

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**UUSIUTUVAN ENERGIAN POTENTIAALIN
ALUEELLINEN VUOSIJAKAUMA**

**REGIONAL ANNUAL DISTRIBUTION OF RENEWABLE
ENERGY POTENTIAL**

Lappeenrannassa 8.6.2020
Jaakko Tiainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Jaakko Tiainen

Uusiutuvan energian potentiaalin alueellinen vuosijakauma

Kandidaatintyö 2020

Tarkastaja: Päivi Sikiö

Ohjaaja: Päivi Sikiö

29 sivua, 12 kuvaa, 3 taulukkoa ja 3 liitettä

Hakusanat: tuulivoima, aurinkosähkö, biomassa, EnergyPLAN, tuntijakauma

Keywords: wind power, solar photovoltaic, biomass, EnergyPLAN, distribution

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää uusiutuvan energian potentiaaliin vaikuttavia tekijöitä, esitellä työkaluja potentiaalin tarkasteluun sekä tapa määrittää aurinkosähkön ja tuulivoiman tuotannon vuosijakauma, jota voidaan käyttää energiajärjestelmän mallintamisessa EnergyPLAN-ohjelmalla. Tuulivoiman ja aurinkosähkön lisäksi tarkastelu on rajattu biomassoihin ja varsinkin puuperäisiin biomassoihin, jotka ovat merkittävimpiä uusiutuvan energian lähteitä Suomessa.

Uusiutuvan energian potentiaaliin vaikuttaa alueellinen ja ajallinen vaihtelu. Potentiaalin tarkasteluun on monia eri työkaluja kuten Suomen Tuuliatlas tuuliolojen tarkasteluun, säteilykartat ja PVGIS auringonsäteilyn määrän ja aurinkosähkön tuotannon arviointiin sekä verkosta ladattavat säädätkä esimerkiksi tuulen nopeuksille ja säteilymäärille. Biomassan potentiaalin tarkasteluun soveltuu Biomassa-atlas. Näiden työkalujen avulla määritetään vuosijakaumat tuulivoiman ja aurinkosähkön tuotannolle. Menetelmät, joita käytetään, ovat yksinkertaiset ja myös lukija voi käyttää niitä omiin tarkoituksiinsa. Lukija voi käyttää myös mallina työssä käytettävää tapaa biomassan potentiaalin tarkasteluun.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 2 | UUSIUTUVAN ENERGIAN LÄHTEET | 7 |
| 2.1 | Tuuli | 8 |
| 2.1.1 | Tuulivoima Suomessa | 10 |
| 2.2 | Aurinko | 10 |
| 2.3 | Biomassa | 12 |
| 3 | TYÖKALUJA UUSIUTUVAN ENERGIAN POTENTIAALIN TARKASTELUUN . | 13 |
| 3.1 | Suomen Tuuliatlas | 14 |
| 3.2 | Työkalut säteilyolosuhteille | 15 |
| 3.3 | Ilmatieteen laitoksen säädata | 17 |
| 3.4 | Biomassa-atlas | 17 |
| 4 | UUSIUTUVAN ENERGIAN POTENTIAALI ESIMERKKIALUEELLA | 18 |
| 4.1 | Tuuli | 18 |
| 4.2 | Aurinko | 23 |
| 4.3 | Biomassa | 26 |
| 5 | YHTEENVETO | 29 |
| | LÄHTEET | 30 |
| | Liite 1. Biomassa-atlaksen biomassoja | 34 |
| | Liite 2. Tuulen vuosijakauma Matlabilla | 37 |
| | Liite 3. Esimerkkiotteet tuulivoiman ja aurinkosähkön vuosijakaumista | 38 |

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

| | | |
|----------------------|------------------------|--------------------------|
| <i>AEP</i> | vuosituotanto | MWh |
| <i>CF</i> | kapasiteettikerroin | |
| <i>E</i> | sähköenergia | MWh |
| <i>l</i> | höyrystymislämpö | MJ/kg |
| <i>M</i> | kosteus | % |
| <i>m</i> | massa | kg |
| <i>P</i> | teho | MW |
| <i>PR</i> | tehokerroin | |
| <i>q</i> | polttoaineen lämpöarvo | MJ/kg, MJ/m ³ |
| <i>t</i> | aika | s |
| <i>U</i> | tuulen nopeus | m/s |
| <i>V</i> | tilavuus | m ³ |
| <i>W</i> | energiasisältö | MWh |
| <i>z</i> | korkeus | m |
| <i>z₀</i> | pinnan karheus | m |

Kreikkalaiset

| | | |
|----------|--------------------------|-------------------|
| <i>α</i> | potenssilain eksponentti | |
| <i>ρ</i> | kuiva-tuoretiheys | kg/m ³ |

Alaindeksit

| | |
|-----|------------------------|
| ar | saapumistila |
| d | kuiva |
| net | tehollinen (lämpöarvo) |
| r | referenssi |
| w | tuulivoimala |

Lyhenteet

| | |
|------|------------------------------|
| CSP | concentrating solar power |
| HAWT | horizontal axis wind turbine |

| | |
|-------|--|
| JRC | Joint Research Centre |
| Luke | Luonnonvarakeskus |
| PVGIS | Photovoltaic Geographical Information System |
| SUT | solar updraft tower |
| SVT | Suomen virallinen tilast |

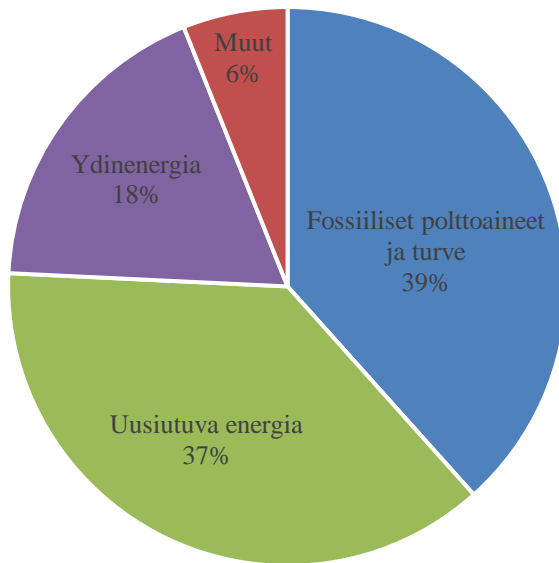
1 JOHDANTO

Euroopan unionin vuoden 2020 ilmasto- ja energiapaketissa on listattu tavoitteiksi kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 20 prosenttia vuoden 1990 tasosta, uusiutuvien energianlähteiden osuus 20 prosenttia energian loppukulutuksesta ja energiatehokkuuden nostaminen 20 prosentilla. Vuodelle 2030 tavoitteet ovat vähintään 40 prosenttia pienemmät kasvihuonekaasupäästöt, uusiutuvien energianlähteiden osuus vähintään 32 prosenttia ja energiatehokkuuden nostaminen vähintään 32,5 prosenttia. (Euroopan komissio.)

Suomen kansallisessa ilmasto- ja energiavoitteessa vuodelle 2020 ja 2030 sekä kasvihuonekaasupäästöille ja energiatehokkuudelle on asetettu EU-tason tavoite. Uusiutuville energianlähteille osuus on nostettu 38 prosenttiin vuonna 2020 ja 50 prosenttiin vuonna 2030. (Ilmasto-opas.fi 2019.)

Tilastokeskuksen tietojen mukaan vuonna 2019 uusiutuvien energianlähteiden osuus energian kokonaiskulutuksesta oli 37 % (141 TWh) kokonaiskulutuksen ollessa 378 TWh. Kuvassa 1.1 on esitetty vuoden 2019 energian kokonaiskulutus energia lähteittäin prosentteina. Suomen kansallinen tavoite uusiutuvien energianlähteiden osalta vuodelle 2020 oli siis jo lähes saavutettu 2019. (Tilastokeskus 2020a.)

Jotta vastaavaa kehitystä voidaan jatkaa ja lisätä uusiutuvan energian käyttöä tulevaisuudessa, on hyvä osata suunnitella tulevaisuuden energiajärjestelmiä. Tällaiseen suunnitteluun voidaan käyttää esimerkiksi EnergyPLAN-ohjelmaa, joka on ladattavissa sivulta energyplan.eu. Sillä voidaan tuottaa vaihtoehtoisia ratkaisuja alueelliselle energiajärjestelmälle, ottamalla huomioon uusiutuvien energialähteiden alueellisen saatavuuden ja ajallisen vaihtelun.

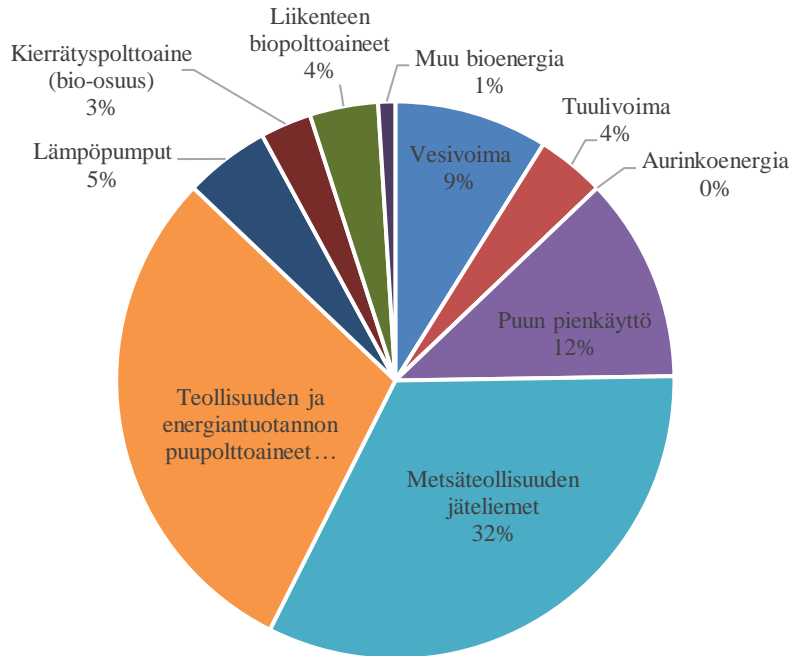


Kuva 1.1: Energian kokonaiskulutus energialähteittäin 2019 (Tilastokeskus 2020a).

Tässä työssä ei keskitytä itse EnergyPLANin käyttöön, vaan uusiutuvien energianlähteiden saatavuuteen ja vaihtelevuuteen ja näitä käsittelevän datan hankintaan. EnergyPLANilla on kuitenkin omat vaatimukset tälle datalle, esimerkiksi tuuli-, aurinko- ja aaltovoiman tuotannolle tarvitaan vuoden jokaisen tunnin kattava jakauma. Biomassan osalta tarvitaan enemmän tietoja, jos halutaan eritellä nestemäisten ja kaasumaisten biopolttoaineiden osuutta sähkön ja lämmön tuotannossa. Uusiutuvien energianlähteiden tarkastelu on rajattu auringonsäteilyyn, tuuleen ja biomassaan. Työssä tarkastellaan näitä energianlähteitä, niiden vaihtelevuutta ja käyttöä Suomessa, sekä työkaluja, joilla voidaan tarkastella uusiutuvan energian alueellista potentiaalia. Lopuksi näitä työkaluja käytetään esimerkkialueen uusiutuvan energian potentiaalın tarkasteluun sekä tuulivoiman ja aurinkosähkön vuosijakauman tarkasteluun. Biomassan osalta esitellään lähialueilla saatavilla olevia biomassoja ja niiden energiamääriä.

2 UUSIUTUVAN ENERGIAN LÄHTEET

Vuonna 2019 uusiutuvien energianlähteiden osuus Suomen kokonaisenergian kulutuksesta oli 37 %. Uusiutuvien energianlähteiden käyttö vuonna 2019 on esitetty kuvassa 2.1. Vaikka aurinkoenergian osuus on 0 %, aurinkoenergia tuotantoa oli noin 204 GWh. Verrattuna esimerkiksi tuulivoimaan (6 TWh) tai uusiutuviin yhteensä (141 TWh) aurinkoenergian osuus on lähes merkityksettömän pieni. (Tilastokeskus 2020b.)



