

## Merekeskkonna ressursside kasutamisest saadava majandusliku kasu mudel: **ENERGEETIKA ALAMMUDELI TÄIENDAMINE**

**GIS modelleerimise ekspert:** Kristjan Piirimäe, Tallinna Tehnikaülikooli vee- ja keskkonnatehnika lektor

**Täienduste tegemisel konsulteeriti:** Ain Kull, Tartu Ülikooli loodusgeograafia vanemteadur

**Aruannet toimetab:** Kaidi Nõmmela, Tartu Ülikooli sotsiaalteaduslike rakendusuringute keskuse (RAKE) projektijuht-analüütik

### Sissejuhatus ja töö eesmärk

2019. aasta suvel viisid Tartu Ülikool ja OÜ Roheline Rada koostöös tuuleenergeetika ekspertidega läbi Rahandusministeeriumi tellitud merekeskkonna ressursside kasutamisest saadava majandusliku kasu mudeli tuuleenergeetika alammudeli ekspertiisi<sup>1</sup> (edaspidi *ekspertiis*). Ekspertiisi tulemusena selgus, et tuuleenergeetika alammudel (edaspidi *mudel*) on oma põhiloogikalt korrektne, kuid mudeli eesmärgipäraseks kasutamiseks, milleks on Eesti mereala ulatuses tuuleenergia majanduslik kasu varieeruvuse hindamine, on vajalik viia läbi mõningad parandus- ja täiendustegevused. Peamisteks vajalikeks täiendustegevusteks olid: põhivalemite kontroll ja parandamine, parameetrite väärtuste ajakohastamine, parameetrite väärtuste dünaamiliseks muutmine, jääoludega arvestamise komponendi lisamine, parameetrite lisamine ja väljajätmine, tundlikkuse analüüsi läbiviimine.

### **Selle töö raames viidi läbi lähtuvalt ekspertiisi tulemustest energeetika alammudeli kahe valemi kontroll ja parandamine.**

Töö käigus kontrolliti ja parandati järgmisi valemeid:

- **toodetava energiakoguse arvutamise valem:**
  - tuule keskmine kiirus ja Rayleigh jaotuse parameetrite väärtus asendati Euroopa tuuleatlase (ingl *New European Wind Atlas*) andmestikus oleva perioodi 2009–2018 keskmise tuule energiatihedusega (ingl *mean energy density*,  $W/m^2$ );
- **tuulepargi rajamise kulu arvutamise valem (investeeringukulud):**
  - tuulikute alusrajatise ehitamiseks kasutatavate sadamate loetelu täiendati Läänemeres paiknevate välisriikide sadamatega;
  - tuuliku alusrajatise ehitamise baaskulu valem asendati gravitatsioonivundamendi (*GBS*) valemiga, mida kasutatakse Läänemeres enam, mis sobib paremini jäätuva ja triivjäaga meredes ja mis on valmistatav kohapeal baassadamas kuivdokis;
  - kaabelduskulu arvutamise valemis elektri põhivõrgust/alajaamadest kauguse arvutamisel asendati näitajad 330kV kõrgepingliinidest kauguse arvestamisega;
  - mere minimaalse sügavuse tuuliku rajamiseks väärtus 2 m asendati 2,5 m.

Järgnevates peatükkides on kirjeldatud muudatuste põhjuseid, sisu ja tulemusi täpsemalt. Tulenevalt aja- ja ressursipiirangutest ning alusandmete puudusest muudeti selle töö raames mudelit vaid osaliselt, st. ei parandatud kõiki ekspertiisis välja toodud vigu ja vigade parandusel arvestati olemasolevaid võimalusi. Muudatuste tulemused on nähtavad veebirakenduses PlanWise4Blue<sup>2</sup> ja need on kirjeldatud Eesti merealade planeeringu<sup>3</sup> mõjude hindamise aruandes tuuleenergeetika arendamiseks sobivate alade abil.

<sup>1</sup> Nõmmela, K., Piirimäe, K. (2019). Mereala majandusliku mõju mudeli ekspertiisi läbiviimine – tuuleenergeetika alammudeli ekspertiis. Tartu Ülikool, OÜ Roheline Rada.

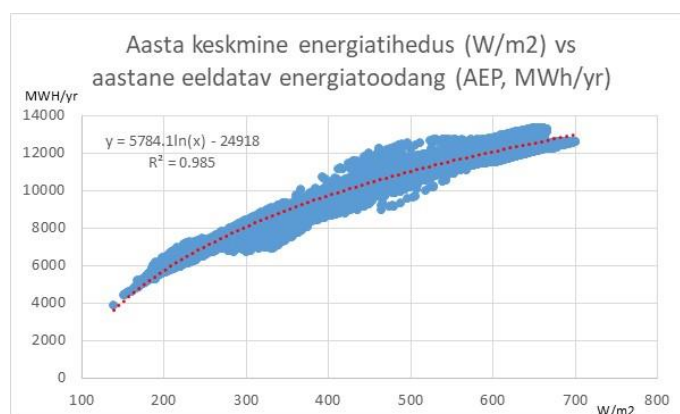
<sup>2</sup> Veebirakendus PlanWise4Blue on leitav veebiaadressilt: <http://www.sea.ee/planwise4blue>

