



TALLINNA TEHNICAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**JUHENDMATERJALI VÄLJATÖÖTAMINE
ÕPPEAINE TUULE- JA PÄIKESENERGEETIKA
KODUSTE TÖÖDE LÄBIVIIMISEKS**

**DEVELOPMENT OF STUDY MATERIALS FOR HOMEWORK
IN SUBJECT WIND AND SOLAR POWER ENGINEERING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Eerik Reinsoo

Üliõpilaskood: 192239AAVM

Juhendaja: Professor Ivo Palu

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Eerik Reinsoo (sünnikuupäev: 12.05.1988)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Juhendmaterjalide väljatöötamine õppeaine tuule- ja päikeseenergeetika koduste tööde läbiviimiseks“

mille juhendaja on Ivo Palu,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Eerik Reinsoo

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Juhendmaterjalide väljatöötamine õppeaine tuule- ja päikeseenergeetika koduste tööde läbiviimiseks

Kuupäev: 18.05.2021

102 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: Professor Ivo Palu

Sisu kirjeldus: Lõputöö eesmärgiks on välja töötada õppeaine tuule- ja päikeseenergeetika tarvis, kodutöö praktiliste ülesannete juhend, aitamaks üliõpilastel paremini seostada õppeaine teoreetilist ja praktilist osa ning võimaldamaks võrrelda erinevate, tudengite poolt esitatud, tööde tulemusi. Praktilisi ülesandeid lahendatakse modelleerimistarkvaradega WindPRO, DIgSILENT Power Factory ja HomerPRO.

Töös antakse ülevaade tuule- ja päikeseenergeetika õppeainest, tutvustatakse elektrituulikuid ja päikesepaneele ning nende tootlikkust mõjutavaid tegureid (võimsuskarakteristikud, tuulekiirus, tuulesuund, varjutusefekt, päikesepaneeli töötemperatuur ja kaldenurk, päikesekiirus, päikesepaiste kestus, pilvisus). Lühidalt kirjeldatakse modelleerimistarkvarade struktuurset ülesehitust ja nende otstarvet. Analüüsitakse tarkvarade sobilikkust, õppeaine õpiväljundite edastamiseks. Võrreldakse ja hinnatakse tarkvarade võimekusi, võrdlustabeli alusel.

Lõputöö viimases peatükis valitakse kodutööde teostamise meetodika ja koostatakse praktiline ülesanne. Iga tarkvara kohta koostatakse eraldi ülesanne. Valitakse välja ülesannete lahendamise järjekord. Määratakse lähteandmed. Seletatakse ülesande lahenduskäik nii graafiliselt kui ka arvutusi esitades. Koostatud ülesannete põhjal teostatakse nädisaruanne, mis lisatakse lõputöö lisadesse.

Lõputöö jätkuks tasuks uurida võimalikke modelleerimistarkvarasid, saavutamaks paremaid tulemusi päikeseenergeetika uurimisel.

Märksõnad: tuuleenergeetika, päikeseenergeetika, elektrituulik, päikesepaneel, modelleerimise tarkvarad, WindPRO, DIgSILENT Power Factory, HomerPRO, õppematerjal, taastuvenergeetika.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Eerik Reinsoo	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Development of study materials for homework in subject Wind and Solar Power Engineering	
<i>Date:</i> 18.05.2021	102 pages (the number of thesis pages including appendices)
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> Professor Ivo Palu	
<p><i>Abstract:</i> The aim of the thesis is to develop study material for Wind and Solar Power Engineering subject. Study materials will help future students to understand and realize the connections between the knowledge provided in lectures and practical homework study cases. It also allows to make comparison between different homework results in a simpler manner, providing good base for open discussions. Practical homework study cases are solved with different software applications – WindPRO, DIgSILENT Power Factory and HomerPRO. The thesis gives an overview of the Wind and Solar Power Engineering subject. It also gives a basic introduction over the wind turbine and PV panel working principles, their constructions and describes different factors which are affecting the productivity (characteristics, wind speed, wind direction, wake effect, working temperature and tilt angle of PV panel, solar radiation, duration of daytime, cloudiness). As well, briefly describing software applications that are used for practical study cases, their buildup structure and range of use. The suitability of software to provide learning outcomes of the named subject is analyzed. The capabilities of the software are compared and evaluated on the basis of a comparison table. In the final chapter of the thesis, the practical homework case study is compiled. A separate task is created for each software. The order in which the tasks are solved is selected. The source data is determined. The solution of the study case is explained both graphically and by presenting calculations. Based on compiled study case, a sample report is made and included in the appendices. As a continuation of the thesis, it would be worthwhile to search for new software in order to achieve better study cases in solar energy.</p>	
<i>Keywords:</i> wind energy, solar energy, WindPRO, DIgSILENT Power Factory, HomerPRO, wind turbine, solar panel, study material, renewable energy.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Juhendmaterjali väljatöötamine õppeaine tuule- ja päikeseenergeetika koduste tööde läbiviimiseks
Lõputöö teema inglise keeles:	Development of study materials for homework in subject Wind and Solar Power Engineering
Üliõpilane:	Eerik Reinsoo, 192239AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Ivo Palu
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	18.05.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Taastuvenergia on üks peamisi suundasid, kuhu maailma energeetika oma arengult on liikumas. Selles tulenevalt nähakse vajadust, arendada ja muuta konstruktiivsemaks, EES5130 „Tuule- ja päikeseenergeetika“ ainekava, muutmaks õppeainet atraktiivsemaks tulevastele tudengitele. Lõputöö käigus töötatakse välja õppemetoodika aine koduste tööde tegemiseks, et paremini valmistada ette tulevasi tudengeid. Valitud metoodika abil õpitakse tundma modelleerimistarkvarasid „HomerPRO“, „WindPRO“ ja „DIGSILENT“ ning omandatakse teadmisi tuule- ja päikeseelektrijaamade tööpõhimõtetest.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on välja töötada tulevastele tudengitele juhend, aitamaks mõistmast, tuule- ja päikeseelektrijaamade rajamisel esinevaid nüansse, läbi praktiliste ülesannete, kasutades ja sidudes omavahel tervikuks erinevaid modelleerimistarkvarasid.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Milleks on vajalikud taastuvenergia lahendused?
- Millest sõltub päikeseelektrijaama tootlikkus?
- Millest sõltub tuulegeneraatorite tootlikkus?

- Millised on tähtsamad, elektrivõrgu komponendid, taastuenergia lahenduste projekteerimisel?
- Milline on modelleerimistarkvara „HomerPRO“, „WindPRO“ ja „DIGSILENT“ tööpõhimõte ning nende tarkvarade võimekus?
- Milline on laboritööde juhendi ülesehitus?

4. Lähteandmed

Modelleerimistarkvara kasutusjuhendite läbitöötamisel, tehakse selgeks tarkvarade võimekus, mis on kättesaadavad tarkvara arendajate kodulehel. Lisaks saadakse tarkvara võimekuse kohta, lähteandmeid, teadusartiklitest. Tuule- ja päikeseelektrijaamade projekteerimise praktiline teadmine saadakse Enefit Green AS ja Eleon AS-lt.

5. Uurimismeetodid

Alustuseks kogutakse kokku lähteandmed ja töötatakse läbi tarkvarade kasutusjuhendid. Seejärel mõeldakse välja laboritööde juhendi struktuur ja meetodika, mis võimaldaks siduda kõik kolm modelleerimistarkvara („HomerPRO“, „WindPRO“ ja „DIGSILENT“) ühtseks tervikuks. Struktuuri väljatöötamisel analüüsitakse ja lähtutakse asjaolust, et koostatav struktuur võimaldaks igale tudengile individuaalset lähenemist. Järgnevalt teostab lõputöö autor, väljatöötatud laboritööde juhendi alusel, näidislahenduse ja lisab saadud tulemuse, lõputöö lisadesse. Uurimismeetod põhineb õppemetoodika osas kirjanduse analüüsil. Eri tarkvarade kasutamist põhjendatakse ja analüüsitakse, et määrata, milline tarkvara on kõige sobilikum laboritöös kindla ülesandeosa lahendamiseks. Magistritöös valminud võrdluse ja analüüsi tulemuse pealt teostatakse näidisaruanne, mis sisaldab tudengite poolt tehtud analüüsi ja ülesannete lahendust.

6. Graafiline osa

Lõputöö graafiliseks osaks on jooniste näol tehtavad väljavõtted modelleerimise tarkvaradest. Graafiline osa on peamiselt töö põhiosa. Kirjeldatakse lähteandmete sisestusviise ja tuuakse välja modelleerimise tulemused.

7. Töö struktuur

- Sissejuhatus (lõputöö eesmärgi tutvustus)
- Taastuenergia lahenduste vajadus ja nende areng
 - Päikeseelektrijaamade tööpõhimõte
 - Tuulegeneraatorite tööpõhimõte
- Modelleerimistarkvarade tutvustus ja nende võrdlus
 - „HomerPRO“
 - „WindPRO“

- "DIgSILENT"
- Tarkvarade võrdlus ja analüüs
- Kodutööde metoodika valik ja juhendi koostamine
 - *HomerPRO* tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne
 - *WindPRO* tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne
 - *DIgSILENT* tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne
- Kokkuvõte
- Summary
- Kasutatud kirjandus
- LISAD

8. Kasutatud kirjanduse allikad

„HOMER Grid User Manual“ [Võrgumaterjal] Saadaval:

<https://www.homerenergy.com/products/grid/docs/latest/index.html>

„HOMER Pro User manual“ [Võrgumaterjal] Saadaval:

<https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>

„WindPRO 2.7 User Guide [Võrgumaterjal] Saadaval:

http://www.emd.dk/files/windpro/manuals/for_print/MANUAL_2.7.pdf

„DIgSILENT Power Factory 2019 User Manual“ [Võrgumaterjal] Saadaval:

http://79.101.33.142/DIgSILENT%20PowerFactory%202019%20User%20Manual/UseManual_2019_en.pdf

Lisaks uuritakse juurde IEEE-st teadusartikleid, vaadatakse sarnastel teemadel, Tallinna Tehnikaülikoolis, vormistatud lõputöid ning uuritakse interneti avarustest kättesaadavat informatsiooni.

9. Lõputöö konsultandid

Konsultante ei ole planeeritud kasutada

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine (22. Jaanuar 2021)
- Lähteandmete kogumine (22. Jaanuar 2021)
- Modelleerimistarkvarade praktilise kogemuse omandamine (8. Veebruar 2021)
- Teoreetilise osa kirjutamine (26. Veebruar 2021)
- Laboritööde juhendi struktuuri koostamine (12. Märts 2021)
- Näidislahenduse teostamine (23. Märts 2021)
- Kokkuvõtte koostamine (4. Aprill 2021)
- Töö esimene versioon valmis (8. Aprill 2021)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (10. Aprill 2021)
- Paranduste sisseviimine (28. Aprill 2021)
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (30. Aprill 2021)
- Töö lõplik versioon valmis (12. Mai 2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1 ÕPPEAINE „TUULE- JA PÄIKESEENERGEETIKA“ TUTVUSTUS	14
2 TAASTUVENERGIALAHENDUSTE VAJADUS JA NENDE ARENG.....	16
2.1 Elektrituulik	18
2.1.1 Põhilised komponendid	21
2.1.2 Kasutegur.....	22
2.2 Päikesepaneelid	26
2.2.1 Põhilised komponendid	28
2.2.2 Kasutegur.....	30
3 MODELLEERIMISTARKVARADE TUTVUSTUS JA NENDE VÕRDLUS	36
3.1 <i>WindPRO</i> tarkvara tutvustus	36
3.1.1 Baasmoodul	37
3.1.2 Energiamoodul	37
3.1.3 Keskkonna moodul	39
3.1.4 Visualiseerimise moodul	39
3.1.5 Elektrotehnika moodul	39
3.1.6 Majandusmoodul	39
3.2 <i>DIgSILENT Power Factory</i> tarkvara tutvustus	40
3.2.1 Ülekandevõrgud	41
3.2.2 Jaotusvõrgud	42
3.2.3 Tööstuslikud süsteemid	42
3.2.4 Elektrienergia genereerimine.....	43
3.2.5 Taastuvenergialahendused.....	43
3.3 <i>HomerPRO</i> tarkvara tutvustus	44
3.3.1 Mudeli koostamine.....	44
3.3.2 Simulatsioon	45
3.3.3 Optimeerimine	45
3.3.4 Sensitiivsusanalüüs.....	46
3.4 Tarkvarade võrdlus ja analüüs.....	47
4 KODUTÖÖDE METOODIKA VALIK JA PRAKTILISTE ÜLESANNETE KOOSTAMINE	50
4.1 WindPRO tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne.....	52
4.1.1 Ülesande eesmärk	52

4.1.2 Ülesande sisu	52
4.2 DigSILENT Power Factory tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne	59
4.2.1 Ülesande eesmärk	59
4.2.2 Ülesande sisu	59
4.3 HomerPRO tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne	67
4.3.1 Ülesande eesmärk	67
4.3.2 Ülesande sisu	67
KOKKUVÕTE	72
SUMMARY	74
KASUTATUD KIRJANDUS	76
LISAD	80
Lisa L1. Kodutöö nädisaruanne	81

EESSÕNA

Käesolev lõputöö teema „Juhendmaterjalide väljatöötamine õppeaine tuule- ja päikeseenergeetika koduste tööde läbiviimiseks“ on välja pakutud Tallinna Tehnikaülikooli professori Ivo Palu poolt, kes ühtlasi kandis töö valmimisel juhendaja rolli. Antud teema valiku põhjuseks oli autori soov tutvuda lähemalt tuule- ja päikeseenergeetika valdkonnaga ning parandada tulevaste, õppeaine läbinud, tudengite teadmiste kvaliteeti.

Autor tänab juhendajat ja tööandjat kannatlikkuse ning mõistva suhtumise eest, samuti loodab, et valminud magistritöö leiab peatset kasutamist tulevaste tudengite õpiprotsessis.

SISSEJUHATUS

Taastuenergia on üks peamisi suundasid, kuhu maailma energeetika oma arengult, tänasel päeval, liikumas. Ajendiks võib pidada, pikaajalist soovi pidurdada kliimasoojenemine, vähendades kasvuhoonegaase, mis eraldub fossiilsete kütuste põletamisel. 2020. aasta jooksul atmosfääri paisatud summaarsest kasvuhoonegaaside kogusest, ligikaudu pool (44,3%), pärineb energeetika sektorist. [1] Vaatamata sellele vähenes energeetika sektori poolt atmosfääri paisatud kasvuhoonegaaside kogus 2020. aastal 6%, võrreldes varajasema aastaga, mis on ühtlasi viimase aja kõige suurem langus. [2] Põhjuseks võib pidada globaalset pandeemiat, mille tulemusena vähenes maailmas energia vajadus, kuid ka märgilist versteposti tuule- ja päikeseenergeetikas. Rahvusvahelise Taastuenergia Agentuuri (*IRENA*) iga-aastase raport põhjal, saavutati aastal 2019 maailma energeetikas pöördpunkt, mille kohaselt on uute tuule- ja päikeseelektrijaamade ehitamine muutunud odavamaks, kui olemasolevate, kivisöel töötavate soojuselektrijaamade, käigus hoidmine. [3] Mis ei tähenda, et tuule- ja päikeseelektrijaamasid ei oleks varajasemalt ehitatud. 2019 aasta seisuga oli maailmas installeeritud elektrituulikute koguvõimsuseks 651 GW ja elektrienergiat tootvate päikesepaneelide koguvõimsus 627 GW. [4] Eriti hüppelist juurdekasvu võib täheldada päikesepaneelide puhul, kus viimase nelja aastaga on installeeritud koguvõimsus kasvanud 100 GW/aastas. [4] Sarnast trendi võib näha ka Eesti elektrienergia sektoris, kus 2020. aasta 1. jaanuari seisuga oli päikesepaneelide installeeritud nimivõimsuseks 128 MW, millest 2019. aasta jooksul lisandus 74 MW. [5] Küll aga ei saa sama väita tuuleparkide arengut silmas pidades, Eesti elektrisüsteemi ühendatud elektrituulikute summaarne nimivõimsus on viimase viie aasta jooksul püsinud stabiilselt 303 – 320 MW ringis. [6] Olukorra paranemiseks annab lootust Eesti Energia poolt planeeritav esimene meretuulepark Baltikumis, mis võiks valmida aastaks 2030. [7] Veelgi suuremaid ambitsioone näitab ülesse Utilitas, soovides Läänemerre rajada kuus võimast meretuuleparki, koguvõimsusega 7200 MW. [8] Sellest tulenevalt saab järeldada, et tuule- ja päikeseenergeetika jätkab aktiivset kasvu ka lähiaastatel nii Eestis kui ka kogu maailmas, tekitades ühtlasi nõudluse antud valdkonnale spetsialiseerunud tööjõu järele.

Tuule- ja päikeseenergeetika õppeaine raames luuakse üliõpilastele võimalus omandada valdkonnaga seotud teoreetilised ja praktilised teadmised. Praktiliste teadmiste omandamine seisneb tuule- ja päikeseenergia parkide modelleerimises. Mudelite koostamiseks kasutatakse tarkvarasid *HomerPRO*, *WindPRO* ja *DIgSILENT Power Factory*. Iga tarkvaraga lahendatakse üks praktiline kodutöö ülesanne ja saadud tulemused esitatakse aruannetena õppejõule.

Vältimaks üliõpilaste pindmist õpihoiakut, mille puhul on üliõpilase eesmärgiks lihtsalt õppeaine läbimine ning mis on üsna levinud lähenemine valikainete puhul, tuleks muuta õppeaine piisavalt atraktiivseks, et üliõpilastel tekiks sügav õpihoiak, mille puhul püüeldaks, mõista ja mõtestada õpitut iseenda jaoks. [9] Sellest tulenevalt nähti vajadus töötada välja juhendmaterjal koduste tööde läbiviimiseks, muutes need konstruktiivseks, loogiliseks ja paremini mõistetavaks.

Lõputöö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis tutvustatakse tuule- ja päikeseenergeetika õppeainet. Antakse ülevaade õppeaine eesmärkidest ja õpiväljunditest ning kirjeldatakse varajasematel aastatel esitatud praktiliste kodutööde sisu.

Teine peatükk annab põgusa ülevaate taastuvenergialahenduste vajadusest ja nende arengust. Lisaks kirjeldatakse elektrituulikute ja päikesepaneelide põhilisi komponente ning uuritakse millised tegurid avaldavad mõju tuule- ja päikeseenergia tootlikkusele.

Kolmandas peatükis tutvustatakse õppeaine raames kasutatavaid modelleerimistarkvarasid. Antakse ülevaade tarkvarade peamistest funktsionaalsustest, struktuurist ja kasutusvaldkonnast. Analüüsitakse tarkvarade sobivust edastamiseks õppeaine õpiväljundeid ja võrreldakse nende võimekusi.

Neljandas peatükis valitakse õppemeetod, mille alusel koostatakse praktilised kodutöö ülesanded. Ülesannete koostamisel lähtutakse, tarkvarade funktsionaalsustest, võimekustest ja õppeaine õpiväljunditest. Tuuakse välja ülesannete eesmärgid ja kirjeldatakse nende sisu. Iga tarkvara jaoks valmistatakse individuaalne ülesanne ning valitakse ülesannete lahendamise järjestus.

Lõputöö lisas esitatakse praktilise kodutöö näidisaruanne. Näidisaruande vormistamise eesmärk on anda visuaalne ja sisuline ülevaade koostatud ülesannete lahenduskäigust.

1 ÕPPEAINE „TUULE- JA PÄIKESEENERGEETIKA“

TUTVUSTUS

Õppeaine eesmärk on luua üliõpilastele võimalus teadmiste omandamiseks tuule-, sh meretuule- ja päikeseenergeetikast ning elektrituulikute ja päikesepaneelide kasutamise iseärasustest. Tõstatamaks ja lahendamaks tuule-, sh meretuule- ja päikeseenergeetikaga kaasnevat piiranguid, erisusi ja eelduseid. Samuti omandatakse oskusi elektrituulike, päikesepaneelide ja meretuuleelektrijaamade planeerimise, püstitamise ja arendamise alal. [10]

Aine läbinud üliõpilane mõistab, kirjeldab ja analüüsib tuule-, sh meretuule- ja päikeseenergia ressursi kasutamise iseärasusi. Oskab nimetada peamisi elektrituuliku ja päikesepaneelide osi, tüüpe. Kirjeldada ja analüüsida tuulikute võimsuse reguleerimise põhimõtteid ja karakteristikuid ning päikesepaneelide ühendusskeemide põhimõtteid ja karakteristikuid. Mõistab tuule- ja päikeseenergia kaasnevat probleeme elektrivõrgus. Hinnata olemasolevate seadmete tootjate majandusnäitajaid, arvestades energeetika jätkusuutlikust. Võrrelda valdkonnaga kaasnevat riikidevahelisi keskkonnamõjusid ning keskkonnasäästu. Planeerida tuule-, sh meretuule- ja päikeseelektrijaamasid ning arvutada ja analüüsida elektrienergia toodangut vastavalt asukoha spetsiifikale. [10]

Teemakäsitus on aktuaalne, kuna energiasectori trende on üha suuremal määral hakanud mõjutama taastuvenergialahenduste kasutuselevõtt. Tuule- ja päikeseelektrijaamad on muutmas traditsioonilist arusaam elektrienergia tootmisest. Selle tulemusena on tuule- ja päikeseelektrijaamades toodetud elektrienergia koguse prognoosimine omandanud kriitilise tähtsuse nii elektrisüsteemi stabiilsuse kui ka majanduslikust vaatenurgast, kuna tegemist on mitteplaneeritava elektrienergia tootmistsükliga. Prognoosi täpsus sõltub suuresti kasutatavast elektrienergia tootmistehnoloogiast ja modelleerimise tarkvarast ning simulatsiooni käigus tehtavatest lihtsustustest.

Tänaseks päevaks on väljatöötatud hulganisti tarkvarasid, mis võimaldavad modelleerida elektrijaamasid, sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast. Õppaine raames teostatavate koduste tööde käigus õpitakse lähemalt tundma *WindPRO*, *DIgSILENT Power Factory* ja *HomerPRO* tarkvarasid. Praktiliste ülesannete eesmärgiks on tõsta üliõpilaste teadmisi tuule- ja päikeseenergeetikat mõjutavate tegurite osas. Kodutööde käiguse keskendutakse peamiselt tuule- ja päikeseelektrijaamade aastase

elektrienergia tootlikkuse prognoosimisele. Põgusalt puututakse kokku valdkonna majandusliku poolega ja hinnatakse võimalikke keskkonnaga seotud mõjusid.

Varajasematel õppeaastatel on modelleerimis tarkvarasid käsitletud õpiprotsessi üksikute osadena, mille käigus otsitud vastuseid või lahendusi konkreetsetele probleemidele. *HomerPRO* tarkvaraga modelleeriti Ruhnu saare elektrienergia tootmise lahendus, *WindPRO* tarkvara modelleeriti Paldiskis asuv tuulepark ja *DIGSILENT Power Factory* tarkvaraga modelleeriti lihtne elektrivõrk, kuhu ühendati elektrituulikud ja päikesepaneelid ning hinnati toodetud elektrienergia kogust vastavalt elektrijaamade geograafilisele asukohale. Antud õppemetoodika on tõhus viis tarkvarade õppimiseks, kuid ei võimalda arendada üliõpilaste analüüsimisvõimet, kuna puudub võrdlusmoment praktiliste ülesannete lahendamisel saadud tulemuste üle.

Parandamaks õppeaine läbinud üliõpilaste teadmisi ja oskusi, tasuks kaaluda olemasoleva õppemetoodika korrigeerimist. Tuule- ja päikeseenergeetika õppeaine puhul tuleb meeles pidada, et tegemist on valikainega ning üliõpilastel ei ole vähimatki kohustust antud ainet oma õpingukavasse lisada, mis omakorda tekitab vajaduse muuta õppemetoodikat struktureeritumaks. Struktuurne ülesehitus aitab üliõpilasel omandada teadmisi loogilises järjekorras, alustades taastuenergialahenduste vajadusest, jätkates tuule- ja päikeseenergeetika teoreetilistest teadmistest ning teoreetiliste teadmiste praktilises kasutamises modelleerimis tarkvarade läbi. Loogilisus tagab üliõpilasele temaatika parema mõistmise, suurendab aktiivset mõtteviisi õppeaine loengutes, parandab modelleerimis tarkvaradega valmistatavate mudelite kvaliteeti ja tõstab võimet analüüsida tarkvarast saadud tulemusi.

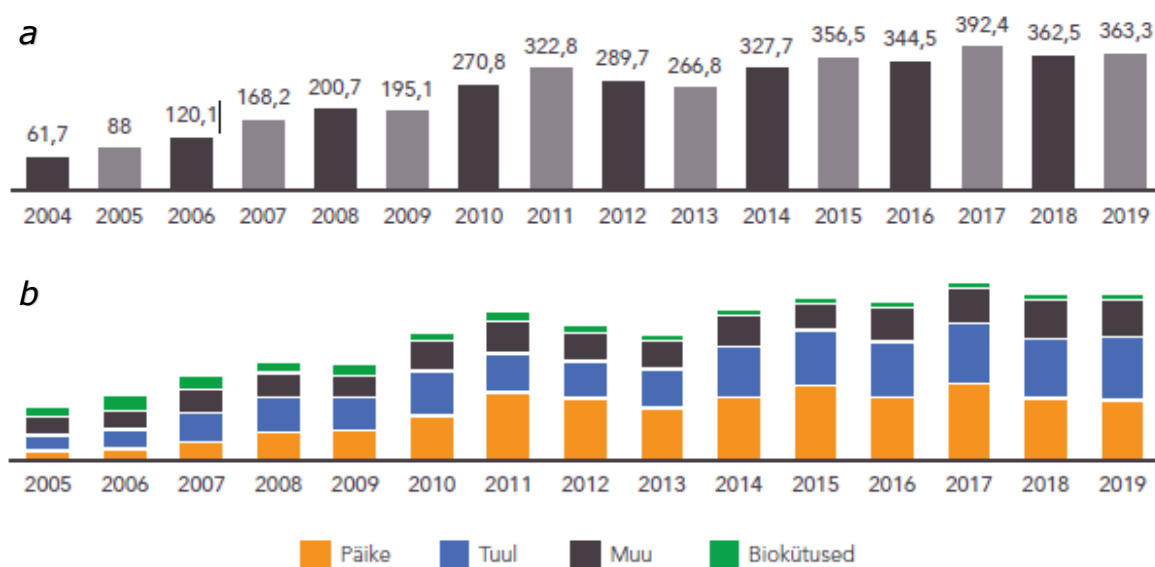
2 TAASTUVENERGIALAHENDUSTE VAJADUS JA NENDE ARENG

Üheks peamiseks põhjuseks, miks taastuvenergialahendusi võetakse kasutusele ja neid pidevalt arendatakse on leida alternatiiv fossiilsete kütuste põletamisele. Kasvuhoonegaasid, mis fossiilsete kütuste põletamisel eralduvad, on suurimad kliimamuutuse mõjurid. 1997. aastal, ülemaailmsel kliimakonverentsil sõlmitud rahvusvaheline Kyoto protokoll, mille kohaselt, kokkuleppes osalevad riigid nõustusid vähendama või hoidma kasvuhoonegaaside tekitamis 1990. aasta tasemel. Eesti ratifitseeris Kyoto protokoll 3. septembril 2002. Esimeseks eesmärgiks oli kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamine perioodil 2008 – 2012 viie protsendi võrra võrreldes 1990. aastaga. 2005. aastal leppisid Euroopa Liidu juhid kokku pikaajalistes kliimaeesmärkides, mille kohasel tuleb aastaks 2020 vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid 20 protsendi võrra võrreldes 1990. aastaga. Toota elektrienergiat 20 protsenti taastuvatest energiaallikatest ja suurendada energiatõhusust 20 protsendi võrra. Samaselt on kokkulepitud ka pikemad eesmärgid – aastaks 2030 vähendada kasvuhoonegaaside heitkogust 40 protsendi võrra võrreldes 1990. aastaga. Toota 27 protsenti elektrienergiast taastuvatest energiaallikatest ja suurendada energiatõhusust 27 protsendi võrra. Aastaks 2050 on eesmärgiks seatud süsinikuheidete vähendamine 80 – 95 protsenti võrreldes 1990. aastaga, kusjuures antud eesmärk ei hõlma enam võimalust heitekogustega kauplemiseks, vaid heitmeid soovitakse realselt vähendada summaarsena terves Euroopa Liidus. [11]

Lisaks ühtselt seatud eesmärkidele on riigiti väljatöötatud arengukavad, mille abil soovitakse saavutada kliimanetraalsus aastaks 2050. Eesti kliimapoliitika raamdokumendiks on „Kliimapoliitika põhialused aastani 2050“, millega on kokku lepitud valdkondlikes ja kogu majandust hõlmavates poliitikasuundades, mis seavad selge teekonna aastani 2050, kuidas kasvuhoonegaaside heitkogust vähendada ning ühtlasi kliimamuutuste negatiivsete mõjudega kohaneda. Seega tee kliimanetraalsuseni ei oma ühesektorilist lahendust ja vajab samaaegset tegutsemist seitsmes strateegilises valdkonnas: energiatõhusus; taastuvate ressursside kasutuselevõtt; puhas, turvaline ja ühendatud liikuvus; konkurentsivõimeline tööstus ja ringmajandus; infrastruktuur ja ühendused; biomajandus ja looduslikud süsinikusidujad; süsinikdioksiidi kogumine ja säilitamine. Kõikidest valdkondadest on energiasektoril suurim potentsiaal süsinikuheite vähendamiseks. Elektrienergia tootmiseks nähakse ette taastuvaid energiaallikaid, milleks on tuule-, päikese- ja hüdroenergia ning biomassi kasutamine või vähese süsinikuheitega energiaallikad nagu

tuumaenergia ja fossiilsetel kütustel põhinev energia koos süsiniku kogumise ning talletamise tehnoloogiaga.

