



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Väiketuulikute tasuvuse arvutamine
(vajalike tuuletingimuste ja
omatarbena kasutatud elektrienergia
leidmine)

Kõrgepingetehnika õppetool

Elektroenergeetika õppesuund

Magistritöö

Õppetooli juhataja

prof Ivo Palu

Juhendaja

doktorant Lauri Ulm

Lõpetaja

Kristina Aprelkova

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Kristina Aprelkova	<i>Lõputöö liik:</i> magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> VÄIKETUULIKUTE TASUVUSE ARVUTAMINE (VAJALIKE TUULETINGIMUSTE JA OMATARBENA KASUTATUD ELEKTRIENERGIA LEIDMINE)	
<i>Kuupäev:</i> 27.05.2016	66 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnika Ülikool	
<i>Teaduskond:</i> Energeetika	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika	
<i>Õppetool:</i> Kõrgepingetehnika	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Lauri Ulm	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Lõputöö eesmärk oli leida sellist, keskmise tuulekiiruse ja omatarbimise osakaalu, mille juures väiketuuliku püstitamise on tasuv – arvutada tasuvust. Teostati selline mudel, mis võttis arvesse kõik tähtsad mõjurid: turbulents, puhangud, omatarbimise osakaal, tuuliku torni kõrguse mõju, tootlikus, hooldustööd ja esialgne investeering. Tekkis selline mudel mida saab usaldada. Antud töös on valitud neli tasuvuse hindamise meetodit: NPV; T, PI ja IRR. Modelleerimise tulemus näitab, et väiketuuliku tasuvust on võimalik saavutada siis, kui esialgse investeeringu toetus on 70%. Lisaks sellele on tähtis keskmine tuulekiirus ja tarbija omatarbimise osakaal. Tuulekiiruse ja tarbija omatarbimise osakaalu vahel on seos. Väiketuuliku tasuvuseks võib tarbija minimaalne omatarbimise osakaal olla 25%, minimaalne keskmine tuulekiirus aga peab olema 9,5 m/s.	
<i>Märksõnad:</i> Väiketuulik, võimsuskõver, omatarbimise osakaal, tuulekiirus.	

Summary of the Thesis

<i>Author:</i> Kristina Aprelkova	<i>Kind of the work:</i> master thesis
<i>Title:</i> SMALL WIND TURBINE PROFITABILITY ANALYSIS (NECESSARY WIND CONDITIONS AND SHARE OF SELF-SUPPLY ELECTRICITY FINDING).	
<i>Date:</i> 27.05.2016	66 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Power engineering <i>Department:</i> Electrical power engineering <i>Chair:</i> High-voltage engineering	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Lauri Ulm <i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> The aim of this Master thesis was to find the parameters of the annual average wind speed and the share of self-supply, when small wind turbine installations are profitable – to calculate profitability. The calculation results largely depend on which variables are considered. When all the necessary facts are defined, then it is necessary to find suitable and accurate method of profitability. Method should be reliable. There are four chosen methods: NPV, T, PI and IRR. The results of modelling shows that small wind turbine profitability is reached only when the grant of primary investment is 70% and the small wind turbine works correctly in normal conditions. In addition to this, annual average wind speed and the share of self-supply are important parameters. There is a link between wind speed and the share of self-supply. For a profitable small wind turbine the minimal share of self-supply may be 25%, but minimal wind speed should be 9,5 m/s. The minimum wind speed may be 6,5 m/s, but the share of self-supply should be 95%.	
<i>Key words:</i> <i>Small wind turbine, power curve, the share of self-supply, annual wind speed.</i>	

Sisukord

Lõputöö kokkuvõte.....	3
Summary of the Thesis.....	4
Sisukord	5
Lõputöö laiendatud ülesanne	7
Teema põhjendus.....	7
Töö eesmärk	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:	8
Lähteandmed	8
Lõputöö konsultandid	9
Eessõna.....	10
1. Sissejuhatus.....	11
2. Tuuleenergia	12
2.1 Väiketuulikud	14
2.2 Väiketuuliku ühendus võrguga	16
2.3 Tuulikute tüübid.....	17
2.4 Tuulikute tööpõhimõtte	20
2.5 Väiketuulikute tehnoloogiad.....	23
2.6 Väiketuulikute töökindlus.....	24
2.7 Väiketuulikud Eestis	25
3. Modelleerimiseks vajalikud andmed.....	27
3.1 Turbulentsi mõju väiketuuliku võimsuskõverale	29
3.2 Puhangute mõju väiketuuliku võimsuskõverale	34
3.3 Omatarbimise osakaal	36
3.4 Tuuliku torni kõrguse mõju tootlikkusele	40
3.5 Väiketuuliku tootlikus	43
3.6 Hind.....	46
3.7 Investeeringud.....	48
3.8 Hoolduskulud.....	49
4. Tuuliku tasuvuse arvutuse meetodika	50
4.1 Nüüdisväärtuse meetod NPV	50
4.2 Lihtne tasuvusaja meetod T	51
4.3 Tulu sisenorm IRR	52
4.4 Kasumiindeks PI	52
5. Modelleerimine	54

6. Tulemused	57
7. Kokkuvõtte.....	62
Kirjandus.....	65



Lõputöö laiendatud ülesanne

Lõputöö teema: *Väiketuulikute tasuvuse arvutamine (vajalike tuuletingimuste ja omatarbena kasutatud elektrienergia leidmine)*

Üliõpilane, üliõpilaskood: Kristina Aprelkova, 132445

Lõputöö liik: *magistritöö*

Lõputöö juhendaja, õppetool: Lauri Ulm, *Kõrgepingetehnika õppetool*

Õppetooli juhataja: Ivo Palu

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: *kehtivusaja annab juhendaja*

Lõputöö esitamise tähtaeg: 27.05.2016

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus

Kirjuta siia miks on vaja seda teemat uurida? Miks ja kelle jaoks on see teema oluline? Selgita probleemi tausta, aktuaalsust ja olulisust. Määratle omapoolne panus ehk mida sinu töö lisaks teadaolevale annab?

Alates 2013. aastast ei ole elektri hind enam riiklikult reguleeritav, kuna turule tulid uued elektrimüüjad. Praeguse hetkega on turul 12 elektrimüüjat. Taastuvenergia lahendused on välja töötatud ja muutunud taskukohaseks kodutarbijatele. Tarbijate investeerimisvõime on tõusnud. Tekkinud on soov kindlustada ennast elektri hinna tõusu vastu, tootes osa vajalikust elektrist ise. Lisaks on taastuvenergia lahenduste kasutuselevõttu toetatud ka investeeringutoetustega. Üks nendest lahendusest on väiketuuliku paigaldamine. Väiketuulik, mis toodab mitte rohkem kui 11kW, sobib eramajadele. See on kallis ja pikaajaline investeering, mistõttu on enne ehitamist vaja teha põhjalik tasuvuse analüüs. Tuuliku majanduslik tasuvus sõltub paljudest faktoritest. Sellepärast tasub planeerimisel teada, kui tähtsad need faktorid on ja kuidas nad saavad mõjutada väiketuuliku tasuvust. Tähtis teha enne tuuliku püstitamist tasuvuse arvutust. Kalkuleerimiseks võib kasutada järgmisi

meetoditeid: NPV, IRR, Diskonteeritud tasuvus ja Lihttasuvus. Tähtis on teada, millised andmed aluseks võetakse, kui detailselt analüüsitakse ja kui suurt toodangut tuulik valitud asukohas välja annab.

Firmad Bakeri ja my!WIND pakkuvad konsultatsioone ja analüüsi tegemist.

Antud töö peab andma head ülevaadet tuuliku töötamist mõjutavatest faktoritest ja väiketuuliku tasuvuse arvutuse meetodist, mida saab rakendada väiketuuliku püstitamisel.

Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida (üks konkreetne küsimus, millele sa vastust otsid ning mille raames lahendatavad alam-küsimused on loetletud punktis 3)

Töö eesmärgiks on uurida mis tingimused peaks olema vajalikud, et tuuliku paigaldamine oleks tasuv.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Loetle 3-4 konkreetset uurimisülesannet, mille abil kavatsed töö eesmärgi saavutada või püstitatud küsimusele vastuse anda.

Turbulentsi ja puhangute mõju võimsuskõverale

Millised on väiketuuliku kulud?

Milline on väiketuuliku toodang erinevatel tuuleoludel?

Milline on omatarbena tarbitud elektrienergia osakaal?

Kui suur on väiketuulikust saadav tulu või kulude kokkuvõide?

Lähteandmed

Milliseid andmeid plaanid kasutada püstitatud eesmärkide lahendamiseks? Kus kohast või kelle käest saad andmed?

Investeeringu maksumuse, hoolduskulude jaoks on vaja firmast saada hinnapakkumist. Elektri hinna moodustamist uurida ja arvutada. Mõju võimsusgraafikutele uurida exceli abil. Väiketuuliku toodang tuleb arvutada kasutades võimsusgraafikut ja Weibulli jaotuskõverat kirjeldatud IEC 16400-12-1 standardis. Omatarbena kasutatud elektrienergia osakaalu arvutada kasutades EMHI aasta andmed ja iga kuu tüüpkoormusgraafikute keskmise tarbimise tunnid.

Lõputöö konsultandid

Vajadusel konsultantide nimed ja töö osad, mille juures abi saadakse.

Lõputöö juhendaja ja konsultant – Lauri Ulm. Töö osad, mille juures abi saadakse on – mudeli loomine.

Eessõna

Antud magistritöö teema on pakutud doktorant Lauri Ulm poolt. Ajendas autorit antud teemaga tegelema isiklik huvi.

Autor tänab doktorandi Lauri Ulm, kes aitas liikuda selle töö koostamisel õiges suunas ja aitas väärtuslike soovitustega. Samuti suur tänu tahaks öelda Inkeri Poogen, kes kontrollis grammatikat.

1. Sissejuhatus

Alates 2013. aastast ei ole elektri hind enam riiklikult reguleeritav, kuna elektriturg avanes. Praeguse hetkega on turul 12 elektrimüüjat. Mõnede tarbijate investeerimisvõime on tõusnud. Tekkinud on soov kindlustada ennast elektrihinna tõusu vastu, tootes osa vajalikust elektrist ise. Taastuenergia lahendused on välja töötatud ja muutunud taskukohaseks kodutarbijatele. Lisaks on taastuenergia lahenduste kasutuselevõttu toetatud ka investeringutoetustega. Üks nendest lahendusest on väiketuuliku paigaldamine. Eestis veel ei ole väiketuulikud eramute juures nii levinud, kuid huvi kasvab. Väiketuulik, mis toodab mitte rohkem kui 11kW, sobib eramajadele. See on kallis ja pikaajaline investering, mistõttu on enne ehitamist mõistlik teha põhjalik tasuvuse analüüs. Tuuliku majanduslik tasuvus sõltub paljudest faktoritest. Sellepärast tasub planeerimisel teada, kui tähtsad need faktorid on ja kuidas nad saavad mõjutada väiketuuliku tasuvust. Kalkuleerimiseks võib kasutada järgmisi meetodeid: NPV, IRR, Tulu sisenorm ja Kasumiindeks. Tähtis on teada, millised andmed aluseks võetakse, kui detailselt analüüsitakse ja kui suurt toodangut tuulik valitud asukohas välja annab.

Firmad Bakeri ja my!WIND pakuvad konsultatsioone ja analüüsi tegemist.

Antud töö on üles ehitatud kolmes etapis. Esimeses peatükis tutvustatakse tuuleenergia olemust ja väiketuuliku tööpõhimõtteid. Teises peatükis analüüsitakse tuuliku töötamist mõjutavaid faktoreid ja prognoositakse tuuliku toodangut. Kolmandas peatükis tuuakse välja erinevaid meetodikaid, mille abil on võimalik arvutada tuuliku tasuvust. Töö järgmises peatükis simuleeritakse erinevad olukordi, vastavalt aasta keskmisele tuule kiirusele ja tarbija omatarbimise osakaalu järgi.

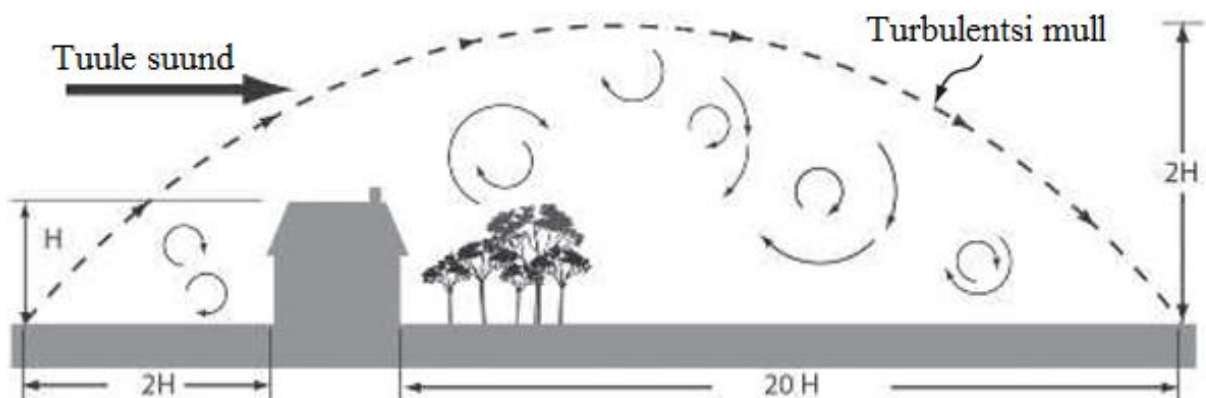
Antud töö peab andma head ülevaadet tuuliku töötamist mõjuvatest faktoritest ja väiketuuliku tasuvuse arvutuse meetodist, mida saab rakendada väiketuuliku püstitamisel.

2. Tuuleenergia

Tuul on õhumasside horisontaalne liikumine maapinna suhtes. Tuuled tekivad õhurõhu erinevuste tõttu. Rõhkude erinevust põhjustab ebaühtlane soojenemine, kõrgus, temperatuur ja koha laiuskraad. Külüm õhk, moodustades kõrge rõhuga ala, liigub madalama õhurõhuga ala poole. Päike soojendab kõige rohkem ekvaatori pinda ja kõige vähem pooluseid. Soe õhk hakkab liikuma ekvaatorist, kas põhja või lõuna poole. Tekivad erinevad tuule suunad ja kiirused. Meretuul tekib tavaliselt päeval, kuna päeval mere ääres olev pind soojeneb kiiremini kui meri ja soe õhk liigub mere poole. Maatuul tekib tavaliselt öösel, kuna vesi jahtub aeglasemalt kui maa [1].

Nagu enamik teisi energiaallikaid, mida praegu kasutatakse: kivisüsi, nafta ja maagaas, on tuul päikese soojuse toode – päikeseenergia. Maakera territooriumite peal moodustuvad püsi- ja muutuv tuule süsteemid – õhuvoolud [1].

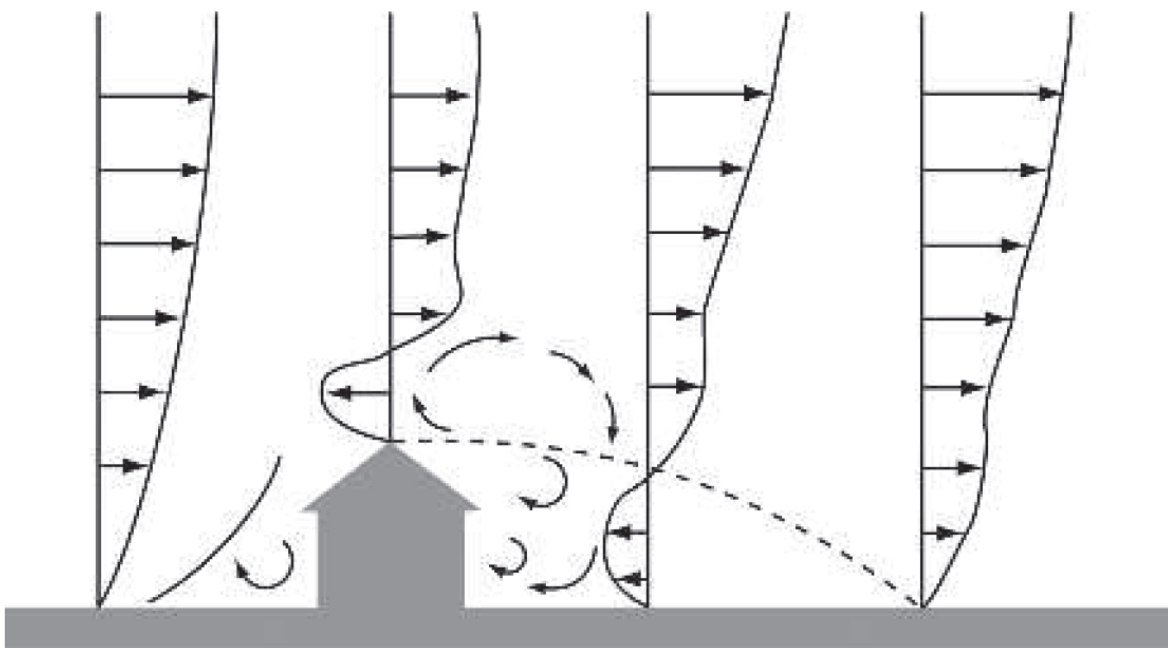
Tuul on alati turbulentne. See tähendab, et õhuvoolu üksikud kihid liiguvad mitte paralleelselt maapinnaga. Õhus tekivad ebakorrapärased tuulekeerised ja erineva suurusega õhujoad. Tuul on eriti turbulentne atmosfääri alamkihis, kus tuule kiirus kiiresti kasvab kõrgusega. Turbulents võib olla kas termiline või dünaamiline. Dünaamiline turbulents tekib takistuste tõttu, termiline turbulents tekib ebaühtlase soojenemise tõttu. Joonisel (Joonis 2.1) on näidatud turbulentsi nähtus. Kõik takistused moodustavad tsooni, kus tuul on turbulentne. Takistused katkestavad tuule laminaarvoolamist ja põhjustavad keerutust. Selle tsooni kõrgus on kaks korda suurem takistuse kõrgusest ja tsooni laius on kakskümmend korda laiem takistuse kõrgusest. Selle tsooni tuul on tavaliselt vertikaalne. [1].



Joonis 2.1 Turbulentsi nähtus [1]

Turbulents mõjutab kõikide tuuleturbiinide töötamist. Turbulentne tuul rikub eriti kergeid ja lühikese mastidega tuuleturbiine. Turbulentse tuule korral, tuuleturbiin kas seiskab või käivitub korduvalt. Takistus vähendab tuuleturbiiniga toodetud elektrienergia kogust. Turbulentse tuule mõju võib vähendada suurendades tuuliku masti kõrgust [1].

Joonis (Joonis 2.2) iseloomustab turbulentsi intensiivsuse sõltuvust kõrgusest. Mida kõrgem, seda väiksem on turbulentsi intensiivsus ja seda suurem on tuule kiirus. Noole pikkus iseloomustab tuule kiiruse suurust. Joonisest on nähtav, et kõige suurem turbulentsuse intensiivsus on maja kõrgusel [1].



Joonis 2.2 Turbulentsi intensiivsuse sõltuvus kõrgusest [1]

Päikeseenergia mõjutab ka õhu tihedust. Mida madalam on õhutemperatuur, seda suurem on õhu tihedus ja tuule kiirus. Tavaliselt toodavad elektrituulikud talvel rohkem elektrienergiat kui suvel [1].

Tuuleenergia on üks kõige kiiremini kasvav elektrienergia allikatest. Tuulikud on kiirelt arenenud viimaste 20 aastate jooksul. Tuuleturbiinide võimsus on kasvanud. Tuuleenergia areng eeldatavasti jätkub elektrienergia kulude vähendamise suunas. Uute ja innovatiivsete rootorite, juhtimis süsteemide ja mastide arendamine eeldab jätkuvat efektiivsuse paranemist tuule tehnoloogias [2].

2.1 Väiketuulikud

Tuuleenergia kasvu põhjus on see, et taastuvenergia lahendused on välja töötatud ja muutunud taskukohaseks kodutarbijatele. Globaalselt ei ole siiani ühtset määratlust väiketuuliku kohta. Algselt oli väiketuulik määratletud tema omaduse järgi toota väikese koguse elektrit kodutarbija seadmete jaoks või katta osa kodu elektritarbimisest. Kuid see määratlus ei ole universaalne. Erinevates riikides on erinev majapidamistarbimine. Ameerika perekonnale on mõistlik püstitada 10 kW turbiiniga väiketuulikud, et katta oma täielikku tarbimist, kuid eurooplasele piisab 4 kW turbiinist ja hiina perele on vaja 1 kW turbiini. Erinevates riikides on väiketuuliku võimsuse piirid erinevad. Tabelites (Tabel 2.1, 2.2) on näidatud väiketuuliku klassifikatsioon erinevates riikides [2].

2012 aastal leppis Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon kokku, et väike elektrituuliku kõrgus ei tohi ületada 30 meetrit. Tiiviku pindala ja masti kõrgus omavad suuremat tähtsust kui tuuliku nimivõimsus. Tavaliselt eristatakse tuulikuid tehniliste andmete järgi, kuid need saab klassifitseerida järgmiselt:

- Ühendus
- Konstruktsioon
- Labade arv
- Labade materjal
- Sammusüsteem

Ühenduse järgi eristatakse on – grid ja off – grid tuulikuid. Kui tuulik on ühendatud elektrivõrguga ja toimub elektrienergia vahetus, siis seda tuulikut nimetatakse *on - grid*. Kui tuulik ei ole ühendatud elektrivõrguga, siis see on *off – grid*.