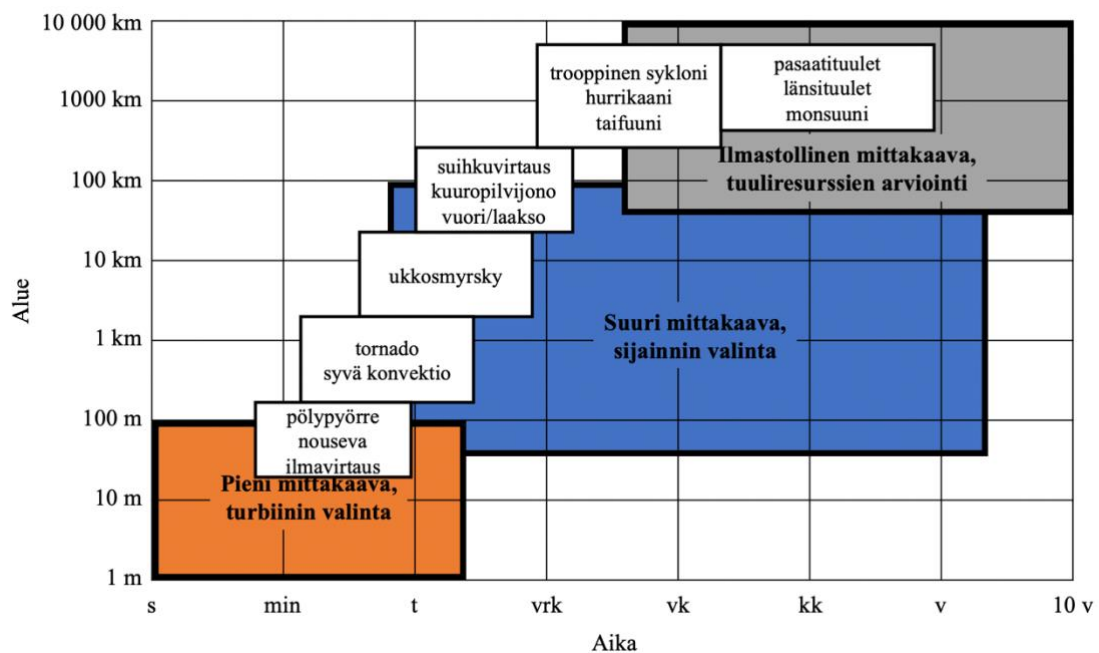
Kuva 2.1: Uusiutuvien energianlähteiden käyttö Suomessa 2019 (Tilastokeskus 2020b).

2.1 Tuuli

Tuuli on uusiutuva energianlähde, joka on peräisin auringonsäteilystä ja Maan pyörimisestä. Auringonsäteily lämmittää maapallon pintaa, josta osa säteilystä heijastuu takaisin ilmakehään. Maan pinta lämmittää ilmaa myös johtumisen ja konvektion kautta. Auringonsäteilyn epätasainen jakautuminen maan pinnalla ja pinnan vaihtelu aiheuttavat ilmakehän epätasaisen lämpenemisen, synnyttäen lämpötila-, tiheys- ja paine-eroja. Näiden paine-erojen tasoittuessa syntyy tuuli, johon vaikuttaa myös Maan pyörimisestä aiheutuvat coriolisvoimat. Paikallisesti tuuleen vaikuttaa sijainti maapallolla ja ympäröivä maasto, kuten vuoret. (Goswami & Kreith 2017, 137 – 138.)

Tuuli vaihtelee alueellisesti, riippuen ympäröivän maaston muodoista ja sijainnista maapallolla. Alueellisen vaihtelun lisäksi tuuliolot vaihtelevat ajallisesti: vuosittain, kuukausittain, päivittäin ja hetkittäin. Vuodenaikojen tai kuukausien väliset erot voivat kuitenkin toistua vuosittain, jonkinlaisella hajonnalla. Tuulioloja voidaan tarkastella eri tasoilla, eri tarkoituksia varten. Tuuliolojen tarkastelun mittakaavat on esitetty kuvassa 2.2. Ilmastollisella tasolla arvioidaan tuuliresursseja viikoista useisiin vuosiin kestäväällä

seurannalla kymmenistä kilometreistä kymmenen tuhannen metrin tarkkuuteen. Tästä seuraava tarkempi taso on suuri mittakaava, joka on tarkoitettu tuulivoimalan tai -puiston alueen valintaan. Pienessä mittakaavassa tarkastelu on hyvin tarkkaa, jotta voidaan valita sopiva tuuliturbiini, joka kestää sijainnilla ilmenevät rasitukset. (Manwell et al. 2009, 24 – 33.)



Kuva 2.2: Tuuliolojen tarkastelun mittakaava (Manwell et al. 2009).

Tuuli on joka puolella Maata saatavilla oleva luonnonvara, jota on aikojen saatossa hyödynnetty muun muassa purjehtimisessa ja tuulimyllyissä. Esimerkkinä ensimmäisistä sähköä tuottavista tuuliturbiineista voidaan käyttää Charles Brushin rakentamaa voimalaa Ohiossa 1888. 1900-luvun alkupuolella rakennettiin muutamien kymmenien kilowattien tuulivoimaloita ja toisen maailmansodan jälkeen Tanskassa käynnistettiin 200 kW tuuliturbiini. Tällä hetkellä moderneista turbiinimalleista yleisin on nostevoimaan perustuva vaaka-akselinen malli, HAWT (horizontal axis wind turbine). (Manwell et al. 2009, 2 – 16.) Turbiineita on myös pystyakselisia ja turbiineja voidaan luokitella myös toimintaperiaatteen mukaan. Tuulivoimaloita voidaan rakentaa maalle tai merelle ja tyypillisesti meritulivoimalat ovat suurempia ja teholtaan jopa yli 10 MW, kun suurimpien maatuulivoimaloiden teho on lähellä 5 MW. (Suomen Tuulivoimayhdistys.)

2.1.1 Tuulivoima Suomessa

Vuonna 2019 tuulivoiman osuus Suomen kokonaisenergian kulutuksesta oli 1,6 % ja tuulivoimatuotanto oli kasvanut edellisestä vuodesta 1,9 % ja vastaavasti vuonna 2018 tuulivoimatuotanto kasvoi 22 % (Tilastokeskus 2020c). Koska sähkön hinta on niin matala, on tuulivoimatuotantoa kasvatettu tukijärjestelmillä. Marraskuussa 2017 suljettiin syöttötariffijärjestelmä uusilta voimalaoilta. Tämän järjestelmän tarkoituksena on varmistaa tuulisähkölle takuuhinta 12 vuoden ajaksi, jotta tuulivoima olisi tuottajalle kannattavaa. Keväällä 2019 otettiin käyttöön uusi tukijärjestelmä, premiojärjestelmä, uusiutuvalla energialle. Premiojärjestelmässä on tilaa enintään 1,4 TWh vuosituotannolle ja järjestelmään haettiin tarjouskilpailun kautta. Kaikki järjestelmään hakeneet ja valitut olivat tuulivoimahankkeita. Tässäkin järjestelmässä tukea maksetaan 12 vuoden ajan. (Motiva 2019.)

Tuulivoimaloiden rakentaminen on kasvanut Suomessa tasaisesti viime vuosina. Poikkeuksena on kuitenkin 2018, jolloin ei rakennettu uusia voimaloita, koska niille ei ollut olemassa tukia. Vuonna 2019 tuulivoimaloita asennettiin 56 kappaletta, yhteensä 243 MW. Samana vuonna tuulivoimatuotantoa oli 6 TWh asennetun kumulatiivisen kapasiteetin ollessa 2 284 MW. Yhteensä tuulivoimaloita oli 754 kappaletta. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2020.)

2.2 Aurinko

Maapallolle saapuu auringonsäteilyä 170 000 TW Auringon kokonaistehon ollessa $3,8 \cdot 10^{14}$ TW. Maapallolle tulevasta säteilystä 30 % heijastuu takaisin avaruuteen, 47 % lämmittää maata, merta ja ilmakehää ja 23 % kuluu haihduttamiseen. Hyvin pieni osa säteilytehosta kuluu myös fotosynteesiin. Maanpinnalle saapuva säteily jaetaan kolmeen ryhmään: suora, haja-/diffuusinen ja ilmakehän vastasäteily. Suoralla auringonsäteilyllä tarkoitetaan suoraan Auringosta maanpinnalle saapunutta säteilyä ja hajasäteily on maanpinnasta, pilvistä ja ilmakehän molekyyleistä heijastunutta säteilyä. Vastasäteily tavallisesti sisältyy hajasäteilyyn. Se on säteilyä ilmakehän vesihöyrystä, hiilidioksidista ja otsonista takaisin maanpinnalle. Yhdessä suora-, haja- ja ilmakehän vastasäteily muodostavat kokonaissäteilyn. (Tahkokorpi 2016, 12 – 14.)

Auringonsäteilyn energia voidaan muuttaa suoraan sähköksi tai epäsuorasti lämmön avulla. Tavallisin tapa muuttaa säteilyenergiaa suoraan sähköksi on aurinkokennotekniikka, joka perustuu valosähköiseen ilmiöön. Kolme tyypillisintä aurinkokennoa ovat yksikiteiset, monikiteiset ja amorfiset (ohutkalvokennot) piikennot. Epäsuoralla tavalla tuotetaan mekaanisesti sähköä lämmön avulla. Lämmön tuottamiseen käytetään aurinkokeräimiä tai keskittävää tekniikkaa. Molempia tekniikoita käytetään kiertoaineen lämmittämiseen, jolla lämpö siirretään esimerkiksi Rankine- tai Brayton- prosessiin. (Kaushika et al. 2018, 8 – 11.)

Aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää useilla eri tavoilla, joten eri mittakaavoissa ja käyttökohteissa voidaan valita tarkoitukseen sopivin tapa. Aurinkokennotekniikalla voidaan tuottaa aurinkosähköä alle yhden watin järjestelmistä gigawattien suuruisiin järjestelmiin. Asuinrakennusten aurinkosähköjärjestelmät voivat olla jopa 20 kW suuruisia, kun taas julkis- ja toimistorakennusten tai tehtaiden järjestelmät ovat muutamien megawattien suuruisia. Itsenäiset, verkon ulkopuolella olevat järjestelmät ovat kaikista pienimpiä ja verkkoon sähköä tuottavat suuret aurinkovoimalat kaikista isoimpia. (IEA 2019.)

Aurinkolämmön hyödyntämiseen on useampia menetelmiä kuin aurinkosähköllä. Auringonsäteilystä lämpö otetaan talteen aurinkokeräimillä, jotka voivat olla keskittäviä tai ei-keskittäviä. Ei-keskittäviä aurinkokeräimiä käytetään matalan lämpötilan kohteissa käyttöveden ja tilan lämmitykseen ja korkeammassa, yli 100 °C, lämpötiloissa käytetään keskittäviä keräimiä. Keskittävää tekniikkaa käytetään myös CSP-voimaloissa (concentrating solar power), joissa auringon säteily kohdistetaan peilien avulla tiettyyn pisteeseen esimerkiksi tornissa tai putkeen (parabolinen kouru ja lineaarinen Fresnel-keräin). Keskittävän tekniikan vaihtoehtona sähköntuotannossa on SUT-voimala. SUT, eli solar updraft tower, hyödyntää kasvihuoneilmiötä ja ilmavirtausta. Aurinko lämmittää läpikuultavan katoksen alla olevaa ilmaa ja lämmin ilma nousee katoksen keskellä olevaan piippuun, jossa sijaitsee turbiini. (Richter et al. 2013.)

