EESTI MAAÜLIKOOL

Metsanduse ja inseneeria instituut

XVII MAGISTRANTIDE TEADUSKONVERENTS
INIMENE JA TEHNOLOOGIAD

Tartu 2023

Eesti Maaülikool

Metsanduse ja inseneeria instituut

XVII Magistrantide teaduskonverents INIMENE JA EHNOLOOGIAD

TOIMKOND

esimees: lektor Heiki Lill

liikmed: doktorant Anni Enn magistrant Paul-Artur Timmusk

doktorant Allabn Tooming magistrant Kaie Nellis

sekretär: Galina Kononenko

Sisukord

TOOTMISTEHNIKA 5
Elektrisõidukite keskkonnasäästlikkus Eesti kontekstis 5
Priit Auväärt 5
Komposiitmaterjalidest haagiste kasutus 11
J. Juss 11
Sõiduki raami dimensioneerimisel arvestatavad jõud 17
T. Juuse 17
Mustikaroboti hooldejaama komposiitmaterjalidest raamide massi ja tugevuse võrdlus raami massivähendamiseks 26
M.Kuusik 26
Tuulekoormuse mõju mobiilse päikesepargi raamile 32
A.Pellja 32
Kruvidosaatori kasutatavus täppisväetamisel 36
G.Randla 36
Vesiniku mõju diiselmootori heitgaasidele 40
A.Tarmo 40
Turbulentseks pihustussüüteks kasutatava eelsüütekambri projekteerimine karburaatormootorile 46
P.A. Timmusk, R. Ilves, R. Allmägi 46
Metaani põlemisprotsessi simulatsioon suletud süsteemis 53
A.Truver 53
Põldroboti keskliigendi analüüs 58
K. Valdre 58
ERGONOOMIKA 67
Meditsiinilabori töötajate skeletilihasvaevuste esinemine 67
K. Ilves[1], K. Vahur[1, 2], E. Merisalu[1] 67
Õppejõu töö raskusaste ja energeetiline koormatus tava- ningkaugtöö keskkonnas 74
K. Karu, E. Merisalu, B. Reppo 74

Töövägivalla levimus kiirabiteenistuse töös Prevalence of occupational violence in emergency services 82

Elis Kikka[1], Eda Merisalu[1].....82

Praktiline üldjuhis ergonoomidele ja töökeskkonnaspetsialistidele sundasendite hindamiseks.....90

K. Nellis, M. Reinvee 90

TOOTMISTEHNIKA

Elektrisõidukite keskkonnasäästlikkus Eesti kontekstis

Priit Auväärt

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituuttituut. Tootmistehnika õppekava.

Abstract. Considering the CO2 equivalent in tons, the environmental savings of electric vehicles depends very much on the source of electricity used to charge the vehicle's battery. In Estonia, more than half of the electricity is produced from oil shale, and the following work tries to analyze its impact on the environmental sustainability of an electric vehicle compared to an equivalent vehicle with an internal combustion engine.

Keywords: EV, electric vehicle, CO2/km, environment

SISSEJUHATUS

Eelektriajamiga sõidukid on igal pool meie ümber ja nende turuosa suureneb pidevalt. Eestis moodustavad elektrisõidukid 2022 aastal ca 5% (kaasaarvatud hübriidid) ning inimeste teadvusesse on kuvatud pilt, et elektriajamiga sõiduk on väga keskkonnasäästlik. Selle väite tõestuseks tuuakse mitmeid erinevaid argumente, mis on tihtipeale kontekstist välja võetud ning sageli ei vaadata auto kogu elukaart – valmistamine, kasutus ning utiliseerimine. Eesti kontekstis ei saa me muuta esimest ja viimast osa, kuna meil puudub autotööstus. Küll aga on Eesti mõistes oluline auto kasutus faas ning selle aku laadimiseks kasutatava energia päritolu. Elektrisõiduki keskkonnasäästlikuse seiskukohast on see ka kõige olulisem muutuja ning see kõik sõltub ennekõike sõiduki kasutajast.

Tekstis kasutatavad lühendid:

SPM – sisepõlemismootor

EV - elektriauto

CO2ekv - 1 tonn süsinikdioksiidi või muud kasvuhoonegaasi, mis on ümber arvutatud CO 2 koguseks, kasutades globaalse soojenemise potentsiaali

MATERIAL JA METOODIKA

Auto valmistamise, kasutamise ja ümbertöötluse keskkonnamõju hindamiseks kasutame üldlevinud CO2 ekvivalent tonni näitajat. Võrdluses kasutatakse võimalikult sarnaseid keskklassi autosid ning arvestatakse Eesti keskmise läbisõiduga 13 200 km /aastas [1] Arvutustes ei arvestata muude kuluosadega nagu rehvid, remont ja hooldus, kuna keskmiselt on selles küsimuses mõlemad sõiduki tüübid võrdsed. SPM sõiduk vajab mõnevõrra rohkem hooldust (mootoriõlid), kuid arvestama peab ka tõenäoliselt EV sõiduki eluea jooksul veoaku vahetusega.

Sõiduki valmistamiseks kuluv energia kogus sõltub suuresti sõiduki tüübist ning kasutatavatest materjalidest. Arvutustes tuuakse välja CO2 kulu keskmise sõiduki kohta.

Oluline on märkida, et EV valmistamise CO2 kulumäär jaguneb kaheks- sõiduk ning veoaku tootmine.
SPM sõiduk valmistatakse masstootmises ning erinevatel hinnangutel võib selleks kuluv CO2 kogus olla 7-17 tonni CO2ekv. Arvutustes võetakse näitajaks 10t CO2 mõlema sõidukitüübi puhul. [2] [3]
Akupaki valmistamiseks kulub nii liitiumi (ca 8kg aku kohta) kui ka niklit, koobaltit ja teisi materjale. Erinevates võrdlustes tuuakse samuti välja muutlikke näitajaid, mis on ennekõike põhjustatud asjaolust, et erineva mahtuvusega akude valmistamiseks kulub erinevalt toormaterjali ja seega ka kuluvat energiat. Kuna see näitaja moodustab EV CO2ekv suure osa, võetakse arvutustes näideteks nii väiksem 30kWh veoaku kui ka suurem, 60 kWh aku näitajad. Vastavalt 5t ja 10t CO2.

Vehicle type	Materials production and refining	Li-ion battery modules
XC40 ICE Petrol	14	-
XC40 Recharge Global	17	7
XC40 Recharge EU28	17	7
XC40 Recharge Wind	17	7

Joonis 1. Sõiduki ning akupaki valmistamiseks kuluv CO2 kogus tonnides Volvo XC40 näitel. [2]

Kasutusea jooksul tekkiva CO2ekv leidmine:

SPM- Uuemad sõidukid toodavad 100g/CO2/km, vanemad 200g/CO2/km.
VW Golf 1.5 TSI Co2 määr WLTP järgi on 127g/CO2/km. [6]
Keskmisena võetakse 200g/CO2/km. Eesti tingimustes on palju lühikesi sõite mitte töösooja mootoriga, seetõttu võib arvestada ka uute sõidukite heitmeid suuremaks tegelikust.
Auto eluea (200 000km/15a) jooksul tekitatud CO2 heitmed leitakse valemiga:

$$CO2_{SPM} = 200000km * 200g/CO2/km = 40t$$

Arvutustes jäetakse välja SPM kütuse tootmiseks kuluv energia.

EV- elektriajamiga sõiduk kasutab 100km läbimiseks 18kwh. [7]
Kuna Eestis on pidevalt ka elektriautole ebasobivad külmakraadid ning kasutatakse ka klaaside/istmete soojendusi, võime selle arvu suurendada 25kwh/100km

Auto eluea (200 000km/15a) jooksul tekitatud CO2 heitmed:

E_{kogu} = (200000/100 * 25) = 50 000 kWh

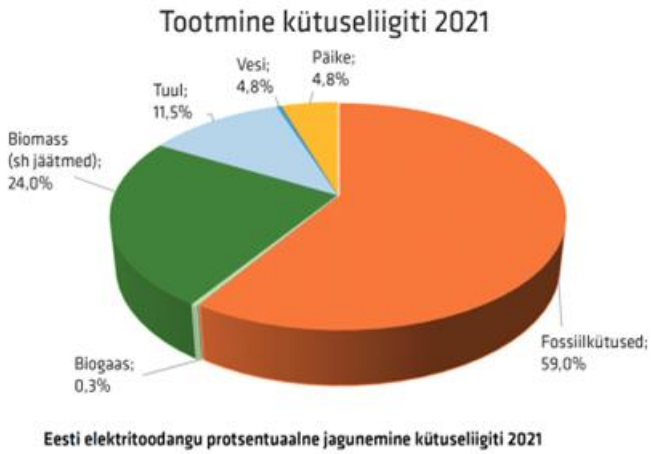
1 kWh tootmiseks kuluv energia leitakse tabel 2 ja 3 abil. Joonis 2 saab järeldada, et üle poole Eestis toodetavast energiast toodetakse siiski põlevkivist. Kuna elektrisõidukeid laetakse pigem öösel, võib ka järeldada, et enamus juhtudel kasutatakse selleks põlevkivist toodetud elektrit.
Põlevkivist 1kwh elektri tootmine paiskab keskkonda aga 1000g/CO2. [Joonis 3]

Kui arvestame, et Eesti on Põhjamaade elektribörsil ning elekter võib tulla ka välisriikide hüdro/tuumaelektrijaamast. Eestis elektri keskmine CO2 sisaldus oli 616,13 gCO2/kWh kohta 2022 aastal. [8]

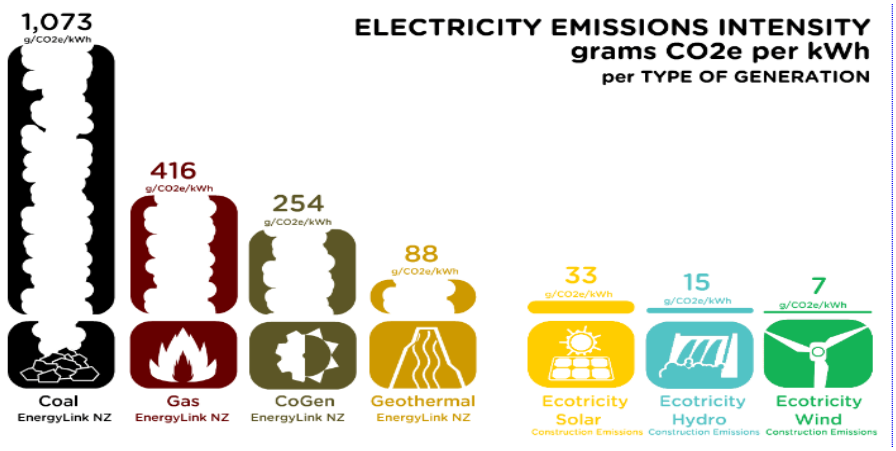
Arvutustes võetakse aluseks 500g/CO2 1kWh kohta.

Seega saame 50 000kWh * 500g = 25t

Arvutustes jäetakse välja laadimiskadude ja põlevkivi ning ja päikese- ja tuule energia tootmiseks kuluvate seadmete tegemiseks kuluv energia.



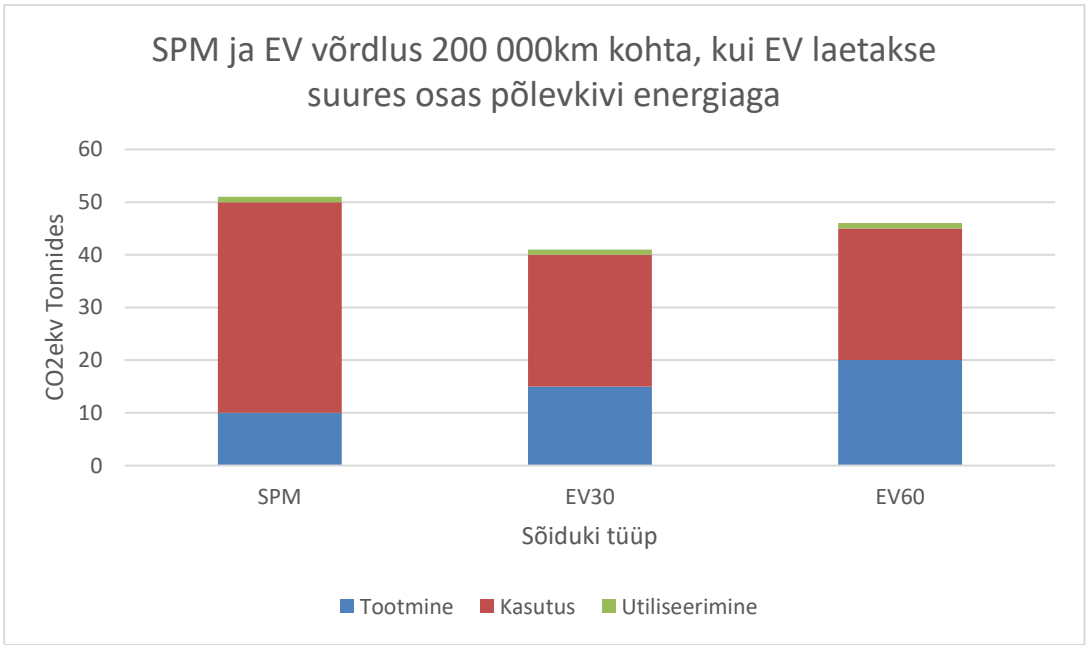
Joonis 2. Elektrienergia allikana lähtutakse Elringi 2022 aasta raportist, kus on välja toodud energiatootmise liigid. [4]

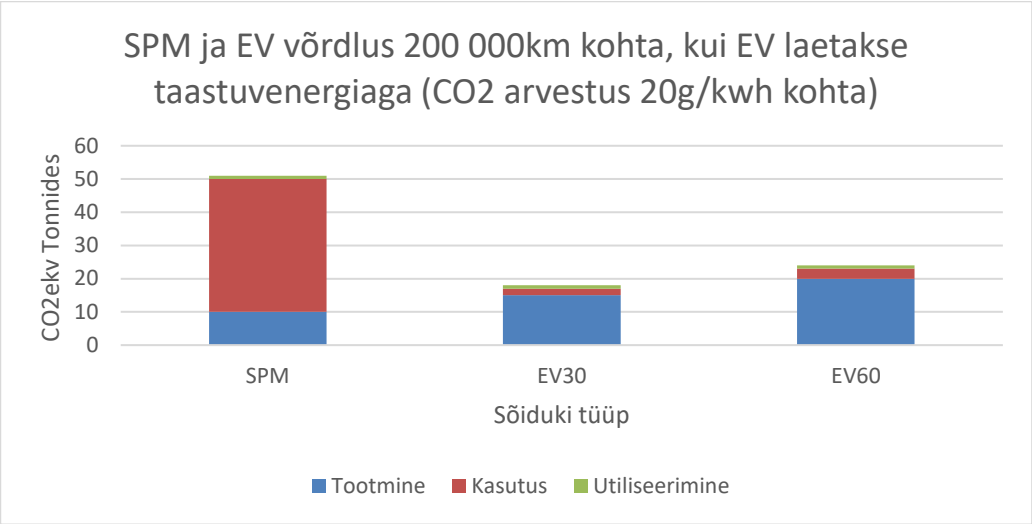


Joonis 3. CO2 kogus kWh kohta sõltuvalt tootmisviisist. [5]

Sõidukite utiliseerimine ning taaskasutamine on SPM ja EV sõidukil võrdsed. Erinevatel andmetel 0,5 – 2t sõiduki kohta. Arvutustes kasutatakse 1t.

TULEMUSED JA ARUTELU

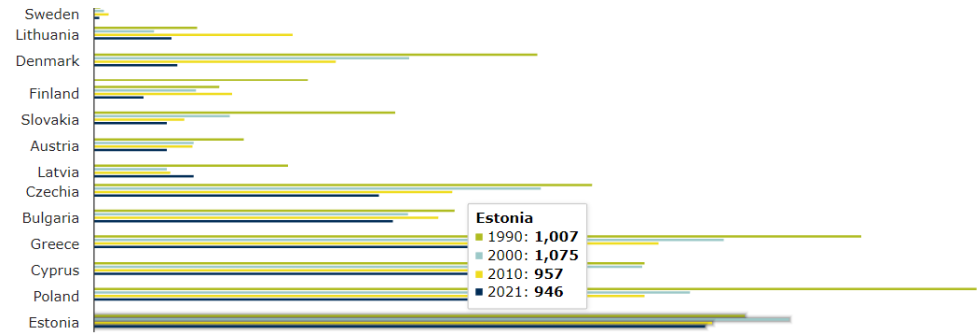




JÄRELDUSED

Arvestades, et enamus elektrienergiat toodetakse Eestis põlevkivienergiast näeme, et SPM ja EV sõidukil on keskkonnale CO2 näol auto mõistliku eluea jooksul (200 000 km) suhteliselt sarnane mõju. Seda eriti just suurema mahtuvusega veoakude korral. Märkimisväärne vahe tekib EV kasuks, kui selle laadimiseks kasutatakse mingisugust roheenergiat. [9] Võrdlusena võib välja tuua Läti ja Soome, kelle kWh CO2 kinnanguline kogus on ca 140g/CO2/kWh kohta. See tähendab, et elektrisõiduki kasutamine muutub keskkonnale sõbralikumaks juba 4-5 aasta jooksul.

Arvutustes kasutati keskmisi läbisõite ja näitajaid ning SPM ja EV võrdlusesse saab kindlasti lisada ka subjektiivsemaid parameetreid nagu sõidumugavus, mahutavus, hind, laadimisvõimalused, igapäevaste sõitude pikkus, käruvedamise võimekus jne... Need aga on suhtelised personaalsed hinnangud ning sõltuvad ennekõike kasutajast. Üldpilti muudab EV laadimiseks kasutatava elektritootmise viis ning kasulikum on väiksema mahtuvusega akude kasutamine.



Joonis 4. CO2 kogus kWh kohta riigiti [99]

Kokkuvõtlikult võib öelda, et EV on keskkonnale ohutum sõiduk kui SPM, aga kõik sõltub kasutajast ning tema sõiduharjumustest. Roheenergia on hea ja ohutu, kuid täpsema tulemuse saamiseks peab arvestama ka kõikide tuulikute ja päikespaneelide valmisel tekkiva CO2 kogusega ning seetõttu üldpilt jälle muutub. Sõidukite elektrifitseerimisega tehtavad mõnikord rutakad ja järelemõtlematud otsused ei vähenda otseselt kuidagi CO2 koguseid, vaid see on üks viis ja vahend saavutamaks puhtamat ja paremat elukeskkonda.
Sellest tulenevalt võib välja tuua elektrisõiduki tõelise keskkonnasäästlikuse aspekti- ta hajutab heitgaaside reostuse suurele maa alale, eemale suurtest inimmassidest. Seeläbi pole ühel väiksel maa alal reostuse kontsentratsioon liiga suur- inimesed on tervemad ja loodus samuti.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] https://www.transpordiamet.ee/statistika
[2] https://www.volvocars.com/images/v/-/media/project/contentplatform/data/media/my23/xc40-electric-light/volvo-cars-LCA-report-xc40.pdf
[3] https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/64183
[4] https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat/6-taastuvenergeetika/63-taastuvenergia-toomisvoimalused-eestis
[5] https://ecotricity.co.nz/wp-content/uploads/2021/06/210615-ElectricityEmissionsIntensityUPDATE.gif
[6] https://www.volkswagen.ee/idhub/content/dam/onehub_pkw/importers/lv/price-lists/ee/golf/Golf_01_18_hinnakiri_EE.pdf
[7] https://www.volkswagen.ie/idhub/content/dam/onehub_pkw/importers/ie/models/product-guides/my23/ID.4_MY23.pdf
[8] https://elering.ee/sites/default/files/2022-06/Eesti%202021%20a%20segaj%C3%A4%C3%A4k%20ja%20metoodika.pdf
[9] https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-12/#tab-chart_2

Komposiitmaterjalidest haagiste kasutus

J. Juss

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. Lately concerns about saving the environment has risen, also fuel prices have made transportation more expensive. With reducing the dry weight of trailers, there is possible to increase the efficiency of transportation. Less mass to be pulled by trucks means less spent fuel, which is better for our environment and pulls down transportation expenses. The best materials to use for reducing trailers masses are composites, which are lightweight and stronger than steel. Composite materials are in use in passenger car trailers and truck trailers, some of which are not so cost effective.

Keywords: composite materials, trailer, transportation, dry weight.

SISSEJUHATUS

Viimasel ajal tõusnud mootorikütuste hinnad on kasvama pannud transpordikulud, mille tõus omakorda mõjutab toodete lõpptarbijat. Transpordiettevõtete kütustele tehtavad kulutused on vähendanud ettevõtete kasumeid ja sõidukite tasuvusperioode. Üheks võimalikuks lahenduseks vähendada kütusekulusid ning seeläbi keskkonda säilitada on vähendada haagise tühimassi, tänu millele suureneb haagise lubatav kandevõime, mis omakorda vähendab transportsõitude arvu.

Euroopa Liidus on üldiselt sõiduauto haagise suurimaks lubatud tegelikuks massiks 3,5 t, veoautorongi suurimaks lubatud tegelikuks massiks 44 t, mis tähendab, et võib tekkida juhus, kus mahuliselt mahub koormasse veel kaupa, kuid suurim lubatud mass on juba täis, seega tuleb teha veel üks sõit. Haagise tühimassi vähendamiseks on võimalik kasutusele võtta kergemad materjalid, kuid materjalide valikul on tähtis, et ei tehtaks kompromisse turvalisusega. Headeks materjalideks siinkohal on komposiitmaterjalid, mida kasutatakse sõidukites massi vähendamiseks. Komposiitmaterjalid koosnevad kahest või enamast koostisosast, mis kokkupanduna annavad piisava jäikuse ja tugevuse.

MATERIAL JA METOODIKA

Töös teostati uuring komposiitmaterjalide kasutuse kohta haagistes. Uuringut alustati sõiduauto haagiste osas, kus uuriti, milliseid võimalusi on turul nii platvormhaagise kui ka haagiselamu puhul. Järgmisena uuriti veoautode haagiste komposiitmaterjalide kasutuskohti. Just veoauto haagistel, mis on suurema tühimassiga saadakse suurim massi vähendamine. Viimaseks uuriti veel töös olevaid komposiitmaterjalide lahendusi haagiste tühimassi vähendamiseks

TULEMUSED JA ARUTELU

2022 märtsis avalikustas *Hapert Trailers* komposiitpõrandaga platvormhaagise (Joonis 1). Tootja pakub hetkel komposiitpõrandat lisavalikuna, kuid plaanib kõik puitpõrandad komposiidi vastu välja vahetada. Probleemiks on puidu mass, vineeri ruutmeetri mass on 10…15 kg, komposiitpõrandal aga 4…6 kg. Uus põrand koosneb klaaskiust ja polüpropüleenist väliskihtidest ja kärgstruktuuriga sisekihtidest, mis kokkupanduna moodustab ühe tugeva tervikpaneeli. Komposiitpõrandat on testitud tavakasutusel tekkivatele teguritele, näiteks kokkupõrked, tõmme, lõige, kulumine ja klimaatilised tegurid. Esialgu haagist ostes on see mõni protsent kulukam, kuid haagise põrand peab paremini vastu kui vineerpõrand, lisaks saab kergema haagise pealt hoida kokku sõidukuludelt, sõltuvalt haagise tüübist kuni 250 kg. Põranda pikk eluiga teeb selle soodsaimaks lahenduseks ning oma eluea lõpus saab seda 100 % taaskäidelda [1].

Joonis 1. *Hapert Trailers*i komposiitpõrandaga platvormhaagis. Allikas: [1]

Kergemassiliste *Earth Traveler* haagiste (Joonis 2) konstruktsioonis kasutatakse komposiitmaterjale peaaegu terve haagise puhul. Süsinikkiust monokokk-konstruktsiooniga väikeste haagiselamute massid algavad 113 kg-st, valikus on veel 136 kg ja klaaskiust 181 kg tühimassiga veetilga kujulised haagiselamud [2]. *CR-1 Carbon* on 10 m pikk luksushaagiselamu (Joonis 3), mis kasutab süsinikkiudu seintel ja katusel. Süsinikkiu kasutamise tulemusena on haagiselamu mass 2,7 t, mida on poole vähem kui kasutades traditsioonilisi materjale. Väike mass mõjutab haagise juhitavust ning veelgi enam vähendab vedava auto kütusekulu, lisaks saab haagist vedada sõiduautoga. Haagise seinte ja katuse liitekohtades ei ole kasutatud kinnitusvahendeid, vaid on koostatud ühe jäiga tervikuna. Haagiselamu hind võib jääda vahemikku 160 000…770 000 USD [3]. Töö kirjutamise ajal antud haagiselamut veel osta ei saa.

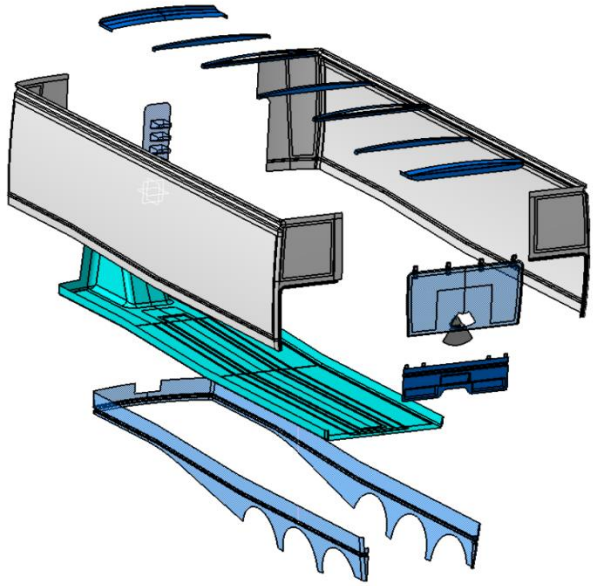
Joonis 2. Earth Traveler haagiselamu. Allikas: [2]

Joonis 3. *CR-1 Carbon* luksushaagiselamu. Allikas: [3]

HollandComposites on tootnud erinevaid poolhaagiseid, kõigil komposiidist raam, küljed ja põrand. Kasutatud on epoksiidvaiku, süsinik- või klaaskiudu. Komposiitmaterjalidest haagise mass on 6 t, võrreldaval alumiiniumhaagisel 8…9 t ning terashaagisel veelgi suurem mass. Väiksem mass hoiab kokku kütusekuludelt ja vähendab heitgaaside hulka. Tühimassi vähenedes, suureneb haagise lubatud kandevõime. Vahe võib olla kuni 15 % rohkem veost ühe sõidu kohta, mis omakorda tähendab 15 % vähem veoautosid. Veofirmale tähendab see kuni 20 % kokkuhoidu haagiste, kindlustuse, töötundide ning kütuse arvelt. Komposiitmaterjalid on korrosiooni vabad ning kestavad kauem kui teras. Lisaks oma heale soojusisolatsioonile on neid otstarbekas kasutada külmikhaagistes [4].

ACS Australia arendas teravilja veoks süsinikkiust haagise (Joonis 4), mille konstruktsioonis kasutatakse süsinikkiududega tugevdatud vinüülester komposiiti. Kasti,

raami, uste ja kasutatud liitevahendite disain tõi 1800 kg väiksema massi kui terasraamiga sarnane haagis. Lisaks massi vähendamisele, suurendati ka kasti mõõtmeid 18 %. Austraalias on teravilja transpordiks tehtavad kulutused peaaegu pool kõikidest põllumajanduses tehtavatest kulutustest, seega väiksema tühimassiga haagis aitab vähendada transpordikulusid [5].



Joonis 4. Süsinikkiust *ACS Australia* teravilja haagise plahvatuslik vaade. Allikas: [5]

Uurimuste tulemusena järeldas *Comopositttrailer*, et kõikide teraskomponentide vahetamine komposiitmaterjalide vastu pole kuluefektiivne ning 1994. aastal ehitati kuus hübriidraamiga poolhaagist, kus kasutati konstruktsioonis korraga tavapärast terast ja komposiitmaterjale. 10 aastat hiljem olid haagised läbinud miljoneid kilomeetreid, ning igal aastal oli vaja metallosasid keevitada. *Compositttrailer* tegi katsetusi järk-järguliselt asendada terasdetaile komposiitmaterjalide vastu ning jõuti järeldusele, et see pole võimalik ja pigem tuleb panustada täiskomposiitraamile. Komposiitraami eelised avalduvad korrosioonikindluses väiksemas massis, kuid kliente peletab komposiitraamiga haagise kõrge hind [6]. 2003 hakkas *Compositttrailer*i patentide alusel komposiithaagiseid tootma Ameerikas *Martin Marietta Composites Inc.*, kuid 2021. aasta aprillis lõpetati haagiste tootmine keerulise majandusliku olukorra ja vähese nõudluse tõttu [7].

*Wabash National*i kõva seinaga poolhaagistes kasutatavad vormitud komposiitpaneelid parendavad soojusisolatsiooni 28 % ning samal ajal vähendavad tühimassi 20 %. Komposiitpaneelid on niiskuskindlad, suurema torke- ja kulumiskindlusega. Kuna paneelid ei ima vett, ei muutu nende mass ja need ei paisu. Robustsemad ja kergemad haagised vähendavad kulutusi ja toodavad paremini kasumit, millest võidab ka lõpptarbija [8].

2014. aastal avaldas *Walmart* kergemassilise idee autorongi (Joonis 5), mille eesmärk on vähendada autorongi tühimassi. Tavalisest *Walmart*i kasutatavast autoringist 1360 kg väiksema tühimassiga autorongiga sooviti demonstreerida süsinikkiu kasutamist veduki ja

haagise massi vähendamiseks. Ideeautorongi eesmärk ei olnud veoseid vedada. Haagise terve katus ja sein on tehtud 16,2 m pikkadest süsinikkiud paneelidest. Haagise montaaž oli väheste paneelide arvu tõttu kiirem ning mehaanilisi kinnitusvahendeid asendasid suuresti liimid [9].

Joonis 5. *Walmart*i ideeveok koos -haagisega. Allikas: [10]

Ameerika Ühendriikides 2009. aastal loodud *SuperTruck* programmi eesmärgiks oli anda veokitootjatele võimalus luua 50 % kütusesäästlikumad veokid. *Wabash International* arendas programmi raames kergemassilise haagise, mis vähendas tühimassi 692 kg. Loodud haagis kasutas alumiiniumraami, komposiitmaterjalist lehtvedrusid, komposiidist seinu ning aerodünaamika parendamiseks seelikut. *SuperTruck II* programmi eesmärgiks on luua veoki ja haagise 100 % suurem efektiivsus võrreldes 2009. aasta *SuperTruck*iga. *SuperTruck II* raames on *Daimler Trucks North America* ja *Volvo Technology of America* eesmärkideks arendada ja demonstreerida kergemassilisi veoki ja haagise kombinatsiooni [11].

JÄRELDUSED

Uuringu eesmärgiks oli uurida komposiitmaterjalide kasutusi erinevates haagise-tüüpides, alates sõiduautohaagistest kuni töösolevate veoauto haagisteni. Uuringust selgus, et komposiitmaterjale kasutatakse haagistes küllaldaselt, kuid komposiitmaterjalidest raami peaaegu et ei kasutatagi. Põhjuseks kõrgem hind, mida klient ei ole nõus maksma. Küll aga kasutatakse komposiitmaterjale kohtades, mis on suure kulumisega ja ka tavapärase vineeri asemel just oma vastupidavuse, korrosioonikindluse ja väiksema massi tõttu.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] HAPERT TRAILERS, „A trailer is stronger yet lighter?," [Võrgumaterjal]. Available: https://hapert.com/en/composite-floor. [Kasutatud 09 04 2023].

[2] Earth Traveler Teardrop Trailers, „STARTING AT 250 POUNDS," [Võrgumaterjal]. Available: https://www.earthtravelerteardroptrailers.com/. [Kasutatud 09 04 2023].

[3] CampRest, „CR-1 Carbon - a trailer that has never been before," [Võrgumaterjal]. Available: https://camprest.com/en/blog/motorhome-caravan-news/cr-1-carbon-a-trailer-that-has-never-been-before. [Kasutatud 09 04 2023].

[4] Holland Composites, „Composite trailer," [Võrgumaterjal]. Available: https://www.hollandcomposites.nl/en/portfolio/composite-trailer/. [Kasutatud 09 04 2023].

[5] ACS Australia, „Carbon fibre tipper truck trailer desgin," [Võrgumaterjal]. Available: https://acs-aus.com/our-work/carbon-fibre-tipper-truck-trailer-design/. [Kasutatud 09 04 2023].

[6] J. Verhaeghe, „Introducing an affordable composite trailer to a conservative market," *Reinforced Plastics,* 31 05 2006.

[7] Winston-Salem Journal, „Martin Marietta Composites Inc. is shutting down Sparta plant," 16 04 2021.

[8] L. Deal, „Why product knowledge is essential when selling composite trailers," Truck parts and service, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.truckpartsandservice.com/trucks-trailers/trailers/article/14991710/what-you-need-to-know-about-selling-composite-trailers. [Kasutatud 09 04 2023].

[9] R. Gehm, „Carbon-fiber concept trailer from Great Dane cuts weight by 4000 lb," SAE International, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.sae.org/news/2014/09/carbon-fiber-concept-trailer-from-great-dane-cuts-weight-by-4000-lb. [Kasutatud 09 04 2023].

[10] Walmart, „Walmart Debuts Futuristic Truck," [Võrgumaterjal]. Available: https://corporate.walmart.com/newsroom/2014/03/26/walmart-debuts-futuristic-truck. [Kasutatud 09 04 2023].