Antud poliitilised otsused ja 1970-ndtl aset leidnud naftakriis on suuresti mõjutanud taastuvate ressursside kasutuselevõttu, seda peamiselt tuule- ja päikeseenergeetika valdkonnas. Tehnoloogiate kiiret arengut ja laialdast kasutust soodustab primaarenergia kättesaadavus, mida hüdroenergia puhul peetakse piiravaks teguriks, kuna see nõuab kindlaid looduses esinevaid tingimusi. Poliitilised subsiidiumid ja primaarenergia piiramatult kättesaadavus, võrreldes fossiilsete kütustega, on tuule- ja päikeseenergia talletamise tehnoloogia muutnud majanduslikult atraktiivseks elektrienergia allikaks energiaettevõtetele. Atraktiivsus kajastub globaalses investeringute mahus, mida on viimaste aastate jooksul taastuenergia tehnoloogiatesse tehtud. Joonisel 2.1 näidatud graafikutelt on võimalik näha globaalset investeringute kogumahtu ja nende jagunemist.



Joonis 2.1 Globaalsed investeringud (miljardit USA dollarit) taastuenergia tehnoloogiatesse(a) ja nende jagumine(b) [6]

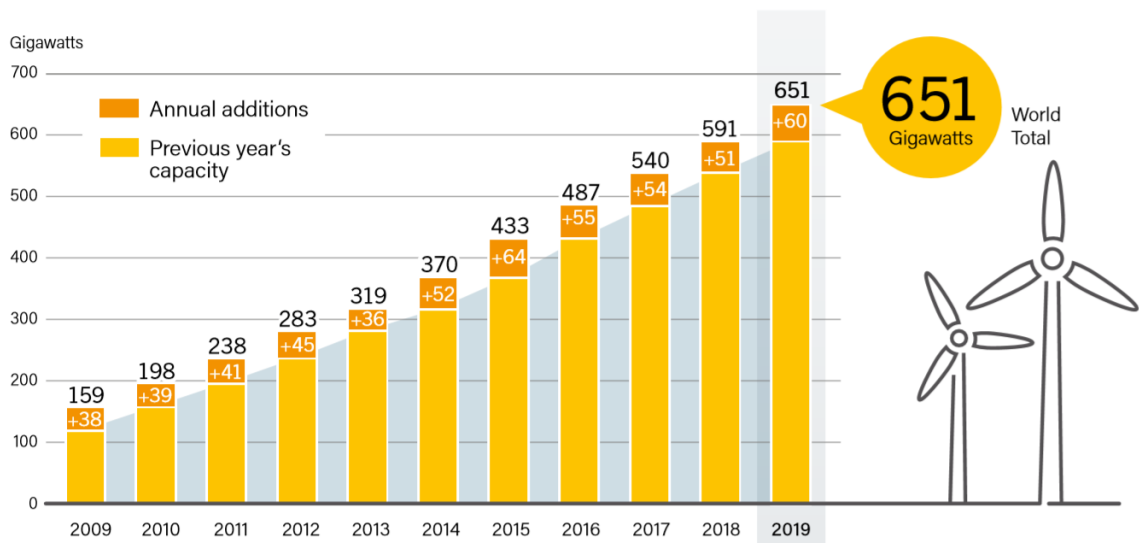
Kuigi globaalne investeringute kogumaht on viimastel aastatel püsivalt ületanud 300 miljardi piiri ja hüppelist kasvu pole märgata, ei tähenda see turu aktiivsuse langust, sest aastatega on toimunud taastuenergialahenduste märgatav odavnemine, mistõttu mõningane investeringute vähenemine ei pruugi edasi anda täit tõde turu aktiivsusest. Siiski on joonisel 2.1 olevast investeringute jagunemise graafikust näha, et suurema osa investeringutest suunatakse tuule- ja päikeseenergeetikasse ehk elektrituulikute ning päikesepaneelide edasi arendamisse.

2.1 Elektrituulik

Tuulegeneraator ehk tuuleturbiin on labamasin, mis muudab tuule – voolava õhu liikumise – kineetilise energia, turbiini võlli pöörlemisenergiaks ehk mehaaniliseks energiaks. Ajalooliselt on tuuleenergiat kasutatud mitmeks otstarbeks nagu näiteks: teravilja jahvatamiseks veskites, vee magestamiseks, vee tõstmiseks või vee pumpamiseks. Elektroenergeetika kontekstis kasutatakse elektrienergiat tootvaid tuulegeneraatoreid ehk elektrituulikuid.

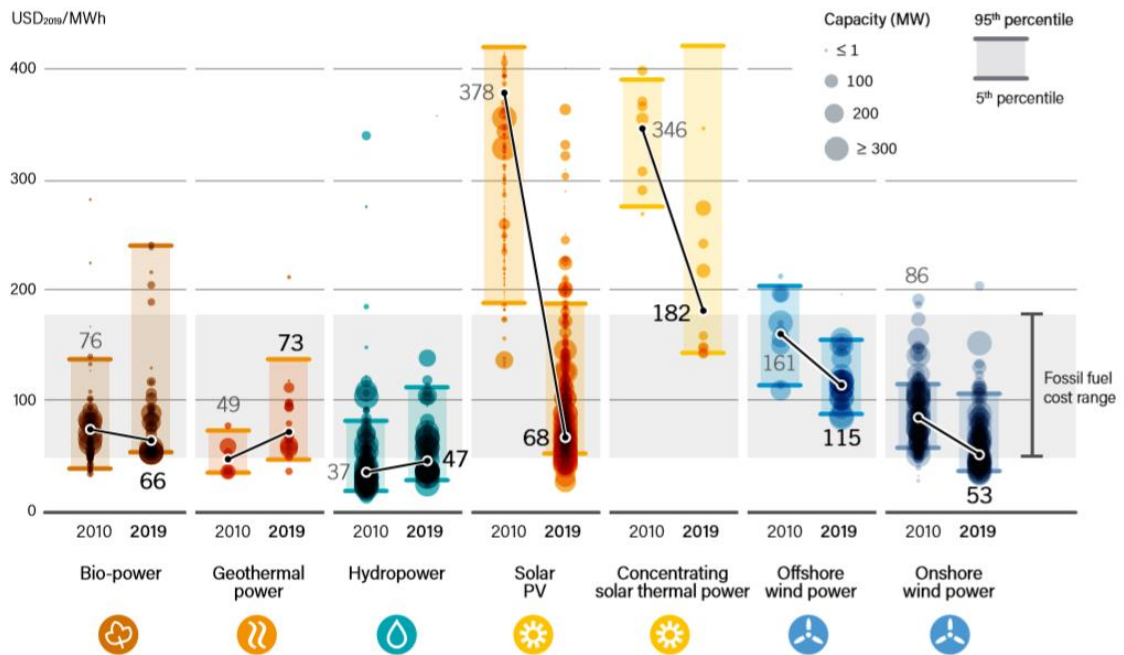
Esimese elektrituuliku, valmistas 1887. aasta juulis šoti õpetlane James Blyth, et valgustada oma suvilat Marykiris. Juba mõni kuu hiljem käivitas, Ameerika Ühendriikide leiutaja Charles Brush esimese automaatse tuuleelektrijaama, elektrienergia tootmiseks Ohia osariigis Cleavlandis. See oli 18 meetrit kõrge, kaalus 3,6 tonni ja selle võimsus oli 12 kilovatti. Kui šotlase leiutis omas vertikaalset elektrituuliku võlli (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbine*) siis ameeriklane kasutas horisontaalset elektrituuliku võlli paigutust (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*), millest viimane on enim kasutatav tehniline lahendus, tänapäeva tuuleparkide ehitamisel.

Vaatamata üsna varajasele leiutisele on tuulikute abil elektrienergia tootmine teinud hüppelise arengu alles 20. sajandi lõpus, seda suuresti tänu varajasemalt mainitud poliitilistele otsustele, mille kohaselt hakati taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia tootmise eest tasuma toetust. Veelgi suuremat artaktiivsust, valdkonna arengusse, lisas asjaolu, et toetuste saamine fikseeriti pikemaks perioodiks, 10 – 15 aastat, mis tekitas suurt huvi erasektoris. 20. sajandi viimasel kahel kümnendil kahekordistus, elektrituulikute installeeritud koguvõimsus Maailmas iga kolme aasta tagant. [12] Aastaks 2009 oli elektrituulikute installeeritud koguvõimsus 159 GW. 2019 aasta seisuga on Maailmas installeeritud elektrituulikute koguvõimsus 651 GW, millest 621 GW on maismaal paigaldatud elektrituulikute osakaal. [4] Joonisel 2.2 on näidatud elektrituulikute koguvõimsuste lisandumine Maailmas aastast 2009 kuni 2019, aastate lõikes. Võrdluseks saab tuua ka Eestisse installeeritud elektrituulikute tootmisvõimsused, mis viimastel aastatel on püsinud 320 MW juures. [6]



Joonis 2.2 Elektrituulikute installeeritud koguvõimsus Maailmas [4]

Kasvav, installeeritud koguvõimsuste trend näitab, et maismaale paigaldatud elektrituulikute abil elektrienergia tootmine on üha konkurentsivõimelisem fossiilsete kütustega. Seda kinnitab ka fakt, et paljud suurriigid on lõpetamas toetuste maksmise elektrituulikute poolt toodetud elektrienergiale ning on üle läinud oksjonipõhisele elektrienergia soetamise meetodile. Mis omakorda on sundinud elektrituulikute tootjaid tegema investeringuid tootearendusse, saavutamaks veelgi suuremat konkurentsivõimet fossiilsetele kütustele. Elektrituulikute kasvavat konkurentsivõimet on võimalik hinnata ka tasandatud tootmiskulu (LCOE – *Levelized Cost of Electricity*) järgi. Joonisel 2.3 on näidatud erinevate taastuvenergiaallikatel põhinevate elektrienergia tootmise globaalne tasandatud tootmiskulude võrdlus aastate 2010 ja 2019 vahel. [4]



Joonis 2.3 Globaalne LCOE võrdlus aastate 2010 ja 2019 vahel [4]

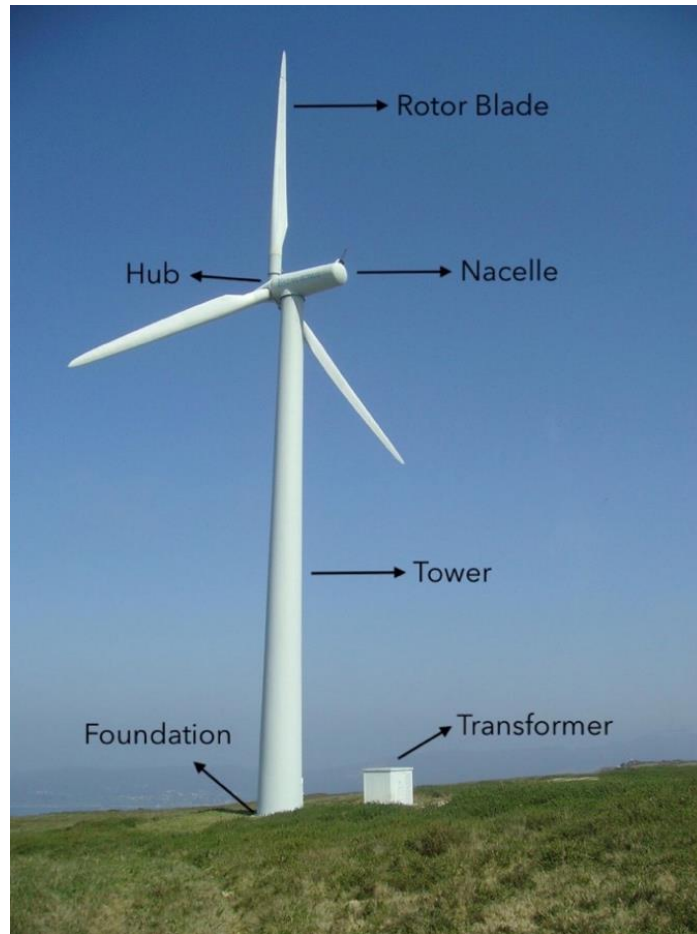
Globaalse tasandatud tootmiskulu puhul tuleb arvestada, et riigiti võib esineda märkimisväärset variatsiooni. See on põhjustatud seadmete soetamise maksumuse kui ka aastase tootlikkuse erinevusest. 2019 aasta seisuga on maismaale paigaldatud tuuleparkide globaalne tasandatud tootmiskulu 53 USD/MWh (ligikaudu 44 EUR/MWh, konverteerituna 5.03.2021 kuupäevaga). Võrdluses 2010 aastaga on see langenud pea 40%. [4] Omajagu tagasihoidlikum langus on meretuuleparkide puhul. Kuigi avamerele paigaldatud elektrituulikud tagavad stabiilsema elektrienergia tootlikkuse on nende ehitamine majanduslikult väga kallid. Kallidus seisneb peamiselt selles, et meretuuleparkides kasutatavad elektrituulikud on üldjuhul suurema väljundvõimsusega, mistõttu elektrituulik ise on massiivsem ning lisaks on seadmete transportimine, vundamendi valmistamine, elektriliinide ehitamine ja tuulepargi hooldamine oluliselt keerukam ja rahaliselt kallim võrreldes maismaaga. [13]

2.1.1 Põhilised komponendid

Tänapäeva tuuleparkides on peamiselt kasutusel horisontaalse võlli paigutusega elektrituulikud nagu on näidatud joonisel 2.4. 2018 aasta seisuga oli sisemaale paigaldatud elektrituuliku keskmiseks võimsuseks 2,45 MW ja 2019 aastaks kasvas see pea 12%, saavutades keskmiseks võimsuseks 2,76 MW. Sarnaselt on kasvamas meretuuleparkidesse paigaldatavate elektrituulikute võimsused, saavutades 2019 aasta keskmiseks võimsuseks 7,2 MW. [4] Viidates selgele trendile, et elektrituulikud on järgnevatel aastatega muutumas üha suuremaks ja võimsamaks. Kinnitust sellele annab *General Electric*-u poolt 2020 aasta lõpus lansseeritud, sisemaale paigaldatav, elektrituulik *Cypress 6.0-164*, mille võimsuseks on 6 MW, labade diameeter 164 m ja rootor asub 167 m kõrgusel maapinnast. [14] Sarnase uuendusega on turule tulnud *Vestas*, uuendades avamerele paigaldatavate elektrituulikute portfooliot tootega *V236-15.0*, mille võimsuseks on 15 MW ja labade diameeter 231 m. [15] Vaatamata elektrituulikute pidevale arengule on üldine kontseptsioon püsinud standardsena, mille põhilised komponendid on:

- Tugikonstruktsioon – koosneb vundamendist, mastist ja tugiraamist. Suurim väljakutse tugikonstruktsioonile on vastupanu osutamine vibratsioonile. Mastina kasutatakse peamiselt metallist torukujulisi mooduleid, mis ühendatakse omavahel töömaal [16]
- Gondel – kaitseb elektrituuliku tugiraamile paigaldatud seadmeid ilmastikutingimuste eest. Samas peab olema võimalikult kerge, vähendamaks tugikonstruktsioonide gabariite [16]
- Rotor – koosneb rummusest ja labadest. Elektrituuliku kõige tähtsam osa, mis mõjutab elektrienergia tootlikkust ja majanduslikku maksumust. Labasid valmistatakse peamiselt komposiitmaterjalidest, süsinikkiust või süsinikuga tugevdatud polümeeridest [16]
- Veovõll – rootorit ja generaatorit ühendav võll, mille abil tuule kineetiline energia kantakse üle elektrienergiat tootvale generaatorile. Enim levinud juhtudel paigaldatakse veovõllile ka käigukast, võimaldamaks veovõlli pöörlemiskiiruse reguleerimist [16]
- Elektrigeneraator – muundab tuule kineetilise energia elektrienergiaks. Peamiselt kasutatakse vahelduvvoolu sünkroongeneraatoreid [16]
- Jõutrafo – kasutatakse elektrigeneraatori pool toodetud elektrienergia pinget tõstmiseks, mille abil vähendatakse elektrienergia ülekandel tekkivaid kadusid [16]

- Juhtimisseadmed – mille alla kuuluvad sensorid, abimootorid, mikroprotsessorid ja sagedusmuundurid, tagamaks tuulegeneraatori soovitud töörežiim [16]



Joonis 2.4 Elekrituuliku peamised komponendid [17]

Teoorias oleks suuremat tuule kineetilise energia hulka võimalik ammutada, kasutades ühe või kahe labaga rootorit, kuid majanduslikult kõige optimaalsem lahendus on kasutada kolme labaga rootorit. [16]

2.1.2 Kasutegur

Üksikut elekrituulikut või nendest koosnevat tuulepargi tootlikust hinnatakse peamiselt kasuteguri alusel. Kasutegurit tähistatakse sümboliga C_p (*Power Coefficient*). Selle määramiseks, kasutatakse valemit 2.5, mille kohaselt on kasutegur võrdeline elekrituuliku elektrilise väljundvõimsuse ja tuule kineetilise energia poolt arendatava võimsuse jagatisena.

$$C_p = \frac{P_{väljuv}}{P_{sisenev}}$$

(2.5)

Kus $P_{väljuv}$ – elektrituuliku elektriline väljundvõimsus, W

$P_{sisenev}$ – tuule kineetilise energia poolt arendatav võimsus, W

Tuule poolt arendatav võimsus laba pöörlemistasapinnal on võrdeline tuule kiiruse kuubiga ning see on leitav valemi 2.6 abil. [12]

$$P_{sisenev} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.6)$$

Kus $P_{sisenev}$ – tuule kineetilise energia poolt arendatav võimsus, W

ρ – õhu tihedus, $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$

A – laba pöörlemispindala, m^2

v – tuule kiirus, m/s

Kasuteguri C_p koosneb omakorda kolmest peamisest komponendist – elektrituuliku aerodünaamiline, mehaaniline ja elektriline efektiivsus. Aerodünaamilise efektiivsuse all arvestatakse elektrituuliku võimet muuta tuule kineetilist energiat mehaaniliseks energiaks. Aerodünaamiline efektiivsuse komponent on ühtlasi suurim, elektrituuliku kasutegurit mõjutav osa. Suuremas üldsuses nimetatakse seda ka *Betz-i* limiidiks või *Betz-i* seaduseks. Saksa füüsik Albert Betz avastas, et elektrituulik suudab tuules olevast kineetilisest energiast muundada, maksimaalselt, kuni 59% mehaaniliseks energiaks. [12] Võttes arvesse ka mehaanilist efektiivsust, kus toimub elektrituuliku rootorile mõjuva mehaanilise energia ülekandmine elektrigeneraatorile ja elektrilist efektiivsust, kus elektrigeneraatori poolt toodetud elektrienergia muundatakse läbi sagedusmuunduri, kasutuskõlblikuks elektrienergiaks, saab järeldada, et tegelik elektrituuliku kasutegur jääb vahemikku 40% – 50%. Seega teades, elektrituuliku tootja poolt määratud kasutegurit ja tuule kiirust, arvutatakse elektrituuliku elektrilise väljundvõimsus tuletades valemite 2.5 ja 2.6 valem 2.7.

$$P_{väljuv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (2.7)$$

Kus $P_{väljuv}$ – elektrituuliku elektriline väljundvõimsus, W

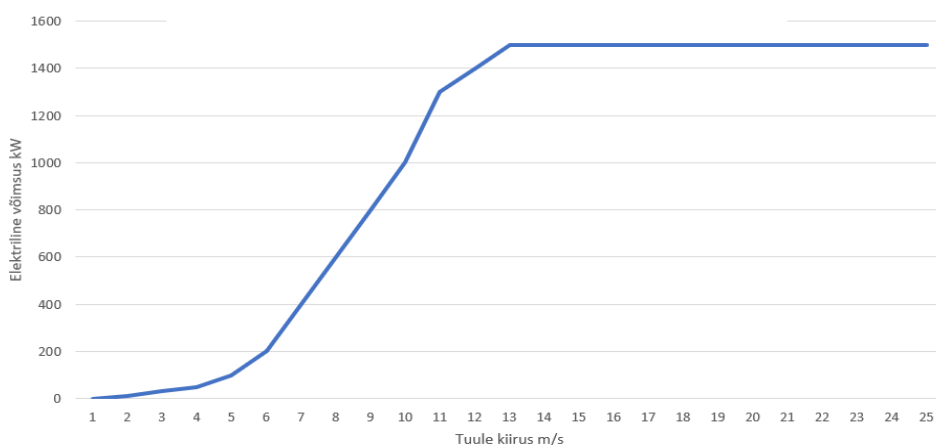
ρ – õhu tihedus, $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$

A – laba pöörlemispindala, m^2

v – tuule kiirus, m/s

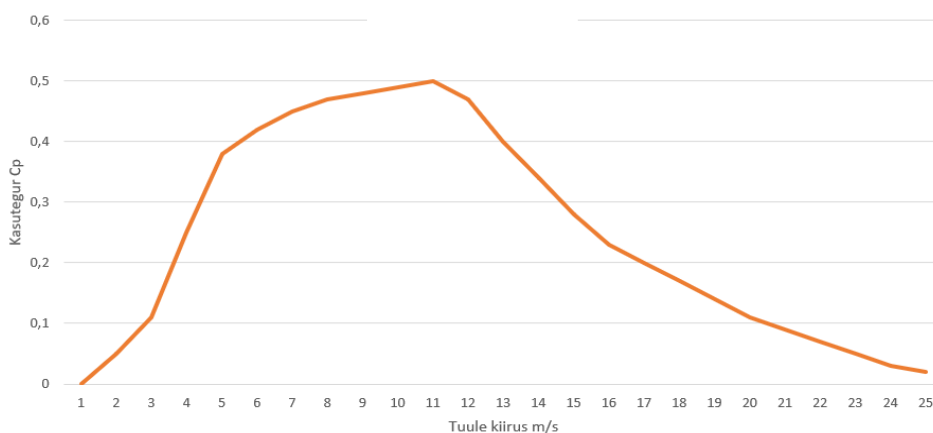
C_p – kasutegur

Valem 2.7 põhjal saab järeldada, et kõige suuremat mõju elektrilisele väljundvõimsusele avaldab tuule kiirus. Tuule kiiruse, täpne määramine igal aja hetkel omab kriitilist tähtsust. 10%-ne viga tuulekiiruse määramisel põhjustab 30%-se vea tuule poolt arendatava võimsuse puhul. [16] Väiksemat mõju avaldavad õhu tihedus ja elektrituuliku labade pöörlemispindala. Elektrituuliku tootjad kirjeldavad tuule kiiruse ja elektrilise väljundvõimsuse seaduspära elektrituuliku võimsuskarakteristiku abil. Joonisel 2.8 on toodud näidis 1500kW nimivõimsusega elektrituuliku võimsuskarakteristikust.



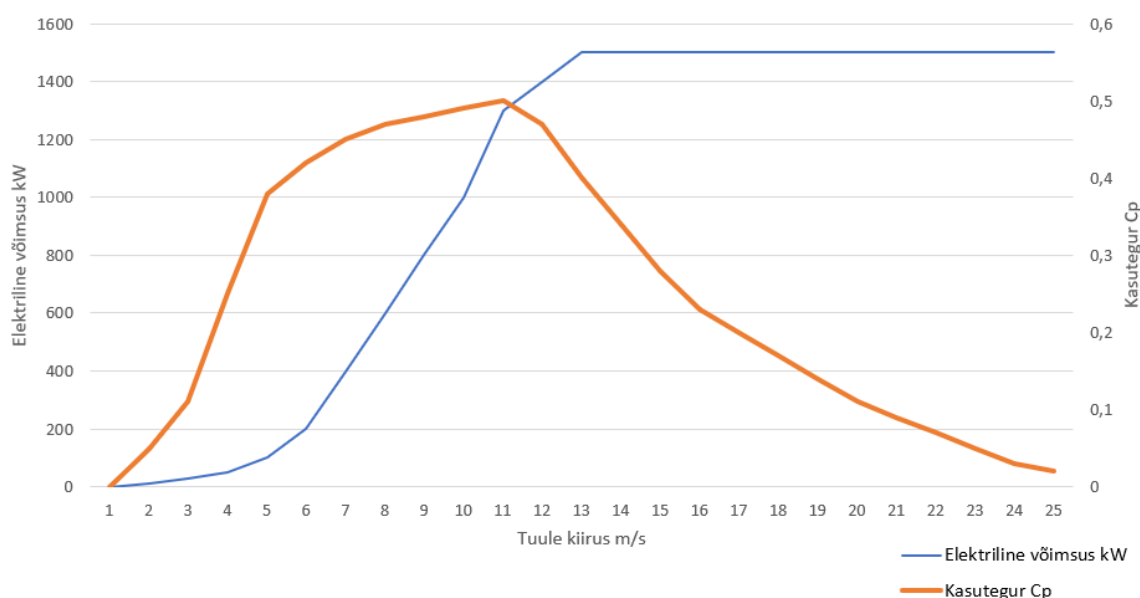
Joonis 2.8 Vestas 1 500kW nimivõimsusega elektrituuliku võimsuskarakteristik [12]

Üldiselt, saavutavad enamus elektrituulikuid oma maksimaalse väljundvõimsuse tuule kiirusel 12 – 16 m/s. [12] Tuule kiiruse edasisel suurenemisel elektriline väljundvõimsus ei kasva, mis omakorda avaldab mõju elektrituuliku kasutegurile. Joonisel 2.9 kujutatud graafikult on näha, elektrituuliku kasuteguri sõltuvust tuule kiirusest.



Joonis 2.9 Vestas 1 500kW nimivõimsusega elektrituuliku kasuteguri sõltuvus tuule kiirusest [12]

Ühildades joonisel 2.8 ja 2.9 olevad graafikud on võimalik määrata elektrituuliku optimaalne töörežiim. Jooniselt 2.10 on näha, et elektrituulik saavutab oma maksimaalse kasuteguri vahetult enne maksimaalset elektrilist väljundvõimsust ja tuule kiiruse suurenedes hakkab kasutegur kiiresti langema. Kasuteguri kiire languse põhjustab, tuule kineetilise energia poolt arendatava võimsuse jätkuv suurenemine, olukorras, kus elektrituuliku elektriline väljundvõimsus püsib konstantselt maksimaalsel piiril.