Konstruktsiooni järgi eristatakse horisontaalseid ja vertikaalseid tuulikuid. Enam levinud on horisontaal teljega tuulikud, nende efektiivsus on kõrgem. [3]

Tabel 2.1 Väike tuuliku klassifikatsioon [2]

	Osakond/ Assotsiatsioon	Turbiini klassifikatsioon	Nimivõimsus, kW	Märkused
USA	Ameerika Tuuleenergia Assotsiatsioon	Väike tuuleturbiin	< 100	Vastu võetud väiketuuliku aruandega 2010 ja Väike tuuleturbiini globaalse turu analüüsi abil

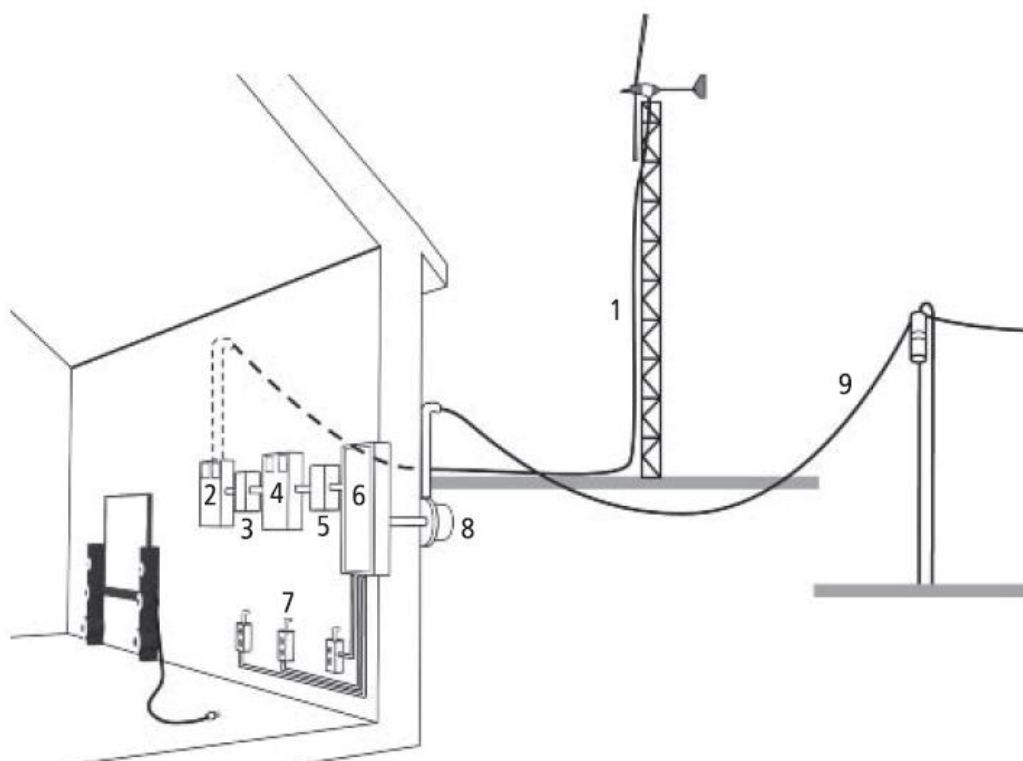
Tabel 2.2 Väike tuuliku klassifikatsioon [2]

	Osakond/ Assotsiatsioon	Turbiini klassifikatsioon	Nimivõimsus, kW	Märkused
Rahvusvaheline	Rahvusvaheline Elektrotehnika- komisjon	Väike Tuuleturbiin	≈ 50	IEC 61400 - 2 järgi väikese elektrituuliku tiivik peab olema vähem kui 200 m ² , võimsus peab olema orienteeruvalt 50 kW, pinge madalam 1000 V AC või 1500 V DC.
Kanada	Kanada Loodusressursid Kanada Tuuleenergia Assotsiatsioon	Mini tuuleturbiin	0,3 - 1	Marbek konsultandid kinnitasid väiketuuliku uuringu tulemuste põhjal
		Väike tuuleturbiin	1 - 30	
Hiina	Taastuv energia ja rahvusvaheline partnerlus	Väike tuuleturbiin	<100	Vastu võetud riigi poliitikaga, strateegiaga ja tegevuskava uuringuga Hiina väike tuuleenergiatööstuse arengu jaoks.
Saksama	Bundesverband tuuleenergia	Väike tuuleturbiin	< 75	Vastu võetud BWE - Marktübersicht spezial - Kleinwindaniagen
Suurbritannia	Suurbritannia Taastuenergia	Mikro tuuleturbiin	0 - 1,5	tuuliku kõrgus 0,5 - 5 m / kuni 1000 kWh aastane energia tootlikus
		Väike tuuleturbiin	1,5 - 15	tuuliku kõrgus 2 - 50 m / kuni 50000 kWh aastane energia tootlikus
		Väike - keskmine tuuleturbiin	15 - 100	tuuliku kõrgus 50 - 250 m / 200000 kWh aastane energia tootlikus
	Mikrotootmise sertifitseerimise süsteem	Mikro ja väike tuule turbiin	< 50	Tuuleturbiinid nimimahtuvusega alla 50 kW kuuluvad soodustariifiga programmi alla

2.2 Väiketuuliku ühendus võrguga

Tuuleenergia süsteem kuulub kahte peamisesse kategooriasse: on – grid elektrivõrku ühendatud; off – grid elektrivõrku ühendamata.

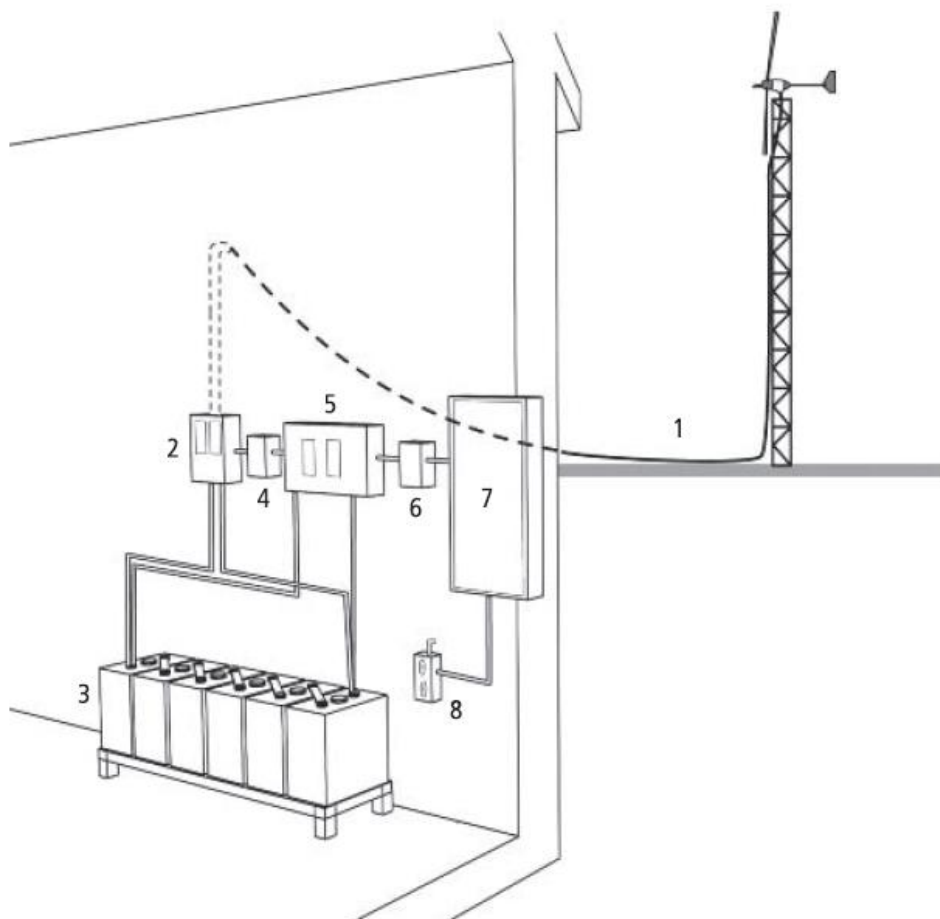
On – grid süsteemi ühendus tähendab, et süsteem on ühendatud otse elektrivõrku. Kui tuule süsteem ei ole aktiivne ja tarbimine on suurem kui tootmine, siis elektrivõrk varustab osaliselt või täielikult elektriga tarbijat. Elektrienergia sellisel ühendusel ei salvestu. Ülejäänud elektrienergia on võimalik müüa elektrivõrku. Joonis (Joonis 2.3) iseloomustab on – grid ühendust [1].



- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Alalisvoolu ülekandmine tuuleturbiinist majja | 6. Elektrikilp |
| 2. Vahelduvvoolu juhtpaneel | 7. Elektrilised väljundavad |
| 3. Vahelduvvoolu lüliti | 8. Elektriarvesti |
| 4. Inverter | 9. Jaotusvõrk |
| 5. Alalisvoolu lüliti | |

Joonis 2.3 On – grid tuuliku ühendus elektrivõrguga [1]

Off – grid süsteem, millel ei ole otsest ühendust jaotusvõrguga. Kui tarbimine on väiksem kui tootmine, siis ülejäänud elekter salvestatakse akupanka. Sellist ühendust kasutatakse tavaliselt kombinatsioonis päikesepaneelidega. Kui tarbimine ületab elektri genereerimist, siis kasutatakse akupanka salvestatud elektrit. Joonis (Joonis 2.4) iseloomustab off – grid tuuliku ühendust tarbijaga [1].



- | | |
|--|-----------------------|
| 1. Alalisvoolu ülekandmine tuuleturbiinist tarbijale | 5. Inverter |
| 2. Kontroller | 6. Alalisvoolu lüliti |
| 3. Akupank | 7. Elektrikilp |
| 4. Vahelduvvoolu lüliti | 8. Alalisvool |

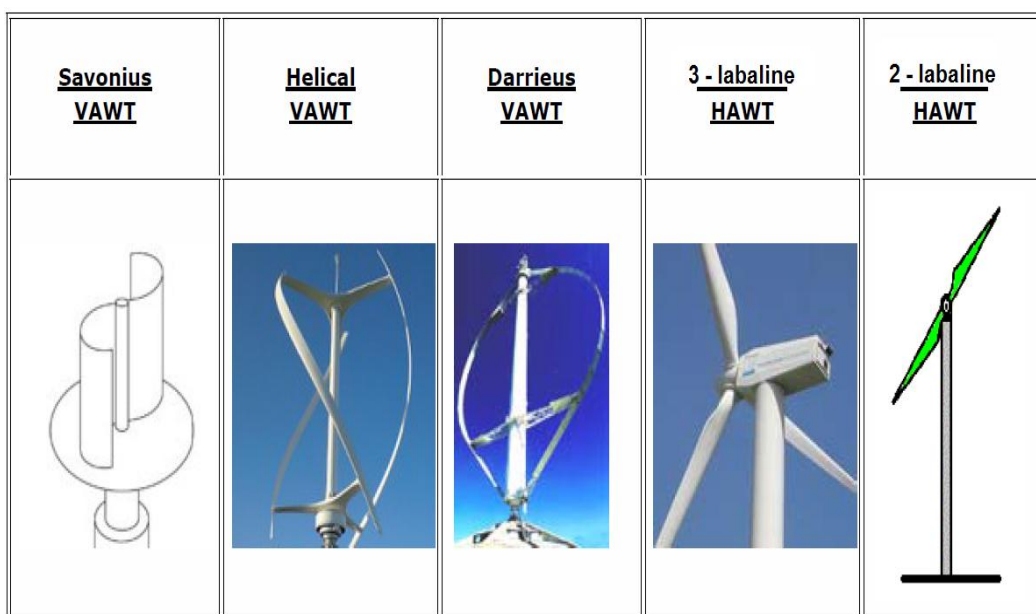
Joonis 2.4 Off – grid tuuliku ühendus tarbijaga [1]

2.3 Tuulikute tüübid

Tuulikute liigitamine sõltub aktiivse jõu tüübist, mis paneb turbiini pöörlema. Tuulikuid eristatakse ka telje järgi – horisontaalne või vertikaalne. Telg – völli, mille ümber pöörlevad

labad. Teatud turbiinide tüübid saavad töötada ainult koos horisontaalse teljega, samas teised võivad töötada nii horisontaalse kui ka vertikaalse teljega. Horisontaalse teljega turbiine nimetatakse HAWT - horisontaal-axis wind turbine ja vertikaalse teljega turbiine nimetatakse VAWT - vertical-axis wind turbine.

Tuul puhub enamasti horisontaalselt, sellepärast on horisontaalsed tuulikud HAWT tundlikud tuule suunale. Samas vertikaalsetel tuulikutel ei ole tähtsust, milline on tuule suund, kuna tal on võimalus püüda tuult. Vertikaalsete tuulikute eeliseks on see, et generaator ja käigukast ei pea olema masti tipus, mis lihtsustab paigaldamist ja hooldamist. Joonisel (Joonis 2.5) on näidatud erinevad tuulikute tüübid [5].



Joonis 2.5 Tuulikute tüübid [4]

Vertikaalse teljega tuulikuid saab omakorda jagada kolmeks: Savonius, Helical ja Darrieus. Darrieus-i turbiin on sarnane horisontaaltelje tuulikuga. Sellisel tuuliku tüübil on horisontaal telg ja tiiba mõjutab tuule tõstejõud. Erinevus on tiiviku kinnituses võlli külge. Darrieus-i turbiin on vispli kujuline. Tiivad ei ole kinnitatud võlli keskele, nad on kõverad ja jätkuvad. Mõlemad tiiva otsad on kinnitatud võlli külge. Tiibade vertikaalne liikumine võimaldab kinnitada tuuliku mitme kinnitustradi abil. Tänu sellele ei pea Darrieus-i võll olema nii jäik ja tugev nagu horisontaal teljega rootor. Darrieus-i tuuliku puudus on halb alg pöördemoment. See tähendab, et ta ei suuda alustada pööramist madala, 3,5 m/s, tuule kiiruse korral. Kuid vertikaalse teljega tuulik ei ole tundlik tuule suuna muutusele. Tänapäevani ei ole püstitatud Darrieus-i tuulikuid. Praktilisuse mõttes eelistatakse propellerturbiine [5, 6].

Savonius-i rootorit nimetati tema leiutaja – Sigurd J. Savonius järgi. Võrreldes eelmise tuuliku tüübiga, on tema konstruktsioon lihtne. Savonius-i rootor koosneb kahest poolsilindri osast, mis on kinnitatud võlli külge ja mille läbilõige on S tähe kujuline. Igal momendil püüab üks laba tuult, samal ajal kui teine liigub vastu tuult. Kui tiiva pöördemomendist lahutada teise tiiva takistava pöördemomendi, saab pöördemomendi. Lisades võllile rohkem poolsilindreid, suureneb tuuliku tootlikkus. Savonius rootori eelis on hea alg pöördemoment ja võimalus püüda väikeseid tuule kiiruseid [5, 6].

Horisontaal teljega tuulikuid kasutatakse peamiselt kommertseesmärkidel. HAWT tuuliku disain võib olla nii pealttuule kui ka allatuule jaoks. Efektiivsuse tähtis mõjur on torni kõrgus. Mida kõrgem on torn, seda suuremat tuule kiirust tuulik võib püüda. Torni suurenemisega kasvab müra, rootori diameeter ja väljundvõimsus. Pealttuule disainiga rootoril domineerib turul. Horisontaal teljega tuulikud on tavaliselt kas kahe või kolme labaga. Kahe labaga rootor on tihti allatuult disainiga. Sellise disainiga tuulik on odavam, aga vibratsioon on palju tugevam kui kolme labaga tuulikul. Kolme labaga tuulik töötab palju sujuvamalt ja on selletõttu vähem häiriv. Horisontaal teljega labad on disainitud sarnaselt lennuki tiiva kujuga. Tiiva pealt ja alt voolab võrdne hulk õhku. Tiiva peal olevad õhuosakesed liiguvad kiiremini, mistõttu tekib rõhu alanemine. Tiiva all olevad õhuosakesed liiguvad aeglaselt, mistõttu tekib rõhu suurenemine. Rõhkude erinevus moodustab tõstejõu, mis on suunatud ülesse ja paneb pöörlema tuuliku rootori. Kõrge tootlikus, täiustatud tõhusus ja kõrge torn on põhilised eelised seda tüüpi tuulikutel. Lindude surmamine, müra, raadio häired aga on põhilised puudused [5, 6]. Tabelil (Tabel 2.3,2.4) on toodud erinevate tuuliku tüüpide eelised ja puudused.

Tabel 2.2.1 Tuuliku tuubide eelised [4, 5]

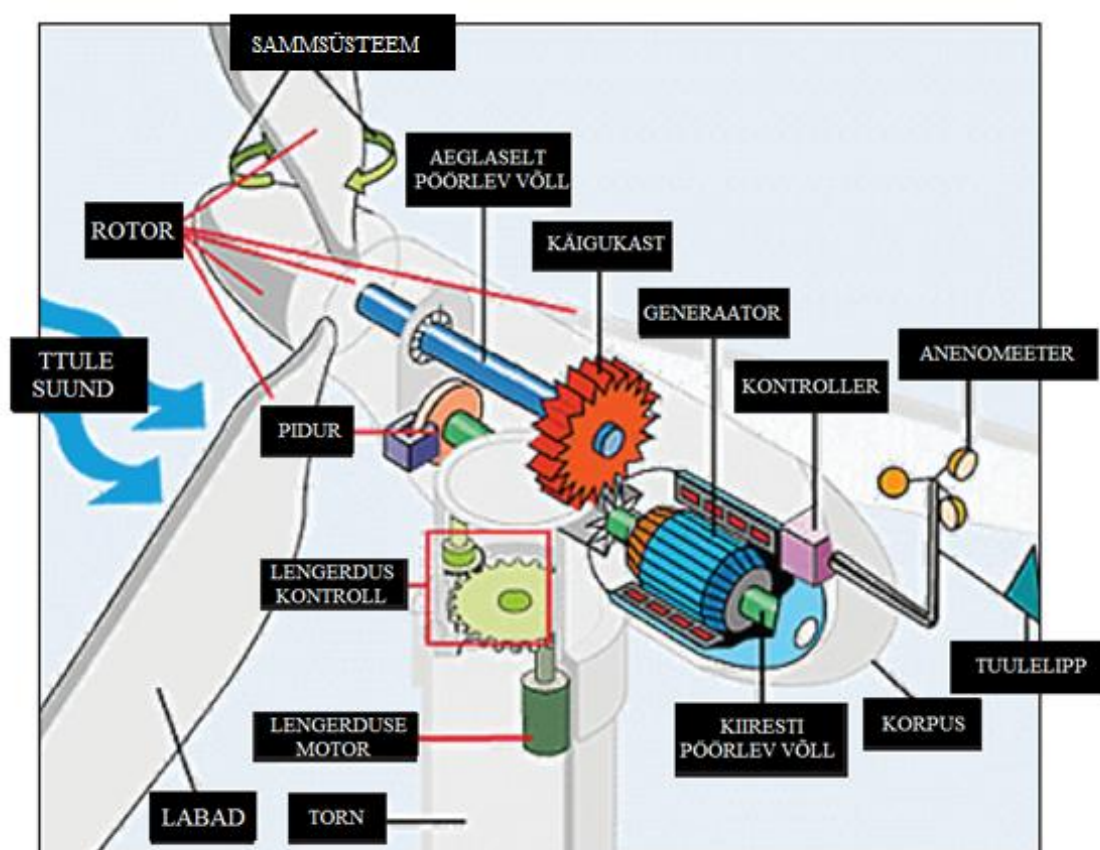
	VAWT			HAWT	
	Savonius	Helical	Darrieus	3-labaline	2-labaline
Eelised	lihtne teostada hooldustöid; labad pöörlevad väikese kiirusega, negatiivne mõju lindudele on väiksem; sobivad äärmuslike ilmastikutingimustega kohtadesse			pikk torn võimaldab püüda kõrged tuule kiirused	
	lengerdussüsteem pole vajalik				

Tabel 2.2.2 Tuuliku tuubide puudused [4, 5]

	VAWT			HAWT	
	Savonius	Helical	Darrieus	3-labaline	2-labaline
Puudused	tekkivad turbulentset õhuvoolamist			raske konstruktsioon nõuab toetust; lengerdussüsteem on vajalik	
Kasutegur	0.3	-	0.32	0.55	0.43

2.4 Tuulikute tööpõhimõtte

Tuuleturbiinid koosnevad tavaliselt kuuest olulisemast komponendist: rootor, käigukast, generaator, kaitse ja juhtimissüsteemist: tornist ja vundamendist. Joonisel (Joonis 2.6) on näidatud tuule turbiini komponendid.