CSP-voimalat käyttävät vain suoraa auringonsäteilyä, minkä takia niitä voidaan sijoittaa vain alueille, joilla on paljon suoraa säteilyä (IEA 2019). Tämän vuoksi Suomessa ei ole CSP-voimaloita, mutta aurinkopaneelien ja -keräimien käyttö sekä aurinkolämmön passiivinen hyödyntäminen on mahdollista. Passiivisella hyödyntäminen tarkoittaa sitä, että aurinkolämmön keräämiseen ei käytetä laitteita, vaan esimerkiksi talo rakennetaan niin, että rakennus vastaanottaa ja varastoi lämpöä. Siihen miten hyvin aurinkolämpöä voidaan

passiivisesti hyödyntää vaikuttaa muun muassa rakennuksen sijainti, tuulensuojat, suuntaus ja materiaalit. (Tahkokorpi 2016, 55 – 61.)

Aurinkopaneelien ja -keräimien tuotantoon vaikuttaa paljon auringonsäteilyn määrä ja suuntaus laitteiden ominaisuuksien lisäksi. Lähtökohtaisesti Suomessa säteilyn määrä on huomattavasti vähäisempää kuin Etelä-Euroopassa lähempänä päiväntasaajaa, kuten myöhemmin kuvassa 3.1 on esitetty. Tuotantoon siis vaikuttaa sijainti Maapallolla, koska auringon säteily ei jakaudu tasaisesti.

Optimaalisella suuntauksella, kallistuskulmalla ja sijoittelulla voidaan vaikuttaa paneelien tai keräimien tuotantoon. Sijainti valitaan niin, että vältetään ympärillä olevien esteiden aiheuttaman varjostukset. Atsimuutti-, eli suuntakulma, valitaan päivän huippukuormituksen ajoittumisen mukaan niin, että paneelit tai keräimet ovat suunnattuna säteilyä kohti huippukuormituksen aikana. Kallistuskulmaan vaikuttaa sijainti maapallolla ja asennusmahdollisuudet. Suomessa optimaalinen kallistuskulma on noin 45 astetta. (Tahkokorpi 2016, 17 – 18.)

2.3 Biomassa

Orgaanista materiaalia, josta puut ja kasvit koostuvat ja joka on peräisin auringon säteilystä ja fotosynteesistä, kutsutaan biomassaksi. Sitä pidetään hyvänä vaihtoehtona fossiilisille polttoaineille, koska puut ja kasvit sitovat hiilidioksidia. Biomassan lähteinä on erilaisia sivuvirtoja, viljelyksiä ja jätteitä kuten maatalouden ja metsäteollisuuden tuotteet, jätteet ja sivuvirrat, levät, eläinperäiset jätteet, teollisuuden jätteet, yhdyskuntajäte ja jätevedet. (Baskar et al. 2012, 1 – 3.)

Biomassaa voidaan käyttää sähkön, lämmön ja kiinteiden, nestemäisten tai kaasumaisten biopolttoaineiden tuottamiseen monilla eri tavoilla, jotka on jaoteltu termokemiallisiin ja biokemiallisiin menetelmiin. Termokemiallisiin menetelmiin kuuluu poltto-, kaasutus-, pyrolyysi- ja nesteytystekniikat. Hapeton mädätys ja käyminen ovat tyypillisiä biokemiallisia tekniikoita, joita käytetään maatalous- ja yhdyskuntajätteen käsittelyyn. Biojalostamoissa käytetään jotakin tekniikkaa tai niiden yhdistelmiä tuottamaan biomassasta polttoaineita, kuten biodieseliä, bioetanolia ja biokaasua, sähköä, lämpöä ja kemikaaleja ilman jätteen tuottamista. (Baskar et al. 2012, 6 – 57.)

Biokemiallisia menetelmiä käytetään biomassoille, joiden hiili/typpi -suhde on alle 30 ja kosteusprosentti yli 30 %. Vastaavasti termokemiallisia menetelmiä käytetään C/N -suhteen ollessa yli 30 ja kosteuden alle 30 %. Biomassoja, joille käytetään termokemiallisia menetelmiä, ovat puu sekä sahanpuru, hake ja muut sivutuotteet ja lignoselluloosapitoiset biomassat. (Lorenzini et al. 2010, 167 – 168.)

Kuvasta 2.1 nähdään, että puuperäisten biomassojen (teollisuuden ja energiantuotannon puupolttoaineet, metsäteollisuuden jäteliemet ja puun pienkäyttö) käyttö muodostaa merkittävän osan, lähes kolme neljäsosaa, uusiutuvan energian käytöstä. Tämän takia puuperäisiä biomassoja voidaan pitää tärkeimpinä uusiutuvan energian lähteinä Suomessa. Bioenergia Ry:n mukaan Suomessa puuta ei kasvateta energiantuotantoa varten, vaan käytettävät puumateriaalit ovat metsäteollisuuden ja metsänhoidon sivutuotteita. Metsäteollisuuden sivutuotteita ovat kuoret, purut ja teollisuusliemet ja metsänhoidon sivutuotteita ovat juuret, kannot, oksat ja latvukset.

3 TYÖKALUJA UUSIUTUVAN ENERGIAN POTENTIAALIN TARKASTELUUN

Erilaisilla työkaluilla voidaan tarkastella olosuhteiden soveltuvuutta esimerkiksi suunnitteilla olevan aurinko- tai tuulivoimalaa varten. Tällaiset työkalut perustuvat aikaisempien vuosien dataan ja tietokoneilla laskettuun arvioon, minkä takia työkaluilla saadaan suuntaa-antavia tuloksia ja tarkemmat tulokset saadaan mittauksilla paikan päällä.

Tuulen nopeuksia voidaan tarkastella Suomen Tuuliatlaksella, mikä sopii käytettäväksi, kun halutaan selvittää sijaintia uusille tuulivoimaloille. Tuuliatlas ei kuitenkaan anna tietoja tuulioloista tunneittain, minkä takia itse tehdyt mittaukset tai muualta saatava data ovat parempia vaihtoehtoja, jos tarvitaan tietoja tuntitasolla. Esimerkiksi Fingrid ja Energiategollisuus tarjoavat dataa tuotetusta sähköstä ja Ilmatieteen laitoksen sivuilta on ladattavissa erilaisia sää- ja säteilyhavaintoja. Auringon säteilyä kuvaavia karttakuvia on useita, mutta on olemassa myös työkaluja, jotka antavat säteilykulmat tai säteilymäärät tarkastelupisteessä. Suomessa on myös käytettävissä biomassan saatavuuden määrittämiseen Biomassa-atlas.

3.1 Suomen Tuuliatlas

Suomen Tuuliatlas on tuuliolojen tarkastelemiseen tarkoitettu tietokonemallinnukseen perustuva karttaliittymä. Tuuliatlas on julkistettu 15.11.2009 ja sen on tuottanut Ilmatieteen laitos yhdessä tanskalaisen Risö DTU:n kanssa työ- ja elinkeinoministeriön tilauksesta. (Tuuliatlas.)

Tuuliatlaksella voidaan tarkastella tuuliolosuhteita 2,5 x 2,5 neliökilometrin tarkkuudella, mutta joillakin alueilla, kuten rannikolla ja tuntureilla, voidaan käyttää tarkempaa 250 x 250 neliömetrin tarkkuutta. Tietoja tuulioloista saadaan eri korkeuksille 50 metristä 400 metriin. (Tuuliatlas.)

Tuuliatlas-karttaliittymän saa avattua osoitteen www.tuuliatlas.fi kautta. Karttaliittymän oikeassa alanurkassa määritellään haku valitsemalla hilakoko, eli tarkkuus. Hilakoosta riippuen valitaan tuulen nopeus, 3 MW:n voimalan tuotto, tuotantotappioarvio, passiivinen jäätäminen tai aktiivinen jäätäminen. Lisäksi valitaan myös korkeus (50, 100 tai 200 m) ja halutut kuukaudet tai koko vuosi.

Alkumäärittelyjen jälkeen kartalla näkee värein kuvattuna esimerkiksi tuulen nopeudet ympäri Suomea valitulla korkeudella. Karttakuva voidaan tallentaa tai vaihtoehtoisesti ottaa lähempään tarkasteluun. Kartalta voidaan hakea kuntaa kiikaripainikkeella tai tarkasteltava alue voidaan i-painikkeella valita itse rajaamalla kartasta alue tai klikkaamalla haluttua pistettä.

Pisteen tai alueen (eli hilapisteen tai -pisteiden) valinnan jälkeen saadaan alkumäärittelyjen mukaiset tulokset kartan vasemmalle puolelle. Tulokset kertovat valitun suureen ja sen arvon, korkeuden sekä karttakoordinaatit. Tulosten alapuolella olevien kuvakkeiden avulla pystytään tarkastelemaan pisteen tuuliruusua, joka kertoo prosentteina mistä suunnasta tuulee, ja tuuliprofiilia tai lataaman taulukon tarkemmista tuloksista CSV-tiedostona. Ladatun taulukon voi avata Excelissä, jolloin voi tarkastella eri korkeuksilla (50, 75, 100, 125, 150, 200, 300 ja 400 m) ja suuntasektoreilla esimerkiksi frekvenssejä, tuulen keskinopeuksia, Weibull-parametrejä, ilman keskilämpötilaa ja tuulivoiman tuottoa 1, 3 ja 5 MW voimaloille. (Tuuliatlas 2012.)

Tuuliatlaksen laskemilla tuulivoimaloiden vuosittaisten sähköntuotantojen avulla voidaan arvioida tuulivoimalle kapasiteettikerroin (Capacity Factor, CF), joka kertoo vuosituotannon ja maksimituotannon suhteen. Esimerkiksi 150 m korkuisen 5 MW tuulivoimalan kapasiteettikerroin lasketaan käyttämällä vuosituotantoa 150 m korkeudella ja voimalan tehoa. Kapasiteettikerroin ratkaistaan yhtälöllä (1). (Hau 2013, 586.)

$$CF = \frac{AEP}{P_w \cdot 8760 \text{ h}} \quad (1)$$

jossa CF on kapasiteettikerroin, AEP (Annual Energy Production) on vuosituotanto [MWh] ja P_w on tuulivoimalan teho [MW]. Yhtälöä voidaan soveltaa myös tuulipuistolle käyttämällä puiston yhteistuotantoa ja kokonaiskapasiteettia.