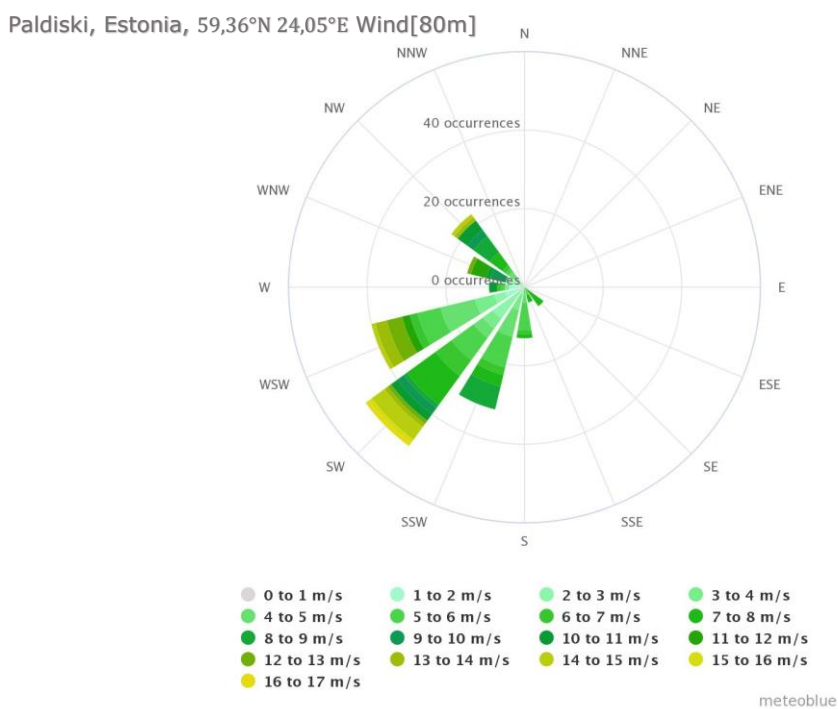


Joonis 2.10 Elektrituuliku elektrilise võimsuse ja kasuteguri sõltuvus tuule kiirusest.

Vältimaks, elektrituulikute kahjustusi, tormiste ilmasikutingimuste korral, peatatakse elektrituulikute töörežiim, kui tuule kiirus ületab 20 – 25 m/s, sõltuvalt tootja poolt määratud piirangust.

Tuule kiiruse ja elektrituuliku võimsuskarakteristiku alusel tehakse lihtsustatud ja üksikute elektrituulikute elektrilise väljundvõimsuse prognoose. Suuremate tuuleparkide hindamisel või kavandamisel tuleb lisaks võimsuskarakteristikule ja tuule kiirusele arvesse võtta ümbritsev keskkond ja elektrituulikute paigutamisel tekkiv varjutusefekt (*wake effect*). Ümbritseva keskkonna puhul jälgitakse peamiselt, kas läheduses ei ole takistusi, mis võiksid oluliselt mõjutada tuule tegelikku kiirust. Varjutusefekti puhul tuleb arvestada, et suuremates tuuleparkides jäävad osa elektrituulikute üksteise varju, mille tulemuseks on olukord, kus eespool asetsevatel elektrituulikutele on laba pöörlemistasapinnale mõjuva tuule kiirus suurem, kui elektrituulikutele, mis asetsevad varjus. [16] Vähendamaks varjutusefekti, tuleks elektrituulikeid paigutada üksteisest võimalikult kaugemale. See aga suurendab,

elektrituulikute ühendatavate liinide pikkust, mis avaldab suurt mõju tuulepargi majanduslikule aspektile. Piiratud maa-ala puhul on tähis valida optimaalne elektrituulikute paigutus topoloogia. Topoloogia määramisel arvestatakse elektrituulikute minimaalsete vahekauguste ja tuule andmetega ehk tuuleroosiga. Minimaalseks vahekauguseks ristsuunal peetakse kolm kuni viis elektrituuliku rootori läbimõõtu. Põhilisel tuule suunal on soovituslikuks vahekauguseks kuus kuni kaheksa rootori läbimõõtu. [12] Joonisel 2.11 on näidised kujutatud tuule kiirused ja suunad, Paldiskis, ajavahemikul 20.03 – 27.03.2021.



Joonis 2.11 Tuule kiiruse ja suuna andmed ehk tuuleroos [18]

Jooniselt 2.11 on näha, et kõige sagedamini, mõõdetud perioodi jooksul, puhus tuul edela suunast, mis ühtlasi oleks tuulepargi topoloogia valiku tegemise põhiliseks tuule suunaks. [16]

2.2 Päikesepaneelid

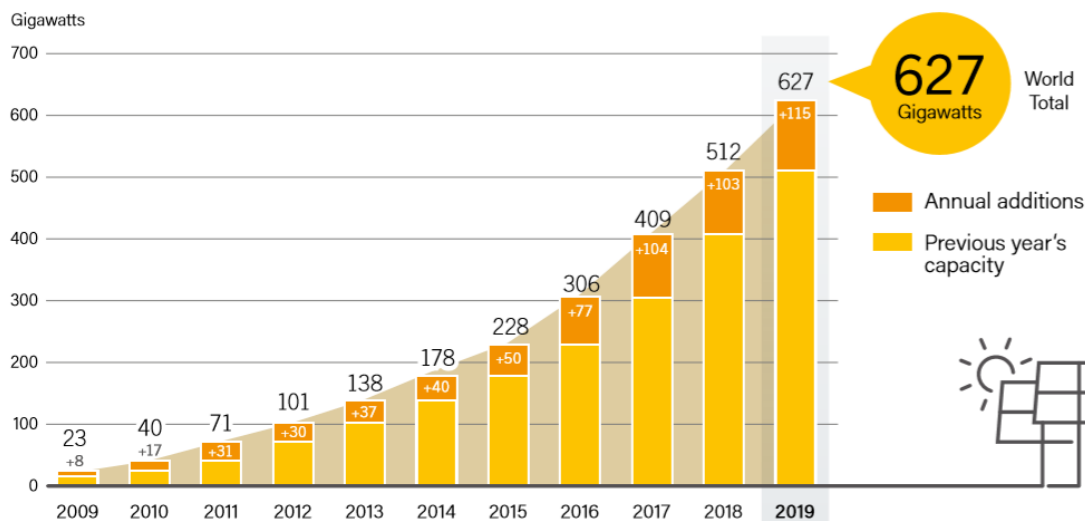
Päikesepaneelid on seadmed, mille abil muundatakse päikese poolt kiiratud energia soojus- või elektrienergiaks. 1891. aastal patenteeris Clarence Kemp päikesepaneeli, mille abil päikeseenergia muundati soojusenergiaks, saadud soojusenergia kasutati ära vee soojendamiseks. Antud päikesepaneeli puuduseks oli asjaolu, et soojavee tootmine toimus päevasel ajal ja puudus soojusenergia salvestamise võimekus. 1910. aastal

leiutas William J. Bailey päikesepaneeli, mis kõrvaldas varajasemate päikesepaneelide puudused ja omas soojusenergia salvestamise võimekust, tagades soojavee kättesaadavuse ööpäeva ringselt. Bailey poolt patenteeritud päikesepaneeli peetakse tänapäeva soojusenergiat tootvate päikesepaneelide teerajajaks. 1953. aastal leiutasid Darryl Chapin, Calvin Fuller ja Gerald Pearson, esimese, räni monokristallstruktuuri (*monocrystalline*) baasil, elektrienergiat tootva päikesepaneeli, mis põhines varajasemalt teada olevale fotoefektile ja mille kasuteguriks oli 5,7%. [19] Esialgu, leidsid elektrienergiat tootvad päikesepaneelid kasutust ainult kosmose- ja sõjatööstuses, kuna nende valmistamine oli majanduslikult väga kulukas. Elektrienergiat tootvad päikesepaneelid muutusid laialtkasutatavateks 90-ndatel, mil paljud Euroopa riigid hakkasid subsideerima taastuvenergia tehnoloogiaid, tänu millele elektrienergiat tootvate päikesepaneelide hinnad hakkasid märgatavalt langema, muutes need atraktiivseks erasektorile. Jooniselt 2.3 on näha, et elektrienergiat tootvate päikesepaneelide globaalne tasandatud tootmiskulu on aastast 2010 kuni 2019 vähenenud rohkem kui 80%. Samaaegselt on elektrienergiat tootvate päikesepaneelide tehnoloogia arenenud ja tänapäeval on saadaval rohkelt variatsioone, mille põhilisi liigitusi võib näha tabelis 2.12.

Tabel 2.12 Päikesepaneelide tehnoloogiate võrdlus [19]

Päikesepaneeli tüüp	Kasutegur, %	Hind	Temperatuuri koefitsient	Eluiga
Monokristallilised	17 – 23	kõrge	kõrge	üle 25 aasta
Polükristallilised	15 – 17	keskmine	madal	kuni 25 aastat
Amorfsed kiled	10 – 13	madal	madal	kuni 15 aastat

Päikesekiirguse keskmine võimsustihedus Maa atmosfääril on 1366 W/m^2 kohta, laialt tuntud kui päikesekonstant. Võttes arvesse, et Maa raadius on $(2/\pi) \cdot 10^{17} \text{ m}$ ja aastas on keskmisel 365,2422 päeva, kiirgab Päike Maale 5 460 000 EJ energiat aastas. [19] Maailma aastane primaarenergia tarbimine aastal 2019 oli 584 EJ, mis on 0,01% päikese poolt Maa atmosfäärile kiiratud energiast. [20] Kuid mitte kogu päikese poolt kiiratud energiast ei jõua maapinnani, 30% sellest peegeldub atmosfääri pinnalt tagasi maailmaruumi, 20% absorbeerub Maa atmosfääris ja Maa pinnast kolm neljandikku on kaetud veega. Isegi, kui 10% atmosfääri pinnale kiiratud päikeseenergiast jõuaks maapinnani, oleks tarvis sellest talletada 0,1%, et katta Maailma primaarenergia vajadus. [19] See on ka põhjus, mis päikeseenergiat peetakse kõige atraktiivsemaks taastuvenergia allikaks. Joonisel 2.13 on näidatud elektrienergiat tootvate päikesepaneelide koguvõimsuse lisandumine Maailmas aastast 2009 kuni 2019, aastate lõikes.

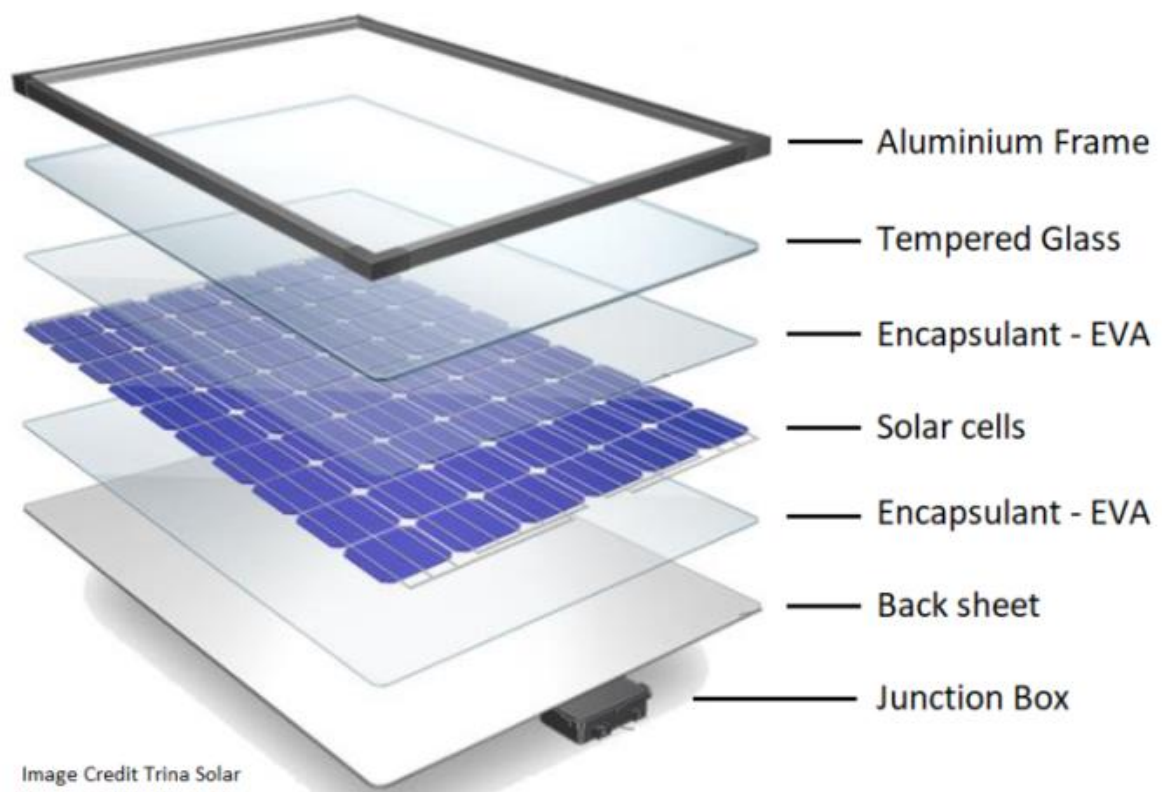


Joonis 2.13 Elektrienergiat tootvate päikesepaneelide installeeritud koguvõimsus Maailmas [4]

Võrdluseks võib tuua Eestisse installeeritud päikesepaneelide koguvõimsuse, mis 1. jaanuar 2020 aasta seisuga oli 128 MW ning millest 74 MW lisandus 2019 aasta jooksul. [5]

2.2.1 Põhilised komponendid

Üksik elektrienergiat tootev päikesepaneel koosneb enamasti kuuest põhilisest komponendist, mille koostöös valmib terviklik seadeldis. Joonisel 2.14 on kujutatud monokristallilise elektrienergiat tootva päikesepaneeli komponendid. Lisaks päikesepaneelile endale võib põhiliseks komponendiks pidada päikesepaneelide kinnitusraami. Kinnitusraame võib liigitada statsionaarseteks ja päikeseteed jälgivateks. Statsionaarsete kinnitusraamide puhul on võimalik päikesepaneeli kaldenurka reguleerida manuaalselt. Päikeseteed jälgivate kinnitusraamide puhul toimub päikesepaneeli kaldenurga kohandamine automaatselt, mis võib teatud tingimustes suurendada päikesepaneelide tootlikkust 40% võrra, kuid kuna antud tehniline lahendus on majanduslikult oluliselt kallim, ei ole see leidnud laialdast kasutust päikeseparkide ehitamisel. [19]



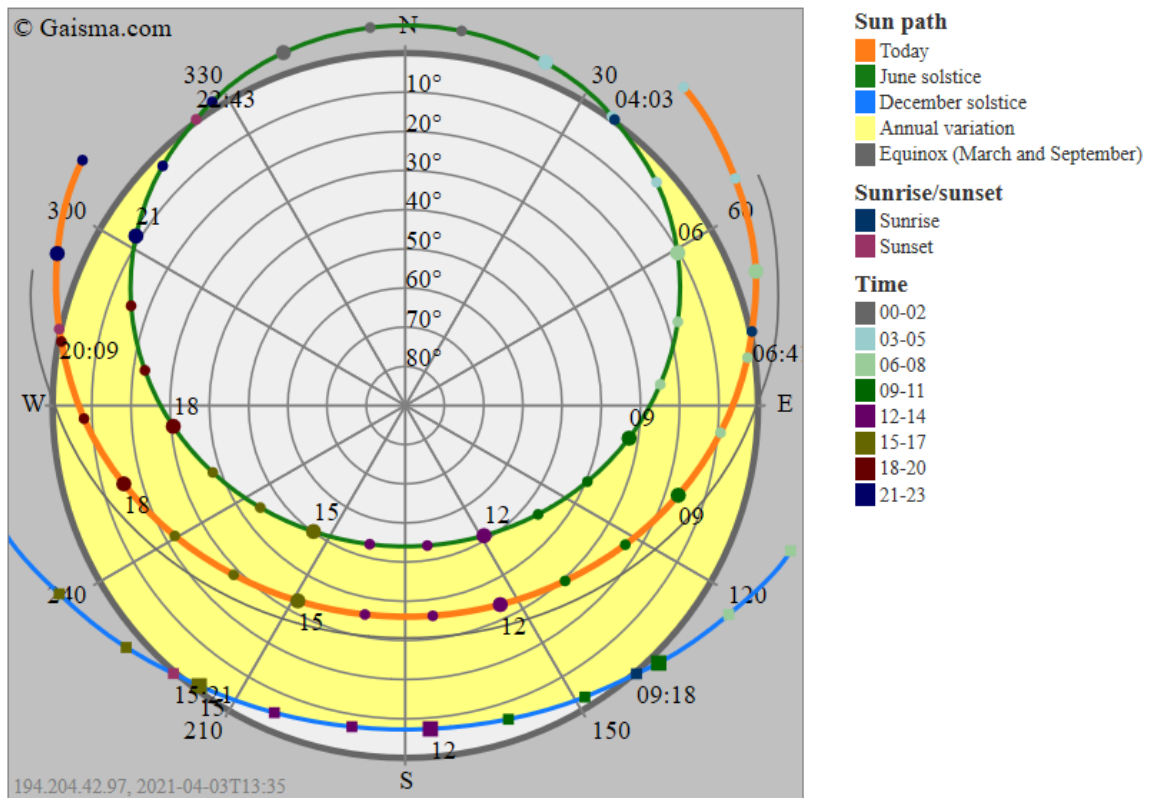
Joonis 2.14 Monokristallilise päikesepaneeli komponendid [21]

- Alumiiniumist raami eesmärk on tagada päikesepaneeli vastupidavus ilmastikutingimustele, kaitsta paneeli keskmises olevat elektrienergiat tootvat räni komponenti ja võimaldada mugavat paneeli paigutamist. [21]
- Karastatud klaas, paksusega kolm kuni neli millimeetrit, tagab räni komponendi põhilise kaitse, milleks võib olla rahe ja õhus lendlev praht. Samuti annab päikesepaneelile mehaanilise tugevuse ja vastupidavuse temperatuuri muutustel. IEC 61215 standardi kohaselt peab kaitseklaas vastu pidama kokkupõrkel kiviga, mille läbimõõt on kuni 25 mm ning mille kiirus kokkupõrkel ulatub 27 m/s. Karastatud klaasi vajalikkus on määratud ohutuse tagamiseks, et klaasi purunemisel ei tekiks vigastusohtlikke lõikeservi. Läbipaistvuse tõstmiseks viiakse klaasis olev raua sisaldus minimaalse tasemeni. Klaasi ühele poolele kantakse peegeldusvastane kate, mis suurendab päikeseenergia absorbeerumist paneelis. [21]
- Iga paneel koosneb mitmetest räni mono- või polükristalli elemendist. Elementide arv sõltub toote valmistajast, kuid jääb üldiselt vahemikku 36 – 144. Tüüpilised päikesepaneelid koosnevad 60-st või 72-st elemendist. [21]

- EVA ehk *ethylene vinyl acetate* (etüleenvinüülatsetaat) on kõrge läbipaistvusega polümeer, mille abil lamineeritakse, päikesepaneeli räni elemendid ja elektrilaenguid juhtivad mooduli sisesed latid. Lamineerimine suurendab päikesepaneeli põrutuskindlust ja tagab paneelile pikaajalise eluea. [21]
- Mehaanilise tugevuse lisab päikesepaneeli tagapaneel. Tagapaneel võib olla valmistatud ka klaasist, kui tegemist on kahepoolse päikesepaneeliga. [21]
- Päikesepaneelide moodulid ühendatakse üksteisega, läbi ühenduskarpide. Tavaliselt on ühenduskarpidesse paigaldatud möödaviigu diodid. Diodi eesmärk on tagada päikesepaneeli tootlikkus olukorras, kus osa päikesepaneelist on mingil põhjusel jäänud varju. [21]

2.2.2 Kasutegur

Elektrienergiat tootvate päikesepaneelide efektiivsus sõltub suurest päikesepaneeli tüübist (monokristalliline, polükristalliline või amorfne kile), kuid märkimisväärset osa mõjutab päikesepaneeli paigaldamise asukoht ja viis. Asukoha all mõistetakse positsioneerimist geograafilisel kaardil. Geograafilisest koordinaatidest tähtsaim on laiuskraad, kuna selle abil on võimalik kindlaks teha, millise nurga all langeb maapinnale päikese poolt kiiratud energia. Päikese kiire ja maapinna vaheline nurk avaldab otsest mõju maapinnale jõudva päikeseenergia kogusele. Suurim hulk päikeseenergiat kiiratakse maapinna ühele pinnaühikule tingimusel, kui päikese kiirte ja maapinna vaheline nurk on 90° ehk risti. Päikese nurkkaugust matemaatilisest horisondist nimetatakse päikese kõrguseks. Päikese kõrgust 90° nimetatakse seniidiks. Pikkuskraadi alusel määratakse päikese asimuut. Joonisel 2.14 on näha, kuidas päikese kõrgus ja asimuut päeva jooksul muutuvad.



Joonis 2.15 Päikesetee Tallinnas kuupäeval 3.04.2021 [22]

Joonisel 2.15 on oranži joonega (*Today*) tähistatud päikese liikumine matemaatilise horisondi suhtes. Antud päeva jooksul saavutas päike maksimaalseks kõrguseks 35°. Teades päikese kõrgust on võimalik valemi 2.16 abil arvutada kõige optimaalsem päikesepaneeli kaldenurk. Optimaalseks kaldenurgaks on nurk, mille puhul päikesekiired langevad päikesepaneelile risti.

$$h_{pV} = 90^\circ - h_0 \quad (2.16)$$

Kus h_{pV} – päikesepaneeli optimaalne kaldenurk, kraadides

h_0 – Päikese kõrgus, kraadides

Samuti on jooniselt 2.15 näha, et suvise pööripäeva keskpäeval on Tallinnas päikese kõrguseks 53° ja talvise pööripäeva keskpäeval 6°. Sõltuvalt geograafilisest asetusest muutub ka päikese kõrgus. Tabelis 2.17 on näidatud mõningate Eestimaa linnade päikese kõrguste erinevused aasta jooksul.

Tabel 2.17 Keskpäevased päikese kõrgused (kraadides, °) kuu 15. kuupäeval [23]

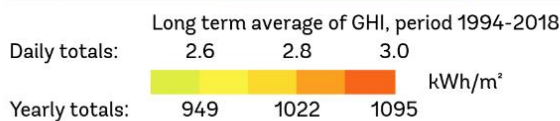
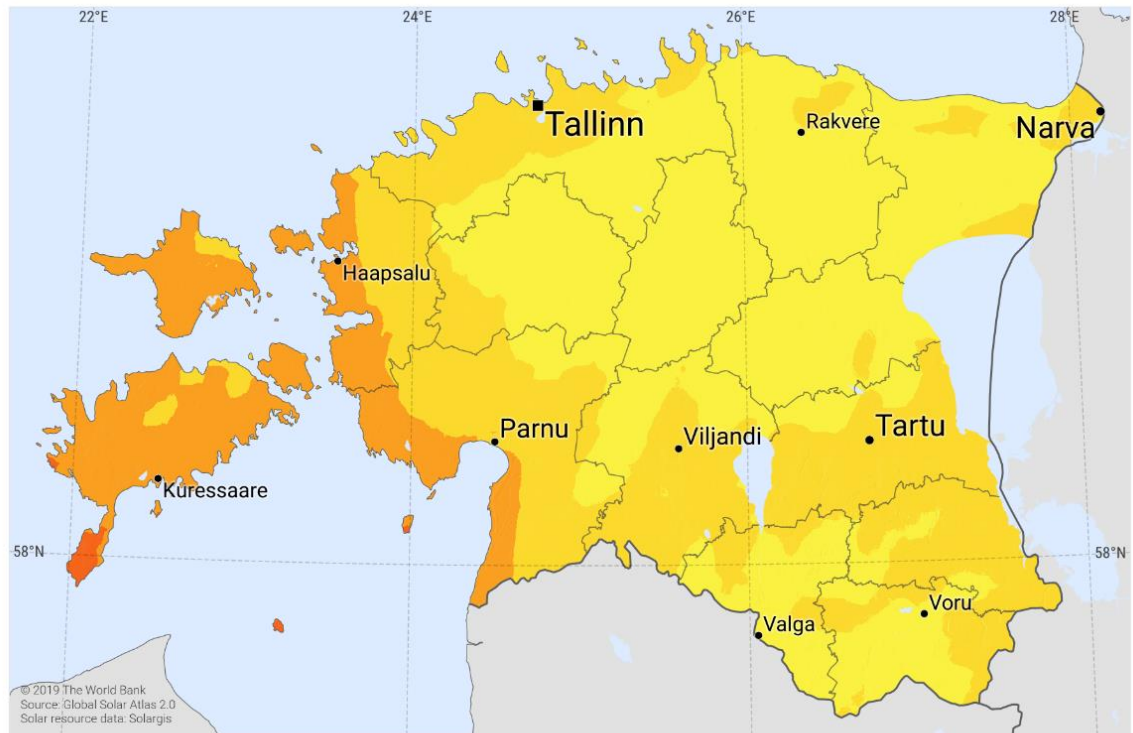
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Kuressaare	10,6	18,7	29,6	41,5	50,6	55,1	53,3	45,9	34,9	23,3	13,3	8,5
Viljandi	10,5	18,5	29,4	41,3	50,4	54,9	53,2	45,7	34,7	23,2	13,2	8,4
Pärnu	10,5	18,5	29,4	41,3	50,4	54,9	53,2	45,7	34,7	23,2	13,2	8,4
Tallinn	9,4	17,5	28,4	40,3	49,4	53,9	52,2	44,7	33,7	22,2	12,2	7,4
Narva	9,5	17,5	28,4	40,3	49,4	53,9	52,2	44,7	33,7	22,2	12,2	7,4
Valga	11,1	19,1	30,0	41,9	51,0	55,5	53,8	46,3	35,3	23,8	13,8	9,0

Päikese kõrguse varieerumine tähendab, et päikesepaneelide optimaalne kaldenurk on samuti ajas muutuv. Kõrvalekalle optimaalsest kaldenurgast põhjustab energiakadu. Tabelis 2.18 on näidatud protsentuaalne energiakadude sõltuvus kõrvalekaldest.

Tabeli 2.18 Päikesepaneeli kõrvalekaldest põhjustatud energiakaod [19]

Kõrvalekalle	Energiakadu
1°	0,015%
3°	0,140%
8°	1,00%
15°	3,40%
23,4°	8,30%
30°	13,40%
45°	30,0%
60°	> 50,0%
75°	> 75,0%

Mida madalamaks muutub päikese kõrgus, seda suuremale horisontaalsele tasapinnale hajub päikese poolt kiiratud energia kogus, lisaks läbib päikese kiir pikema atmosfäärilise teekonna, tuntud kui ka optiline massiarvu kordaja. Teel atmosfääri ülapiirilt päikesekiirgus nõrgeneb, sest nii õhu molekulid kui ka pilved ja õhus leiduv veeaur, aerosool ning mitmed gaasilised ained neelavad ja hajutavad kiirgust. [23] Päikesekiirgust võib suuresti eraldada kaheks, otsene kiirgus ja hajutatud kiirgus. Päikese otsene kiirgus on see osa kiirgusest, mis jõuab maapinnale praktiliselt paralleelsete kiirte kimbuna. Hajutatud kiirgus on kiirgus, mis õhu molekulide, aerosooli, veeauru ja pilvedest tingituna on langenud välja paralleelsetest kiirte kimbust ning nende edasine liikumine on kaootiline. Päikese otsese ja hajusa kiirguse summat nimetatakse summaarseks kiirguseks. [23] Joonisel 2.19 on näidatud summaarset päikeseenergia kiirgust üle Eesti.