[11] G. Gardiner, „Recycled carbon fiber for lower-priced lightweight in heavy trucks?," *CompositesWorld.*

Sõiduki raami dimensioneerimisel arvestatavad jõud

T. Juuse

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. A vehicle frame is the main supporting structure of a motor vehicle to which all other components are attached. It must deal with static and dynamic loads, without undue deflection or distortion. The purpose of this article is to find the most optimal way to apply the load cases for dimensioning the vehicles frame. Also, the formulas were found to be applied in each load case. It turned out that the most important factors are the weight of the vehicle itself, the height of the center of mass, the width of the track and the wheelbase. First calculations are made using the bending stress formula to dimension initial cross-section of cross and longitudinal beams. Once the cross and longitudinal beams are selected, a frame model is designed with 3D design software and analyzed using the Finite Element Method (FEM). FEM simulations use forces that are found using the formulas presented in this paper. The simulated load cases are compression, combined compression and torsion, also longitudinal and lateral loading. They provide sufficient insight into the behavior of the frame. Coefficients developed over the years are used to ensure the safety of the frame.

Märksõnad: Computer aided design, finite element method (FEM), bending, torsion, longitudinal loading, lateral loading.

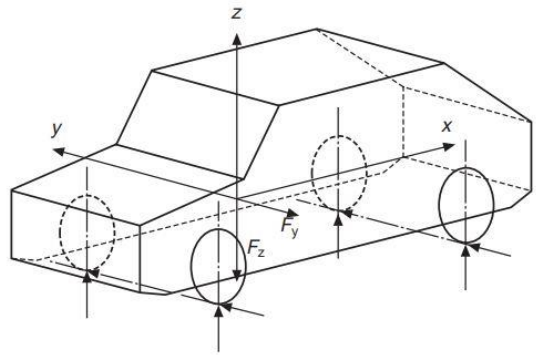
SISSEJUHATUS

Sõiduki raam, tuntud ka kui šassii, on sõiduki kõige olulisem põhistruktuur, kuhu kinnituvad kõik agregaadid ja sõlmed. See on võrreldav organismi skeletiga. Raami põhifunktsiooniks on toetada keret, agregaate, sõlmi ja komponente. Samuti peab see vastu võtma staatilisi ja dünaamilisi koormusi ilma liigselt läbi paindumata ning väändumata. Raam peab taluma kere, reisijate ja lasti massi, vertikaalset koormust ja väänet ebatasasel teel. Samuti teeoludest, külgtuulest ja sõiduki juhtimisest põhjustatud põiksuunalist jõudu, mootori ning käigukasti tekitatud pöördemomenti, pikisuunalisi jõudusid startimisel ja kiirendamisel ning kokkusurumist pidurdamisel. Lisaks ka kokkupõrgetest tekitatud äkilisi lööke[1].

Ükski matemaatiline mudel ei kajasta täpselt tegelikku struktuuri. Isegi kõige üksikasjalikumal lõplike elementide mudelil on puuduseid. Seetõttu on oluline, et simulatsioonide tegemisel hinnatakse seda, mida saab reaalseks pidada, välistades seejuures parameetreid, mida ei saa kindlaks määrata[2]. Käesolevas artiklis selgitatakse välja, milliseid jõudusid tuleb arvestada sõiduki raami matemaatilise mudeli analüüsimisel ja leitakse kõige olulisemad mõjurid. Seejärel leitakse, milliseid koormusjuhte on otstarbekas raami analüüsimisel kasutada.

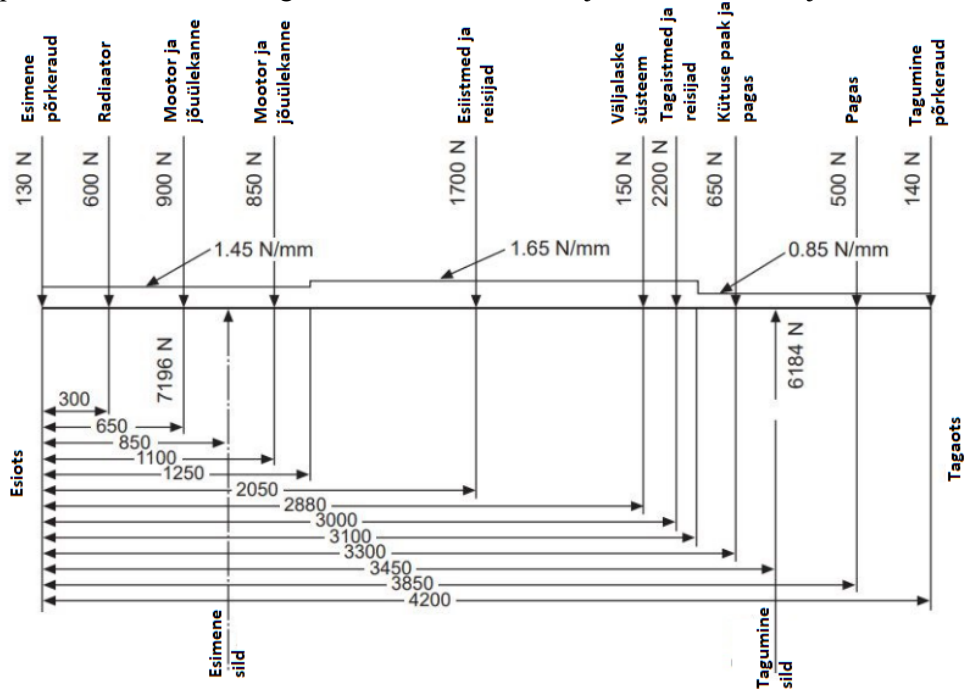
MATERJAL JA METOODIKA

Painet saab liigitada staatilisteks ja dünaamilisteks. Raamile mõjuv paindemoment on staatiline siis, kui sõiduk seisab paigal või liigub tasasel teel ühtlase kiirusega. Paindemoment on vertikaaltasandil ehk x–z tasapinnal agregaatide ja sõlmede mass tõttu tekitatud moment piki sõiduki raami, mis põhjustavad paindumist y-telje ümber (joonis 1) [2].



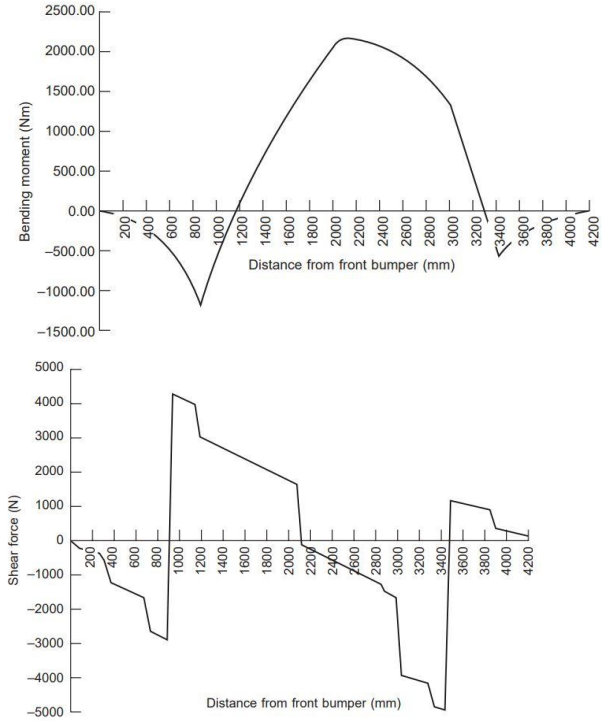
Joonis 1. Sõiduki koormusjuhtum paindele. Allikas: [2].

Tüüpiline keskmise suurusega sõiduautode koormuse jaotus on näidatud joonisel 2.



Joonis 2. Sõiduki koormusdiagramm. Allikas: [2].

Koormusdiagrammi järgi saab koostada paindemomendi ja nihkejõu epüürid (joonis 3).



Joonis 3. Sõiduki raamile mõjuva paindemomendi ja nihkejõu epüürid. Allikas: [2].

Paindemoment on dünaamiline siis, kui sõiduk sõidab ebatasasel teel, olenemata sellest, kas kiirus on ühtlane või mitte. Näiteks võib sõiduk sõita üle kühmu sellise kiirusega, et rattad tõusevad õhku. Maapinnale naasva sõiduki kokkupõrget pehmendab vedrustus, kuid põhjustab paratamatult koormuse märkimisväärse suurenemise. Tabelis 1 on toodud dünaamilise paindemomendi kordajad staatilisest momendist. Sõidukitootjate kogemuse põhjal võetakse dünaamiline paindemoment maanteesõidukitel võrdseks 2,5 – 3 kordse staatilise momendiga. (Pawlowski, 1969) [4].

Tabel 1. Dünaamilise paindemomendi kordajad staatilisest momendist Allikas: [4]

	Üldkasutatav	**Erz (1957)**	**Pawlowsky (1969)**
Dünaamiline tegur	3	2	2,5
Lisa ohutustegur	1,5		1,4-1,6 (pingekonsentratsiooniko htadest väljaspool) 1,5-2,0 (mootori ja vedrustuse kinnituskohad)

Dünaamilise paindemomendi koormusjuht on projekteerimise faasis kõige lihtsam ja kiirem viis sobiva ristlõikega raami pikitalade leidmiseks. Esialgsed arvutused tehakse traditsiooniliselt käsitsi painepinge valemi järgi:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} \qquad \text{[3, lk.44]} \qquad (1)$$

kus σ_b – suurim paindepinge (N/mm^2)
Mb – paindemoment (Nm);
W – telgtugevusmoment (cm^3).

Painet ja väänet kombineeritult võib lugeda raami dimensioneerimisel kõige tähtsamaks koormusjuhuks. Praktikas ei saa väändemoment eksisteerida ilma paindeta, kuna gravitatsioonijõud on alati olemas. Seetõttu tuleb võimalikult reaalse tulemuse saamiseks neid kahte juhtumit koos vaadelda [4]. Näiteks on vasaku esiratta vedrustus üle kühmu sõites põhjas ja seetõttu tõuseb parem esimene ratas maast lahti. Kogu esisilla koormus on nüüd vasakul esirattal. Selle tulemusel pole jõudude tasakaal x-z (joonis 1) tasapinnal enam paigas. Parema tagumise ratta reaktsioonijõud suureneb, stabiliseerides nii struktuuri. Nii tekitatud pöördemoment sõltub esi- ja tagaosa rullumisjäikusest vedrustustele ja sõiduki kere väändejäikusele. Need toimivad kolme järjestikuse torsioonvedruna, seega saadakse üldine väändejäikus $K_{ÜLD}$ järgmiselt:

$$\frac{1}{K_{ÜLD}} = \frac{1}{K_{ESI}} + \frac{1}{K_{KERE}} + \frac{1}{K_{TAGA}} \qquad \text{[4, lk. 17]} \qquad (2)$$

kus K_{ESI} – esivedrustuse rullumisjäikus;
K_{TAGA} – tagavedrustuse rullumisjäikus;
K_{KERE} – kere väändejäikus.

Sõiduki kere on tavaliselt palju jäigem kui esi- ja tagavedrustus. Seega on selle panus üldisesse väändumisesse sageli tühine. Sellistel juhtudel on termin $1/K_{KERE}$ väike ja selle võib ülaltoodust võrrandist välja jätta. Kasutades joonisel 6 toodud tähiseid saadakse väändemoment T, mis on tekitatud kühmu kõrgusest *H*:

$$T = K_{ÜLD} \cdot \theta \qquad \text{[4, lk. 17]} \qquad (3)$$

Kus θ – üldine väändumine.

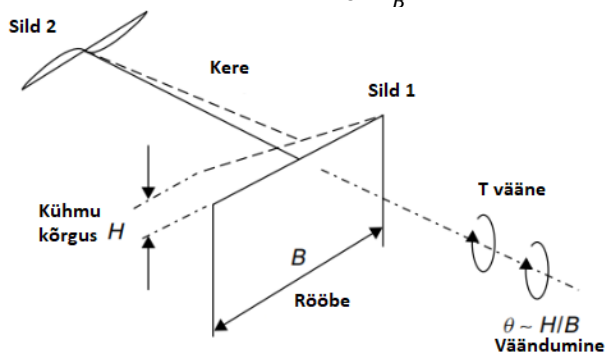
Ja vääne sillas 1:

$$\theta \approx \frac{H}{B} \qquad \text{[4, lk. 17]} \qquad (4)$$

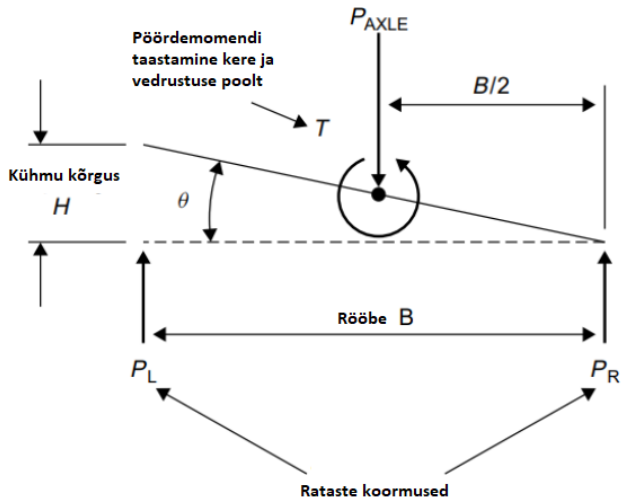
Kus H – kühmu kõrgus (m);
B – rööpme laius (m).

Seega:

$$T = K_{ÜLD}\frac{H}{B} \qquad \text{[4, lk. 17]} \qquad (5)$$



Joonis 6. Kühmu kõrgusest *H* tekitatud väändemoment. Allikas: [4].



Joonis 7. Jõud ja momendid sillal 1. Allikas: [4].

Kasutades joonisel 7 olevaid tähistusi, saadakse:
Vertikaalne jõud tasakaalu jaoks 1. teljel:

$$P_L + P_R = P_{AXLE} \qquad [4, \text{lk. } 18]$$

Ehk

$$P_L = P_{AXLE} - P_R \qquad [4, \text{lk. } 18] \qquad (6)$$

kus P_{AXLE} – teljekoormus;
P_L – vasakpoolse ratta reaktsioon;
P_R – parempoolse ratta reaktsioon.

Momendi tasakaal:

$$T = (P_L - P_R)\frac{B}{2} \qquad [4, \text{lk. } 18] \qquad (7)$$

Vahetades välja võrrandi (6) :

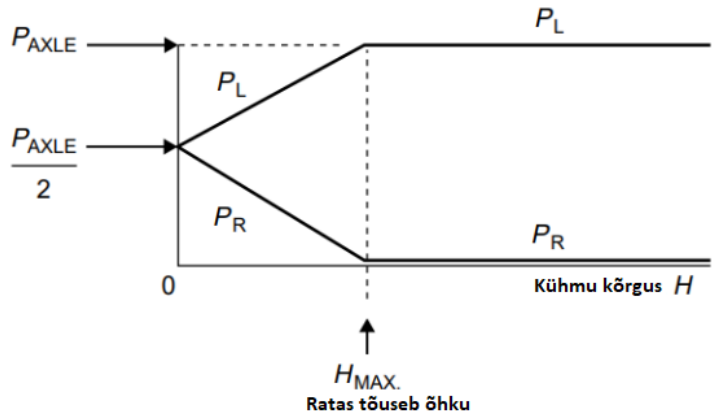
$$T = (P_{AXLE} - 2P_R)\frac{B}{2} \qquad [4, \text{lk. } 18] \qquad (8a)$$

$$P_R = \frac{P_{AXLE}}{2} - \left(\frac{T}{B}\right) \qquad [4, \text{lk. } 18] \qquad (8b)$$

Teise poole sarnasus:

$$P_L = \frac{P_{AXLE}}{2} + \left(\frac{T}{B}\right) \qquad [4, \text{lk. } 18] \qquad (8c)$$

Rattakoormused käituvad joonisel 8 näidatud viisil.



Joonis 8. Staatiline ratta reaktsioon kühmule vasaku ratta all. Allikas: [4].

Väändemoment jõuab piirini siis, kui parem ratas õhku tõuseb, st kui $P_R = 0$ (ja seega $P_L = P_{AXLE}$).

Alati tõuseb vähem koormatud telje ratas:

$$T_{MAX.} = P_{AXLE}\frac{B}{2} \qquad \text{[4, lk. 19]} \qquad (9)$$

kus P_{AXLE} – vähem koormatud silla koormus.

Seega võib maksimaalse pöördemomendi T_{MAX} sellel piirjuhtumil saada valemist (5) ja (9):

$$T_{MAX.} = K_{ÜLD}\frac{H_{MAX}}{B} = P_{AXLE}\frac{B}{2} \quad \text{[4, lk. 19]} \qquad (10)$$

kus H_{MAX} – kühmu kõrgus, mis põhjustab ratta õhkutõusmise.

Seega:

$$H_{MAX} = \frac{P_{AXLE}\cdot B^2}{2\cdot K_{ÜLD}} \qquad \text{[4, lk. 19]} \qquad (11)$$

Erinevad autotootjad on pakkunud väändejuhtumi jaoks erinevaid H väärtusi. Mõned nendest väärtustest on toodud tabelis 2. Pawlowski (1969) soovitas rakendada lisa dünaamilist tegurit, kui sõidukit kasutatakse rasketes tingimustes (nt. auklik jää) [4].

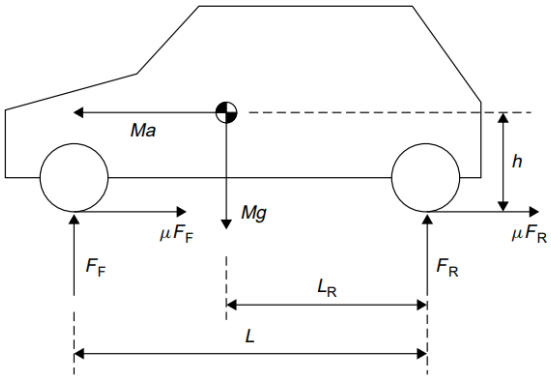
Tabel 2. Väändemomendi kühmu kõrgus. Allikas: [4]

	Pawlowsky (1969)	**Erz (1957)**
Kühmu kõrgus	0,2 m	0,2 m
Inertsiaalne tegur	1,3	
Inertsiaalne tegur (maastikul)	1,8	

Kiirendamisel ja pidurdamisel tekivad pikisuunalised jõud (x-telje sihis). On leitud, et pikisuunalised kiirendused on väiksemad kui pidurduskoormused, välja arvatud pukseerimisel. Siis kasutatakse koefitsienti 1,5, sest tulemuseks võib olla suur vertikaalne/vastandkoormus jõuülekande kinnitusdetailidele. Tabelis 3 on toodud erinevate autotootjate soovitatud üldised pidurduskoormustegurid. Kuna pidurdusjõud maapinnaga kokkupuutekohtades on nihkes vertikaalse vahemaa h võrra sõiduki massikeskmest, toimub raskuse ülekandumine tagaratastelt esiratastele (joonis 9) [4].

Tabel 3. Koormustegurid pidurdamiseks Allikas: [4]

	Pawlowsky (1969)	**Carnfield tests (Tidbury 1966)**	**Garrett (1953)**
Sõuduauto	1,1 g	1,84 g	1,75 g
Veok	0,7 g		



Joonis 9. Koormuse ülekandumine pidurdamisel. Allikas: [4].

Kasutades joonisel 9 olevat tähistusi, leitakse pikijõu tasakaalu võrrand:

$$Ma = \mu Mg = \mu F_F + \mu F_R \quad \text{[4, lk. 21]} \quad (12)$$

kus μ - rehvi hõõrdekoefitsent;
M - sõiduki mass (N);
a - aeglustumine pidurdamisel;
Mg - sõiduki kaal (kg).

Momendi tasakaaluvõrrand tagarataste kontaktpunktides:

$$F_F L = MgL_R + Mah \quad \text{[4, lk. 21]} \quad (13)$$

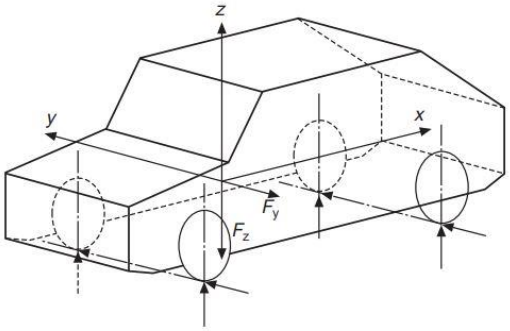
Seega esisilla vertikaalne reaktsioon F_F:

$$F_F = \frac{Mg(L_R + \mu h)}{L} \quad \text{[4, lk. 21]} \quad (14)$$

Ja tagasilla vertikaalne reaktsioon F_R:

$$F_R = \frac{Mg(L_F + \mu h)}{L} \quad \text{[4, lk. 21]} \quad (15)$$

Külgkoormus ilmneb siis, kui sõidukiga võetakse kurvi või kui see libiseb vastu äärekivi, st koormused y-telje sihis (joonis 10) [2].



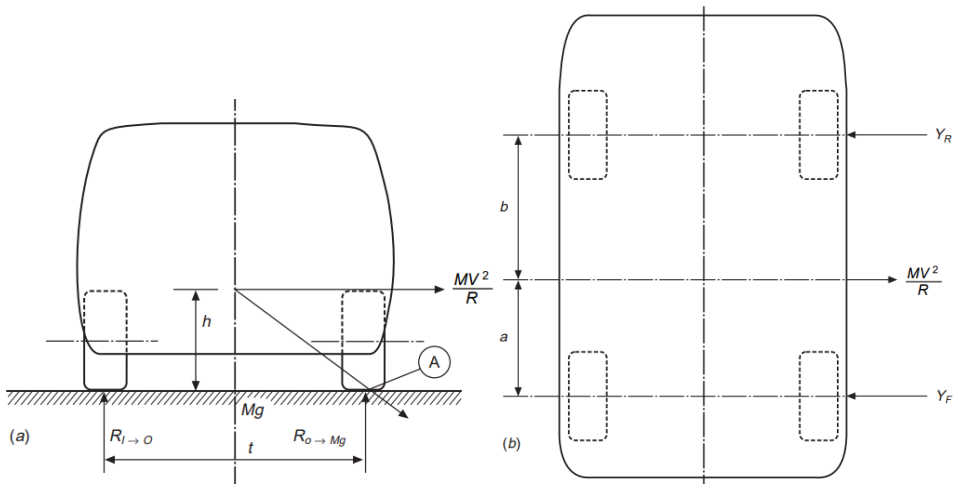
Joonis 10. Sõiduki koormusjuhtum külgjõule. Allikas: [2].

Kurvides tekib külgkoormus rehvi ja maapinnaga kokkupuute kohtades, mis on tasakaalustatud tsentrifugaaljõu $\frac{MV^2}{R}$ abil. M on sõiduki mass, *V* on edasiliikumise kiirus ja *R* on kurvi raadius (joonis 11). Halvim võimalik olukord tekib siis, kui ratta reaktsioon kurvi siseküljel langeb nulli, st siis, kui sõiduk hakkab ümber minema. Ümberminekule lähenev seisund on näidatud joonisel 11 ja sõltub sõiduki raskuskeskme kõrgusest ning rööpme laiusest. Sellel tingimusel kandub tsentrifugaaljõud ja sõiduki mass kurvi välimiste rataste kontaktalale (A joonisel 11) [2]:

$$\frac{MV^2}{R} \cdot h = Mg\frac{t}{2} \qquad \text{[2, lk. 130]} \qquad (16)$$

Seega külgkiirendus:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{gt}{2h} \qquad \text{[2, lk. 130]} \qquad (17)$$



Joonis 11. Sõiduki maksimaalne koormusjuhtum külgjõule. Allikas: [2].

Külgjõud raskuskeskmes:

$$\frac{MV^2}{R} = \frac{Mgt}{2h} \qquad \text{[2, lk. 131]} \qquad (18)$$

Külgjõud esirehvidel:

$$Y_F = \frac{Mgtb}{2h(a+b)} \quad \text{[2, lk. 131]} \quad (19)$$

Külgjõud tagarehvidel:

$$Y_R = \frac{Mgta}{2h(a+b)} \quad \text{[2, lk. 131]} \quad (20)$$

Eelneva kahe valemi järgi saab määrata, kui suure tõenäosusega sõiduk kurvis ümber paiskub [5].

TULEMUSED JA ARUTELU

Selgus, et kõige olulisemad faktorid on sõiduki enda mass, massikeskme kõrgus, rööpme laius ning teljevahe. Kõigepealt leitakse sõidukile mõjuvad staatilised jõud. See tähendab, et kõik kasutatavad agregaadid, sõlmed ja komponendid kaalutakse ning leitakse nende massikese raami suhtes. Väljatöötatud kordajaid rakendades leitakse staatilistest jõududest dünaamilised jõud. Siis tehakse arvutused, kasutades paindepinge valemit, käsitsi paindele ning leitakse esialgne risti- ja pikitalade ristlõige. Kui risti- ja pikitalad on valitud, siis projekteeritakse 3D projekteerimistarkvaraga raami mudel ning see analüüsitakse lõplike elementide meetodil (LEM). LEM simulatsioonidel kasutatakse jõudusid, mis leitakse käesolevas artiklis välja toodud valemite abil. Simuleeritavad koormusjuhtumid on paine, paine ja vääne kombineeritult ning piki- ja külgkoormus. Need annavad piisava ülevaate raami käitumisest. Kasutatakse aastate jooksul välja töötatud koefitsiente, et tagada raami ohutus.

JÄRELDUSED

Käesolevas artiklis leiti, millised koormusjuhtumid on optimaalsed ja millised jõud on vaja leida sõiduki raami dimensioneerimiseks. Need annavad piisavalt hea ülevaate raami käitumise kohta erinevatel ekspluatatsiooni olukordades. Samuti on see indikaatoriks, kui suur on tõenäosus sõiduki ümberminekul kurvis ning kui palju tõuseb kiirendades või langeb pidurdamisel sõiduki nina.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] R. K. Rajput “A Text Book of Automobile Engineering (Online)” [Online]. Available: A Text Book of Automobile Engineering - R. K. Rajput - Google Books [Accessed 2.02.2023].

[2] J. Happian-Smith, “An Introduction to Modern Vehicle Design (Online)” [Online]. Available: Introduction To Modern Vehicle Design - Julian Happian-Smith.pdf (ceb.ac.in) [Accessed 2.02.2023].

[3] Mehaanikainseneri käsiraamat, TTÜ kirjastus, Tallinn 2021, 482 lk.

[4] J. C. Brown, A. J. Robertson (Cranfield University, UK) S. T. Serpento)General Motors Corporation, USA) “Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals (Online)” [Online]. Available: Motor Vehicle Structures (Automotive Engineering) (free.fr) [Accessed 2.02.2023].

[5] Microsoft PowerPoint - 3-Automotive_chassis-design-v2 (iitd.ac.in)

Mustikaroboti hooldejaama komposiitmaterjalidest raamide massi ja tugevuse võrdlus raami massivähendamiseks

M.Kuusik

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. In this article researched frame of robot service station. Research was made with using frames made of two different composite materials (Glass fibre reinforced plastic and carbon fibre with epoxy die). Current robot service station is made of EN AW-6061 T6 aluminium. Making frame out of composite is important for reducing mass of service station. With heavier frame of robot service station, we may exceed the bearing capacity of the soil and damage field soil. Composite material is almost 1,7 times lighter than aluminium and approximately 3,8 times stronger, so it is good way to reduce mass. To conclude carbon fiber with epoxy die is best choice from both options. Frame mass is 61,7 kg and displacement is up to 20 mm.

Keywords: Mass, composite materials, robot service staion, field soil, deviation.

SISSEJUHATUS

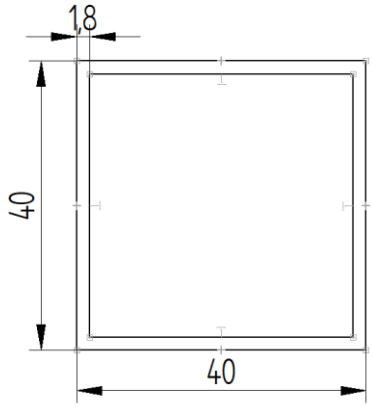
Ettekande käigus uuriti kahest erinevast komposiitmaterjalist valmistatud klaaskiuga tugevdatud plastik ja süsinikkiud epoksüdvormis raami omadusi – massi, siiret ja paindepinget. Hetkel valmisolev süsteem on valmistatud alumiiumist EN AW-6061 T6. Süsinikfiiber on võrreldes alumiiniumiga ligikaudu 1,7 korda kergem ja 3,8 korda tugevam [1]. Selline tugevuse erinevus võimaldab luua konstruktsioone, milles on palju väiksema läbimõõduga torud, profiilid jne. väiksema läbimõõduga torud ja profiilid võimaldavad konstruktsioonide massi vähendada märkimisväärselt.

Mustikaroboti hooldejaama puhul on oluline, et mass oleks võimalikult väike, sest hooldejaam jäetakse põllu peale statsionaarseks. Seega on väga oluline, et hooldejaama mass oleks pinnase kandevõimest võimalikult palju väiksem. Sellega tagame, et kui hooldejaam on põllul statsionaarne või liigutatakse ringi, ei saa põld kahjustada. Lisaks massile on väga oluline, et tugevusarvutustes siire poleks liiga suur ja paindemoment ei ületaks materjali lubatud piire.

Ettekande eesmärk on uurida klaaskiuga tugevdatud plastikust ning süsinikkiud epoksüdvormis komposiitmaterjalist valmistatud roboti hooldejaama massi, tugevusarnäitajates siiret ning paindemomenti.

MATERIAL JA METOODIKA

Komposiitmaterjalide uurimine viidi läbi kasutades raalprojekteerimis tarkvara *Solid Edge Academic 2023*. *Solid Edge* võimaldab luua ruumilisi mudeleid. Mudel valmistati selliselt, et nelikanttorust osad ja katuseplaat on valmistatud komposiidist. Kinnitusplaadid ja toed on valmistatud alumiiniumist EN AW-6082 T6. Tulemuste täpsuseks on mõlemast komposiitmaterjalist valmistatud raamil sama läbimõõduga nelikanttoru, mõõtudega 40•40•1,8 mm, nelikanttoru profiil on illustreeritud joonisel 1.



Joonis 1. Nelikanttoru profiil 40•40•1,8 mm.
Fig.1. Square tube profile 40•40•1,8 mm.

Mudelis kasutatud materjalide spetsifikatsioonid on väljatoodu alljärgnevates tabelites. klaaskiuga tugevdatud plastiku spetsifikatsioonid on kirjeldatud tabelis 1.

Tabel 1. Klaaskiuga tugevdatud plastiku spetsifikatsioonid. Allikas: [2]
Tabel 1. Glass fibre reinforced plastic properties. Source: [2]

Tihedus, g/cm^3	**Tõmbetugevus, MPa**	**Elastsusmoodul, GPa**	**Katkevenivus, %**
2,11	2500	55	4,5

Süsinikkiud epoksüdvormis spetsifikatsioonid on väljatoodud tabelis 2.

Tabel 2. Süsinikkiud epoksüdvormis spetsifikatsioonid. Allikas: [3, 4]
Tabel 2. Carbon fibre with epoxy die properties. Source: [3, 4]

Tihedus, g/cm^3	**Tõmbetugevus, MPa**	**Elastsusmoodul, GPa**	**Katkevenivus, %**
1,6	2000	160	1,52

Alumiinium EN AW-6082 T6 spetsifikatsioonid on väljatoodu tabelis 3.

Tabel 3. Alumiinium EN AW-6082 T6 spetsifikatsioonid. Allikas: [5]
Tabel 3. Aluminium EN AW-6082 T6 properties. Source: [5]

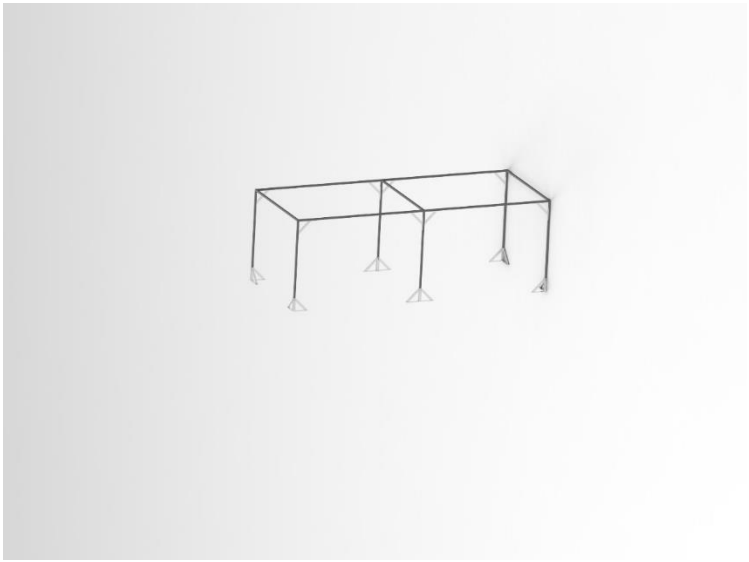
Tihedus, g/cm^3	**Tõmbetugevus, MPa**	**Elastsusmoodul, GPa**	**Katkevenivus, %**
2,7	340	70	11

Peale materjalide valimist sisestati materjalide spetsifikatsioonid *Solid Edge* materjalitabelisse. See on vajalik, et *Solid Edge* abil saaks massi, siiret ja paindemomenti arvutada.

Seejärel valmistati teenindusjaama raami mudel. Joonisel 2 on illustreeritud raam koos katusepaneeliga.

Joonis 2. Roboti teenindusjaama raami ruumiline mudel koos katusepaneeliga.
Fig. 2. Robot service station frame 3D-model with roof panel.

Ilma katusepaneelita raami variant on illustreeritud joonisel 3.



Joonis 3. Roboti teenindusjaama raami ruumiline mudel ilma katusepaneelita.
Fig. 3. Robot service station frame 3D-model without roof panel.

Tugevus arvutuste tegemiseks on vajalik koormus, antud uurimuse käigus valiti uuritavaks koormuseks lumekoormus. Standardi EN 1991-1-3 järgi valiti lumekoormus maapinnal Norra näitel [6]. Lumekoormuse suuruseks valiti f=1,75 kN/m^2 [6] .