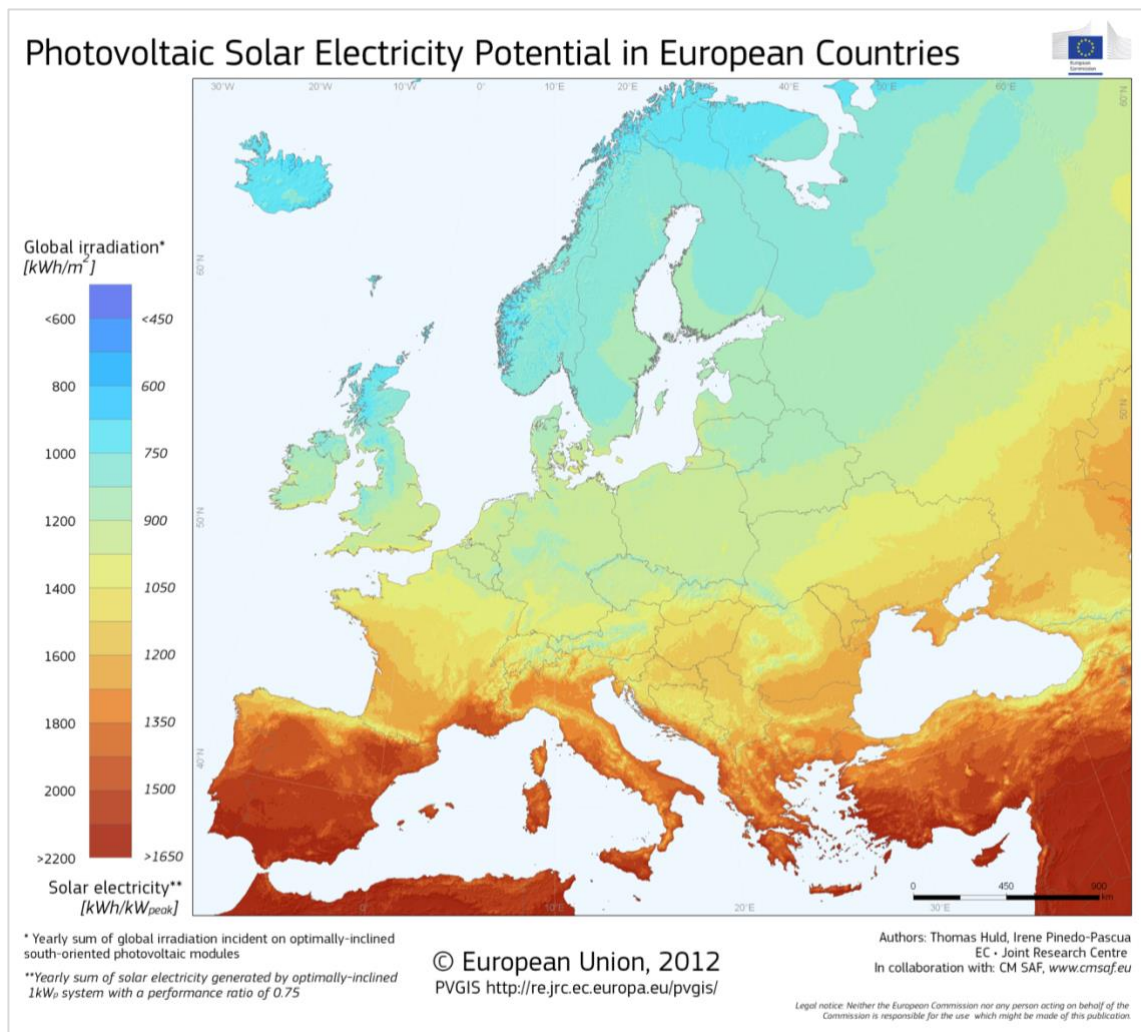
3.2 Työkalut säteilyolosuhteille

Säteilyolosuhteita voidaan kuvata esimerkiksi karttapohjalla. Euroopan Komission yhteisen tutkimuskeskuksen (Joint Research Centre, JRC) tuottamassa kuvassa (kuva 3.1) on esitetty Euroopan kartalla vuotuinen kokonaissäteily ja aurinkosähkön tuotanto 1 kW_p järjestelmällä, kun suorituskyvyn suhdeluku (Performance Ratio, PR) on 0,75. PR tarkoittaa aurinkosähkijärjestelmän todellisen tuoton ja teoreettisen maksimituoton suhdetta (Kolari 2018, 28). Kartan mukaan kokonaissäteilyn määrä Suomessa vaihtelee noin 900 ja 1200 kWh/m² välillä ja Välimeren rannikoilla auringonsäteily on jopa yli kaksinkertaista. Vastaavanlaisia karttakuvia löytyy auringonsäteilyn eri osille tai aurinkosähkön tuotannolle, mutta tällaisten karttojen tuottajilla ei aina ole tietoja jollekin tietylle maalle, maanosalle tai maapallon napa-alueille.

Joillakin työkaluilla voidaan määrittää tarvittavia lähtöarvoja, jotta auringon säteilymäärät ja aurinkopaneelien tai -keräimien tuotanto voidaan itse laskea. SunEarthTools.com on sivusto, jonka Auringon sijainti (Sun Position) -työkalulla voidaan määrittää elevaatio- ja atsimuuttikulma vuoden jokaiselle tunnille halutussa karttapisteessä. Näiden kulmien avulla voidaan laskea säteilyn voimakkuus tietyssä pisteessä.

PVGIS on Euroopan komission Yhteisen tutkimuskeskuksen tuottama verkkosovellus. PVGIS, eli Photovoltaic Geographical Information System, sisältää työkaluja aurinkopaneelien tuotannon arviointiin, säteilyn tarkastelemiseen tunti-, päivä- ja

kuukausitasolla sekä meteorologisen datan keräämiseen tuntitasolla. Lisäksi PVGIS tarjoaa kuvan 3.1 kaltaisia ladattavia karttoja, joissa kuvataan säteilymääriä ja aurinkopaneelien tuotantoa, yksittäisistä maista tai alueista. PVGIS-työkalut ovat helppokäyttöisiä ja niille on annettu kattavat kuvaukset ja käyttöohjeet. (Euroopan komissio 2020.)



Kuva 3.1: Vuotuinen kokonaissäteily (Global irradiation) ja aurinkosähkön tuotanto (Solar electricity) Euroopassa (JRC 2012).

Lisäksi saatavilla on maksullisia lähteitä, kuten Sveitsiläisen Meteotestin tuote, Meteonorm. Meteonorm on ilmatieteeseen ja aurinkoenergiaan liittyvä tietokoneohjelma. Se käyttää yli 8000 sääaseman ja satelliitin säädettä ja laskentaa tuottamaan käyttäjän tarvitsemaa tietoa esimerkiksi simulaatiota varten. (Meteotest.)

3.3 Ilmatieteen laitoksen säädädata

Säädädataa voidaan ladata esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen verkkosivuilta. Sivustolla on otsikon ”Sää ja meri” alla kohta ”Havaintojen lataus”. Valittavia suureita ovat sää-, säteily-, meri- ja ilmanlaatuhavaintoihin liittyvät hetkellis-, vuorokausi- ja kuukausihavainnot. Esimerkiksi säähavainnoista voidaan valita hetkellishavaintona pilvien määrä tai tuulen nopeus, vuorokausihavaintona sademäärä tai ilman lämpötila ja kuukausihavaintona sadesumma tai keskilämpötila. Hetkellishavainnoille valitaan myös tihein havaintoväli, joka voi olla minuutti, kymmenen minuuttia tai tunti. Haussa valitaan myös aikaväli ja havaintoasema. Havaintoasema etsitään nimen mukaan tai valitaan kartalta. (Ilmatieteen laitos a.)

3.4 Biomassa-atlas

Biomassa-atlas on Luonnonvarakeskuksen, Luken, organisoima hanke, jonka tarkoituksena on koota eri biomassojen paikkatietoja karttapalveluun. Biomassa-atlasta voidaan käyttää suunniteltaessa biomassojen hankintaa tai investointeja. (Luke.)

Biomassa-atlas saadaan avattua osoitteessa www.luke.fi/biomassa-atlas/. Karttaliittymän avatessa tulee näkyviin karttapohja ja valikko sivun vasemmassa reunassa. Valikosta biomassat-otsikon takaa voidaan määrittellä tarkasteltavat biomassat potentiaalilin, alkuperän tai oman haun perusteella. Potentiaaliin ja alkuperään sisältyviä biomassoja on taulukoitu liitteessä 1.

Kun tarkasteltava biomassa tai biomassat on valittu, voidaan tarkastelu rajata haluttuun alueeseen aluevalinnalla. Alue voidaan piirtää itse kartalle, valita valmiiksi rajattuja kuntia, maakuntia, ELY-keskuksia, valuma-alueita tai postinumeroalueita tai valita yksi piste keskipistehalulla ja määrittää kilometreinä joko ympyrän säde tai tieverkostolla saavutettava etäisyys. Alueen valinnan jälkeen on mahdollista laskea tulokset. Biomassa-atlas antaa tulokset valittujen biomassojen määristä taulukkona ruudulle, mutta taulukon voi myös ladata omalle tietokoneelle.

4 UUSIUTUVAN ENERGIAN POTENTIAALI ESIMERKKIALUEELLA

Tarkoituksena on selvittää esimerkkialueen tuuliolot, säteilymäärät ja biomassan saatavuus sellaisissa muodoissa kuin niitä voidaan EnregyPlan-ohjelmalla käyttää. EnergyPlan tarvitsee uusiutuvien energianlähteiden osalta ainakin kapasiteetin ja tuntijakauman. Tuntijakauma on vuosittaista tuotantoa tai tarvetta kuvaava tekstitiedosto, jossa tiedot on kuvattu 8784 rivillä arvoilla 0 – 1 (Connolly 2015, 5). Luku kuvaa osuutta tunnitaisesta maksimituotannosta tai -kulutuksesta ja rivit tarkoittavat vuoden jokaista tuntia, joten tarvittaessa käytettäessä dataa vuodelta ilman karkauspäivää on lisättävä yhden päivän data itse. Tämän voi tehdä esimerkiksi lisäämällä helmikuun 29. päivälle tiedot 28. päiväältä.

4.1 Tuuli

Koska Tuuliatlaksesta ei saa tuulitietoja tuntitasolla, sitä voidaan käyttää suuntaa-antavana ohjeena sille, minne tuulivoimala tai -puisto kannattaa tuuliolojen puolesta rakentaa. Tuuliolojen puolesta tuulivoimalle sopivaksi alueeksi käy Porvoo, jota tarkastellaan tässä työssä.

Ilmatieteenlaitoksen sivuilta saadaan ladattua sääasemilla mitattua dataa. Tässä laskennassa käytetään Harabackan sääaseman mittauksia. Tuulen nopeus on kuitenkin mitattu lähellä maan pintaa, minkä takia on arvioitava tuulen nopeus tuulivoimalan korkeudella yhtälön (2) avulla (Manwell et al. 2009, 46).

$$U = U_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2)$$

jossa U on tuulen nopeus [m/s], U_r on tuulen nopeus referenssikorkeudella, z on korkeus [m], z_r on referenssikorkeus ja α on potenssilain eksponentti. Tarkkaa referenssikorkeutta z_r ei ole saatavilla, joten sille käytetään arvoa 10 m.

Potenssilain eksponentti voidaan arvioida useiden erilaisten korrelaatioiden avulla. Tässä tapauksessa potenssilain eksponentti määritetään yhtälön (3) avulla (Manwell et al. 2009, 47).

$$\alpha = 0,096 \log_{10} z_0 + 0,016(\log_{10} z_0)^2 \quad (3)$$

jossa z_0 on pinnan karheus [m]. Pinnan karheuden arvoja löytyy kirjallisuudesta taulukoituina. Mittauspaikan ympäristössä on laajoja peltoalueita ja 2 – 3 km etäisyydellä on metsäalueita (Ilmatieteen laitos b). Täten tässä tapauksessa voisi käyttää viljelyalueen pinnan karheutta, jolloin $z_0 = 0,05$ m ja $\alpha \approx 0,142$ (Manwell et al. 2009, 46).

Tuulen nopeuksien ja voimalan tehokäyrän avulla voidaan määrittää energiantuotanto tunneittain yhtälöllä (4) (Manwell et al. 2009, 54 – 55).

$$E_w = \sum_{i=1}^N P_w(U_i)(\Delta t) \quad (4)$$

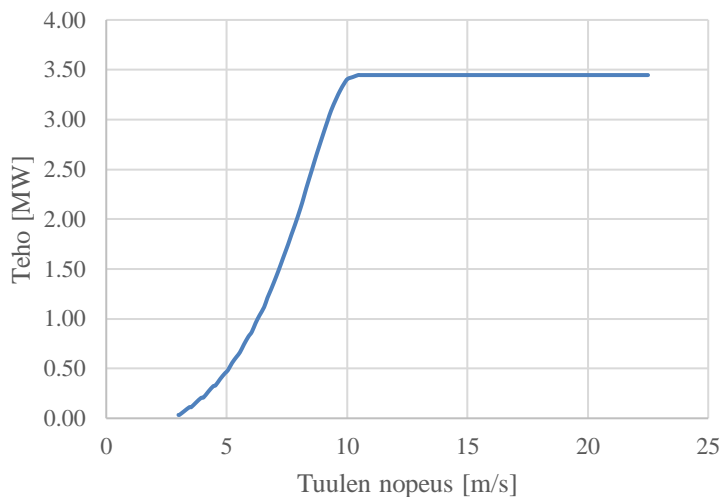
jossa E_w on sähköenergia tuulivoimalasta [MWh], N on havaintojen määrä [kpl], P_w on voimalan teho [MW] ja Δt on aikaväli [h]. $P_w(U_i)$ kuvaa voimalan tehokäyrää, joka voi olla saatavissa valmistajan sivulla tai jossakin muussa lähteessä. Koska havaintoja on vuoden jokaiselle tunnille, $N = 8784$. Myös aikavälinä käytetään yhtä tuntia, eli $\Delta t = 1$ h.