<sup>3</sup> Rahandusministeerium, Hendrikson&Ko (2019), <http://mereala.hendrikson.ee>

## Toodetava energiakoguse arvutamise valemi muutmine

Ekspertiisi<sup>4</sup> tulemusena selgus, et mudelis on **tuuleenergeetikast potentsiaalse aastase energiatoodangu arvutamise valem** ebakorrekne ja kasutusel olnud Rayleigh jaotus ei võimalda kajastada tuule kiiruse ning -energia ruumilist muutust rannikumeres. Lisaks on mudelis tuule keskmine kiirus (m/s) lisatud tuulekaardina, kus tuule kiirus on modelleeritud ligikaudu 100 m kõrguselt. Ekspertiisi tulemusena selgus, et tuule kiirus määrab suuresti ära ka tuuliku kasutusteguri, mistõttu tuleks mudelis kasutada tuulekaarti, mis modelleerib tuule kiirust kõrgemalt (vähemalt 150 m) arvestades tuulikute tehnoloogilisi arenguid.

Valemi korrastamiseks asendati valemis tuule keskmine kiirus ja Rayleigh jaotus Euroopa tuuleatlases mesoskaala mudeliga 150 m kõrgusel aluspinnast modelleeritud tuule energiatihedusega ( $W/m^2$ ), mis on antud majandusliku kasu mudeli sisendina hetkel kõige asjakohasem andmestik, kuna kajastab juba tuule kiiruse sagedusjaotuse ruumilisest erinevusest tulenevaid aspekte ja on vahetult seotud tuuliku aastase eeldatava energiatoodanguga (Joonis 1). Kuigi ekspertiis tõi välja, et Rayleigh jaotus tuleks asendada Weibulli valemiga, siis selle töö raames võeti kasutusele uus värskelt avaldatud ja kõigile avalikult kasutatav andmeallikas Euroopa tuuleatlas (ingl *New European Wind Atlas*<sup>5</sup>), mis on nii täpsuselt kui sisult arvestatav edasimineku võrreldes kasutusel olnud andmeallikaga. Kuna uus andmeallikas muutus avalikult kättesaadavaks, siis jäeti vaheetapp (tuule kiiruse Weibull'i jaotus, mida vajati korrektse energiatiheduse väärtuse arvutamiseks) vahele ja võeti kasutusel otse NEWA modelleeritud energiatiheduse väärtus.



**Joonis 1. Aasta keskmise energiatiheduse ( $W/m^2$ ) ja 3.6 MW tuuliku eeldatava aastase energiatoodangu (MWh/aastas) seos lineaarse regressioonimudelina Edela-Eesti merealal 1 km<sup>2</sup> ruutude keskmisena (n=32681, st. 32681 km<sup>2</sup> hõlmates lisaks merealale ka rannikut ja saari)**

Valemi muutmiseks laeti Euroopa tuuleatlasest alla tuule energiatiheduse ööpäeva keskmised väärtused 150 m kõrgusel aluspinnast, hõlmates ajavahemikku 1. jaanuar 2009 kuni 31. detsember 2018, kokku 3652 andmekihti. Saadud andmed konverteeriti rasterandmebaasideks ja arvutati nende keskmine.

## Tuulepargi rajamise ehk investeeringukulu arvutamise valemi muutmine

Ekspertiisi tulemuste põhjal oli mudelis tuulepargi rajamise kulude arvutamise valemis mitmeid puudusi. Selle töö käigus parandati tuuliku alusrajatise ehitamisel kasutatavate sadamate nimekirja, korrigeeriti tuuliku alusrajatise ehitamise baaskulu ja kaabelduskulu arvutamise valemeid ning muudeti tuuliku rajamiseks sobivat mere minimaalset sügavust.

Tuuliku alusrajatise ehitamisel oli **ühenduseks maismaaga** mudelisse lisatud neli Eesti sadamat: Paldiski, Saaremaa, Sillamäe ja Vana-Pärnu. Ekspertiisi käigus selgitati välja, et need sadamad ei sobi baassadamateks, kus on vajalikud kaid enam kui 120 m pikkuste laevade vastuvõtmiseks ning kraanasid suurte raskuste tõstmiseks (8 MW tuuliku generaatori kaal on 375 tonni, iga tiivikulaba kaal 35 tonni). Seetõttu lisati eeldatavate arendusalade lähedal asuvate välisriikide potentsiaalselt sobivad sadamad.

<sup>4</sup> Täpsemalt ekspertiisi tulemustest: Nõmmela, K., Piirimäe, K. (2019). Mereala majandusliku mõju mudeli ekspertiisi läbiviimine – tuuleenergeetika alammudeli ekspertiis. Tartu Ülikool, OÜ Roheline Rada.