Joonis 2.6 Tuuleturbiini olulised komponendid [6]

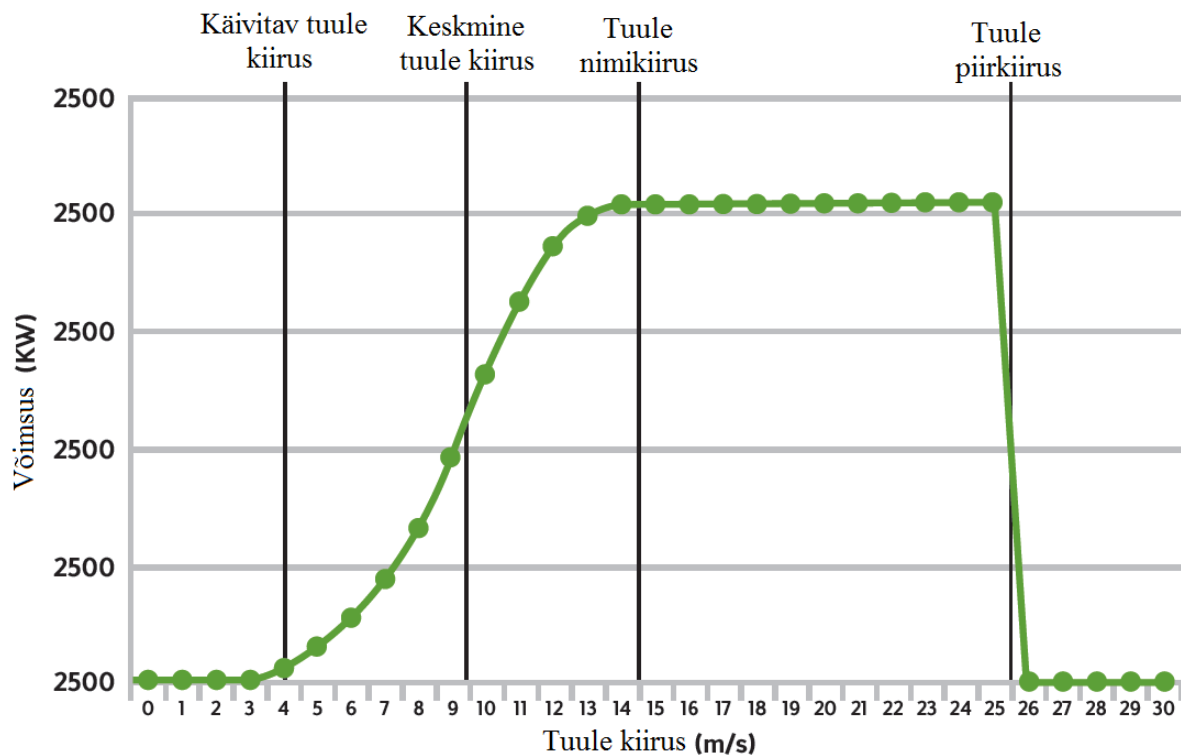
Rooror koosneb aerodünaamilise ehitusega labadest, mis muudavad võlli abil tuule kineetilist energiat mehaaniliseks energiaks. Käigukast muudab võlli pöörlemiskiiruse sobilikuks generaatorile [5].

Kaitse- ja juhtimissüsteemide peamine ülesanne on jälgida tuule kiirust. Siis kui tuul saavutab kiiruse 25-30 m/s, annavad kaitse- ja juhtimissüsteemid rooorile signaali, et on vaja pidurdada. [5].

Tuulikud genereerivad elektrivoolu samamoodi, nagu kõik teised põlvkonna tehnoloogiad. Erinevus on selles, et elektrilist generaatorit paneb käima, mitte diisel ja auru turbiin, vaid tuulenergia – mehaanilise energia liik. Labad haaravad tuule energiat ja käivitavad turbiini lengerdussüsteemi. Lengerdussüsteem seab labasid tuule suunaga risti, keerab korpust vastavalt tuule suunale ja reguleerib suurte tuuleturbiinide labade kaldenurka tuule kiiruse muutumisel. Tavaliselt ühendab käigukast labade võlli (rooorit) elektrigeneraatoriga. Elektrigeneraatorina võivad olla tuuleturbiinis nii induksioongeneraatorid kui ka sünkroongeneraatorid. Väikesed tuuleturbiinid toodavad erineva pingega elektrit ja mõned ka alalisvoolu. Tuuleturbiinid nõuavad transformaatoreid, et muuta väljuvat võimsust sobilikuks koormusele [7, 8].

Enamik tuuleturbiinidest alustavad elektri genereerimist juba tuule kiirusel 3-4 m/s ja genereerivad maksimaalset võimsust tuule kiirusel 12 m/s. Tuuleturbiinidel on automaatne võimsuse kontroll, mis pidurdab turbiini suurtel tuule kiirustel 25 m/s kahjustuste ära hoidmiseks [7, 8].

Tuuleturbiini spetsifikatsioon näitab turbiini tootlikust või väljundvõimsust kilovattides, mida saavutatakse väga kõrgetel tuule kiirustel ja mis ei näita keskmist toodangut. Energia tootmine on tavaliselt prognoositud aasta keskmise tootmise järgi või aasta jooksul toodetud energia järgi. Igal hetkel genereeritud elekter on seotud sellel hetkel oleva tuule kiirusega. Tuuleturbiini võimsuskõver näitab toodetud võimsust kogu tuule turbiini töövahemikus. Tavaliselt hakkavad tuuleturbiinid genereerima väikest kogust elektrit siis, kui tuulekiirus on 3,5 m/s. Kuid käivitatavast tuule kiirusest ei ole piisav, et toota elektrienergiat [8].



Joonis 2.7 Tuuleturbiini võimsuskõver [6]

Elektrienergia toodangut arvutatakse, kasutades tuuleturbiini võimsuskõverat koos arvatud tundidega aastas erineva tuulekiiruse korral. Tuulekiiruse jaotus on asukoha funktsioon. Joonis (Joonis 2.7) iseloomustab tuuleturbiini tüüp võimsuskõverat. Vastavalt geograafilisele asukohale, võib tuulekiirus olla kõrge ja stabiilne või madal ja suure varieeruvusega päeva-, kuu- ja aasta jooksul. Võimsusteguri järgi arvutatakse aastase keskmist elektrienergia tootmist tuuleturbiinist [6].

Suured tuuleturbiinid, mis on püstitatud hea tuulekiirusega asukohas, võivad saavutada 40% kasutegurist. Väikesed tuuleturbiinid väikese tuulekiirusega asukohas saavutavad tavaliselt 20% kasutegurist või vähem [6].

Tuuleturbiinis genereeritav elektrienergia kogus sõltub paljudest faktoritest. Põhifaktor on tuule kiirus. Tuule kiirus kuubis on tuule võimsus. Kui tuul puhub kaks korda kiiremini, suureneb tema võimsus kaheksa korda. Tuule turbiinid, mis on püstitatud kohtadesse tuule kiirusega 8 m/s, toodavad elektrit 75-100% rohkem, kui turbiinid asukohtades tuule kiirusega 6 m/s. Elektri toodangut mõjutab tuuliku töökindlus. See näitab, kui kaua on tuulik võimeline

tootma elektrit ilma rikketa. Kaasaaegsetel euroopa masinatel on töökindlus tavaliselt 98% või rohkem. Kindlasti on tähtis paigaldada tuulikut heas asukohas, kus kõrval olevad objektid ei tekitaks puhanguid ja turbulentsi [7].

Laminaarne tuule võimsus on proportsionaalne õhu tihedusele ja võrdne tuule kiirusele kuubis. Valem (2.1) näitab võimsuse arvutust.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \quad (2.1)$$

Kus, P – on elektrituuliku võimsus W;

ρ – on õhu tihedus normaalingustel ($\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$);

A – on tiiviku pindala m^2 ;

V – on tuule kiirus m/s;

C_p – on kasutegur.

2.5 Väiketuulikute tehnoloogiad

Inseneridel on väljakutse projekteerida tuuletööstuses tõhusat tuule turbiini efektiivse tuule kasutamiseks ja elektrienergia muutmiseks. Viimase 20 aasta jooksul on turbiinide suurus väga muutunud: 25 kW -2500 kW ja rohkem. Elektrienergia hind on vähenenud rohkem kui viis korda [8].

Tuule jõul pöörleva rootori mõiste on iidne ja elektrimootorid on laialt levinenud. Kaasaaegse tuuleturbiini funktsioon on genereerida kõrge kvaliteediga ja õige sagedusega elektrienergiat. Iga tuuleturbiin peab toimima nagu automaatselt kontrollitud ja sõltumatu mini-alajaam. On mõeldamatu, et kaasaaegset tuulikut, mis ei ole majanduslik, tuleb pidevalt ja sageli hooldada. Mikroprotsessorite areng mängib olulist rolli tuuletehnoloogia kulude vähendamises. Kaasaaegne tuulik on kohustatud töötama järelevalveta, madala hoolduse vajadusega ja elueaga 20 aastat [8].

Tuule turbiini projekteerimine võib tunduda lihtne, kuid see on suur väljakutse et teha sellist turbiini, mis:

- vastaks nõuetele, kus standardne elektri tootmine toimub järelevalveta elektrijaamas (sagedus, pinge);
- taluks tuule muutlikkust, see tähendab, et kui tuule kiiruse muutus on 5 m/s kuni 70 m/s;

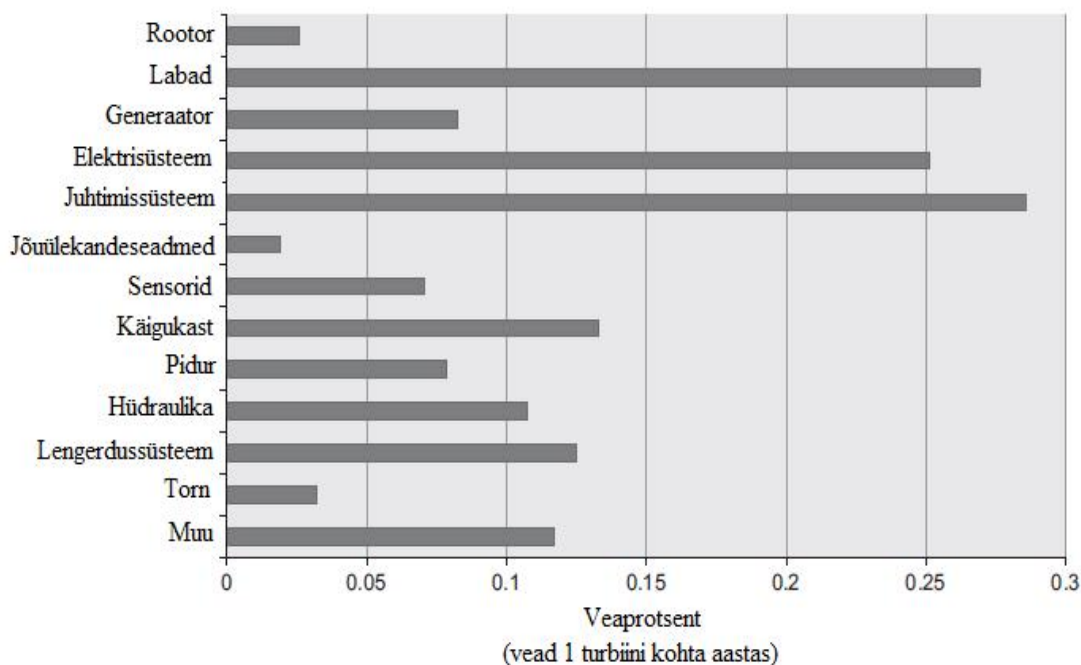
- oleks võimeline konkureerima teiste elektrienergia allikatega.

Tuulikuid toodetakse erinevate suurustega, erineva konfiguratsiooniga ja paljudest erinevatest materjalidest [8].

2.6 Väiketuulikute töökindlus

Tuuleenergia kiire läbitungimine energiasüsteemi, mõjutab oluliselt planeerimist ja süsteemi töötamist nii tulevikus kui ka praegu. Energiasüsteemi töökindlus sõltub tuule stabiilsusest ja tuuliku töökindlusest. Sellepärast on tuuliku töökindlus oluline faktor, mis hindab tema häiringukindlust. Konkureerivas keskkonnas eelistavad energiatööstuse arendajad ja ettevõtjad majanduslikult kõige produktiivsemat tuuleturbiini. Tuuliku pikaajaliste kulude analüüs, arvestades investeeringut, kasutamist ja hooldust, aitab valida sobivaima tuule turbiini konfiguratsiooni [10].

Tuuleturbiinide tootjad arendavad jätkuvalt erinevaid sammsüsteeme, rootori kiiruseid, käigukaste, generaatoreid ja muundureid. Nad ei ole eriti järjekindlad, kuid kui joonestada rikkesageduse vastu kaotatud töötunde arvu, võib näha, et probleemid labadega ja käigukastidega põhjustavad suurimaid tööseisakuid. Tuuliku töökindluse tõstmiseks on tähtis jälgida ja kontrollida komponentide tööd [10].



Joonis 2.8 Tuuliku komponentide töökindlus [9]

Joonisel (Joonis 2.8) on näidatud tuuliku komponentide veaprotsent. Tuuliku veaprotsendi ja rikkeaja mõistmine on keeruline mitte ainult sellepärast, et maailmas on palju erinevaid konfiguratsioone ja suuruseid vaid ka seetõttu, et uuringud on teostatud iseseisvalt erinevates olukordades ja erinevates riikides. Spetsifikatsioon on vastuoluline, avaldatud andmed on koondatud, sest sisaldab konfidentsiaalset äriteavet. Sellepärast on arusaadav ja selge, et arendajate ja ettevõtjate ühinemine on võimatu [9].

2.7 Väiketuulikud Eestis

Võrreldes teiste Euroopa riikidega, on elektri hind Eestis madal. Taanis ja Saksamaal on elektri hind 100 - 150% kõrgem kui Eestis ja seetõttu on väikesed tuulikud enam levinud nendes riikides. Väiketuuliku kõrge hind ja elektri hind on põhjused, miks huvi tuulikute paigaldamiseks Eestis on madal. [10]

Tuuliku hind on 2000 - 4000 eurot/kW, hind sõltub kindlasti ka tootjast. Ilma toetuseta on tuuliku kasutuselevõtt väga kallis.

2013. aastal oli Eestis ühendatud võrku 15 väiketuulikut koguvõimsusega 150,6 kW. Väiketuulikute täpne arv ei ole teada, osa tuulikute ei ole ühendatud elektrivõrku. On teada, et tuulikud olid 10 kilavatised ja tootsid umbes 100 MWh elektrit. 2,4 kW elektrituulik tootis Naissaarel kaheksa kuuga 2500 kWh ja 5 kW elektrituulik tootis Ida-Eestis kaheksa kuuga 17 kWh. [11, 12]

Väiketuuliku ehitamiseks on rida takistusi. Tuuliku püstitamist reguleerivad õigusaktid:

- planeerimisseadus
- ruumilise mõjuga objektide nimekiri
- lennundusseadus
- keskkonna mõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seadus
- veeseadus
- elektrituruseadus
- ehitusseadus

Kui väiketuulik, mis on ühendatud elektrivõrku, genereerib rohkem elektrienergiat kui tarbitakse, siis edastatud elektrienergia eest arvutatakse taastuenergia toetust.

Vastavalt elektrituruseadusele on taastuenergia tariifi toetus 0,0537€/kWh. Toetust makstakse 12 aastat.

On võimalik saada KredEx-ist taastuenergia seadmete soetamise ja paigaldamise toetust 70%. Võib saada toetust elektri müügist võrku, või investeeringu toetust. Kahte toetust saada ei ole võimalik.



Joonis 2.9 Tuulikud Eestis [12]

Joonisel (Joonis 2.9) vasakul pildil on tuulik Naissaarel ja paremal pildil on tuulik Ida – Eestis.

3. Modelleerimiseks vajalikud andmed

Iga faktiline analüüs algab mudeli loomisest. Mudeli eesmärk on luua matemaatilist sõltuvust faktorite vahel. Mudeli abil on võimalik hinnata ja prognoosida tuuliku tasuvust. Kasutades mudelit, on võimalik jälgida kuidas eri algandmed mõjutavad tasuvuse tulemust. Mida keerulisem objekt, seda raskem on saada modelleerimise täpsust. Modelleerimise täpsus sõltub sellest, kuidas on võimalik hinnata objekti iseloomustavad parameetrid. Väiketuuliku töötamist mõjutavad paljud faktorid, aga põhilised on nendest turbulents, masti kõrguse mõju, omatarbimise osakaal, aastane toodang, esialgne investeering, tuuliku hooldus ja elektrienergia hind. Kõiki neid mõjureid on võimalik jagada kolmeks gruppiks: mõõdetud, liigikaudne hinnang ja kaudne arvutus. Tabelis (Tabel 3.1) on esitatud tuuliku tasuvust mõjutavad faktorid.

Tabel 3.1 Tuuliku mõjuvate faktorite hinnang

Mõõdetud	Liigikaudne hinnang	Kaudne arvutus
Esialgne investeering	Elektrienergia hind	Aastane toodang
Tuuliku hooldus	Masti kõrgus	Omatarbimise osakaal
Tuuliku võimsuskõver	Turbulents	

Mudeli loomiseks on kasutatud tuuliku tootja poolt esitatud andmed. Tootja poolt esitatud andmed on sobivad ideaalolukorras, mida elus tavaliselt ei ole. Tuul ei puhu alati ühe kiirusega ja tuule kiiruse suurenemine ei toimu alati rahulikult. Sellepärast on tootja poolt esitatud andmed korrigeeritud vastavalt sellele, mis võib mõjutada tuuliku noormaalset töötamist.

Tuuliku töötamist mõjutavad paljud faktorid: turbulents, puhangud, vihm, torm, temperatuur, niiskus, tuuliku kõrgus. Tuuliku võimsuskõver on korrigeeritud ja tema andmeid võib kasutada omatarbimise ja toodangu arvutamiseks.

Omatarbimise osakaalu tähtsus seisneb selles, et tuul ei pruugi olla alati siis, kui toimub tarbimine. Seetõttu on oluline teada, kui palju toodetud elektrienergiat on võimalik kasutada väiketuuliku omanikul ise. Võib juhtuda nii, et tuulik töötab ainult öösel, millal suurt tarbimist ei ole, aga päeval on vaja osta elektrienergiat. Omatarbimise osakaalu arvutamiseks oli võetud tuule kiiruse andmed Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudist.

Aastase toodangu arvutamiseks on kasutatud Weibulli jaotust vastavalt tuuleturbiini rahvusvahelisele standardile 61400-12-1.

Matemaatilise seose tekitamiseks faktorite vahel on võetud kasutusse erinevad tasuvuse arvutamiseks meetodid: NPV, IRR, PI ja T. Igal meetodil on oma eelis ja puudus, sellepärast on tähtis kasutada projekti tasuvuse hindamiseks mitu erinevat meetodit.

Antud mudelis katsetatakse läbi erinevad võimalikud variandid: muutes keskmist tuule kiirust ja omatarbimise osakaalu; lisades riigi taastuvenergia toetust.

Investeeringiprojekti hindamise põhimõte seisneb selles, et tuleb koguda kokku kõik vajalik informatsioon. Ainult nii on võimalik hinnata projekti tasuvust [2].

Tulemuste väärtus sõltub suurel määral algandmete täielikkusest, usaldatavusest ja kasutatud meetoditest [2].

Antud töös kasutatakse arvutustes väiketuuliku TUGE10 – 42 – 140 tehnilisi andmed. Tuuliku tehnilised andmed on esitatud tabelis (Tabel 3.2).

Tabel 3.2 Tuuliku tehnilised andmed [13]

Turbiini tüüp	TUGE10, TUGE10 - 42 - 140
Võimsus	Nimivõimsus 8,5 kW, maksimaalne võimsus 10 kW
Tuule aktiivne piirkond	3 - 16 m/s, tuule nimikiirus on 11 m/s
Torn	18 või 22 kõrge ise seistav silindriline torn
Keskkonna tingimused	SWT klass IV- IEC 61400 - 2, kasutamistemperatuur -20 ... +40°C
Juhtimine	Aktiivne lengerduskiiruse kontroll $\pm 15^\circ$, keerispidurdus reguleerimine
Rooror	42 m ² , 140 pöördeid minutis, 3 - labaga, päripäeva pööramine, klaaskiudlabad
Generaator	Püsimagnetiga sünkroonne, temperatuuri jälgimisega, ilma käigukasti
Inventer	DVE GFI10 - K2 integreeritud Beckhoff turbiini juhtimis süsteemiga
Tootlikus	5 m/s - 14001 kWh/y
	6 m/s - 20982 kWh/y
	7 m/s - 26823 kWh/y
	8 m/s - 30730 kWh/y

Väiketuuliku tootjaid on Eestis kaks: myWind ja Tuge. Väikesele kodutarbijale on majapidamise jaoks soovitatav 5 – 10 kW tuulik. Kuna Eestis ei ole eriti kasutuses 5 kW tuulikuid, siis on antud töö jaoks valitud tuntud Eesti tootja, Tuge, 10 kW tuulik. Tuuliku tiivad reguleeritakse keerispiduriga, mis tähendab, et kui tuule kiirus ületab nimikiirust 11 m/s, siis lengerduskiiruse kontroll lülitab tuuliku välja [14].

3.1 Turbulentsi mõju väiketuuliku võimsuskõverale

Võimsuskõver on põhiline näitaja tuule ressursi hindamiseks. Võimsuskõver näitab, millise tuule kiiruse korral milline elektrigenerereerimine on. Tuuliku aastase tootlikkuse arvutamiseks kasutatakse võimsuskõveraid. Tootja poolt saadud võimsuskõveraid nimetatakse: võimsuskõver null turbulentsi väärtusega. Seda sellepärast, et tuuleturbiini väljundvõimsused on saadud ideaalsete – stabiilsete tuulekiiruste korral, kus ei ole arvestatud turbulentsi. Need võimsuskõverad ei ole kohaldatavad tihti muutuva tuule korral. Tuuleturbiini võimsuskõverad sõltuvad atmosfääri tingimustest: õhu tihedusest, temperatuurist, turbulentsist, puhangutest ja tuule vertikaalsest nihkest [13].

Tuule turbulents omab märkimisväärset mõju tuule turbiini väljundvõimsusele. See on eriti oluline väikestele tuulikutele, mis praktikas tihti asuvad hoonete, puude ja muu takistuste juures. Tootja poolt saadud võimsuskõver ei anna ettekujutust, milline on tuuleturbiini elektrigenerereerimine erineva turbulentsi tugevuse korral. Kohaspetsiifilise turbulentsi mõju on kontrollitav suurteil tuuleturbiinidel, väikestele tuuleturbiinidele tuleb aga katsetada turbulentsi erinevaid tugevusi vastavalt asukohale. Muutuva turbulentsi ja tuule suuna vastuolu mõjutab oluliselt väike tuuleturbiini tööd. Tugeva turbulentsi korral on elektrienergia genereerimine väike ja mehaaniline pinge turbiini komponentidele suur. Mida väiksem tuulik ja mida puhangulisem keskkond, seda suurem tõenäosus, et turbiini lengerduskiiruse süsteem ei suuda ühtlustada rootori suunda tuule suunaga koos. Kui tuuleturbiin ei ole tuulega ühtlustatud, siis genereeritava võimsuse kogus langeb kiiresti.