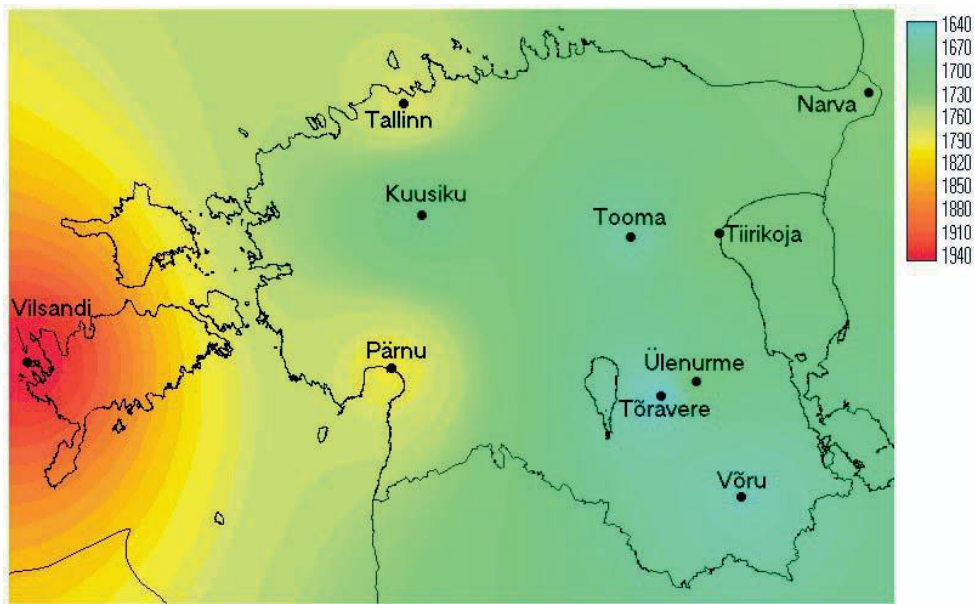


This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

Joonis 2.19 Summaarne päikeseenergia kiirus, üle Eesti [24]

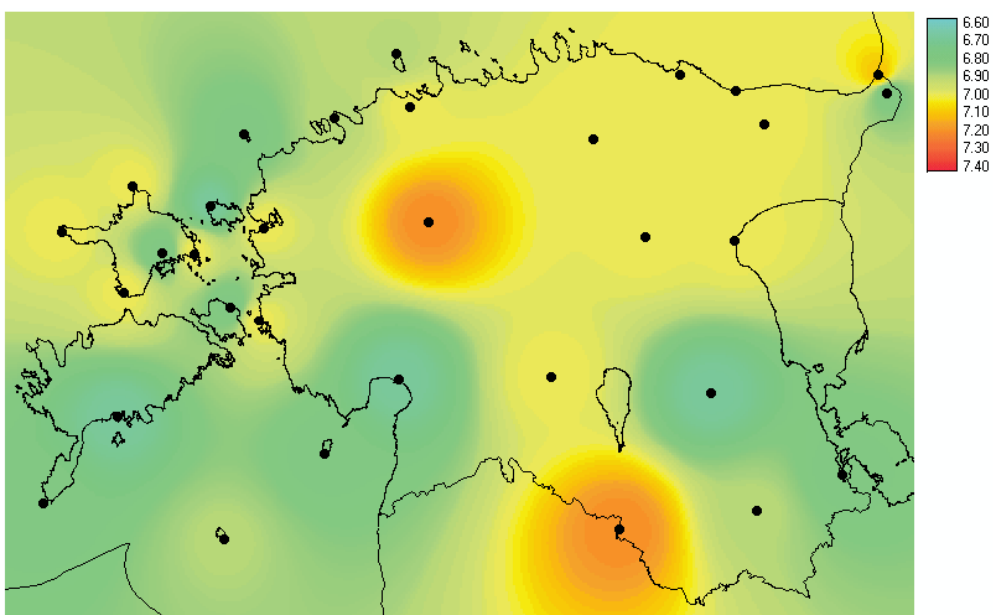
Päikeseenergia kogus, mis maapinnani jõuab sõltub, lisaks eelnevale, ka päikesepaiste kestusest. Päikesepaiste kestus sõltub geograafilisest pikkuskraadist. [23] Joonisel 2.20 on näidatud päikesepaiste kestuse aastasummade keskmine jaotus Eesti territooriumil.

Võrreldes tabelis 2.17 andmeid Narva, Kuressaare ja Valga vahel on näha, et Valgas päikese kõrgus on läbi aasta mõne kraadi võrra kõrgem, teistest nimetatud linnadest. Joonise 2.19 kohaselt on aga kõige suurema päikeseenergia kiirgusega piirkond Kuressaare. Antud tulemuse põhjustab päikesepaiste kestus, kuigi Valgas on maapinnale jõudvad päikese kiire intensiivsus tugevam, kui Kuressaares, paistab päike ajaliselt rohkem Kuressaares, mille tulemusena on maapinnale jõudva päikeseenergia hulk suurem. Joonisel 2.20 on näidatud aastasummade keskmine päikese kestuse aeg Eestis (1955 – 2000.a.).



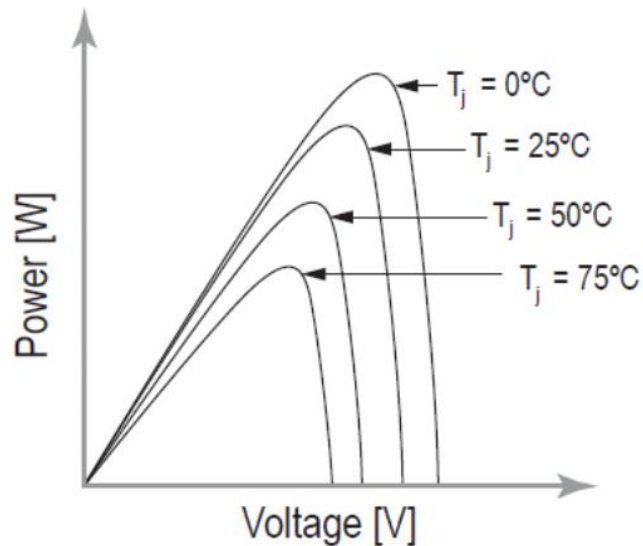
Joonis 2.20 Päikesepaiste kestuse aastasummade keskmine jaotus tundides [23]

Lisaks päikesepaistele, avaldab päikeseenergia kogusele mõju ka pilvisus. Pilvisust kujundab atmosfääri üldine tsirkulatsioon ja aluspinna omadused. Esimene neist mõjutab ligikaudu ühtemoodi kogu Eesti territooriumi ulatuses, aluspinna mõju on aga peamiselt lokaalse iseloomuga ning erinev rannikualadel ja sisemaal. Pilvede hulka määratakse Eestis kümnepallilises skaalas (1 pall pilvisust tähendab, et pilved katavad 1/10 taevalaotusest). Joonisel 2.21 on kujutatud aasta keskmist üldpilvisust Eestis. Mida suurem on pilvisuse skaala pall, seda suurem on tõenäosus, et antud piirkonnas esineb pilvi, mis põhjustavad hajusa päikesekiirguse teket ning vähendavad maapinnale jõudva päikeseenergia kogust.



Joonis 2.21 Aasta keskmine üldpilvisus Eestis, kümnepallilises skaalas [23]

Vaatamata elektrienergiat tootvate päikesepaneelide geograafilisele asukohale, millest sõltub päikeseenergia intensiivsus ja kestus, mõjutab päikesepaneeli väljundvõimsust ka paneeli enda töötemperatuur. Sarnaselt elektrituulikutele, väljastavad ka päikesepaneelide tootjad üksikute paneelide võimsuskarakteristikuid. Illustreeriv päikesepaneeli töötemperatuurist sõltuv võimsuskarakteristik on kujutatud joonisel 2.22.



Joonis 2.22 Päikesepaneeli töötemperatuurist sõltuv võimsuskarakteristik [25]

Päikesepaneeli tootja annab tehnilistes andmetes paneeli parameetrid kindlatel ilmastiku tingimustel. Standardi kohaselt on tehnilised parameetrid mõõdetud päikese kiirgusel 1000 W/m^2 , optilise massiarvu kordaja AM1,5 ja päikesepaneeli töötemperatuuril $25 \text{ }^\circ\text{C}$. [26] Reaalsuses selliseid tingimusi esineb üsna harva, mistõttu tuleb päikesepaneeli väljundvõimsus objektipõhiselt arvutada. Iga kraad, mis erineb temperatuuri standard tingimustest, põhjustab keskmiselt $2,3 \text{ mV}$ suurust pinge tõusu või langust, päikesepaneeli elemendi kohta. Voolu temperatuurist sõltuv muutus ei avalda märkimisväärset mõju päikesepaneeli väljundvõimsusele, mistõttu lihtsustatud arvutuste puhul sellega ei arvestata. [26]

3 MODELLEERIMISTARKVARADE TUTVUSTUS JA NENDE VÕRDLUS

Tuule- ja päikeseparkide modelleerimise üheks peamiseks eesmärgiks on elektrilise väljundvõimsuse prognoosimine. Prognoosimist võib liigitada ajalise skaala alusel, sõltuvalt kavandatud rakendusest, kolmeks põhiliseks tüübiks – hetkeline, lühiajaline ja pikaajaline. Hetkelist prognoosi vajatakse elektrisüsteemi aktiivjuhtimiseks, kus elektrilist väljundvõimsust prognoositakse millisekundist mõne minutini. Lühiajalise prognoosi eesmärgiks on elektrisüsteemi haldamine ja elektrienergia kaubanduse tagamine, mille ajaintervalliks on mõni tund kuni paar päeva. Pikaajalise prognoosi ajaliseks ühikuks on kuu kuni aasta, mille vastu tunnevad huvi peamiselt investorid, kes on tuule- või päikeseparki projekteerimas, võimaldamaks hinnata projekti majanduslikku tasuvust. [27] [28] Lisaks elektrilise väljundvõimsuse prognoosimisele võimaldab modelleerimine hinnata keskkonna mõjusid ja visuaalset reostust ning pargi eluea maksumust.

Tuule- ja päikeseenergeetika õppeaine õpiprotsessi toetamiseks on tänasel päeval rakendatud kolm erinevat modelleerimistarkvara, milleks on:

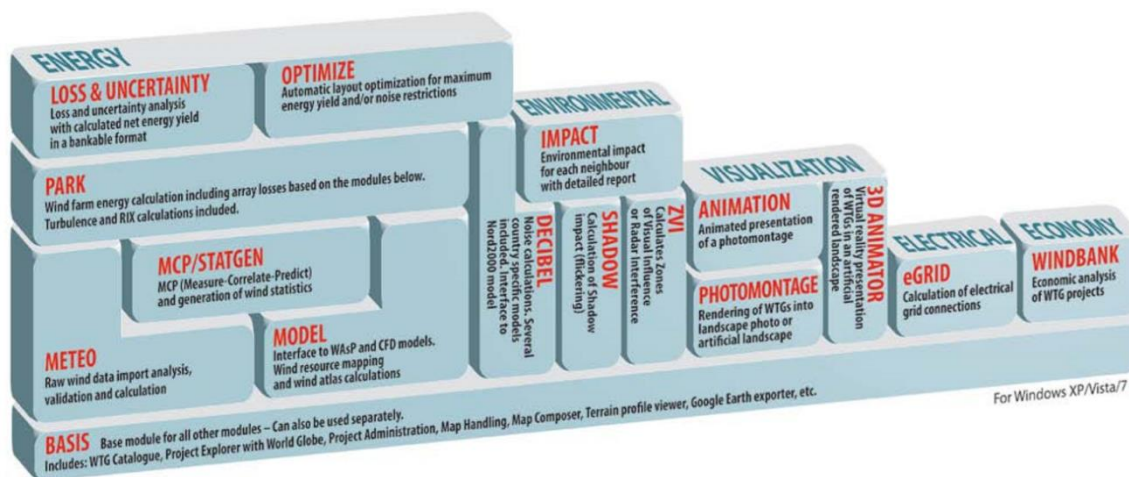
- *WindPRO*
- *DIgSILENT Power Factory*
- *HomerPRO*

WindPRO tarkvaraga soovitakse üliõpilastele edasi anda teadmisi tuuleparkide kavandamisest ja modelleerimisest, rakendamaks õppeaines omandatud teoreetilisi teadmisi. *DIgSILENT Power Factory* puhul keskendutakse peamiselt elektrituulikuid ja päikesepaneeli sisaldava mikrovõrgu modelleerimisele, uurimaks elektrisüsteemi võimsusvoogude liikumist kasutades dünaamilist simulatsiooni. *HomerPRO* tarkvara abil modelleeritakse hübriidne saartalitlussüsteem, mis koosneb elektrituulikute, päikesepaneelidest ja generaatorist, leidmaks majanduslikult optimaalseim lahendus, mis katab tarbijate elektrienergia vajaduse.

3.1 *WindPRO* tarkvara tutvustus

Taani ettevõtte EMD International A/S (EMD), mis on asutatud aastal 1986, keskendub peamiselt tuuleparkide, hübriidsete energialahenduste ja keerukate energiasüsteemide ehitamise hõlbustamiseks tarkvarade valmistamisega. Ettevõtte visioon on juhtida sujuvat üleminekut taastuvate energiaallikate rakendamisel, jätkusuutliku tuleviku

tagamiseks. Oma missiooniks peab EMD, uusimate teadusuuringute kogumist ja süstematiseerimist, nende arendamist ja olemasolevate kogemuste lisamist ning läbi nende väärtuste tarkvaratoodete valmistamist. [29] Oma ülesehituselt koosneb *WindPRO* mitmetest moodulitest, millest igaühel on oma eesmärk. Peamisteks mooduliteks on baas, energia, keskkond, visualiseerimine, elektrotehnika ja majandus. Joonisel 3.1 on näidatud tarkvara moodulite struktuur.



Joonis 3.1 WindPRO tarkvara moodulid [30]

3.1.1 Baasmoodul

Ühiseks nimetajaks kõikide simulatsioonide teostamisel on baasmoodul ehk *BASIS*. Baasmoodul koosneb algandmetest. Algandmeteks on elektrituulikute tehniline spetsifikatsioon, kavandatava, arendatava või hinnatava tuulepargi asukoht, olemasolevate tuuleparkide andmed, maapinna, maa- ja taimekatte kõrgusmudelid, varjutusalad, teekatte infrastruktuur ja simulatsiooni arvutusviisid. [30]

3.1.2 Energiamoodul

Energiamoodul ehk *ENERGY* on *WindPRO* tarkvara kõige tähtsam osa. Selles moodulis teostatud arvutuste tulemuseks on kavandatava, arendatava või hinnatava tuulepargi potentsiaalne elektriline väljundvõimsus, mis ühtlasi on *WindPRO* tarkvaraga modelleerimisel kõige otsitavam väärtus. Energiamoodul koosneb omakorda alammodulitest, milleks on tuule andmete arvutusmetoodika, tuulepark, optimeerimine ning kadude ja määramatuse arvestamine. [30]

Tuulepargi väljundvõimsus sõltub suuresti tuule andmete arvutamiseks kasutatavast metoodikast, mistõttu on antud alamoodul jaotatud omakorda erinevateks mooduliteks.

- *METEO* – arvutusmetoodika puhul kasutab *WindPRO* kavandatava, arendatava või hinnatava tuulepargi asukohas teostatud tuulemõõdistuste andmeid, mis on tarkvarasse manuaalselt sisestatud. Juhul, kui tuule andmete sisestamisel puuduvad mõõtmisandmed teatud kõrgustel puhuvate tuulte osas, määratakse need väärtused ekstrapoleerimise teel. Sellist, arvutusmetoodikat, kasutatakse peamiselt tuuleparkide puhul, mis asuvad või mida kavandatakse tasase maapinnaga aladel ning mille läheduses ei esine suuri maapinna kõrgusvahesid. [30]
- *MODEL (ATLAS)* – arvutusmetoodika puhul kasutab *WindPRO* tuule andmeid, mis on kättesaadavad lähedal asuvatest ilmajaamadest, arvestades lihtsustatud määral maapinna, maakatte ja taimkatte iseärasustega (kui antud mudelid on baasmoodulis sisestatud). Kogutud andmete puhul genereeritakse tuule statistika tuulepargi asukohas. Sellist, arvutusmetoodikat, kasutatakse peamiselt tuuleparkide modelleerimisel, kus mudeli koostamise ressursid on majanduslikult piiratud ja mis asuvad tasasel maapinnal. [30]
- *MODEL (WAsP Interface)* – arvutusmetoodika puhul kasutab *WindPRO* tuule andmeid, mis on kättesaadavad lähedal asuvatest ilmajaamadest ning lisaks sellele arvestatakse põhjalikult maapinna, maakatte ja taimkatte iseärasustega, mille andmeid hangitakse *WAsP* liides abil. Sellist, arvutusmetoodikat, kasutatakse detailsete modelleerimistulemuste saamiseks. [30]

Energiamooduli alamoodul tuulepark ehk *PARK*, teostatakse arvutusi saamaks tulemusi elektrituulikute väljundvõimsuse kohta. Sisendandmetena kasutatakse baas moodulis määratud elektrituulikute asukohta, tüüpi, rootori kõrgust maapinnast ja tuule andmete arvutusmetoodikast (*METEO*, *MODEL (ATLAS)* või *MODEL (WAsP Interface)*) saadud tulemusi. Arvutuste teostamisel, arvestatakse ka varjatusest põhjustatud kadudega ehk varjutusefektiga (*wake losses*). [30]

Optimeerimise alamoodulis ehk *OPTIMIZE* teostatakse peamiselt elektrituulikute paigutuse optimeerimine, ettemääratud tuulepargi piirkonnas. Juhtiv kriteerium, tuulepargi optimeerimisel on suurima tootlikkuse saavutamine. Lisaks on võimalik optimeerida tuulepargi töörežiimi, vähendamaks müra taset. [30]

Kadude ja määramatuse arvestamise moodul ehk *LOSSES & UNCERTAINTY*, teostatakse modelleerimise teel saadud tulemuste korrigeerimine. Kadude puhul arvestatakse vaikimisi kahe kriteeriumiga. Elektrituuliku väljundvõimsuse kättesaadavus, mis sõltub peamiselt elektrituuliku kvaliteedist ja hooldustööde planeerimisest. Elektrienergia ülekandes tekkivad kaod, mis sõltuvad elektrituulikute vahekaugustest. Määramatuse

arvestamise puhul võetakse arvesse vead, mis tekivad tuule andmete ja elektrituuliku väljundvõimsuse arvutamisel. Täiendavalt on võimalik lisada kategoriseerimata määramatuse tegureid, mida mudeli valmistaja võib pidada oluliseks, kuid millega modelleerimise tarkvara ei arvesta. [30]

3.1.3 Keskkonna moodul

Keskkonna moodul ehk *ENVIRONMENT*, hõlmab endas võimalust hinnata tuulepargi või üksiku elektrituuliku mõju keskkonnale. Peamised parameetrid, mida hinnatakse on aerodünaamiline ja mehaaniline müra, elektrituulikute labadest põhjustatud varju väreluse müra ning visuaalne müra. [30]

3.1.4 Visualiseerimise moodul

Visualiseerimise moodul ehk *VISUALIZATION* on moodul, mille abil on võimalik kavandatavast tuulepargist või üksikust elektrituulikust saada visuaalne pilt paigaldades see olemasolevasse keskkonda. Antud moodulis teostatakse kahte tüüpi visualiseerimist – fotomontaaž või animatsioon. Animatsioon liigitub omakorda kahe- või kolmemõõtmeliseks animatsiooniks. [30]

3.1.5 Elektrotehnika moodul

Elektrotehnika moodul ehk *eGRID* on moodul, mille abil teostatakse elektrotehnikas laialdaselt kasutatavaid arvutusi. Lühisvoolude arvutamisel kasutatakse IEC 60909 standardile vastavaid põhimõtteid. [30] Lisaks lühisvoolude arvutustele on tarkvara võimaline teostama järgnevaid, elektrotehnikaga seotud arvutusi:

- Kadude arvutused kaablites, ülekandeliinides ja jaotustrafodes.
- Pinge väärtused tuulepargi jaotusvõrgu sõlmedes.
- Pikaajalised voolu värelused.
- Elektrituulikute elektrivõrku lülitamisel tekkivad pingemuutused.

3.1.6 Majandusmoodul

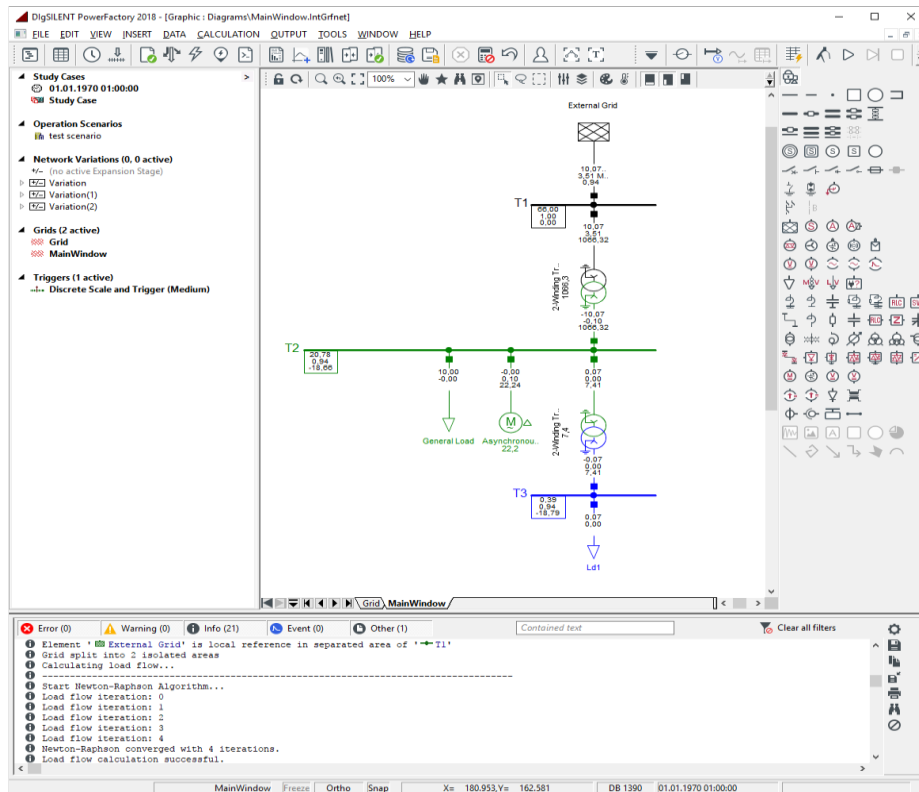
Majandusmoodul ehk *WINDBANK* on moodul, mille abil teostatakse tuulepargi või üksiku elektrituuliku tasuvusarvutused. [30] Arvutuse käigus saadav majandusaruanne, koosneb järgnevatest majandusnäitudest:

- Tulud – elektrienergia müügilt saadav tulu, mis arvutatakse energiamoodulis saadud tulemuste ja elektrienergia (€/kWh) maksumuse põhjal.
- Kulud – käidu- ja hooldustöödega seotud kulud.

- Maksud – vastavalt projekti asukohariigis kehtestatud regulatsioonidele.
- Põhivarad – seadmete soetamise hind.
- Paigalduskulud – elektrituuliku vundamendi ja infrastruktuuri ehitamine.
- Rahavoog – mille abil hinnatakse, kas projekt on kasumlik või kahjumlik.
- Laenud – juhul, kui projekti elluviimiseks on tehtud investeeringuid laenude kaasamisel.

3.2 DIgSILENT Power Factory tarkvara tutvustus

Saksa ettevõtte DIgSILENT GmbH on 1985. aastal Martin Schmiegi poolt asutatud, mille peamiseks tegevusvaldkonnaks on elektrijaamade, ülekandevõrkude, jaotusvõrkude ja taastuvenergia lahenduste modellerimiseks mõeldud tarkvara ning tarkvaraga seotud konsultatsioonide pakkumine. Toodete portfooliosse kuuluv *Power Factory* tarkvara omab laiahaardelist modelleerimis ja simulatsioonide võimekust nii väikemate kui ka üleriigiliste elektrivõrkude üle. Aastate pikkustesse arendustöösse on kaasatud hulganisti oma ala spetsialiste, mille tulemusena on *Power Factory*-st saanud elektrisüsteemide analüüsimiseks mõeldud tarkvarade turuliider. Omades mahukat elektrisüsteemis kasutatavate seadmete andmebaasi ja seadmete kooslusest põhjustatud elektrotehnika alustel põhinevaid arvutusalgortime, võimaldab tarkvara hõlpsasti teostada koormusvoolude analüüsi, lühisvoolude arvutusi, harmoonikate analüüsi, releekaitse sätete koordineerimist ning elektrisüsteemi stabiilsuse analüüsi. Vaatamata keerukatele analüüsifunktsioonidele on *Power Factory* tarkvara kasutamist lihtsustatud, ühejoone skeemil põhineva, graafilisel visualiseeringuga, mis võimaldab kiiresti modelleerida väiksemaid elektrisüsteeme. [31] Joonisel 3.2 on näidatud tarkvara graafilist kasutajaliidest.



Joonis 3.2 Power Factory graafiline visualiseering [32]

Oma struktuurilt võib tarkvara ülesehitust eristada rakendatavuse alusel viite põhimoodulisse, milleks on ülekandevõrgud, jaotusvõrgud, tööstuslikud süsteemid, elektrienergia genereerimine ja taastuvenergialahendused.

3.2.1 Ülekandevõrgud

Ülekandevõrkude modelleerimisel *Power Factory* tarkvaraga keskendutakse peamiselt, suurte elektrisüsteemide stabiilsuse analüüsimisel, saavutamaks efektiivne opereerimine ja vähendamaks ülalpidamiskulusid. Mudeli simuleerimisel kasutatavaid arvutusalgortime on võimalik rakendada nii alalis- kui ka vahelvudvoolusüsteemidele. Lisaks on võimalik simuleerida ja hinnata, millist mõju avaldavad elektrisüsteemi stabiilsusele uute tehnoloogiate nagu virtuaalne elektrijaam, alalisvoolu võimsuslüli, kõrgepinge alalisvoolu ühendus (*HVDC – High Voltage Direct Current*), aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kontroller, *FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System)* ning *VSC (Voltage Sourced Converters)*, kasutuselevõtt. [32] Peamised funktsioonid, mida tulemuste saamiseks kasutatakse on:

- Erakorraliste olukordade analüüs (*Contingency Analysis*).
- Elektromagnetiliste transientide analüüs (*Electormagnetic Transients*).
- Harmoonikute / võimsuse kvaliteedi analüüs (*Harmonics / Power Quality Analysis*).

- Stabiilsuse analüüs (*Stability Analysis*).
- Ülekandevõimsuste analüüs (*Transfere Capacity Analysis*).
- Elektrivõrgu optimeerimine (*Network Optimization*).

3.2.2 Jaotusvõrgud

Jaotusvõrgu modelleerimisel *Power Factory* tarkvaraga keskendutakse peamiselt, kahe-suunalise võimsusvoo ja hajatootmisel põhjustatud ülepingsed tekkivate probleemide lahendamisele. Lihtsustamaks keerukate mudelite kiiremat valmimist on võimalik tarkvara hõlpsasti ühildada, jaotusvõrgu operaatori, *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*) süsteemiga. Simulatsiooni käigus saadud tulemuste põhjal on võimalik optimeerida jaotusvõrgu ühendustopoloogiat – tagades efektiivse võimsusvoogude ülekandmise, pinge taset – vältimaks kaskaadset pinge kollapsi, faaside koormatavust – vähendamaks kadusid ja kommutatsiooniseadmete paigutust – parandamaks varustuskindlust. [32] Peamised funktsioonid, mida tulemuste saamiseks kasutatakse on:

- Tõenäosuslik analüüs (*Probabilistic Analysis*).
- Pinge kvaliteedi analüüs (*Voltage Profile Analysis*).
- Dünaamiline simulatsioon (*Quasi-Dynamic Simulation*).
- Majanduslik analüüs (*Economic Analysis*).
- Varustuskindluse analüüs (*Reliability Analysis*).
- Kaabli ja juhtme ristlõike analüüs (*Cable sizing Analysis*).

3.2.3 Tööstuslikud süsteemid

Tööstuslike süsteemide modelleerimisel *Power Factory* tarkvaraga keskendutakse peamiselt, elektrisüsteemis olevate jõuelektroonika seadmete arvukusest põhjustatud probleemide lahendamisega, jätkusuutliku tootmise tagamisele saartalitlusel ja töötajate ohutuse kindlustamisele. Võimaldamaks teostada põhjalikku analüüsi on tarkvara andmebaas varustatud mitmete, elektrisüsteemi rikkeid simuleerivate, stsenaariumitega, mida saab kasutada nii alalis- kui ka vahelduvvoolu võrkudes. Töötajate ohutuse tagamiseks koordineeritakse, simulatsiooni abil, releekaitse sätteid. [32] Peamised funktsioonid, mida tulemuste saamiseks kasutatakse on:

- Lühisvoolude arvutused nii alalis- kui vahelduvvoolu süsteemides vastavalt IEC/VDE, ANSI ja IEEE standarditele (*Short-Circuit calculations fo AC and DC systems*).

- Kesk- ja madalpingekaablite ristlõigete arvutamine vastavalt IEC standardile (*Cable sizing according to IEC*).
- Releekaitse koordineerimine (*Protection scheme coordination*).
- Varustuskindluse analüüs (*Network Reliability Analysis*).
- Tervikliku süsteemi analüüs (*System Analysis*).
- Pingelangu analüüs (*Voltage Drop Analysis*).