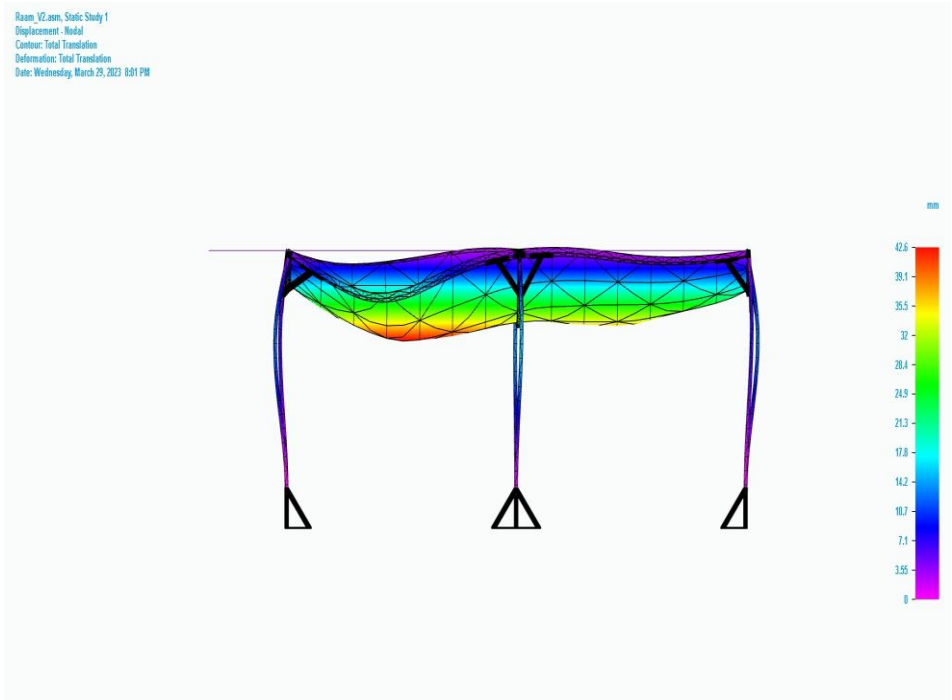
TULEMUSED JA ARUTELU

Kui mudelite valmistamine oli teostatud, siis valiti esmalt materjaliks süsinikkiud epoksüdvormis. Raami mass, läbipaine ja paindemoment leiti kasutades *Solid Edge 2023 Academic* [7] tarkvara. Raamile rakenduva jõu leidmiseks kasutati valemit 1.

$$F = a \bullet b \bullet f \bullet i = 6{,}05 \bullet 2{,}416 \bullet 1{,}75 \bullet 1{,}2 \sim 31\ kN \sim 31000\ N \qquad [1]$$

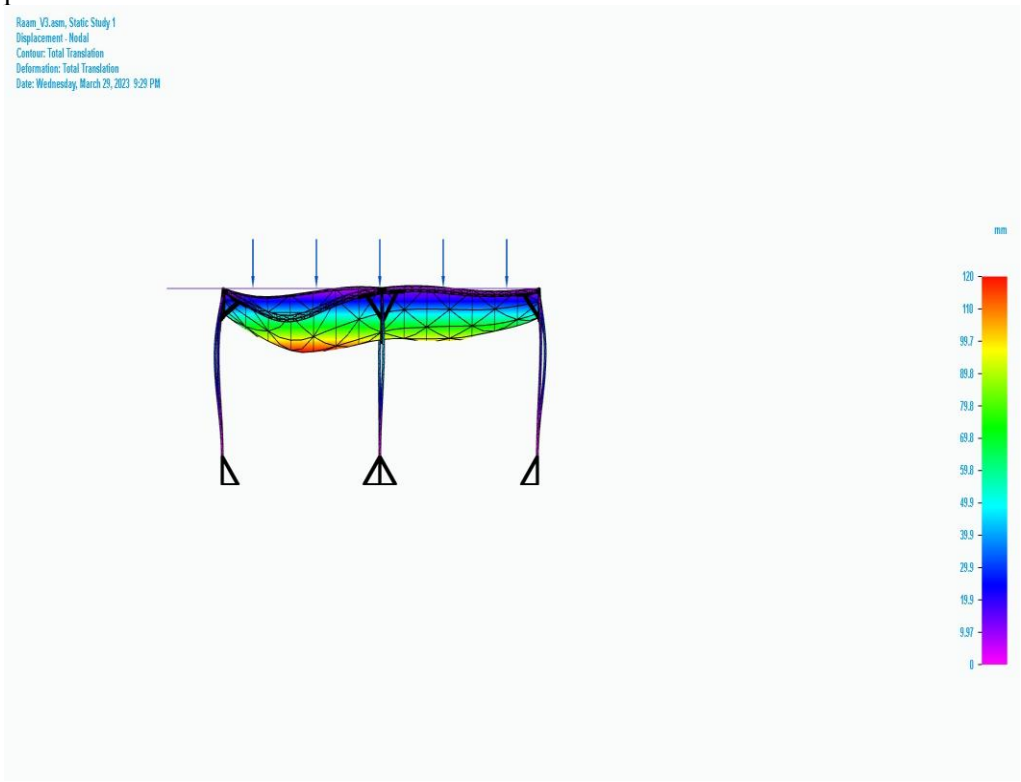
Kus a on pikema külje pikkus, m;
b - lühema külje pikkus, m;
f - lumekoormus, kN/m^2;
i - varutegur, i=1,2;
F - lume poolt tekitatud jõud, kN.

Tulemusena saadi, et paindemoment on 600Mpa, mis on väiksem kui materjali enda piirväärtus. Raami osa läbipaine on kuni 20mm, mis on F=31000 N rakendamisel väga hea tulemus. Saadud läbipaine on illustreeritud joonisel 4. Massiks on 61,7 kg, millest ligikaudu 15 kg moodustab katusepaneel. Mis on raami suurust arvestades väga suur osa.



Joonis 4. süsinikkiud epoksüdvormis valmistatud raami läbipaine kuni 20 mm.
Fig. 4. Frame displacement made of carbon fibre with epoxy die up to 20 mm.

Teiseks kasutati raami puhul klaaskiuga tugevdatud plastikut, mille massiks saadi 73,8 kg, läbipaine on kuni 50 mm, mis on väga palju juba, selline raam ei pea vastu sellisele koormusele. Läbipaine on illustreeritud joonisel 5. paindemoment 700 MPa, mis on materjali piirväärtusest väiksem.



Joonis 5. Klaaskiuga tugevdatud plastikust valmistatud raami läbipaine kuni 50 mm.
Fig. 5. Frame displacement made of Glass fibre reinforced plastic up to 50 mm.

Tulemuste põhjal järeldati, et raami puhul parimaks valikuks on kasutada süsinikkiudu epoksüdvormis. Kuna soov on saada tugevat ja samas ka kerge massiga raami. Mis on süsinikkiud epoksüdvormis valmistatud raami puhul tagatud.

JÄRELDUSED

Töö eesmärk saavutati, uuriti kahest erinevast komposiitmaterjalist valmistatud raami omadusi. Ja valiti välja parim variant, milleks osutus süsinikkiud epoksüdvormis valmistatud raam.
Tulemusena saadi, et raami mass on kõigest 61,7 kg. See on väga hea tulemus. Saades raami massi alla, väheneb võimalus, et põllul statsionaarselt või liikudes kahjustatakse pinnast.
Lisaks töökäigus uuritule, saab järeldada siirdegraafikuid vaadates, et tuleb lisada pikema talaga risti olevaid talasid juurde, kuna katuseplaadi siire on väga suur. Mis viib katuseplaadi purnunemiseni.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Dragon Plate. Carbon Fiber vs Aluminum. [Online] Available: https://dragonplate.com/carbon-fiber-vs-aluminum#:~:text=This%20chart%20shows%20that%20carbon,1.71%20times%20that%20of%20aluminum. [Accessed 27.03.2023].
2. Textile Learner. Glass Fiber: Types, Properties, Manufacturing Process and Uses. [Online] Available: https://textilelearner.net/glass-fiber-types-properties/. [Accessed 27.03.2023].
3. Alusic. C6 Line Carbon Profiles And Accessories. [Online] Available: https://online.flippingbook.com/view/838356/, pp. 7. [Accessed 27.03.2023].
4. MatWeb. Overview of materials for Epoxy/Carbon Fiber Composite. [Online] Available: https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=39e40851fc164b6c9bda29d798bf3726&ckck=1. [Accessed 28.03.2023].
5. Thyssenkrupp. Aluminium 6082. [Online]. Available: https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/aluminium-6082.html. [Accessed 28.03.2023].
6. Actions on structures. (2003). General actions – Snow loads: European Standard RN 1991-1-3. Brussels: European committee for standardization. [Online] Available: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.3.2003.pdf. [Accessed 28.03.2023].
7. Simens. Solid Edge 2023. [Online] Available: https://solidedge.siemens.com/en/solutions/products/complete-product-development-portfolio/solid-edge-2023/. [Accessed 04.04.2023].

Tuulekoormuse mõju mobiilse päikesepargi raamile

A.Pellja

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. The abstract of this study is to analyse how wind loads affect construction of mobile solar station during highway transportation. Analysis is done using finite element methods in SolidWorks simulation package. Wind load calculated to front end during highway transportation with heavy wind against surface.

Keywords: Mobile solar station, wind load, FEM.

SISSEJUHATUS

Elektrimasinate kasutatavuse võimaldamine elektritaristuta piirkondades on raskendatud ilma mobiilse ressurssi allikata. Elektrivõrguta piirkondade all on eeskätt nimetatud metsad ja põllud, mis vajavad hooldamist, ning mille saadused on inimtegevuse lahutamatu osa. Energia tagamine asustamata piirkondades on esmatähtis masinate pideva töö tagamiseks. Seadmete funktsionaalsus on tagatud seniks, kuni on olemas elektrienergia elektrivõrguta asukohas. Elektrivõrguta piirkonnas puudub võimalus elektriajamiga varustatud põllundus-/metsamasinate laadimine ja sellest tulenev otstarbelise tehnika pidev töö. Masinate pideva töö tagab maantee transpordiks sobilik mobiilne päikesejaam, mille pindala on kaetud maksimaalselt päikesepaneelidega, ning varustatud alternatiivenergia allikaga. Mobiilse päikesejaama pealisehitis peab olema konstrueeritud maanteetranspordil tekkiva tuule poolt tekitatud dünaamilise koormuse vastuvõtmiseks.

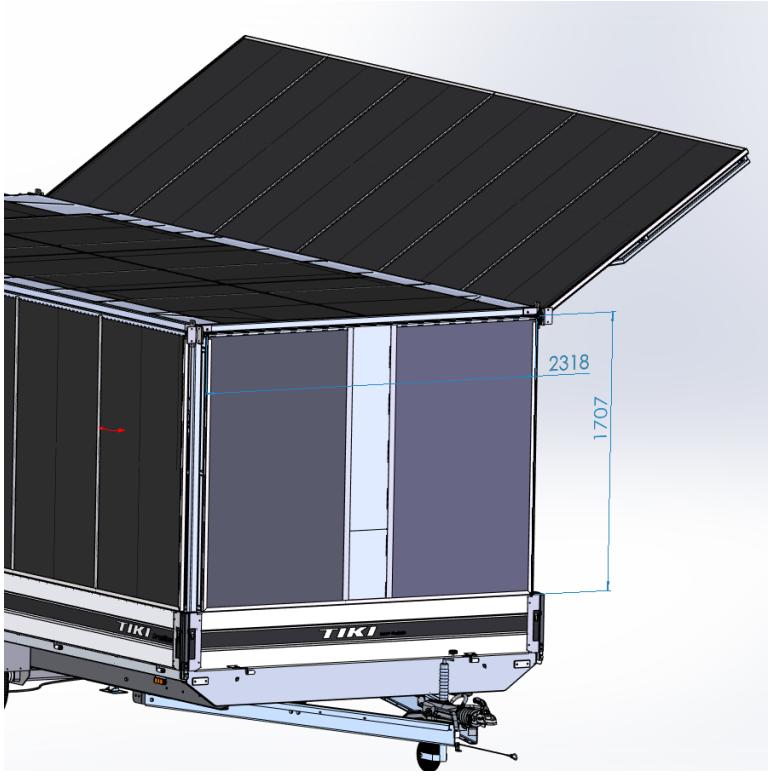
MATERIAL JA METOODIKA

Tuul tekib, kui õhk liigub, mis peatatakse pinnaga. Õhu liikudes tekib dünaamiline energia, mis muutub ümber rõhuks. Rõhk mõjub pinnale. Peatatava pinna jaoks muutub rõhk pinnale mõjuvaks jõuks. Mida suurem on tuule kiirus, seda suurem on tuule poolt tekitatud dünaamiline koormus, ning seda suurema koormuse all on mobiilse päikesejaama pind.

Transportides mobiilset päikeseparki Eesti teedel lubatava piirkiirusega on tuule poolt tekitatav koormus võrdeline sõidukiirusega. Mobiilse päikesepargi konstrueerimisel tuleb arvestada kõige ebasoodsama olukorraga. Sõrestikule on kõige ebasoodsam olukord, kui koormus mõjub konstruktsioonile täisnurga all. Frontaalpindalale mõjub koormus kandub üle kogu sõrestikule maanteetranspordis. Mida teravamaks muutub nurk, seda väiksemaks muutub tuule poolt tekitatud dünaamiline koormus.

Maantee transpordiks konstrueeritav sõrestik olgu kaalult võimalikult kerge. Koostatud kättesaadavatest ja lihtsasti töödeltavatest, ning omavahel liidetavatest materjalidest. Konstruktsioonile on lubatud vaid elastsed deformatsioonid.

Katse läbiviimiseks on kasutusele võetud tarkvara SolidWorks 2022. Integreeritud simulation pakett võimaldab läbi kasutada lõplike elementide meetodit konstruktsiooni uurimisel. SolidWorks tarkvara aitab kaasa virtuaalsele prototüüpimisele. [3] Staatiline koormusanalüüs viiakse läbi 3D keskkonnas.



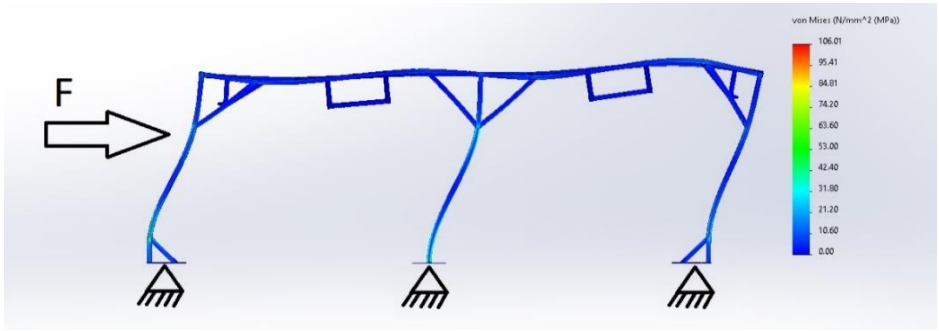
Joonis 1. Konstrueeritud mobiilse päikesejaama frontaalpind

Kogu sõrestiku materjaliks on valitud alumiiniumsulam margiga EN-AW 6082T6. [1]. Materjal on termotöödeldud ja vanandatud. Fikseeritud pindadeks on nelikant toru vertikaaltoed platvormhaagise AS Bestnet CP600-DRBW/DROP/3500 kg[4] mudelil. Sõrestik on konstrueeritud platvormhaagise gabariitmõõtude järgi. Maanteetransporditava päikesejaama konstrueerimisel on arvestatud ebasoodsamat olukorda autorongi vedamisel: lubatud maantee kiirus 90km/h vastu puhuva tugeva tuulega 20m/s. Maantee transpordil tekkiva päikesejaama vedamisel jõud liidetakse tuule kiirusega. Mobiilse päikesepargi frontaalpinna mõõdud joonisel 1. Õhu tihedus 1.25 $\mathrm{kg/m^3}$. Frontaalpindalale tekkinud dünaamiline koormus kandub üle raamistikule.

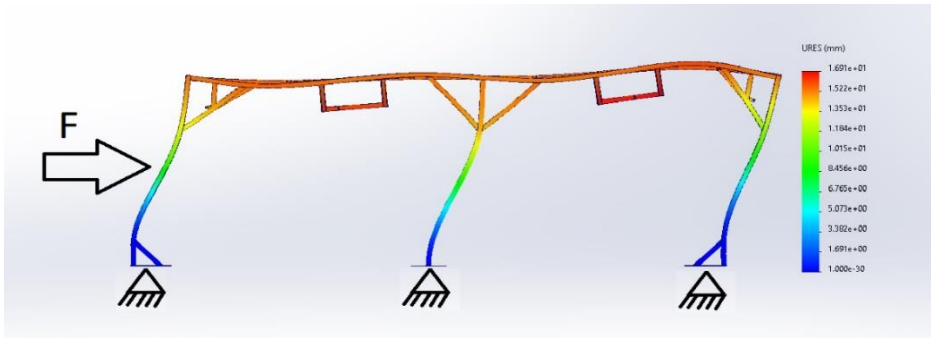
$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1 + v_2)^2 \cdot A \qquad [5]$$

kus
F_w Tuule dünaamilinekoormus N;
ρ õhutihedus $\mathrm{kg/m^3}$
v_1 vastu puhuva kiirus m/s;
v_2 maanteerongi sõidukiirus m/s;
A päikesepargi frontaalpindala m^2
$F_w = 4811.4$ N

Arvutatud jõud mõjub kogu frontaalpina detailidele võrdselt, mis on ära jagatud frontaal pindalale. SolidWorks simulation paketis loodud võrgu parameetrid on kuvatud joonisel 2.



Joonis 2 Raamis pinged maanteetranspordil tuulekiirusega 20 m/s. 106 MPa.



Joonis 3 Raamil tekkiv maksimaalne siire 1.7 mm.

Joonistel 2 ja 3 on võimendatud konstruktsiooni siire. Staatilise koormusanalüüsi eesmärk on kuvada materjalis tekkinud maksimaalset pinget mobiilse päikesepargi frontaalpinnale..

Konstruktsiooni detailide omavahelised liited teostatakse kasutades TIG keevitustehnoloogit Eelnevalt termotöödeldud alumiiniumsulami soojussisestuse tõttu langevad materjali mehaanikalised omadusnäitajad kuni 40% baasmaterjali omadusest.[2]. Enim langevad sulami mehaanilised omadused detailide liitekohtadel, kuna soojussisestus on suurim.

TULEMUSED JA ARUTELU

Käesoleva simulatsiooni olulisus seisneb 3D keskkonnas läbiviidavate simulatsioonide osatähtuses prototüüpseadmete loomisel. Konstruktsioonide projekteerimisfaasis tuleb arvestada millised jõud võivad mõjuda sõrestikele. Oluline on arvestada kõige ebasoodsamaid olukordasid, mis võivad tekkida. Olukorrad on alati seotud otstarbelise kasutamisega. Maantee transpordiks on valitud AS Bestnet treileri valikust kõige suurem kahe torsioonsillaga platvormhaagis.

Arvutustulemustega saab kindlaks teha mõjuvate jõudude suunad ja väärtused. Iga raami konstrueerimisel tuleb valida õige materjal.

3D keskkonnas simulatsioonide läbiviimisel säästab ajalist ressurssi ja materjali. Konstrueerimisel virtuaalses keskkonnas saab projektiks sobiv materjali valida. Materjalis tekkinud siirded ja esinevad pinged peavad jääma alla lubatud piirmäära. Pärast konstruktsiooni materjali esialgset valikut on oluline kontrollida materjali deformeerumist sihtotstarbelisel kasutamisel. Enamasti on konstruktsiooni materjalidel lubatud vaid elastsed deformatsioonid.

Katse lahendab mobiilse päikesejaama maanteetranspordiks konstrueeritud raami transpordi probleemi. Arvestatud on kõige ebasoodsama olukorraga.

JÄRELDUSED

EN-AW 6082T6 materjali voolepiiriks on märgitud 260 Ma.[1] Pärast keevitamisel tekkinud soojussisestust langeb voolepiir raami detailide omavahelisel liitekohtadel kuniks 156 MPa.[2]

Konstrueeritud raamil on vähemalt pooleteise kordne varutegur arvestades kõige ebasoodsamat olukorda mobiilse päikesepargi transportimiseks mööda maanteed lubatud sõidukiirusega tugeva vastutuule korral täisnurga all frontaalpinnale.

Kõik analoogsed olukorrad peab simuleerima 3D keskkonnas, et mõista projekteeritud raamide nõrgad kohad. Oluline on valida korrektne materjal konstruktsioonile. Käesolev uurimistöö lahendab frontaalkoormusolukorra otsesihis sõites tingimusel, et lubatud on vaid elastsed raami deformatsioonid.

Soovituslik on viia läbi analüüs kurvi siseneval autorongil. Arvesse võtta mobiilse päikesejaama külgpindala, massikeset, kurvi sisenemise kiirust, tugevat külgtuult ning veosõiduki andmeid. Simulatsioon koos arvutustega on oluline läbi viia, et ennetada potensiaalset raami purunemist.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] Alumero material datasheet of EN AW-6082 T6. (2020) https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2016/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6082.pdf (03.04.2023).

[2] S. Missori, A.Sili “Mehanical behaviour of 6082-T6 aluminium alloy welds” (01.2000) https://www.researchgate.net/publication/283627414_Mechanical_behaviour_of_6082-T6_aluminium_alloy_welds (03.04.2023).

[3] K. B. Mustapha “Practical finite element simulaations with SolidWorks2022: An illustrated guide to performing static analysis with SolidWorks Simulation” (02.2022) https://www.researchgate.net/publication/360619148_Practical_Finite_Element_Simulations_with_SOLIDWORKS_2022_An_illustrated_guide_to_performing_static_analysis_with_SOLIDWORKS_Simulation

[4] Tootja koduleht. Tiki platvormhaagis CP600-DRBW/DROP/3500kg https://www.tiki.ee/pood/haagised/platvormhaagised/cp600-drbw-drop-3500kg/ (03.04.2023).

[5] Inseneeria tööriistakast. Tuule dünaamilise koormuse arvutamise valem https://www.engineeringtoolbox.com/wind-load-d_1775.html (03.04.2023).

Kruvidosaatori kasutatavus täppisväetamisel

G.Randla

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract: Precision farming technologies have the potential to improve agricultural efficiency and environmental sustainability. Screw-type fertilizer applicators, also known as auger-type spreaders, are one type of technology used in precision farming for accurate and efficient application of fertilizers. This article provides an overview of the usability of screw-type fertilizer applicators in precision farming, including their advantages, limitations, and challenges. Things that are discussed are such as their ability to apply fertilizers at precise rates, their compatibility with variable rate application, and their reduced environmental impact through minimizing fertilizer waste and runoff.

The article concludes that they are an important tool in precision farming for achieving higher crop yields and environmental sustainability. Future advancements in technology and automation could further enhance the precision and usability of these applicators.

Keywords: precision farming, screw-type fertilizer applicators, auger-type spreaders, variable rate application, environmental sustainability.

SISSEJUHATUS

Täppispõllumajanduse tehnoloogiad omavad potentsiaali parandada põllumajanduslikku efektiivsust ja keskkonnasäästlikkust. Üks potentsiaalne täppispõllumajanduses kasutatav tehnoloogia on kruvidosaatorid ehk spiraalkujuline doseerimismasin. Kruvidosaatorid on laialdaselt kasutusel tänapäevases põllumajanduses [1]. Kruvikonveier või tigukonveier on mehhanism, mis kasutab vedelate või granuleeritud materjalide liigutamiseks pöörlevat spiraalset kruvitera, mis on tavaliselt toru sees.

Esimene kruvikonveier oli Archimedese kruvi, mida kasutati iidsetest aegadest kastmisvee pumpamiseks. Edaspidi on neid kasutusele võetud paljudes puistekäitluse tööstusharudes. Kaasaegses tööstuses kasutatakse kruvikonveiereid sageli horisontaalselt või väikese kaldega, et tõhusalt teisaldada pooltahkeid materjale, sealhulgas toidujäätmeid, hakkepuitu, täitematerjale, teravilja, loomasööta, katlatuhka, liha- ja kondijahu, olmejäätmete tahked jäätmed jne [2]. Lisaks on kruvikonveierite eeliseks nende lihtne struktuur, kõrge efektiivsus, madal hind ja vähesed hooldusnõuded [3].

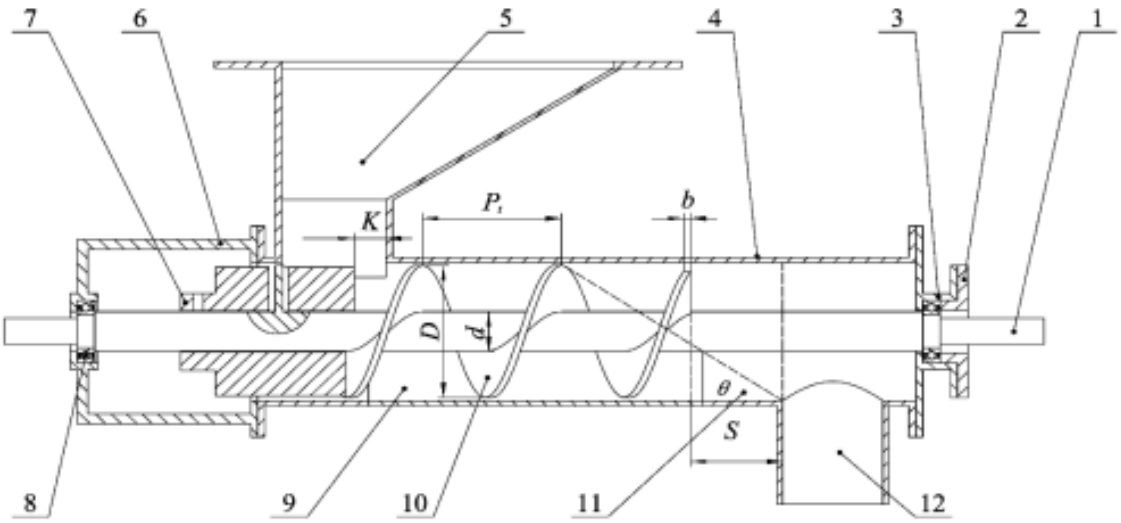
Käesolev uurimustöö analüüsib erinevaid allikaid, mis kirjeldavad kruvidosaatorit ja selle omadusi ja seejärel teeb järeldusi, kui hea on kruvidosaatorit kasutada graanulväetise täppisdoseerimisel.

MATERJAL JA METOODIKA

Esimese asjana peaks vaatama, millised tegurid mõjutavad kruvikonveieri teoreetilist läbilaskvust. Selle jaoks kastutakse järgnevat valemit [4]:

$$q = \left[\pi(D^2 - d^2) * \frac{P_t}{4} - Z * b * H * L_p\right] * \rho * \varphi * 10^{-3} \quad (1)$$

kus q on Teoreetiline läbilaskvus, g;
D – kruvi välisdiameeter, mm;
d – Kruvi sisediameeter, mm;
P_t – kruvi tera samm, mm;
Z – kruvi tippude arv, tk;
b – keskmine kruvihamba paksus, mm;
H – kruvi hamba kõrgus (H=(D-d)/2), mm;
L_p – keskmine kruvi pikkus kahe kruvitipu vahel, mm;
ρ – puistetava materjali tihedus, g/cm^3;
φ – väetise kruvi väetisega täituvus.

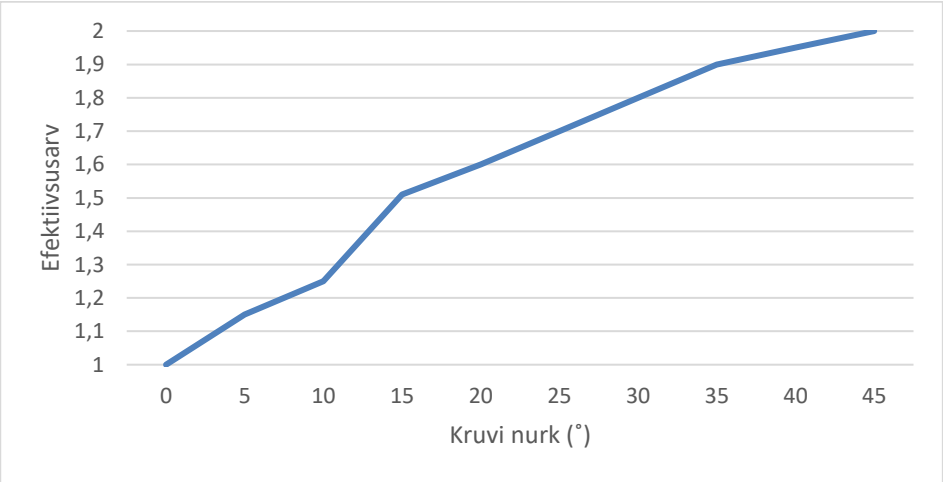


Joonis 6. Blokeerimisratta tüüpi kruviga väetisejaoturi ehitus. 1. Kruvivõll 2. Laagri kate 3. Hülsi otsakate 4. Kruvi korpus 5. Püramiidne etteandeava 6. Laagripesa 7. Spiraalblokeeriv ratas 8. Laager 9. Väetise puhastusväljund ja selle kaas 10. Kruvitera 11. Väetise puhvertsoon 12. Väetise väljalaskeava. Märkus: D on kruvi välisläbimõõt, mm; d on kruvi tera siseläbimõõt, mm; P_t on samm, mm; b on kruvi laba keskmine paksus, mm; K on spiraalselt blokeeriva ratta avanemise laius, mm; S on väljalaskeava kaugus, mm [5]

Vastavalt valemile 1 on peamised parameetrid, mis kruvidosaatori väljundit mõjutavad järgnevad: D ehk kruvilaba välisläbimõõt, d ehk kruvilaba siseläbimõõt, P_t ehk kruvilaba samm ning φ ehk kruvi täitumiskiirus.

Täitumiskiirus on väga suhteline mõiste kuna see sõltub väga otseselt materjali omadustest, mida me kruvidosaatoriga lükkama hakkame. Sõltuvad omadused on näiteks osakeste kuju, osakeste suurused, osakeste suuruse jaotused ja nende voolavus. Näiteks võtame 3 eritüüpi mustikaväetist - Agro NPK, Agro Organic ja Substral. Nende kolme väetise juures võetud 100 osakese keskmine geomeetriline läbimõõt varieerub 15%, sfäärilisus 21% ja puistetihedus 25% [6]. Just puistetiheduse 25%-ine vahe näitab ka problemaatilist kohta täppisdoseerimisel, kuid saranane probleem esineb kõikidel mahtdosaatoritel. Täitumiskiirust võib lisaks eelnevale mõjutada veel dosaatorile mõjuvad vibratsioonid, dosaatori pöörlemiskiirus ja kruvi kalle.

Kruvi nurk mõjutab dosaatori pakkuvust, kuid selle eest tekitab ka lisa probleeme. Nurka tõstes hakkab mõjuma ka gravitatsioonijõud liigutatavale graanulväetisele. See tähendab seda, et naturaalselt hakkab väetis küll pakkima ennast tihedamalt kokku ja liigutamiseks vajaminev jõu efektiivsus väheneb. Kuni 10 kraadine nurk mõjutab kruvidosaatori efektiivsust minimaalselt ja seda on võimalik vähendada lisaks, tõstes kruvi kiirust. Suurim efektiivsuskadu toimub 10-20 kraadise nurga juures, kus kadu on 10-40 %. Kadusid saab vähendada jällegi kiiruse tõstmisega või kruvi diameetri tõstmisega. [7]



Joonis 7. Kruvi efektiivsusarvu sõltuvus kruvi nurgast [7]

Kruvilaba samm on samuti suur tegur. Sammu tõstes, saame iga pöördega rohkem graanuleid välja ja samuti langes sellega doseerimise ebatäpsus. Katsetustes võeti 25, 35 ja 45 mm kruvilaba samm 45 mm diameetriga kruvi juures. Väljund graanulväetise kogused olid vastavalt 20,08, 29,32 ja 37,41 g/pöörde kohta. Väetamise ühtluse minimaalne variatsioonikoefitsient oli 53,41%, 47,27 % ja 36,65 %. [5]

TULEMUSED JA ARUTELU

Eelnevat arvesse võttes, tuleks kruvidosaatori valemis 1 põhiliselt arvestada läbimõõtu D, siseläbimõõtu d, ja tera sammu P_t ning selle abil arvutada teoreetiline läbilaskvus. Samuti tuleks arvesse võtta kruvi nurk, et saada võimalikult täpne kogust väetist ja vähendada üleväetamist. Kruvi nurk peaks jääma 10 kraadise nurga juurde, et suurendada pakkuvust ja vähendada ebaühtlust väljundis. Suurema nurga korral muutub kruvi efektiivsus hüppeliselt suuremaks. Kruvilaba samm tuleks hoida pigem suuremana, sest see annab jällegi ühtlasema tulemuse ja samuti lisandina suurema koguse väetist ühe pöörde kohta.

Täpsemaks doseerimiseks on mõistlik lisada kruvidosaatori otsa pöördenkooder ja mootoriks on mõistlik valida näiteks käigukastiga stepper mootor, mida on väga täpselt võimalik vastavalt enda soovile liigutada. Pöördenkoodriga saame veenduda pöörete koguses ja seejärel hiljem ka mootori juhtimist parendada.

JÄRELDUSED

Kuigi tigukonveierid on praegu põhiliselt kasutusel erineva vedelike või puistatava materjalide transpordiks või liigutamiseks, siis võttes arvesse selle töö käigus uuritud teadusartikleid ja tootjate infot, on kruvidosaator kindlasti üks võimalik viis täppisdoseerimiseks ja seeläbi üleväetamise vähendamise vastu võitlemiseks. Kruvidoseerimise eeliseks on tema lihtne ülesehitus, suur efektiivsus ja vähene hooldusvajadus [3].

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] „Agricultural Auger Conveyors,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://falconindustries.com/news/2015/07/09/agricultural-auger-conveyors.

[2] „Bega Screw Conveyor,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.screwconveyorbega.com/screw-conveyor-manufacture.

[3] M. H. K. M. R. A. Hemad Zareiforoush, „A Review on Screw Conveyors Performance Evaluation During,“ *Journal of Scientific Review,* kd. 2, nr 1, pp. 55-63, 2010.

[4] H. Ding, X. An, G. Wu, L. Li ja Q. Zhu, „Optimization and Simulation of Fertilizer Guide Device Parameters Based on EDEM,“ %1 *In Proceedings of the International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*, Jilin, China, 2017.

