



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**VESINIKU TOOTMISE, HOIUSTAMISE JA
KASUTAMISE MODELLEERIMINE ENERGYPRO
TARKVARA ABIL**

**HYDROGEN PRODUCTION, STORAGE AND
CONSUMPTION MODELLING WITH ENERGYPRO
SOFTWARE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane:

Artjom Rem

Üliõpilaskood:

185098EAAB

Juhendaja:

Reeli Kuhi-Thalfeldt,
vanemlektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"18" mai 2022

Autor: Artjom Rem

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"18" mai 2022

Juhendaja: Reeli-Kuhi Thalfeldt

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina **Artjom Rem**

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modelleerimine energyPRO tarkvara abil**,

mille juhendaja on **Reeli Kuhi-Thalfeldt**,

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

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

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

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

18.mai 2022 (*kuupäev*)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Artjom Rem

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modelleerimine energyPRO tarkvara abil

Kuupäev:
18.05.2022

64 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Reeli Kuhi-Thalfeldt

Sisu kirjeldus:

Käesolevas töös modelleeriti ja analüüsiti kolme erinevat alternatiivi. Tulemustest selgub, et Eestis tuulepargil on rohkem potentsiaali, sest teises alternatiivis päikesepargi elektritoodang on 2 korda vähem võrreldes esimese alternatiiviga. Kolmas alternatiiv näitas, et kui tuulepark koos päikesepargiga toodavad elektrienergiat, siis nad kogu aeg kompenseerivad teineteist ja vajaduse korral koostootmisjaam aitab katta elektritarbimist. Kolmanda alternatiivi tulemused on positiivsed ja kogu aeg tarbimine on kaetud. Samal ajal oli uuritud erinevad energyPRO vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise võimalused. Iga aastaga energyPRO uuendab oma tarkvara ja võimaldab süveneda vesiniku energeetika suunda modelleerides erinevate variantidega. Praegu elektrolüüs on ainukene vesiniku tootmise modelleerimisvõimalus tarkvaras. Vesiniku kasutamise võimalused on erinevad: kütuseks koostootmisjaama jaoks, anaeroobse kääritamise metanooli tootmiseks ja uue tarkvara versioonis kütuseks transpordi jaoks. Eesti elektrisüsteemi jaoks on kasu sellisest uuest salvestuslahendusest ja selline lahendus võimaldab kasutada taastuvallikaid koos elektrolüüsi seadmega ning salvestada ülejääki. Siis tuleb välja, et maksimaalselt kasutatakse rohelist energiat ja hoiatakse kaua vesinikuna. Vajadusel korral koostootmisjaam toodab vesinikust taas elektrit.

Töö tulemusena on valmis harjutusülesanne õppeaine „Haja- ja taastavenergeetika“ jaoks. Tudengid saavad tutvuda selle tehnoloogiaga ja iseseisvalt modelleerida vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise mudelit, mis on oluline energeetika arengusuund.

Märksõnad: vesiniku tootmistehnoloogiad, elektrolüüs, vesiniku hoidla, päikesepark, tuulepark, koostootmisjaam, elektritoodang, vesiniku toodang, vesiniku tarbimine, energyPRO

ABSTRACT

Author: Artjom Rem

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Hydrogen production, storage and consumption modelling with energyPRO software

Date: 18.05.2022

64 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Reeli Kuhi-Thalfeldt

Abstract:

In the present work, three different alternatives were modeled and analyzed. The results show that the wind farm in Estonia has more potential, because in the second alternative the electricity production of the solar park is 2 times less than in the first alternative. The third alternative showed, that when a wind farm with a solar park produces electricity, they always compensate each other and, if necessary, the cogeneration plant helps to cover electricity consumption. The results of the third alternative are positive and all consumption is covered. At the same time, different options for the hydrogen production, storage and consumption of energyPRO were explored. Every year, energyPRO updates own software and allows you to go into the direction of hydrogen energy with different options. Currently, electrolysis is the only way to model hydrogen production in software. The consumption of hydrogen are different: as fuel for a cogeneration plant, anaerobic digestion for methanol production and in the new software version as fuel for transport. The Estonian electricity system benefits from such a new storage solution and such a solution allows to use of renewable sources with an electrolysis unit and the storage of surplus. Then it turns out that maximum use is made of green energy and stored in compressed gas for a long time. If necessary, the cogeneration plant will again generate electricity from hydrogen. As a result of the work, an exercise task for the subject "Distributed and Renewable Energy System" has been completed. Students can get acquainted with that technology and independently model a model of hydrogen production, storage and consumption, where the development of electrical power engineering is important.