Rahvusvahelises taastuvenergia laboris katsetati 7 väikest tuulikut. Katsetel leiti, et suurteil tuule kiirustel lülitab turbiin tihedamini välja. Tuulikute aastase tootlikkuse erinevus on 9% kuni 32%, mõlemates tulemustes on arvesse võetud nii väike kui ka suur turbulents [14].

Turbulentsi tugevus on määratud valemiga (3.1) [15] :

$$TI = \sigma_u / U \quad (3.1)$$

kus, σ_u – on tuule kiiruse standardne kõrvalekalle;

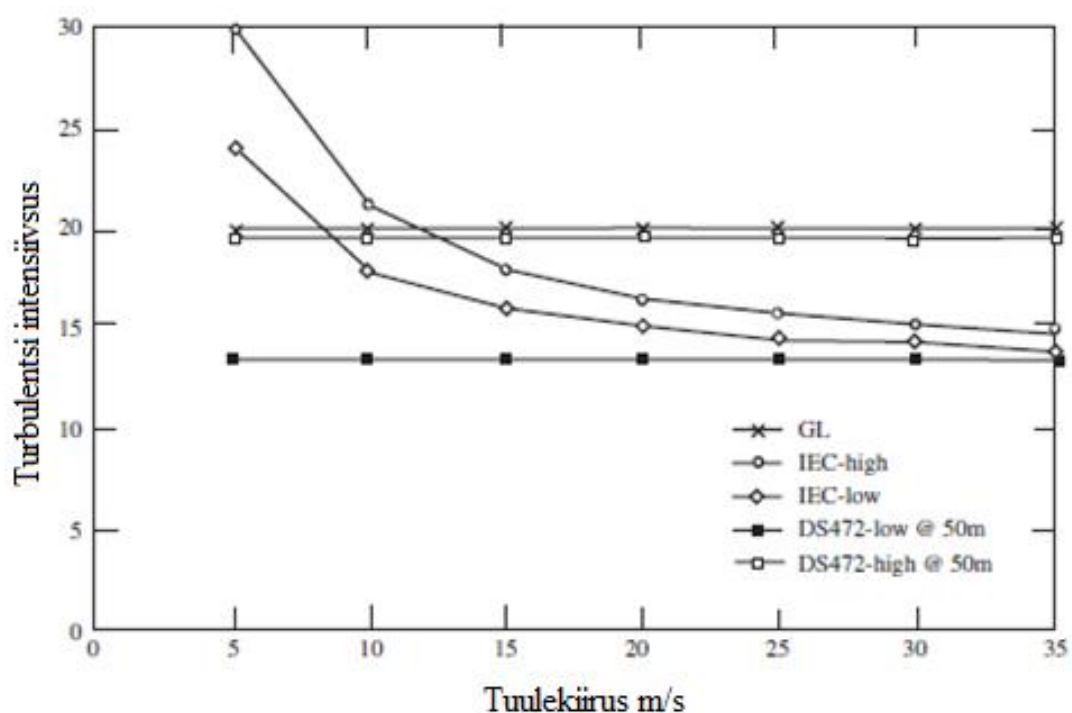
U – tuule kiirus m/s.

Tavaliselt on turbulentsi tugevus vahemikus 0,1 kuni 0,4.

Turbulentsi tugevuse järgi tuule kiiruse korrigeerimiseks kasutatakse valemit (3.2) [15]:

$$U_{\text{corr}} = (U \cdot [(1 + 3 \cdot [TI]^2)]^{1/3}) \quad (3.2)$$

Antud töös on tuuliku töötamise režiim tuule kiirustel 3 m/s – 15 m/s ja vastavalt IEC standardile valitakse joonisest (Joonis 3.1) turbulentsuse tugevuse väärtused järgmised: 0,15; 0,20; 0,25; 0,3.



Joonis 3.1 Turbulentsuse tugevuse väärtus vastavalt erinevatele standarditele [1]

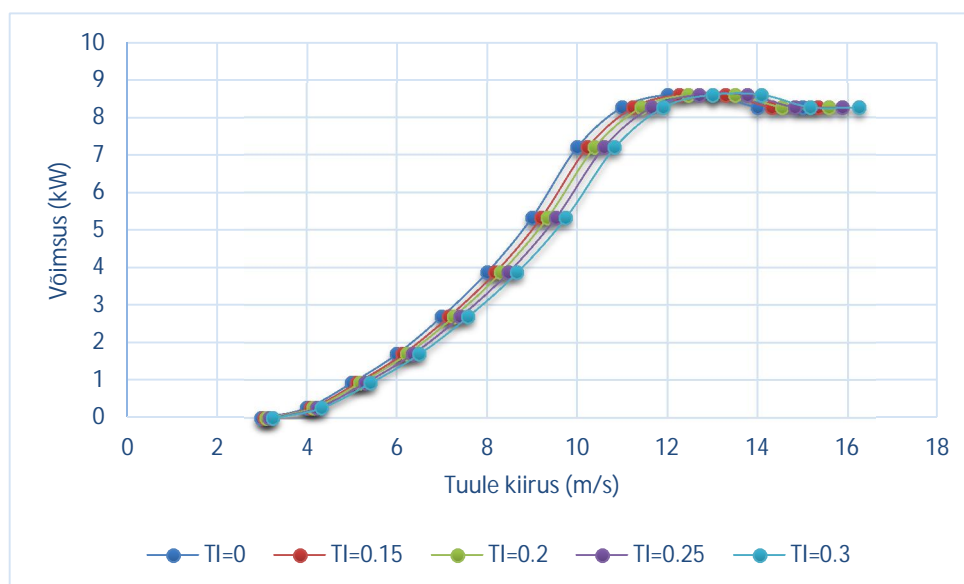
Kasutades valemit (3.2) saab arvutada korrigeeritud tuule kiirust valitud tuuliku TUGE10-42-140 jaoks.

Korrigeerides iga tuule kiirust eraldi, jääb võimsuse suurus samaks. Tabelis (Tabel 3.3) on uued, arvutatud ja korrigeeritud tuule kiirused.

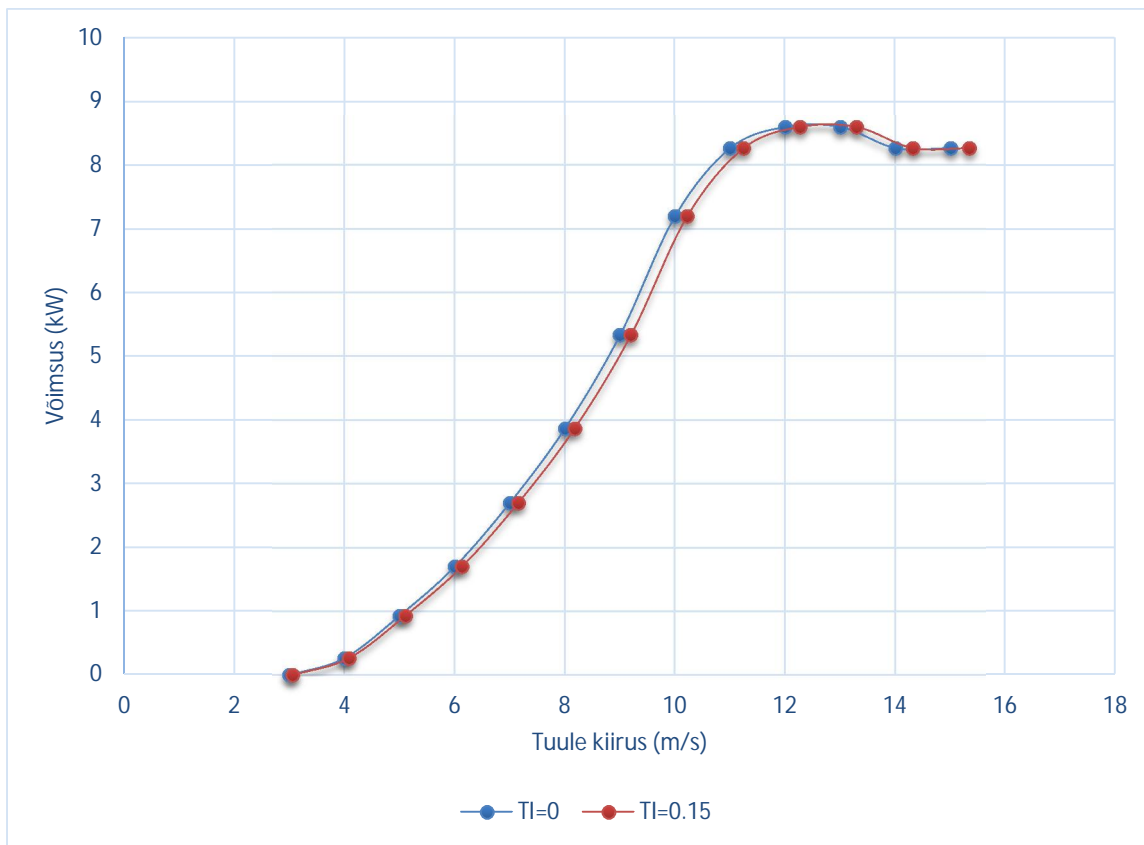
Tabel 3.3 Korrigeeritud turbulentside järgi tuule kiirused

$U_{rated}, m/s$	$U_{corr-TI=0,15}$	$U_{corr-TI=0,2}$	$U_{corr-TI=0,25}$	$U_{corr-TI=0,3}$	P_{rated}, kW
3	3.0660	3.1154	3.1768	3.2487	0
4	4.0880	4.1539	4.2358	4.3317	0.267
5	5.1101	5.1924	5.2947	5.4146	0.933
6	6.1321	6.2309	6.3537	6.4975	1.7
7	7.1541	7.2694	7.4126	7.5805	2.7
8	8.1761	8.3079	8.4716	8.6634	3.867
9	9.1981	9.3464	9.5306	9.7463	5.333
10	10.2201	10.3849	10.5895	10.8293	7.2
11	11.2421	11.4234	11.6485	11.9122	8.267
12	12.2641	12.4619	12.7074	12.9951	8.6
13	13.2861	13.5004	13.7664	14.0781	8.6
14	14.3081	14.5389	14.8253	15.1610	8.267
15	15.3301	15.5774	15.8843	16.2439	8.267

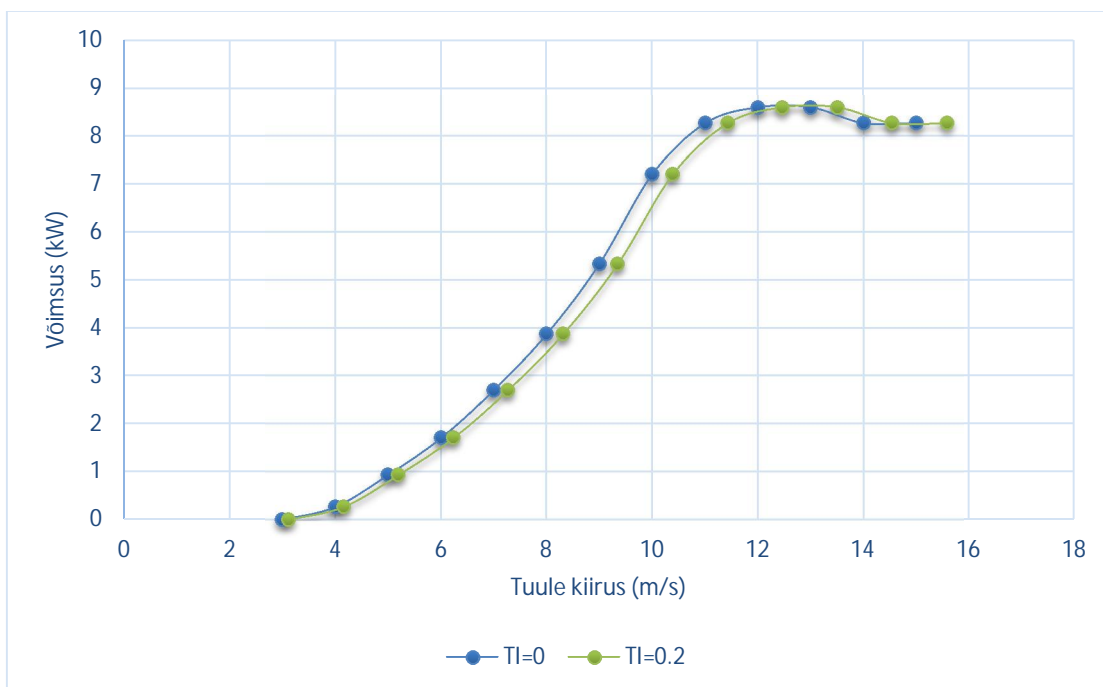
Saadud tulemuste alusel on tehtud graafikud erineva turbulentsi väärtuse jaoks. Graafikul (Graafik 3.1) on näidatud turbulentsi mõju tootja poolt antud võimsuskõverale. Graafikul (Graafik 3.1) on näidatud korrigeeritud võimsuskõverad turbulentsi 0,05, 0,1, 0,15 ja 0,2 väärtuste järgi. Graafikud (Graafik 3.2-3.5) iseloomustavad iga turbulentsi mõju eraldi.



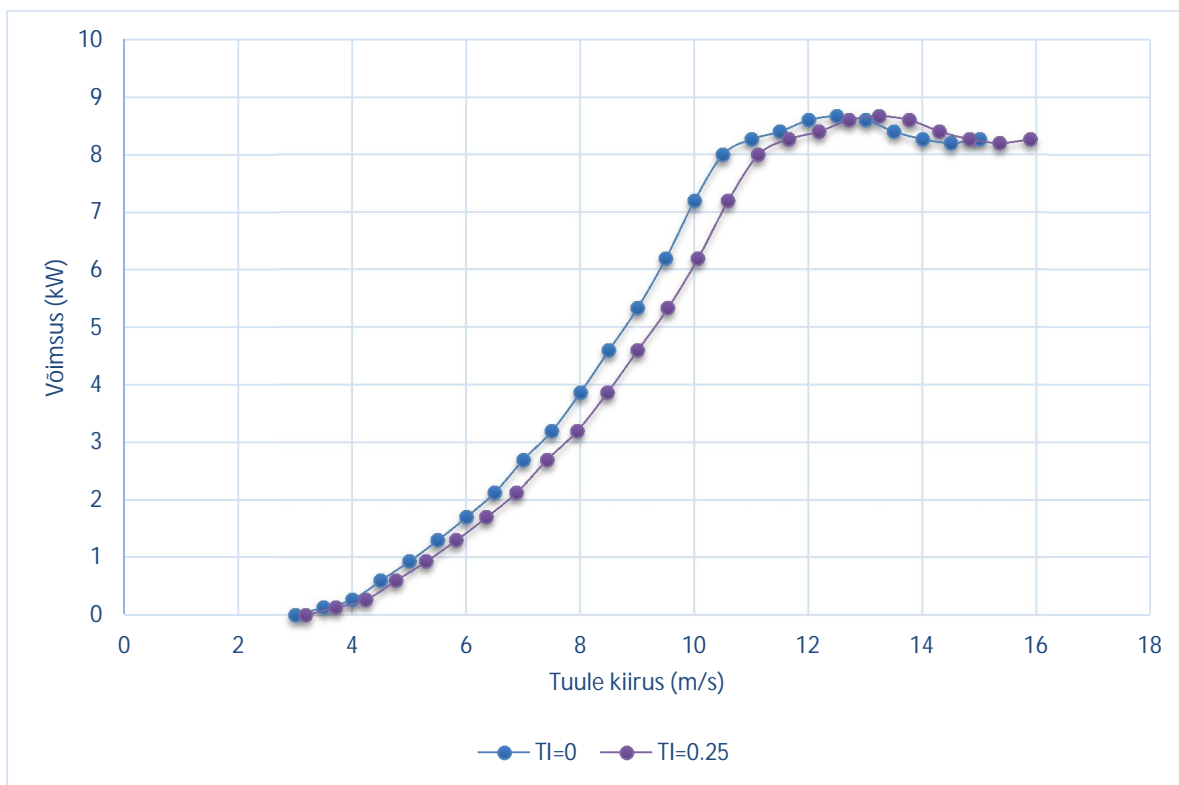
Graafik 3.1 Turbulentsi mõju võimsuskõverale



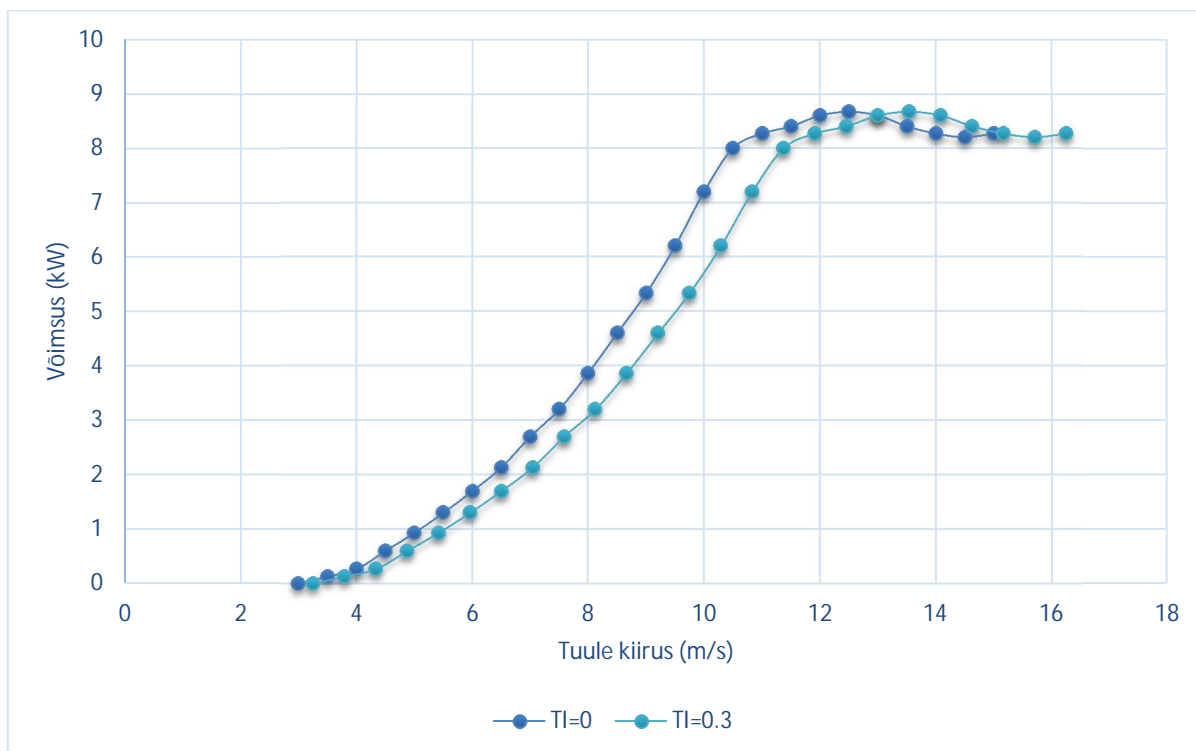
Graafik 3.2 Turbulents 0,15 mõju võimsuskõverale



Graafik 3.3 Turbulentsi 0,2 mõju võimsuskõverale



Graafik 3.4 Turbulentsi 0,25 mõju võimsuskõverale

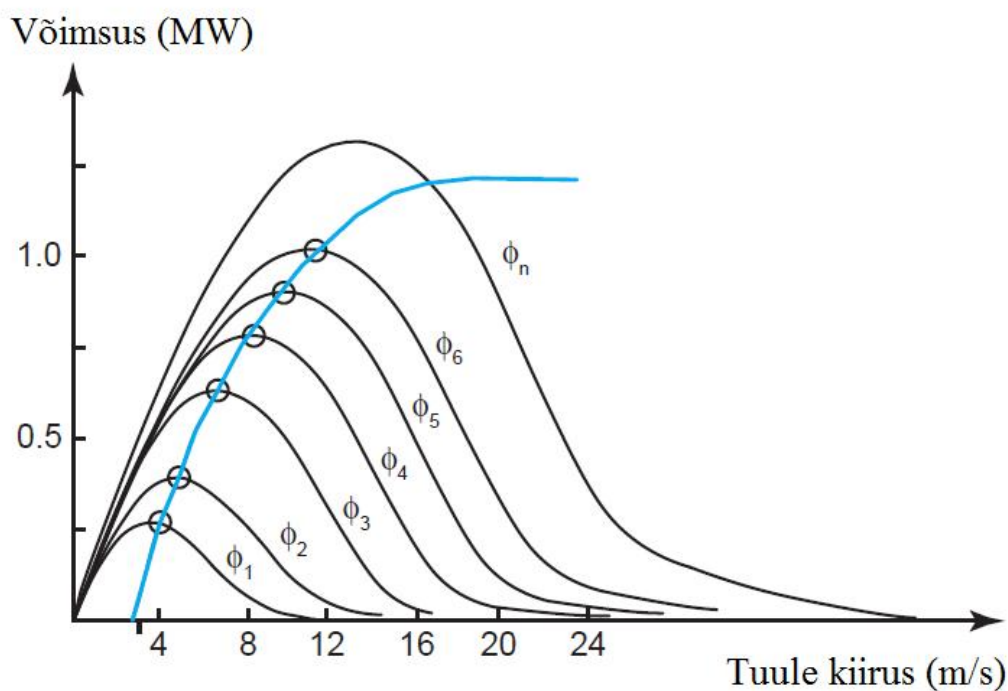


Graafik 3.5 Turbulentsi 0,3 mõju võimsuskõverale

Kahekordse eramaja kõrgus on minimaalselt 5,4 m. Selleks et vältida tuuliku sattumist suure turbulentsi intensiivsusega piirkonda, peab tuuliku kõrgus olema kaks korda suurem kui maja kõrgus – 10,8 m. Antud töös on TUGE 10 – 42 – 140 tuuliku kõrgus 18 m. Tavaliselt paigutatakse väiketuulik sinna, kus läheduses ei ole tuult segavaid objekte - kuid isegi nendes kohtades tekib turbulentne tuul. Vastavalt sellele valin tuuliku tasuvuse arvutamiseks turbulentsuse intensiivsuseks 0,15.