<sup>5</sup> European Wind Atlas (2019). Kättesaadav: [<https://map.neweuropeanwindatlas.eu/>]

Nendeks sadamateks on Muuga, Vene-Balti ja Ventspils sadamad<sup>6</sup>. Iga piksli teekonna hindamiseks teenindava sadamani eeldatakse, et kogu mereala on laevatatav. Selleks, et sadamad ise arvestusest välja ei jääks, laiendati analüüsis laevatatavat ala ühe piksli võrra kõikjale sisemaale. Eelnevalt mudelis kasutatud Eesti sadamaid oleks võimalik kasutada abi- ja hooldustööde sadamatena ning alusrajatiste ehitamiseks kuivdokis.

**Tuuliku alusrajatise ehituse kulu** valemis oli ekspertiisi kohaselt tõlgendatud ebakorrektselt rajamise kulu suurenemist võrreldes vee sügavuse ja kaugusega sadamast. Ekspertide sõnul peaks antud seos toimima koos ühe kaheparameetrilise funktsioonina. Lisaks tuleks ekspertide hinnangul lisakulu arvutamise puhul arvestada komponendina juurde ka kulu sõltuvus jääoludest. Kuigi selle töö raames ei olnud aja- ja ressursipiirangute tõttu võimalik parandada alusrajatise ehituse kulu valemis sügavuse ja jääoludega arvestamise komponente, asendati vundamendi ehituse kulu valem korrektse gravitatsioonivundamendi valemiga. Viimast kasutatakse enam Läänemeres, see sobib paremini jääoludesse, on kohapeal valatav ja tänu olemasolevale andmeallikale ei esine valemis enam ebakorrektselt tõlgendust. Tuuliku alusrajatise ehituskulu valem asendati Rosenauer<sup>7</sup> (2014) võrrandiga (valem 1):

$$ct=278,34 \times d_{shore}+814\,403,8 \quad (1)$$

kus  $ct$  – tuuliku alusrajatise ehitusmaksumus (€/MW),  
 $d_{shore}$  – kaugus ehitussadamast meremiilides.

Olulise puudusena ei kajasta ka täiendatud valem sügavust statistiliste lähteandmete puudumise tõttu.

**Kaabelühenduste rajamiskulude** arvutamisel kasutati seni mudelis 110 kV mere- ja maakaabli hindu, mis võimaldavad liita kuni 100 MW meretuulepargi. Samas on mudeli arvestuse aluseks võetud minimaalselt 100 MW võimsusega tuulepark. Sellest tulenevalt tõi ekspertiis välja, et tuuliku kauguse ja täiendavate alajaamade väljaehitamise kulude arvestamisel tuleks arvestada kaugust 330 kV kõrgepingeliinist. Selle töö käigus muudeti mudelit selliselt, et kaabelühenduste rajamiskulu modelleerimisel võetakse arvesse ainult 330 kV kõrgepingeliine ja lähtutakse eeldusest, et tuulepargi ühenduskaabel viiakse kululähima 330 kV kõrgepingeliinini. Arvutamisel ei kasutatud vektorandmete puudumise tõttu Läti kõrgepingeliini.

Samuti muudeti mudelis tuulepargi rajamiseks sobivat **mere minimaalse sügavuse väärtust**, mis seni oli mudelis 2 m. Ekspertiisi tulemusena selgus, et väärtus 2 m on liiga vähe, kuna suurte tuulikute (nt 8 MW, 10 MW) püstitamiseks kasutatakse erilaevasid ning nende süvised ei võimalda teostada töid 2 m sügavusel vees. Sellest tulenevalt soovitasid eksperdid mere minimaalseks sügavuseks määrata mudelis vähemalt 4 m. Samas, majandusliku kasu hindamise seisukohalt esineb Eesti merealal piirkondi, kus on väiksemaid 2,5 m madalaid või rannikuäärseid alasid, kus vesi madal ja muidu ümbritsev meri sügavam (nt. Nasva sadama „meretuulik“), mida on võimalik käsitleda eranditena. Selle tulemusena muudeti mere minimaalseks sügavus 2 meetrilt 2,5 meetrini<sup>8</sup>.

<sup>6</sup> Kuigi ekspertiis tõi välja, et baassadamate valimiseks on vajalik välja töötada selged hindamiskriteeriumid ja nendest tulenevad valmise tunnused, siis selle töö raames ei olnud tulenevalt aja- ja ressursipiirangutest võimalik seda teha. Mudelisse lisati vaid lähimad sadamad, mis potentsiaalselt sobivad arendusalade teenindamiseks.

<sup>7</sup> Rosenauer, E. 2014. Investment costs of offshore wind turbines. University of Michigan. A report of the Center for Sustainable Systems. Report No. CSS14-27

<sup>8</sup> Mere minimaalse sügavuse väärtus on mudelis kergesti muudetav parameeter, mistõttu saab seda erinevate stsenaariumide korral muuta.