Keywords: hydrogen production technologies, electrolysis, hydrogen storage, solar park, wind farm, cogeneration plant, electricity production, hydrogen production, hydrogen consumption, energyPRO

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modelleerimine energyPRO tarkvara abil**

Lõputöö teema inglise keeles: **Hydrogen production, storage and consumption modelling with energyPRO software**

Üliõpilane: **Artjom Rem, 185098EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **Bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Reeli Kuhi-Thalfeldt**

Lõputöö kaasjuhendaja:

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **01.07.2022**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Artjom Rem
Üliõpilane (allkiri)

Reeli Kuhi-Thalfeldt
Juhendaja (allkiri)

Lauri Kütt
Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Euroopa Liidu ja Eesti energia- ja kliimapolitika eesmärkideks on taastuvatest energiaallikatest elektrienergia tootmise osakaalu kasv, mille tõttu on oodata tuule- ja päikeseelektril elektritootmisseadmete suuremahulist kasutuselevõttu. Nende tootmisseadmete puhul on tegemist juhitamatute elektri tootjatega, kelle toodang sõltub ilmastikutingimustest nagu tuulekiirus ja päikesekiirgus. Samas peab igal ajahetkel olema tagatud tasakaal elektri tarbimise ja tootmise osakaal ning seetõttu suureneb vajadus erinevate salvestuslahenduste kasutamiseks. Euroopa Liidu komisjon on üheks perspektiivseks arengusuunaks välja pakkunud vesiniku abil energia salvestamise.

Vesiniku abil elektrienergia salvestamine tähendaks, et odavama elektrituruhinna korral toodetakse hüdrolüüseriga vesinikku ning kõrgema elektri hinna korral toodetakse sellest kütuseelemendiga taas elektrit. Käesoleval hetkel tootmise ja tarbimise tasakaalustamiseks vesinikku suuremahuliselt ei kasutata. Kuna aga tegemist on Euroopa Liidu poolt välja pakutud perspektiivse rohepöörde tehnoloogiaga, mille alaseid uuringuid on käimas nii Eestis kui ka mujal. Seetõttu oleks vajalik vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise teemat kajastada ka

õppetööd. Üheks selliseks kohaks on õppeaine Haja- ja taastuvenergeetika, kus lisaks erinevate elektrijaamade toodangu modelleerimisele ja tasuvuse hindamisega uuritakse ka erinevate salvestite talitlust ja tasuvust. Siiani on aga salvestite all uuritud pumphüdroelektri ja akulahenduste kasutust.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on koostada õppeaine Haja- ja taastuvenergeetika tarbeks vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise harjutusülesanne ning anda selle teostamiseks vajalik teoreetiline taust. Seejärel teha harjutus läbi konkreetse näite abil lisades täiendavalt juurde ka elektrituuliku ja seejärel päikesepaneelid ning võrrelda erinevate salvestusstrateegiatega kasutamise otstarbekust.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Millised on vesiniku tootmise ja selle kasutamise tehnoloogiad ja võimalused?

Millisel määral on energyPRO sobilik vesiniku tootmise, hoiustamise ja sellest elektri tootmise modelleerimiseks?

Kuivõrd palju oleks sellisest salvestuslahendusest Eesti elektrisüsteemis kasu?

4. Lähteandmed

EnergyPRO mudeli lähteandmeteks on elektrituruhinnad, päikesekiirguse ja tuulekiiruse mõõteandmed, elektrolüüseri, vesinikuhoidla ja kütuseelemendi modelleerimise sisendandmed.

5. Uurimismeetodid

Töös koostatakse kirjanduse analüüsi põhjal kokkuvõtte vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise võimalustest. Analüüsi osas kasutatakse modelleerimist energyPRO tarkvara abil.