[5] G. Z. Y. H. A. E. S. ,. J. F. Y. Z. Xiantao Zha, „Structural Optimization and Performance Evaluation of Blocking Wheel-Type Screw Fertilizer Distributor,“ *MDPI Agriculture,* kd. 11, p. 248, 2021.

[6] R. M. V. I. O. J. Lillerand TORMI, „FEASIBILITY ANALYSIS OF FLUTED ROLLER DISPENSER APPLICATION FOR PRECISION FERTILIZATION,“ *INMATEH - Agricultural Engineering,* kd. 68, nr 3, pp. 415-423, 2022.

[7] „KWS Manufacturing Company,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.kwsmfg.com/wp-content/themes/va/pdf/Screw-Conveyor-Engineering-Guide.pdf. [Kasutatud 03 2023].

Vesiniku mõju diiselmootori heitgaasidele

A.Tarmo

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Tootmistehnika

Abstract. Hydrogen stands out as a very attractive alternative for the electricity and transportation sectors, especially considering the existing environmental restrictions, notably those imposed on the exploitation of fossil fuels. This article investigates two different experiments where hydrogen was added to a diesel engine and CO2 and NOx results were analyzed. In the first experiment, the effects of using hydrogen in a K9K car diesel engine are examined. Several quantities were monitored to assess the performance with hydrogen use in terms of CO2 and NOx characteristics. Experiments were carried out at a speed of 2000 min-1 with engine load level of 55%. [1] In the second experiment, the effect of 25% and 50% addition of the hydrogen in the diesel engine was analyzed on CO2 and NOx emissions. Investigated engine speeds were 750, 900, 1100, 1400, 1700 and 2100 r/min. [6]

Keywords: diesel engine; hydrogen; emissions; fuel

SISSEJUHATUS

Heitgaaside eeskirjade karmistamine ja kasvav mure maanteeliikluse mõju pärast on viimastel aastatel põhjustanud mitmesuguste tehnoloogiate esile kerkimise, mis võimaldavad vähendada sisepõlemismootorite heitkoguseid ja sellest tulenevalt lahendada diiselmootorite eluiga. [2] Paratamatult on diiselmootorid igapäevaelu lahutamatud osad ja kahtlemata olulised ka tulevikus. Arvestades asjaolu, et vastavalt normatiivsetele õigusaktidele on sätestatud kahjulike heitkoguste piirmäär ja pidades silmas viimaste aastate kütusehinna tõusu, on ootused diiselmootorite alternatiivsete kütuste rakenduste osas aina kõrgemad. [3]

Elektriauto on vältimatult tuleviku arengusuund ning sisepõlemismootori lõplikuks asendamiseks on kriitilise tähtsusega järgmise põlvkonna akud ja vesinik. Vesiniku infusioon koos diislikütusega tagab parema põlemise ja väiksemad heitkogused. [2]

Aastakümneid on diiselmootorite vesiniku sissepritse kasutamine olnud tuntud oma eeliste, näiteks puhtama põlemise poolest. Näiteks vesinikku kasutatakse diiselmootorite dekarboniseerimiseks. Vesiniku sissepritse idee seisneb selles, et lisada diislikütuse ja vesiniku kombinatsioon tavalisse diiselmootori töösse, kus vesinik aitaks kaasa puhtamale põlemisele. Nähes vajadust vesiniku sissepritsega mootori järele, märkame, et see nõuab vähemalt seadet vesiniku kohaletoimetamiseks ja loomulikult mehhanismi sissepritsega vesiniku reguleerimiseks vastavalt asjaoludele. Diiselmootorisse vesiniku sisestamiseks on vaja nii sissepritsetavat vesiniku reguleerivat süsteemi kui ka seadet, mis vajalikku vesinikku tarniks. [2]

Suurim probleem selle tehnoloogia juures on vesiniku hoiustamise nõue, mis eeldab rõhu all olevat paaki ja vesiniku jaotusvõrgu kasutamist. Samuti tekib lisakulu iga kilomeetri kohta. Võib-olla just seetõttu on seda lahendust hakatud rakendama diiselmootoriga tarbesõidukitele, mis püüavad vähendada oma keskkonnamõju ja järgida heitgaaside regulatsioone, mitte aga sõiduautodele, mille tootjad on eelistanud pühendada kõik oma ressursid täielikult elektrisõidukite akudele või kütuseelementidele. [2]

Antud artikli eesmärgiks on anda ülevaade vesiniku mõjust diiselmootori heitgaasidele (CO2 ja NOx). Selleks viidi läbi katsed, et uurida vesiniku ja diiselmootori põlemisprotsessi erinevatel koormustel. [4]

MATERJAL JA METOODIKA

Antud töös on kasutatud „Sustainability“, „Advances in Mechanical Engineering“ ning „ScienceDirect“ andmebaase. Vesiniku mõju diiselmootori heitgaasidele (CO2 ja NOx muutused) on uuritud eelnimetatud andmebaasidest leitud artiklite põhjal.

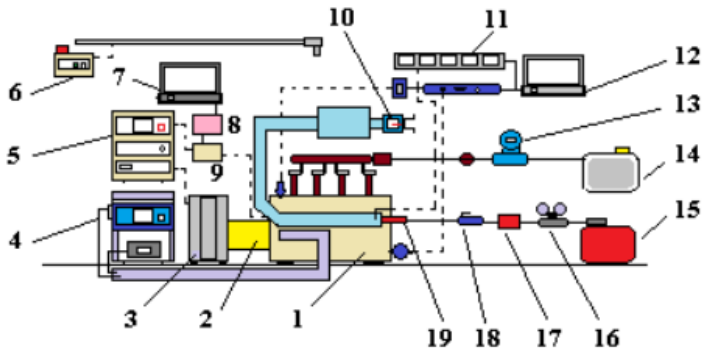
Võrreldes kõigi teiste kütustega on vesinikul lai süttivusvahemik. Tänu sellele saab vesinikku põletada sisepõlemismootoris paljudes kütuse-õhu segudes. Selle oluline eelis on see, et vesinik võib süttida lahja kütteseguna. Lahja segu on selline, milles kütuse kogus on väiksem kui teoreetiline, stöhhiomeetriline või keemiliselt ideaalne kogus, mis on vajalik põlemiseks etteantud õhuhulgaga. [5]

Esimese uuritava katsemetoodika alusel toideti mootorit diislikütuse ja vesinikuga. Mootori koormuseks oli 55% konstantsel töökiirusel 2000 min^{-1}.

Teise uuritava katsemetoodika käigus uuriti CO2 ja NOx emissiooni taset, kui vesiniku kogus oli diiselmootoris 25% ja 50%, kus mootori pöörete arv oli vastavalt 750, 900, 1100, 1400, 1750 ja 2100 p/min. [6]

TULEMUSED JA ARUTELU

Esimese katseprotseduuri põlemisomadusi ja mootori jõudlust hinnati allpool kirjeldatud viisil. Toitesüsteem oli varustatud avatud tüüpi ECU-ga (mootori elektrooniline juhtseade), mis oli ühendatud kütusesüsteemiga ning mida juhtis Dastek Unichipi tarkvara kasutav arvuti. Mootori võimsuse säilitamiseks vesiniku tsüklilise koguse suurenemisega vähendati diislikütust. Kütusekoguseid juhiti elektrooniliselt, reguleerides avatud pihustite kestust. Sissepritse kestused määrati kindlaks vastavalt mootori töörežiimile/põlemisparameetritele ja saasteainete heitkogustele. [1]



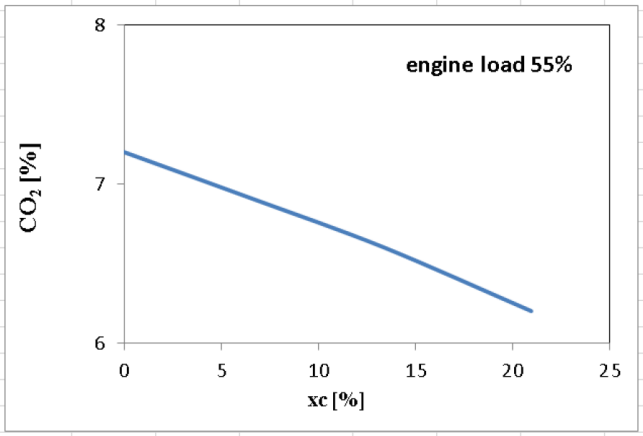
Joonis 1. Vesinik-diiselmootori katsestend, mis koosneb järgmistest osadest: 1 – ülelaadimisega neljasilindriline K9K diiselmootor; 2 Voith ühendusvõll; 3 — Horiba Schenchi pöörisvooludüno; 4 — AVL DiCom 4000 gaasianalüsaator ja suitsususe mõõtur; 5-dyno juhtkapp; 6-katsekambri ohutusandur vesiniku tuvastamiseks; 7 – Dastek Unichipi arvuti; 8 – Unichip Q; 9 — K9K mootori ECU; 10 – Krohne õhuvoolumõõtur; 11 – Shimadeni ülelaadimisrõhu ja temperatuuri indikaatorid; 12 — AVL andmehõivesüsteem (AVL Indimodul Card C1 kogumisplaat, AVL Indimodul 621, AVL-

3067A01 laadimisvõimendi, AVL-GU12P rõhuandur ja AVL-365CC nurgaandur); 13 – Optimassi diislikütuse voolumõõtur; 14 – diislikütuse reservuaar; 15 – vesiniku reservuaar; 16 — vesiniku rõhuregulaator; 17 – Alicat Scientific MCR vesiniku voolumõõtur; 18 – leegi tõkestajad; 19 – vesiniku pihusti. [1]

Esiteks kalibreeriti kõik katseinstrumendid ja seadmed. Diiselmootor sisaldas vesiniku toitesüsteemi koos sisselaskekollektoriga ühendatud vesinikupihustiga, kaitseklappi, rõhuregulaatorit ja vesiniku reservuaari. Vesiniku voolu jälgimiseks paigaldati kütusetorule spetsiaalne voolumõõtur. Vesinikupihusti käivitati Dastek Unichipi tarkvaraga arvutist. Unichipi seade kontrollis diislikütuse sisselaskeava ja vesinikupihusti avanemisaegu, vähendades seeläbi diislikütuse tsüklilist kogust koos vesiniku vooluhulga suurenemisega, et hoida väljundpiduri võimsust konstantsena standardse tankimise tasemel. Sellisel viisil määrati erinevad vesiniku voolud, mistõttu muudeti energeetilist asendussuhet. Seega oli võimalik tagada parim korrelatsioon mootori töörežiimi, kütuse tsükliliste koguste, silindri tipprõhu, saasteainete heitkoguste taseme ja heitgaasi temperatuuri vahel, et tagada mootori kõrge efektiivsus vesiniku kasutamisel. [1]

Teise katseprotseduuri ajal arvutati vesiniku energia osakaalu küttesegus välja kasutades diisli- ja vesinikkütuste madalamaid küttevääртusi. Kasutades saadud vesinikpihusti sissepritse kogust sõltuvalt sissepritse kestusest oli sisse pritsitud vesinikkütuse kogus pihusti kaupa hõlpsasti reguleeritav. [6]

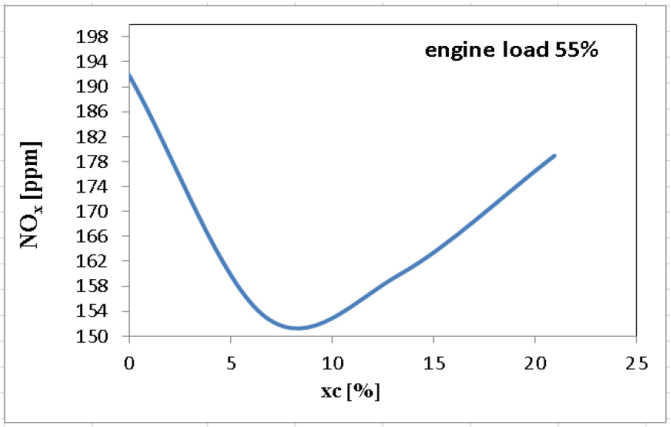
Esimese katsemetoodika käigus analüüsiti tulemusi 55%-se mootori koormuse juures. Katsete tulemusena tagas vesiniku lisamine diiselmootori põlemisprotsessi mootori normaalse töö. Vesiniku lisamisega hakkas CO2 emissiooni tase vähenema vesiniku tsüklilise doosi suurendamisega (vt joonis 2). [1]



Joonis 2. CO2 heitkoguste tase arvestades vesiniku asendussuhet mootori 55% koormuse juures ja kiirusel 2000 min−1. [1]

CO2 emissiooni tase vähenes 4% võrra, kui vesiniku asendussuhe diiselmootoris oli 6,67. CO2 emissiooni tase vähenes 8,3% võrra, kui vesiniku asendussuhe diiselmootoris oli 13,39 ja 14% võrra, kui vesiniku asendussuhe diiselmootoris oli 20,97.

55% koormuse ja kiirusega 2000 p/min tõi soojuseralduse suurenemine maksimaalsel xc-l kaasa NOx (lämmastikühendite summaarne osakaal heitgaasides) emissiooni suurenemise suurte vesinikudooside korral; saadud väärtus oli aga 6,8%, st alla traditsiooniliste kütuste väärtuse (vt joonis 3). [1]

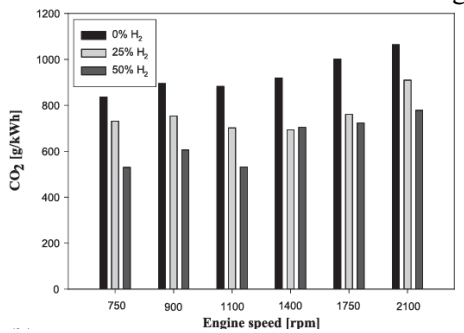


Joonis 3. NOx heitkoguste tase võrreldes asendussuhe 55% mootori koormuse juures ja kiirusel 2000 min−1. [1]

Kui vesiniku asendussuhe diiselmootoris oli 6,76 ja 13,39, vähenes NOx heitkoguste tase vastavalt 20% ja 16,7%. NOx emissiooni vähenemist võib seletada rikkama segu ja veeauru suurenemisega põlemiselementides, mis mõjutab põlenud gaasi temperatuuri. Kuid vesiniku juurde lisamisega on näha, et NOx emissiooni tase suureneb. [1]

Teise katsemetoodika käigus analüüsiti CO2 ja NOx taset, kus vesiniku sisaldus segus 25% ja 50% ning mootori pööretel 750, 900, 1100, 1400, 1700 ja 2100 p/min. [6]

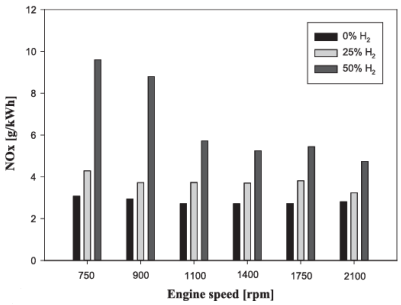
Joonisel 4. on kujutatud CO2 heitkoguste väärtuste varieerimine mootori pöörlemiskiirusel erinevate vesiniku koguste juures. [6]



Joonis 4. CO2 emissiooni väärtuste võrdlus. [6]

CO2 heitkogused vähenevad oluliselt vesiniku lisamisega kõigil pööretel, võrreldes ainult diislikütusega. Võrreldes puhta diislikütusega, paraneb CO2 heitkogus 25% vesiniku lisamisel 12,7-25,4% ning vesiniku 50% lisamisega 23,4-38,7%. [6]

Joonisel 5. on kujutatud NOx heitkoguste väärtuste varieerimine mootori pöörlemiskiirusel erinevate vesiniku koguste juures. [6]



Joonis 5. NOx emissiooni väärtuste võrdlus. [6]

NOx heitkogused suurenevad vesiniku lisamisel kõigil mootori pööretel võrreldes puhta diislikütusega. Kõige rohkem eristub tulemus 50% vesiniku lisamisega, kus NOx heitkogused suurenevad drastiliselt. 25% vesiniku lisamisel on täheldatud tõusu vahemikus 15,2% kuni 39,6% ja 50% vesiniku lisamisel 68,6-212,7% võrreldes puhta diislikütusega. [6]

JÄRELDUSED

Vesiniku lisamine diiselmootorisse tagab kasutatava kütuse kiirema ja täielikuma põlemise. Täielikum põlemine tähendab seda, et rohkem energiat muudetakse kasulikuks mehaaniliseks energiaks ja vähem raisatakse kasutuks soojuseks. See ei mõjuta positiivselt mitte ainult mootori võimsust ja kütusekulu, vaid ka kahjulike ainete sisaldust heitgaasides. [6]

Esimese katse tulemusena selgus, et vesiniku kasutamine võimaldab vähendada CO2 ja NOx heitkoguseid, kuid vähenemise aste sõltub vesiniku tsüklilisest doosist. Lähtuvalt kõigist eespool toodud tulemustest võib järeldada, et CO2 heitkoguse tase väheneb vesiniku lisamisega. Vesiniku kasutamine töörežiimil 55% koormusega ja kiirusel 2000 p/min vähendas CO2 heitkoguseid 14% tänu paranenud põlemisprotsessile. Vesiniku lisamine tõi kaasa veeaurude suurenemise põlemiselementides, mõjutades põlemistemperatuuri ja vähendades NOx emissiooni taset 20%. Kuid vesiniku koguse suurendamisel, tõuseks ka NOx emissiooni tase. [1]

Teise katse tulemusena võib järeldada, et diiselmootori rikastamine vesinikuga põhjustab CO2 heitkoguste suure vähenemise kõigil mootori pööretel. Tulemustest täheldatakse vastavalt 20,4–65,3% ja 48,5–66,3% CO2 emissiooni paranemist, arvestades asjaolu, et kogu kütuse vesiniku sisaldus on 25% ja 50%, võrreldes tulemusi puhta diislikütusega (0% vesiniku sisaldus). Enamgi veel - CO2 väärtus väheneb vesiniku lisamisega mootori kõigil pööretel. Samuti täheldati asjaolu, et vesiniku lisamisega diiselmootorisse, NOx heitkogused suurenevad puhta diislikütusega 25% vesiniku lisamisel 15,2–39,6% ja 50% vesiniku lisamisel 68,6–212,7%. [6]

Analüüsides mõlemaid katsetulemusi järeldame, et vesiniku lisamine diiselmootorisse vähendab CO2 emissiooni taset. Samuti katsetulemustest on näha, et lämmastikühendite summaarne osakaal heitgaasides vesiniku lisamisel suureneb. Ainult kuni 10% vesiniku lisamisel NOx emissiooni tase vähenes. Üle 10% vesiniku lisamisega diiselmootorisse NOx emissiooni tase hakkab suuresti tõusma. [6]

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] C. P. N. N. G. L. C. N. D. F. Alexandru Cernat, „Hydrogen—An Alternative Fuel for Automotive Diesel Engines used in Transportation,“ *Sustainability,* pp. 1-16, 2020.

[2] A. Biogradlija, „Energy News,“ Energy News, 25 April 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://energynews.biz/hydrogen-tech-to-extend-the-life-of-a-diesel-engine/.

[3] T. S. L. Y. A. S. D. S. W. Yasin Karagöz, „Effect of hydrogen-diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines,“ *Advances in Mechanical Engineering,* pp. 1-2, 2016.

[4] R. A. B. A. N. W. B. Santoso, „Combustion characteristics of diesel-hydrogen dual fuel engine at low load,“ *ScienceDirect,* pp. 1-2, 2013.

[5] C. o. t. Desert, „Hydrogen Use In Internal Combustion Engines,“ College of the Desert, 2001.

[6] B. F. Technology, „Better Fuel,“ Better Fuel Technology, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.hho-1.com/emissions-reduction-hydrogen-diesel/?lang=ru.

Turbulentseks pihustussüüteks kasutatava eelsüütekambri projekteerimine karburaatormootorile

P.A. Timmusk, R. Ilves, R. Allmägi

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. Due to tightening emissions regulations on internal combustion engines, car makers are facing the need to develop new technologies with which it is possible to further reduce engine exhaust emissions and fuel consumption. However, since these technologies are, in majority, only implemented on new cars, then the existing worldwide fleet of cars are left out on the new technologies. For that reason, it is necessary to develop new systems and technologies for internal combustion engines that can be retrofitted to already existing equipment. This paper will give an overview of a development process that was required to design a prechamber for a turbulent jet ignition system that will be installed on a carburetted internal combustion engine. In short, the existing test engine had been previously 3D scanned and based on these scans, the critical engine components/regions were remodelled as solid objects in 3D CAD. After getting familiar with the engine components, design process was started. The design and parameters of components that were critical for turbulent jet ignition, were similar to the results that were previously published by other authors. The most complex part of the development was to create a retrofittable system, while taking into account the properties and the design of the test engine.

Keywords: Turbulent jet ignition, hardware development, internal combustion engine, retrofitting

SISSEJUHATUS

Sisepõlemismootoritele rakenduvad peaaegu aasta-aastalt järjest karmimad saastenõuded, mistõttu arendavad ka autotootjad uusi tehnoloogiaid kuidas kütuse tarbimist optimeerida ning heitgaaside koguseid minimeerida. Kuna antud tehnoloogiad paigaldatakse ainult uutele sõidukitele, siis vanad, juba kasutusel olevad sisepõlemismootorid saastavad keskkonda edasi.

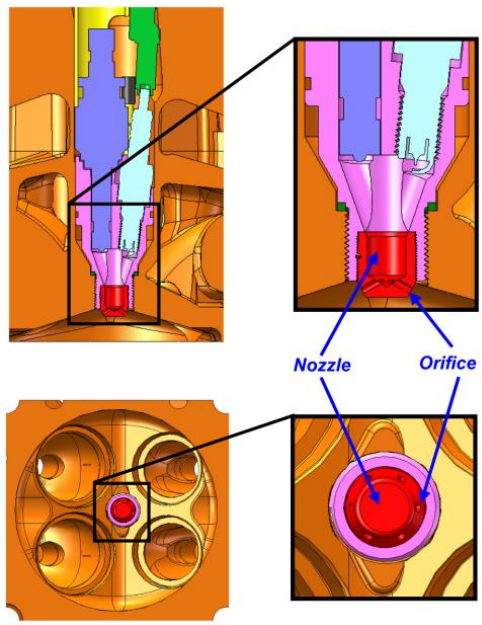
Sel põhjusel on vajalik arendada ka tehnoloogiaid ning meetodeid, mille abiga saab ka juba olemasolevaid sisepõlemismootoreid efektiivsemaks muuta. Antud ettekande raames esitletaksegi osalt juba teadusmaailmas katsetatud süsteemi - turbulentset pihustussüüdet.

Turbulentne pihustussüüde kujutab endast eelsüütekambriga süsteemi, mis läbi õhu-kütuse segu täpse reguleerimise võimaldab süüdata sisepõlemismootori silindris ka tavapärasest kordades lahjemat kütusesegu. Kütusesegu klassifitseeritakse lahjaks, kui õhu-kütuse suhe (*air-to-fuel ratio, AFR*) on suurem kui selle stöhhiomeetriline väärtus ehk 14,7. Lahja kütusesegu kasutamine sisepõlemismootorites võimaldab vähendada NO_X heitgaaside koguseid ning suurendada mootori soojuslikku efektiivsust. Teisisõnu, keskkonnale kahjulike heitgaaside osakaal väheneb ning täiendavalt kaob mehaanilise töö käigus vähem energiat soojusena [1].

Erinevaid eelsüütekambritega mootoreid on katselistel eesmärkidel arendatud alates 1970ndatest, mille raames prooviti ka suurendada mootori soojuslikku efektiivsust, kasutades lahjat kütusesegu. Turbulentse pihustussüüte eeliseks varasemate arenduste ees on asjaolu, et eelsüütekambri geomeetria ning selles olevate väikeste avade tõttu süüdatakse silindris antud lahja kütusesegu mitmes piirkonnas samaaegselt tänu keemilistele,

turbulentsetele ja soojuslikele mõjudele. Antud lahja kütusesegu süttib just sel viisil, kuna eelsüütekambris süttinud kütuseesegust tekkinud kuumad heitgaasid ning põlemisest tekkinud radikaalid paisatakse turbulentsete jugadena läbi eelsüütekambri avade mootori põlemiskambrisse [1].

Turbulentse pihustussüüte süsteeme saab klassifitseerida kaheks, aktiivseteks süsteemideks ning passiivseteks süsteemideks. Aktiivsetel süsteemidel pihustatakse läbi eraldi kütusepihusti eelsüütekambrisse kütust, seejuures aga passiivsetel süsteemidel eelsüütekambri kütusepihusti puudub. Mõlemat süsteemi ühendab asjaolu, et eelsüütekambri ruumala on vahemikus ~2%-10% silindri vabaruumalast (silindris olev tühi ruum, kui kolb on ülemises surnud seisus). Täiendavalt on turbulentsete pihustussüsteemide puhul eelsüütekambrid ühendatud silindriga läbi eelsüütekambri seintes olevate pisikeste (kuni 3mm diameetriga) avade. 3D CAD pilt aktiivsest pihustussüüte süsteemist on esitatud joonisel 1, allpool [1] [2].



Joonis 8. 3D CAD pilt aktiivsest pihustussüüte süsteemist. Allikas: [3].
Figure 1. 3D CAD image of an active type of turbulent jet ignition system. Source: [3].

Eeltoodud joonisel kujutatud turbulentse pihustussüüte süsteem on disainitud selliselt, et selle eelsüütekambri ruumala moodustab ~2% silindri vabaruumalast ning eelsüütekambril on 6 x 1,25mm diameetriga ava, mis ühendavad selle mootori põlemiskambriga. Antud pihustussüsteem paigaldub bensiinimootori süüteküünla pessa [3]. Antud artikli eesmärgiks on välja arendada katsemootorile (DB3500CL) turbulentse pihustussüsteemi eelsüütekamber, võttes arvesse varasemalt publitseeritud teaduskirjanduses kirjeldatud süsteemide omadusi. Täiendavateks piiritlevateks tingimusteks on komponentide tootmismugavus, *retrofit* võimalus ning olemasoleva kütusepihusti (03C 906 036E) kasutamine. Teisisõnu tähendab tagantjärele paigaldamist võimaldavate komponentide arendus seda, et katsemootori konstruktsiooni mitte-taastatav ümberehitus ei ole lubatud.

MATERIAL JA METOODIKA

Arenduse raames lähtutakse esmalt teaduskirjandusest ning nendes esitatud seostest-tulemustest. Kuna teaduskirjanduses on kirjeldatud erinevate disainide ja optimeerimisaspektidega pihustussüsteeme, siis optimaalsete parameetrite leidmisel eelistatakse teaduskirjanduses kirjeldatud süsteeme mille eelsüütekambri ruumala moodustab kuni ~5% silindri vabaruumalast [2].

Katsemootorile DB3500CL eelsüütekambri arendamisel, võetakse arvesse mootori geomeetriast tulenevaid iseärasusi, nagu näiteks mootori plokikaane kuju ning sellele kinnituvate elementide paigutus. Komponentide arendusel lähtutakse ka katsemootori tehnilistest parameetritest, mis on teaduskirjanduses esitatud. Antud tehnilised parameetrid on esitatud ka tabelis 1, allpool.

Tabel 1. Katsemootori DB3500CL tehnilised andmed. Allikas: [4]
Table 1. DB3500CL test engine's technical parameters. Source: [4]

Takte	4	Kepsu pikkus	84.8 mm
Silindreid	1	Dünaamiline ruumala, V_d	207.42 cm^3
Töömaht	208 cm^3	Silindri vabaruumala, V_c	28.28 cm^3
Võimsus	3.6 kW	Koguruumala, V_t	235.7 cm^3
Nimipöörlemiskiirus	3000 rpm	Surveaste	8

Kõik arendatavad komponendid peavad olema oma kujult ja keerukuselt standardsete CNC freespinkidega valmistatavad.

TULEMUSED JA ARUTELU

Teadusartiklite analüüsi tulemusena leiti, et pihustussüüte süsteemi põhikomponendi ehk eelsüütekambri geomeetria on piiritletud eelsüütekambri ja põlemiskambri ruumalasuhtega, pihustusavade arvuga, diameetriga, pihustusavade nurga/suunaga ning pihustusavade sügavusega.

Eelsüütekambri ruumala mõjutab võrdeliselt põlemiskambrisse jõudvate jugade intensiivsust, mis tekivad läbi pihustusavade eelsüütekambris oleva segu süttimise järel. Suurem eelsüütekambri suhteline ruumala soodustab pihustussüüte toimimist ning põlemiskambris lahjema kütusesegu kasutamist ka kõrgematel pööretel. Samas, on suuremate eelsüütekambri ruumalade puhul heitgaaside kogus suurem. Analüüsitud teadusartiklites jäid eksperimentaalsete eelsüütekambrite suhtelised ruumalad vahemikku ~2% kuni 8% silindri vabaruumalast [2] [5].

Teadusartiklite põhjal järeldati, et eelsüütekambri optimaalne pihustusavade arv on 6 ning antud pihustusavad peavad olema jaotatud võimalikult ühtlaselt, et tagada efektiivne kütusesegu süttimine silindris. Täiendavalt peavad pihustusavad olema suunatud selliselt, et neist paiskuvad joad ulatuksid võimalikult kaugele. Kui antud turbulentsed joad ulatuvad kas silindri seinteni või kolvini, siis joad jahtuvad ning põlemiskambris oleva segu süttimine aeglustub [2] [6].

Pihustusavade diameeter peaks madalamatel mootori pöörlemiskiiruste puhul jääma 1-3mm vahemikku. Väiksemate pihustusavade diameetrite puhul on täheldatud ka efekti kus silindrisse paisatakse eelsüütekambrist mitte leegid vaid põlemisjäägid, radikaalid ning heitgaasid. Selle järel tekkivate termiliste ning keemiliste reaktsioonide tulemusena on silindris oleva kütusesegu süttimine kiirem kui suurema diameetriga avade puhul.[5] [6].

Täiendavalt leiti, et eelistatud on aktiivset tüüpi pihustussüüte süsteemid, kuna antud süsteemid võimaldavad stabiilsemalt toimida lahjemate silindris olevate kütusesegude puhul kui passiivsed süsteemid. Erinevus on tingitud asjaolust, et passiivsete süsteemide puhul sõltuvad eelsüütekambris oleva õhu-kütuse segu parameetrid otsesemalt kaudse sissepritsega silindrisse jõudnud kütusesegu omadustest [6].

Teadusartiklitest kogutud info põhjal alustati aktiivset tüüpi eelsüütekambri arendamist DB3500CL katsemootorile. Kuna antud mootoritüüpi on varasemalt ka teadustöös kasutatud, siis arendamisel võeti aluseks mootori plokikaane ning ka silindri osaline 3D-skanneering. Antud skanneeringu abil mudeldati 3D CAD keskkonnas sisse plokikaane ning ka silindri (kus kolb on ülemises surnud seisus) olulisemad pinnad. Pilt plokikaanest koos originaalse süüteküünlaga on esitatud joonisel 2, allpool.

Joonis 2. Katsemootori plokikaas, pildistatuna kolvi suunast. Pildil on näha ka katsemootori süüteküünal.
Drawing 2. Test engine's cylinder head, pictured from the piston side. Engine's spark plug is also visible.

Jooniselt 2 on näha, et antud mootori puhul paikneb süüteküünal asümmeetriliselt. Teisisõnu ei asetse süüteküünal silindri teljel, vaid paikneb teljest eemal ning lisaks asetseb süüteküünal silindri telje suhtes nurga all.

Kuna pihustussüüte süsteemi ainus võimalik paigaldusviis antud mootori puhul on kasutada olemasolevat M14 suurusega süüteküünla pesa, siis selle paigutuse tõttu ei olnud võimalik projekteerida eelsüütekambrit sarnaselt teadusartiklites toodule. Seetõttu arendati teaduskirjandusest lähtuvalt sarnane, kuid teistsuguse geomeetria ning pihustusavade

paigutusega eelsüütekamber. Arendatud eelsüütekambri üldised parameetrid on toodud tabelis 2, allpool.

Tabel 2. Projekteeritud eelsüütekambri üldised parameetrid.
Table 2. General specifications of the designed prechamber.

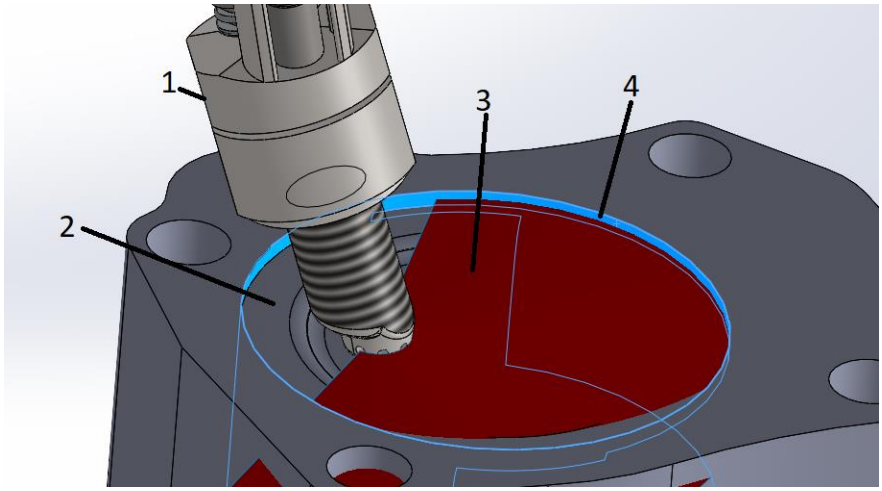
Pihustusava diameeter d_{ava}	1.5 mm
Pihustusavade arv, n	6
Pihustusavade jaotus	200 kraadi vahemikus, 40-kraadiste sammudega
Pihustusavade sügavus, l_{ava}	1.75 mm
Eelsüütekambri alumise osa sisemine läbimõõt, $d_{alumine}$	6.65 mm
Eelsüütekambri ruumala, V_{kamber}	1831 mm^3
Ruumala suhe, V_{kamber}/V_c	6,48%
Pihustusavade ristlõikepindala, S_{ava}	10.6 mm^2
Pihustusavade ristlõikepindala ja ruumala suhe, S_{ava}/V_{kamber}	0.058 1/cm
Pihustusava diameetri ja pikkuse suhe, d_{ava}/l_{ava}	0.86

Antud eelsüütekamber ületab seatud ~5% ruumala suhte eesmärki, kuna arenduse jooksul oli prioriteediks mitte-taastatavate modifikatsioonide vältimine ning eelsüütekambri pihustusavade võimalikult suur katvus ja nende optimaalne suund. Antud katsemootori plokikaane geomeetria ning väikese silindri vabaruumala tõttu ei ole suure tõenäosusega võimalik pihustusavade jaotusvahemikku oluliselt üle 200 kraadi suurendada. Seetõttu paigutati kõik kuus eelsüütekambri pihustusava eelmainitud 200-kraadisesse vahemikku, 40-kraadiste sammudega. Antud avade paigutusega on seega eeltoodud vahemikus turbulentsete jugade tihedus suurem, võrreldes eelnevalt teadusartiklites kajastatud infoga.