3.2 Puhangute mõju väiketuuliku võimsuskõverale

Tuuleturbiini võimsuskõver on ehitatud tiiviku laba kõverate abil. Laba erineva nurga kõvera maksimaalseid väärtusi ühendades saab võimsuskõvera [6]. Joonis (Joonis 3.2) iseloomustab võimsuskõvera kujunemist.



Joonis 3.2 Võimsuskõvera kujunemine [5]

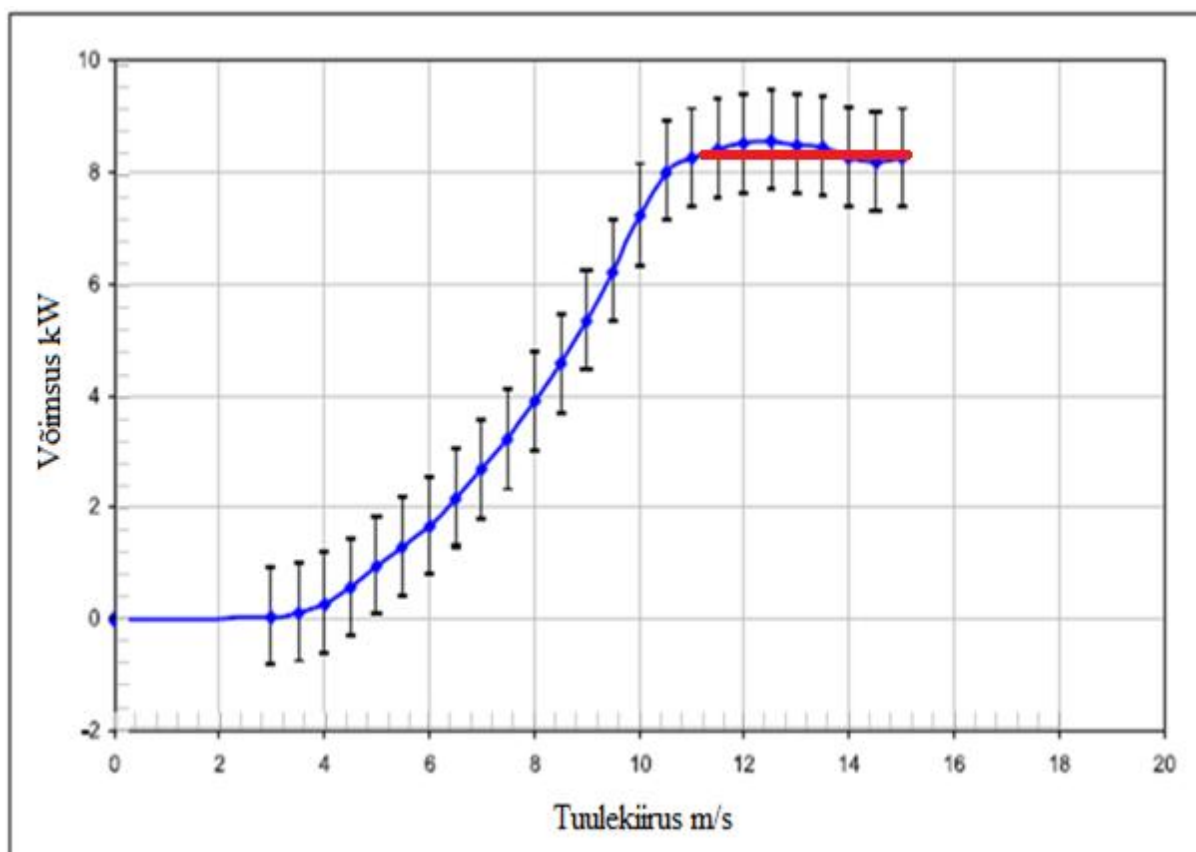
Võimsuskõver sõltub tiiviku laba reguleerimise meetodist: väärtus- ja kallutusreguleerimine [5].

Väärtusreguleerimise viis pidurdab rootorit, kui tuul saavutab teatud kiiruse. Sellist süsteemi kasutatakse tavaliselt väikestel tuulikutel. Väärtusreguleerimise puuduseks on tuuliku väike kasutegur ja väljundvõimsus, eeliseks on lihtsus [5].

Kallutusreguleerimise puhul reguleeritakse tiiviku labade nurka vastavalt tuule kiirusele ja suunale. See reguleerimise viis vähendab tiiviku laba koormust suurtel tuule kiirustel. Reguleerimiseks kasutatakse kas ühte sama mehhanismi või eraldi jaama, mis muudab eri labade kallutus nurka [5].

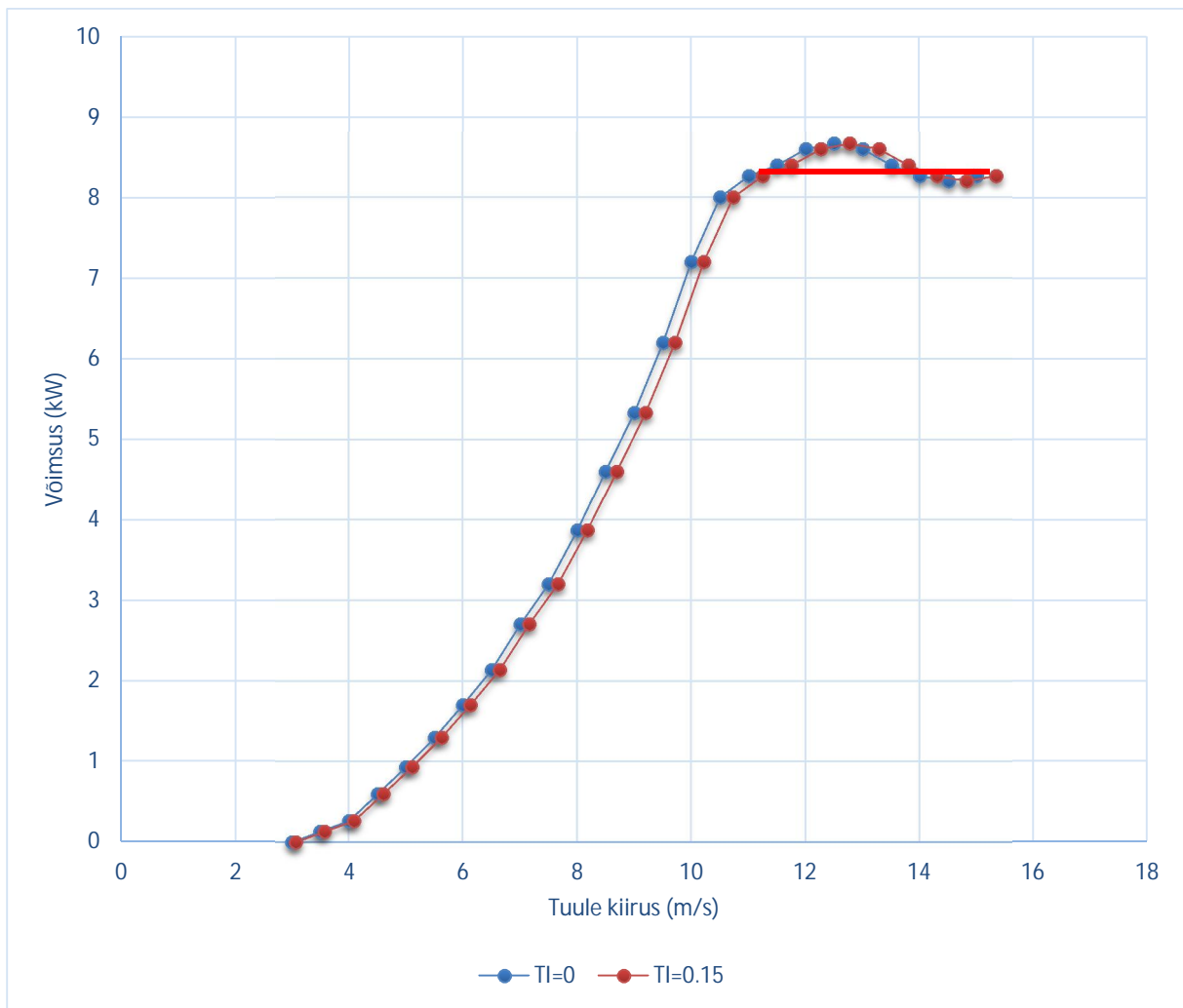
Tuuleturbiini töö sõltub tuule kiirusest, suunast ja muutusest. Alustades tuule kiirusest 10 m/s muutub võimsuskõvera iseloom vastavalt sellele, milline on tuulikul tiiviku labade reguleerimise meetod [5].

Tuuliku TUGE tiiviku labad on väärtusreguleeritud. Ta saavutab oma nimivõimsuse 11 m/s. Joonisel (Joonis 3.2) on näidatud tootja poolt antud ja korrigeeritud väärtusreguleerimisega tuuliku võimsuskõver [5].



Joonis 3.3 Korrigeeritud tootja võimsuskõver

Graafikul (Graafik 3.6) on näidatud võimsuskõver, kus on arvestatud turbulentsi intensiivsus 0,15 ja väärtusreguleerimine.



Graafik 3.6 Turbulentsi ja puhangute mõju võimsuskõverale

3.3 Omatarbimise osakaal

Tuult ei ole alati siis kui tarbimine on, sellepärast on vaja teada, kui palju tuuliku poolt genereeritud elektrienergiast saab kasutada omatarbimiseks.

Antud töös ei ole väiketuuliku asukoht määratud, sellepärast oli võetud omatarbimise osakaalu leidmiseks EMHI Tallinn - Harku aeroloogiajaamast aasta tuule kiiruse andmed iga tunni kohta ja tüüpkoormusgraafikud elektrilevi koduleheküljelt. Enne tuuliku püstitamist on mõistlik analüüsida valitud kohta. Tallinn – Harku aeroloogiajaam ei ole hea koht tuuliku püstitamiseks, selle ümbruses on mets, hooned ja muud tuult segavad objektid. Tallinn – Harku aeroloogiajaama andmete abil on võimalik arvutada minimaalse omatarbimise osakaalu arvestades jaama asukoha iseloomu. Joonisel (Joonis 3.4) on Tallinn – Harku aeroloogiajaam. Tuule kiiruse andmed mõõdetakse 10-meetrilisel kõrgusel.



Joonis 3.4 Tallinn – Harku aeroloogiajaam

Elektrilevi andmete järgi tarbib keskmine pere aastas 3500 – 5500 kWh. Antud töö jaoks valitakse aastaseks tarbimiseks 4490 kWh.

Kasutades EMHI andmeid Tallinn – Harku jaamast, on valitud igas tunnis olevale tuule kiirusele kõige lähedasem tuule kiirus ja väljundvõimsuse väärtus võimsuskõverast arvestades turbulentsi mõju. Omatarbimise osakaalu arvutamiseks kasutatakse korrigeeritud turbulentsi järgi võimsuskõvera tabelit (Tabel 3.3). Vastavalt tunnile ja päevale valitakse tüüpkoormusgraafikute tabelist vastav tarbimine. Lahutades genereeritavast võimsusest tarbimise, saab omatarbimise osakaalu. Näidiseks on toodud ühe päeva osatarbimise arvutamine tabelis (Tabel 3.4). Kui genereerimine ületab tarbimist, siis omatarbimise osakaal on võrdne tarbimisega. Kuna valitud asukohas Tallinn – Harku ei ületa tuule kiirus 9 m/s, siis võimsuskõvera korrigeeritud andmed ei mõjuta omatarbimise osakaalu tulemust.

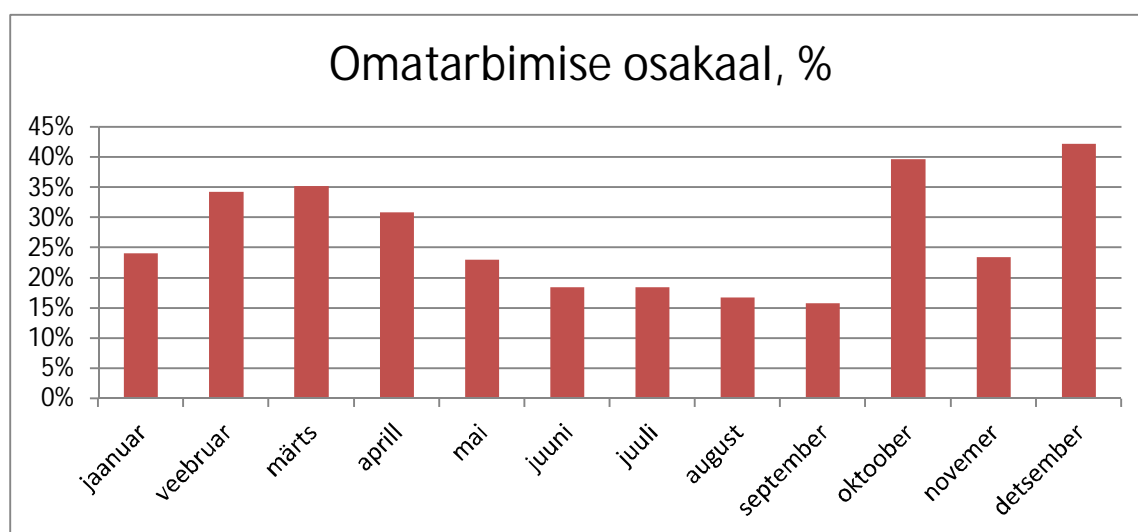
Tabel 3.4 Ühe päeva omatarbimise osakaalu arvutus tulemused

Kellaeg	Tuulekiirus, m/s	Tuulekiirusele vastav elektrigenerereerimine, kWh	Tarbimine, kWh	Omatarbimise osakaal, kWh	Omatarbimise osakaal, %
1:00	5.6	1.3	0.46897	0.4689	100%
2:00	3.3	0	0.47443	0	0%
3:00	3.2	0	0.47865	0	0%
4:00	3.4	0	0.48258	0	0%
5:00	2.5	0	0.48912	0	0%
6:00	3.2	0	0.49035	0	0%
7:00	4.3	0.267	0.48130	0.267	55%
8:00	5.5	1.3	0.47526	0.4752	100%
9:00	2.7	0	0.47443	0	0%
10:00	3.1	0	0.47865	0	0%
11:00	2.8	0	0.48258	0	0%
12:00	1.2	0	0.48258	0	0%
13:00	4.3	0.267	0.49035	0.267	54%
14:00	0.9	0	0.48130	0	0%
15:00	0.5	0	0.47526	0	0%
16:00	0.7	0	0.47443	0	0%
17:00	0.5	0	0.47865	0	0%
18:00	3.9	0.267	0.48258	0.267	55%
19:00	1.6	0	0.48912	0	0%
20:00	0	0	0.49035	0	0%
21:00	1.9	0	0.48130	0	0%
22:00	0.6	0	0.47526	0	0%
23:00	2.4	0	0.47443	0	0%
0:00	3.8	0.133	0.47865	0.133	28%
Kokku		3.534	11.5307	1.8782	16%

Tabel 3.5 Omatarbimise osakaal kuu järgi

Kuu	Tootmine, kWh	Tarbimine, kWh	Omatarbimise osakaal, kWh	Omatarbimise osakaal, %
Jaanuar	152.22	374.9681	90.3063	24%
Veebruar	207.68	361.8102	124.0852	34%
Märts	379.278	375.1081	132.3151	35%
Aprill	283.185	375.075	116.0279	31%
Mai	156.188	375.1498	86.3955	23%
Juuni	127.185	374.9173	69.0537	18%
Juuli	153.782	374.9872	69.2686	18%
August	101.017	374.997	62.7505	17%
September	112.481	375.07	59.2749	16%
Oktoober	387.534	374.889	148.6626	40%
November	162.607	374.3854	87.8818	23%
Detsember	363.837	375.7139	158.6221	42%
Kokku	2 586.994	4487.071	1204.6449	27%

Tabelist (Tabel 3.5) on nähtav, et Harku asukohas püstitatud tuulikul on tarbija omatarbimise osakaal 27%. Graafik (Graafik 3.7) iseloomustab tuuliku omatarbimise osakaalu. Eeldades, et väiketuulik püstitatakse paremas kohas kui Tallinn – Harku aeroloogiajaam, on mõistlik võtta arvesse erinevad omatarbimise variandid: 20%, 30%, 50% ja 75% ja vaadata kuidas omatarbimise osakaal mõjutab tuuliku tasuvust.



Graafik 3.7 Omatarbimise osakaal

3.4 Tuuliku torni kõrguse mõju tootlikkusele

Tuuliku tootlikkus sõltub tuulest. Mida suurem ja stabiilsem on tuule kiirus, seda suurem on tootlikkus. Kuna maapinna juures on palju takistusi, mis tekitavad turbulentsi, puhanguid ja tuule keriseid, siis suureneb ja stabiliseerub tuule kiirus kõrgusega. Maapinna mõju tuulekiirusele võib arvutada teoreetilise valemi (3.3) abil [16]:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (3.3)$$

Kus v – on tuulekiirus kõrgusel H m/s;

v_0 – on tuulekiirus kõrgusel H_0 m/s;

α – on hõõrdetegur, mis iseloomustab maa pinnareljeefi, kus tuul puhub.

Hõõrdetegur iseloomustab maapinna reljeefi, mille peale tuul puhub. Tabeli (Tabel 3.6) valitakse hõõrdeteguri väärtust vastavalt keskkonnale, kus tuul puhub.

Tabel 3.6 Hõõrdeteguri väärtused

Hõõrdetegur, α	Maapinna kirjeldus
0.1	Sile ja kõva maapind, rahulik vesi
0.15	Kõrge rohi
0.2	Kõrge põllukultuur, hekid ja põõsad
0.25	Metsastunud maa, palju puid
0.3	Väike linn puudega ja põõsastega
0.4	Suure linna kõrghooned

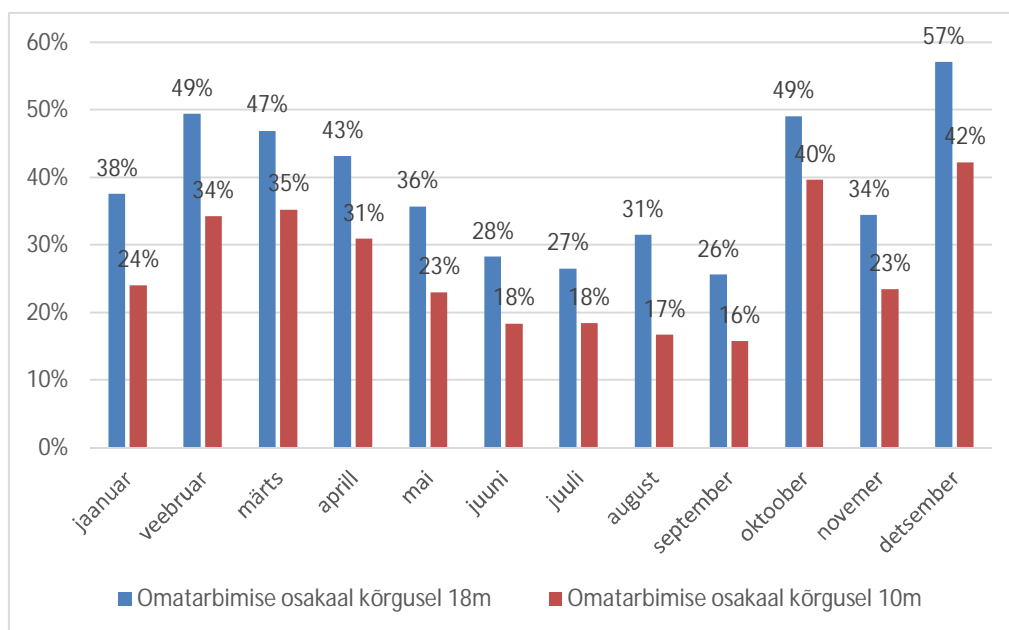
Tuule andmed on saadud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituutist ja on mõõdetud 10 meetri kõrgusel. Tuuliku kõrgus on 18 meetrit. Kasutades valemit (3.3) võib arvutada võimalikku tuule kiirust 18 meetrilisel kõrgusel.