Tähän työhön on valittu Vestaksen V136-3.45 -voimala, koska sen tehokäyrä (kuva 4.1) oli helposti saatavilla wind-turbine-models.com -sivustolla. Voimala käynnistyy tuulen nopeudella 3 m/s ja sammuu nopeudella 22,5 m/s (Vestas). Laskennassa tehokäyrän arvot tarvitaan taulukkumuodossa. Jos valmistaja ei tarjoa tehokäyrää taulukkona, se voidaan luoda käsin lukemalla arvoja tai tietokoneen avulla. Tässä työssä on käytetty Engauge Digitizer -ohjelmaa, joka lukee kuvatiedostosta käyrän arvopisteitä ja luo niistä taulukon.

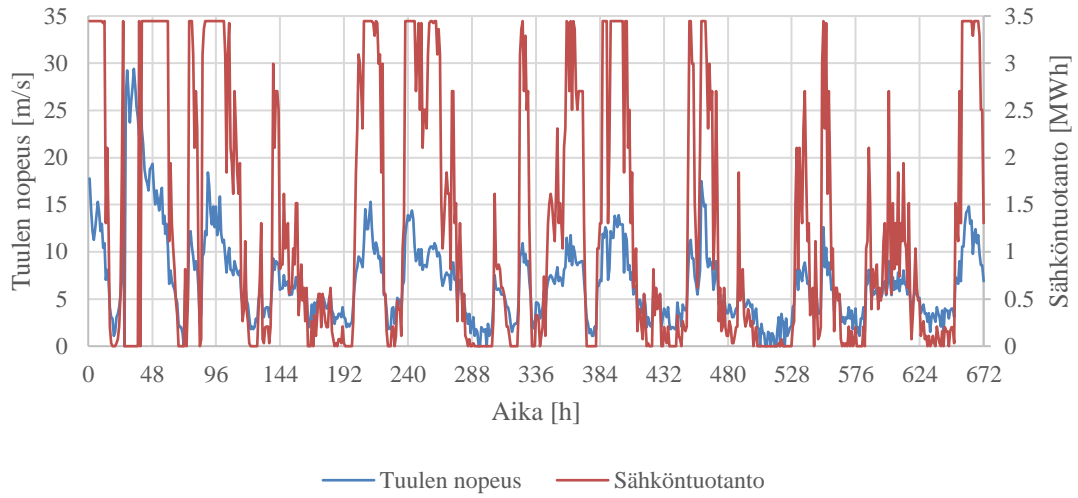
Laskettaessa yhtälöillä (2) ja (3) saadut tuulen nopeudet vaikuttivat pieniltä ja vuotuinen keskinopeus oli vain 4,55 m/s. Syynä tähän voi olla jokseenkin tuntematon mittauspaikka. Koska mittauskorkeutta ja ympäröivää maastoa ei tarkasti tiedetä, laskuihin voi tulla virheitä. Tämän takia määritin Tuuliatlaksen avulla vuotuiseksi keskinopeudeksi Porvoossa 132 m korkeudessa 7,3 m/s ja suhteutin tuulen nopeudet tähän arvoon saaden suurempia nopeuksia. Itse jakauman laskenta on suoritettu Matlab-ohjelmalla ja käytetty Matlab-tiedosto on esitetty liitteessä 2. Yksinkertaisesti laskenta on vain tuulen nopeuden vertaamista voimalan tehokäyrään, jotta saadaan selville voimalan teho vuoden jokaiselle tunnille. Näiden tehoarvojen avulla lasketaan samalla jakauma jakamalla tunnin energiantuotanto voimalan yhden tunnin maksimituotannolla. Matlab-tiedosto kirjoittaa tunneista, tuulen nopeuksista, tuotannosta ja jakaumasta Excel-tiedoston, josta tuloksia

voidaan tarkastella ja tehdä kuvaajia. Ennen laskentaa, Matlabiin oli tuotava tehokäyrän tiedot ja tuulen nopeudet vektoreina Import Data -toiminnolla.

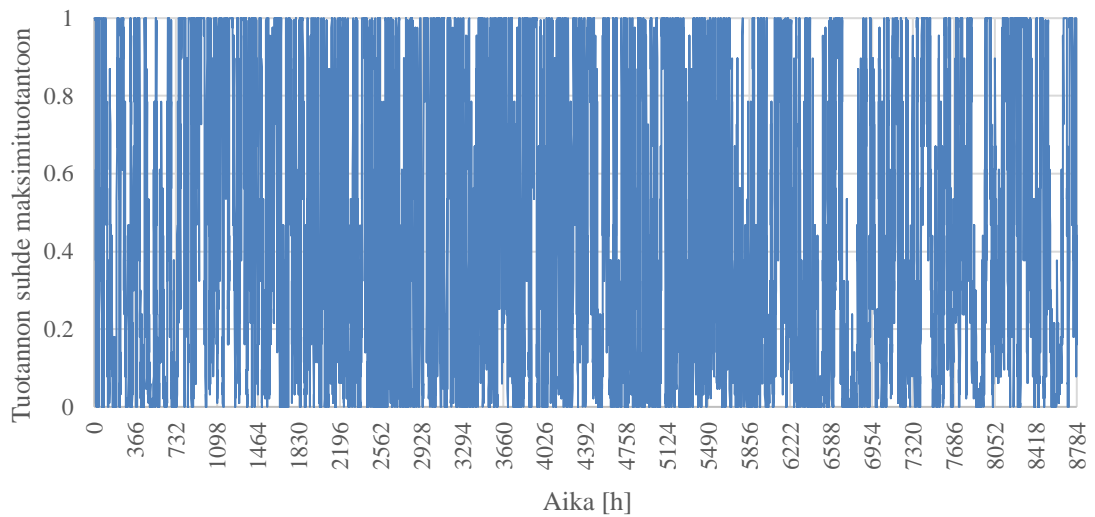
Laskennan tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa. Kuvassa 4.2 näkyy tuulen nopeus ja sähköntuotanto ajan funktiona vuoden 2019 neljälle ensimmäiselle viikolle. Kuvissa 4.3, 4.4 ja 4.5 on esitetty tuulivoiman tuotanto vuodelle 2019, neljälle ensimmäiselle viikolle ja ensimmäiselle viikolle. Koska tarkastellaan vain yhtä aluetta yhdellä tuulivoimalalla, energiantuotannon ja jakauman kuvaajien muoto on sama. Jakauman arvot tarvitaan EnergyPLANiin yksinään yhtenä tiedostona. Liitteessä 3 on esitetty lyhyt ote vuosijakaumasta numeroina heinäkuun kahden ensimmäisen vuorokauden ajalta.



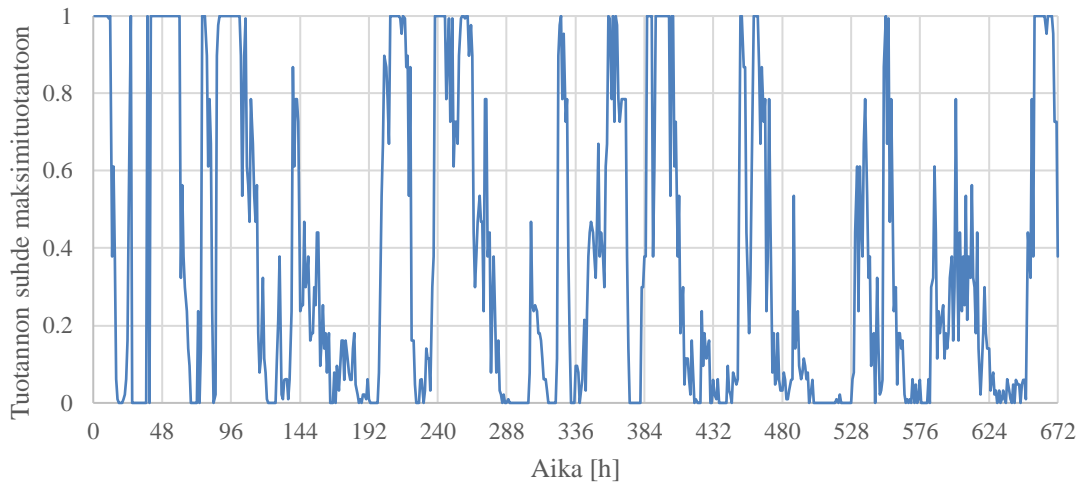
Kuva 4.1: Tuulivoimalan tehokäyrä, Vestas V136-3.45 (wind-turbine-models.com).



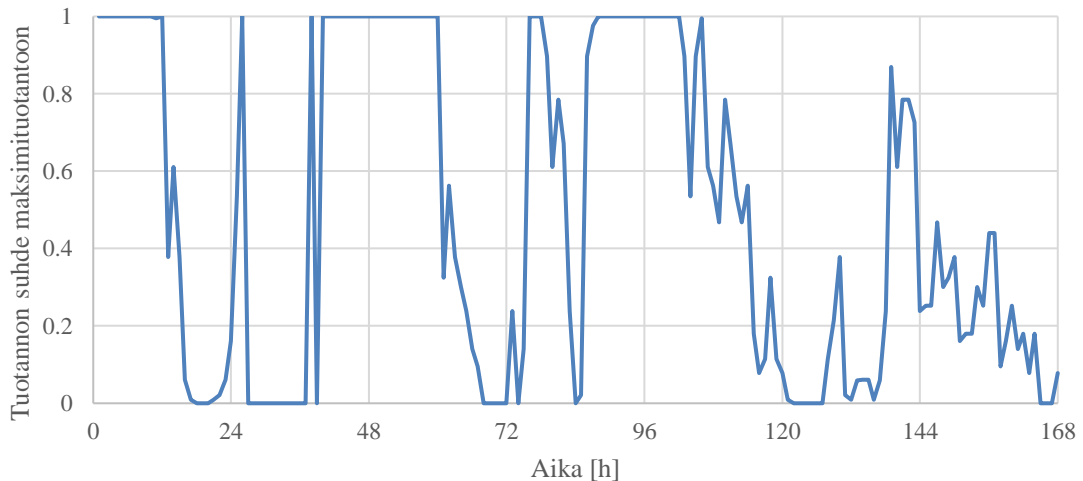
Kuva 4.2: Tuulen nopeus ja sähköntuotanto tuulivoimalassa Porvoossa vuoden 2019 neljälle ensimmäiselle viikolle ajan funktiona korkeudessa 132 metriä.



Kuva 4.3: Tuulivoiman tuotannon jakauma (tuotannon suhde maksimituotantoon) ajan funktiona Porvoossa vuoden 2019 aikana.



Kuva 4.4: Tuulivoiman tuotannon jakauma (tuotannon suhde maksimituotantoon) ajan funktiona Porvoossa vuoden 2019 neljälle ensimmäiselle viikolle.



Kuva 4.5: Tuulivoiman tuotannon jakauma (tuotannon suhde maksimituotantoon) ajan funktiona Porvoossa tammikuun 2019 ensimmäiselle viikolle.

Kuvasta 4.5 nähdään, että heti ensimmäisen vuorokauden jälkeen tuotanto käy maksimissa ja äkisti putoaa noltaan ja myöhemmin nousee taas maksimiin. Tällaisessa tilanteessa tuulen nopeus on ylittänyt voimalan suurimman mahdollisen tuulen nopeuden.

Vaihtoehtoisesti jakauman määrittäminen voidaan tehdä olemassa olevien tuulivoimaloiden tuotannon ja kapasiteetin avulla. Tämä menetelmä tosin soveltuu sellaisille alueille, joita on tarkoitus mallintaa EnergyPLANissa ja joilla on asennettua tuulivoimakapasiteettiä. Jonkin

muun alueen tuulituotannon käyttäminen tarkastelualueen jakauman muodostamiseen ei välttämättä anna todellisia tuloksia, jos tuulioloissa on eroja.