Tootmise lihtsustamise eesmärgil arendati eelsüütekamber kahest osast koostatavana. Eelsüütekambri ülemise osa külge kinnituvad süüteküünal (M10 keermega) ning otsesissepritsepihusti. Eelsüütekambri alumine osa kinnitub M14x1.25 keermega plokikaane originaalsesse süüteküünla pesasse. Eelsüütekambri mõlemad osad ühilduvad omavahel M22x1.5 keermega.

Eelsüütekambri mõlemad komponendid on disainitud prototüübi valmistamise lihtsustamiseks C45 materjalist. Kui peaks tulevikus ilmnema probleeme antud materjali tugevuse või töökindlusega, siis plaanitakse alternatiivina kasutada materjali 1.8509 (41CrAlMo7).

Joonisel 3 on esitatud turbulentse pihustussüsteemi teoreetiline pihustusala. Antud pihustusala näitab tõenäolist pihustuste suunda ideaaltingimustel, teisisõnu see ei võta arvesse turbulentsete jugade omadusi. See näitab ainult pihustusavade jaotust ja suunda, kui pihustussüütesüsteem on paigaldatud mootori külge.



Joonis 3. Turbulentse pihustussüüte süsteemi pihustusala. 1 - Turbulentne pihustussüsteem; 2 - Katsemootori kolb; 3 - Teoreetiline pihustusala (punane); 4 - Katsemootori silinder (sinine).
Drawing 3. Turbulent jet ignition system's jet spray area. 1 – Turbulent jet ignition system; 2 – Test engine's piston; 3 – Theoretical spray area (red); 4 – Test engine's cylinder (blue).

Eeltoodud joonisel ning tabelis esitatud pihustussüüte jaoks vajalik eelsüütekamber on antud arenduse esimene iteratsioon, mistõttu on tõenäoline, et mootori katsetuste käigus tehakse arendatud komponentidele ka teatavaid parendusi.

JÄRELDUSED

Töö käigus püstitatud eesmärgid said enamjaolt täidetud – disainiti valmis turbulentse pihustussüüte jaoks vajalik eelsüütekamber. Katsemootori geomeetria tõttu ei olnud aga võimalik tagada eelsüütekambri optimaalset, 360-kraadist pihustusala. Selle asemel arendati eelsüütekamber, mis tagab kuue pihustusavaga ligikaudu 200-kraadi laiuse pihustusala. Kuna arendatud komponentide puhul on tegemist arenduse esimese iteratsiooniga, siis katsetuste käigus võivad komponendid teatud määral muutuda. Tulevikus võiks antud eelsüütekambrile teha ka 3D CFD (*Computational Fluid Dynamics*) analüüsid, et näha erinevate parameetrite mõju süsteemi toimimisele.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] E. Toulson, H. Schock ja W. Attard, „A Review of Pre-Chamber Initiated Jet Ignition Combustion Systems,“ *SAE International,* 2010.

[2] V. Dilber ja M. Sjeric, „Optimization of Pre-Chamber Geometry and Operating Parameters in a Turbulent Jet Ignition Engine,“ *Energies,* kd. 15, nr 4758, 2022.

[3] W. Attard, N. Fraser, P. Parsons ja E. Toulson, „A Turbulent Jet Ignition Pre-Chamber Combustion System for Large Fuel Economy Improvements in a Modern Vehicle Powertrain,“ *SAE International,* 2010.

[4] V. Raide, R. Ilves ja J. Olt, „Developing and Testing Air-fuel Mixture Heating System for Internal Combustion Engine,“ *Engineering for Rural Development,* nr 20, pp. 1393-1401, 2021.

[5] W. Attard ja H. Blaxill, „A Single Fuel Pre-Chamber Jet Ignition Powertrain Achieving High Load, High Efficiency and Near Zero NOx Emissions,“ *SAE International,* kd. 5, nr 3, pp. 734-746, 2011.

[6] C. Alvarez, G. Couto, V. Roso, A. Thiriet ja R. Valle, „A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines,“ *Applied Thermal Engineering,* nr 128, pp. 107-120, 2018.

[7] Bosch GmbH, „Injection Valve EV 14,“ Bosch Motorsport, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/en-GB/49225227208430731.html#/Tabs=9007199303980683/. [Kasutatud 05 Aprill 2023].

[8] Robojax, „SG90 9g Micro Servo,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://robojax.com/learn/arduino/robojax-servo-sg90_datasheet.pdf. [Kasutatud 03 Aprill 2023].

Metaani põlemisprotsessi simulatsioon suletud süsteemis

A.Truver

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. Main purpose of this article is to simulate how does methane combusts in different environmental conditions (1000K, 1500K and 2000K) and compare the obtained data using graphics. Calculations are made by Cantera software, which is used to solve chemical kinetics, thermodynamics and transport processes problems.

Keywords: Cantera, methane, combustion.

SISSEJUHATUS

Metaan on oluline kütus nii transpordis kui ka soojuselektrijaamades elektri tootmisel [2]. Metaani põlemisprotsessi simuleerimine annab võimaluse muuta erinevaid põletussüsteeme efektiivsemaks. Cantera on avatud lähtekoodiga programm, kus erinevate tööriistade komplektide abil saab lahendada keemilise kineetika, termodünaamika ja transpordiprotsesside probleeme. [1] Näitena võib tuua tarkvara võimaluse simuleerida erinevate gaaside põlemisprotsesse. Käesoleva artikli eesmärgiks on simuleerida metaani põlemist erinevatel keskkonnatemperatuuridel, et demonstreerida Cantera simulatsioonitarkvara võimalusi.

MATERIAL JA METOODIKA

Metaani põlemisprotsessi simulatsiooniks kasutati Cantera tarkvara (MatLabi põhine). Simulatsioonid viidi läbi erinevatel keskkonnatemperatuuridel 1000K, 1500K ja 2000K. Simulatsioonis on arvestatud, et põlemine toimub hapniku keskkonnas. Lisaks temperatuurile oli määratud ka rõhk 10^5 Pa ning gaasi segu molekulmass 26.68 kg/kmol.
Programmi kasutamine:

Simulatsiooni alustamiseks tuleb fikseerida, millist gaasi segu hakatakse kasutama. Selle jaoks tuleb sisestada Matlabi käsuakna järgmise koodi:

```
gas1 = GRI30
```

GRI30 on 53 ainete ning nende 325 elementaarse keemilise reaktsiooni kogumik, mis oli loodud metaani põlemisreaktsioonide simuleerimiseks. [3]

Simulatsiooni läbiviimiseks peab määrama põlemiskeskkonna temperatuuri ja rõhu. Lisaks tuleb määrata kasutatav gaas. Metaani molekuli valem on CH_4. Programmi sisestatakse kood:

```
set(gas1, 'Temperature', 1000, 'Pressure', 1.e5, 'MoleFractions', ...
    'CH4:1,O2:2');
```

Tulemuste arvutamiseks tuleb sisestada käsk:

gas1()

Programm teeb vajalikud arvutused ning väljastab tulemuse.

```
>> gas1()

  gri30:

      temperature   1000 K
         pressure   1e+05 Pa
          density   0.32088 kg/m^3
  mean mol. weight   26.68 kg/kmol
   phase of matter   gas

                         1 kg             1 kmol
                    ---------------   ---------------
          enthalpy       1.1826e+05        3.1551e+06  J
   internal energy      -1.9338e+05       -5.1594e+06  J
           entropy           9391.1        2.5055e+05  J/K
    Gibbs function      -9.2729e+06       -2.474e+08   J
 heat capacity c_p           1791.4             47794  J/K
 heat capacity c_v           1479.8             39480  J/K

                     mass frac. Y      mole frac. X     chem. pot. / RT
                    ---------------   ---------------   ---------------
                O2          0.79956           0.66667           -26.984
               CH4          0.20044           0.33333           -35.296
     [  +51 minor]                0                 0
```

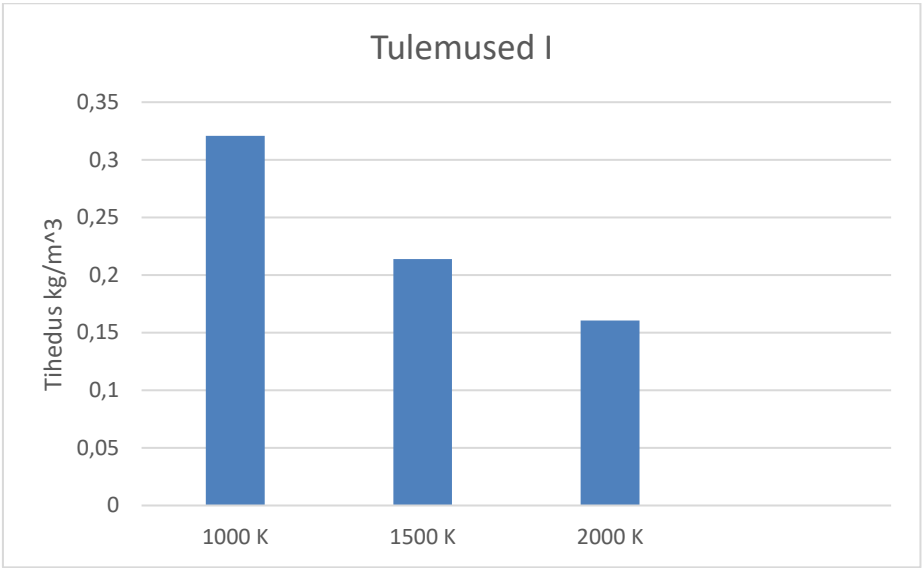
Joonis 9. Metaani põlemise simulatsiooni tulemused temperatuuril 1000K.

Kalkulatsiooni tulemus algab baasandmetest, kus on näha katse temperatuuri, rõhku, tiheduse, molaarmassi ning gaasi olekut. Järgmine lahter näitab energia muutusi 1 kg ja 1kmol kohta. Entalpia (*Enthalpy*) – näitab energia hulka, mis on saadaval soojuse muundamiseks kindlal temperatuuril ja rõhul (1000 K ja 100000 Pa), ühikuks on J(džaul). [4] Siseenergia (*Internal energy*) - on gaasis olevate osakeste kineetiliste energiate summa, ühikuks on J(džaul). [5] Entroopia (*Entropy*) – näitab süsteemi häiret ehk kui palju energiat ei ole töö tegemiseks saadaval, mida suurem on entroopia, seda vähem energiat on saadaval, ühikuks J/K. [6] Gibbs vabaenergia (*Gibbs function*) - mõõdab termodünaamilise süsteemi maksimaalset või pöörduvat tööd, mida saab vastu võtta konstantsel temperatuuril ja rõhul, ühikuks on J. [7] Lisaks, programm näitab ka soojusmahtuvust konstantsel mahul ja rõhul (*heat capacity constant volume and pressure*), ühikuks on J/K. Viimases lahtril on näha valitud gaasi segu, mis koosneb hapnikust ja metaanist, samuti on välja toodud nende keemiline potentsiaal (*chemical potential*), mis näitab kui palju muutub entalpia. [8]

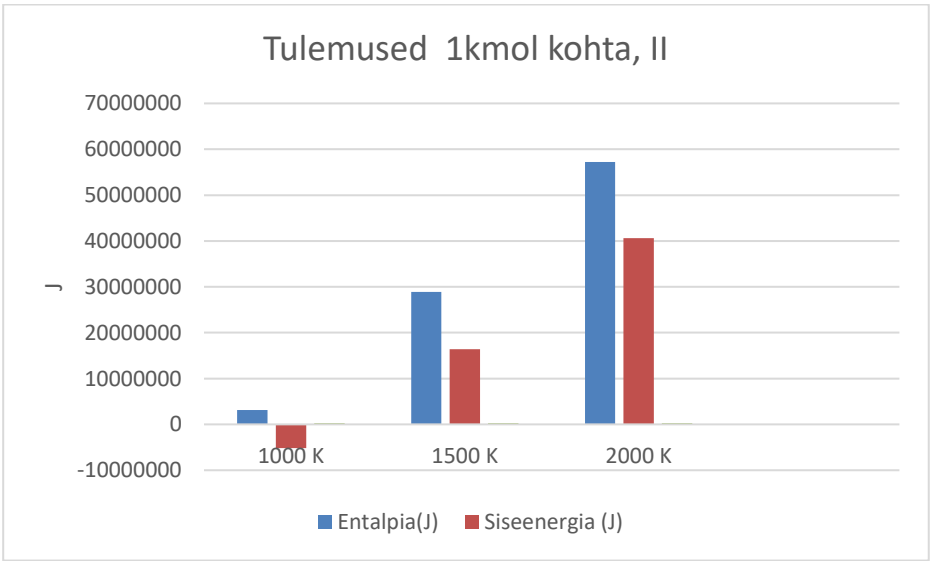
Andmete võrdlemiseks viidi läbi täiendavalt kaks simulatsiooni temperatuuril 1500K ja 2000K.

TULEMUSED JA ARUTELU

Järgmised graafikud on tehtud metaani põlemisprotsessi Cantera tarkvara poolt arvutatud tulemuste põhjal. Võrreldud on olulisemaid andmeid. (Joonis 2, 3 ja 4)

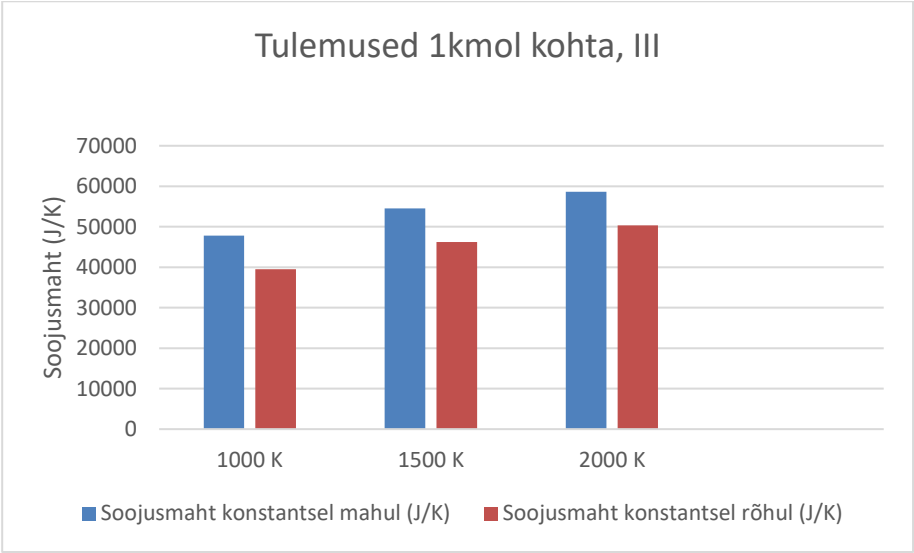


Joonis 2. Tiheduse võrdlus.



Joonis 3 Entalpia ja siseenergia tulemuste võrdlus.

Teise graafiku andmete järgi saab järeldada, et mida kõrgem on temperatuur, seda kõrgem on entalpia (soojussisaldus) näitaja. Energia eraldumisel toimub eksotermiline protsess (joonis 3).



Joonis 4. Soojusmahtuvuse tulemuste võrdlus.

Graafik näitab, et soojusmahu kasv toimub ühtlaselt nii konstantsel mahul, kui ka konstantsel rõhul (joonis 4).

JÄRELDUSED

Võttes arvesse kõik saadud tulemused saab järeldada, et entalpia ja soojusmahu näitajad kasvavad tempretuuri tõusmisel. Toimub keemiline reaktsioon ehk eksotermiline protsess, kus esialgne aatomite vaheline side katkeb ning hiljem tekib uus keemiline side, selle tulemusena eraldub energia. Andmete järgi gaasi tihedus kahanes, see toimub just põlemise ajal, kuna ruumala sel ajal suureneb.

KASUTATUD ALLIKAD

[1] Cantera developers, „Cantera,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://cantera.org/.

[2] Vikipeedia, vaba entsüklopeedia, „Metaan,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://et.wikipedia.org/wiki/Metaan.

[3] Cantera developers , „Cantera/Matlab tutorial,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://cantera.org/tutorials/matlab-tutorial.html.

[4] ООО "Ксирон-Холод", „Энтальпия,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.xiron.ru/content/view/23194/28/.

[5] Bodner Research Web, „Energy, Enthalpy, and the First Law of Thermodynamics,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch21/chemical.php#inter.

[6] Paul Peter Urone, California State University, Sacramento. Roger Hinrichs, State University of New York, College at Oswego, „Second Law of Thermodynamics: Entropy,“ [Võrgumaterjal].

Available: https://openstax.org/books/physics/pages/12-3-second-law-of-thermodynamics-entropy.

[7] ProfessorMajid Ghassemi, Dr.Azadeh Shahidian, in Nano and Bio Heat Transfer and Fluid Flow, „Thermodynamics,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gibbs-function#:~:text=The%20Gibbs%20free%20energy%20(Gibbs,temperature%20and%20pressure%20%5B3%5D..

[8] C. Kittel; Preface to his book: Introduction to Solid State Physics, „The chemical potential,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def_en/kap_2/advanced/t2_4_1.html.

Põldroboti keskliigendi analüüs

K. Valdre

[1]Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

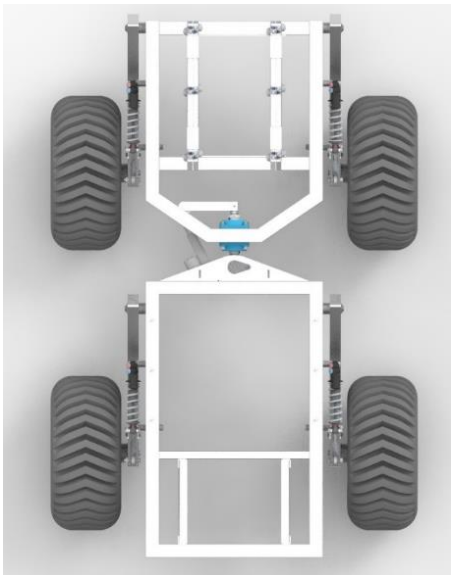
Abstract. Focus of this article is to determine kinematics of the articulated joint of an agricultural robot. Electronic actuator was used in design for steering automation of the robot. Several motion equations were used to determine the optimal length of joint members. Based on actuator load and payload, the strength analyses of the robot articulated joint was performed, providing maximum stress and deformation information of the joint.

Keywords: Finite Element Method, kinematics, articulated joint, stress, deformation

SISSEJUHATUS

Autonoomse roboti projekteerimisel on üheks peamiseks probleemiks juhtimissüsteemi arendamine ja konstrueerimine. Võimalikuks lahenduseks on liigendmehhanismi kasutamine.

Keskliigendi projekteerimisel on oluline selgitada välja liigendmehhanismi kinemaatika ja süsteemis mõjuvad jõud [1]. Saadud teabe põhjal on võimalik teostada tugevusanalüüs keskliigendi konstruktsioonile ning hinnata idee töökindlust erinevate stsenaariumite korral. Artikli eesmärk on anda ülevaade, kuidas probleemile läheneti ning millised on tulemused.

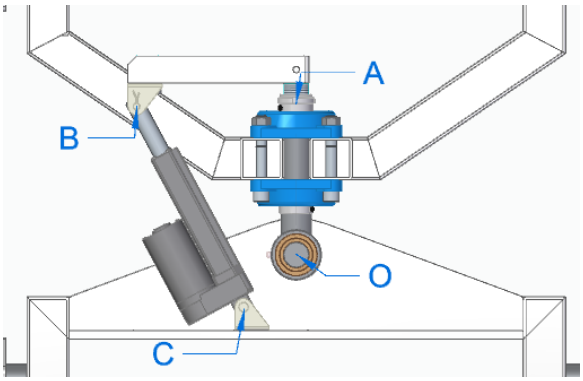


Joonis 1. Uuritava põldroboti konstruktsioon.

MATERIAL JA METOODIKA

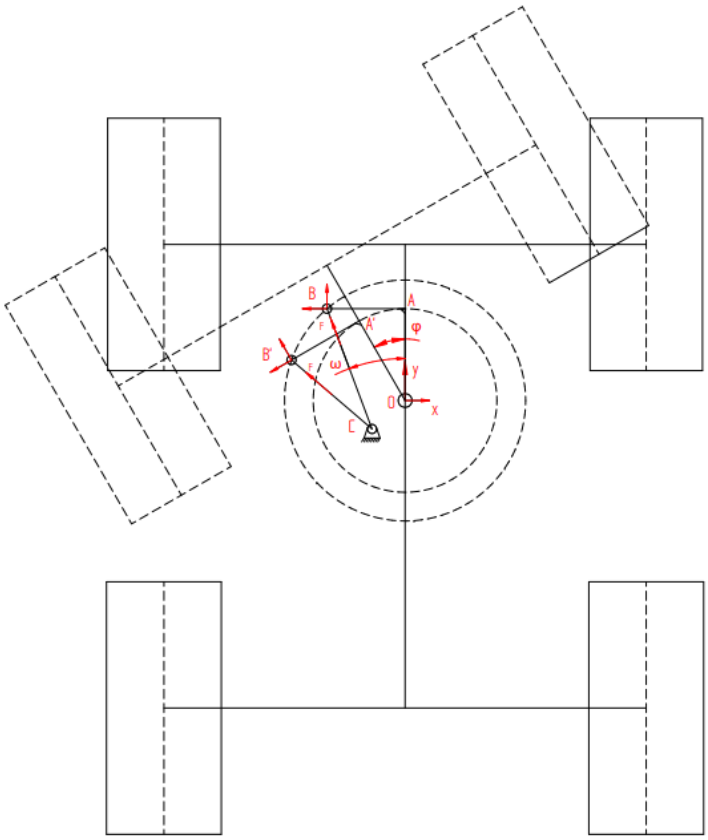
Põldroboti keskliigendi analüüsiks koostati liikumisvõrrandid, leiti optimaalsed aktuaatori kinnituspunktid ja jõuõlgade pikkused, teostati tugevusanalüüs kasutades LEM (lõplike elementide meetodit).

Liikumisvõrrandite koostamiseks kasutati trigonomeetrilisi võrrandeid, mis võimaldavad massipunkti liikumist kirjeldada [1]. Võrrandite koostamise lihtsustamiseks ning mehhanismi visualiseerimiseks koostati kinemaatiline skeem (joonis 3). Kinemaatika skeemi aluseks on põldroboti keskliigendi konstruktsioon, konstruktsioon koos sõlmpunktidega on näidatud joonisel 2.



Joonis 2. Põldroboti keskliigendi konstruktsioon, *O* – liigendi telg, *A* – kinnituspunkti *B* projektsioon liigendi teljele, *B* – aktuaatori kinnituspunkt 1, *C* – aktuaatori kinnituspunkt 2.

Skeemil (joonis 3) on kujutatud punktide A ja B liikumist sõltuvalt pöördenurgast φ. Liikumistrajektooride arvutamiseks on võetud koordinaatide alguspunktiks liigendi tsenter. Nurk ω tähistab aktuaatori ja lüli *OA* vahelist nurka. Lülid *OA* ja *AB* on üksteise suhtes risti ja nende pikkus on muutumatu. Lüliga *BC* tähistatakse aktuaatorit, mille pikkus muutub sõltuvalt pöördenurgast. Skeemile on kantud jõud *F*, mis simuleerib aktuaatori poolt tekitatud jõudu. Vektoritega F_1 ja F_2 visualiseeritakse jõu *F* komponente, kusjuures jõuvektor F_1 on lüliga *AB* kollineaarne ja F_2 on lüliga AB risti. Jõud *F* on jagatud komponentideks, et leida moment koordinaatide alguspunkti *O* suhtes.



Joonis 3. Põldroboti keskliigendi liikumist kujutav kinemaatiline skeem.

Võrrandite koostamisel on lähtutud asjaolust, liikumine on tasapinnaline ja on kirjeldatav kahe ruumi koordinaadiga [1;3]. Liikumise kirjeldamiseks leitakse punktide koordinaadid koordinaatide alguspunkti suhtes.

Punkti *A* liikumist kirjeldavad seosed [2]:

$$x_A(\varphi) = OA \cdot \sin\varphi \quad (1)$$

kus $x_A(\varphi)$ – Punkti A x koordinaat, mm;

OA – lüli AB pikkus, mm.

φ – pöördenurk, °.

$$y_A(\varphi) = OA \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

kus $y_A(\varphi)$ – punkti *A* *y* koordinaat.

Jooniselt 3 on näha, et punkt *B* liigub mööda ringjoont, mis on kontsentriline punkti A liikumisega. Seega on punkti *B* liikumine määratletav *OB* pikkusega [2].

$$OB = \sqrt{OA^2 + AB^2} \tag{3}$$

kus *OB* – punktide *O* ja *B* vaheline kaugus, mm;
OA – lüli *OA* pikkus, mm;
AB – lüli *AB* pikkus, mm.

Lõik *OB* on sisendlüli *OA* suhtes nurga all, nurga suurus on leitav lülide *AB* ja *OB* vahelisest seosest:

$$\sin\alpha = \frac{AB}{OB} \rightarrow \alpha = \text{asin}\frac{AB}{OB} \tag{4}$$

kus α – lülide *AB* ja *OB* vaheline nurk, °.

Seega on punkti *B* koordinaadid kirjeldatud funktsioonidega:

$$x_B(\varphi) = OB \cdot \sin(\varphi - \alpha) \tag{5}$$
$$y_B(\varphi) = OA \cdot \cos(\varphi - \alpha) \tag{6}$$

Aktuaatori pikkus *BC* sõltub punktide *B* ja *C* koordinaatidest, kusjuures punkti *C* koordinaat ei ole funktsioonilises sõltuvuses pöördenurgast vaid on fikseeritud.

$$BC(\varphi) = \sqrt{(x_B(\varphi) - x_C)^2 + (y_B(\varphi) - y_C)^2} \tag{7}$$

kus $BC(\varphi)$ – aktuaatori pikkus või punktide *B* ja *C* vaheline kaugus, mm.

Järgnevalt seatakse põldroboti konstruktsioonist tulenevad piirangud, millega määratletakse ära keskliigendi lülide pikkused või nende vahemikud. Piirangud tulenevad robotplatvormi gabariitmõõtmete nõuetest ja aktuaatori pikkusest. Konstruktsioonilised piirangud on esitatud tabelis 1.

Tabel 1. Konstruktsiooni lülide pikkusele seatud piirangud

Lüli või dimensiooni nimetus	**Suurus ühikuga**
Pöördenurk φ	-35°…35°
Lüli *OA*	176 mm
Lüli *AB*	150…190 mm
Aktuaatori pikkus *BC*	217…317 mm
Kinnituspunkti *C* y -koordinaat	- 62 mm
Kinnituspunkti *C* x - koordinaat	-150 …-50 mm

Valemid ja piirangud on kantud tabelarvutus programmi *MS Excel*, milles kasutati andme analüüsi paketti kuuluvat optimeerimise tööriista *Solver* [2]. Nimetatud tööriistale määrati optimeerimisülesanne – sisestati tabelis 1 nimetatud piirangud lülide pikkuse osas ning seati eesmärgiks saavutada võimalikult kõrge keskmine moment tookäigu vältel (st arvutati aktuaatori poolt tektitatud moment koordinaatide algpunkti suhtes vahemikus φ = -35°…35° sammuga 1°).

Jõumomendi arvutamiseks kasutati valemit [4]:

$$M_O(\varphi) = F_1 \cdot OA + F_2 \cdot AB \quad (8)$$

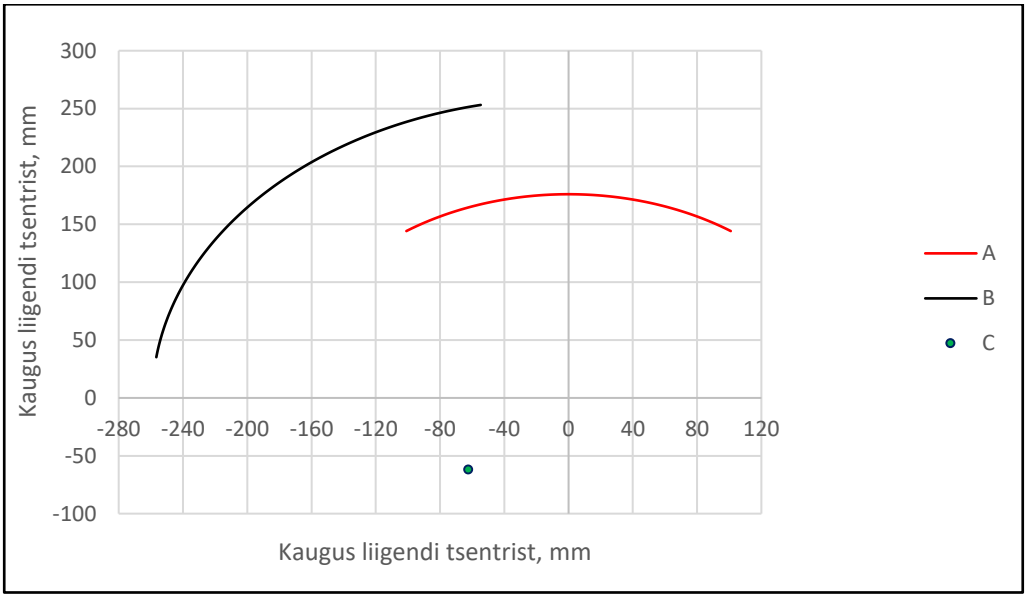
kus $M_O(\varphi)$ – jõumoment punkti O suhtes, Nm;
F_1, F_2 – aktuaatori poolt tektitatud jõu komponendid, N.

MS Exceli Solver tööriistaga leitud õlgade pikkused ja aktuaatori kinnituspunkti positsioon *C* on esitatud tabelis 2.

Tabel 2. Leitud keskliigendi jõuõlgade pikkused ja aktuaatori kinnituspunkti asukoht

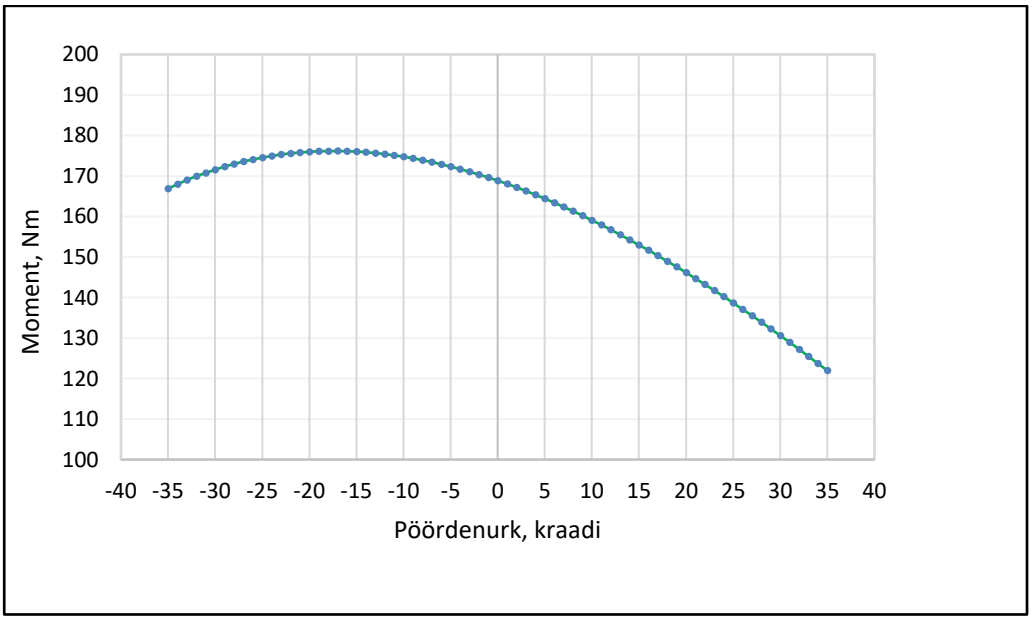
Lüli või dimensiooni nimetus	**Suurus ühikuga**
Lüli *OA*	176 mm
Lüli *AB*	190 mm
Aktuaatori pikkus *BC*	217…315,2 mm
Kinnituspunkti *C* y -koordinaat	- 62 mm
Kinnituspunkti *C* x - koordinaat	-62,5 mm

Valemite põhjal on koostatud graafikud sõlmpunktide liikumise visualiseerimiseks. Joonisel 4 on näha punkti *A* ja punkti *B* liikumistrajektoorid töökäigu vältel.