3.2.4 Elektrienergia genereerimine

Elektrijaamade modelleerimisel *Power Factory* tarkvaraga keskendutakse peamiselt, efektiivse töörežiimi leidmisele ja elektrisüsteemis ilmnevatest rikestest põhjustatud elektrigeneraatori staatilise ja dünaamilise stabiilsuse hindamisele. Tagamaks simulatsioonide käigus saadavate tulemuste usaldusväärsus on tarkvara andmebaasi vaikimisi lisatud hulgaline arv generaatorite ja mootorite mudelid, mille tehnilisi parameetreid on võimalik vastavalt vajadusele korrigeerida. Korrektsete tulemuste eesmärgiks on vähendada riske ja kulusid, mis võivad tekkida elektrijaama üle koormamisel. [32] Peamised funktsioonid, mida tulemuste saamiseks kasutatakse on:

- Elektrijaama tootlikkuse analüüs (*Power Plant Energy Analysis*).
- Lühisvoolude arvutused (*Short-circuit Calculation*).
- Stabiilsus ja elektromagnetiline simulatsioon (*Stability and EMT simulation*).
- Pinge automaatse reguleerimise analüüs (*Automatic Voltage Regulation Analysis*).

3.2.5 Taastuenergialahendused

Taastuenergialahenduste modelleerimisel *Power Factory* tarkvaraga keskendutakse peamiselt, tuule- ja päikeseparkide lisamisest elektrisüsteemi, põhjustatud kahe-suunalise võimsusvoo probleemide lahendamisele, stohhastilisest elektrienergia tootmisest tuleneva elektrivõrgu optimaalsele opereerimisele, elektrienergia tootmise ja tarbimise bilansi määramisele ja efektiivsele planeerimisele. Leidmaks lahendusi nimetatud probleemidele võimaldab tarkvara simuleerida tuule- ja päikeseparkide elektrienergia tootlikkust vastavalt asukoha spetsiifikale ning hinnata saadud tulemuste põhjal elektrisüsteemi kõrvalekaldeid normaaltalitlusest, olgu selleks siis pinge taseme liigne kõikumine, ülekandeliinide ülekoormus või võimsuse puudujääk. [32] Peamised funktsioonid, mida tulemuste saamiseks kasutatakse on:

- Tuule- ja päikesepargi elektrienergia tootmine (*PV and Wind Generation based on location*).

- Tootlikkuse analüüs (*Park Energy Analysis*).
- Lühisvoolude arvutused (*Short-circuit Calculation*).
- Võimsusvoogude arvutused (*Steady-state load flow calculation*).
- Varustuskindluse analüüs (*Reliability Analysis*).
- Optimaalse pinget taseme arvutamine (*Optimisation of distribution transformer tap positions*).

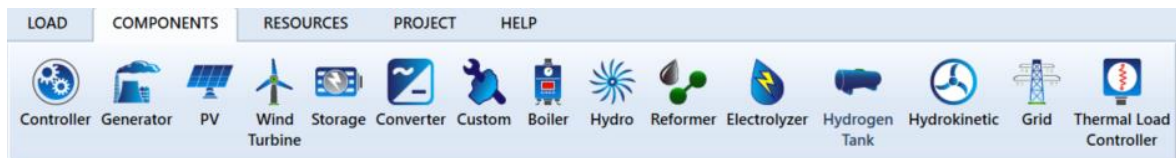
3.3 HomerPRO tarkvara tutvustus

Ameerika Ühendriikide ettevõtte HOMER Energy LLC, mis on asutatud aastal 2009 Dr. Peter Lilienthal-i poolt, keskendub mikrovõrkude optimeerimistarkvara *HomerPRO (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources)* jätkuvale arendamisele, levitamisele ja tarkvaraga seotud tehnilise toe pakkumisele. Lisaks pakub ettevõtte koolitusi, nõustamist ja analüüsimis teenust, mikrovõrkude kavandamisel, arendamisel ning hindamisel tekkivate tehniliste probleemide lahendamiseks. Ettevõtte visiooniks on pakkuda inimestele, kogu maailmas vahendeid, teenuseid ja teavet, kiirendamaks taastuvenergiaallikate kasutuselevõttu hajaasustus piirkondades. Oma olemuselt keskendub tarkvara peamiselt mikrovõrkude majanduslike tulemuste hindamisele ja optimeerimisele, tagades samaaegselt elektrienergia tootmise ja tarbimise tasakaal. [33]

HomerPRO modelleerimistarkvara tööpõhimõtte seisneb neljas peamises sammus – mudeli koostamine, simulatsioon, optimeerimine ja tulemuste analüüs. [34]

3.3.1 Mudeli koostamine

Mudeli koostamise käigus sisestatakse tarkvarasse algandmed, mille alusel teostatakse edasised simulatsioonid. Esmalt määratakse modelleeritava elektrivõrgu geograafiline koordinaat. Geograafilise koordinaadi alusel hangib tarkvara, globaalsest serverist, tuule- ja päikeressursi sisendandmed. Seejärel valmistatakse elektrivõrgu konfiguratsioon. Konfiguratsiooni all mõistetakse komponente, tootmis või tarbimis allikaid, mis elektrivõrgus on esindatud – tuulegeneraator, päikesepaneel, bensiini- või diislegeneraator, hüdroelektrijaam, koostootmisjaam, energiasalvesti, muundur, väline elektrivõrgu ühendus ja erinevate iseloomudega tarbijate koormused. [34] Joonisel 3.3 on näidatud, mudeli koostamisel kasutatavate komponentide nimistut.



Joonis 3.3 HomerPRO komponentide nimistu

Valitud komponentide alusel genereeritakse tarkvara poolt elektrivõrgu struktuurskeem. Igale komponendile lisatakse tehnilised parameetrid ja majanduslik maksumus ning hoolduskulud. Järgnevalt sisestatakse tarbijate koormused ja nende profiil, mida modelleeritud tootmisüksustega soovitakse katta. Koormuste sisestamist saab teostada kahel viisil:

- *HomerPRO* andmebaas – tarkvara andmebaasi on salvestatud eramute, büroohoonete ja tööstuslike ettevõtete tüüpilised koormused ja nende koormuste profiilid.
- Andmete importimine – manuaalset koormusandmete sisestamist teostatakse käsitsi või kasutades mahukaid andmete tabelleid.

Lisaks tarbija koormuse suurusele ja selle profiilile võimaldab tarkvara eristada, ka selle liiki – elektriline ja soojuslik. Peale elektrivõrgu konfiguratsiooni valmimist ja tarbijate koormuste lisamist, teostatakse mudeliga simulatsioon. [34]

3.3.2 Simulatsioon

Simulatsiooni käigus arvutab tarkvara energia tootmise ja tarbimise tasakaalu ning modelleeritud süsteemi eluea maksumuse. Tootmis ja tarbimise tasakaalu hindamiseks leitakse mudelis olevate energiat tootvate komponentide tootlikkus iga tunni kohta, aasta lõikes. Saadud tulemusi võrreldakse tarbijate koormuse profiiliga. Juhul, kui koostatud mudel on saartalitlusele vastav süsteem ja energia tootmine ei vasta tarbijate koormuse profiilile, ei edastata simulatsiooni käigus ühtegi tulemust. Tulemuste puudumist loetakse võrdseks süsteemi jätkusuutlikkuse puudumisega. Jätkusuutlikkuse tagamiseks korrigeeritakse mudelisse paigaldatud energiat tootvate komponentide osakaalu või ühendatakse olemasolev süsteem piiramatule energiareessurssile omava süsteemiga, tagamaks energia tasakaalu igal simulatsiooni ajahetkel. Eluea maksumuse arvutamisel arvestab tarkvara mudelisse paigaldatud seadmete kapitalikulu, käidu- ja hoolduskulud, kütusekulu ning intressimäära. [34]

3.3.3 Optimeerimine

Optimeerimise käigus keskendub tarkvara peamiselt majanduslikule aspektile, teostades hulganisti erinevaid simulatsiooni arvutusi. Eesmärgiks on leida kõige soodsam energiat tootvate komponentide kooslus, tagades samaaegselt energia

tasakaal. Isegi, kui esialgne mudel sisaldab erinevaid energiat tootvaid komponente, teostatakse optimeerimise käigus simulatsioone, kus kasutatakse ainult ühte energia tootmise allikat. Seega optimeerimise tulemustes kuvatakse kõikvõimalikud energiat tootvate komponentide koosluste variatsioone. [34] Joonisel 3.4 on näidis, optimeerimise käigus teostatavate arvutuste tulemused.

Architecture		Cost				System		PV		E-82 E4					
PV (kW)	E-82 E4	Grid (kW)	Conv (kW)	NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (€)	Production (kWh/yr)	Capital Cost (€)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (€)	
72,069	90	999,999		-€88.1M	-€0.0331	-€9.11M	€28.4M	99.4	0	18,017,250	73,411,040	10,384,615	133,254,864	415,385	
72,069	90	1	999,999	9,999,999	-€67.0M	-€0.0327	-€9.08M	€29.1M	99.4	0	18,017,250	73,411,040	10,384,615	133,254,864	415,385
	90		999,999		-€58.5M	-€0.0339	-€5.39M	€10.4M	98.5	0		10,384,615	133,254,864	415,385	
	90	1	999,999	9,999,999	-€57.5M	-€0.0332	-€5.36M	€11.1M	98.5	0		10,384,615	133,254,864	415,385	
72,069			999,999		-€13.9M	-€0.0139	-€2.49M	€18.0M	94.3	0	18,017,250	73,411,040			
72,069		1	999,999	9,999,999	-€12.8M	-€0.0129	-€2.47M	€18.7M	94.3	0	18,017,250	73,411,040			
			999,999		€22.4M	€0.200	€1.75M	€0.00	0	0					
		1	999,999	9,999,999	€23.5M	€0.210	€1.78M	€700,000	0	0					

Joonis 3.4 HomerPRO optimeerimise tulemused

Optimeerimise tulemused, kuvatakse tarkvaras tabelina, kus iga rida tähistab iseseisvat simulatsiooni. Simulatsiooni andmetest esitletakse, elektrivõrgu komponentide koostus, komponentide kogus või summaarne nimivõimsus, simuleeritud PV perioodi käidu- ja hoolduskulud ning toodetud elektrienergia kogus.

3.3.4 Sensitiivsusanalüüs

Sensitiivsusanalüüsi ehk tundlikkuse analüüsi käigus teostatakse tarkvaraga mitmeid erinevaid optimeerimisi. Eesmärgiks on leida, millist majanduslikku mõju avaldab süsteemi eluea maksumusele, esialgselt sisestatud sisendparameetrite muutus. Sisendparameetrite muutuste all peetakse silmas, nii tehnilisi kui majanduslikke. Tehniliste parameetrite alla kuulub elektrituulikute koguse ja võimsuse suurendamine või vähendamine, päikesepaneelide koguse, kaldenurga ja võimsuse suurendamine või vähendamine, energiasalvestite koguse ja mahtuvuse suurendamine või vähendamine. Majanduslikud muutused hõlmavad endas peamiselt kasutatava tehnoloogia odavnemist või kallinemist ja piiramatust ressursist saadava energia maksumuse odavnemist või kallinemist. Tundlikkuse analüüsi teostamine on valikuline ja arvutatakse ainult siis, kui sisendparameetritesse on lisatud mitu erinevat väärtust ühe komponendi kohta. Antud analüüs võimaldab hinnata erinevust sõltuvalt esialgse mudeli investeeringu mahust ja realiseerumise ajast arvestades eeldatavaid tehnoloogiate arenguid. [34]

3.4 Tarkvarade võrdlus ja analüüs

Tarkvarade tutvustuste alusel saab järeldada, et kõigi kolme tarkvara struktuurne ülesehitus erineb nii funktsionaalsuse kui ka peamiste eesmärkide poolest. Võrdlustabeli koostamise aluseks võeti tuule- ja päikeseenergeetika õppeaine õpiväljunditele vastavad tarkvara funktsionaalsused. Saadud tulemused on koondatud tabelisse 3.5.

Tabel 3.5 Tarkvarade võrdlus

Nr.	Tuuleenergeetika	WindPRO	Power Factory	HomerPRO
1.	Elektrituuliku tootlikkuse analüüs	●	●	●
2.	Tuulepargi tootlikkuse analüüs, vastavalt asukoha spetsiifikale	●	-	●
3.	Elektrituulikute topoloogia määramine	○	-	-
4.	Varjutusefekti analüüs	●	-	-
5.	Elektrituulikute andmebaas	●	-	●
6.	Tuulepargi majanduslik analüüs	○	○	●
7.	Tuulepargi keskkonnamõjude analüüs	●	-	-
8.	Maapinna, maa- ja taimkatte kõrgusmudeli analüüs	○	-	-
9.	Tuuleenergia ressursi andmebaas	●	-	●
10.	Tuulepargi visualiseerimine	●	-	-
Päikeseenergeetika				
11.	Päikesepargi tootlikkuse analüüs, vastavalt asukoha spetsiifikale	-	●	●
12.	Päikesepaneelide topoloogia määramine	-	●	-
13.	Päikesepaneelide kaldenurkade analüüs	-	○	○
14.	Päikesepaneelide töötemperatuuri analüüs	-	○	-
15.	Päikesepaneelide andmebaas	-	●	●
16.	Päikesepargi majanduslik analüüs	-	○	●
17.	Päikesepargi optimeerimise analüüs	-	-	●
18.	Statsionaarse ja päikesetee jälgiva, päikesepaneeli kinnitusraami analüüs	-	○	○
19.	Päikeseenergia ressursi andmebaas	-	●	●
20.	Päikesepargi visualiseerimine	-	-	-
Elektrotehnika				
21.	Võimsusvoogude analüüs	○	○	-
22.	Reaktiiv- ja aktiivvõimsuse analüüs	○	●	-
23.	Elektriliinide koormatavuse analüüs	○	●	-
24.	Elektriliinide kadude analüüs	○	○	-
25.	Lühisvoolude analüüs	○	○	-
26.	Süsteemi pinge kvaliteedi analüüs	○	●	-
27.	Süsteemi ohutuse analüüs	-	○	-
28.	Harmoonikute analüüs	-	○	-
29.	Elektromagnetiliste transientide analüüs	-	○	-
30.	Elektrisüsteemi stabiilsuse analüüs	-	○	-
Sümbolite selgitus:				
- funktsionaalsus puudub				
○ funktsionaalsus olemas, kuid praktiliste ülesannete puhul ei ole kasutatud				
● funktsionaalsus olemas ja praktiliste ülesannete puhul kasutatud				

Tabelis 3.5 koondatud tarkvarade võrdlemise tulemustest on esiteks näha, et päikeseenergeetikaga seotud probleemide kindlaks tegemisel ja nende lahendamisel ei ole võimalik kasutada *WindPRO* modelleerimistarkvara. Põhjuseks, päikeseenergeetikale omase funktsionaalsuse puudumine. Sarnane olukord on ka *HomerPRO* tarkvaraga, millel puudub võimekus hinnata ja kindlaks teha, elektrisüsteemi talitlust iseloomustavaid seisundiparameetreid.

Teiseks, selgub, et *WindPRO* tarkvaraga on võimalik katta kogu tuuleenergeetikaga seotud õpiväljundite osa, kui õppeprotsessis kasutada kõiki tarkvara funktsionaalsusi. Selle saavutamiseks, tuleks olemasolevale kodutöö ülesandele lisada, tuulepargi topoloogia valiku harjutus, teostada tuulepargi majanduslik analüüs ning uurida, millist mõju simulatsiooni tulemusele avaldab ümbritsev maapind, maa- ja taimkate. Samuti omab *DIgSILENT Power Factory* piisavat võimekust, et katta elektrotehnikaga seotud õpiväljundite osa. Küll aga tuleks sellisel juhul oluliselt muuta olemasoleva praktilise kodutöö sisu, suurendades elektrotehnikaga seotud probleemide analüüsimise osakaalu.

Kolmandaks saab järeldada, et antud õppeaine raames pööratakse enim tähelepanu tuuleenergeetikaga seotud probleemide lahendamisele ja analüüsimisele. Kolme tarkvara peale kokku kasutakse 13 funktsionaalsust, simuleerimaks elektrituulikute ja tuuleparkide talitlust, mudeli koostaja poolt etteantud tingimustel. Elektrituulikute tootlikkuse analüüs on ainus funktsionaalsus, mida praktilise kodutöö ülesande lahendamisel teostatakse kõikide tarkvaradega. Samuti on kõige madalamad näitajad kasutamata ja puuduvate funktsionaalsuste osas, vastavalt 4 ja 13 tükki. Seejärel keskendutakse päikeseenergeetikaga seotud probleemide lahendamise ja analüüsimisega, kasutades *DIgSILENT Power Factory* ja *HomerPRO* tarkvarasid. Kahe erineva tarkvara kasutamise põhjuseks on asjaolu, et ükski, õppeaine raames, kasutatavast tarkvarast ei ole võimeline iseseisvalt katma kõiki päikeseenergeetika õpiväljundite osa ning ühte funktsionaalsust, päikesepargi visualiseerimist, ei ole võimalik üldse teostada. Elektrituulikute ja päikesepaneelide poolt põhjustatud, elektrisüsteemi talitluse probleeme, käsitletakse kodutöö praktiliste ülesannete lahendamisel kõige vähem, teostades ainult elektriliinide koormatavuse ja süsteemi pinge kvaliteedi analüüse. Vaatamata sellele, et kasutatavad tarkvarad omavad piisavalt funktsionaalsusi (16 tk) teostamiseks elektrisüsteemide talitluse modelleerimisi, võib vähese praktiseerimise põhjuseks olla õppejõudude teadlik valik, keskenduda peamiselt tuule- ja päikeseparkide elektrienergia tootlikkuse ja majanduslike analüüside teostamisele.

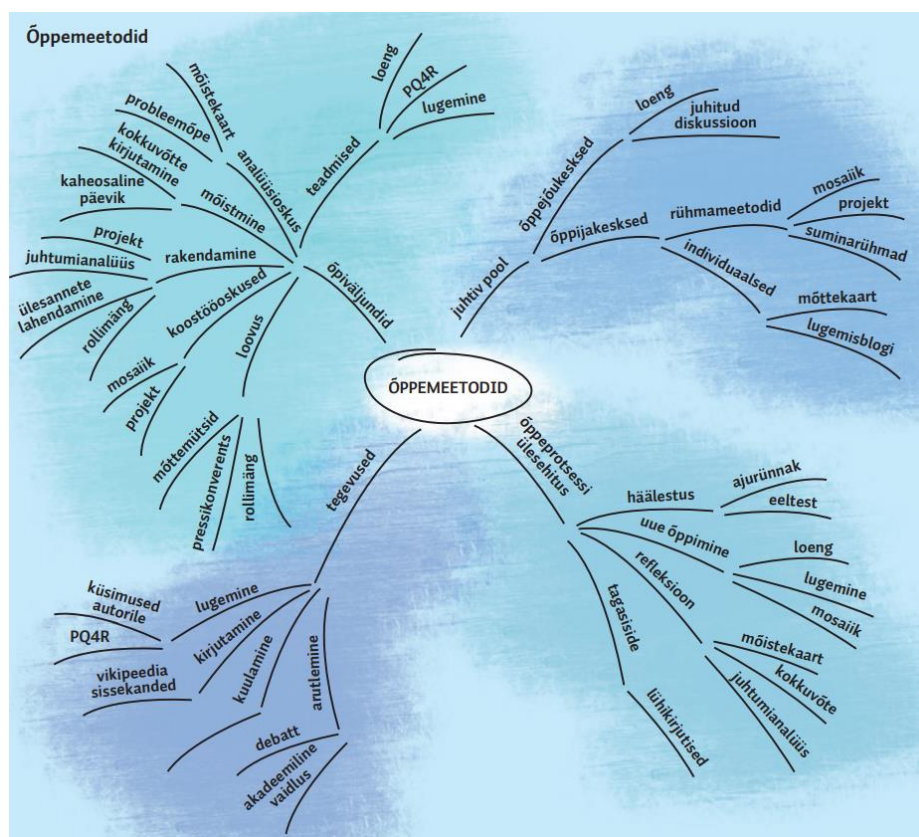
Hinnates õppeaine raames kasutatavate modelleerimise tarkvarade potentsiaalikut, saab väita, et *DIgSILENT Power Factory* omab kõige suuremat funktsionaalsuste kogust (20 tk), mida üliõpilased oma kodutööde lahendamisel võiksid kasutada. Kuid tegelikkuses jääb üle poole (12 tk), sellest kasutamata. Põhjuseks võib pidada, suuri puudujääke tuuleparkide modelleerimise võimekuses ja vastupidiselt, väga põhjalikku elektrisüsteemide analüüsimise võimet. Sellegipoolest on võimalik tõsta *Power Factory* osakaalu päikeseenergeetikaga seotud kodutöö ülesannete lahendamisel, kasutades ära päikesepaneelide kaldenurkade, töötemperatuuri ja kinnitusraami analüüsi funktsionaalsusi.

WindPRO kõrge potentsiaal seisneb elektrituulikute ja tuuleparkide põhjalikus modelleerimise ja analüüsimise võimekuses, millele lisandub tuuleenergeetika õpiväljundite edastamise täielik funktsionaalsus. Siiski tasub kaaluda, kas kõikide funktsionaalsuste kasutamiseks koostatav tuulepargi mudeli valmistamine on ajaliselt kõige parem viis üliõpilastele teadmiste edasi andmiseks või on mõistlikum edastada mingi osa tuuleenergeetika õpiväljunditest teoreetiliste loengutundide jooksul.

Kõige madalamat funktsionaalsuste kogust (12 tk) omab *HomerPRO* tarkvara ja ühtlasi on antud tarkvara puhul kõige madalam näitaja kasutamata funktsionaalsuste osas (2 tk). Vaatamata funktsionaalsuste vähesusele ja pea täielikule tarkvara võimekusele ära kasutamisele, praktiliste koduste tööde lahendamisel, omab *HomerPRO* ainukesena võimekust teostada päikeseparkide optimeerimise analüüsi. Lisaks võimaldab *HomerPRO* simuleerida ühe mudeli alusel, elektrisüsteemis olevate erinevate komponentide kooslus kombinatsioone, mida teiste tarkvarade puhul saab teostada alles peale mudelisse muudatuste sisseviimist, vähendades sellega oluliselt mudeli koostamiseks kuluvat aega.

4 KODUTÖÖDE METOODIKA VALIK JA PRAKTILISTE ÜLESANNETE KOOSTAMINE

Õppemeetodid on vahendid, mille abil õppejõud loob õpikeskkonna, milles üliõpilane saab erinevaid kogemusi ning õpib aktiivselt. Õpimeetodite teadlikul valikul tasub arvesse võtta mitmeid tegureid: õppeprotsessi eesmärgid, õpiväljundid, aine ja üliõpilaste eripära, üliõpilaste varajasemad kogemused, õpikeskkonna tingimused, õppejõu enda oskused ja kogemused ning kasutada olevad ressursid. [9] Joonisel 4.1 on kujutatud, printsiibist lähtuvate õppemeetodite rühmitamine.



Joonis 4.1 Printsiibist lähtuv õppemeetodite rühmitus. [9]

Osa, joonisel 4.1 nimetatud meetoditest ja võtetest, sobivad paremini õppeprotsessi algusesse (nt. loengu või seminari), osa uue materjali õppimiseks, osa refleksiooniks või tagasiside andmiseks, seega ühte universaalset viisi, millega saavutatakse alati õppeaine õpiväljunditele vastavad tulemused, ei ole olemas. Küll aga on oluline vaadelda õppeprotsessi tervikuna, et õpiväljundid, hindamisviisid ja õppemeetodid oleksid omavahel kooskõlas. [9]

Vaadates tuule- ja päikeseenergeetika õppeaine õpiväljundite kirjeldust, on näha, et suurt rõhku pannakse analüüsivõime arendamisele. Analüüsioskuse harjutamist

võimaldavateks meetoditeks on võrdleva tabeli või mõistekaardi koostamine, juhtumianalüüs või probleemõpe. [9] Sellest tulenevalt saab järeldada, et praktiliste kodutöö ülesannete koostamine juhtumianalüüsina on üks sobivatest viisidest, kuidas tuule- ja päikeseenergeetika õppeaine õpiväljundeid üliõpilastele edastada.

Lisaks õppemeetodite valikule, võib üsna oluliseks pidada üliõpilaste õpihoiakut õpitava aine suhtes. Õpihoiakud kirjeldavad, mida üliõpilased teevad, kui nad enda arvates õpivad, ja miks nad just seda teevad. Eristatakse pindmist ja sügavat õpihoiakut. Pindmise õpihoiakuga lähtub üliõpilane soovist saada ülesandega ühele poole võimalikult väikse vaevaga, ent jätta mulje, et nõudmised on täidetud. Sügava õpihoiaku puhul püüdleval üliõpilasel selle poole, et mõista ja mõtestada õpitavat iseenda jaoks. [9]

Sügav õppimine ei tule iseenesest ja sageli puuduvad üliõpilastel selleks vajalikud oskused. Selle kujunemist saab toetada õppejõud, näidates üles huvi teema ja õpetamise vastu, pühendades piisavalt aega kesksetele teemadele, sidudes uut materjali sellega, mis juba on õpitud ning kasutades erinevaid õppemeetodeid, valmistades harjutusi, mis nõuavad mõtlemist ja seoste loomist. [9]

Kodutöö praktiliste ülesannete lahendamine on õpingute rakenduslik osa, millega soovitakse luua seoseid teoreetiliste teadmiste ja praktilise kogemuse vahel. Tuule- ja päikeseenergeetika õppeaine raames omandatakse praktilised teadmised läbi modelleerimistarkvarade kasutamise. Ülesannete väljatöötamisel kasutati juhtumianalüüsi õppemetoodikat. Juhtumianalüüsi puhul on tegu konkreetse probleemi kirjeldusega, mida üliõpilased peavad analüüsima ning leidma sobiva lahendus- või tegevusstrateegia. [9] Samuti lähtuti õppeaine õpiväljunditest ja tabelis 3.5 esitatud tarkvarade funktsionaalsustest.

Lisaks muudeti senimaani kasutatud praktiliste ülesannete lahendamise järjekorda, mille kohaselt lahendati esialgu *HomerPRO*, seejärel *WindPRO* ja lõpetuseks *DIgSILENT Power Factory* praktiline kodutöö ülesanne. Järjekorra muutmise põhjuseks on soov siduda modelleerimistarkvaradega lahendatavad ülesanded ühtseks tervikuks, mille kohaselt ühe ülesande tulemused on järgmise ülesande sisendparameetriteks. Uus järjekord määrati tarkvarade funktsionaalsuste alusel, mille kohaselt alustatakse praktiliste kodutööde lahendamist *WindPRO* tarkvaraga – modelleerides lähteandmetele vastav tuulepark, sellele järgneb *DIgSILENT Power Factory* – kus otsitakse vastuseid päikeseenergeetikaga seotud küsimustele, ning kodutöö ülesanne lõpetatakse *HomerPRO* tarkvaraga, teostades tuule- ja päikesepargi majanduslik analüüs.

Kodutööde lahendamisel saadud tulemused, esitatakse ühtse aruandena. Aruande koostamise põhjuseks on anda üliõpilastele võimalus praktiseerida kirjalikku eneseväljendamist ja ülikooli poolt seatud nõuetele vastavat vormistus. Aruandes tuuakse välja lähteülesanne, üliõpilase poolt iseseisvalt kogutud algandmed ja põhjendused nende valiku tegemisel, arvutuskäigud, simulatsioonide tulemused, võrdlustabelid, järeldused ja ettepanekud.

4.1 WindPRO tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne

4.1.1 Ülesande eesmärk

WindPRO tarkvaraga teostatava praktilise ülesande eesmärgiks on anda üliõpilastele võimalus rakendada õppeaine jooksul omandatud teoreetilisi teadmisi ja edastada selge arusaam, kuidas mõjutab tuulepargi tootlikkust elektrituulikute paigutus ja rootori kõrgus ning analüüsida tuulepargi majanduslikke aspekte. Lisaks tutvustada kasutatavat tarkvara ja arendada mudeli simuleerimise käigus saadavate tulemuste analüüsivõimet.

4.1.2 Ülesande sisu

Praktilise ülesande sisuline ülesehitus on jagatud mitmeks etapiks – lähteandmete lugemine, mudeli koostamine, simulatsiooni teostamine, tulemuste analüüsimine, mudeli parendamine, korduv simulatsiooni teostamine ja tulemuste võrdlemine.