Samaa jakaumaa voidaan käyttää alueelle myös myöhemmin, vaikka kapasiteettia tai tuotantoa muutettaisiin. Tämä on mahdollista muuttamalla korjauskerrointa (Correction factor) EnergyPLANissa, siten että kapasiteettikerroin saadaan vastaamaan haluttua arvoa. Korjauskerroin muuttaa simuloinnissa jakauman arvoja paitsi niitä, joilla tuotantoa ei ole tai se on maksimissaan, eli arvoja 0 ja 1. (Lund & Thellufsen 2019, 70 – 71)

4.2 Aurinko

Aurinkosähkölle vastaava jakauma voitaisiin luoda samalla tavalla kuin tuulelle, eli lataamalla säteilytiedot Ilmatieteen laitoksen sivuilta ja laskemalla jonkin aurinkopaneelin teknisten tietojen avulla sähköntuotanto ja jakauma. Nyt jakauma määritetään kuitenkin eri tavalla, jotta voidaan esitellä erilainen ja hyvin yksinkertainen menetelmä.

PVGIS-työkalua käytetään säteilyn ja aurinkosähkön tehon laskentaan. Tuntidatan hakemiseen käytetään tietokantana PVGIS-SARAH ja vuotta 2016, koska se on viimeisin vuosi, jolta saadaan dataa. Valitaan kiinteä asennus ja annetaan työkalun määrittää optimaaliset kulmat sekä valitaan teknologiaksi piikiteinen 10 kWp aurinkosähköjärjestelmä, jolle on annettu oletuksena 14 % häviöt. Tiedot hausta sekä optimaalisesta kallistus- ja atsimuuttikulmasta on listattu taulukkoon 4.1.

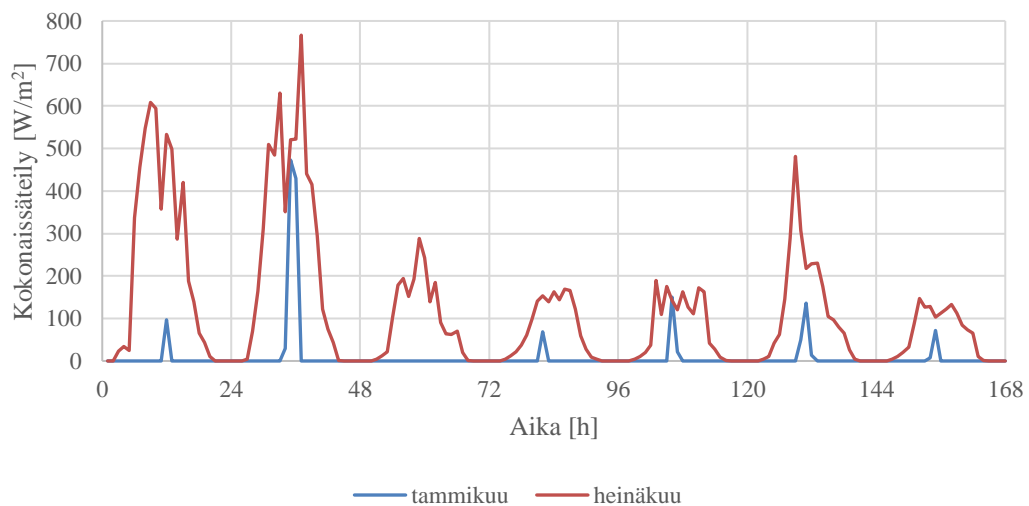
Ladattua dataa käyttäen on tehty kuvaaja, joka havainnollistaa kokonaissäteilyn määrän eron tammikuun ja heinäkuun ensimmäisen viikon välillä (kuva 4.6). Kuvasta nähdään, että kokonaissäteilyn määrä on huomattavasti isompi kesäaikaan kuin talviaikaan, jolloin valoa on vain muutaman tunnin päivässä.

PVGIS-työkalun antamista tuloksista voidaan helposti muodostaa tuntijakauma samalla tavalla kuin tuulen osalta. Kuvassa 4.7 on esitetty aurinkosähkön tuotannon jakauma vuodelle 2016 ja kuvassa 4.8 jakauma on esitetty neljälle viikolle tammikuun ja heinäkuun alusta. Jakauman kuvista havaitaan, että tuotanto ei vuoden aikana yllä missään vaiheessa paneelien maksimituotantoon. Tämä johtuu siitä, että aurinkosähköjärjestelmällä on häviöitä ja kiinteällä asennuksella ei optimoida yksittäisen hetken maksimituotantoa, vaan

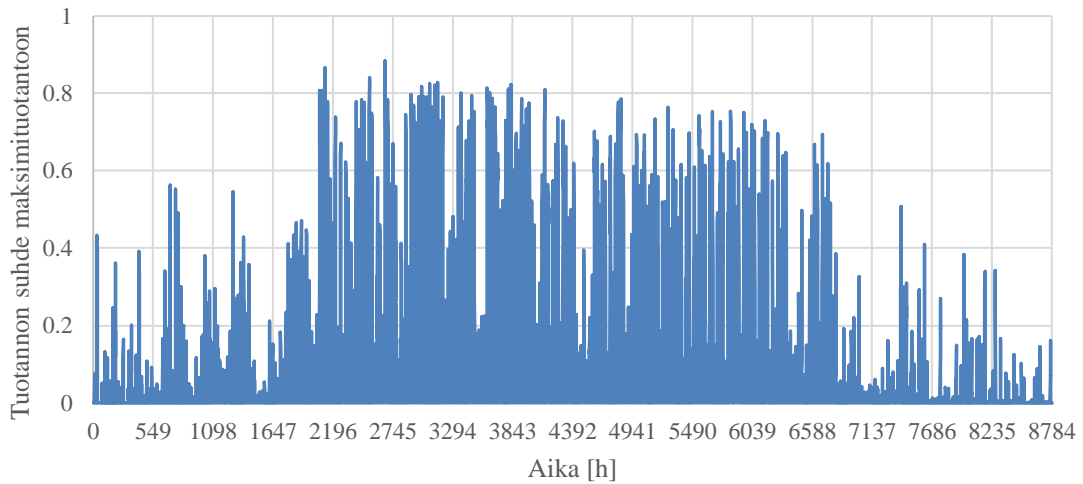
koko vuoden tuotantoa. Aurinkosähkön tuotanto ei myöskään ole niin tehokasta Suomessa verrattuna alueisiin lähempänä päiväntasaajaa säteilymäärien ja -kulmien takia.

Taulukko 4.1: Tiedot tunnittaisen säteilydatan hausta PVGIS-työkalulla.

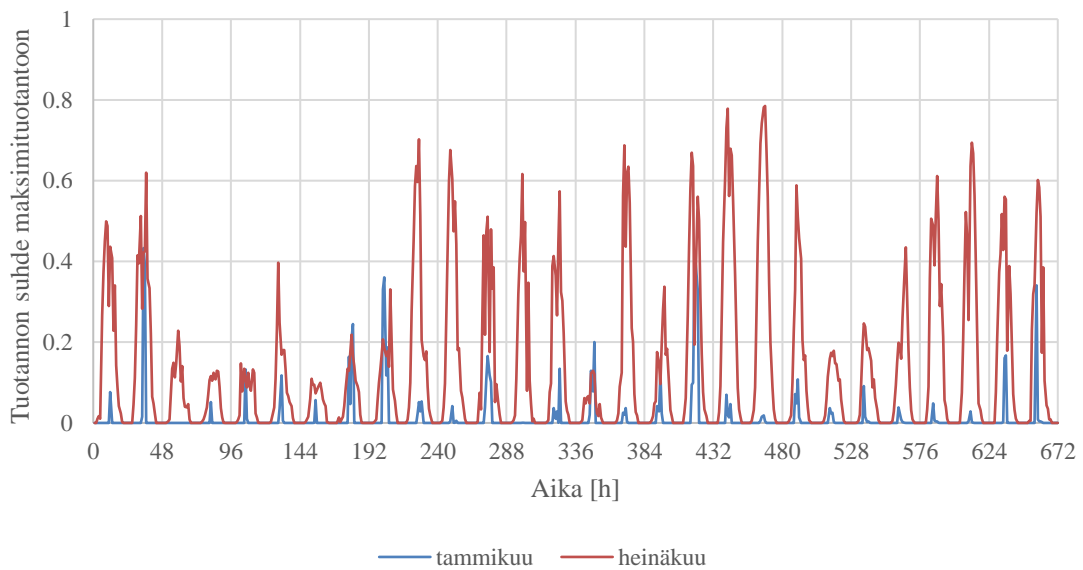
| | |
|------------------------------|-------------|
| Leveysaste | 60,395 ° |
| Pituusaste | 25,660 ° |
| Korkeus | 21 m |
| Tietokanta | PVGIS-SARAH |
| Vuosi | 2016 |
| Optimaalinen kallistuskulma | 41 ° |
| Optimaalinen atsimuuttikulma | -8 ° |
| Aurinkopaneelin nimellisteho | 10 kWp |
| Järjestelmähäviöt | 14 % |



Kuva 4.6: Auringon kokonaissäteily [W/m^2] ajan funktiona Porvoossa vuoden 2016 tammikuun ja heinäkuun ensimmäisellä viikolla.



Kuva 4.7: Aurinkosähkön vuosijakauma (tuotannon suhde maksimituotantoon) ajan funktiona Porvoossa vuonna 2016.



Kuva 4.8: Aurinkosähkön jakauma (tuotannon suhde maksimituotantoon) ajan funktiona neljälle viikolle Porvoossa vuoden 2016 tammikuun ja heinäkuun alusta.

Liitteessä 3 on esitetty lyhyt ote vuosijakaumasta numeroina heinäkuun kahden ensimmäisen vuorokauden ajalta. Tässä otteessa erottuu myös selvästi vuorokauden vaihtelu, eli pimeällä yöaikaan jakauman arvo on 0 ja keskellä päivää saavutetaan suurimmat lukemat.

4.3 Biomassa

Biomassan potentiaalia tarkastellaan Porvooseen sijoitetulle voimalaitokselle, jossa poltetaan metsähaketta. Puuperäiset biomassat ovat yleisimmät biomassat, joita Suomessa käytetään energiantuotantoon. Tämän takia tähän esimerkkiin on valittu metsähake.

Energiapuun pitkän matkan kuljetuksen toimitusketjun kustannuksille tehdyn tutkimuksen mukaan lastauspaikalla tehdyn hakkeen kuljettaminen kuorma-autolla on edullista 30 ja 200 kilometrin välisillä etäisyyksillä voimalaitoksesta (Tahvainen & Anttila s. 3372). Tämän tiedon perusteella tarkastelualueeksi on valittu Porvoon alue 100 km säteellä (linnuntietä). Biomassa-atlaksen tieverkostoa pitkin saavutettava etäisyys voi maksimissaan olla 65 kilometriä. Tämän takia käytetään ympyrän sädettä, jotta saadaan valittua suurempi alue. Biomassa-atlaksessa valitaan sivuvirtapotentiaaleista metsähake, joka sisältää pienpuun, latvusmassan ja kannot, ja rajataan alue, jolloin tulokseksi saadaan taulukossa 4.2 esitetty metsähakkeen potentiaali.

Taulukko 4.2: Metsähakkeen potentiaali kiintotilavuuksina 100 km etäisyydellä Porvoosta.

| Biomassa | [m ³ /a] |
|-----------------------------|---------------------|
| Ensiharvennusten energiapuu | 296 199 |
| Latvusmassa Mänty | 193 988 |
| Kuusi | 669 442 |
| Lehtipuu | 149 945 |
| Kannot Mänty | 246 186 |
| Kuusi | 823 675 |
| Yhteensä | 2 379 435 |

EnergyPLANissa biomassa käyttöä voidaan mallintaa määrittämällä polttoaineiden (hiili, öljy, maakaasu ja biomassa) keskinäinen jakauma, eli niiden suhteelliset osuudet energiantuotannossa. Esimerkiksi biomassalle on myös mahdollista määrittää tarkka kulutus yksikössä TWh/a ja muille polttoaineille suhteelliset osuudet, joilla täytetään mallinnuksessa energiankulutus. (Lund & Thellufsen 2019, 74 – 75.)