Tabel 3.7 Ühe päeva omatarbimise osakaalu arvutus tulemused 18 m kõrgusel

Kellaeg	Tuulekiirus, m/s	Tuulekiirusele vastav elektrigenerereerimine, kWh	Tarbimine, kWh	Omatarbimise osakaal, kWh	Omatarbimise osakaal, %
1:00	6.6798	2.133	0.4689	0.4689	100%
2:00	3.9363	0.267	0.4744	0.267	56%
3:00	3.8171	0.133	0.4786	0.133	28%
4:00	4.0557	0.267	0.4825	0.267	55%
5:00	2.9821	0	0.4891	0	0%
6:00	3.8171	0.133	0.4903	0.133	27%
7:00	5.1293	0.933	0.4813	0.4813	100%
8:00	6.5606	2.133	0.4752	0.4752	100%
9:00	3.2207	0	0.4744	0	0%
10:00	3.6978	0.133	0.4786	0.133	28%
11:00	3.3399	0.133	0.4825	0.133	28%
12:00	1.4314	0	0.4825	0	0%
13:00	5.1292	0.933	0.4903	0.4903	100%
14:00	1.0736	0	0.4813	0	0%
15:00	0.5964	0	0.4752	0	0%
16:00	0.8350	0	0.4744	0	0%
17:00	0.5964	0	0.4786	0	0%
18:00	4.6521	0.6	0.4825	0.4825	100%
19:00	1.9085	0	0.4891	0	0%
20:00	0	0	0.4903	0	0%
21:00	2.2664	0	0.4813	0	0%
22:00	0.7157	0	0.4752	0	0%
23:00	2.8628	0	0.4744	0	0%
0:00	4.5327	0.6	0.4786	0.4786	100%
Kokku		8.398	11.5307	3.9431	34%

Tabel 3.8 Omatarbimise osakaal kuu järgi

Kuu	Tootmine, kWh	Tarbimine, kWh	omatarbimise osakaal, kWh	omatarbimise osakaal, %
Jaauar	326.791	374.9681	140.8279	38%
Veebruar	416.143	361.8102	178.7902	49%
Märts	693.868	375.1081	175.8948	47%
Aprill	535.732	375.075	161.9737	43%
Mai	323.168	375.1498	134.0269	36%
Juuni	259.481	374.9173	106.0960	28%
Juuli	290.078	374.9872	99.4616	27%
August	235.374	374.997	118.1082	31%
September	231.756	375.07	96.2516	26%
Oktoober	697.009	374.889	183.9438	49%
November	321.071	374.3854	129.0793	34%
Detsember	685.625	375.7139	214.5338	57%
Kokku	5016.096	4487.071	1738.9883	39%



Graafik 3.8 Omatarbimise osakaal erinevatel kõrgustel

Tabelis (Tabel 3.7) on näidatud ühe päeva tuule kiiruse sõltuvus kõrgusest. Teoreetilisest tulemusest on nähtav, et tuule kiirus sõltub kõrgusest. Mida kõrgem on tuuliku torn, seda suurem on tootlikkus ja seda väiksem on puhangute ja turbulentsi mõju.

Arvestades seda, et tuule kiirus oli mõõdetud 10 meetrisel kõrgusel, aga tuuliku kõrgus on 18 meetrit, võib arvutada teoreetilist toodangut samas kohas aga 18 meetrilisel kõrgusel.

Tabelist (Tabel 3.8) on nähtav, et omatarbimise osakaal 18 meetrilisel kõrgusel suurenes 12% võrra. Graafikust (Graafik 3.8) on nähtav omatarbimise osakaal erinevatel tuule kõrgustel kuude kaupa. Tulemustest on nähtav, et mida kõrgem on tuulik seda suurem ja stabiilsem on tuule kiirus, tootlikkus ja tarbija omatarbimise osakaal.

3.5 Väiketuuliku tootlikus

Aastane energia tootmine on kõige olulisem parameeter tuuliku valimisel. Ligikaudset aastast energiatarbimist arvutatakse vastavalt standardi IEC – 61400-12-1 valemi (3.4) abil, kasutades tuule turbiini võimsuskõverat ja Weibull-i jaotust [15].

$$Aastane\ tootlikus = \sum_1^n tuule\ kiiruse\ tootlikus \quad (3.4)$$

Standardi järgi arvutatakse aastast tootlikkust keskmiste kiiruste 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ja 11 m/s jaoks.

Iga tuule kiiruse tootlikkust saab arvutada valemi (3.5) abil [4]:

$$tuule\ kiiruse\ tootlikus\ (V) = a \cdot b \cdot 8760h \quad (3.5)$$

kus, a – on tuulekiirusele vastav võimsus võimsuskõveral kW;

b – on tuule esinemis sagedus %.

Vastavalt arvutatavale tuulekiirusele valitakse tuuliku korrigeeritud võimsuskõvera graafikust võimsus. Tuule varieeruvust arvutatakse Weibull – i jaotusega valemi (3.6) abil [15]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (3.6)$$

kus, k – on kuju parameeter, standardi IEC – 61400-12-1 järgi on k=2;

c – on voointensiivsuse parameeter.

Voointensiivsuse parameetrit arvutatakse valemi (3.7) abil [15]:

$$\bar{v} \cong 0,886 \cdot c \quad (3.7)$$

kus, \bar{v} – on keskmine tuule kiirus aasta jooksul.

Jaotuse parameetrid k ja c sõltuvad tuuliku asukoha püstitamisest. Kui kuju parameeter on võrdne arvuga 3, siis see tähendab, et asukohal puhub alati konstantse kiirusega tuul. Kui $k=2$, tähendab, et võib esineda tugev tuul, väike perioodiline või kiire tuul. Kui $k=1$, tähendab, et asukoht ei ole väga hea tuuliku püstitamiseks ja seal puhuvad nõrgad ja väikese kiirusega tuuled [15].

Aastase tootliku arvutamiseks valitakse erinevad keskmiseis tuule kiiruseid: 3,5 m/s, 5,3 m/s ja 7,1 m/s. Tabelis (Tabel 3.9) on esitatud tootlikkuse arvutuse tulemused. Tootlikkuse tulemused erinevate keskmiste tuule kiiruste kohta on esitatud tabelis (Tabel 3.10).

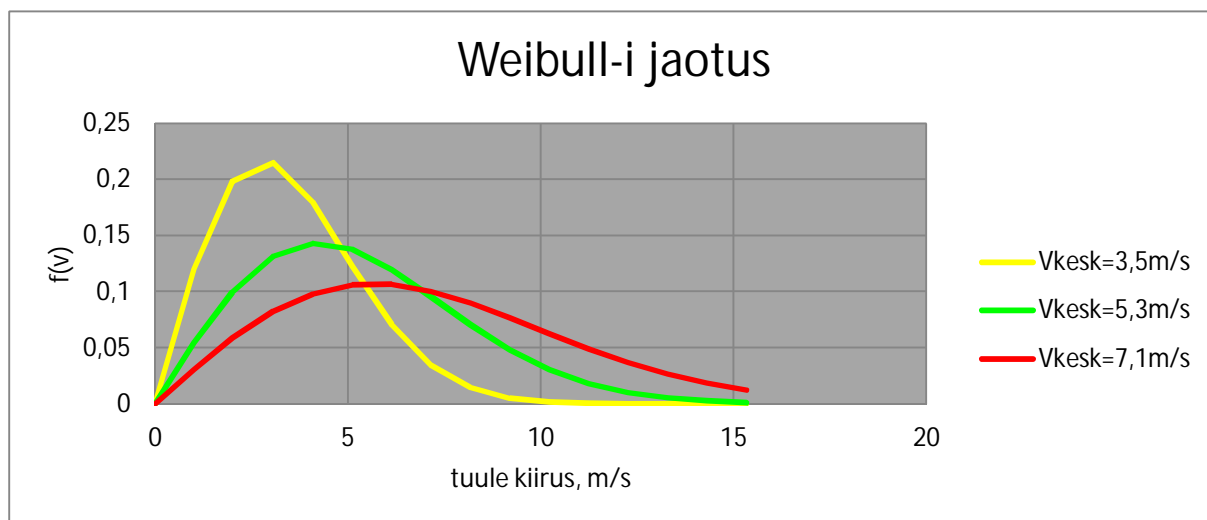
Tabel 3.9 Tootlikkuse arvutuse tulemused

Weibull-i jaotus					
Tuule kiirus, m/s	Võimsus, kW	Tuule esinemise sagedus, (f)	Tootlikus, kWh	Tuule kiiruse sagedus, h/aastas	Tootlikus, kWh/aastas
0	0	0%	0	0	0
1	0	5%	0	476.1164	0
2	0	10%	0	875.6551	0
3.0660	0	13%	0	1 154.3439	0
4.0880	0.267	14%	0.0382	1 254.6884	335.0018
5.1101	0.933	14%	0.1284	1 206.0188	1 125.2155
6.1321	1.7	12%	0.2037	1 049.7594	1 784.5911
7.1541	2.7	10%	0.2583	837.9871	2 262.5650
8.1761	3.867	7%	0.2729	618.1249	2 390.2890
9.1981	5.333	5%	0.2577	423.37191	2 257.8423
10.2201	7.2	3%	0.2220	270.1588	1 945.1430
11.2421	8	2%	0.1470	160.9895	1 287.9159
12.2641	8	1%	0.0820	89.7466	717.9730
13.2862	8	1%	0.0428	46.8661	374.9285
14.3082	8	0%	0.0210	22.9492	183.5937
15.3302	8	0%	0.0096	10.5463	84.37075
16	0	0%	0	6.1232	0
17	0	0%	0	2.5870	0
18	0	0%	0	1.02999	0
19	0	0%	0	0.3866	0
20	0	0%	0	0.1368	0
Kokku		97%	1.6837	8 507.586165	14 749.4301

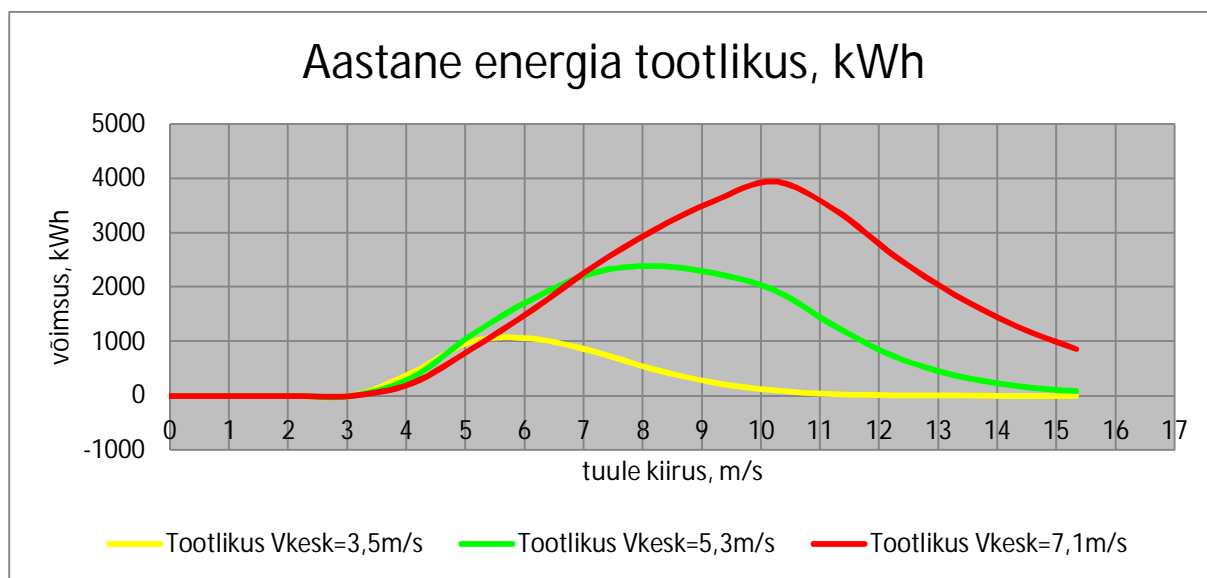
Graafik (Graafik 3.9) iseloomustab erinevate tuule kiiruste esinemise sagedust erineva keskmise tuule kiiruse korral.

Tabel 3.10 Tootlikkuse tulemused

Keskmine tuule kiirus, m/s	Tootlikus, kWh/aastas
3,5	4 166.9674
5,3	14 749.4301
7,1	25 638.0783



Graafik 3.9 Erinevate tuule kiiruste esinemise sagedus



Graafik 3.10 Aastase energia tootlikkuse sõltuvus keskmisest tuule kiirusest

Graafik (Graafik 3.10) iseloomustab energia tootlikkuse sõltuvust keskmisest tuule kiirusest.

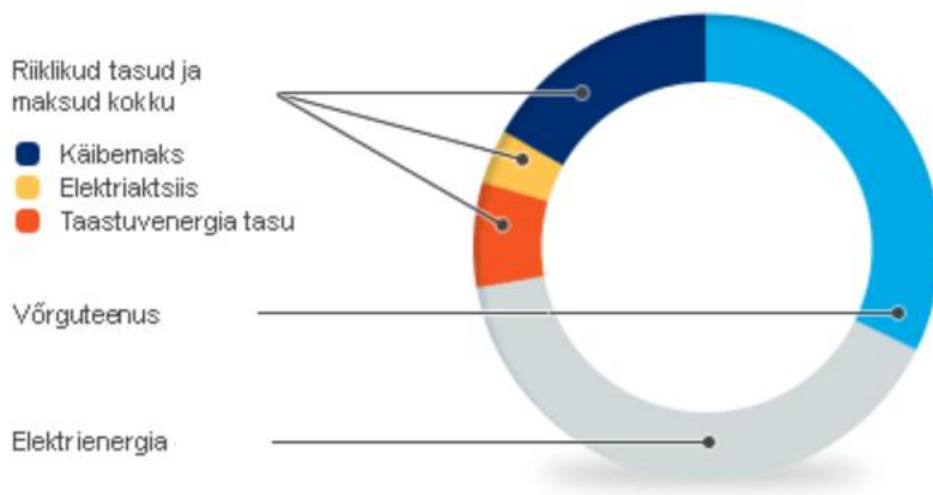
3.6 Hind

Elektrienergia hind kujuneb nõudluse ja pakkumise suhtest. Elektrienergia – kaup, mis erineb teistest toodetest selle poolest, et teda toodetakse järjepidevalt, iga ajahetk. Teda ei saa salvestada sellisel viisil, et oleks majanduslikult otstarbekas - võivad esineda katkestused elektrienergia edastamise hetkel. Ta on koguaeg kättesaadav. Elektrienergia tarbimine sõltub ajast ja ei ole võimalik jälgida, millisest jaamast sai tarbija toodetud elektrienergiat [16].

Elektrienergia hind sõltub tema töökindlusest ja kvaliteedist. Mida kvaliteetsem toode, seda kallim tootmine ja haldamine. Tuleb investeerida uutesse tehnoloogiasse ja ehitada kaasaegseid elektrijaamu. Tuleb investeerida arengusse [16].

Riikidevaheline elektrienergia ülekandmine on üks mõjutavatest faktoritest. Praegu on Eesti ühendatud Venemaa ja Lätiga. Mida suurem turg, kus on võimalik müüa elektrit, seda suurem on konkurents ning seda stabiilsem ja parem on elektri hind [16].

Kodutarbija elektrienergia hind ei koosne ainult elektrienergia hinnast. Elektrienergia arve sisaldab võrguteenus tasu, mis moodustab 40% kogu elektriarvest, elektriaktsiisi, taastuenergia tasu ja käibemaksu. Võrguettevõtte salvestab ja töötleb tarbija elektri andmed ja edastab salvestamiseks Eleringile. Müüja saab Eleringist kliendi andmed ja väljastab arve [17].



Joonis 3.5 Elektrienergia hinna kujunemine [17]

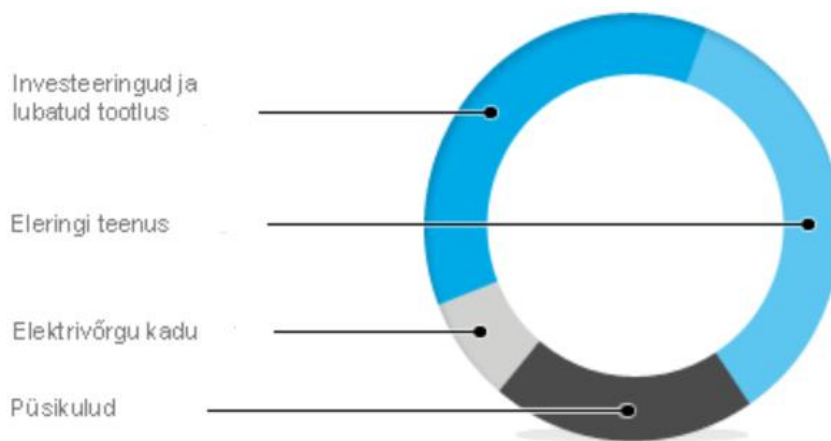
Joonis (Joonis 3.5) iseloomustab lõpptarbija elektrienergia hinna kujunemist. Elektrituru avanemisega sõltub elektrihind nõudlusest ja pakkumisest ning elektrihind kujuneb elektribörsil Nord Pool Spot [18].

Nord Pool Spot on elektribörs – füüsilise energiaga kõige suurem organiseeritud kauplemise turg. Eesti astus 15 aasta tagasi Nord Pool Spot – i süsteemihaldurina. Elektribörsi eesmärk on tagada nii klientidele kui ka tootjatele konkurentsivõimelist elektrihinda. Mida rohkem on osalejaid seda suurem turg ja seda stabiilsem ja parem elektrienergia hind. Nord Pool Spot tegutseb Põhjamaades – Rootsi, Taani, Soome ja Norra. Elektribörs on mõeldud energia hulгимüüjatele, sest tavatarbija jaoks on osalustasu väga kõrge. Elektribörsil saavad osaleda suured tootjad; tarbijad, mille tarbimine ületab aastas 2 GWh [18].

Taastuenergia tasu on toetuse lisakulu, mida lõpptarbija maksab. Alates 1. maist, 2007 aastast, eraldati võrguteenuse tasust taastuenergia tasu. Iga aasta 1. detsembriks väljastab Elering järgmise aasta taastuenergia tasu. Taastuenergia tasu sõltub järgmise aasta prognoositud taastuenergia tootmise mahust ja toetuse suuruselt. Lisaks sellele sõltub järgmise aasta tarbimise suuruselt. Taastuenergia tasu koos käibemaksuga on 1,15 eurosent/kWh [18].

Elektriaktsiis on määratud elektriaktsiisi seadusega, mida reguleerib riik. Alates 1. märtsist 2010 on elektriaktsiis käibemaksuta 0,00447 eurot kilovatt-tunni kohta [18].

Võrguteenuse tasu koosneb neljast komponendist: investeeringud, eleringi ülekandeteenus ja reaktiivenergia kulu, elektrivõrgu kadu ja püsikulud [17].



Joonis 3.6 Võrguteenustasu kujunemine [17]

Joonis (Joonis 3.6) iseloomustab võrguteenustasu kujunemist.

Arvestades kõike ülaltoodud elektrienergia hinda võib arvutada järgmise valemi (3.8) abil:

$$\text{Lõpptarbija elektrienergia hind} = [\text{kogu tarbimine kWh} \cdot (a + b + c + d)] + e \quad (3.8)$$

kus, a – on NPS tunni hind euro;

- b – on müüja marginaal €/kWh;
- c – on elektriaktsiis 0,0047 €/kWh;
- d – on taastuenergia tasu 0,0096 €/kWh;
- e – on käibemaks 20%.

Keskmine NPS tunni hind 2015 jooksul on 31,08 €/MWh ja Eesti energia marginaal on 0,0049 €/kWh.

Kasutades valemit (3.8) arvutatakse lõpptarbija elektrienergia ostu hinna.

Lõpptarbija elektrienergia hind = $(0,03108 + 0,0049 + 0,0047 + 0,0096) \cdot 1,2 = 0,0603$ €/kWh

Elektrienergia müügi hind = $(0,03108 - 0,0049) \cdot 1,2 = 0,031416$ €/kWh

Eesti mikrotootja kuni 11kW tuleb sõlmida ühe ja sama elektrimüüjaga elektriostmise ja elektrimüügi lepingut. Elektri müügi hind sõltub Nord Pool Spot börsi hinnast. Elektriostja lahutab börsi hinnast kokkulepitud marginaali. Osa elektri hinnast fikseeritakse kogu jaama elueaks 25 – 30 aastaks.

Eesti statistika järgi eelmise aasta elektrienergia hinna tõus oli 1,3% [19].

3.7 Investeeringud

Iga projekti tasuvus sõltub esialgse investeeringu suurusel. Sellepärast on tähtis kohe alguses määrata esialgne rahavoog.

Väiketuuliku püstitamine on reguleeritav ehitusseadusega. Paigaldamiseks on vaja taotleda projekteerimistingimused ja saada luba kohalikus omavalitsuses. Alates 1. juulist 2015 on projekteerimistingimuste menetlemine tasuline – riigilõiv 25 eurot.

Järgmiseks sammuks on asukoha kirjeldus. Plaanile tuleb täpselt panna tuuliku asukoht ja kinnistu piirid.

Väiketuuliku paigaldamiseks piisab üheastmelisest projektist, kus on ära määratud tuuliku tehnilised parameetrid, asukoha plaan ja kirjeldus, tuuliku sertifikaadid, elektrivõrkude plaan ja rajatise põhilahendus. Projekt peab vastama Eestis kehtestatud projekteerimisstandardile.

Tuuliku püstitamine ja tehnilised andmed peavad vastama nõuetele. Tuuliku torn peab olema kinnitatud nii, nagu tootja poolt on ettenähtud. Elamurajoonides ei tohi müratase päeval olla suurem kui 50 dB ja öösel suurem kui 40 dB. Tuulik ei tohi varjata päikest [10].

3.8 Hoolduskulud

Igat seadet on vaja hooldada. Osad kuluvad ajaga ära. Antud töös on tuuliku elueaks 20 aastat kui kasutada tuulikut normaalses töörežiimis. Selleks, et tuulik töötaks 20 aastat, on vaja teostada hooldust [20].

Antud töös pakutavat tuulikut on vaja hooldada igal aastal. Iga-aastane hooldus maksab 50 eurot. Peale kümnet aastat tuleb vahetada labad [20]. Tabel (Tabel 3.8) iseloomustab firma BAKERI tuuliku hooldus graafikut.