Alustuseks edastatakse üliõpilastele lähteandmed. Lähteandmed määratakse üliõpilase matriklinumbri alusel ja koosnevad järgnevast:

- Modelleeritava tuulepargi geograafilised koordinaadid.
- Ühe elektrituuliku nimivõimsus.
- Modelleeritava tuulepargi maa-ala.
- Elektrituulikute arv tuulepargis.

Järgnevalt toimub mudeli koostamine *WindPRO* tarkvaraga. Mudeli koostamisel kasutada õppeaine raames varajasemalt väljatöötatud tarkvara kasutusjuhendit. [35]

Vastavalt lähteandmetele fikseeritakse tuulepargi keskpunktiks olev geograafiline koordinaat. Valikus on viis erinevat geograafilist koordinaati, mille vahel lähteülesandeid jaotatakse. Tuuleparkide asukohtade ettemääramisega tagatakse võimalus võrrelda, erinevate üliõpilaste, simulatsioonide käigus saadud tulemusi, säilitades lähteandmete

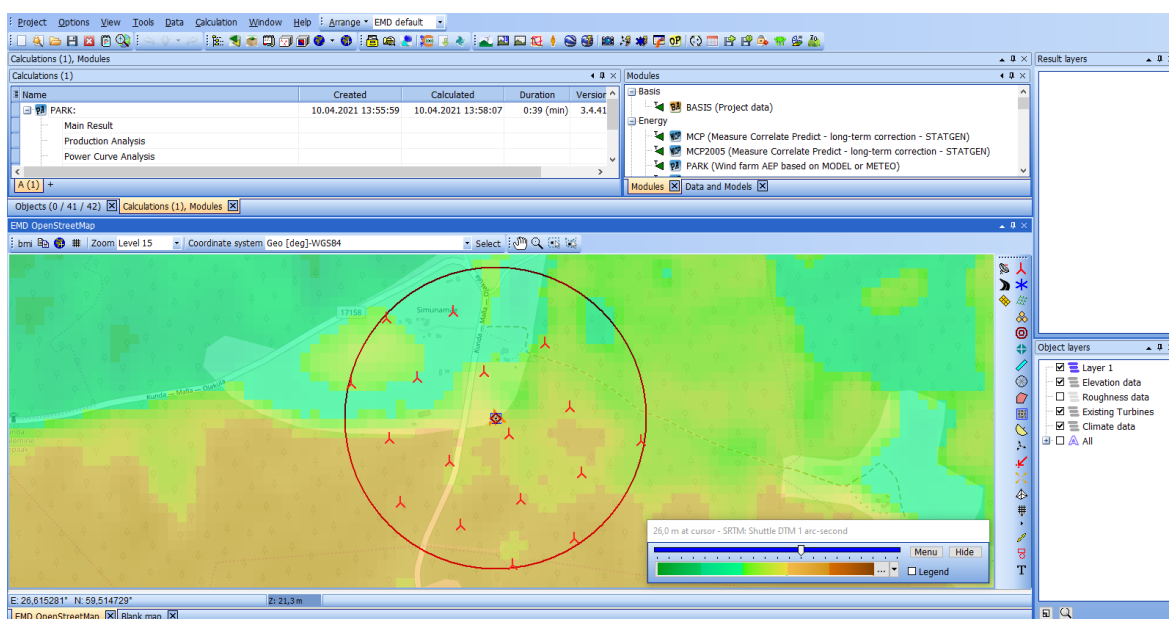
individuaalsus. Tabelis 4.2 on näha lähteandmeteks valitud tuuleparkide asukohad, koos geograafiliste koordinaatidega.

Tabel 4.2 – Modelleeritava tuulepargi asukoha algandmed

Asukoht	Geograafilised koordinaadid
Saarde	58.13, 24.94
Rõuste	58.63, 23.53
Paldiski	59.39, 24.04
Saviranna	59.50, 25.03
Simunamäe	59.51, 26.59

Geograafiliste koordinaatide valiku puhul sooviti tagada piisav lähteandmete variatsioon, katta Eesti rannikualad ja hinnata antud asukohtade potentsiaalikut tuuleenergeetika vaatenurgast. Variatsioonide pikaajalisuse tagamiseks on võimalik tulevikus lähteandmete geograafilisi koordinaate muuta, vastavalt soovile.

Peale tuulepargi keskpunkti fikseerimist, märgitakse mudelis tuulepargi maa-ala, kuhu edaspidi hakatakse elektrituulikuid paigutama. Vähendamaks mudeli koostamiseks kuluvat aega on otsustatud tuuleparkide maa-alana kasutada geomeetrilist ringi, mille raadius on etteantud lähteandmetes. Maa-ala raadiused varieeruvad ühest kuni kahe kilomeetrini. Tuulepargi piiride seadmine võimaldab mõista, millist mõju avaldab elektrituulikute vaheline kaugus ja sunnib üliõpilast leidma kõige efektiivsemat elektrituulikute paigutuse topoloogiat. Joonisel 4.3 on näidatud modelleeritava tuulepargi maa-ala määramise piir.



Joonis 4.3 – Modelleeritava tuulepargi maa-ala.

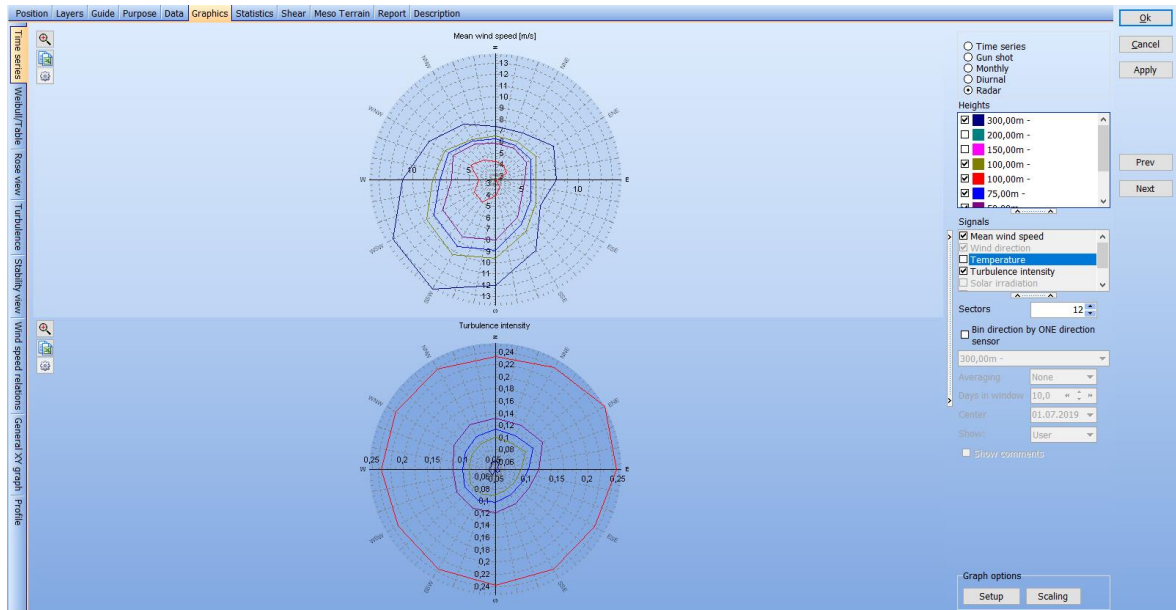
Määrates ära tuulepargi maa-ala, jätkatakse elektrituulikute mudelisse paigutamiseks. Elektrituulikute nimivõimsus antakse ette lähteandmetes. Antud praktilise ülesande väljatöötamisel on kasutatud kolme nimivõimsusega elektrituulikuid – 1,5 MW, 2 MW ja 3 MW. Samuti on lähteandmetes ette antud elektrituulikute arv, modelleeritavas tuulepargis. Elektrituulikute arv genereeritakse tuulepargi koguvõimsuse alusel. Tuulepargi koguvõimsuse määrab õppejõud, kes üliõpilastele praktilisi ülesandeid väljastab (*Näide: modelleeritava tuulepargi koguvõimsuse 25 MW ja elektrituuliku 1,5 MW nimivõimsuse puhul tuleb etteantud maa-ala sisse paigutada vastavalt 17 elektrituulikut*). Elektrituulikute paigutuse topoloogia on üliõpilase enda valik, mille peamiseks eesmärgiks on saavutada võimalikult suur elektrienergia aastane tootlikkus. Samuti on üliõpilase valida, millise tootja poolt valmistatud elektrituulikut soovitakse mudeli valmistamisel kasutada. Elektrituulikute tootjate ja tüüpide nimekiri asub *WindPRO* tarkvara andmebaasis. Joonisel 4.4 on näidatud tarkvaras oleva elektrituulikute nimekiri. Üliõpilase poolt valitud elektrituuliku tehnilised andmed (tootja, tüüp, võimsus, rootori kõrgus ja võimsuskarakteristik) esitatakse praktilise kodutöö aruandes.

	Name	Source	Valid	Grid connection	Power curve count	Noise count	Visual count	eGrid count	Power & Noise pairs	PowerMatrix count	Company	Variant	Power	Sec. power	Generator type	Diameter	W/m ²	Def. hub height	Edit date	Prod. country	Filename
60 Hz turbines																					
Acciona																					
Alstom	ENERCON E-126 7580 127.0 I01	EMD	Yes	50/60	8	6	2	0	0	0	ENERCON	E-126	7 580	Variable	127,0	598,4	135,0	16.06.2017	DE	C:\Users\LaptopDc	
Clipper	ENERCON E-126 7500 127.0 I01	EMD	No	50 Hz	8	6	2	0	0	0	ENERCON	E-126	7 500	Variable	127,0	592,1	135,0	13.01.2015	DE	C:\Users\LaptopDc	
Ecolecna	Siemens Gamesa SG 6.0-155 6600 I	EMD	Yes	50/60	17	17	3	0	0	0	Siemens	SG 6.0-	6 600	One gener	155,0	349,8	122,5	16.11.2020	ES	C:\Users\LaptopDc	
Enercon	Siemens Gamesa SG 6.0-170 6200 I	EMD	Yes	50/60	14	14	2	0	0	0	Siemens	SG 6.0-	6 200	One gener	170,0	273,2	115,0	16.11.2020	ES	C:\Users\LaptopDc	
Envision	VENSYS 155 6200 155.0 I01	EMD	Yes	50/60	7	7	6	0	0	0	VENSYS	155	6 200	Variable	155,0	328,6	102,5	08.12.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
Gamesa	NORDEX N149/5.X 5700 149.0 I01	EMD	Yes	50/60	0	0	7	0	0	6	NORDEX	N149/5.	5 700	Variable	149,0	326,9	125,0	04.06.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
GE Wind	NORDEX N163/5.X 5700 163.0 I01	EMD	Yes	50/60	0	0	5	0	0	5	NORDEX	N163/5.	5 700	Variable	163,0	273,2	118,0	04.06.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
Goldwind	VENSYS 170 5600 170.0 I01	EMD	Yes	50/60	9	9	0	0	0	0	VENSYS	170	5 600	Variable	170,0	246,7	115,0	28.10.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
Lagerwey	VESTAS V150-5.6 5600 150.0 I01	EMD	Yes	50/60	7	8	2	0	0	0	VESTAS	V150-5.	5 600	Variable	150,0	316,9	105,0	07.12.2020	DK	C:\Users\LaptopDc	
MTorres	VESTAS V162 5600 162.0 I01	EMD	Yes	50/60	6	7	2	0	0	0	VESTAS	V162	5 600	Variable	162,0	271,7	125,0	07.12.2020	DK	C:\Users\LaptopDc	
NEPC																					
Nordex	ENERCON E-160 EPS E2 5500 160.0 I	EMD	Yes	50 Hz	10	10	4	0	0	0	ENERCON	E-160 E	5 500	Variable	160,0	273,5	119,9	20.11.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
Repower	GE WIND ENERGY 5.5-158 Thrust 66	EMD	Yes	50 Hz	3	9	1	0	0	0	GE WIND	5.5-158	5 500	Variable	158,0	280,5	120,9	26.03.2020	US	C:\Users\LaptopDc	
Semicon	GE WIND ENERGY 5.3-158 Thrust 66	EMD	Yes	50 Hz	3	9	1	0	0	0	GE WIND	5.3-158	5 300	Variable	158,0	270,3	120,9	26.03.2020	US	C:\Users\LaptopDc	
Siemens	GE WIND ENERGY 5.3-158 Thrust 70	EMD	Yes	50 Hz	3	9	1	0	0	0	GE WIND	5.3-158	5 300	Variable	158,0	270,3	120,9	26.03.2020	US	C:\Users\LaptopDc	
Siemens Gamesa	GE WIND ENERGY 5.3-158 Thrust 70	EMD	Yes	50 Hz	3	9	1	0	0	0	GE WIND	5.3-158	5 300	Variable	158,0	270,3	120,9	26.03.2020	US	C:\Users\LaptopDc	
Sinovel	ENERCON E-147 EPS E2 5000 147.0 I	EMD	Yes	50 Hz	10	10	4	0	0	0	ENERCON	E-147 E	5 000	Variable	147,0	294,6	126,0	23.11.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
Suzlon	GAMESA G128 5000 128.0 I01	EMD	Yes	50/60	2	2	1	0	0	0	GAMESA	G128	5 000	Variable	128,0	388,6	120,0	18.07.2013	ES	C:\Users\LaptopDc	
Turbowinds	GAMESA G132 5000 132.0 I01	EMD	Yes	50/60	1	1	4	0	0	0	GAMESA	G132	5 000	Variable	132,0	365,4	120,0	17.05.2018	ES	C:\Users\LaptopDc	
Vestas	Repower 5 M 5000 126.0 I01	EMD	No	50 Hz	4	1	1	0	0	0	Repower	5 M	5 000	Variable	126,0	401,0	100,0	10.03.2014	DE	C:\Users\LaptopDc	
Winwind	Siemens Gamesa SG 5.0-132 MKII S1	EMD	Yes	50 Hz	14	16	1	0	0	0	Siemens	SG 5.0-	5 000	One gener	132,0	365,4	84,0	29.06.2020	ES	C:\Users\LaptopDc	
	Siemens Gamesa SG 5.0-145 MKII S1	EMD	Yes	50 Hz	16	16	4	0	0	0	Siemens	SG 5.0-	5 000	One gener	145,0	302,8	127,5	21.12.2020	ES	C:\Users\LaptopDc	
	GE WIND ENERGY 4.8-158 4800 158.	EMD	Yes	50/60	9	0	1	0	0	0	GE WIND	4.8-158	4 800	Variable	158,0	244,8	101,0	06.05.2020	US	C:\Users\LaptopDc	
	NORDEX N133/4.8 4800 133.0 I01	EMD	Yes	50/60	0	0	4	0	0	4	NORDEX	N133/4.	4 800	Variable	133,0	345,5	78,0	04.06.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
	ENERCON E-136 EPS 4650 136.3 I01	EMD	Yes	50 Hz	10	10	8	0	0	0	ENERCON	E-136 E	4 650	Variable	136,3	318,7	109,3	23.11.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
	ENERCON E-160 EPS 4600 160.0 I01	EMD	Yes	50 Hz	10	10	4	0	0	0	ENERCON	E-160 E	4 600	Variable	160,0	228,8	120,0	20.11.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
	ENERCON E-112/45.114 4500 114.0	EMD	No	50 Hz	1	1	1	0	0	0	ENERCON	E-112/4	4 500	Variable	114,0	440,9	124,0	04.01.2008	DE	C:\Users\LaptopDc	
	GAMESA G128 4500 128.0 I01	EMD	Yes	50 Hz	5	5	1	0	0	0	GAMESA	G128	4 500	Variable	128,0	349,7	120,0	31.01.2013	ES	C:\Users\LaptopDc	
	GAMESA G136 4500 136.0 I01	EMD	No	50/60	5	5	1	0	0	0	GAMESA	G136	4 500	Variable	136,0	309,8	120,0	18.09.2018	ES	C:\Users\LaptopDc	
	GE WIND ENERGY 4.5-158 4500 158.	EMD	Yes	50 Hz	6	0	1	0	0	0	GE WIND	4.5-158	4 500	Two gener	158,0	229,5	120,9	06.05.2020	US	C:\Users\LaptopDc	
	NORDEX N149/4. 4.5 4500 149.0 I01	EMD	Yes	50/60	1	2	6	0	0	6	NORDEX	N149/4.	4 500	Variable	149,0	258,1	125,0	21.09.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
	Siemens Gamesa SG-145 4.5 4500	EMD	Yes	50 Hz	9	9	0	0	1	0	Siemens	SG-145	4 500	One gener	145,0	272,5	127,5	18.08.2020	ES	C:\Users\LaptopDc	
	WZE 4.5 MW 4500 151.0 I01	EMD	Yes	50/60	1	0	2	0	0	0	WZE	4.5 MW	4 500	Variable	151,0	251,3	120,0	22.01.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	
	ENERCON E-147 EPS 4.3MW 4300 1	EMD	Yes	50/60	10	10	8	0	0	0	ENERCON	E-147 E	4 300	Variable	147,0	253,4	126,4	23.11.2020	DE	C:\Users\LaptopDc	

Joonis 4.4 Elektrituulikute nimekiri

Elektrituulikute valiku ja paigutus topoloogia määramise järgselt lisatakse mudelile tuule andmed. Tuule andmete lisamiseks kasutatakse funktsiooni „Insert Meteo Object”. Antud funktsiooni kasutades, kuvab *WindPRO* tarkvara kõiki, modelleeritava tuulepargi ümbruses, paiknevaid ilmastiku andmeid koguvaid ilmajaamu. Võimalikult realistliku tulemuse saamiseks tuleb valida tuulepargile lähim ilmajaam. Tuule andmete lisamisel, peab üliõpilane jälgima, et mudelile lisatavad andmed on vastavuses elektrituuliku rootori kõrgusega. Praktilise kodutöö aruandes esitatakse, ilmajaama andmetest saadud

tuuleroos ja keskmine tuule kiirus, vastavalt elektrituuliku rootori kõrgusele. Joonisel 4.5 on toodud näide kodutöö aruandes esitatavatest tuule andmetest.

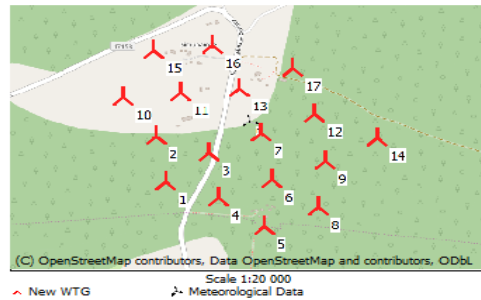


Joonis 4.5 Modelleeritava tuulepargi tuule andmed

Tuule andmete mudelisse lisamise järel teostatakse simulatsioon, kasutades *PARK* funktsiooni, mille käigus arvutab tarkvara tuulepargi aastase elektrienergia toodangu, kuvab iga elektrituuliku elektrienergia toodangu ja näitab kui suurt mõju avaldab elektrituulikute paigutuse topoloogiast tulenev varjutusefekt. Joonisel 4.6 on näidatud tuulepargi simulatsiooni tulemusena koostatud raport. Üliõpilase ülesandeks on analüüsida, simulatsiooni käigus saadud tulemusi ja pakkuda välja lahendus, mis aitaks modelleeritud tuulepargi elektrienergia tootlikkust tõsta. Lahenduste välja pakkumine seisneb mudeli korrigeerimises. Korrigeerimise käigus on võimalik muuta tuulepargis olevate elektrituulikute topoloogiat või valida uus elektrituuliku tootja ja tüüp. Uue elektrituuliku valimisel tuleb lähtuda lähteandmetes esitatud elektrituuliku nimivõimsusest. Peale mudeli korrigeerimist teostatakse korduv tuulepargi tootlikkuse simulatsioon.

PARK - Main Result

Wake Model N.O. Jensen (RISO/EMD)
 Calculation performed in UTM (north)-WGS84 Zone: 35
 At the site centre the difference between grid north and true north is: -0,4°
Power curve correction method
 New WINDPRO method (adjusted IEC method, improved to match turbine control) <RECOMMENDED>
 Air density calculation method
 Height dependent, temperature from climate station
 Station: RANKEE1
 Base temperature: 5,2 °C at 11,0 m
 Base pressure: 1013,2 hPa at 0,0 m
 Air density for site center in key hub height: 13,0 m + 64,0 m = 1,254 kg/m³ -> 102,4 % of Std
 Relative humidity: 0,0 %
Wake Model Parameters
 Wake decay constant: 0,075 DTU default onshore
Wake calculation settings
 Angle [°] Wind speed [m/s]
 start end step start end step
 0,5 360,0 1,0 0,5 30,5 1,0



Key results for height 64,0 m above ground level

Terrain Geo [deg]-WGS84		Height	Type	Wind energy	Mean wind speed
Longitude	Latitude	[m]		[kWh/m²]	[m/s]
E 26.590000°	E 59.510000°	75,0	WEIBULL	3 772	7,6

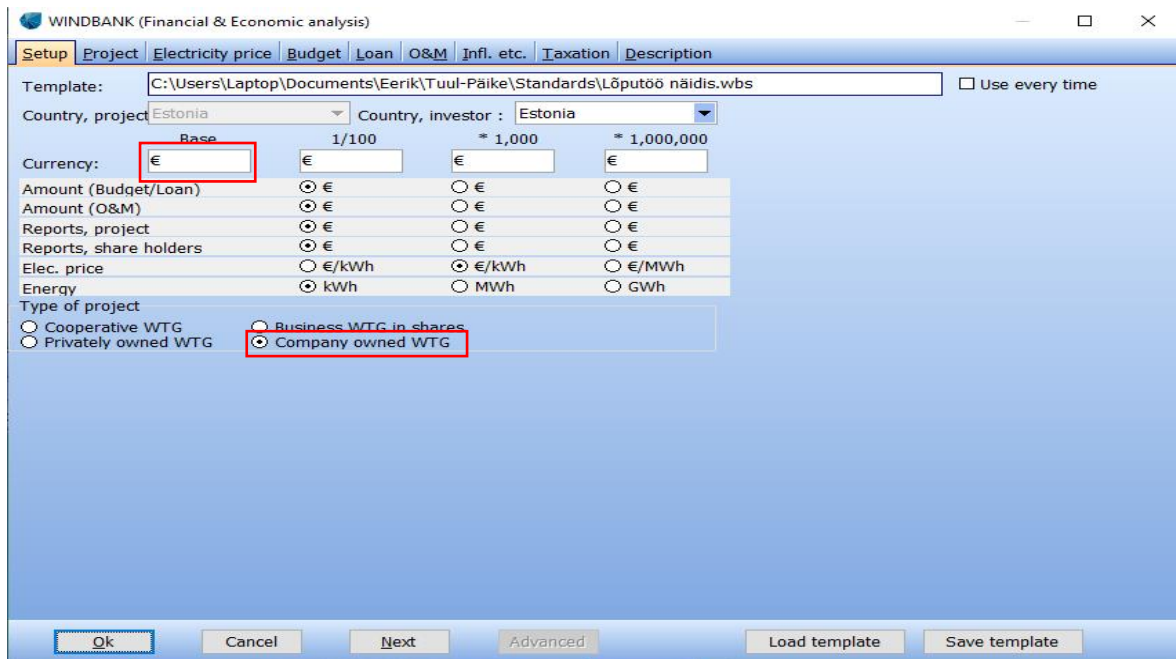
Calculated Annual Energy for Wind Farm

WTG combination	Result PAKK [MWh/y]	GROSS (no loss) Free WTGs [MWh/y]	Wake loss [%]	Capacity factor [%]	Specific results*)		Full load hours [Hours/year]	Mean wind speed @hub height [m/s]
					Mean WTG result [MWh/y]	Mean WTG result [MWh/y]		
Wind farm	70 633,4	85 186,5	17,1	31,6	4 154,9	2 770	7,6	

*) Based on wake reduced results and any curtailments.

Joonis 4.6 Tuulepargi simulatsiooni käigus väljastatav elektrienergia tootlikkuse raport

Lisaks tootlikkuse simuleerimisele, arvutatakse praktilise ülesande käigus, tuulepargi majanduslik maksumus ja tasuvus, kasutades funktsiooni *WINDBANK*. Majandusliku analüüsi tegemiseks kohustub üliõpilane iseseisvalt leidma, elektrituuliku turuhinna, elektrienergia müügihinna ja hoolduskulud. Tuulepargi elueaks arvestada 20 aastat. Joonistel 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 ja 4.11 on näidatud majandusliku analüüsi tarbeks sisendandmete samm-sammuline sisestus.



Joonis 4.7 Majandusliku analüüsi ühikute määramine

WINDBANK (Financial & Economic analysis)

Setup Project Electricity price Budget Loan O&M Infl. etc. Taxation Description

Name Tuulepargi majanduslik analüüs

Data for WTGs/production

User defined
 Use WTG from object list
 Use WTG from Windcat
 Load from energy calculation
 Link to energy calculation

Energy calculation: PARK: [võimaldab valida]

WTG(s):

1: GE WIND ENERGY GE 1.5s 1500 70.5 !0! hub: 64,7 r ^
 2: GE WIND ENERGY GE 1.5s 1500 70.5 !0! hub: 64,7 r ^
 3: GE WIND ENERGY GE 1.5s 1500 70.5 !0! hub: 64,7 r ^
 4: GE WIND ENERGY GE 1.5s 1500 70.5 !0! hub: 64,7 r ^
 5: GE WIND ENERGY GE 1.5s 1500 70.5 !0! hub: 64,7 r ^

Select all
Deselect all

WTGs: 17

	per WTG	total	Include
Installed power:	1 500 kW	25 500 kW	
Calculated production:	4 154 904 kWh	70 633 368 kWh	<input type="radio"/>
Calculated production -	10 3 739 414 kWh	63 570 031 kWh	<input checked="" type="radio"/>

New WTG
 Existing WTG

Installation date: 12-2020 [võimaldab valida] Expected life span: 20

Ultimo month
 Primo month

Ok Cancel Next Advanced Load template Save template

Joonis 4.8 Tuulepargi tootlikkuse andmete sidumine majandusliku analüüsiga

WINDBANK (Financial & Economic analysis)

Setup Project Electricity price Budget Loan O&M Infl. etc. Taxation Description

Number of decimals in electricity prices
2

Electricity price, WTG energy production

Name	Share of production [%]	Price [€/kWh]	Properties	Hours / edit / Ann inc	Tax free	Start year (0=2020)	End year
Elektrihind 1	100	0,06	Annual increase	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	0	20

Add Delete

Ok Cancel Next Advanced Load template Save template

Joonis 4.9 Elektrienergia hinna sisestamine

WINDBANK (Financial & Economic analysis)

Setup Project Electricity price **Budget** Loan O&M Infl. etc. Taxation Description

No	Entry type	D 1	D 2	D 3	I	Year	Budget entry text	Cost/WTG [€]	Cost of 17 WT
1	Investment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	Esmane investeering	2 295 000	39 015 000

Installation costs: 39 015 000 €
 Cost per 1000 kWh: 614 €
 Price per kW : 1 530 €

Adjusting entry :

Add Delete Edit insurance

Ok Cancel Next Simple Load template Save template

Joonis 4.10 Elektrituuliku maksumuse sisestamine

WINDBANK (Financial & Economic analysis)

Setup Project Electricity price Budget Loan **O&M** Infl. etc. Taxation Description

All amounts are indicated in net present values and applies for:
 1 WTG 17 WTGs

No	O&M costs (type)	Annual O&M expenditures text	From year	[€]/[%]	From year	[€]/[%]
1	€/kW	Käidu- ja hoolduskulud	0	38,700001	0	0

Add O&M costs Delete O&M costs Add transfer Delete transfer

No	Transferences to overhaul	Amount [€]	To be used in year	Transference from year
<No data to display>				

Ok Cancel Next Simple Load template Save template

Joonis 4.11 Käidu- ja hoolduskulude määramine

Praktilise kodutöö aruandes esitatakse esialgse ja korduva simulatsiooni käigus saadud tulemused, tabeli kujul. Tulemuste tabelis tuuakse välja tuulepargi aastane elektrienergia tootlikkus, üksikute elektrituulikute tootlikkus ja varjutusefektist põhjustatud kaod. Majandusanalüüsist saadud tulemustest esitatakse tuulepargi maksumus, tasuvuse aeg ja eluea jooksul teenitud kasum või kahjum. Tulemuste võrdlemise käigus hindab üliõpilane, millist mõju tuulepargi tootlikkusele avaldas mudeli korrigeerimine ja kirjeldab antud muudatuste ilmnemise põhjuseid.