Biomassan energiamäärän ratkaisemiseksi tarvitaan biomassan potentiaalın lisäksi biomassan ominaisuuksia, kuten lämpöarvo ja kosteus. Biomassa-atlaksessa metsähakkeiden metatiedoissa kerrotaan, että biomassat ”muunnettiin kiintotilavuudeksi jakamalla kunkin jakeen biomassa vastaavalla kuivatuoretiheydellä”. Näin ollen laskuissa

on otettava huomioon, että biomassat on ilmoitettu kiintotilavuuksina. Ennen energiamäärien laskemista on ratkaistava biomassan eli polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ja kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo tilavuusyksikössä.

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa voidaan laskea yhtälön (5) avulla (Alakangas et al. 2016, 29)

$$q_{\text{net,ar}} = q_{\text{net,d}} \cdot \left(\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100} \right) - l \cdot M_{\text{ar}} \quad (5)$$

jossa $q_{\text{net,ar}}$ on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg], $q_{\text{net,d}}$ on tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa [MJ/kg], M_{ar} on kosteus saapumistilassa [p-%] ja l on höyrystymislämpö [MJ/kg], joka on vedelle 25 °C lämpötilassa 0,02443 MJ/kg.

Koska biomassojen potentiaali on annettu tilavuusyksikössä, tarvitaan joko eri biomassajakeiden tiheydet tai muutetaan lämpöarvot tilavuusyksikköön. Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo tilavuusyksikössä voidaan laskea yhtälön (6) avulla (Alakangas et al. 2016, 29-30).

$$q_{\text{ar,v}} = \frac{\rho}{1 - \frac{M_{\text{ar}}}{100}} \cdot q_{\text{net,ar}} \quad (6)$$

jossa $q_{\text{ar,v}}$ on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo [MJ/m³] ja ρ on kuiva-aineen kuiva-tuoretiheys [kg/m³]. Kuiva-tuoretiheys tarkoittaa kuivamassaa jaettuna tuoretilavuudella (Alakangas et al. 2016, 12).

Metsähakkeiden energiasisältö voidaan laskea yhtälön (7) avulla (Alakangas et al. 2016, 31).

$$W = \frac{q_{\text{net,ar}}}{3600} \cdot m = \frac{q_{\text{ar,v}}}{3600} \cdot V \quad (7)$$

jossa W on polttoaineen energiasisältö [MWh], $q_{\text{net,ar}}/3600$ on saapumistilan tehollisen lämpöarvon muunto yksikköön MWh/kg, m on polttoaineen massa [kg], $q_{\text{ar,v}}/3600$ on kostean polttoaineen tehollisen lämpöarvon muunto yksikköön MWh/m³ ja V on polttoaineen tilavuus [m³].

Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, kosteus saapumistilassa ja kuiva-tuoretiheys metsähakejakeille on luettu teoksesta *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia* (Alakangas et al. 2016). Samaa teosta voidaan käyttää myös muille biomassoille. Ensiharvennusten energiapuun sisältöä ei ole tarkemmin eritelty, joten sille on käytetty laskuissa ensiharvennusmännyn ominaisuuksia. Metsähakkeen jakeiden tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, kosteus saapumistilassa, kuiva-tuoretiheys, tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ja energiamäärä on listattu taulukkoon 4.3.

Taulukko 4.3: Metsähakkeen potentiaali ja energiasisältö 100 km etäisyydellä Porvoosta sekä metsähakkeen ominaisuuksia (Alakangas et al. 2016).

| Biomassa | V | $q_{\text{net,d}}$ | M_{ar} | ρ | $q_{\text{net,ar}}$ | $q_{\text{ar,v}}$ | W | W |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------|---------|
| | [m ³ /a] | [MJ/kg] | [%] | [kg/m ³] | [MJ/kg] | [MJ/m ³] | [MWh/a] | [TWh/a] |
| Ensiharvennusten energiapuu | 296 199 | 19,56 | 50 | 379 | 8,56 | 6 487 | 533 762 | 0,53 |
| Latvusmassa | | | | | | | | |
| Mänty | 193 988 | 20,09 | 60 | 450 | 6,57 | 7 391 | 398 294 | 0,40 |
| Kuusi | 669 442 | 19,41 | 60 | 610 | 6,30 | 9 605 | 1 786 063 | 1,79 |
| Lehtipuu | 149 945 | 19,42 | 45 | 538 | 9,58 | 9 373 | 390 382 | 0,39 |
| Kannot | | | | | | | | |
| Mänty | 246 186 | 22,36 | 27,3 | 450 | 15,59 | 9 649 | 659 859 | 0,66 |
| Kuusi | 823 675 | 19,18 | 27,3 | 410 | 13,28 | 7 488 | 1 713 169 | 1,71 |
| Yhteensä | 2 379 435 | | | | | | 5 481 529 | 5,48 |

Metsähakkeiden vuosittainen potentiaali yhteensä rajatulla alueella on 5,48 TWh. Tämä vaikuttaa suurelta luvulta verrattuna esimerkiksi tuulisähkötuotantoon, joka oli 6 TWh vuonna 2019. Suuri arvo tarkoittaakin vain potentiaalia metsähakkeelle rajatulla alueella, eikä yksittäisen voimalaitoksen käyttöä. EnergyPLANissa mallintamisessa voisi valita tapauskohtaisesti sopivan määrän biomassan käyttöä potentiaalilin sallimissa rajoissa.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin, miten uusiutuvien energianlähteiden potentiaali vaihtelee, tapoja potentiaalın tarkasteluun ja miten voidaan itse luoda jakauma, eli tuotannon suhde maksimituotantoon, jolla voidaan ottaa huomioon uusiutuvan energian vaihtelevuus, kun mallinnetaan jonkin alueen energiajärjestelmää EnergyPLANissa. Tarkastelussa huomioitiin tuulivoima, aurinkosähkö ja biomassat, joista kahdelle ensimmäiselle muodostettiin jakauma. Työssä myös esiteltiin ja käytettiin useita työkaluja, joilla potentiaalia voidaan tarkastella.

Tuulivoiman ja aurinkosähkön tuotanto riippuu olosuhteista alueellisesti ja ajallisesti. Jotkin alueet ovat esimerkiksi tuulioloiltaan parempia tuulivoiman tuotantoon, kuten merialueet ja rannikot. Tuulituotannolle suotuisia alueita voidaan etsiä tuulen keskinopeuksia tarkastelemalla Tuuliatlaksessa. Tuotannon tarkempaan arviointiin tai sen mallintamiseen tarvitaan kuitenkin tuulen nopeudet tuntidatana.

Auringonsäteilyä tarkastellessa, esimerkiksi karttapohjalla, nopeasti huomataan, että aurinkosähkön tuotantoon vaikuttaa merkittävästi sijainti maapallolla. Mitä pohjoisempi sijainti, sitä pienempi on vuotuinen kokonaissäteilyn määrä Euroopassa. Myös vuoden- ja vuorokaudenaika vaikuttaa säteilyn määrään ja tuotantoon. Aurinkosähkölle voitaisiin määrittää tuotannon jakauma samalla tavalla kuin tuulisähkölle, mutta tähän on kuitenkin paljon suoraviivaisempi tapa olemassa, eli PVGIS-työkalun käyttö, joka antaa tuotannon suoraan valitun kapasiteetin ja sijainnin perusteella.

Biomassan potentiaali riippuu biomassaa tuottavista tekijöistä. Biomassa-atlas on hyvä työkalu eri biomassojen potentiaalien tarkasteluun. EnergyPLANissa biomassaa kuitenkin huomioidaan energiamäärinä, joten Biomassa-atlaksen antamat potentiaalit on muunnettava biomassojen ominaisuuksien avulla energiamääriksi.

Tässä työssä esitettyjen menetelmien avulla lukijan on mahdollista muodostaa tuntijakaumat tuulivoimalle ja aurinkosähkölle itse haluamalleen alueelle ja käyttää niitä EnergyPLANissa.

LÄHTEET

Alakangas Eija, Hurskainen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana ja Korhonen Jaana, 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: VTT. 172 sivua. ISBN 978-951-38-8419-2.

Baskar Chinnappan, Baskar Shikha ja Dhillon Ranjit S., 2012. Biomass Conversion: The Interface of Biotechnology, Chemistry and Material Science. Berlin: Springer. 465 sivua. ISBN 978-3-642-28418-2.

Bioenergia Ry. Puuenergia. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 19.5.2020]. Saatavissa: <https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2020/03/Faktapaketti.pdf>

Connolly David, 2015. Finding and Inputting Data into EnergyPLAN (The FIDE Guide). [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.3.2020]. Saatavissa: <https://energyplan.eu/wp-content/uploads/2013/06/Finding-and-Inputting-Data-into-the-EnergyPLAN-Tool-v5.pdf>

Euroopan komissio. Ilmastotoimet. [Verkkosivusto]. [Viitattu 21.3.2020] Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_fi

Euroopan komissio, 2020. PVGIS. [Verkkosivusto]. [Päivitetty 24.2.2020]. [Viitattu 24.3.2020]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

Goswami D. Yogi & Kreith Frank, 2017. Energy Conversion. Toinen painos. Boca Raton: CRC Press. 1193 sivua. ISBN 978-1-4665-8482-2.

Hau Erich, 2013. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 3. painos. Berlin: Springer. 879 sivua. ISBN 978-3-642-27151-9.

IEA, 2019. Solar energy: Mapping the road ahead. [Verkkajulkaisu]. International Energy Agency. [Viitattu 3.4.2020]. Saatavissa: <https://webstore.iea.org/solar-energy-mapping-the-road-ahead>

Ilmasto-opas.fi, 2019. Suomen ilmastopolitiikalla pyritään vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. [Verkkosivusto]. [Päivitetty 10.9.2019]. [Viitattu 21.3.2020]. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/161b48de-bc6a->

44ef-97fe-83d184fc257a/suomen-ilmastopolitiikalla-pyritaan-vahentamaan-kasvihuonekaasupaastoja.html

Ilmatieteen laitos a. Havaintojen lataus. [Verkkosivusto]. [Viitattu 9.3.2020]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>

Ilmatieteen laitos b. Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat. [Verkkosivusto]. [Viitattu 25.5.2020]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintoasemat>

JRC, 2012. Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries. [Verkkajulkaisu]. Euroopan komissio. [Viitattu 25.5.2020]. Saatavissa: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/PVGIS_EU_2012_publication.png

Kaushika N. D., Mishra Anuradha ja Rai Anil K., 2018. Solar Photovoltaics: Technology, System Design, Reliability and Viability. Cham: Springer International Publishing. 167 sivua. ISBN 978-3-319-72404-1.

Kolari Kalle, 2018. Pitkän aikavälin seurantatutkimus aurinkopaneelien suorituskyvystä. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos. Jyväskylä. 77 sivua.

Lorenzini G. Biserni C. ja Flacco G., 2010. Solar Thermal and Biomass Energy. Southampton: WIT Press. 211 sivua. ISBN 978-1-84564-147-4.

Luke. Biomassa-atlas. [Verkkosivusto]. [Viitattu 16.1.2020]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/biomassa-atlas/>

Lund Henrik & Thellufsen Jakob Znick, 2019. EnergyPLAN Documentation Version 15. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 19.5.2020]. Saatavissa: <https://www.energyplan.eu/wp-content/uploads/2019/09/EnergyPLAN-Documentation-Version15.pdf>

Manwell James, McGowan Jon ja Rogers Anthony, 2009. Wind energy explained: theory, design and application. Toinen painos. Chichester: Wiley. 689 sivua. ISBN 978-0-47001-500-1.

Motiva, 2019. Uusiutuva energia. [Verkkosivusto]. [Päivitetty 5.8.2019]. [Viitattu 24.3.2020]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia

Richter Christoph, Lincot Daniel ja Gueymard Christian A., 2013. Solar Energy. New York: Springer. 744 sivua. ISBN 978-1-4614-5806-7.

Suomen Tuulivoimayhdistys. Tietoa tuulivoimasta. [Verkkosivusto]. [Viitattu 25.3.2020]. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta>

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020. Tuulivoima Suomessa 2019. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.3.2020]. Saatavissa: https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1456-Tuulivoimatilastot_AFRY_full.pdf

Suomen virallinen tilasto (SVT). Energian hankinta ja kulutus. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu 24.3.2020]. ISSN 1799-795X. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ehk/tau.html>

Tahkokorpi Markku, 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Erat Bruno, Hänninen Pekka, Nyman Christer, Rasinkoski Asko ja Wiljander Mats. Helsinki: Into kustannus. 207 sivua. ISBN 978-952-264-663-7.