Tabel 3.8 Tuuliku näidis hoolduse graafik

	Iga talv	Pärast tormi	Iga aasta	Iga 5 aasta	Iga 10 aasta
Labad: jälgi, ebatavalisi moondumisi, pragusid, juhul kui leiad veendu labade korrasolekus või vaheta labad. Tasakaalust väljas olevate labade kasutamine vähendab elektrituuliku tootlikkust ja võib põhjustada elektrituuliku kahjustumise. Labade kahjustumine tähendab ka masti kõikumist pöõretel rohkem kui 90 RPM. Juhul kui täheldad ebanormaalselt suurt kõikumist tuleb elektrituulik viivitamatult peatada põhjuste selgitamiseni.	√	√		√	√
Laagrite määrimine	√		√		
Kinnituspoltide pingususe kontroll		√	√		
Elektrikaablite kontroll	√		√		
Rootori kontroll			√		
Tihendite asendamine vajadusel					√
Värvi/kaitsekihtide parandused			√		
Labade vahetus vajadusel, sõltuvalt õhu abrasiivsusest				√	
Andmeside kaabli vahetus vastavalt vajadusele				√	
Paigaldaja poolt ettenähtud lisategevused			√		

4. Tuuliku tasuvuse arvutuse meetodika

Projekti aktsepteerimise aluseks on investeeringute hinnang. Investeering on pikaajaline kapitalimahutus, mis toob kasu pikemas perspektiivis. Investeeringute puhul hinnatakse riski, kestvust ja tulu suurust tasuvuse analüüsi abil. Tasuvuse arvutuse eesmärk on hinnata investeeringu maksumuse võrdlust tulevase säästuga. Investeeringute hindamiseks kasutatakse erinevaid meetodeid. Eri algandmed mõjutavad tulemust erinevalt. Saadud tulemuste objektiivsus ja usaldusväärtus on suuresti tingitud kasutatud meetoditest. Sellest tulenevalt on tähtis vaadata läbi olemasolevaid meetodikaid investeeringute hindamiseks.

Eristatakse kahte põhilist investeeringute eelarvestamise meetodid [21, 16]:

Diskonteeritud meetodid

Diskonteerimata meetodid.

Diskonteerimata meetodist enim kasutatav on tasuvusaja meetod. Diskonteeritud meetodist enim kasutatavad on: puhas nüüdisväärtuse meetod, sisemine tulumäära meetod ja kasumiindeksi meetod.

4.1 Nüüdisväärtuse meetod NPV

Nüüdisväärtuse meetodit nimetatakse mõnikord ka võrdsete aastamaksete meetodiks. See meetod on enim kasutatav. Nüüdisväärtuse meetod võrdub iga aastase rahavoogude summaga, millest on lahutatud esialgsed investeeringud. Selles meetodis arvestatakse projektis kogu eluea jooksul tulnud kuludega ja tuludega. Meetodi tasuvus seisneb selles, et projektis tehtud investeering ja kõik kulud peavad olema väiksemad kui diskonteeritud puhas kulu. Nüüdisväärtuse meetodit saab arvutada valemi (4.1) abil [21, 16]:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^n (B_t - C_t)(P/F, i, t) = \sum_{t=0}^n F_t(P/F, i, t) = -P + \sum_{t=1}^n F_t(P/F, i, t) \quad (4.1)$$

kus, B_t ja C_t – kogutulud ja -kulutused aastal t ;

n – projekti eluiga või hindamisperiood;

i – diskontomäär %;

P – esialgne investeering €

Kui tulemusel $NPV > 0$ siis, projekt on tasuv.

Kui tulemusel $NPV < 0$ siis, projekt ei ole tasuv.

Antud töös on kogutulud: elektrimüük ja omatarbimise osakaal. Kogukulud on puudujääva elektri ostmine.

Diskonteerimismäär näitab, kui palju muutub investeeritud raha mitmete aastate jooksul. Diskontomäär valik sõltub kulu ja investeeritud kapitali olemasolust, arvestades tasakaalu omakapitali, finantseerimise ja kaasnevaid finantsriske projektis. Soovitav on hinnata, kuidas mõjutab inflatsioon ja kasutada seda reaalse intressimäära asemel [22].

Euroopa statistikaameti järgi on keskmine inflatsioonimäär Eestis viimaste 5 aastate jooksul 2,62% . Joonisel (Joonis 4.1) on esitatud Eesti inflatsioonimäära andmed aastate kohta [23].

geo	time	2011	2012	2013	2014	2015
Estonia		5.1	4.2	3.2	0.5	0.1

Joonis 4.1 Eesti inflatsioonimäära andmed aastate kohta [23]

Esialgne investeering tuuliku püstitamiseks on 40500 eurot. Selle hinna sees on tuuliku hind, ehitus, püstitamine, võrguühendamine ja transport.

Kasutades valemit (4.1) arvutatakse netorahavoogu iga aasta jaoks eraldi. Aasta kogutuludest arvutatakse välja kõik aasta jooksul tehtud kulutused. Antud töö puhul on aastased kogutulud: elektritoodangust üle jääva elektri müük võrku ja omatarbena kasutatud elektrienergia. Aastased kogukulud on: iga aastane tuuliku hooldus ja iga 10 aasta järgne labade vahetus.

Selle meetodi eeliseks on rahaväärtuse muutmise ajas ja iga aastaste rahavoogude arvestamine. Meetodi puuduseks on pikaajaline kulude ja tulude planeerimine, mis võib olla ebastabiilse majandusega raskendatud juhul kui investeerimisprojekti jooksul tehakse lisa investeering.

4.2 Lihtne tasuvusaja meetod T

T on lihtsa tasuvusaja hindamise meetod investeeringu ettepanekuks. Ta on diskonteerimata rahakäive meetod, mis on defineeritud kui ajavahemik – periood, mille jooksul projekti esialgne investeering hakkab tooma kasu. See meetod ei nõua keerukaid arvutusi, ei arvesta raha muutumist ajas ja ignoreerib rahavoogu peale tasuvust. Meetod ei võimalda jälgida tulude ja kulutuste muutumist kogu projekti vältel. Tavaliselt kasutatakse seda meetodit lühikese elueaga projektide tasuvuse hindamiseks. Pika elueaga projektides kasutatakse pigem

selleks, et vähendada detailsemat analüüsi tegemist ja lihtsustada tasuvuse arvutust. Valemi (4.2) abil arvutatakse tasuvus perioodi [21, 16, 24].

$$T = \frac{I_0}{a} \quad (4.2)$$

Kus, I_0 – on esialgne investeering €

a – on keskmine aastane makse €

Vastavalt omatarbimise osakaalule muudeti tuule keskmist kiirust, et mõjutada aastase tootlikkuse suurust.

Meetodi eeliseks on lihtsus ja seda kasutatakse müügi argumendina. Meetodi puuduseks on diskonteeritud rahavoogude mitte arvestamine, ei arvestata riske ja raha väärtust.

4.3 Tulu sisenorm IRR

IRR on tulu sisenormi meetod. Sellel meetodil otsitakse intressi määra, mille korral investeeringu maksumus võrdub diskonteeritud tuluga. Nüüdisväärtuse meetodis kasutatud diskontomäär mõjutab tasuvust. Mida suurem on diskonteerimisväärtus, seda väiksem on tasuvus. Selle meetodi eesmärk on leida selline diskontomäär, mille puhul nüüdisväärtus on võrdne nulliga. Sisenormi intressi määr on leitav valemist (4.3):

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i^*)^t} = \sum_{t=0}^n (B_t - C_t)(P / F, i^*, t) = 0 \quad (4.3)$$

Meetodi eelised on rahavoogude kasutamine, raha ajalise väärtuse arvestamine. Puuduseks on pikaajalised rahavoogude ennustused.

4.4 Kasumiindeks PI

PI – on tulude ja kulude suhete meetod, mis näitab investeeringute efektiivsust. Kasumiindeksi meetod näitab investeeritud raha tululist eelistatavust. Kasumiindeksi võib arvutada valemi (4.4) abil:

$$PI = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{C_k}{(1+i)^k}}{I_0} \quad (4.4)$$

Kus, C_k – on tulumaksujärgne rahavoog ajavahemikul k ;

i – on diskonteerimismäär;

I_0 – on esialgsed kulud

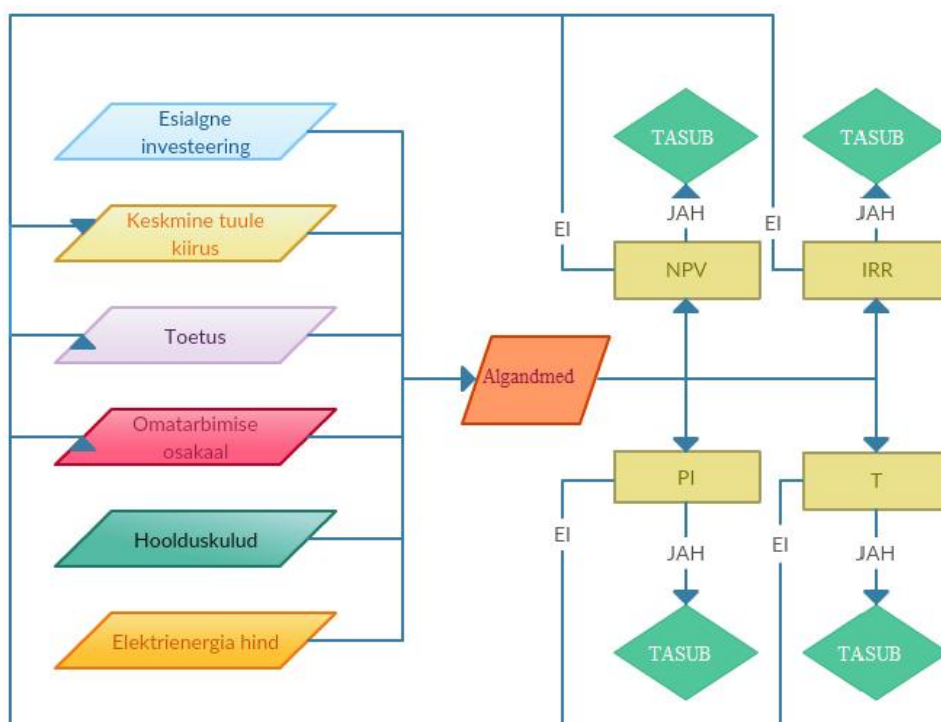
n – on projekti eluiga

Kui $PI > 1$ või võrdne 1-ga, siis projekt on aktsepteeritav. Kui $PI < 1$, siis antud investeering toodab kahjumit.

5. Modelleerimine

Modelleerimisel katsetatakse kahte stsenaariumit. Esimeses stsenaariumis kasutatakse taastuvenergia toetust elektrienergia müügist võrku. Teises stsenaariumis kasutatakse taastuvenergia toetust investeerimisel. Stsenaariumites muudetakse tuulekiirust ja omatarbimise osakaalu. Modelleerimise eesmärk on saavutada väiketuuliku tasuvus.

Joonisel (Joonis 5.1) on iseloomustatud mudeli tööpõhimõte. Algandmed muudetakse mudelis nii kaua, kuni arvutuste tulemus on tasuv.



Joonis 5.1 Mudeli tööpõhimõte

Tabelites (Tabel 5.1, 5.2) on esitatud arvutatud ja analüüsitud mudelis kasutatavad andmed.

Tabel 5.1 Modelleerimiseks vajalikud andmed

ANDMED		
Tuuliku 10 kW 18 m hind=	33 000	€
Ehitus=	5 000	€
Püstitamine=	1 500	€
Võrguühendamine=	500	€
Transport=	500	€
Tuule kiirus=	9	m/s
Toodang=	31 464	kWh/aasta

Tabel 5.2 Modelleerimiseks vajalikud andmed

ANDMED		
Elektrienergia müügi hind=	0,03	€/kWh
Elektrienergia ostu hind=	0,060336	€/kWh
Iga aastased hoolduskulud=	50	€/aasta
Toetus=	0,0537	€/kWh
Eluiga=	20	aastat
Diskontomäär=	2,62	%
süsteemi degradeerumine=	0,5	%/aasta
elektri hinna tõus aastas=	1,3	%/aasta
Omatarbimise osakaal=	75%	%/aasta

Tabelis (Tabel 5.3) on esitatud 2016 aasta kohta tasuvuse arvutamiseks vajalikud vajalikud andmed . Mudelis arvutatakse kogu tuuliku eluea jaoks.

Tabel 5.3 Tasuvuse arvutuse andmed

eluiga, aastad	kokku	1
aasta		2016
tarbimine kWh/aasta		4 487,07
Elektri ostu hind €/kWh		0,0603
Elektri müügi hind €/kWh		0,03
Elektrikulu 20 aastaks €/aasta	6 138,51	270,73
Toodang kWh/aastas		32 171
Omatarbimise osakaal kWh/aastas		4 262,72
Puudujääv elekter kWh/aastas		224,35
Toodangust ülejääv elekter kWh/aastas		27 908
Omatarbimise osakaalu €/aasta	5 831,59	257,20
Taastuenergia toetus €/kWh		0,0537
Puudu jääva elektri ost €/aasta		13,54
Toodangu ülejääva elektri müük toetusega €/aasta		2335,88
Toodangu ülejääva elektri müük ilma toetuseta €/aasta	17 929,48	837,23

Tabel 5.4 Tasuvuse arvutuse tulemused toodetud elektrienergia müügi toetusega

	Kokku	
Aasta, eluiga		2016
Esialgne investeering	40 500,00	
Netorahavoog	-40 500,00	2 529,54
Diskonteeritud rahavoog		2 464,96
NPV	-8 513,17	
NPV (kontroll)	-8 513,17	
Tasuvusaeg T	20,31	
Diskonteeritud tasuvusaeg		-42 964,96
IRR	-0,0017	
PI	0,79	

Tabel 5.5 Tasuvuse arvutuse tulemused esialgse investeeringu toetuse puhul

Parameeter	Kokku	
Aasta, eluiga		2016
Esialgne investeering	40 500,00	
Investeeringu toetus 70%	28 350,00	
Omafinantseering 30%	12 150,00	
Netorahavoog	-12 150,00	1030,89
Diskonteeritud rahavoog		1004,57
NPV	5 024,57	
NPV (kontroll)	5 024,57	
Tasuvusaeg T	10,82	
Diskonteeritud tasuvusaeg		-13 154,57
IRR	0,0650	
PI	0,42	

6. Tulemused

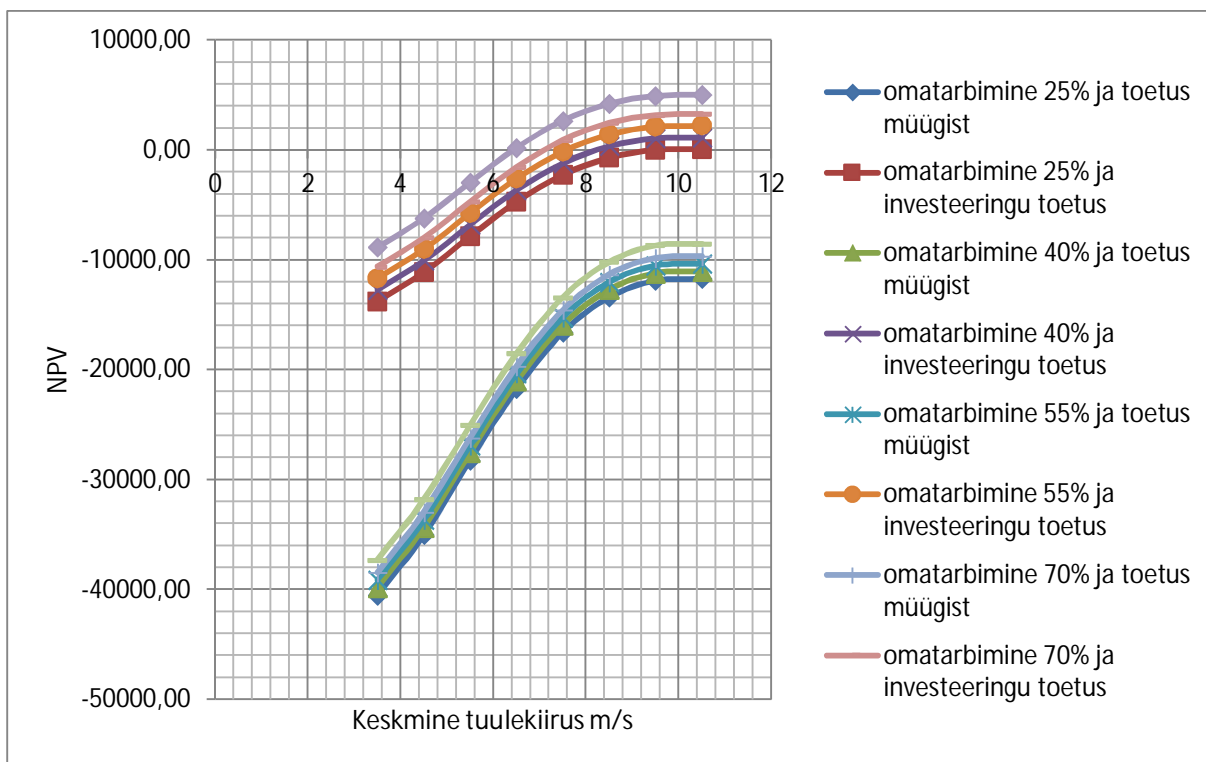
Mudelis simuleeritakse erinevad stsenaariumid, kus suurendatakse tarbija omatarbimise osakaalu, võetakse arvesse toetust ja suurendatakse keskmist tuule kiirust.

Tabelis (Tabel 6.1) on esitatud näidisarvutuste tulemused katsetatud stsenaariumi kohta, kus omatarbimise osakaal on 55%.

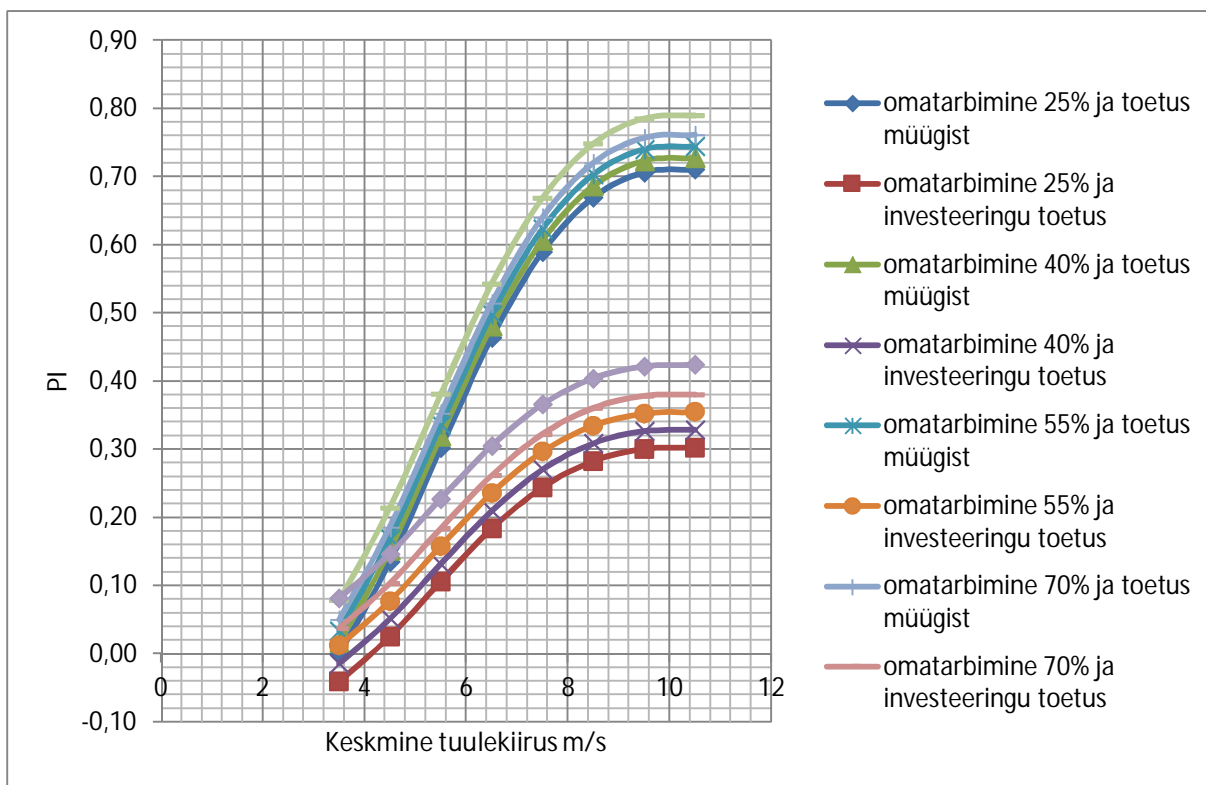
Tabel 6.1 Modelleerimise tulemused (omatarbimise osakaal on 55%)

Toetus elektrimüügist võrku					
Omatarbimise osakaal, %	Keskmine tuule kiirus, m/s	NPV	T	IRR, %	PI
55%	3,5	-39 146,13	489,32	-0,24	0,03
55%	4,5	-33 645,04	95,61	-0,14	0,17
55%	5,5	-26 878,00	48,05	-0,09	0,34
55%	6,5	-20 342,21	32,46	-0,05	0,50
55%	7,5	-15 238,92	25,90	-0,03	0,62
55%	8,5	-12 013,18	22,96	-0,02	0,70
55%	9,5	-10 515,27	21,81	-0,01	0,74
55%	10,5	-10 344,13	21,69	-0,01	0,74
Esialgse investeeingu toetus 70%					
Omatarbimise osakaal, %	Keskmine tuule kiirus, m/s	NPV	T	IRR	PI
55%	3,5	-11 667,08	383,83	-0,19	0,01
55%	4,5	-9 016,20	59,33	-0,09	0,08
55%	5,5	-5 755,29	29,08	-0,03	0,16
55%	6,5	-2 605,81	19,49	0,00	0,24
55%	7,5	-146,62	15,49	0,02	0,30
55%	8,5	1 407,80	13,72	0,04	0,33
55%	9,5	2 129,62	13,02	0,04	0,35
55%	10,5	2 212,09	12,95	0,04	0,35