Peale *WindPRO* ülesande lahendamist, liigutakse edasi järgmise praktilise ülesande juurde, mis hõlmab endas päikesepargi modelleerimist. Edasiste ülesannete lahendamisel võetakse elektrituulikute andmed *WindPRO* tarkvaraga saadud tulemustest.

Näidisaruanne, *WindPRO* tarkvaraga lahendatavast praktilisest kodutööst, on toodud antud magistritöö lisades, Lisa 1.

4.2 DigSILENT Power Factory tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne

4.2.1 Ülesande eesmärk

DIgSILENT Power Factory tarkvaraga teostatava praktilise ülesande eesmärgiks on anda üliõpilastele võimalus rakendada õppeaine jooksul omandatud teoreetilisi teadmisi ja edastada selge arusaam, millist mõju avaldab päikesepargi tootlikkusele päikesepaneeli töötemperatuur ja kaldenurga valik ning kuidas teostada päikesepaneelide paigutus topoloogia. Lisaks tutvustada kasutatavat tarkvara ja arendada mudeli simuleerimise käigus saadavate tulemuste analüüsivõimet.

4.2.2 Ülesande sisu

Praktilise ülesande sisuline ülesehitus on jagatud mitmeks etapiks – lähteandmete lugemine, päikesepaneeli valik, päikesepaneeli töötemperatuurist põhjustatud elektrienergia tootlikkuse muutuse arvutamine, päikesepargi paigutus topoloogia määramine, mudeli koostamine, päikesepaneeli optimaalse kaldenurga määramine vastavalt asukoha spetsiifikale, simulatsiooni teostamine, tulemuste analüüsimine ja tulemuste võrdlemine.

Alustuseks edastatakse üliõpilastele lähteandmed. Lähteandmed määratakse üliõpilase matriklinumbri alusel ja koosnevad järgnevast:

- Päikesepargi geograafilised koordinaadid
- Päikesepargi planeeritav nimivõimsus
- Modelleerimiseks kasutatava muunduri tehnilised parameetrid
- Päikesepaneelide töötemperatuur
- Elektritarbimine
- Päikesepaiste tundide arv
- Päikesepaneelide kaldenurga muutused
- Elektrivõrgu tööpinge
- Elektrivõrgu sõlmede vahelised liinide pikkused

Järgnevalt teostab üliõpilane iseseisvalt, modelleeritavas päikesepargis kasutatava, päikesepaneeli tüübi valiku. Valituks osutunud päikesepaneelide tehnilised andmed esitatakse praktilise kodutöö aruandes. Päikesepaneelide alusel arvutatakse nende esialgne kogus modelleeritavas päikesepargis, võttes arvesse lähteandmetes edastatud päikesepargi planeeritav nimivõimsus, kasutades valemit 4.12.

$$k_{PV} = \frac{P_{Park}}{P_{PV}} \quad (4.12)$$

Kus k_{PV} – päikesepaneelide esialgne kogus, tk

P_{Park} – päikesepargi nimivõimsus, MW

P_{PV} – päikesepaneeli maksimaalne võimsus, MW

Peale päikesepaneelide valiku tegemist ja koguse arvutamist, teostatakse arvutus, leidmaks, kui palju avaldab mõju, päikesepaneeli tootlikkusele lähteandmetes määratud töötemperatuur. Töötemperatuurist põhjustatud väljundvõimsuse muutus arvutatakse valemiga 4.13 ja 4.14.

$$V_{TT} = (V_{OC} \cdot T_{TC}) \cdot (T_{TT} - T_{STC}) \quad (4.13)$$

Kus V_{TT} – töötemperatuurist põhjustatud päikesepaneeli pinge muutus, V

V_{OC} – päikesepaneeli avatud ahela pinge, V

T_{TC} – päikesepaneeli temperatuuri koefitsient, %

T_{TT} – töötemperatuur, °C

T_{STC} – standardne katsetingimuse temperatuur, 25°C

Kuna töötemperatuuri mõju päikesepaneeli poolt genereeritud elektrivoolu suhtes on marginaalselt väike, ei arvestata selle arvutamisel temperatuuri koefitsiendiga.

$$P_{TT} = (V_{mp} - V_{TT}) \cdot I_{mp} \quad (4.14)$$

Kus P_{TT} – päikesepaneeli väljundvõimsus töötemperatuuril, W

V_{mp} – päikesepaneeli pinge, maksimaalse võimsuse korral, V

V_{TT} – töötemperatuurist põhjustatud pinge muutus, V

I_{mp} – päikesepaneeli maksimaalne koormusvool, A

Teades päikesepaneelide arvu, mida modelleeritavasse päikeseparki paigutatakse ja töötemperatuurist tulenevat päikesepaneeli võimsuskadu, leitakse päikesepargi tegelik aktiivvõimsus, kasutades valemit 4.15.

$$P_{Tegelik} = k_{pV} \cdot P_{TT} \quad (4.15)$$

Kus $P_{Tegelik}$ – päikesepargi tegelik väljundvõimsus töötemperatuuril, MW

k_{pV} – päikesepaneelide kogus, tk

P_{TT} – päikesepaneeli väljundvõimsus töötemperatuuril, MW

Teades päikesepargi väljundvõimsust töötemperatuuril ja lähteandmetes esitatud päikesepaiste tundide arvu, arvutatakse aastane tootlikkus. Tootlikkuse arvutamisel kasutatakse valemit 4.16.

$$P_{Aasta} = P_{Tegelik} \cdot t_{päike} \quad (4.16)$$

Kus P_{Aasta} – päikesepargi aastane elektrienergia tootlikkus, MWh

$P_{Tegelik}$ – päikesepargi tegelik väljundvõimsus töötemperatuuril, MW

$t_{päike}$ – päikesepaiste tundide arv, h

Järgnevalt arvutatakse muundurite kogus ja päikesepaneelide ühenduse topoloogia. Topoloogia leidmiseks kasutatakse päikesepaneelide tehnilisi andmeid ja lähteülesandes esitatud muunduri tehnilisi parameetreid. Esmalt leitakse muundurite kogus, kasutades valemit 4.17.

$$k_{Muundur} = \frac{P_{Park}}{P_{Muundur}}$$

(4.17)

Kus $k_{Muundur}$ – muundurite summaarne kogus päikesepargis, tk

P_{Park} – päikesepargi nimivõimsus, MW

$P_{Muundur}$ – muunduri maksimaalne väljundvõimsus, MW

Topoloogia leidmiseks on tarvis teada jadamisi ühendatavate päikesepaneelide kogust ühe muunduri sisendi kohta. Valemi 4.18 abil määratakse jadamisi ühendatavate päikesepaneelide arv.

$$n_{PV} = \frac{V_{Muundur}}{V_{OC}} \quad (4.18)$$

Kus n_{PV} – jadamisi ühendatavate päikesepaneelide maksimaalne kogus, tk

$V_{Muundur}$ – muunduri maksimaalne tööpinge sisendi kohta, V

V_{OC} – päikesepaneeli avatud ahela pinge, V

Lõpliku, jadamisi ühendatavate päikesepaneelide koguse, valib üliõpilane iseseisvalt põhjendades tehtud valikut. Muunduri väljundvõimsuse alusel arvutatakse päikesepaneelide kogus, mida ühe muunduriga on võimalik ühendada, kasutades valemit 4.19.

$$n_{Muundur} = \frac{P_{Muundur}}{P_{TT}} \quad (4.19)$$

Kus $n_{Muundur}$ – päikesepaneelide maksimaalne kogus muunduri kohta, tk

$P_{Muundur}$ – muunduri maksimaalne väljundvõimsus, W

P_{TT} – päikesepaneeli väljundvõimsus töötemperatuuril, W

Saadud tulemuste põhjal arvutatakse päikesepaneelide lõplik kogus ja päikesepargi nimivõimsus, kasutades valemit 4.20 ja 4.21 ning joonestatakse topoloogiline struktuurskeem, ühe muunduri külge ühendatavate päikesepaneelide kohta nagu on näidatud joonisel 4.22

$$k_{PV\ Lõplik} = k_{Muundur} \cdot n_{Muundur} \quad (4.20)$$

Kus $k_{PV\ Lõplik}$ – päikesepaneelide lõplik kogus päikesepargis, tk

$k_{Muundur}$ – muundurite summaarne kogus päikesepargis, tk

$n_{Muundur}$ – päikesepaneelide maksimaalne kogus muunduri kohta, tk

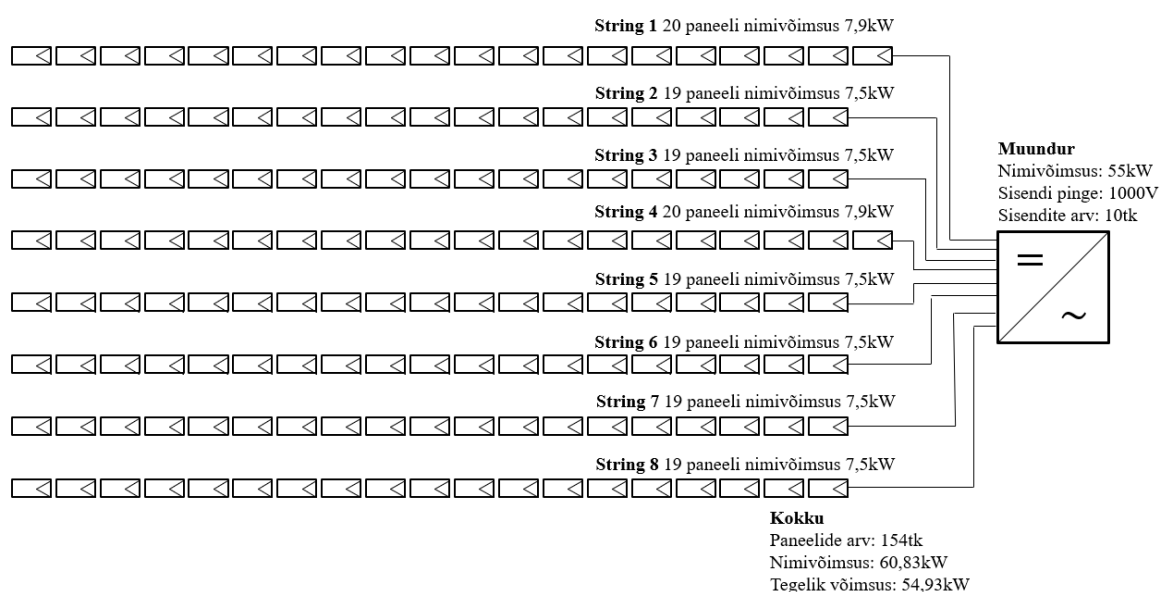
$$P_{Park\ lõplik} = k_{PV\ lõplik} \cdot P_{PV} \quad (4.21)$$

Kus $P_{Park\ tegelik}$ – päikesepargi lõplik nimivõimsus, MW

$k_{PV\ lõplik}$ – päikesepaneelide lõplik kogus päikesepargis, tk

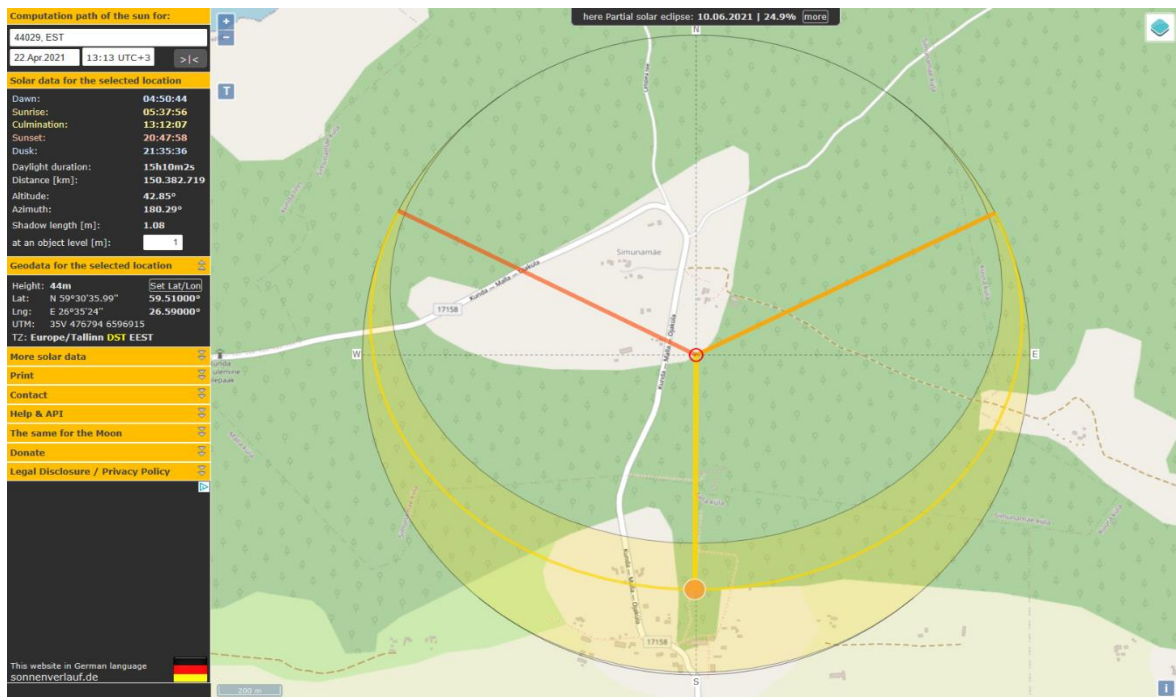
P_{PV} – päikesepaneeli maksimaalne võimsus, MW

Lõpliku päikesepaneelide koguse alusel, korratakse varajasemaid arvutusi, leidmaks päikesepargi väljundvõimsus töötemperatuuril ja aastane tootlikkus.



Joonis 4.22 Päikesepaneelide topoloogiline struktuurskeem muunduri kohta

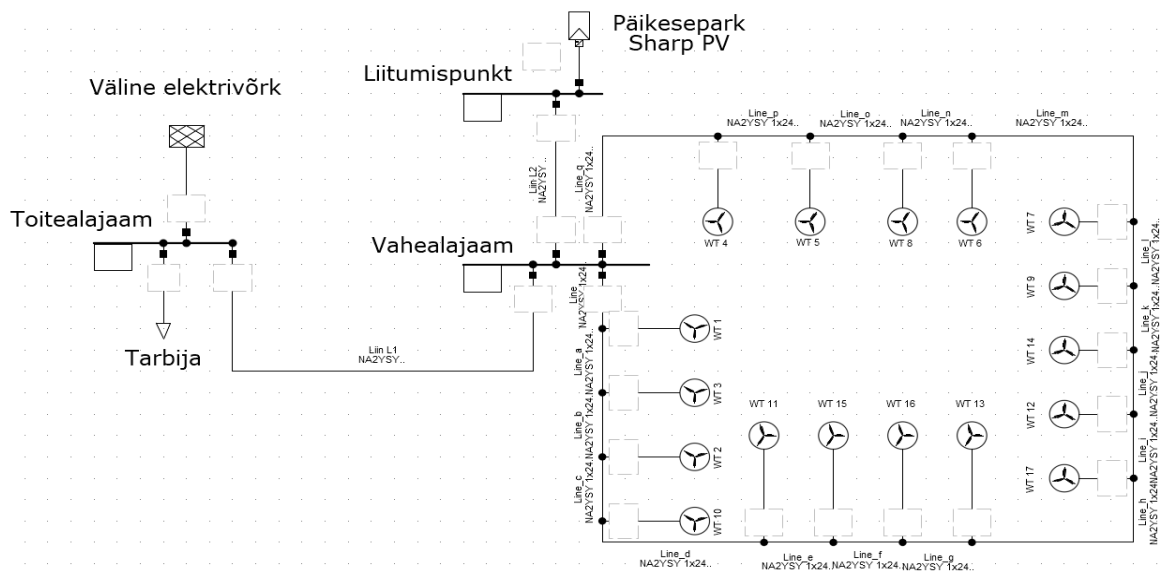
Määrates päikesepaneelide lõpliku koguse ja valides topoloogia asutakse arvutama päikesepaneelide kaldenurka. Kaldenurga arvutamisel kasutatakse valemit 2.16. Päikese kõrguseks valitakse, praktilise ülesande vormistamise keskpäevane päikese kõrgus, vastavalt päikesepargi geograafilistele koordinaatidele. Joonisel 4.23 on toodud näidis, päikese kõrguse määramiseks kasutatud veebilehest – www.suncalc.org.



Joonis 4.23 Päikese kõrgus Simunamäel 22. aprill 2021 [36]

Arvutuste käigu saadud tulemused koondatakse ühisesse tabelisse, kus tuuakse välja esialgsed ja lõplikud tulemused.

Teostades eelnevad arvutused, asutakse koostama mudelit *Power Factory* tarkvaras. Mudeli koostamine seisneb tarkvaras ühejoone skeemi valmistamisest, mis hõlmab endas toitealajaama, kuhu on ühendatud tarbija ja väline elektrivõrgu ühendus. Toitealajaam on ühendatud vahealajaamaga. Vahealajaama on omakorda ühendatud tuulepark ja päikesepargi liitumispunkt. Lisaks kasutada õppeaine raames varajasemalt väljatöötatud juhendeid. [37] Joonisel 4.24 on näha praktilise ülesande skeem.



Joonis 4.24 – Praktilise ülesande ühejoone skeem.

Tuulepargi andmed lisatakse vastavalt *WindPRO* tarkvaraga teostatud praktilise kodutöö käigus saadud tulemustele. Elektri tuulikute vahekaugused määratakse neid ühendavate elektriliinide pikkusega. Elektriliini tüübi ja ristlõike valib üliõpilane iseseisvalt ja kontrollib simulatsioonide abil nende sobilikkust. Kuna *Power Factory* tarkvaraga modelleerimisel keskendutakse peamiselt päikesepargi tootlikkuse ja päikesepaneelide kaldenurkade muutmise analüüsile, sisestatakse elektri tuulikute parameetrid konstantsete väärtustena kasutades valemit 4.25.

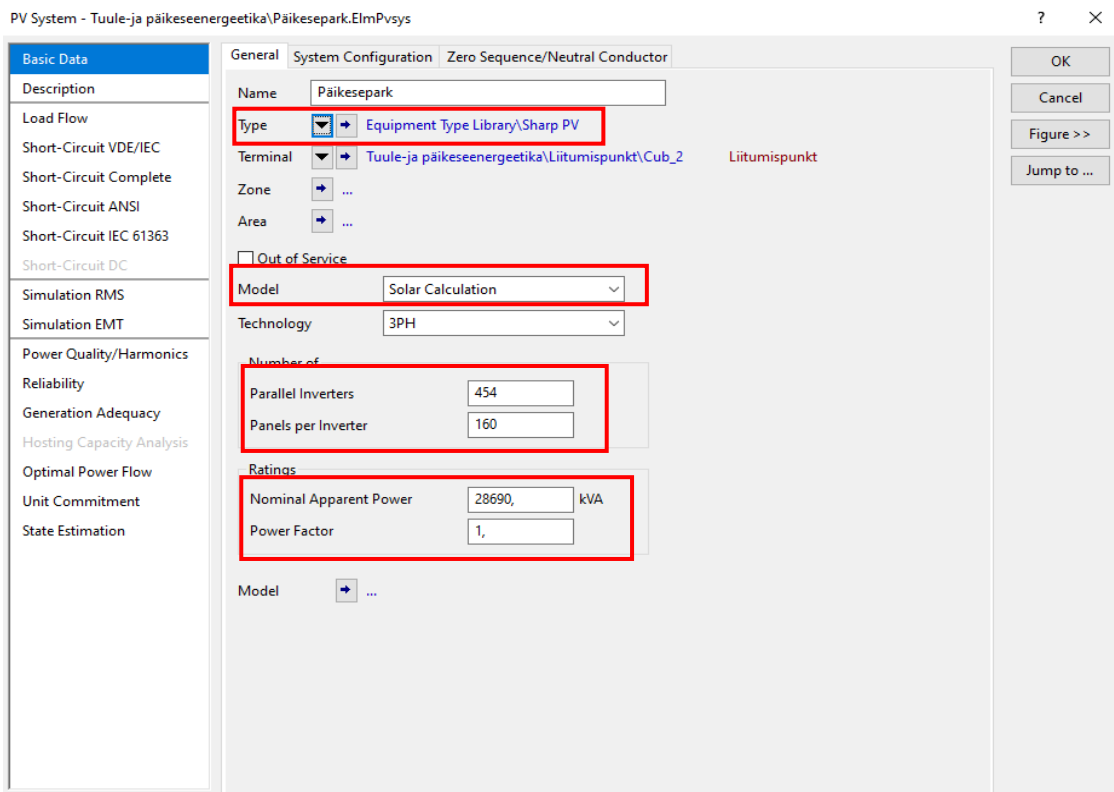
$$P_{WT} = \frac{P_{WT \text{ tootlikkus}}}{t_{aasta}} \quad (4.25)$$

Kus P_{WT} – elektri tuuliku konstantne väljundvõimsus, MW

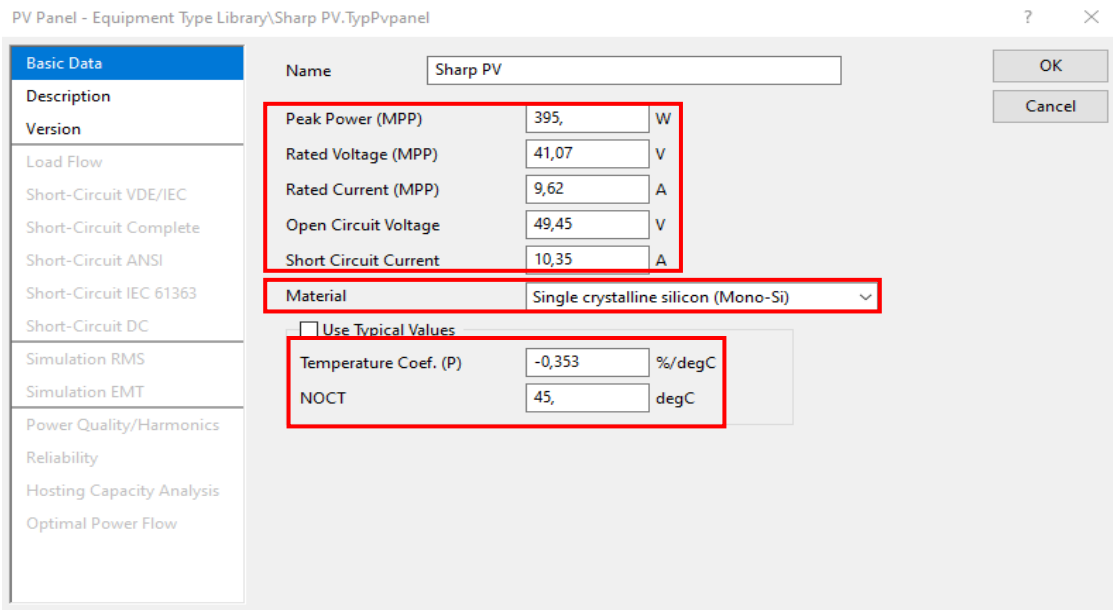
$P_{WT \text{ tootlikkus}}$ – elektri tuuliku aastane elektrienergia tootlikkus *WindPRO* tulemuste alusel, MWh

t_{aasta} – tundide arv aastas, h

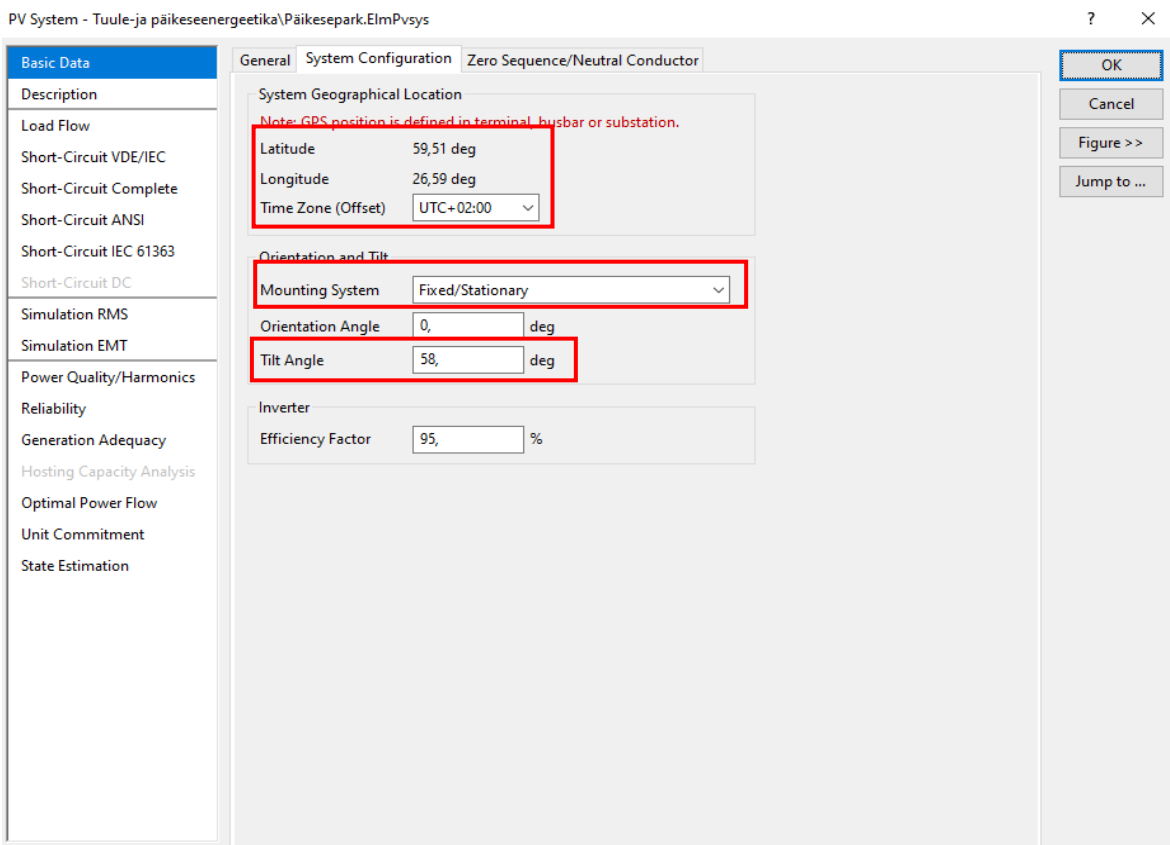
Järgnevalt lisatakse mudelisse päikeseпарк. Päikesepaneelide ja muundurite kogused võetakse arvutuste teel saadud tulemustest. Samuti lisatakse üliõpilase poolt valitud päikesepaneelide tehnilised parameetrid. Joonisel 4.26, 4.27 ja 4.28 on näidatud kuidas lisada päikesepaneelide parameetreid tarkvarasse.



Joonis 4.26 Päikesepaneelide koguse ja nimivõimsuse lisamine



Joonis 4.27 Päikesepaneeli tehniliste parameetrite sisestamine



Joonis 4.28 Päikesepaneeli kinnitusraami tüübi ja kaldenurga väärtuse lisamine

Päikesepaneelide parameetrite sisestamisega valmib ühtlasi modelleeritav päikesepark. Edasi teostatakse dünaamilisi simulatsioone selgitamiseks, milline on päikesepargi aastane elektrienergia tootlikkus, millist mõju avaldab erinevate päikesepaneelide

kinnitusraamide tüüpide ja kindlate kaldenurkade kasutamine, tootlikkusele. Kaldenurkade muutmist teostatakse lähteandmetes esitatud andmete põhjal. Lisaks analüüsitakse kuidas mõjutab kaldenurkade muutmine päikesepargi väljundvõimsust talvisel ja suvisel perioodil.

Peale päikesepargi mudeli koostamist ja simulatsioonide analüüsimist, asutakse hindama tuule- ja päikesepargi majanduslikku maksumust, kasutades *HomerPRO* tarkvara.

Näidisaruanne, *DIgSILENT Power Factory* tarkvaraga lahendatavast praktilisest kodutööst, on toodud antud magistritöö lisades, Lisa 1.

4.3 HomerPRO tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne

4.3.1 Ülesande eesmärk

HomerPRO tarkvaraga teostatav praktilise ülesande eesmärk on anda üliõpilastele võimalus analüüsida, eelnevate praktiliste tööde käigus modelleeritud tuule- ja päikeseparkide majanduslikku poolt ja leida kui suurt elektrienergia hulka hangitakse välisest elektrivõrgu ühendusest katmaks tarbija elektrienergia vajadus. Lisaks tutvustada kasutatavat tarkvara.