Tahvainen Timo & Anttila Perttu, 2011. Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. Julkaisussa: Mitchell C. P. & Overend R. P., Biomass and Bioenergy. 35. painos. Elsevier. Sivut 3360-3375. DOI 10.1016/j.biombioe.2010.11.014.

Tilastokeskus 2020a. Fossiilinen ja uusiutuva energia. [Verkkotietokanta]. [Päivitetty 17.4.2020]. [Viitattu 20.4.2020]. Saatavissa: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehk/statfin_ehk_pxt_008.px/

Tilastokeskus 2020b. Uusiutuvien energianlähteiden käyttö. [Verkkotietokanta]. [Päivitetty 17.4.2020]. [Viitattu 20.4.2020]. Saatavissa: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehk/statfin_ehk_pxt_009.px/

Tilastokeskus 2020c. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin ja CO₂-päästöt. [Verkkotietokanta]. [Päivitetty 17.4.2020]. [Viitattu 20.4.2020]. Saatavissa: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehk/statfin_ehk_pxt_001_fi.px/

Tuuliatlas. [Verkkosivusto]. [Viitattu 7.3.2020]. Saatavissa:
<http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Tuuliatlas, 2012. Käyttöohjeet. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 7.3.2020]. Saatavissa:
http://www.tuuliatlas.fi/linked/fi/kayttoohje/Tuuliatlas_kayttoohjeet_14032012.pdf

Vestas. [Verkkosivusto]. [Viitattu 8.3.2020]. Saatavissa:
https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v136-_3_45_mw#!firstorder

wind-turbine-models.com. [Verkkosivusto]. [Viitattu 8.3.2020]. Saatavissa: <https://en.wind-turbine-models.com/powercurves>

LIITE 1. BIOMASSA-ATLAKSEN BIOMASSOJA

| Potentiaali | | |
|--|--|--------------------------------|
| Maanpeite | Maaluokka [ha] | Metsämaa |
| | | Kitumaa |
| | | Joutomaa |
| | Maaluokka FAO:n FRA-määritelmän mukaan [ha] | Metsä |
| | | Muu puustoinen maa |
| | | Muu maa |
| | | Muu maa, puita kasvava muu maa |
| | Kasvupaikan päätyyppi [ha] | Kivennäismaa |
| | | Korpi |
| | | Räme |
| | | Avosuo |
| | Kasvupaikka [ha] | Lehto |
| | | Lehtomainen kangas |
| | | Tuore kangas |
| | | Kuivahko kangas |
| | | Karukko kangas |
| Kalliomaata, hietikko tai vesijättömaa | | |
| Lakimetsä tai tunturi | | |
| Pellon käyttö [ha] | | |
| Kokonaistuotanto | Metsäbiomassat (mänty, kuusi ja lehtipuut) [t] | Elävät oksat |
| | | Hukkapuuosa |
| | | Juuret |
| | | Kanto |
| | | Kuolleet oksat |
| | | Kuorellinen runkopuu |
| | | Neulas/lehvästö |
| | Peltobiomassat [t/a] | Syysvehnä |
| | | Kevätvehnä |
| | | Kevättruis |
| | | Ruis |
| | | Muu ohra |
| | | Mallasohra |
| | | Kaura |
| | | Seosvilja |
| | | Vihantavilja |
| | | Herne |
| | | Härkäpapu |

| | | |
|--|---|--|
| Sivuvirtapotentiaali | | Peruna |
| | | ... |
| | Metsähake [m ³ /a] | Pienpuu [m ³ /a] |
| | | Latvusmassa [m ³ /a] |
| | | Kannot [m ³ /a] |
| | Yhdyskuntien biohajoava jäte [t/a] | Yhdyskuntien biojäte |
| | | Yhdyskuntien muu biohajoava jäte |
| | Yritysten biohajoava jäte [t/a] | Eläin- ja kasvijäte |
| | | Liete |
| | | Paperi- ja pahvijäte |
| | | Puujäte |
| | | Sekajäte |
| | Jätteenkäsittelyn biohajoava jäte [t/a] | Eläin- ja kasvijäte |
| | | Liete |
| | | Paperi- ja pahvijäte |
| | | Puujäte |
| | | Sekajäte |
| | Tuhka [t/a] | Pohjatuuhka, kuona ja kattilatuhka |
| | | Hiilen poltossa syntyvä lentotuuhka |
| | | Turpeen ja käsittelemättömän puun polton lentotuuhka |
| | Rinnakkaispolton pohjatuuhka, kuona ja kattilatuhka | |
| | Rinnakkaispolton lentotuuhka | |
| Peltokasvien sivuvirrat [t/a] | Olki | |
| | Valkuaiskasvien varret | |
| | Perunan varret | |
| | Sokerijuurikkaan naatti | |
| | Viherlannoitusnurmen mahdollinen alkusato | |
| | Nurmen siemenen olki | |
| | Kesantonurmi | |
| | Suojavyöhykenurmi | |
| | Öljykasvien korsi | |
| Lanta (lietelanta, kuivalanta ja virtsa) [t/a] | Lanta eläinsuojasta | |
| | Lanta varastosta | |

| Alkuperä | | |
|-----------------------------------|--|---|
| Metsä | Kokonaisvaranto | Metsäbiomassat [t] |
| | | Maaluokka [ha] |
| | | Maaluokka FAO:n FRA-määritelmän mukaan [ha] |
| | | Kasvupaikan päätyyppi [ha] |
| | | Kasvupaikka [ha] |
| | Metsähakepotentiaali [m ³ /a] | Pienpuu |
| | | Latvusmassa |
| Kannot | | |
| Maatalous | Maankäyttö | Pellon käyttö [ha], useita käyttötapoja |
| | Biomassat | Peltobiomassat [t/a] |
| | Sivuvirrat | Peltokasvien sivuvirrat [t/a] |
| | | Lanta eläinsuojasta [t/a] |
| | | Lanta varastosta [t/a] |
| Yhdyskunnat | Yhdyskuntien biohajoava jäte [t/a] | |
| Yritykset | Eläin- ja kasvijäte [t/a] | |
| | Liete [t/a] | |
| | Paperi- ja pahvijäte [t/a] | |
| | Puujäte [t/a] | |
| | Sekajäte [t/a] | |
| Jätteenkäsittelyn biohajoava jäte | Eläin- ja kasvijäte [t/a] | |
| | Liete [t/a] | |
| | Paperi- ja pahvijäte [t/a] | |
| | Puujäte [t/a] | |
| | Sekajäte [t/a] | |
| Polttolaitokset | Tuhkat [t/a] | |

LIITE 2. TUULEN VUOSIJAKAUMA MATLABILLA

Alla olevaa Matlab-koodia voi käyttää suoraan omiin tarpeisiin tai muokata itselleen sopivammaksi. Ennen kuin koodia käyttää on muistettava tuoda tuulen nopeudet ja tehokäyrän tiedot Import Data -toiminnolla ja nimetä tuodut vektorit. Koodista on vaihdettava tuotujen vektoreiden nimet, tuulivoimalan tiedot (Pmax, käynnistys ja sammutus) ja tallennettavan tiedoston nimi ennen käyttöä.

```
nopeus = tuulennopeus132m; % Tuulennopeudet tuntitasolla pystyvektorina,
                                % tuodaan 'Import Data'-toiminnolla Matlabiin
n = length(nopeus);           % Vektorin alkioden maara, pitäisi olla 8784.
E = [];                       % Alustus teholle tai sähkontuotannolle. HUOM Koska
                                % aikaväli on tunti, tehon ja sähkontuotannon
                                % lukuarvot ovat samoja.
t = 1:n;                      % Tuntivektori myohempaa taulukon luomista varten.
Pmax = 3.45;                  % Tuulivoimalan teho [MW].
kaynnistys = 3;              % Tuulennopeus [m/s], jolla voimala kaynnistyy.
sammutus = 23;               % Tuulennopeus [m/s], jolla voimala sammuu.

% Alueen tuulennopeuksien lisäksi tehokayran tuulennopeudet [m/s] ja
% tehoarvot [MW] on tuotava vektoreina Matlabiin ennen seuraavia vaiheita.

for i = 1:n
    v = nopeus(i); % Tuulennopeuden arvo alkiossa i.

    if v < kaynnistys
        E(i) = 0;
    elseif v > sammutus
        E(i) = 0; % Jos tuulennopeus on pienempi kuin kaynnoistysnopeus tai
                % suurempi kuin nopeus, jolla voimala sammutetaan, ei
                % sähkontuotantoa.
    else
        for j = 1:length(x) % x on voimalan tehokayrasta muodostetun
                            % taulukon tuulennopeudet vektorina.
            if v >= x(j)
                E(i) = P(j); % P on voimalan tehokayrasta muodostetun
                            % taulukon tehoarvot vektorina.
            end
        end
    end
end
end

E = E'; % Kaannetaan luotu vektori pystyyn.
t = t'; % Kaannetaan tuntivektori pystyyn.

Emax = 1 * Pmax; % Suurin mahdollinen yhden tunnin sähkontuotanto.
jakauma = [];    % jakaumavektori

for i = 1:n;
    jakauma(i) = E(i)/Emax; % Lasketaan jakauman arvot verrattuna
                            % maksimitehoon tai -tuotantoon, jolloin
                            % saadaan arvoja valilta 0 - 1.
end

jakauma = jakauma'; % Kaannetaan jakaumavektori pystyyn.

taulukko = table(t,nopeus,E,jakauma); % Luodaan taulukko, joka sisältää
                                        % tunteja, tuulennopeudet, tehon [MW]
                                        % tai tuotannon [MWh] ja jakauman.

tiedostonnimi = 'jakaumaPorvoo.xlsx'; % Annetaan tiedostolle haluttu nimi.
writetable(taulukko,tiedostonnimi); % Luodaan Excel-tilukko, joka sisältää
                                        % jakauman.
```

LIITE 3. ESIMERKKIOTTEET TUULIVOIMAN JA AURINKOSÄHKÖN VUOSIJAKAUMISTA

Esimerkit tuulivoiman ja aurinkosähkön tuotannon vuosijakaumista heinäkuun kahdelta ensimmäiseltä vuorokaudelta. Koko vuoden jakaumassa ensimmäinen luku kuvaa vuoden ensimmäistä tuntia ja seuraavat tunnit on listattu aikajärjestyksessä tämän alle.

| Tuuli | Aurinko |
|-------|---------|
| 0 | 0 |
| 0,01 | 0 |
| 0,021 | 0,01 |
| 0,44 | 0,017 |
| 0,18 | 0,01 |
| 0,44 | 0,266 |
| 0,563 | 0,374 |
| 1 | 0,45 |
| 1 | 0,499 |
| 1 | 0,487 |
| 1 | 0,29 |
| 1 | 0,436 |
| 1 | 0,408 |
| 1 | 0,229 |
| 1 | 0,34 |
| 0,994 | 0,143 |
| 0,897 | 0,088 |
| 0,785 | 0,041 |
| 0,3 | 0,024 |
| 0,059 | 0,002 |
| 0,059 | 0 |
| 0,059 | 0 |
| 0,096 | 0 |
| 0 | 0 |
| 0 | 0 |
| 0,033 | 0 |
| 0,059 | 0 |
| 0,3 | 0,045 |
| 0,468 | 0,111 |
| 0,378 | 0,242 |
| 0,535 | 0,415 |
| 0,161 | 0,395 |
| 0,535 | 0,513 |
| 0,44 | 0,283 |
| 0,215 | 0,422 |
| 0,785 | 0,425 |
| 0,897 | 0,62 |
| 0,976 | 0,357 |
| 0,727 | 0,334 |
| 0,215 | 0,221 |
| 0,44 | 0,065 |
| 0,115 | 0,048 |
| 0,994 | 0,024 |
| 1 | 0 |
| 0,868 | 0 |
| 0,994 | 0 |
| 1 | 0 |
| 1 | 0 |