6. Graafiline osa

Tähtsamad graafikud: elektrituru tunnipõhine börsihind, modelleeritud tunnipõhine vesiniku toodang, hoidla kasutamine, kütuseelemendi elektri- ja soojusenergia toodang. Olulisemad joonised, graafikud ja tabelid lähevad töö põhiosasse.

7. Töö struktuur

TIITELEHT

AUTORIDEKLARATSIOON

LÜHIKOKKUVÕTE

ABSTRACT

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

EESSÕNA

SISSEJUHATUS

1. VESINIKU TOOTMISE, HOIUSTAMISE JA KASUTAMISE TEHNOLOOGIAD JA EUROOPA LIIDU STRATEEGIA

1.1. Euroopa Liidu vesiniku strateegia

1.1.1. EL investeeringud vesiniku strateegia eesmärkide saavutamiseks

1.2. Vesiniku tootmise tehnoloogiad

1.2.1. Auru metaani reformimine

1.2.2. Söe gaasistamine

1.2.3. Elektrolüüs

1.2.4. Termokeemilised protsessid

1.3. Vesinik nagu tulevik mootorikütus

1.4. Roheline vesinik kui kliimaneutraalne kütus koostootmisjaamades

1.5. Vesiniku salvestamine

2. VESINIKU TOOTMISE, HOIUSTAMISE JA KASUTAMISE MODELLEERIMINE

2.1. Modelleerimistarkvara energyPRO

2.3. Päikesepargi toodangu modelleerimine

2.4. Tuulepargi toodangu modelleerimine

2.5. Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modelleerimine

3. VESINIKUL PÕHINEVA SALVESTUSE KASUTATAVUSE ANALÜÜS JA TULEMUSED

3.1. Esimese alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs⁴¹

3.2. Teise alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs

3.3. Kolmanda alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs

3.4. Alternatiivide võrdlus

3.5. Harjutusülesande koostamine

KOKKUVÕTE

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

LISAD

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamisteks kasutatud kirjanduse allikateks on aruanded, arengukavad ja teadusartiklid.

Oluline alusdokument töö kirjutamiseks on Euroopa Liidu vesinikustrateegia (A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe).

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbitöötamine ja lähteandmete kogumine – 18.11.2021

Teoreetilise osa kirjutamine – 18.11.2021

Arvutuste/mõõtmiste/modelleerimise teostamine – 18.02.2022

Uuringu tulemuste kirjeldamine ja järelduste kirjutamine – 17.03.2022

Kokkuvõtte koostamine, töö esimene versioon valmis ja juhendajale läbilugemiseks saatmine – 06.04.2022

Paranduste sisseviimine, juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine – 13.05.2022

Töö lõplik versioon valmis – 17.05.2022

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1. VESINIKU TOOTMISE, HOIUSTAMISE JA KASUTAMISE TEHNOLOOGIAD JA EUROOPA LIIDU STRATEEGIA	14
1.1. Euroopa Liidu vesiniku strateegia	15
1.1.1. EL investeringud vesiniku strateegia eesmärkide saavutamiseks	17
1.2. Vesiniku tootmise tehnoloogiad	18
1.2.1. Auru metaani reformimine	18
1.2.2. Sõe gaasistamine	19
1.2.3. Elektrolüüs	20
1.2.4. Termokeemilised protsessid	21
1.3. Vesinik nagu tulevik mootorikütus	22
1.4. Roheline vesinik kui kliimanetraalne kütus koostootmisjaamades	23
1.5. Vesiniku salvestamine	24
2. VESINIKU TOOTMISE, HOIUSTAMISE JA KASUTAMISE MODELLEERIMINE	26
2.1. Modelleerimistarkvara energyPRO	26
2.2. Modelleritud tehnoloogia	27
2.3. Päikesepargi toodangu modelleerimine	30
2.4. Tuulepargi toodangu modelleerimine	35
2.5. Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modelleerimine	38
3. VESINIKUL PÕHINEVA SALVESTUSE KASUTATAVUSE ANALÜÜS JA TULEMUSED	41
3.1. Esimese alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs	41
3.2. Teise alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs	44
3.3. Kolmanda alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs	48
3.4. Alternatiivide võrdlus	51
3.5. Harjutusülesande koostamine	53
KOKKUVÕTE	54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	56
LISAD	59

EESSÕNA

Lõputöö idee käis välja juhendajaga Reeli Kuhi-Thalfeldt. Autor tänab juhendajat, kelle teadmised olid töö koostamisel abiks ning kes aitas modelleerida vesiniku toodangu andmeid EnergyPRO tarkvaraga. Kõikide töös sisalduvate andmete kogumine toimus autori alalises elukohas Kalevipoja põik 3, Tallinnas.

SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu ja Eesti energiapoliitika eesmärk on taastuvatest energiaallikatest elektrienergia tootmise osakaalu kasv, mille tõttu võib oodata tuule- ja päikeseelektri jõul töötavate elektritootmiseseadmete suuremahulist kasutuselevõttu. Need elektritootjad on juhtimatud, sest nende toodang sõltub ilmastikutingimustest nagu tuulekiirus ja päikesekiirgus. Samal ajal peab olema tagatud elektri tootmise ja tarbimise osakaal ja sellest järeldeb, et on vaja uut salvestuslahendust. Euroopa Liidu Komisjonil on üks perspektiivne arengusuund ja see on vesinik. Vesinikku saab kasutada lähteainena, kütusena või energiakandjana ja salvestina ning samal ajal võib vesinikku rakendada väga palju tööstuses ja transpordis.

Vesinik on liigitatud tootmise järgi halliks, siniseks ja rohelineks vesinikuks. Praegu on maailmas halli vesiniku osakaal 97%. Halli vesinikku toodetakse eelkõige looduslikust maagaasist, tootmise protsessi käigus tekib ka CO₂. Ka sinise vesiniku tootmisprotsessi tulemus on lisaks vesinikule CO₂, aga see on kinni püütud. Seetõttu nimetatakse seda siniseks vesinikuks. Sinist vesinikku toodetakse maagaasist. Rohelise vesiniku tootmistehnoloogiad kasutavad taastuvat energiat ja vee elektrolüüsi. Vee lagundamisel elektrolüüsides tekivad vesinik ja hapnik ning CO₂ heidet ei tule. Selle põhjusel valis Euroopa Liit uueks arengusuunaks energeetikas vesiniku, mis asendab fossiilkütuseid ja alandab tunduvalt CO₂ heidet. [1]

CO₂ hinna kasvu tõttu tekkis Euroopa strateegia vesinikutehnoloogia laiemale kasutamisele perioodil 2020–2030. Strateegias uuritakse puhta vesiniku tootmise ja kasutamise toetamise meetmeid, keskenduses eelkõige taastuva vesiniku süvalaiendamisele. Praegused vesinikutehnoloogiad on kallid, seetõttu vajab vesinik tootmistehnoloogiate arenemist. Eestis vesiniku tootmine ja tarbimine põhimõtteliselt puudub, aga piloot- ja äriprojektid eksisteerivad. Näiteks 2024. aastaks plaanitakse alustada vesiniku tootmist Väos ja hakatakse kasutama vesinikku Tallinna taksodes. Samal ajal on plaanis alustada vesiniku tootmist Tartus ja kasutada vesinikku bussides. Lisaks sellele saavutab 2025. aastaks täisvõimsuse Põhjamaade suurim päikeseelektrijaam Raadil, kus toodetakse vesinikku. Enne vesinikutehnoloogia kasutuselevõttu tuleb tuvastada vesiniku tootmisvõimalusi, rakendusvaldkondi ja kasutamise potentsiaali. [1] [2]

Eesti vesiniku pilootprojektide eesmärk on määrata roheline ja sinise vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise potentsiaal. Analüüs annab riigiasutustele arusaama infrastruktuuri edasise planeerimiseks ja rajamiseks. Samal ajal võib tuvastada vesiniku

kasutuselevõtuks valdkonnad, vajalikud investeeringud, riskid ja mõjud. Projektide analüüs vesiniku potentsiaalid on oluline nii avaliku kui ka erasektori jaoks.