4.3.2 Ülesande sisu

Praktilise ülesande sisuline ülesehitus on jagatud mitmesse etappi – mudeli koostamine, tehniliste ja majanduslike andmete sisestamine ning tarkvara poolt väljastatud tulemuste analüüsimine. Mudeli koostamiseks vajalikud lähteandmed võetakse õppeaines varajasemalt teostatud kodutööde aruandest ja leitakse iseseisvalt. Praktilise ülesande teostamiseks on tarvis koguda järgnevad lähteandmed:

- Modelleeritava süsteemi eluiga
- Tuule- ja päikesepargi geograafilised koordinaadid
- Elektritarbimine
- Elektrituuliku nimivõimsus ja kogus (valida tarkvara andmebaasist kõige sarnasemate tehniliste parameetritega elektrituulik)
- Tuulepargi maksumus ning aastane käidu- ja hoolduskulu

- Päikesepargi nimivõimsus
- Päikesepaneelide efektiivsus, temperatuuri koefitsient ja erinevad kaldenurgad
- Päikesepaneeli maksumus ning aastane käidu- ja hoolduskulu
- Elektrienergia ostu- ja müügihind

Praktilise ülesande lahenduskäik algab tabeli koostamisest, kuhu märgitakse kasutatavad lähteandmed. Peale lähteandmete kogumist arvutatakse päikesepargi maksumus ning käidu- ja hoolduskulud, kasutades valemeid 4.29 ja 4.30.

$$PV_{Maksumus} = P_{Park} \cdot PV_{Hind} \quad (4.29)$$

Kus $PV_{Maksumus}$ – päikesepargi maksumus, EUR

P_{Park} – päikesepargi nimivõimsus, kW

PV_{Hind} – päikesepaneeli hind, EUR/kW

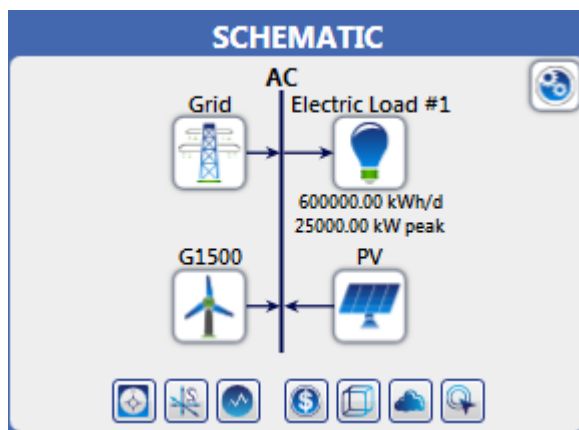
$$PV_{O\&M\ Aasta} = P_{Park} \cdot PV_{O\&M} \quad (4.30)$$

Kus $PV_{O\&M\ Aasta}$ – päikesepargi aastane käidu- ja hoolduskulu, EUR

P_{Park} – päikesepargi nimivõimsus, kW

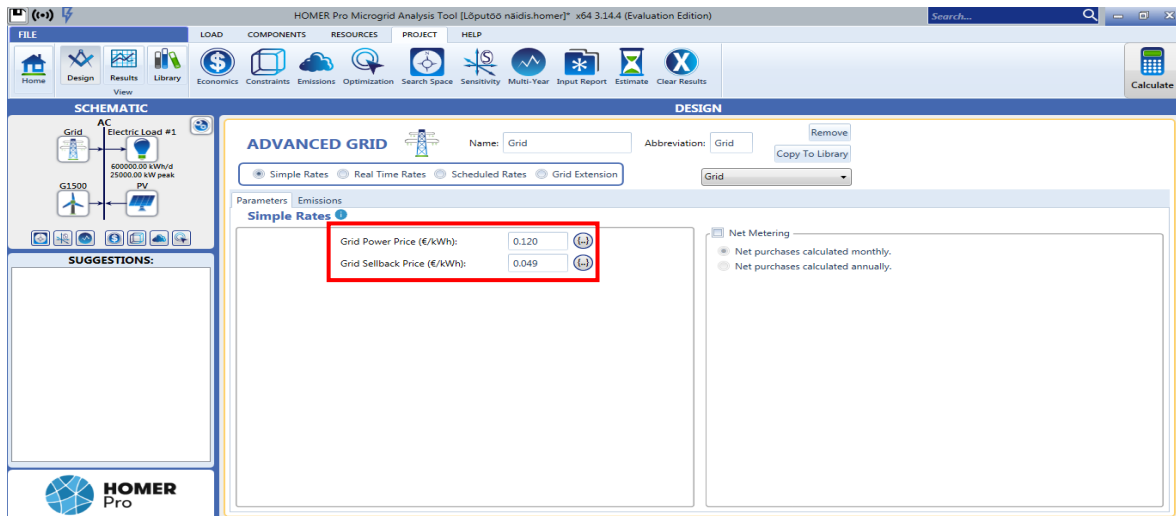
$PV_{O\&M}$ – päikesepaneeli käidu- ja hoolduskulu ühe kilovatti kohta aastas, EUR/kW

Järgnevalt asutakse koostama mudelit *HomerPRO* tarkvaras. Mudeli koostamisel kasutada varajasemalt õppeaine raames väljatöötatud kasutusjuhendeid. [38] Esmalt määratakse asukoht, seejärel koostatakse elektrivõrgu skeem nagu on näidatud joonisel 4.31.

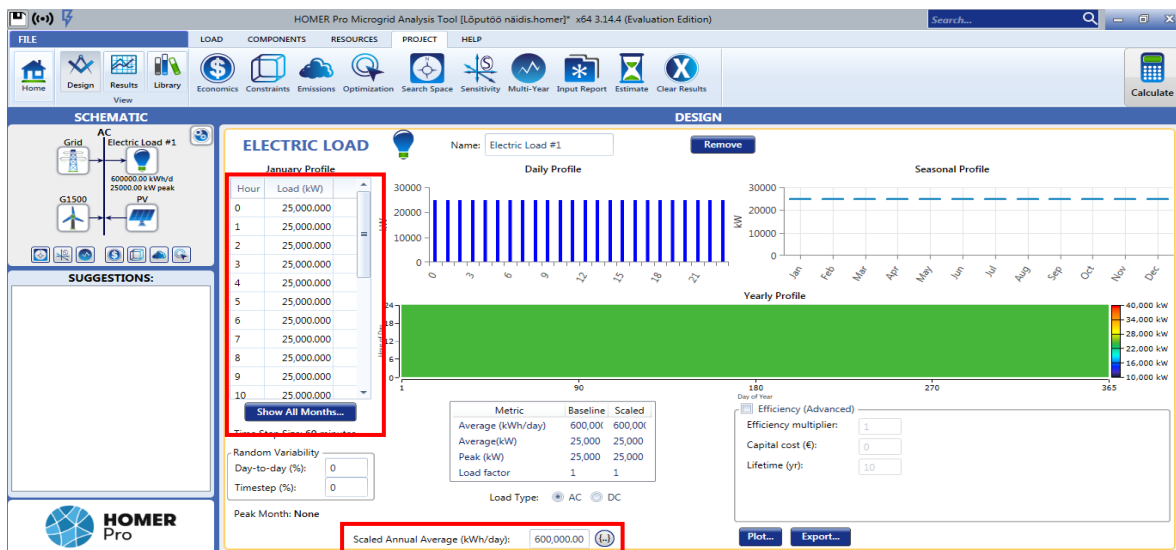


Joonis 4.31 HomerPRO praktilise ülesande skeem

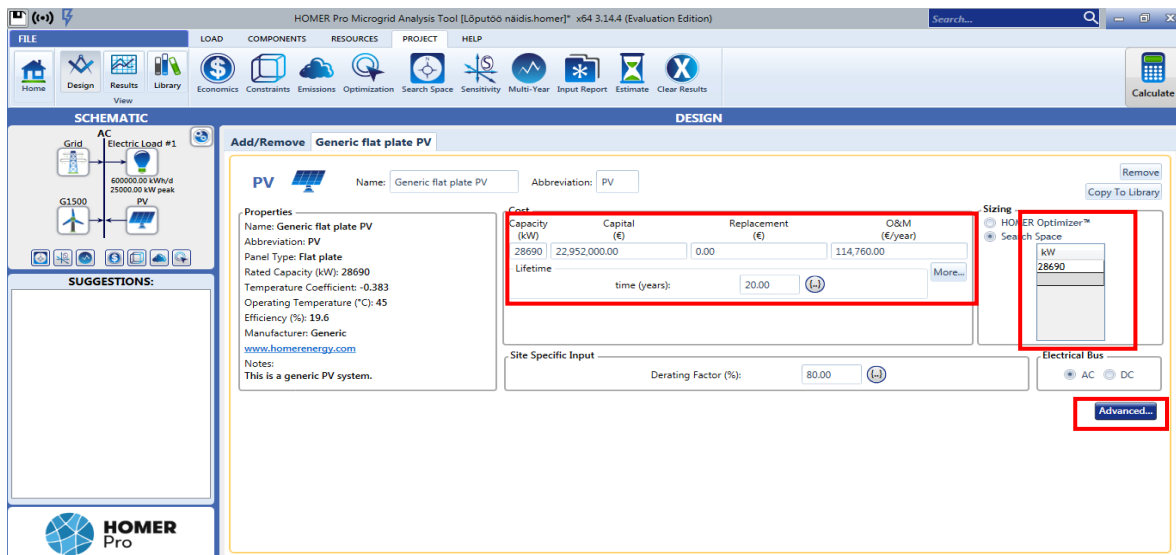
Skeemil olevale igale komponendile lisatakse, vastavalt kogutud lähteandmetele, tehnilised ja majanduslikud parameetrid. Joonistel 4.32, 4.33, 4.34 ja 4.35 on näidatud tehniliste ja majanduslike parameetrite samm-sammuline lisamine.



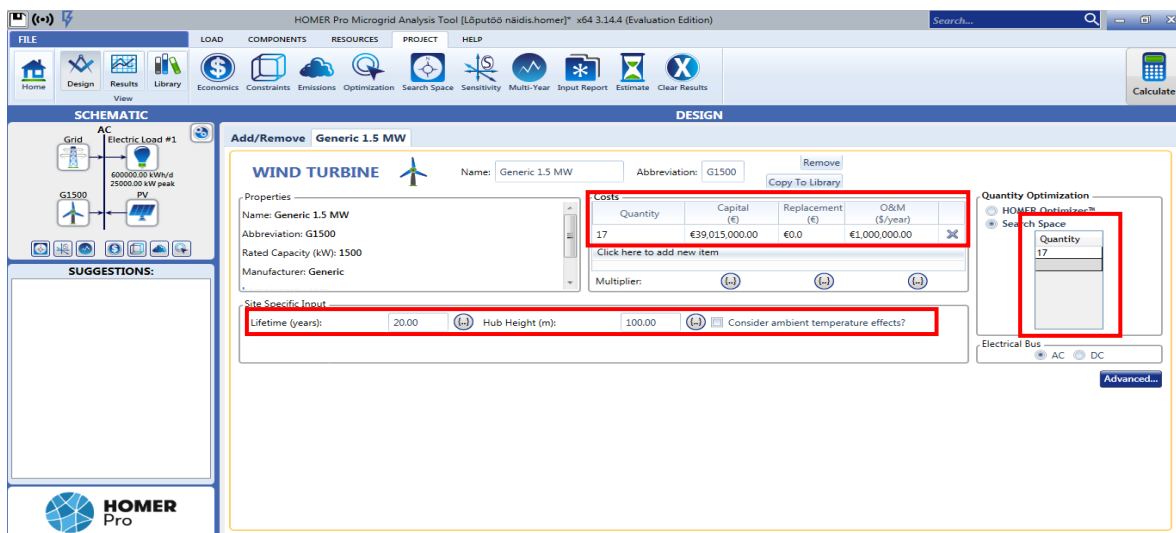
Joonis 4.32 Väliste elektrivõrgu majanduslike parameetrite lisamine



Joonis 4.33 Tarbija koormuse parameetrite lisamine



Joonis 4.34 Päikesepaneelide tehniliste ja majanduslike parameetrite lisamine



Joonis 4.35 Elektri tuulikute tehniliste ja majanduslike parameetrite lisamine

Peale mudeli koostamist teostatakse majanduslik kalkulatsioon. Saadud raportist otsitakse vastuseid järgnevatele küsimustele:

- Kui palju elektrienergiat toodeti tuulepargis ühe aasta jooksul?
- Kui palju elektrienergiat toodeti päikesepargis ühe aasta jooksul?
- Kui palju elektrienergiat tarbiti välisest elektrivõrgust ühe aasta jooksul?
- Millise päikesepaneeli kaldenurgaga saavutati kõige suurem aastane tootlikkus?
- Milline oli kõikide kalkulatsioonide tasandatud elektrienergia tootmiskulu?
- Kui palju elektrienergiat müüdi välisesse elektrivõrgust?

Tulemused esitada kodutöö aruandes tabelina ja lisada välisest elektrivõrgust elektrienergia ostmise ja müümise graafikud ning analüüsida tulemusi.

HomerPRO tarkvaraga teostatav praktiline ülesanne on ühtlasi ka viimane. Kõikide eelnevate ülesannete põhjal vormistatakse üks ühine aruanne, mis edastatakse õppejõule hindamiseks. Muutmaks esitatavata aruannet veelgi sisukamas võib kaaluda teoreetiliste küsimuste lisamist.

Näidisaruanne, *HomerPRO* tarkvaraga lahendatavast praktilisest kodutööst, on toodud antud magistritöö lisades, Lisa 1.

KOKKUVÕTE

Soov vähendada kasvuhuonegaase, tähendab fossiilsete kütuste põletamise lõpetamist, mis omakorda annab võimaluse taastuvenegial esile kerkida. Tuule- ja päikeseenergeetika on viimase kümne aastaga teinud märkimisväärse arengu jõudes pöördepunkti, kus suudetakse konkureerida fossiilsetel kütustel põhineva elektrienergia tootmise tehnoloogiatega. Millest saab järeldada, et tulevastel aastatel on maailmas oodata veel suuremat tuule- ja päikeseenergia juurdekasvu. Seega oskus hinnata, analüüsida, mõista, kirjeldada ning planeerida, elektrituulikute ja päikesepaneelide tootlikkust, karakteristikuid, spetsifikatsioone ja probleeme, on muutumas järjest tähtsamaks.

Käesoleva töö raames tutvuti alustuseks õppeaine tuule- ja päikeseenergeetika õpiväljunditega. Õpiväljundite selgitamise eesmärk oli mõista, milliseid teadmisi ja oskusi soovitakse õppeaine jooksul üliõpilastele selgeks teha. Seejärel uuriti elektrituulikute ja päikesepaneelide ehitust, põhilisi koostiskomponente ning elektrienergia tootlikkust mõjutavaid tegureid. Järgnevalt viidi kurssi, õppeaine praktiliste ülesannete lahendamisel, kasutatavate modelleerimistarkvaradega. Tarkvarade võrdlustabeli ja analüüsi koostamise järel selgus, et õppeaine jooksul lahendatavate praktiliste ülesannete sisu on kõige rohkem kallutatud tuuleenergeetikale ja kõige vähem soovitakse leida vastuseid elektrotehnika alastele küsimustele. Funktsionaalsuste poolest on kõige võimekam tarkvara *DIgSILENT Power Factory*, millele järgnes *WindPRO* ning kõige vähem funktsionaalsusi oli *HomerPRO* tarkvaral. Lisaks selgus, et *WindPRO* tarkvaraga ei ole võimalik lahendada päikeseenergeetikaga seotud probleeme ja sarnaselt ei ole võimeline *HomerPRO* tarkvara kindlaks tegema elektrisüsteemi talitlust iseloomustavaid seisundiparameetreid.

Magistritöö eesmärgiks oli välja töötada juhendmaterjal õppeaine tuule- ja päikeseenergeetika koduste tööde läbiviimiseks. Õpiväljunditest selgus, et õppeaine keskendub analüüsivale tegevusele. Analüüsioskuse harjutamiseks on sobilike kasutada võrdleva tabeli või mõistekaardi koostamist, juhtumianalüüsi või probleemiõpet. Sellest tulenevalt valiti kodutööde läbiviimise meetodiks juhtumianalüüs. Juhtumianalüüsi puhul on tegu konkreetse probleemi kirjeldusega, mida üliõpilased peavad analüüsima ning leidma sobiva lahendus- ja tegevusstrateegia. Peale meetodika valiku tegemist, määrati tarkvarade kasutamise järjekord. Järjekorra määramisel lähtuti tarkvarade funktsionaalsustest ja võimekustest. Kodutööde lahenduskäiku alustatakse *WindPRO* praktilise ülesande teostamisega. Põhjuseks on päikeseenergeetikaga seotud funktsionaalsuse puudumine, mis annab üliõpilase võimaluse keskenduda ühele tehnoloogiale korruga. Teine, kodutöö praktiline ülesanne, teostatakse *DIgSILENT*

Power Factory tarkvaraga. Valikut põhjendatakse tuuleenergeetikaga seotud funktsionaalsuste vähene võimekus, mis annab järjekordselt üliõpilasele võimaluse keskenduda ühele tehnoloogiale korraga. Viimasena teostatakse, kodutöö praktiline ülesanne, *HomerPRO* tarkvaraga. Põhjuseks on üleüldine madal funktsionaalsuste võimekus, mis omakorda nõuab head arusaama tuule- ja päikeseenergeetikast, saavutamaks usaldusväärseid simulatsioon tulemusi.

Lõputöö tulemusena valmisid kolm kodutöö praktilist ülesannet, millest igal on oma eesmärk ja mis üheskoos moodustavad struktuurse terviku. *WindPRO* tarkvaraga teostatav harjutuse sisu koosneb tuulepargi mudeli koostamisest, elektrituulikute topoloogia ja tüübi määramisest, tootlikkuse simulatsioonist ja majanduslikust analüüsist. *DIgSILENT Power Factory* tarkvaraga teostatav harjutuse sisu koosneb päikesepaneeli valiku tegemisest, päikesepaneeli töötemperatuurist põhjustatud elektrienergia tootlikkuse muutuse arvutamisest, päikesepargi paigutus topoloogia määramisest, mudeli koostamisest, päikesepaneeli optimaalse kaldenurga määramisest vastavalt asukoha spetsiifikale, simulatsiooni teostamisest, tulemuste analüüsimisest ja tulemuste võrdlemisest. *HomerPRO* tarkvaraga teostatav harjutuse sisu koosneb mudeli koostamisest, tehniliste ja majanduslike andmete sisestamisest ning tarkvara poolt väljastatud tulemuste analüüsimisest.

Töö jätkamiseks on soovituslik uurida päikesepeakide modellerimiseks mõeldud tarkvarasid. Hinnata nende võimekust ja sobivust õppeainega ning asendada mõne varajasemalt kasutatud tarkvara vastu. Samuti on soovituslik suurendada praktiliste ülesannete lahendamisel elektrotehniliste küsimuste osakaalu.

SUMMARY

The willingness to reduce greenhouse gases involves ending the burning of fossil fuels, which in turn provides an opportunity for renewable energy to emerge. Over the last ten years, wind and solar energy have made significant progress, reaching a turning point where technology can compete with fossil fuel-based electricity generation. From which it can be concluded that the amount of wind and solar parks, in the World will continue to increase. The ability to evaluate productivity, analyze characteristics, understand specifications, describe problems, of wind turbines and solar panels is becoming increasingly important.

To begin with, the study was acquainted with the learning outcomes of Wind and Solar Power Engineering subject. The aim of explaining the learning outcomes was to understand what knowledge and skills students should obtain during the subject. The construction of wind turbines and solar panels, the main components and the factors influencing electricity productivity were then studied. Alongside the modeling software, used for solving practical tasks of the subject, were examined. After compiling the software comparison table and analysis it became clear that the content of the practical tasks to be solved during the course is most tilted to wind energy and the least desired is to find answers to questions about electrical engineering. In terms of functionality, *DIgSILENT Power Factory* is the most capable software, followed by *WindPRO*, and *HomerPRO* software had the least functionality. In addition, it was found that the *WindPRO* software cannot solve the problems related to solar energy and, similarly, the *HomerPRO* software is not able to determine the state parameters characterizing the performance of the electrical system.

The aim of the master's thesis was to develop study material for conducting homework in Wind and Solar Power Engineering. The learning outcomes showed that the subject focuses on analytical activities. To practice analytical skills, it is appropriate to use the creation of a comparative table or concept map, case studies or problem-based learning. Consequently, case study was chosen as the method of doing homework. A case study is a description of a specific problem that students need to analyze and find a suitable solution and action strategy. After choosing the methodology, the order of using the software was determined. The order was determined based on the functionalities and capabilities of the software. The homework solution process begins with the practical task of *WindPRO*. This is due to the lack of functionality related to solar energy, which allows the student to focus on one technology at a time. The second, practical task of homework, is performed with *DIgSILENT Power Factory* software. The choice is justified

by the lack of capabilities related to wind energy, which once again gives the student the opportunity to focus on one technology at a time. Finally, homework is done with *HomerPRO* software. This is due to the overall low capacity capability, which in turn requires a good understanding of wind and solar energy to achieve reliable simulation results.

As a result of the thesis, three homework assignments were completed, each with its own goal and which together form a structural whole. The content of the exercise with *WindPRO* software consists of wind farm modeling, wind turbine topology and type determination, productivity simulation and economic analysis. The content of the exercise with *DIgSILENT Power Factory* software consists of selecting the solar panel, calculating the change in electricity productivity due to the solar panel operating temperature, determining the topology of the solar park layout, modeling, determining the optimal tilt angle of the solar panel according to location, simulation and analysis. The content of the exercise with *HomerPRO* software consists of building a model, entering technical and economic data, and analyzing the results provided by the software.

To continue the work, it is recommended to study the software for modeling solar parks. Evaluate their ability and suitability for the subject and replace them with some previously used software. It is also recommended to increase the share of electrotechnical issues in solving practical tasks.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Share of global carbon dioxide emissions from fossil fuels of 2020, by economic sector,” Statista Inc., [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.statista.com/statistics/1129656/global-share-of-co2-emissions-from-fossil-fuel-and-cement/>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [2] „Energy-related carbon dioxide emissions worldwide from 1975 to 2020,” Statista Inc., [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.statista.com/statistics/526002/energy-related-carbon-dioxide-emissions-worldwide/>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [3] „Renewable Power Generation Costs in 2019,” International Renewable Energy Agency, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. [Kasutatud 30 aprill 2021].
- [4] H. E. Murdock, D. Gibb, T. Andre ja A. Swenson, „REN21's Renewables 2020 Global Status Report,” REN21 Secretariat, 1 Detsember 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf. [Kasutatud 10 Jaanuar 2021].
- [5] „Eesti Elektrisüsteemi Varustuskindluse Aruanne 2020,” Elering AS, Tallinn, 2020.
- [6] M. Annus, A. Lokk ja T. Heinaste, „TAASTUVENERGIA AASTARAAMAT 2019,” Eesti Taastuvenergia Koda, Tallinn, 2020.
- [7] „Liivi lahe meretuulepark,” Eesti Energia, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://liivimeretuulepark.ee/>. [Kasutatud 5 mai 2021].
- [8] S. Liiva, „Enneolमतult suured plaanid: Utilitas tahab rajada Läänemerre kuus võimast meretuuleparki,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://arileht.delfi.ee/artikkel/89896013/enneolematult-suured-plaanid-utilitas-tahab-rajada-laanemerre-kuus-voimast-meretuuleparki>. [Kasutatud 2 mai 2021].
- [9] M. Karm, „Õppemeetodid kõrgkoolis,” Sihtasutus Archimedes, Tartu, 2013.
- [10] „Tuule- ja päikeseenergeetika ainekaart,” Tallinna Tehnikaülikool, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://ois2.ttu.ee/uusois/aine/EES5130>. [Kasutatud 2 Aprill 2021].

- [11] „Kyoto protokoll,“ Keskkonnaministeerium, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.envir.ee/et/kyoto-protokoll>. [Kasutatud 17 Veebruar 2021].
- [12] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [13] I. Secretariat, „RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES,“ International Renewable Energy Agency, Bonn, 2021.
- [14] „Cypress Onshore Wind Turbine Platform,“ General Electric Renewable Energy, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/cypress-platform>. [Kasutatud 8 Märts 2021].
- [15] „News release from Vestas Wind Systems A/S,“ Vestas Wind Systems A/S, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.vestas.com/en/media/company-news?n=3886820#!>. [Kasutatud 9 märts 2021].
- [16] J. Manwell, J. McGowan ja A. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application - 2nd ed.*, Massachusetts: John Wiley and Sons, Ltd, 2009.
- [17] U. Zafar, „Literature Review of Wind Turbines,“ Chair of Geotechnical Engineering Bauhaus Universität, Weimar, 2018.
- [18] „Meteoblue,“ Meteoblue AG, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/windrose/paldiski_estonia_589663?daterange=2021-03-20%20-%202021-03-27&domain=NEMSAUTO¶ms=wind%2Bdir80m&windRoseDegreeResolution=22.5&windRoseValueResolution=1&velocityunit=METER_PER_SECOND. [Kasutatud 5 Märts 2021].
- [19] C. J. Chen, *Physics of Solar Energy*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [20] „Primary energy consumption worldwide from 2000 to 2019,“ Statista, Juuni 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.statista.com/statistics/265598/consumption-of-primary-energy-worldwide/>. [Kasutatud 13 Märts 2021].
- [21] J. Svarc, „Clean Energy Reviews,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>. [Kasutatud 20 Märts 2021].
- [22] M. Tukiainen, „GAISMA,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gaisma.com/en/location/tallinn.html>. [Kasutatud 3 Aprill 2021].
- [23] H. Tooming, V. Russak ja K. Ain, *Eesti Kiirguskliima Teatmik*, Tallinn: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, 2003.

- [24] „Global Solar Atlas,” Solargis s.r.o, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://globalsolaratlas.info/map?c=58.612625,24.993896,8&r=EST>. [Kasutatud 25 Märts 2021].
- [25] A. L. Bonkaney, S. Madougou ja R. Adamou, „Ambient Temperature and Relative Humidity Impacts on a Photovoltaic Module under Niamey Climatic Conditions,” Oktoober 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.researchgate.net/publication/328743854_Ambient_Temperature_and_Relative_Humidity_Impacts_on_a_Photovoltaic_Module_under_Niamey_Climatic_Conditions/citation/download. [Kasutatud 14 märts 2021].
- [26] „A Guid To Photovoltaic Panels,” ITACA, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.itacanet.org/a-guide-to-photovoltaic-panels/photovoltaic-pv-cells/>. [Kasutatud 25 Märts 2021].
- [27] P. Pinson, H. Nielsen, J. Moller, H. Madsen ja G. Kariniotakis, „Non-parametric probabilistic forecasts of wind power: required properties and evaluation,” John Wiley&Sons, Ltd, Lyngby, 2007.
- [28] P. Pinson, C. Chevallier ja G. Kariniotakis, „Trading Wind Generation From Short-Term Probabilistic Forecasts of Wind Power,” Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2007.
- [29] „WindPRO,” EMD International A/S, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.emd.dk/windpro/>. [Kasutatud 2 aprill 2021].
- [30] P. Nielsen, WindPro 2.7 User Guide edition 3, Aalborg: EMD International A/S, 2010.
- [31] „DIgSILENT POWER SYSTEM SOLUTIONS,” DIgSILENT GmbH, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>. [Kasutatud 12 veebruar 2021].
- [32] DIgSILENT Power Factory 2019 User Manual, Gomarigen, Sakamaa: DIgSILENT GmbH, 2018.
- [33] „The Power of HOMER,” HOMER Energy by U, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.homerenergy.com/company/index.html>. [Kasutatud 21 märts 2021].
- [34] „HOMER Pro 3.14 User Manual,” HOMER Energy by UL, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>. [Kasutatud 22 märts 2021].
- [35] V. Astapov, *WindPRO 3.4 tarkvara juhend*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2021.

- [36] T. Hoffmann, „SunCalc,” [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://www.suncalc.org/#/59.51,26.59,15/2021.04.22/13:13/1/0>. [Kasutatud
22 Aprill 2021].
- [37] V. Astapov, „Quasi-Dynamic Simulations Exercise,” Tallinna Tehnikaülikool,
Tallinn, 2021.
- [38] S. Mishar, „Energy system modelling using HOMER,” Tallinna Tehnikaülikool,
Tallinn, 2021.

LISAD