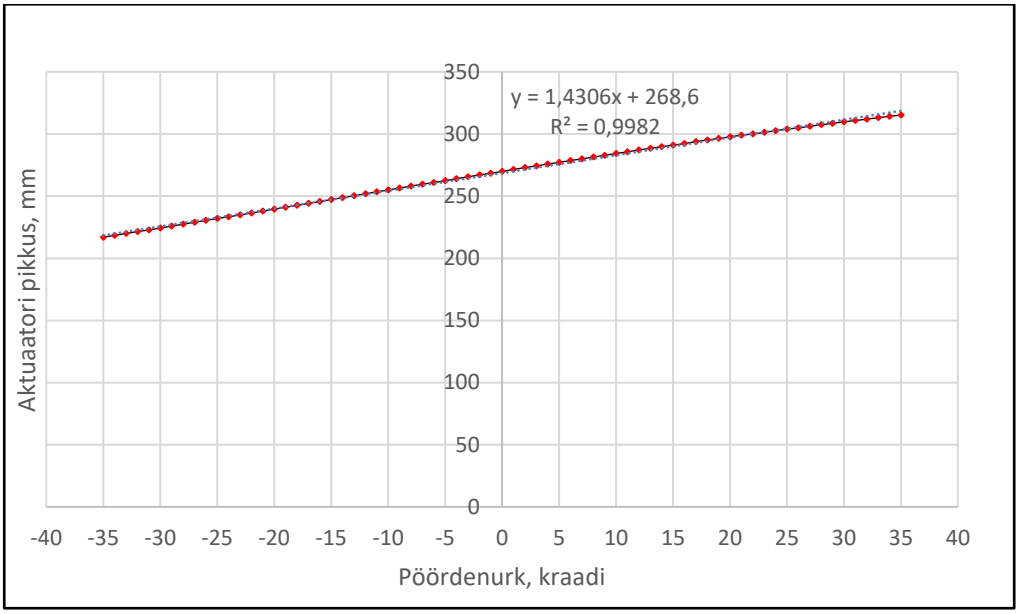


Joonis 4. Sõlmpunktide *A* ja *B* liikumistrajektoorid sõltuvalt sisendlüli pöördenurgast.

Jõumomendi visualiseerimiseks on koostatud joonis 5, aktuaatori jõu suuruseks on võetud 2000 N. Jooniselt on näha, et moment ei ole töökäigu vältel lineaarne ning muutub vahemikus 176-122 Nm.



Joonis 5. Momendi muutus töökäigu vältel.



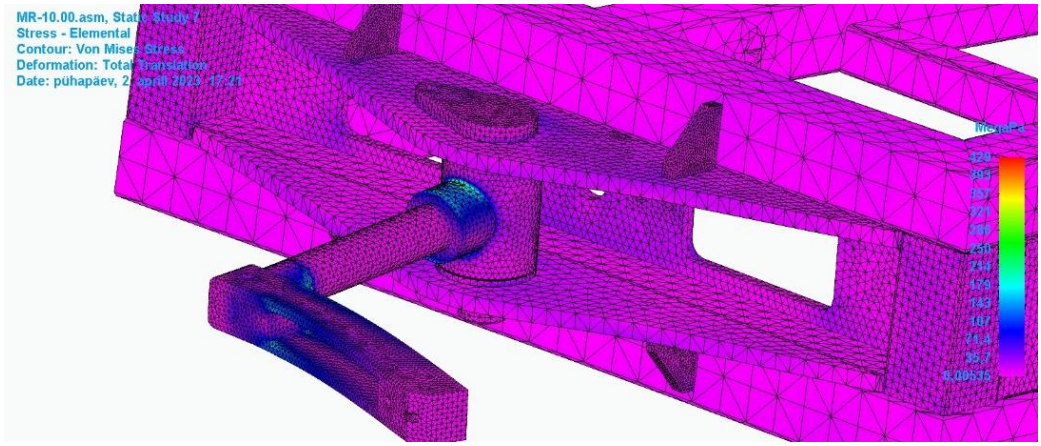
Joonis 6. Aktuaatori pikkuse ja pöördenurga vaheline seos, punktiirjoonega märgitud lineaarvõrrandi lähendus.

Jooniselt 6 saab järeldada, et aktuaatori pikkuse ja pöördenurga seos on sisuliselt lineaarne, korrelatsiooni kordaja regressiooni puhul on 0,9982. See võimaldab elektroonilist juhtimist lihtsustada kasutades võrrandit y = 1,4306x+268,6.

Järgnevalt teostati tugevusanalüüs kandes konstruktsioonile koormused. Koormuste määramisel lähtuti olukorrast, kus üks pool liigendist (võll) on laagri pindadest fikseeritud ning teisele liigendi poolele kanti koormus. See peaks simuleerima olukorda, kus roboti esiosa on fikseeritud ning tagumine osa ripub õhus. Koormuse suuruseks võeti 2000 N, mis on maksimaalne roboti ühe poole kandevõime. Koormus jagati toru raami pealmisele tasapinnale. Lisaks kanti mudelile ka aktuaatori jõud. LEM simulatsiooni tulemused on esitatud joonistel 7-8.

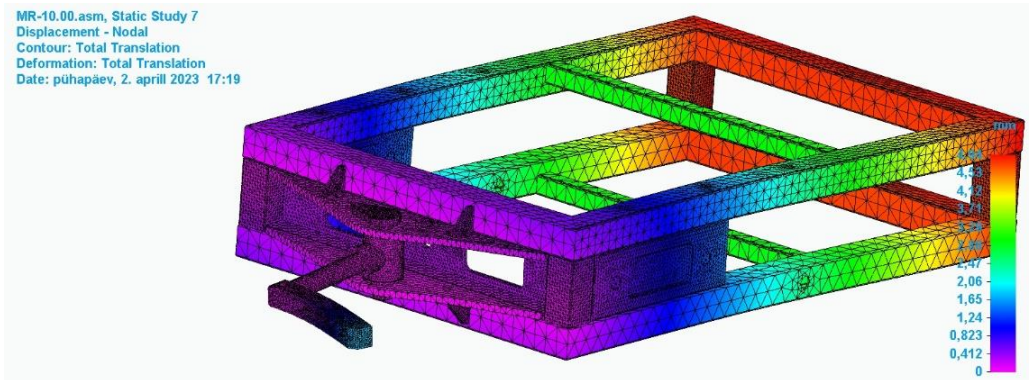
TULEMUSED JA ARUTELU

LEM simulatsiooni tulemusena selgus, et maksimaalne materjali sisepinge 429 MPa esineb piirkonnas, kus võll on puksi sisse istatud ning selle võib autori hinnangul käsitlemata jätta kuna ekstreemum on suure tõenäosusega tekkinud terava serva pinge kontsentratsiooni tõttu. Idee kohaselt on võll puksi külge keevitatud, mida simulatsioon ei arvesta. Võlli ja puksi ühenduskohas ulatub materjalis tekkiv pinge 250 MPa-ni. Valdavalt on konstruktsioonis pinged jaotunud ühtlaselt ning ei ületa 50 MPa. Konstruktsiooni kaalu vähendamiseks on võimalus optimeerida väiksema ristlõikega nelikanttoru kasutamisega (vahetada 50x50 profiilmaterjal 30x30 materjali vastu). Keskliigendi konstruktsioonis esinevad sisepinged on näidatud joonisel 7. Maksimaalne pinge aktuaatori kinnituslülis jääb alla 150 MPa.



Joonis 7. Materjalides esinevate sisepingete jaotus konstruktsiooni, suurendatud vaade.

Lisaks materjali sisepingetele on üks konstruktsiooni tugevuse näitaja läbipaine [5]. Läbipainde abil saab hinnata tekkivaid siirdeid erinevates konstruktsiooni piirkondades. Suurimad siirded esinevad raami tagumises osas, mis asetseb liigendist kõige kaugemal. Maksimaalseks siirdeks on 4,94 mm.



Joonis 8. Konstruktsiooni läbipainded 2000 N suuruse jaotatud koormuse korral.

JÄRELDUSED

Keskliigendi analüüsi jaoks püstitatud ülesandeid said käsitletud ja lahendatud. Koostatud liikumisvõrrandid võimaldavad liigendmehhanismi kinemaatikat selgitada ning lihtsustavad aktuaatori ja kinnituspunkti positsiooni valikut. Aktuaatori pikkuse ja pöördenurga vahelise seose kirjeldamiseks sobib võrrand y = 1,4306x+268,6. Koormates konstruktsioon 2000 N suuruse jõuga tekivad ohtlikes lõigetes maksimaalselt 250 MPa suurused sisepinged ning kuni 4,94 mm suurune läbipaine.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] J-S. Zhao, S-T. Wei, „Kinematics of Articulated Planar Linkages", Frontiers in Mechanical Engineering, 7:774814, 2021.
[2] A.Aan, „Mathcadi tarkvarapõhine modelleerimine,visualiseerimine ja simuleeriminemehaanikas", Eesti Maaülikool, 2015.
[3] X.Zhang, Y. Liu, T. S Huang, „Articulated joint estimation from motion using two monocular images", Pattern Recognition Letters,Volume 25, Issue 10, 2004.
[4] A.Salupere, „Staatika" Tallina Tehnikaülikool [Online] Available: https://www.ioc.ee/~salupere/lk/Staatika_2006.pdf. [Accessed 02.04.23]
[5] P.Kulu, P.Põdra, „Mehaanikainseneri käsiraamat", Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2021.

ERGONOOMIKA

Meditsiinilabori töötajate skeletilihasvaevuste esinemine

Prevalence of musculoskeletal disorders among medicine laboratory personnel

K. Ilves[1], K. Vahur [1, 2], E. Merisalu [1]

[1]Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogite õppetool

[2]Tartu Tervishoiu Kõrgkool, Füsioteraapia ja tervisekaitse osakond

Abstract. The aim of this study was to find out musculoskeletal disorders (MSD) among medicine laboratory personnel and to evaluate the effectiveness of ergonomic interventions in reducing MSD-s. The prevalence of MSD-s was assessed using the Nordic Musculoskeletal Questionnaire (NMQ). An intervention was carried out for the employees, which included ergonomic training and individual recommendations to improve the workplace ergonomics, working methods and postures among medicine laboratory personnel. The study was conducted among the employees of the SA TÜK Ühendlabor (n=17). The survey and repeated counseling lasted for six months in five stages. The results revealed that before the intervention period MSD symptoms were present in almost all the subjects. Before the intervention, the main areas where the MSD symptoms occurred were the lower back (76.5%), neck (70.6%), upper back (58.8%). After the interventions, the average rating of pain presence in almost all body regions decreased. All observations that occurred after the interventions were pooled together and the statistically significant differences of pain prevalence were found in the left forearm (p=0.01) and lower limb(p=0.01). Thus, it can be concluded that the intervention methods reduced musculoskeletal complaints in some body regions of the medical laboratory workers.

Keywords: Musculoskeletal disorders, ergonomic intervention, laboratory technicians, nordic questionnaire

SISSEJUHATUS

Skeleti-lihaskonna vaevused (SLV) on üks kõige sagedasemaid tööga seotud vaevusi. Üle kogu Euroopa on miljoneid inimesi, kes võivad vaevuste tõttu olla mõjutatud. SLV-d võivad esineda ühes või mitmes kehapiirkonnas - seljas, kaelas, õlgades, üla- ja alajäsemetes. [1] SLV-sid võivad põhjustada erinevad tegevused nagu näiteks liigse jõu kasutamine, korduvliigutused, ebaloomulik kehahoiak, sundasendid ja vibratsioon [2]. Eestis on iga aastaga hakatud järjest rohkem haigestuma skeleti- lihaskonna ja sidekoe haigustesse [3]. Terviseameti 2020. aasta kokkuvõttest on näha, et Eestis on kõige sagedasemaks kutsehaigestumise ja tööst põhjustatud haigestumise põhjuseks SLV-d. 2020. aastal diagnoositi kokku 22 kutsehaigestumise juhtumit, millest 81% oli skeleti-lihaskonna ja sidekoehaigused. Tööst põhjustatud haigestumisi diagnoositi 87 inimesel ning SVL-d moodustasid üle poole (53,3%) neist haigusjuhtudest. [4] Laboritöötajatel on risk haigestuda SLV-desse, kuna töö tegemisel on vaja kasutada staatilisi ja ebamugavaid tööasendeid, korduvliigutusi ja peenmotoorikat nõudvaid liigutusi. [5] Ülevaade varasematest uuringutest näitab, et laboritöötajatel üheks kõige sagedasemaks valupiirkonnaks on pahkluud või jalad, kael, selg või kogu keha [6–11]. Selleks, et

leevendada ja vähendada SLV-de esinemist, on hakatud rakendama ergonoomilisi sekkumistegevusi. Sekkumistegevuse tõhusust uurisid Etuknwa ja Humpheries viies läbi kirjanduse analüüsi (*n*=13) varasemalt tehtud uuringute põhjal. Leiti, et koolitused tõhusad meetmed, et vähendada ja ennetada SLV-de levimust, kuid üheks oluliseks faktoriks koolituste tõhususe juures on koolitusele lähenemine ja läbiviimise metoodika. [12] Uurimistöö eesmärgiks on selgitada SLV-de levimus meditsiinilabori töötajate seas ning sekkumistegevuste mõju SLV esinemisele.

MATERIAL JA METOODIKA

Antud uurimistöö on üks osa Kristi Vahuri doktoritööst, mis uurib SLV levimust meditsiinilabori töötajate hulgas ning hindab ergonoomikaliste sekkumistegevuste mõju SLV vähenemisele. Eesmärgi täitmiseks loodi kaks katsegruppi, kus üks grupp sai võimlemiskava ja teine grupp ergonoomika alase koolituse koos individuaalsete soovitustega töökoha, töövõtete ja -asendite parandamiseks. Antud uurimistöö käsitleb teist katsegruppi (*n*=17), kes igal kohtumisel täitsid ankeetküsimustiku. Üheks ankeetküsimustiku osaks oli NMQ küsimustik *(Nordic Musculoskeletal Questionnaire).* Uuritavatel paluti mõelda viimasele seitsmele päevale ning hinnata neil esinenud vaevuseid erinevates kehapiirkondades. Vaevusi oli võimalik hinnata 1-5 skaalal, kus (1) ei esine, (2) vähene, (3) mõõdukas, (4) tugev, (5) väga tugev. Sekkumisperiood oli 8 nädalat. Katsegrupi jälgimine toimus pooleaasta vältel ning jagunes viieks etapiks, täpsem kirjeldus etappidel tehtud tegevustest on näha tabelist 1.

Tabel 1. Uuringu etapid ja tegevuste kirjeldus
Tabel 1. Study stages and description of activities

Etapp	Mõõtmiste periood	Sekkumistegevuse kirjeldus
I	Enne sekkumist: detsember 2021 - veebruar 2022	Viidi läbi ankeetküsitlus. Hinnati töökohtade ergonoomilisust ankeetmeetodi abil.
II	Sekkumine: veebruar-märts 2022	Uuritavatele saadeti koolituslink ning soovitused, kuidas töökohta ergonoomilisemaks muuta.
III	Kohe peale sekkumist: aprill-mai 2022	Viidi läbi ankeetküsitlus. Hinnati töökohtade ergonoomilisust ankeetmeetodi abil.
IV	2 kuud peale sekkumist: juuni 2022	Viidi läbi ankeetküsitlus. Hinnati töökohtade ergonoomilisust ankeetmeetodi abil.
V	6 kuud peale sekkumist: okt-nov 2022	Viidi läbi ankeetküsitlus. Hinnati töökohtade ergonoomilisust ankeetmeetodi abil. Kõik uuritavad said uuesti töökoha muutmiseks soovitused meilile.

Andmetöötlus viidi läbi *MS Exceliga*. Ankeetküsimustikud sisestati käsitsi andmetöötlusprogrammi magistrandi poolt. Statistiline andmetöötlus tehti *MS Excel* programmis ning gruppide võrdluseks kasutati T-testi ja *GraphPad* veebikalkulaatorit (https://www.graphpad.com/quickcalcs/ttest1/?format=SD). Tulemuste tõlgendamiseks kodeeriti ankeetküsimustiku vastused ning seejärel arvutati hinnangute keskmised väärtused (±SD). Statistilise olulisuse nivooks võeti $p < 0,05$. Uuringu läbiviimiseks saadi nõusolek uuritavatelt ning kooskõlastus Tartu Ülikooli Inimuuringute EetikaKomiteelt (Protokolli number: 333/T-24). Kõik uuringu käigus käsitletud ankeetküsimustikud hoiustatakse magistrandi ja doktorandi parooliga kaitstud arvutis ning paberkandjal olevad ankeedid doktorandi juures.

TULEMUSED JA ARUTELU

Uuring toimus SA TÜK Ühendlabori töötajate hulgas, kes andsid nõusoleku katses osaleda. Kokku oli katsegrupis 17 uuritavat, nendest 10 Tartus ning 7 Tallinnas. Jälgimisperioodi ajal oli katsegrupist lahkujaid 3, kes avaldasid soovi loobuda uuringus osalemisest enne sekkumisperioodi algust. Tabelist 2 on näha, kuidas jagunesid uuritavad etappide lõikes.

Tabel 2. Katsegrupi suurused poole aastase jälgimisperioodi ajal
Tabel 2. Number of subjects during the half-year follow-up period

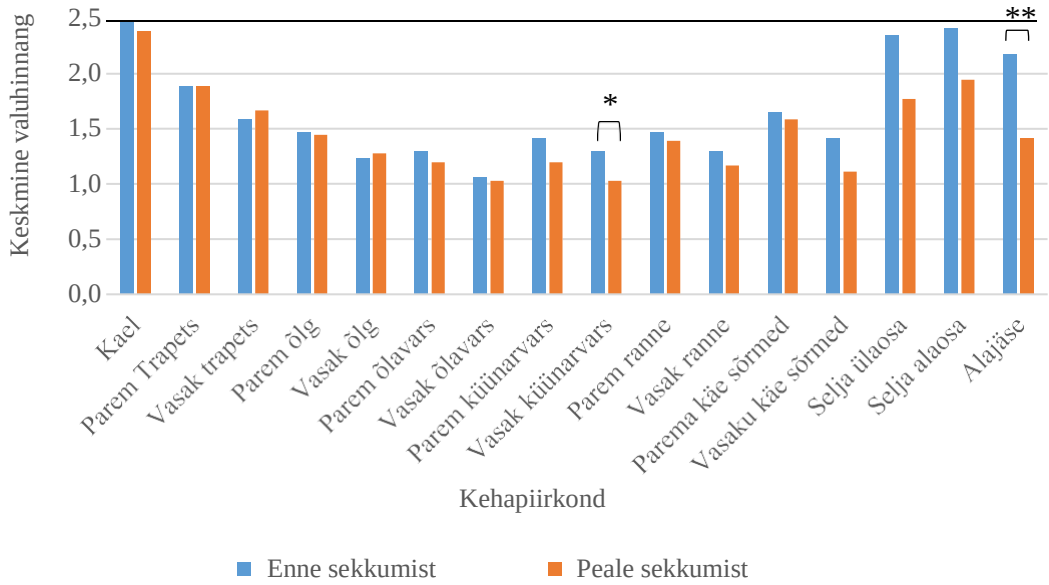
Piirkond	Enne sekkumist	Kohe peale sekkumist	2 kuud peale sekkumist	6 kuud peale sekkumist
Tartu	10	7	6	6
Tallinn	7	7	5	5
Kokku	17	14	11	11

Poole aastase jälgimisperioodi ajal said kõik katsegrupis osalejad igal kohtumisel vastata ankeetküsimustikule, kokku täideti 53 ankeetküsimustikku. Uuritavad said võimaluse hinnata oma viimase seitsme päeva jooksul esinenud kaebusi erinevates keha piirkondades. Enne sekkumistegevusi esines kõige rohkem vaevusi selja alaosas (76,5%), kaelas (70,6%), selja ülaosas (58,8%). Sarnane tulemus leiti ka Maulik *et al* 2012 aasta uuringus, kus kõige rohkem esines vaevuseid viimase 7 päeva jooksul laboritöötajatel alaseljas (22,4%) ja ülaseljas (16,3%) ning kaelavalu esines vähestel(8.2%) [11].

Antud uuringus esines kõige vähem esines vaevusi paremas (11,8%) ja vasakus õlavarres (5,9%) ning paremas küünarvarres (11,8%). Tulemusi võrreldi viienda etapi mõõtmistega ehk 6 kuud peale sekkumist. Leiti, et ülal nimetatud kehapiirkondades oli vaevustega vastajate osakaal vähenenud: selja üla- ja alaosas 54,5% ja kaelas 63,6%. Samas aga Etuknwa ja Humpheries (2018) läbiviidud ergonoomiliste sekkumiste kirjanduse analüüsi (n=13) tulemustest selgus, et 11 uuringus kaelavaevused vähenesid,aga selja üla- ja alaosas vaevused vähenesid vaid 5 uuringus [12].

Kõik peale sekkumistegevusi antud valu esinemise hinnangud summeeriti ja nendest arvutati keskmised. Neid tulemusi võrreldi enne sekkumisperioodi esinenud valu esinemise arvutatud keskmisega. Jooniselt 1 on näha, et üldjuhul keskmine hinnang vaevustele peale sekkumist vähenes. Statistiliselt olulised erinevused saadi vasakuküünarvarre (1,29 vs 1,03

p= 0,014) ja alajäseme piirkonnas (2,18 vs 1,42, *p*= 0,013). Keskmine hinnang vaevustele läks suuremaks paremas trapetsis (1,88 vs 1,89) vasakus trapetsis (1,59 vs 1,67), vasakus õlas (1,24 vs 1,28).



Joonis 1. SLV muutumine kehapiirkonniti, võrreldes enne ja pärast sekkumist (*p<0,05; **p<0,05).
*Figure 1. Changes in musculoskeletal complaints in the body regions, compared beforeand after the intervention (*p<0,05; **p<0,05).*

Tabelis 3 on välja toodud keskmised (±SD) uuritavate enda hinnangust vaevuste esinemisele erinevates kehapiirkondades erinevates mõõtmisetappides. Igas järgnevas mõõtmisetapis hinnati, kas valu läks peale sekkumist väiksemaks. Kõiki võimalikke erinevusi hinnati *t-testiga*. Leiti, et ainuke statistiliselt oluline valu vähenemine esines alajäseme piirkonnas (2,18 vs 1,09 *p*=0,020) enne sekkumistegevusi ja 2 kuud peale sekkumistegevust. Kogu sekkumistegevuse jooksul ülejäänud etappidel erinevates kehapiirkondades mõõdetud parameetrid oluliselt ei erinenud.

Tabel 3. Uuritava hinnang vaevuste esinemisele (keskmine±SD) kehapiirkonnitimõõtmistel I-V etapis

Tabel 3. The subject's own assessment of the occurrence of ailments (mean±SD) inmeasurements by body region in I-V stages

Kehapiirkond	Mõõtmise etapp ja uuritavate arv, *n*				Statistiline erinevus, *p*
	I (*n*=17)	III (*n*=14)	IV (*n*=11)	V (*n*=11)	
		Valuskoorid skaalal 1-5			
Kael	2,47 ± 1,28	2,57 ± 1,22	2,18 ± 1,17	2,36 ± 1,21	*ns*
Parem trapetslihas	1,88 ± 1,45	1,93 ± 1,14	2,00 ± 1,18	1,73 ± 1,10	*ns*
Vasak trapetslihas	1,59 ± 1,06	1,86 ± 1,10	1,64 ± 0,92	1,45 ± 0,93	*ns*
Parem õlg	1,47 ± 1,07	1,43 ± 0,94	1,55 ± 0,93	1,36 ± 0,81	*ns*
Vasak õlg	1,24 ± 0,44	1,36 ± 0,63	1,18 ± 0,4	1,27 ± 0,90	*ns*
Parem õlavars	1,29 ± 0,85	1,29 ± 0,83	1,27 ± 0,9	1,00 ± 0,00	*ns*
Vasak õlavars	1,06 ± 0,24	1,07 ± 0,27	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00	*ns*
Parem küünarvars	1,41 ± 1,18	1,14 ± 0,53	1,27 ± 0,9	1,18 ± 0,60	*ns*
Vasak küünarvars	1,29 ± 0,59	1,07 ± 0,27	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00	*ns*
Parem ranne	1,47 ± 0,87	1,36 ± 0,93	1,64 ± 1,12	1,18 ± 0,6	*ns*
Vasak ranne	1,29 ± 0,69	1,14 ± 0,53	1,18 ± 0,6	1,18 ± 0,6	*ns*
Parema käe sõrmed	1,65 ± 1,00	1,64 ± 1,15	1,73 ± 1,01	1,36 ± 0,81	*ns*
Vasaku käe sõrmed	1,41 ± 0,71	1,14 ± 0,53	1,09 ± 0,30	1,09 ± 0,30	*ns*
Selja ülaosa	2,35 ± 1,37	1,79 ± 0,80	1,50 ± 0,53	2,00 ± 1,10	*ns*
Selja alaosa	2,41 ± 1,18	2,21 ± 0,97	1,73 ± 0,79	1,82 ± 0,98	*ns*
Alajäse	2,18 ± 1,42	1,57 ± 0,85	1,09 ± 0,3	1,55 ± 0,82	I -IV 0,020

**ns*- not siginificant; mõõtmiste etapid ja valuskoorid on kirjeldatud metoodikas.

Katsegrupi keskmised hinnangud vaevuste tugevusele jäävad valuskoori 1-3 vahemikku.Kõige rohkem esines uuritavate hinnangul vähest kuni mõõdukat valu kaelas, seljas ja alajäsemes. Teistes kehapiirkondades jääb valuskoor piiridesse „ei esine“ kuni „vähese valu esinemine“. Siinjuures ka 5-etapilised sekkumised ei toonud olulisi valuskooride muutusi enamus kehapiirkondades, va jalavalu vähenemine 4. mõõtmisetapis, võrreldesnäitajaga enne sekkumist. Uuringu puuduseks võib lugeda seda, et katsegrupp oli väikeja tulemustest ei saa teha suuremaid järeldusi. Ka sekkumistegevuste mõju valu tugevusele on üsna vähene, mis viitab sellele, et mingeid meetmeid oleks pidanud veel rakendama. Heaks uuringu tulemuseks on aga see, et võrreldes enne sekkumist mõõdetud valuskooriga, esines katsegrupil vähem SLV-sid vasaku küünarvarre ja jalgade piirkonnas.

JÄRELDUSED

Antud artikkel annab ülevaate SLV-de esinemise kohta meditsiinilabori töötajate seas. Vaevuste esinemise hindamiseks kasutati ankeetküsimustikku, kus neil paluti hinnata viimasel seitsmel päeval esinevaid SLV-sid ning anda skoor valutugevusele. Kõige sagedasemini esines vaevuseid kaelas ning üla- ja alaseljas. Sarnased tulemused olid ka kirjanduses. Läbiviidud sekkumistegevustena viidi läbi uuritavatele ergonoomiline koolitus, lisaks sellele said nad individuaalsed soovitused oma töökohtade ja asendite parandamiseks. Kuus kuud peale sekkumistegevusi näitasid tulemused, et SLV osakaal vähenes ja seda kõikides piirkondades (v.a vasakus trapetsis). Sellest võib järeldada, et sekkumistegevused olid küll tõhusad, aga midagi oleks pidanud olema lisaks veel juba olemasolevatele tegevustele näiteks töökohtade ümber tõstmine. Kuigi valuhinnangute skoorid jäid enamasti alla keskmise,läks sekkumise perioodil valu mõneti suuremaks paremas ja vasakus trapetsis ning vasakus õlas. Selleks, et meditsiinilabori töötajate valuskoorid ei muutuks tugevamaks, on vaja siiski jätkuvalt tähelepanu pöörata õigetele tööasenditele ja töövõtetele, et ennetada SLV esinemist töötajate hulgas.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] European Agency for Safety and Health at Work. (i.a). Musculoskeletal disorders [WWW]. https://osha.europa.eu/en/themes/musculoskeletal-disorders (03.04.23)
[2] George E., (2010). Occupational hazard for pathologists: Microscope use and musculoskeletal disorders. *Am J Clin Pathol*, vol. 133, no. 4, pp. 543–548. doi: 10.1309/AJCPUXDS5KJKRFVW
[3] Rahvastiku tervise arengukava 2022-2030 koostamise ettepanek. 2018. [WWW] https://www.sm.ee/sites/default/files/content-editors/sisekomm/rahvastiku_tervise_arengukava_2020-2030_koostamise_ettepanek.pdf?fbclid=IwAR2hc0IUQDS6B1K_HPdjCzQI1LUk (03.04.23)
[4] Terviseamet. (2020). Kutsehaigestumine ja tööst põhjustatud haigestumine 2020. aastal. [WWW] h ttps://www.terviseamet.ee/sites/default/files/Tervishoid/kh_ja_tph_2020.pdf (03.04.23)
[5] Agrawal, P., Maiya, A., Kamath, V., Kamath, A. (2014). Work related musculoskeletal disorders among medical laboratory professionals: a narrative review. *Int J Res Med Sci*, vol. 2, no. 4, p. 1262. doi: 10.5455/2320-6012.ijrms20141105.
[6] Kumari, A, F, S, S., Ali, H., Solangi, Z., Unar, I., Abro, A., Samejo, S., Rizvi, N. (2022). Prevalence of work-related musculoskeletal disorders among laboratory workers of Sindh: A cross-sectional study. *MOJ Orthop Rheumatol*, vol. 14, no. 1, pp. 15–19
[7] Maulik, S., Iqbal, R., De, A., Chandra, A, M. (2014). Evaluation of the working posture and prevalence of musculoskeletal symptoms among medical laboratory technicians. *J Back Musculoskelet Rehabil*, vol. 27, no. 4, pp. 453–461. doi: 10.3233/BMR-140466.
[8] Haile, E, L., Taye, B., Hussen, F. (2012). Ergonomic Workstations and Work-Related Musculoskeletal Disorders in the Clinical Laboratory. *Lab Med*, vol. 43, no. suppl 2, pp. e11– e19. doi: 10.1309/lm7bq15ttqfbxis.
[9] López-González, M, J., González, S., González-Menéndez E. (2021). Prevalence of musculoskeletal problems in laboratory technicians. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 27, no. 3, pp. 840–851. doi: 10.1080/10803548.2019.1646531.
Rafeemanesh, E., Khooei, A., Niroumand, S., Shirzadeh, T. (2021). A study on musculoskeletal complaints and working postures in pathology specialists in Iran. *BMC Musculoskelet Disord*, vol. 22, no. 1, pp. 1–8. doi: 10.1186/s12891-021-04870-w.
[10] Maulik, S., De, A., Iqbal, R. (2012). Work related musculoskeletal disorders among medical

laboratory technicians. Network of Ergonomics Societies Conference (SEANES), 2012 Southeast Asian, doi: 10.1109/SEANES.2012.6299585
[11] Etuknwa, S, A., Humpheries S. (2018). A Systematic Review on the Effectiveness of Ergonomic Training Intervention in Reducing the Risk of Musculoskeletal Disorder. *Journal of Nursing and Health Studies,* vol. 03, no. 02, pp. 1–10. doi: 10.21767/2574-2825.1000032.

Õppejõu töö raskusaste ja energeetiline koormatus tava- ning kaugtöö keskkonnas

K. Karu, E. Merisalu, B. Reppo

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. The aim of this study was to assess the energetic load and the level of difficulty of teaching among the University faculty, both when working at a regular workplace and in the remote working conditions. **Methodology.** The subjects were the employees of the Estonian University of Life Sciences, who carried on teaching in both auditorium and remote teaching during the period from February to March 2023. To assess the workload, the subjects' heart rate was measured, based on which the degree of the workload was calculated. The lecturers had to fill out an activity diary and answer a short questionnaire assesing the teaching load in general. The heart rate monitor was placed on the hand of the subject at the beginning of the working dayand returned at the end of the working day of the study phase. Based on the indicators, the total energetic burden of the employee and the degree of the work difficulty were calculated. **Results**. The analysis of the results revealed that the indicators of the energetic load of the lecturer differed somewhat during auditory and remote teaching. According to the preliminary assessment, theenergetic load of the lecturer was estimated to be higher during the academic studies – the work difficulty score was light to heavy, and during remote work – light to medium-heavy. By observing the pulse dynamics, the mainreasons for the increase in the employees' heart rate when working in the study rooms were constant communication and, in both cases, standing and walking. **Conclusions**. The results of the pilot study show the differences in the energetic load of a lecturer during auditory (here in after regular work) and distance learning (here in after remote work). However,to draw convincing conclusions, it is necessary to involve more subjects in the study and continue the analysis ofthe results.

Keywords: heart rate, watch, auditorium work, teaching, subjects.

SISSEJUHATUS

Seoses kaugtöö levikuga viimastel aastakümnetel on laialdaselt analüüsitud kaugtöö mõju tööga rahulolule. Kaugtöö võib tuua töötajatele kasu, parandades töö- ja eraelu tasakaalu ning emotsionaalsetheaolu, kuid toob kaasa ka märkimisväärseid väljakutseid [1]. Mõiste „kaugtöö" *(inglise keeles teleworking, telecommuting)* võttis 1973. aastal kasutusele USA füüsik ning insener Jack Nilles. Tema peamine eesmärk oli vähendada autodega liiklemist, sest masinad kasutasid palju energiat ning riigis tekkis 1973. a. naftakriis [2, 3]. Leiti, et kaugtöö võib olla osa riskide maandamise strateegiast kui on vajalik organisatsioonidel tagada elutähtsate teenuste jätkamine eriolukordades [4]. Kaugtöö laialdane levimine kulges takistustega kuni COVID- pandeemia alguseni [2, 3]. 2020. a. kevadel tekitas Covid-19pandeemia erakorralise olukorra, kuna riikide sulgemise ja muude piirangute tõttu olid inimesed sunnitud kodus töötama [5]. Covid-19 muutis üle maailma töö ja elu korraldust, sundides nakkuse leviku vähendamiseks inimesi töötama kodukontori tingimustes. Paljud ettevõtted, ka haridusasutused andsidoma töötajatele võimaluse kaugtöö tegemiseks [6].

Leitakse, et praeguse töömaailma arengutest tulenevad töömeditsiini ja tööpsühholoogia jaoks uued küsimused, mida tuleb uurida uute töövormide puhul. Küsimuseks on, millised tööstressi tegurid on uute arengutega seotud ning kuidas

mõjutavad uued töövormid töötajate vaimset tervist ja tulemuslikkust. Uued töövormid ja muutused töömaailmas võivad luua nii võimalusi kui ka riske töötajate vaimse tervise ja töötulemuslikkuse säilitamiseks ning edendamiseks. Huvi keskmes peaks olema küsimus, kuidas saaks paindlikus digitaalses töömaailmas edendada töötajate tervislikku töökeskkonda, võttes arvesse struktuurseid ja individuaalseid töönõudeid [7].