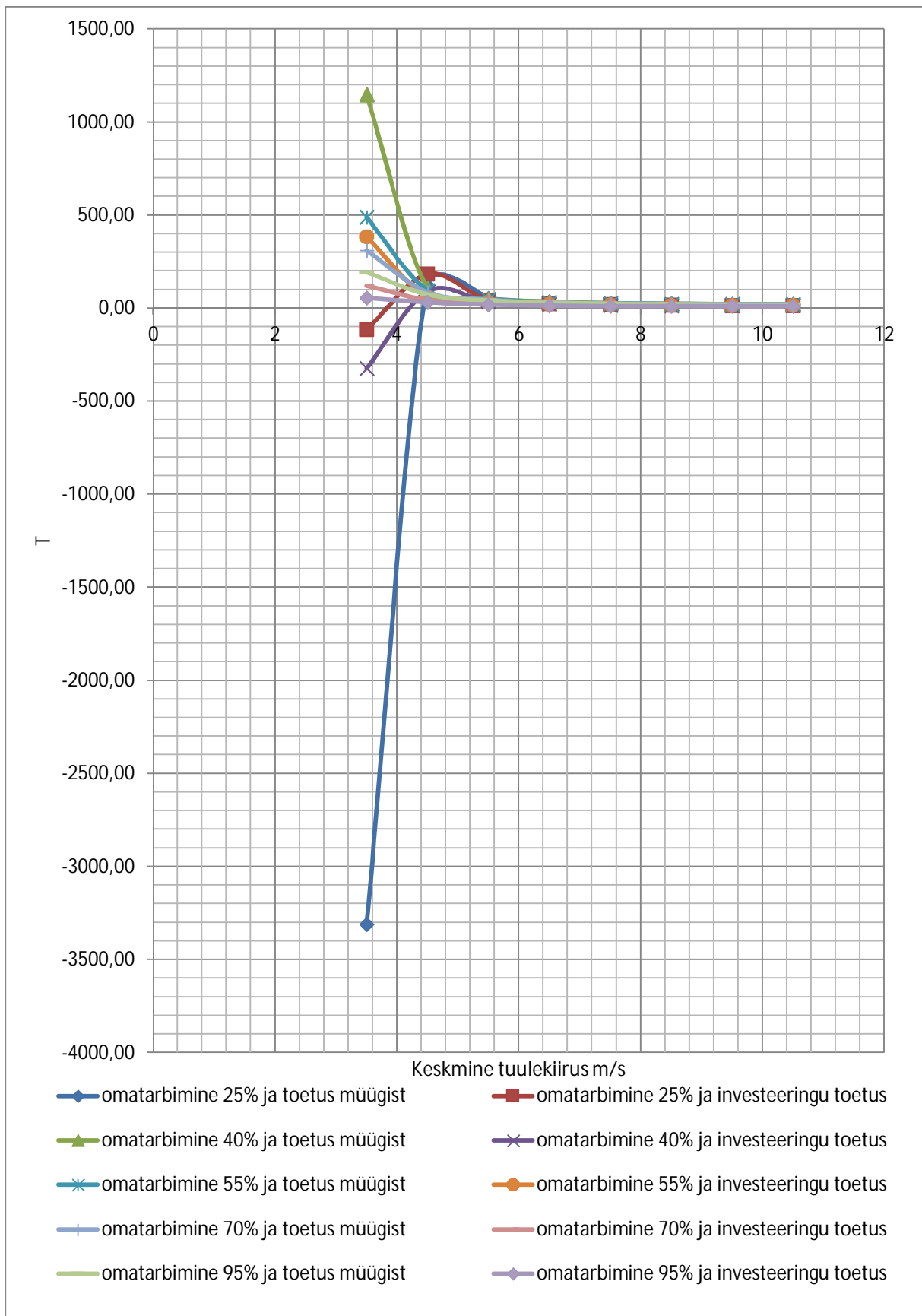
Arvutatud tulemuste põhjal on tehtud graafikud (Graafik 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5). Graafikutelt on nähtav, et kui toetust saadakse ainult elektri müügist võrku, siis tasuvust ei ole võimalik saada. Tasuvust võib saavutada ainult siis, kui saadakse esialgse investeeingu jaoks toetust.



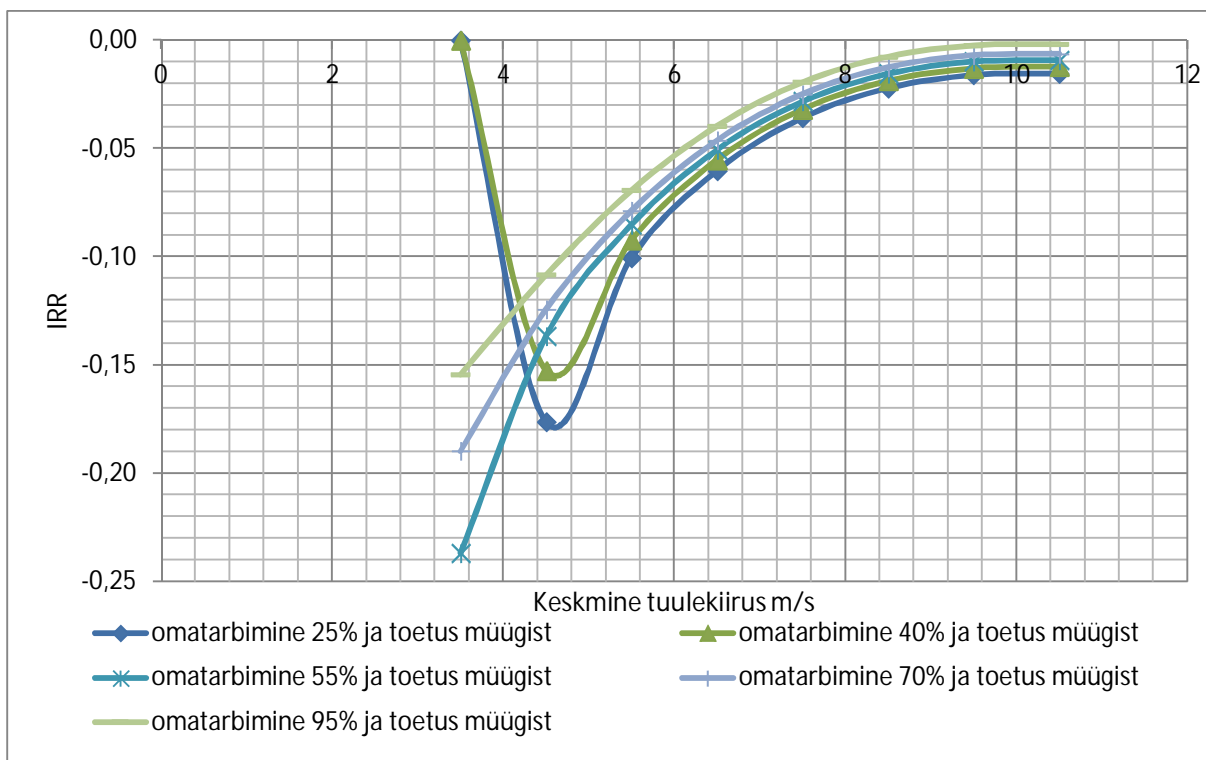
Graafik 6.1 Nüüdisväärtuse tulemused erineva omatarbimise osakaalu ja tuule kiiruse korral (investeeringu toetus 70% ja toetus müügist on 0,0537€/kWh)



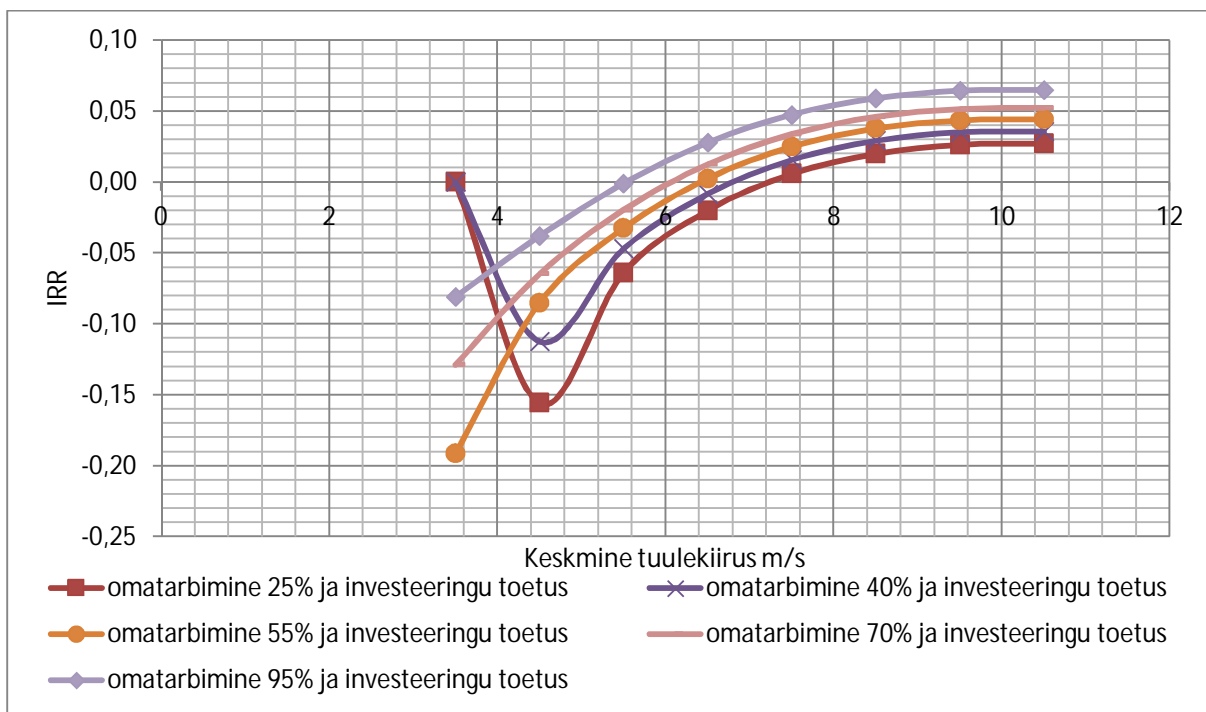
Graafik 6.2 Kasumi indeksi tulemused erineva omatarbimise osakaalu ja tuule kiiruse korral (investeeringu toetus 70% ja toetus müügist on 0,0537€/kWh)



Graafik 6.3 Lihtsa tasuvusaja tulemused erineva omatarbimise osakaalu ja keskmise tuule kiiruse korral



Graafik 6.4 Tulu sisenormi tulemused erineva omatarbimise osakaalu ja keskmise kiiruse korral (toetus müügist on 0,0537€/kWh)



Graafik 6.5 Tulu sisenormi tulemused erineva omatarbimise osakaalu ja keskmise kiiruse korral (investeeringu toetus 70%)

Tulemuste põhjal on nähtav, et NPV tulemus on suurem nullist siis, kui tarbija omatarbimise osakaal on 25% ja keskmine tuulekiirus aastas on 9,5 m/s; kui tarbija omatarbimise osakaal on 40% ja keskmine tuulekiirus aastas on 8,5 m/s; kui tarbija omatarbimise osakaal on 55% ja keskmine tuulekiirus aastas on 8,5 m/s; kui tarbija omatarbimise osakaal on 70% ja keskmine tuulekiirus aastas on 7,5 m/s.; kui tarbija omatarbimise osakaal on 95% ja keskmine tuulekiirus aastas on 6,5 m/s. NPV tulemus on suurem ainult selles projektis, kus on võimalik saada esialgse investeeringu toetust. Sellises projektis, kus toetust saadakse ainult toodetud elektri müügist, ei ole võimalik saada positiivset NPV tulemust.

Kõige suurem tasuvuse periood on 1148 aastat ja kõige lühem tasuvuse periood on 11 aastat. Lihtne tasuvusaja meetod ei võta arvesse rahamuutmist ajas, seetõttu on tema tulemus rohkem informatiivne.

7. Kokkuvõtte

Lõputöö eesmärk on leida sellist, keskmise tuulekiiruse ja omatarbimise osakaalu, mille juures väiketuuliku püstitamine on tasuv – arvutada tasuvust. Tulemuste väärtus sõltub suurel määral sellest, milliseid muutujaid on arvestatud.

Tuuliku tasuvust mõjutavad paljud faktorid, enim aga mõjutavad: turbulents, puhangud, keskmine tuulekiirus, omatarbimise osakaal, tuuliku hoolduskulud, väiketuuliku tootlikkus, tuuliku torni kõrgus, esialgne investering, valitud tuuliku asukoht, toetused ja elektrienergia müügi- ja ostu hinnad.

Kõik need tegurid sõltuvad omakorda: tuuliku tehnilistest parameetritest, võimsuskõverast, kvaliteedist, tehnoloogiast ja tuuliku võimalustest.

Mõnede faktorite prognoosimiseks on tähtis kasutada matemaatilise seoseid. Turbulentsi mõju on võimalik arvutada valemi abil. Puhangute mõju sõltub tuuliku reguleerimise võimalusest. Omatarbimise osakaal sõltub tuule esinemise sagedusest, tuule kiirusest ja tarbija vajadusest. Hoolduskulud sõltuvad tuuliku kvaliteedist ja töörežiimist. Tuule esinemissagedust on võimalik määrata Weibull-i jaotuse abil. Kõik need muutujad on seotud oma vahel. Osa nendest muutujatest on võimalik liigikaudselt hinnata, osa saab hinnata kasutades arvutusi ja osa saab mõõta.

Kui kõik tähtsad mõjurid on määratud, on tähtis leida võimalikult täpne tasuvusarvutuse meetod - see peab olema selline, millele on võimalik toetuda ja mida saab usaldada. Antud töös on valitud neli tasuvuse arvutuse meetodit: NPV; T, PI ja IRR. Iga meetod omab oma väärtust. Tuuliku tasuvuse otsustamise aluseks oli võetud NPV tulemused.

Meetodid ja korjatud andmed – tasuvuse muutujad moodustavad mudeli, mille abil on võimalik prognoosida ja analüüsida tuuliku tasuvust teades mingisuguse faktori või faktorite muutmist.

Modelleerimise tulemus näitab, et väiketuuliku tasuvust on võimalik saavutada siis, kui esialgse investeeringu toetus on 70%. Lisaks sellele on tähtis keskmine tuulekiirus ja tarbija omatarbimise osakaal. Tuulekiiruse ja tarbija omatarbimise osakaalu vahel on seos. Väiketuuliku tasuvuseks võib tarbija minimaalne omatarbimise osakaal olla 25%, aga minimaalne keskmine tuulekiirus peab olema 9,5 m/s. Kui tarbija omatarbimise osakaal suureneb, siis keskmine tuulekiirus võib väheneda. Väiketuuliku tasuvuseks võib minimaalne

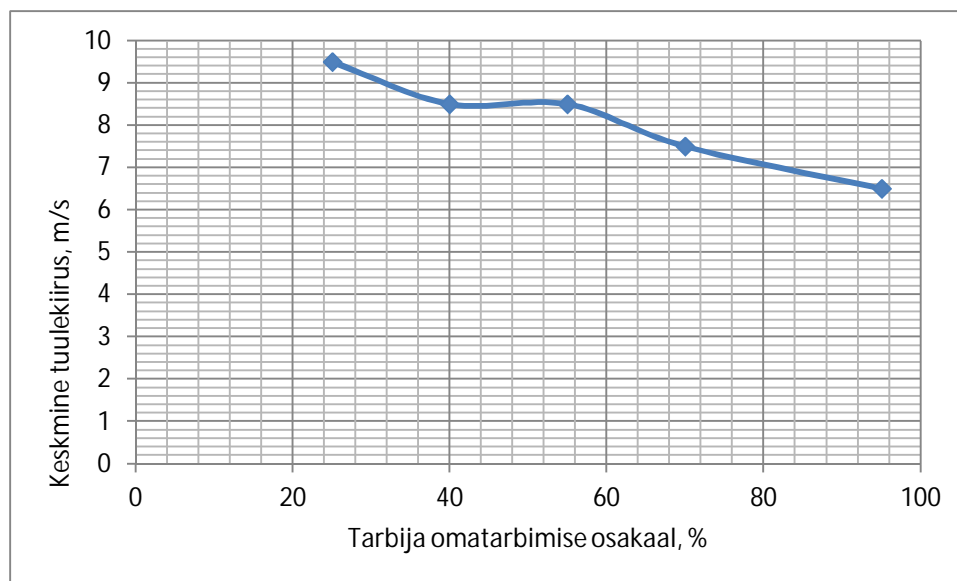
keskmise tuulekiirus olla 6,5 m/s, sellisel juhul peab tarbija omatarbimise osakaal olema 95%.

Tabelis (Tabel 7.1) on esitatud modelleerimise parameetrid, mille juures väiketuuliku püstitamine on tasuv.

Tabel 7.1 Tasuvuse parameetrid

Esialgse investeeringu suurus	Keskmine tuulekiirus, m/s	Tarbija omatarbimise osakaal, %
70%	9,5	25
	8,5	40
	8,5	55
	7,5	70
	6,5	95

Tulemuste põhjal on tehtud graafik (Graafik 7.1), mis illustreerib tarbija omatarbimise osakaalu ja keskmise tuule kiiruse vahelist seost.



Graafik 7.1 Tarbija omatarbimise osakaal ja keskmise tuulekiiruse seos (NPV tulemus on suurem kui 0)

Saadud mudelit on võimalik kasutada iga väiketuuliku tasuvuse arvutuse jaoks, kui on vajadus, siis lisada muud tuuliku töötamist mõjutavaid faktoreid mudelisse. Mõjurid määravad mudeli keerukust ja täpsust. Sõltub kui suurt täpsust on vaja saavutada. Mudelisse võib lisada temperatuuri mõju, õhurõhu, õhu tiheduse, jäätuvuse, sademete sageduse jne.

Saadud mudeli abil on võimalik ehitada veel täpsemat mudelit. Kõik sõltub tuulikust, asukohast ja tingimustest, kus tuulik peab töötama.

Kirjandus

- [1] D. Chiras, WIND POWER Basics, Kanada: New Society Publishers, 2010.
- [2] S. Gsäger ja J. Pitteloud, Small Wind World Report 2014, Bonn: World Wind Energy Association, 2014.
- [3] E. Jõgisu, K. Keis, J. Laht ja J. Kleesmaa, Väikeste elektrituulikute pakettlahendused, Tallinn: Estivo, 2011.
- [4] T. Al-Shemmeri, Wind Turbines, Stafford: Ventus Publishing ApS, 2010.
- [5] A. Hemami, Wind Turbine Technology, New York: Cengage Learning , 2012.
- [6] D. Reinemann ja J. Heinzen, „How Do Wind Turbines Generate Electricity?“, Midwest Rural Energy Council, Madison, 2014.
- [7] T. B. W. E. Association, „Wind Turbine Technology“, Kent Art Printers, London, 2005.
- [8] N. Fichaux ja H. Kruse, „Wind Energy The Facts Part I“, Wind Energy Association , United Kingdom, 2007.
- [9] F. P. G. M. A. T. M. P. Jesús María Pinar Pérez, „Wind turbine reliability analysis“, Elsevier, kd. 23, pp. 463-472, 2013.
- [10] E. Jõgisu, K. Keis, J. Laht ja J. Kleesmaa, „Väikeste elektrituulikute pakettlahendused“, AF-ESTIVO AS, Tallinn, 2011.
- [11] E. T. Assotsiatsioon, „Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon“, Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tuuleenergia.ee/>. [Kasutatud 21 September 2001].
- [12] T. Kasonen, „Eraisikute võimalused ja valikud tuulest elektri tootmisel“, %1 *Kuidas kasutada taastuvenergiat uutes*, Tallinn, 2012.
- [13] T. E. OÜ, „Technical specification - TUGE® 10“, TUGE Energia OÜ, Tallinn, 2015.
- [14] T. Kasonen, „Väiketuulikud toovad elektritootmise inimestele lähedale“, Tuuleenergia Assotsiatsioon, Tallinn, 2012.

- [15] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, New Jersey: Wiley & Sons Inc, 2004.
- [16] J. Valtin, Energiasüsteemide ökonoomika, Tallinn: Tallinna Tehnika Ülikool, 2013.
- [17] Elektrilevi, „elektrilevi,“ elektrilevi, 17 Aprill 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elektrilevi.ee/>.
- [18] Elering, „Elering,“ Elering, 17 Aprill 2016. [Võrgumaterjal]. Available: www.elering.ee.
- [19] K. Pöder, Eesti statistika aastaraamat, Tallinn: Ofset OÜ, 2015.
- [20] TUGE, „TUGE,“ TUGE, Aprill 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tuge.ee/>.
- [21] E. Abel, „Tasuvuse arvutus,“ Tallinna Tehnika Ülikool, Tallinn, 2012.
- [22] M. Ragheb, Wind power systems Harvesting the wind, Urbana: University of Illinois, 2015.
- [23] Eurostat, „Eurostat,“ Eurostat, Mai 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat>.
- [24] V. V. S. ja S. , „Wind Energy Cost and Feasibility of 2 MW Wind Power Project,“ Department on Unconventional Energy Sources and Electrical Engineering, Maharashtra, 2003.
- [25] M. Robinson, P. V. ja R. T. , Wind Energy Technology: Current Status and R&D Future, Kalifornia: Natinal Renewable Energy Labaratory, 2008.
- [26] H. V. Lopez, „The Illusion of Power Curves,“ Delft University of Technology , Delft, 2014.
- [27] W. D. Lubitz, „Impactof ambient turbulence on performance of a small wind turbine,“ Wind Energy Application, Guelph, 2011.
- [28] J.W.Wagenaar ja P.J.Eecen, „Dependence of Power Percormance on Atmospheric Conditions and Possible Corrections,“ ECN, Brussels, 2011.