Inimeste töökoormuse ja energiatarbimise uurimine võimaldab hinnata energeetilist kulu, mida rakendatakse mitmete töövõtete puhul erinevates töökeskkondades. Seejärel on võimalik luua uusi lahendusi, kuidas muuta töötehnoloogia ning töökeskkond paremaks, vähendada töötajate energiakulu ja parendada töötajate töövõimet [8]. Kasutusel on mitmeid energiakulu määramise meetodeid, kus hinnatakse tööviisi, koormust ning kehaasendeid [9]. Luu- ja lihaskonna ülekoormusriski hindamiseks on erinevaid meetodeid, näiteks kiire ülajäsemete hindamismeetod *(Rapid Upper Limb Assessnment,* RULA), kiire kogu keha hindamismeetod *(Rapid Entire Body Assessment,* REBA) jt [10]. Töötaja energiakulu ehk energeetilise koormatuse määramiseks on erinevaid meetodeid, nt *Ovako Working posture Assessment System* (OWAS), kus testitakse inimese tööd 84 näitaja (indeksi) alusel. Seda kasutatakse raske, liikumist nõudva füüsilise töö puhul, tööasendite hindamisel. Meetodit ERGOLOG kasutatakse töötaja skeletilihaste töökoormuse hindamiseks töökohal [11].

Kuid probleemiks on asjaolu, et ülalnimetatud meetodid arvestavad töötajat mõjutavat füüsilist töökoormust ning ei võta arvesse psüühilisi ega füüsikalisi ohutegureid. Esitatud meetodite abil ei ole võimalik hinnata töötaja töö raskusastet. Seetõttu on Eesti Maaülikoolis kasutatud pulsimeetodit [12], kus mõõdetakse töötaja südame löögisagedust tööpäeva jooksul, mille abil määratakse töötaja töö raskusaste ning summaarne energeetiline koormatus [13]. Töö raskusastme määramiseks on võetud aluseks Maailma Terviseorganisatsiooni poolt (WHO heaks kiidetud töö raskusastme liigitus pulsi ning hapnikukulu järgi [11].

Magistritöödes on uuritud ka õppejõudude ja üliõpilaste töö raskusastet ning energeetilist koormatust nende tavalisel, auditoorsel töötegevusel. Näiteks Maarika Haidak viis Tartu Tervishoiu Kõrgkooli õppejõudude ja üliõpilaste seas läbi uuringu, et määrata nende töö raskusaste ning energeetiline koormatus. Uuringust selgus, et kolme tööpäeva vältel oli õppejõudude keskmine pulss vahemikus 81…92 lööki/min, mis liigitus raskusastmelt kergeks tööks ja suurim pulss 152 … 154 lööki/min, mis liigitus raskusastmelt väga raskeks tööks. Pulsitõusu peamisteks põhjusteks oli treppidest kõndimine või kolleegidega pidev suhtlemine. Pulssi mõjutas ka see, mis teemal vesteldi. Ühel õppejõuloli pulss väiksem hetkel, mil ta töötas arvutiga või osales koosolekul. Teisel õppejõul oli pulss stabiilneloenguid läbi viies. Kuid kolmandal õppejõul suurenes pulss 84 löögini minutis ajal, mil olid praktikumid ja järelarvestused. Tööpäeva summaarne energeetiline koormatus keskmise pulsi järgi oli vahemikus 120…165 W ning suurima pulsi järgi vahemikus 186…540 W [14].

Samuti viidi läbi uuring Rootsi eri paigus asuvate ülikoolide õppejõudude ning professorite seas, kes tegelesid õppe- ja/või teadustööga ≥ 50% oma tööajast. Eesmärk oli välja selgitada, kas psühhofüsioloogiline aktiivsus, kehaasendid ja liigutused erinevad kaugtöö (kodus tehtava töö) ja tavapärases kontoris tehtava töö ajal. Kõik osalejad pidid mõõtmisperioodil vähemalt ühel päeval töötama kodus ning ühel päeval tavapärases kontoris. Lisaks süljeproovide võtmisele ning füüsilise aktiivsuse mõõtmisele, mõõdeti ka töötajate pulssi. Kaugtöö tegemisel avastati erinevused kõigis pulsisageduse

mõõtmistes kogu päeva jooksul võrreldes tavapärase kontoritööga. Üldiselt oli osalejatel suurem parasümpaatiline (kontrollitud/tasakaalus) aktiivsus ja üldine südame löögisageduse varieeruvus kaugtööpäevadel, võrreldes kontoripäevadega. Lisaks näitasid tulemused kaugtöö ajal suuremat erinevust istuvas ja seisvas asendis kui kontoris töötamise ajal. Kaugtöö ajal oli osalejate südame löögisageduse varieeruvus aja jooksul suhteliselt stabiilne, samas kui kontoris töötamise ajal varieerus pulsisagedus päeva jooksul rohkem. Uuringust leiti, et akadeemikutel oli kaugtöö ajal parasümpaatilist aktiivsust rohkem kui kontoritööl, mis võib viidata kaugtöötundide suuremale lõõgastumisele. Samas vahetasid uuritavad kaugtööpäevadel sagedamini asendeid (istumine ja seismine). Leiti, et arvestades üldiselt suurt istuvat tööaega, võib selline käitumine olla nende tervisele kasulik [15].

Uurimistöö eesmärgiks oli määrata akadeemilise töötaja (õppejõu) töö raskusaste ja energeetiline koormatus tava- ning kaugtöö keskkonnas, mõõtes tema pulssi tööpäeva jooksul.

MATERJAL JA METOODIKA

Eesti Maaülikooli õppejõudude töö raskusastme ning energeetilise koormatuse määramiseks mõõdeti pulssi õppesessiooni ajal nii kaugtöös kui auditoorses õppes. Pulsikellad asetati käele tööpäeva alguses ja seda kanti vähemalt kahel õppepäeval. Mõõdeti töötaja südame löögisagedust, arvutati töötaja töö raskusaste ning summaarne energeetiline koormatus. Lisaks täitsid uuritavad iga tunni tagant ka päevikut, kuhu pandi kirja tähtsamad tegevused. Käesolevas uuringus osales kümme õppejõudu, kuid nende seast valiti tulemuste analüüsiks kaks inimest. Õppejõud 1 oli naisterahvas, vanuses 68 eluaastat, pikkusega 157 cm ning mass 63 kg. Õppejõud 2 oli samuti naisterahvas, vanuses 50 eluaastat, pikkusega 163 cm ning tema mass oli 100 kg.

Uuringud toimusid veebruari- ja märtsikuus 2023. aastal, päevadel, mil õppejõud viisid läbi õppetööd, kas auditooriumis või distantsilt (ehk kodus). Enne õppetöö algust anti õppejõududele pulsikellad, mis käivitati ning seejärel paigaldati uuritavate käe peale. Õppejõudude pulsi mõõtmiseks kasutati *Mi Band 3* pulsikellasid. Pulsikell salvestas südamelööke intervalliga üks minut. Uuritavad täitsid väikese küsimustiku seoses oma tööülesannetega ning pidasid iga tunni tagant ka tegevuspäevikut, pannes kirja oma tähtsamad tegevused.

Katseperioodi lõpus koguti pulsikellad ning tegevuspäevikud kokku. Saadud andmed kanti *MSOffice Exceli* andmetöötlusprogrammi, kus teostati tulemuste analüüs. Töö raskusastme määramiseks on kasutatud Maailma Terviseorganisatsiooni (WHO) poolt heaks kiidetud raskusastme liigitust uuritava pulsi ning hapnikukulu järgi (tabel 1).

Tabel 1. Töö raskusastme liigitus pulsi ja hapnikukulu järgi. Allikas: [11].
Table 1. Classification of the degree of work difficulty by heart rate and oxygen consumption. Source: [11].

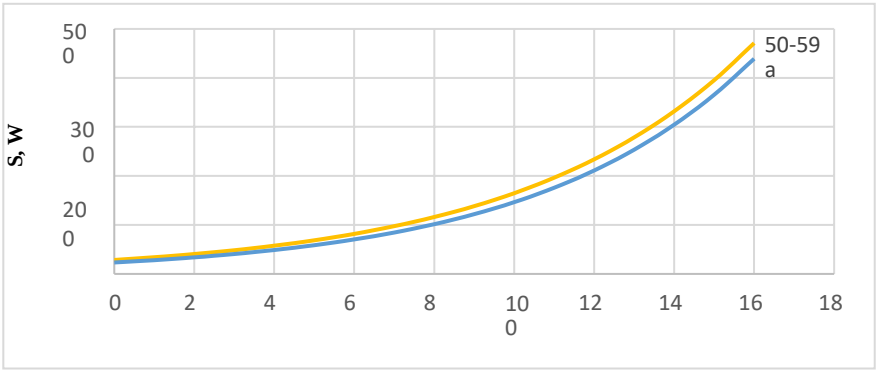
Töö raskusaste	**Hapniku kulu O_2 l/min**	**Pulss, (l/min)**
Kerge	< 1,0	< 100
Keskmiselt raske	1,0 … 1,5	100 … 125
Raske	1,5 … 2,0	125 … 150
Väga raske	>2,0	>150

Tabelis 2 on toodud erineva vanusega naiste summaarne keskmine energiakulu vastavalt töö raskusastmele ning võimalikult suurim energiakulu (W_{max}) ja hapniku tarbimine (O_{2max}) [17].

Tabel 2. Naiste töö raskusastme liigitamine energiakulu (W) ning hapniku kulu (O_2) järgi olenevalt vanusest. Allikas: [11].
Table 2. Classification of the degree of work difficulty by energy expenditure (W) and oxygen expenditure (O_2) depending on age. Source: [11].

Vanus aasta	**Keskmine energiakulu W**				**W_{max} W**	**$O_{2\ max}$ l/min**
	kerge	**kesk, raske**	**raske**	**eriti raske**		
20 … 29	… 223	230 … 356	363 … 488	488 …	651	1, 93
30 … 39	… 202	209 … 293	300 … 454	454 …	605	1, 79
40 … 49	… 188	195 … 279	286 … 419	419 …	559	1, 65
50 … 59	… 154	160 … 265	272 … 384	384 …	521	1, 51
60 …69	… 133	140 … 244	251 … 349	349 …	465	1, 38

Summaarse energeetilise koormatuse määramiseks võib kasutada tabelit 2, aga töö kergendamiseks koostati tabelite 1 ja 2 alusel joonis 1, kus on esitatud kõverad, mille järgi määrati energiakulu [12].



Joonis 1. Inimese pulss ja summaarne energeetiline koormatus (S) sõltuvalt soost ja vanusest. Allikas:[12].
Figure 1. Human heart rate and total energy burden (S) depending on gender and age. Source: [12].

Teades, et summaarne energeetiline koormatus (S, W) sisaldab inimese otseselt tööks (T, W) jafüsioloogia tarbeks (F, W) kuluvat energiat, siis otseselt tööks kuluva energia leiab kui T = S - F. Füsioloogia tarbeks kuluv energia (F, W) leiti naistel valemiga

F_n**= 1,934+0,0278·G+0,00538·H- 0,0136·V kJ/min**, kus [17]:

G – inimese mass kg;H – pikkus cm;

V – vanus aastates;

1 kJ/min = 16, 67 W;

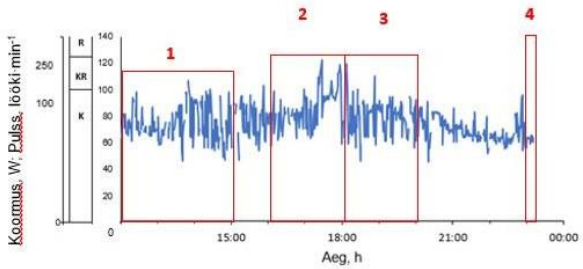
1 W = 1 J/s = 0,06 kJ/min.

Uuritavate õppejõudude keha massi, pikkuse ja vanuse kohta on esitatud andmed tabelis 3.

TULEMUSED JA ARUTELU

Töö raskusaste ning energeetiline koormatus tavatöö- ja kaugtöökeskkonnas määrati kahel naissoost õppejõul. Mõlema õppejõu tööplaanid ning päeva pikkused olid erinevad, sest rohkem tehakse tööd auditooriumis ning nende töökoormused ei olnud samuti samasugused. Küsitlusest, mis puudutas õppejõudude tööülesandeid selgus, et nad hindavad oma õppekoormust üldiselt suureks ning ärevust enne õppetöö algust kõikide kohustustega hakkama saamisel keskmiseks. Uuritavate töö raskusaste ja energeetiline koormatus määrati pulsi ning joonise 1 alusel. Lisaks on tabelis 3 välja toodud õppejõudude vanus, pikkus ja mass, millest sõltub füsioloogiline energiatarve.

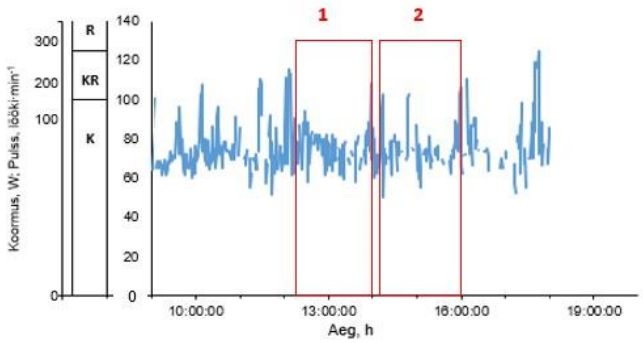
Õppejõud 1 oli tavatöökohal loenguid ja seminare läbi viies (joonis 2 märgitud tulbad 1; 2; 3), pulsi keskmine väärtus 85 l/min ning summaarne energeetiline koormatus 110 W, mis vastab kergetöö raskusastmele, kuid samas suurima pulsi järgi oli töötajal tavatöökohal töötades suurim pulss 131 l/min ning õppejõu summaarne energeetiline koormatus 235 W, tema töö oli sel hetkel keskmiselt raske.See võis tuleneda asjaolust, et õppejõud seisis püsti, kõndis ning rääkis. Kaugtöökohal Moodle materjaleüle vaadates oli õppejõu pulsi keskmine väärtus 67 l/min (joonis 2, tulp nr 4) ning summaarne energeetiline koormatus 75 W, mis vastab kerge töö raskusastmele. Otseselt tööga seotud koormatus olitavatööl 50 W, kuid kaugtööd tehes oluliselt väiksem, 15 W.



Joonis 2. Õppejõud 1 pulsi, töö raskusastme ja energeetilise koormatuse väärtused tavapärases töökohasning kaugtööd tehes (loengute ja seminaride läbiviimine tulbad 1, 2 ning 3; Moodle materjalide ülevaatamine tulp nr 4).

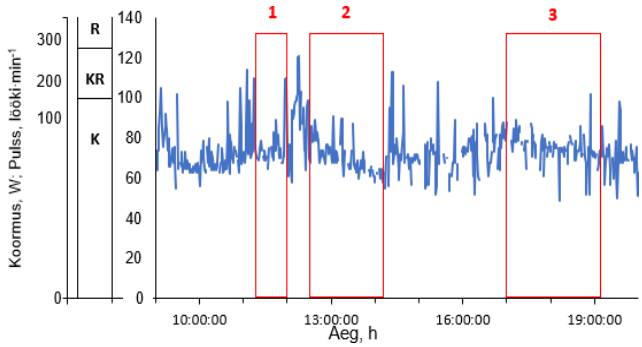
Figure 2. Lecturer 1 – values of pulse, degree of work difficulty and energy burden in the usual workplace and when working remotely (conducting lectures and seminars – columns 1, 2 and 3; reviewing Moodle materials – column No. 4).

Õppejõud 2 oli tavatöökohal kontrolltöid parandades (samal ajal tudengid tegid kontrolltöid) (joonis 3,tulbad 1 ja 2) pulsi keskmine väärtus 76 l/min, ning summaarne energeetiline koormatus keskmise pulsijärgi 102 W, mis vastab kerge töö raskusastmele. Tavatöökohal töötades oli otseselt tööga seotud koormatus 18 W. Kontrolltöid kontrollides oli õppejõu suurim pulss 115 l/min (joonis 3, tulp 1) ning summaarne energeetiline koormatus 210 W, sel hetkel oli tema töö keskmiselt raske.



Joonis 3. Õppejõud 2 pulsi, töö raskusastme ja energeetilise koormatuse väärtused tavatöökohas (kontrolltööde parandamine tulbad 1 ning 2).
Figure 3. Lecturer 2 – values of heart rate, degree of work difficulty and energy burden in the regular workplace (correcting tests – columns 1 and 2).

Õppejõud 2 oli kaugtööl viibides (kontrolltööde parandamine, joonis 4, tulbad 1 ja 2 ja Zoomi kursuselosalemine joonis 4, tulp 3) pulsi keskmine väärtus küllaltki sarnane tavapärases töökohas töötamisele –74 l/min ning tema summaarne energeetiline koormatus keskmise pulsi järgi oli 101 W, mis vastab kergetöö raskusastmele. Kaugtööd tehes oli töötaja summaarne energeetiline koormatus suurima pulsi järgi 208 W, mis vastab keskmiselt raskele tööle. Sel hetkel töötaja parandas Moodles tudengite kontrolltöid,tema töö oli keskmiselt raske. Õppejõu tööga seotud koormatus oli 19 W.



Joonis 4. Õppejõud 2 pulsi, töö raskusastme ja energeetilise koormatuse väärtused kaugtöökohas (kontrolltööde parandamine tulbad 1 ning 2; Zoomi kursusel osalemine tulp 3).
Figure 4. Lecturer 2 – values of heart rate, degree of work difficulty and energy burden in the remote workplace (correcting tests – columns 1 and 2; participation in Zoom course – column 3).

Tabelis 3 on kajastatud õppejõudude mass, pikkus, vanus ja välja on toodud

energeetilise koormatuse näitajad. Füsioloogilise energiaterve ning pulsisageduse alusel määrati õppejõudude töö raskusaste ja energeetiline koormatus.

Tabel 3. Õppejõudude tava – ja kaugtöökoha energeetiline koormatus ning töö raskusaste.
Table 3. The energy burden of the regular and remote work of the faculty and the degree of work difficulty.

Näitajad	Õppejõud 1		Õppejõud 2	
	Tava-töökoht	Kaugtöö-koht	Tava-töökoht	Kaugtöö-koht
Üldnäitajad				
Mass, kg	63		100	
Pikkus, cm	15 7		163	
Vanus, a	68		50	
Pulss, l/min				
- keskmine	85	67	76	74
- suurim	131	70	115	113
Energeetiline koormatus, W				
Keskmise pulsi järgi:				
- summaarne, W	110	75	102	101
- füsioloogiline, W	60		82	
- otseselt tööga, W	50	15	20	19
Suurima pulsi järgi:				
- summaarne, W	235	90	210	208
- füsioloogiline, W	60		82	
- otseselt tööga, W	175	30	128	126
Töö raskusaste	**K→R**	**K→ K**	**K→ KR**	**K→ KR**

Töö raskusaste keskmise → suurima pulsi järgi: K - kerge, KR - keskmiselt raske, R – raske töö.

Tabeli 3 järgi selgub, et õppejõul 1 muutus tavatöökohal töö kergest raskeks, kuid samas kaugtööd tehes oli töö raskusaste kerge. Samas oli õppejõul 2 töö nii tavatöökohas kui ka kaugtöökohas kerge kuni keskmiselt raske. Võrdluseks saab tuua Tartu Tervishoiu Kõrgkooli õppejõudude uuringi, kus kolme tööpäeva vältel oli õppejõudude keskmine pulss vahemikus 81…92 lööki/min, mis liigitus kerge töö raskusastmeks ja suurim pulss 152 ning 154 lööki minutis, mis kuulus väga raske töö raskusastme alla. Selgub, et Eesti Maaülikooli uuritud õppejõudude seas ei tehtud tööd, mis oleks olnud väga raske.

JÄRELDUSED

Uuringu eesmärgiks oli hinnata õppetöö energeetilist koormatust ja töö raskusastet ülikooli õppejõudude hulgas nii auditoorses töökohas kui kaugtöö tingimustes. Pulsidünaamikat jälgides oli õpperuumides töötamisel töötaja südame löögisageduse tõusmise peamisteks põhjusteks pidev suhtlemine, püsti seismine ja kõndimine. Pilootuuringu tulemused näitavad õppejõu energeetilise töökoormatuse erinevusi

auditoorse ja distantsõppe ajal. Kuid veenvate järelduste tegemiseks on uuringusse vaja kaasata rohkem uuritavaid ja jätkata tulemuste analüüsi.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] Lu, Z., & Zhuang, W. (2023). Can teleworking improve workers' job satisfaction? exploring the roles of gender and emotional well-being. *Springer Science and Business Media* LLC. doi:10.1007/s11482-023-10145-4

[2] Jala International. Jack Nilles. [veebileht] https://www.jala.com/jnmbio.php (05.02.2023)

[3] Archives. Interview with Jack Nilles. [veebileht] https://archivesit.org.uk/interviews/jack-nilles/ (05.02.2023)

[4] Boon Heng, T., Chin Hooi, S., Yap Liang, Y., Othma, A., & Tze San, O. (2012). Telecommuting for businesscontinuity in a non-profit environment. *Asian Social Science, 8*(12) doi:10.5539/ass.v8n12p226

[5] Stich, J. (2020). A review of workplace stress in the virtual office. *Intelligent Buildings International (London), 12*(3), 208-220. doi:10.1080/17508975.2020.1759023

[6] Bouziri, H., Smith, D. R. M., Descatha, A., Dab, W., & Jean, K. (2020). *Working from home in the time of COVID-19: How to best preserve occupational health?* BMJ. doi:10.1136/oemed-2020-106599

[7] Mache, S., & Harth, V. (2016). Flexibilisierte Arbeitsformen. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 66*(6), 364-368. doi:10.1007/s40664-016-0143-3 Retrievedfrom https://link.springer.com/article/10.1007/s40664-016-0143-3

[8] Siva Priya, N., & Shenbagavadivu, N. (2021). A brief study on applications of random matrix theory. *Intelligent sustainable systems* (pp. 465-477). Singapore: Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-16-2422-3_36 Retrieved from https://library.biblioboard.com/viewer/a9a16da4-06e2-11ec-b46b-0a9b31268bf5

[9] Nautras, A., Reppo, B., & Kuzmin, J. (2016). *Pulse-video method for determining the workload and energy expenditure for assessing of work environment*

[10] Kee, D. (2022). Systematic comparison of OWAS, RULA, and REBA based on a literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(1), 595. doi:10.3390/ijerph19010595

[11] Tuure, V.-M. (1991). Maatilan töiden fyysisen kuormittavuuden määrittäminen. Työtehoseuran julkaisuja
322. Helsinki. 30-69 lk.

[12] Reppo, Boris. 1997. Lehmafarmide tehnoloogiliste elementide ja biotehniliste süsteemide töökindlusemääramise ja parendamise meetodid. Doktori väitekiri. Eesti Põllumajandusülikool. Tartu, 113 lk.

[13] Reppo, B., & Kuzmin, J. (2019). PULSAVI: A method for determining and assessing the workload and energy expenditure of workers. *Agraarteadus,* 30(Special Issue 2), 51-55. doi:10.15159/jas.19.15

[14] Haidak, Maarika. 2013. Tartu Tervishoiu Kõrgkooli õppejõudude ja üliõpilaste töökeskkond ja töövõime. Magistritöö. Eesti Maaülikooli tehnikainstituut. Tartu. 123 lk.

[15] Widar, L., Wiitavaara, B., Boman, E., & Heiden, M. (2021). Psychophysiological reactivity, postures and movements among academic staff: A comparison between teleworking days and office days. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(18), 9537. doi:10.3390/ijerph18189537

Töövägivalla levimus kiirabiteenistuse töös Prevalence of occupational violence in emergency services

Elis Kikka[1], Eda Merisalu[1]

[1]Eesti Maaülikool, Metsandue ja inseneeria instituut, Biomajandustehnoloogiaate õppetool

Abstract. The profession of ambulance workers can be considered one of the high-risk jobs, because *ad hoc* emergency service as part of its normal responsibilities is related to various unexpected dangerous situations. The number of studies has confirmed that the ambulance workers when helping the patients and becoming a victim of violence, can affect their quality of work. **Purpose.** The aim of the study was to describe the phenomena of occupational violence in the ambulance service and analyze the results depending on demographic indicators. **Methodology.** The target group consisted in the employees of one of the largest ambulance facilities in Estonia (*n=550*). The internationally validated psychosocial risk factor questionnaire COPSOQ III (*Copenhagen Psychosocial Questionnaire*) was used in the study, where the questions on occupational violence such as conflicts at work and/or inappropriate patient behavior were included. **Results.** We distributed 550 questionnaires among the target population.In total, 125 questionnaires were retuned, the response rate was 22,7%. Among the respondents 32,8% were male and 67,2% female. The age of the subjects was between 20 and 65 years. The questionnaires were returned by doctors – 21,6%, nurses from the ambulance brigade leader – 31,2%, ambulance nurses – 26,4%, paramedics – 15,2% and office and auxiliary workers – 5,6%. The results showed that from the respondents 28% emergency workers experienced work violence or threatening behavior caused by patients or colleagues in their work at least acouple times in a year. The majority of emergency nurses (70,8%) and 18,5% of doctors had encountered unwanted sexual attention caused by the patients and colleagues during the last year. **Conclusions.** In emergency work, workplace violence occurs mostly among emergency nurses and it can affect the health and quality of work of ambulance workers.

Keywords: emergency service personnel, workplace, work violence, bulling

SISSEJUHATUS

Töövägivald kasvab kogu maailmas üha enam. Euroopa Tööohutuse ja Töötervishoiu Agentuuri (*European Union-Occupational Safety and Health Agency*, EU-OSHA) 2011. aasta aruande kohaselt on 5- 20% Euroopa töötajatest töökohal kogenud vägivalda ja ahistamist [1]. Seega on paljud töötajad kogenudtöövägivalda. Töövägivald esineb paljude ettevõtete töötajate, sh tervishoiusektori töötajate seas. Esmatasandi ehk haiglaeelses tervishoiuasutuses (nt kiirabis) töötamine on seotud suure riskiga [2], kuna kiirabi töötajadon ööpäevaringselt valmis osutama meditsiinilist abi, kus abivajaja vajab abi vältimatult ja kiirelt [3]. Sageli satuvad kiirabi töötajad ettenägematutesse olukordadesse, kus kiirabitöötajatel on suur oht kokkupuutuda töövägivallaga [2].

Kirjanduses kirjeldatud töövägivalla levimus kiirabiteenistustes on laialt varieeruv. Itaalias läbiviidud uuringus osales 1100 kiirabiõde, kellest 76% koges verbaalset vägivalda ning 15,5% koges nii verbaalset kui füüsilist vägivalda, kuid 8,5% eitas vägivallaga kokkupuudet [4]. Kanadas (2014) läbiviidud uuringus ilmnes, et 75% kiirabitöötajatest on kokku puutunud töövägivallaga [5, 6]. Kõige levinum vägivallavorm oli verbaalne rünnak (67%), millele järgnes hirmutamine (41%), füüsiline rünnak (26%), seksuaalne ahistamine (14%) ja seksuaalne rünnak (3%) [6]. Austraalia uuringus (2007) selgus, et kiirabitöötajatest
82% koges verbaalset vägivalda, 55% hirmutamist, 38% füüsilist väärkohtlemist, 14% seksuaalset ahistamist ja 4% täheldas seksuaalset rünnakut [5, 7]. Autorite Koritsas *et al* poolt 2009 aastal läbi viidud uuringust selgus, et naissoost kiirabitöötajatel on suurem oht saada hirmutamist, seksuaalset ahistamist ja seksuaalset rünnakut [5, 8]. Poolas uuriti kiirabitöötajatega juhtunud tööõnnetusi, milles selgus, et kõigist tööõnnetustest oli 6% seotud patsiendi kallaletungiga [5, 9]. USA kiirabitöötajatest 69% koges vähemalt ühte vägivalla vormi, kusjuures parameedikutel oli kolm korda suurem tõenäosus kogeda vägivalda [5, 10].

Rootsis uuriti ähvarduste ja vägivalla juhtumeid kiirabiteenistuse õdede (*n=134*) ja parameedikute (*n=11*)hulgas. Selgus, et 66% kiirabi töötajatest koges aasta jooksul töövägivalda ning 26% ähvardusi ja 16% füüsilist vägivalda töö ajal. [5, 11]

Kanadas ja Austraalias (2014) parameedikute seas läbi viidud uuringutest selgus, et nad kogevad enamasti töövägivallana verbaalset väärkohtlemist patsientide või nende lähedaste poolt [6, 12, 13]. Samution leitud, et pärast vägivalla juhtumiga kokkupuudet oli meditsiinitöötaja töövõime halvenenud – 73% töötajatest kartis patsiente nende vägivaldsuse tõttu, 49% varjas ennast patsientide eest ning 74% nentis vähenenud tööga rahulolu. Pärast vägivalla episoodi eelistasid töötajad saada tuge oma kolleegidelt või ametnikelt. [12, 14]

Sahebi *et al* (2019) uuringus kirjeldati, et 70-80% meditsiinitöötajatest kogeb aastas ühte või mitut vägivalla juhtumit. Töövägivalla määr kiirabitöötajate hulgas oli suurem kui tuletõrjujatel. [15]

Paljudes uuringutes on leitud, et stress on tihedalt seotud nii füüsiliste kui ka psühholoogiliste haigustega. Negatiivsed vaimse tervise tagajärjed võivad varieeruda sõltuvalt inimese kognitiivsest töövõimest või stressi tajumisest. [5, 16] Kiirabitöötajad kogevad rohkem tööalast vaimset stressi, mis tõttuesineb neil ka vaimseid probleeme, mille esinemissagedus on võrreldes teiste tervishoiutöötajatega kõrgeim. Kõrge tööstress, väsimus ja unepuudus on seotud madala kognitiivse töövõimega. [16]

Seetõttu on töövägivalla ilmingute teadvustamine, ennetamine ja juhtimine kiirabitöös oluline nii organisatsiooni juhtidele kui ka töötajatele. Selle uuringu eesmärgiks on kirjeldada töövägivalla ja töökiusamise ilmingud kiirabi töös ning analüüsida tulemusi sõltuvalt demograafilistest ja tööalastest näitajatest.

MATERIAL JA METOODIKA

Käesolev uuring viidi läbi Eesti suurimas kiirabiasutuses ajavahemikul 27.02–19.03.2023. Sihtgruppikuulusid 10 kiirabiteenistust üle Eesti, kus hinnanguliselt töötab 1500 kiirabitöötajat.

Uuritavad. Ankeetküsimustik saadeti 550 uuritavatele e-posti vahendusel. Uuritava grupi valiku kriteeriumiteks oli vähemalt aastase töökogemusega töötajat, vanuse vahemikus 20-65 eluaastat. Kaasamaks uuringusse võimalikult palju kiirabitöötajaid, saadeti üks meeldetuletus kolmel järjestikusel nädalal.

Uuringu meetodiks on anonüümne veebipõhine küsitlusuuring. Uurimustöös kasutati rahvusvaheliselt standardiseeritud töökeskkonna Taanis välja töötatud psühhosotsiaalsete ohutegurite küsimustikku COPSOQ III (*Copenhagen Psychosocial Questionnaire, version 3*) [17]. Kuna e-küsitluse eesmärgiks oli koguda andmeid lisaks tööalase psühhosotsiaalsete ohutegurite kohta ja rohkem teavet töövägivallast kiirabitöötajate hulgas, siis lisati seda temaatikat puudutavatele üldküsimustele juurde täiendavaid küsimusikiirabi töös ettetulevate vägivallajuhtude kohta (nt kuulujutud ja laim, konfliktid, kiusamine, seksuaalne ahistamine, vägivallaoht (küber, verbaalne ja füüsiline). Konfliktse ja solvava käitumise küsimusi oli kokku9, mille vastuseid hinnati 5-palli skaalal, kus: 1 – jah, iga päev, 2 – jah, iga nädal, 3 – jah, iga kuu, 4 – jah,paar korda aastas ning 5 – ei.

Uuringu eesmärgist tulenevalt analüüsitakse näitajate erinevaid seoseid statistiliste andmetöötlusprogrammide abil (SPSS.21.0 - *Statistical Package of Social Sciences* ja *MS Excel*). Saadud andmed sisestati *MS Exceli* programmi, sisestusvigu kontrollitakse regulaarselt. Tulemustest esitatakse üldkirjeldavad näitajad – hinnangute sagedusjaotused (%), gruppide vaheliste erinevuse hindamiseks hii- ruut testi (χ^2*-testi*). Gruppide keskmiste näitajate võrdlemisel kasutati *Kruskal Wallis'e* testi ja sooliste erinevuste hindamisel *Mann-Whitney U* testi. Tulemuste usaldusväärsuse hindamisel võeti gruppide võrdlemisel arvesse statistiline tõenäosus $p \leq 0{,}05$.

Uuringu teostamiseks saadi nõusolek Tartu Ülikooli inimuuringute eetika komiteelt, mille kinnitus uuringu läbiviimiseks saadi 5. detsembril 2022 a (371/T-10, 5.12.2022). Eelnevalt saadi nõusolek uuringusosalemiseks kiirabiteenuse juhatuselt.

TULEMUSED

Uuringusse kaasati kiirabiteenistuses kõik (*n=550*) töötajad, kellele saadeti e-küsimustik. Kaasatud oli kogu kiirabi personal - arstid, õed (brigaadijuhid, jt liikmed), kiirabitehnikud kui ka kontori ja abitöölisi. Viimased kaasati samuti uuringusse, et selgitada välja organisatsiooni siseselt esinevat vägivallajuhtumeid. Täidetud ankeete saadi tagasi 125 vastajalt, mis teeb vastamismääraks 22,7%. Uuringus osalesidvaldavalt kiirabiõed, keda on kiirabiasutuses kõige rohkem (tabel 1).

Tabel 1. Valimi ametialane ja soo-vanuseline jaotus (*n=125*).
The sample distribution by occupational and demographic parameters (n=125)

Parameeter		**Arv, *n***	**Osakaal, %**
Amet	Arst	27	21,6
	Õde, brigaadijuht	39	31,2
	Õde, teine liige	33	26,4
	Kiirabitehnik	19	15,2
	Kontoritöötaja, abitööline	7	5,6
Sugu	Mees	41	32,8
	Naine	84	67,2
Vanus, aastat	≤30	23	18,4
	30 – 49	67	53,6
	≥50	35	28,0
Tööstaaž kiirabis, aastat			
	1-9	57	45,6
	10-19	42	33,6
	20-29	18	14,4
	30 – 45	8	6,4

Analüüsides kiirabitöötajate hinnanguid konfliktsele ja solvavale käitumisele (tabel 2), selgus, et soovimatu seksuaalse tähelepanuga on kokku puutunud 14,4% vastanutest (*n=18*) vähemalt paar korda aastas nii patsientide kui kolleegide poolt. Peamiselt soovimatu seksuaalse tähelepanu alla on sattunud noorem ja keskealiste vanusegrupp. Sooliselt tunnetasid soovimatut seksuaalset tähelepanu enamasti naised (*n=14*) ja vähesed mehed (*n=4*).

Töökohal tülitsenud või konfliktis on olnud 40,8% vastajatest (*n=51)*. Ebameeldiva narrimisega töökohal on kokku puutunud 21,6% vastanutest (*n=27*). Töökohal kiusamisega kolleegide, juhi ja patsientide poolt on kokku puutunud 16,8% vastajatest (*n=21*). Vastanutest 32% (*n=40*) on tundnud end kolleegide või ülemuse poolt ebaõiglaselt kritiseerituna, kiusatuna või teiste eest näidatuna.

Tabelist 2 on näha, et kiirabitöötajate hinnangud konflikti ja solvava käitumise osas erinesid oluliselt vanusegrupiti *(p<0,05*). Soovimatu seksuaalse tähelepanu hindas oluliselt kõrgemaks noorem vanusegrupp,võrreldes kesk- (*p=0,042*) ja vanemaealistega (*p=0,002*).

Vastajatest 32,8% puutuvad kord aastas kokku vägivallaga ähvardamisega patsientide poolt. Vägivallaga ähvardamine häiris nooremaid kiirabitöötajaid oluliselt rohkem kui keskealisi *(p=0,036*) või vanemaealisi töötajaid *(p*=0,006). Füüsilise vägivallaga patsiendi poolt on aasta jooksul kokku puutunud 17,6% vastanutest (*n=22*).

Kiirabitöötajatest keskealiste vanusegrupp hindas mõneti kõrgemalt kokkupuudet tööalase ahistamisega sotsiaalmeedias, võrreldes noorema vanusegrupiga (*p=0,05*).

Ülejäänud vägivallailmingud grupiti ei erinenud, kuigi tuli iga kuu kokku puutuda kuulujuttude või laimuga ning paar korda aastas tööalaste konfliktide, narrimise või kiusamisega, kolleegide või ülemuse poolt ebaõiglase kohtlemisega ja füüsilise

vägivallaga patsientide poolt.

Tabel 2. Vastajate hinnangud sõltuvalt vanusegrupiti konfliktide ja solvava käitumise osas (keskmised ±SD). *Respondents' assessments of conflicts and offensive behavior depending on age group (mean±SD).*

Küsimus	Vanusegrupid			Kruskal-Wallis'e test		
	1	2	3	Statistilin eerinevus, *p*	Grupid	Gruppide erinevus, *p*
Kokkupuude töökohal soovimatu seksuaalse tähelepanug a.	4,65±0,49	4,85±0,40	4,97±0,17	0,004	1 - 2 1 - 3	0,042 0,002
Kokkupuude töökohal vägivallaga ähvardamisega.	4,35±0,57	4,63±0,65	4,77±0,49	0,007	1 - 2 1 - 3	0,036 0,006
Kokkupuude kuulujuttude ja laimuga.	3,35±0,94	3,48±1,04	3,74±1,25	*ns*	*ns*	*ns*
Kokkupuude töökohal tülitsemise või konfliktiga.	4,48±0,67	4,67±0,47	4,40±0,60	*ns*	*ns*	*ns*
Kokkupuude tööalase ahistamisega sotsiaalmeedias (nt facebookis, e-kirjade vm kaudu)	4,91±0,29	5,00±0,00	4,97±0,17	0,063	1 - 2	0,05
Kokkupuude töökohal füüsilisevägivallaga.	4,74±0,54	4,81±0,44	4,86±0,36	*ns*	*ns*	*ns*
Kokkupuude kiusamisega töökohal.	4,87±0,34	4,84±0,37	4,69±0,58	*ns*	*ns*	*ns*
Kolleegide või ülemuse poolt ebaõiglaselt koheldud (kritiseeritud, kiusatud vm).	4,74±0,45	4,66±0,48	4,66±0,54	*ns*	*ns*	*ns*

Märkus: skooride suurenedes esinevad vägivallailmingud harvemini; vanusegrupid: 1 – alla 30 a.; 2 – 30-49 a.;3 – üle 50 a.

Kiirabitöötajate hinnangud konfliktide ja solvava käitumise soovimatu seksuaalse tähelepanu küsimusele erinesid oluliselt ameti grupiti (*p=0,002*). Kiirabibrigaadijuhist õde hindas soovimatu seksuaalse tähelepanu oluliselt kõrgemaks kui kiirabiõde teine liige (*p=0,003*) ja kiirabitehnik (*p=0,011*).

Töökeskkonnas viimase aasta jooksul on kuulujutu ja laimuga kokku puutunud

83,2% vastajatest (*n=104*). Kiirabitöötajate hinnangud kokkupuude kuulujuttude ja laimuga erinesid tööstaaži gruppides (*p=0,029*). Kauem töötanud (üle 30 aasta) kiirabitöötajad tunnetasid rohkem kuulujuttu ja laimu kui töötajad, kes on töötanud kiirabis alla10 aasta (*p=0,02*).

ARUTELU

Töökiusamine on levinud nähtus, millest on teatatud kogu maailmas. Erakorralise meditsiiniõed kui ka kiirabitöötajad puutuvad kiusamisega kokku oma tööstressi tekitajate ja nõudmiste tõttu [18]. Kiusamine ei ole tavaliselt seotud üksikjuhtumiga, vaid pigem käitumismustriga, mis on korduvaltja püsivalt suunatud ühele või mitmele töötajale [18, 19]. Uuringu andmete põhjal selgus, et töökeskkonnasesineb kolleegide vahel töökiusamist, narrimist, kuulujutte ja laimu. Kõige enam tunnetasid kuulujuttu ja laimu pikema tööstaažiga töötajad. Kuid teiste ees kiusamist ja kritiseerimist on tundnud ligi 32%uuritavatest. Varasemad uuringud on samuti leidnud, et 40% õdedest on tööl regulaarselt kokku puutunud kiusamise, tõrjumise, hirmutamise ja halvustamisega [18, 20-22]. Ühes varasemas uuringust selgus, et erakorralise meditsiiniõdede seas on väga kõrge töökiusamise levimus (ligi 90%) [18]. Vessey *et al* on jõudnud järeldusele, et kiusamine on õpitud käitumine, mis sõltub töökeskkonnast [16, 25]. Arvatakse, et kiusamise tõus võib olla seotud stressirohkest töökeskkonnast ja rollikonfliktist kolleegide vahel [18, 23, 24].

Antud uuringus selgus, et kiirabitöötajate töös esineb töövägivalla ja töökiusamise ilminguid ning sõltuvalt tööalastest ja demograafilistest näitajatest need mõneti erinesid. Tulemused näitasid, et kiirabitöötajaid ähvardatakse vägivallaga vähemalt kord aastas. Oluliselt kõrgemaks hindasid vägivallaga ähvardamist nooremad töötajad, võrreldes kesk- ja vanemaealistega. Kuid kuulujutte ja laimutöökeskkonnas tunnetasid kõige enam pikema (>30 aastase) tööstaaziga töötajad, võrreldes <10 aastase tööstaažiga töötajatega.

Nii varasemad uuringud kui ka antud töö leidis kinnitust, et meditsiinitöötajad puutuvad sageli kokkusoovimatu seksuaalse tähelepanuga ning vägivalla ähvardustega just patsientide poolt [5, 11]. Selles uuringus selgus ka, et soovimatut seksuaalset tähelepanu hindasid oluliselt kõrgemaks nooremad, võrreldes kesk- ja vanemaealiste töötajatega. Kiirabibrigaadijuhist õed hindasid oluliselt kõrgemaks soovimatut seksuaalset tähelepanu kui kiirabitehnikud ning õed, kes töötavad teise liikmena.

JÄRELDUSED

Ülaltoodust tulenevalt saab järeldada, et kiirabi töökeskkonnas esineb erinevaid vägivalla vorme, mison seotud nii kolleegide kui patsientidega. Kiusamine töökohal mõjutab töötajaid organisatsioonis ning patsiente. Töökiusamine mõjutab töötaja tootlikkust ning see läbi ka organisatsiooni tootlikust. Lisaks mõjutab töökiusamine tervishoiuasutuses ravi kvaliteeti. Seega on vaja asutuses vähendada töökiusamist ja vägivalda, et luua parem töökeskkond nii töötajatele kui ka ravikeskkond patsientidele.

Seega tuleb suuremat tähelepanu pöörata töövägivalla teemat puudutavatele

koolitustele ja rakendadatöövägivalla ennetusprogramme, et töötajad oskaksid ennast paremini kaitsta nii füüsilise-, vaimse- kui ka seksuaalsevägivalla eest.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] Töövägivald,kiusamine ja diskrimineerimine töökohal. 2018 https://www.rmp.ee/toooigus/ohutus/toovagivald-kiusamine-ja-diskrimineerimine-tookohal-2018-04- 03 (29.05.22)

[2] Morken, T., Johansen, I. H. & Alsaker, K. (2015). Dealing with workplace violence in emergencyprimary health care: a focus group study. *Springer Science and Business Media LLC* 10.1186/s12875-015-0276-z

[3] Sotsiaalministeerium. Terviseamet. Tervishoid. Inimesele. Kiirabi. (veebileht) https://www.terviseamet.ee/et/valdkonnad/tervishoid/kiirabi (02.01.2022)

[4] Ramacciati N, Gili A, Mezzetti A, Ceccagnoli A, Addey B, Rasero L. (2019) Violencetowards Emergency Nurses: The 2016 Italian National Survey-Across-sectional study. *J Nurs Manag*, 27(4):792–805, http://dx.doi.org/10.1111/jonm.12733.

[5] Maguire, B. J., O'Meara, P, O'Neill, B. J. & Brightwell, R. (2017). Violence against emergency medical services personnel: A systematic review of the literature. *Am J Ind Med.* 2018;61:167–180.

[6] Bigham BL, Jensen JL, Tavares W, *et al*. (2014) Paramedic self-reported exposure to violence in the emergency medical services (EMS) workplace: a mixed-methods cross-sectional survey. *Prehosp Emerg Care*, 18:489–494.

[7] Boyle M, Koritsas S, Coles J, Stanley J. (2007) A pilot study of workplace violence towards paramedics. *Emerg Med J*, 24:760–763.

[8] Koritsas S, Boyle M, Coles J. (2009) Factors associated with workplace violence in paramedics. *PrehospDisaster Med*, 24:417–421.

[9] Gałązkowski R, Binkowska A, Samoliński K. (2015) Occupational injury rates in personnel of emergency medical services. *Ann Agric Environ Med*, 22:680–684.

[10] Gormley MA, Crowe RP, Bentley MA, Levine R. (2016) A national description of violence towardemergency medical services personnel. *Prehosp Emerg Care*, 20:439–447.

[11] Petzäll K, Tällberg J, Lundin T, Suserud BO. (2011) Threats and violence in the Swedish pre-hospitalemergency care. *Int Emerg Nurs*, 19:5–11

[12] Baydin, A., Erenler, A. K. (2014). Workplace Violence in Emergency Department and its Effects onEmergency Staff. *International Journal of Emergency Mental Health and Human Resilience*, Vol. 16, No. 66-68, pp. ISSN 1522-4821

[13] Stanley, J., Goddard, C. (2002). In the firing line: violence and power in child protectionwork. *Chichester: John Wiley and Sons*, 92, 88–92.

[14] Fernandes, C.M., Bouthillette, F., Raboud, J.M., Bullock, L., Moore, C.F., Christenson, J.M., et al. (1999). Violence in the emergency department: a survey of health care workers. *Canadian Medical Association Journal*, 161, 1245–8.

[15] Sahebi, A., Jahangiri, K., Sohrabizadeh, S., & Golitaleb, M. (2019). Prevalence of Workplace ViolenceTypes against Personnel of Emergency Medical Services in Iran: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Knowledge E*. 10.18502/ijps.v14i4.1984

[16] Sedlàr, M. (2021). Work-related factors, cognitive skills, unsafe behavior and safety incident involvement among emergency medical services crew members: relationships and indirect effects. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)* doi.org/10.1080/10803548.2021.1888018

[17] Lincke, HJ., Vomstein, M., Lindner, A., Nolle, I., Häberle, N., Haug, A., Nübling, M. (2021) COPSOQIII in Germany: valitatsion of a standard instrument to measure psychosocial factor at work. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 16:50. https://doi.org/10.1186/s12995-021-00331-1

[18] Al-Ghabeesh, S. H., Qattom, H. 2019. Workplace bullying and its preventive measures and productivity among emergency department nurses. *BMC Health Services Research*, 19:445, https://doi.org/10.1186/s12913-019-4268-x

[19] Longo J. (2012) Bullying in the workplace: Reversing a culture. Silver Spring: Nursebooks.org.

[20] Laschinger HKS, Grau AL, Finegan J, Wilk P. (2010) New graduate nurses'experiences of bullying and burnout in hospital settings. *J Adv Nurs*, 66(12):2732–42. https://doi.org/10.1111/j.1365- 2648.2010.05420.x.

[21] Simons S. (2008) Workplace bullying experienced by Massachusetts registered nurses and the relationship to intention to leave the organization. *Adv Nurs Sci*, 31(2):E48–59.

[22] Spector PE, Zhou ZE, Che XX. (2014) Nurse exposure to physical and nonphysical violence, bullying,and sexual harassment: a quantitative review. *Int J Nurs Stud*, 51(1):72–84.

[23] Darawad MW, Al-Hussami M, Saleh AM, Mustafa WM, Odeh H. (2015) Violence against nurses in emergency departments in Jordan: Nurses' perspective. *Workplace health and safety*, 63(1):9–17.

[24] ALBashtawy M, Aljezawi M. (2015) Emergency nurses' perspective of workplace violence in Jordanian hospitals: A national survey. *Int Emerg Nurs*. https://doi10.1016/j.ienj.

[25] Nwaneri AC, Onoka AC, Chima A, Onoka CA. (2016) Workplace bullying among nurses working intertiary hospitals in Enugu, southeast Nigeria: Implications for health workers and job performance. *JNurs Educ Pract*, 69–78.

Praktiline üldjuhis ergonoomidele ja töökeskkonnaspetsialistidele sundasendite hindamiseks

K. Nellis, M. Reinvee

Eesti Maaülikool, Metsanduse ja inseneeria Instituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool

Abstract. Ergonomists and occupational health and safety (OHS) specialists should use reliable ergonomics assessment methods for assessing physiological hazards, including postural load. The article gives an overview of observational ergonomics assessment methods for assessing postural load and general guidance to ergonomists and OHS specialists for choosing methods that meet specialists' needs. Databases Google Scholar, Science Direct and Scopus where searched for papers about ergonomic assessment methods, time of publication until March 1, 2023. Inclusion criteria was as follows: the methods need to be evidence-based, easy to use and observation based. Twelve methods were found that meet the criteria: EAWS, EN 1005-4, ISO 11226, KIM-ABP, LUBA, NERPA, OWAS, PATH, PERA, RAMP II, REBA, RULA. All twelve methods are suitable for assessing postural load. Methods OWAS, REBA, RAMP II and EN 1005-4 allow assessment of postural load in single or multi-posture task, methods EAWS and PATH allow only to assess multi-posture tasks. Methods OWAS, RULA and ISO 11226 have been used as the basis for the development of other methods, therefore, it is recommended to learn to use those methods first, as it helps to understand the majority of other methods. For ergonomists and OHS specialists who have limited experience of ergonomic assessment it is recommended to use the following methods: RULA, REBA, OWAS and KIM-ABP.

Keywords: ergonomic assessment, occupational health, working

SISSEJUHATUS

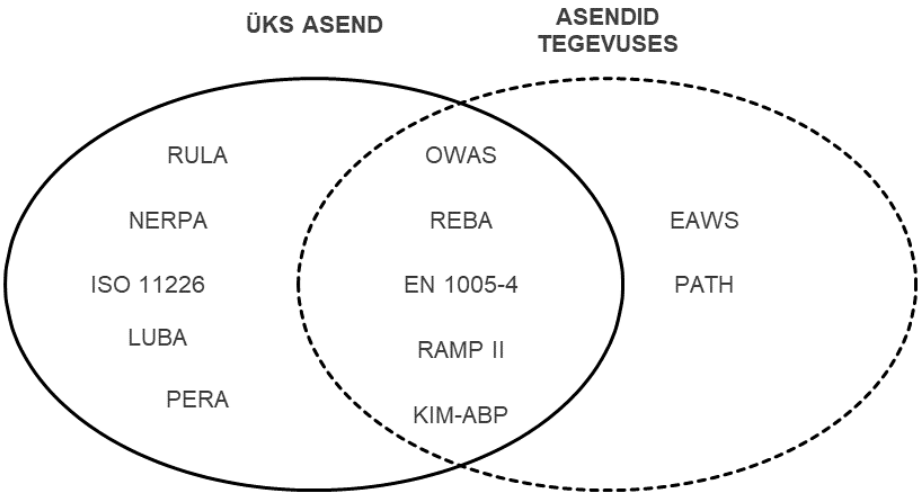
Tööandja on kohustatud tagama, et töökeskkonnas esinevad füsioloogilised ohutegurid nagu füüsilise töö raskus, sama tüüpi liigutuste kordumine, üleväsimust põhjustavad sundasendid ja sundliigutused töös ei kahjusta töötaja tervist [1]. Eestis on sundasendid teine levinuim tööga seotud haigusi põhjustav füsioloogiline ohutegur [2]. Luu-lihaskonna vaevuste tõhus ennetamine eeldab, et tööandja suudab riskihindamisel välja selekteerida olulised füüsilise koormuse tegurid [3-5], planeerida saadud tulemuste alusel tõhusad sekkumistegevused [6] ning hiljem hindab ergonoomikaliste sekkumistegevuste mõju [3]. Füsioloogiliste ohutegurite hindamine ergonoomikaliste sekkumistegevuste planeerimiseks ainult vaatlemise või intervjuuga ei anna usaldusväärseid tulemusi [6, 7]. Seetõttu on tööandjal vaja kasutada tõenduspõhiseid ergonoomikalisi hindamismeetodeid [3]. Kuigi ergonoomikalisi hindamismeetodeid on palju, siis on Eestis probleemiks hindamismeetodite vähene kasutamine [8]. Artikli eesmärk on esitada ülevaade sundasendi ergonoomikalistest hindamismeetoditest ja anda üldine juhis sobiva meetodi valimiseks praktiseerivatele ergonoomidele ja töökeskkonnaspetsialistidele.

MATERJAL JA METOODIKA

Sundasendi ergonoomikaliste hindamismeetodite otsinguks kasutati elektroonilisi andmebaase *ScienceDirect*, *Google Scholar* ja *Scopus*. Otsiti ainult ingliskeelseid allikaid, mis on avaldatud kuni 01.03.2023. Otsingusõnadena kasutati märksõnu *postural load, ergonomic assessment methods, postural assessment, body posture assessment.* Pärast esmast meetodite otsimist jätkati konkreetsete juba leitud meetoditega seotud artiklite otsimist, näiteks märksõnadega RULA, REBA, RAMP II, NERPA ja nii edasi. Valikusse jäeti ergonoomikalised hindamismeetodid, mis on tõenduspõhised, ergonoomidele ja töökeskkonnaspetsialistidele jõukohased kasutada ning ei eelda spetsiaalse tehnilise varustuse olemasolu. Tulemusena leiti 12 kriteeriumitele vastavat hindamismeetodit.

TULEMUSED JA ARUTELU

Loetelu analüüsi valitud kaheteistkümnest sundasendi ergonoomikalisest hindamismeetodist, akronüümist, allikast ja viitest töölehele on esitatud tabelis 1. Kõik analüüsi valitud hindamismeetodid võimaldavad hinnata sundasendit, aga nende hulgas on meetodeid, mis võimaldavad hinnata lisaks asendite vaheldumist tegevustes (OWAS, REBA, EN 1005-4, RAMP II) või oma põhieesmärgiga hindavadki ainult vahelduvaid asendeid tegevustes (EAWS ja PATH). Joonisel 1 on esitatud meetodite jaotus lähtuvalt hindamise eesmärgist, mis võimaldab praktikul teha kiiresti esmane valik ergonoomikalise hindamismeetodi valikuks.

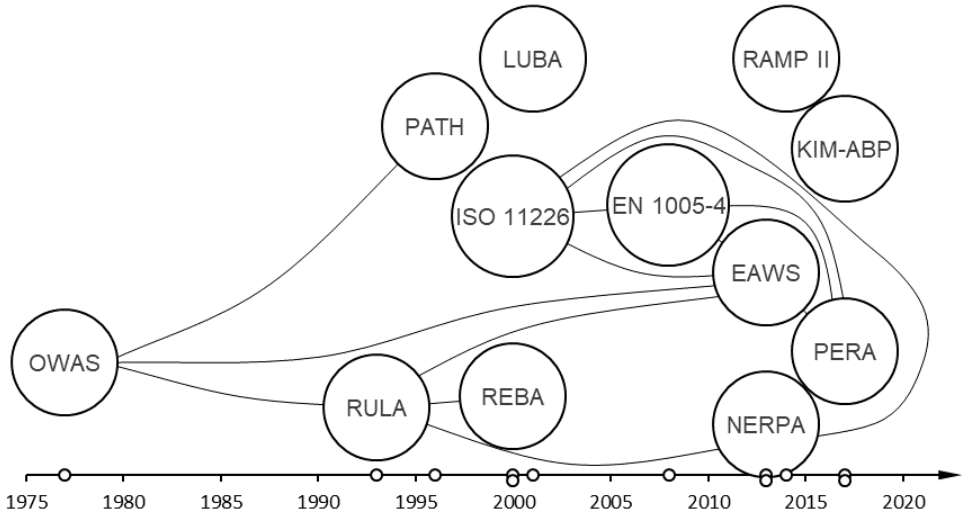


Joonis 1. Ergonoomikaliste hindamismeetodite jagunemine asendite ja tegevuste hindamise alusel.

Tabel 1. Ülevaade analüüsitud sundasendi hindamismeetoditest, allikatest ja viidetest töölehtedele või artiklitele, kui tööleht puudub.

Meetodi akronüüm	**Hindamismeetodi ingliskeelne nimetus**	**Allikas**	**Viide töölehele või artiklile, kui tööleht puudub**
EAWS	European Assembly Worksheet	[9]	https://www.eaws.it/form-download-page/
EN 1005-4	Safety of machinery - Human physical performance - Part 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery	[10]	https://www.evs.ee/et/evs-en-1005-4-2005-a1-2008-consolidated
ISO 11226	ISO 11226:2000. Ergonomics - Evaluation of Static working postures	[11]	https://www.evs.ee/et/iso-11226-2000
KIM-ABP	Key Indicator Method for assessing and designing physical workloads with respect to Akward Body Postures	[12]	https://www.ergonomiesite.be/documenten/risicoanalyse/KIM-ABP-Awkward-Body-Postures.pdf
LUBA	Postural Loading on the Upper Body Assessment	[13]	https://doi.org/10.1016/S0003-6870(01)00006-0
NERPA	Novel Ergonomic Postural Assessment Method	[14]	https://figshare.com/articles/figure/_NERPA_worksheet_modified_from_RULA_worksheet_using_new_NERPA_criteria_/774977/1
OWAS	Ovako Working Posture Analysing System	[15]	http://ergonoomika.ee/allalaadimiseks/OWAS-est.pdf
PATH	Posture, Activity, Tools and Handling	[16]	https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00078-X
PERA	Postural Ergonomic Risk Assessment	[17]	https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.11.007
RAMP II	Risk Assessment and Management tool for manual handling Proactively	[18]	https://www.ramp.proj.kth.se/polopoly_fs/1.731806.1600688854!/RAMP%20II%20-%20In%20depth%20analysis%20%28Version%201.03%29%20English%20version.pdf
REBA	Rapid Entire Body Assessment	[6]	http://ergonoomika.ee/allalaadimiseks/REBA-est.pdf
RULA	Rapid Upper Limb Assessment	[19]	http://ergonoomika.ee/allalaadimiseks/RULA-est.pdf

Ergonoomikaliste hindamismeetodite avaldamise aeg varieerub 1977. kuni 2017. aastani. Üldjuhul kehtib reegel, et mida hilisem on meetod, seda laiapõhjalisem, aga ka keerukam on see kasutaja jaoks. Sundasendite ergonoomikalisi hindamismeetodeid uurides selgus, et nii mitmedki meetodid on eeskujuks võtnud mõne varasemalt välja töötatud hindamismeetodi. Meetodite esmane avaldamise aeg ja omavahelised seosed on esitatud joonisel 2, kus on näha, et sagedamini on eeskujuks võetud meetodid OWAS, RULA ja standard ISO 11226. Kui ergonoom või töökeskkonnaspetsialist omandab nende kolme meetodi tööpõhimõtte, siis oskab ta selle põhjal tõenäolisemalt kasutada ka OWAS meetodist eeskuju saanud meetodeid PATH, EAWS ja RULA. Kui ergonoom on omandanud meetodi RULA kasutamise, siis ta oskab tõenäolisemalt kasutada ka meetodeid EAWS, REBA ja NERPA. Standardi ISO 11226 põhimõtete tundmine annab tõenäolisemalt eelduse standardi EN 1005-4 ja meetodite EAWS, PERA ja NERPA mõistmiseks. Meetodi RAMP II koostamisel kasutati palju erinevaid allikaid, mistõttu tuleb seda meetodit käsitleda kui täiesti eraldiseisvat, millel puuduvad seosed muude varem välja töötatud meetoditega. Meetodite LUBA ja KIM-ABP välja töötamise aluseks on eksperimentaalsed uuringud, mistõttu on tegemist unikaalsete meetoditega, millel ei ole muude meetoditega seoseid.



Joonis 2. Ergonoomikaliste hindamismeetodite välja töötamise aeg ja omavahelised seosed.

Hindamiseks kasutatavad töölehed on kättesaadavad meetoditel RULA, REBA, OWAS, KIM-ABP, EAWS, RAMP II, NERPA, puudu meetoditel LUBA, PERA, PATH, ISO 11226 ja EN 1005-4. Eestikeelsena on kättesaadavad meetodite RULA, REBA, OWAS ja EAWS töölehed. Muud hindamismeetodite töölehed või juhised on ingliskeelsed.

Valitud meetoditest sobivad esmaseks tööasendi hindamiseks vähem kogenud ergonoomile või töökeskkonnaspetsialistile meetodid RULA, REBA, OWAS ja KIM-ABP. Uue masina kasutusele võtmisel on asjakohane järgida standardi EN 1005-4 juhiseid, mis on jõukohane kasutada ka ilma eelneva väljaõppeta. Meetodid RAMP II ja EAWS sobivad põhjaliku analüüsi läbiviimiseks ja eeldavad eelnevalt väljaõpet, aga kuna EAWS on saadaval eestikeelsena ning on Euroopas laialdaselt kasutusel, siis on soovitus seda rakendada ka Eestis. Muude meetodite kasutamine eeldab kas meetodi mugavaks kasutamiseks töölehe vormistamist, tõlkimist arusaadavasse keelde või põhjalikumat koolitust ja väljaõpet, mistõttu on soovitav kasutada pigem järgnevate valikutena.

JÄRELDUSED

Kõik valitud sundasendi ergonoomikalised hindamismeetodid (EAWS, EN 1005-4, ISO 11226, KIM-ABP, LUBA, NERPA, OWAS, PATH, PERA, RAMP II, REBA, RULA) sobivad sundasendi hindamiseks, aga kui töös on vajalik lisaks hinnata asendite muutusi tegevustes, siis sobivad hindamismeetoditena OWAS, REBA, RAMP II ja EN 1005-4. Meetodid EAWS ja PATH võimaldavad anda hinnangu asendi esinemissagedusele tegevuses. Meetod EAWS on Euroopas laialdaselt kasutusel, sellel on olemas eestikeelne tööleht, mistõttu on soovitus seda rakendada ka Eestis. Meetodid OWAS, RULA ja ISO 11226 on andnud eeskuju hilisemalt välja töötatud meetoditele. Seda arvestades on soovitus ergonoomidele ja töökeskkonnaspetsialistidele omandada esmalt eeskuju andvate meetodite kasutamise oskus, sest siis on lihtsam omandada ka nendest tuletatud muid hindamismeetodeid. Valitud meetoditest sobivad esmaseks tööasendi hindamiseks vähem kogenud ergonoomile või töökeskkonnaspetsialistile meetodid RULA, REBA, OWAS ja KIM-ABP.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] Riigikogu, RT 1 1999, 60, 616 (1999, June 16). Töötervishoiu ja tööohutuse seadus. [Online]. Available: https://www.riigiteataja.ee/akt/111032023098

[2] Terviseamet, "Infomaterjalid ja sihtgrupiuuringud. Aruanded. Kutsehaigestumine ja tööst põhjustatud haigestumine." 2007.-2009, 2010.-2021. [Online]. Available: https://www.terviseamet.ee/et/uuringud-oigusaktid/aruanded

[3] K. Eliasson, C. M. Lind, and T. Nyman, "Factors influencing ergonomists' use of observation-based risk-assessment tools," *Work*, vol. 64, no. 1, pp. 93–106, 2019, doi: 10.3233/WOR-192972

[4] J. Oakman, N. Kinsman, V. Weale, and R. Stuckey, "A qualitative exploration of tools used by WHS professionals for the prevention of musculoskeletal disorders," *Saf. Sci.*, vol. 149, p. 105685, 2022, doi: 10.1016/j.ssci.2022.105685

[5] P. J. Beliveau, H. Johnston, D. Van Eerd, and S. L. Fischer, "Musculoskeletal disorder risk assessment tool use: A Canadian perspective," *Appl. Ergon.*, vol. 102, p. 103740, 2022, doi: 10.1016/j.apergo.2022.103740

[6] S. Hignett and L. McAtamney, "Rapid Entire Body Assessment (REBA)," *Appl. Ergon.*, vol. 31, no. 2, pp. 201–205, 2000, doi: 10.1016/S0003-6870(99)00039-3

[7] P. Plantard, H. P. H. Shum, A. S. Le Pierres, and F. Multon, "Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions," *Appl. Ergon.*, vol. 65, pp. 562–569, 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2016.10.015

[8] M.Tasane. "Kokkuvõte lõppenud sihtkontrollist luu- ja lihaskonna vaevuste ennetamise kohta". 2022. [Online]. Available: https://www.ti.ee/asutus-uudised-ja-kontaktid/statistika

[9] K. Schaub, G. Caragnano, B. Britzke, and R. Bruder, "The European Assembly Worksheet," *Theor. Issues Ergon. Sci.*, vol. 14, no. 6, pp. 616–639, 2013, doi: 10.1080/1463922X.2012.678283

[10] Masinate ohutus. Inimeste füüsiline töö. Osa 4. Tööasendite ja liigutuste hindamine. Konsolideeritud tekst. EVS-EN 1005-4:2005+A1:2008. Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2008

[11] Ergonomics - Evaluation of Static working postures, ISO 11226:2000, The International Organization for Standardization, 2000

[12] B. Hartmann, P. Serafin, A. Klussmann, A. Schäfer, H. Gebhardt, F. Liebers, F. Brandstädt, M. Schust, „The draft on the new key indicator method "awkward body postures" (KIM-ABP): Aspect of background, objectivity, reliability and criterion validity", presente at 10th International Scientific Conference on the Prevention of Work-Related Muscuskeletal Disorders, University of Bolongna, 2-5 September 2019

[13] D. Kee, W. Karwowski, „LUBA: an assessment tehnique for postural loading on the upper body based on joint motion discomfort and maximum holding time“, *Appl Ergon*, vol 32, no 4, pp 357-366, 2001, doi: 10.1016/S0003-6870(01)00006-0

[14] A. Sanchez-Lite, M. Garcia, R. Domingo, and M. Angel Sebastian, “Novel Ergonomic Postural Assessment Method (NERPA) Using Product-Process Computer Aided Engineering for Ergonomic Workplace Design,” *PLoS One*, vol. 8, no. 8, pp. 1–12, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0072703

[15] O. Karhu, P. Kansi, and I. Kuorinka, “Correcting working postures in industry: A practical method for analysis,” *Appl. Ergon.*, vol. 8, no. 4, pp. 199–201, 1977, doi: 10.1016/0003-6870(77)90164-8

[16] B. Buchholz, V. Paquet, L. Punnett, D. Lee, and S. Moir, “PATH: A work sampling-based approach to ergonomic job analysis for construction and other non-repetitive work,” *Appl. Ergon.*, vol. 27, no. 3, pp. 177–187, 1996, doi: 10.1016/0003-6870(95)00078-X

[17] D. Chandler, D, M. Cavatorta, „An observational method for Postural Ergonomic Risk Assessment (PERA).“ *Int Jour of Ind Ergon*, vol 57, pp 32-41, 2017 doi: 10.1016/j.ergon.2016.11.007

[18] C. Lind, L. Rose, H. Franzon, and L. Nord-Nilsson, “HUMAN FACTORS IN ORGANIZATIONAL DESIGN AND MANAGEMENT-XI NORDIC ERGONOMICS SOCIETY ANNUAL CONFERENCE-46 RAMP: risk management assessment tool for manual handling proactively”

[19] L. McAtamney and N. E. Corlett, “RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders.,” *Appl. Ergon.*, vol. 24, no. 2, pp. 91–99, 1993, doi: 10.1016/0003-6870(93)90080-S