Bakalaureuse lõputöö teemaks on valitud vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modelleerimine energyPRO tarkvara abil. Tegemist on Euroopa Liidu poolt välja pakutud perspektiivse rohepöörde tehnoloogiaga, kus uuringud on juba käimas nii Eestis kui ka mujal. Seetõttu oleks vajalik vesiniku teemat kajastada ka õppetöös. Üheks sobivaks kohaks on õppeaine „Haja- ja taastuvenergeetika“, kus uuritakse ka erinevate salvestite talitlust ja tasuvust. Töö eesmärgiks on koostada õppeaine Haja- ja taastuvenergeetika tarbeks vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise harjutusülesanne ning anda selle teostamiseks vajalik teoreetiline taust. See tarkvara võimaldab teha analüüsi ja järelkult analüüsist tulevad järeldused ning tulemused. Seejärel võib võrrelda erinevaid roheline vesiniku tootmisstrateegiaid (tuulepark koos elektrolüüsiga, päikesepark koos elektrolüüsiga ja tuulepark päikesepargi ning elektrolüüsiga). Tulemustest saab hinnata vesiniku salvestuslahendust Eesti elektrisüsteemi jaoks.

Töö teostamisel käsitletakse erinevaid põhilisi vesiniku tootmise tehnoloogiaid. Need on: auru metaani reformimine, söe gaasistamine, elektrolüüs ja termokeemilised protsessid.

1. VESINIKU TOOTMISE, HOIUSTAMISE JA KASUTAMISE TEHNOLOOGIAD JA EUROOPA LIIDU STRATEEGIA

Tänapäeval vesinik on väga rikkalik ja kõige levinum ressurss maailmas, aga veel ei leidu oma vaimset vormi. Vesinikku võib toota nii taastuvatest kui ka mittetaastuvatest allikatest. Esimene võimalus tootmiseks on keskkonnasõbralik, teisel tootmise võimalusel eraldub süsinikdioksiidi või mõni muu süsiniku jäägi vorm. Põhimõte on teha selline tehnoloogia, mis oleks renthaabne ning mis ei tekitaks kasvuhoonegaasi, ehk CO₂. Tootmise puhul on väga tähtis teha selgeks, millist primaarenergiat saab kasutada, et see oleks keskkonnasõbralik. Vesiniku tootmine hõlmab vesiniku eemaldamist süsivesinikest. Need on kivisüsi, nafta ja maagaas. Samuti on veel mitmed tootmise võimalused: süsivesinike aurreformatsioon, söe gaasistamine, elektrolüüs või termokeemilised protsessid, kasutades tuuma- või kontsentreeritud kõrgtemperatuurilist soojust, päikeseenergia tehnoloogiaid. Palju neist tootmistehnoloogiatest on kaubanduslikult saadavad. Kivisöe gaasistamine ja termokeemiline tuumaenergia sobivad ainult vesiniku suuremahuliseks tsentraliseeritud tootmiseks, aga aurreformimine ja elektrolüüs sobivad vesiniku väikesemahuliseks detsentraliseeritud tootmiseks. [3]

Vesinikku kasutatakse väga mitmetes tööstuse valdkondades. Väga palju vesinikku kasutatakse hetkel ammoniaagi tootmiseks (NH₃). Sellest edasi toodetakse lämmastiku põhjal väetiseid, sünteetilisi kiudusid, plastmasse ning erinevad ravimeid. Vesinikust ja kloorist toodetakse vesinikukloriidi (HCl). Vesinikku kasutatakse erinevate orgaaniliste ainete tootmiseks. Toiduainete tööstuses kasutatakse vesinikku näiteks margariini tootmiseks. [3]

Maailmas kasutatakse ligikaudselt 16 triljonit t^o vesinikku keemia- ja toomisvaldkonnas. Vesinikku lisatakse rutiinselt küllastumata rasvadele, nt margariinile, et muuta need hajutatavaks ja pikendada säilivusaega. NAE uuringutest on saadud vesinikku 48% maagaasist, 30% naftast, 18 kivisöest ja 4% elektrolüüsist. Iga protsessi jaoks on eraldi kapital, lähteaine, haldus- ja hoolduskulud. Kuna mõned tootmistehnoloogiad ei ole veel kättesaadavad, siis on raske hinnata ja eeldada, mis kulud tulevad. [3]

1.1. Euroopa Liidu vesiniku strateegia

Vesinik on oluline osa Euroopa Liidu energiasüsteemi integreerimise strateegiast. Komisjon kinnitas 2020. aastal uue strateegia vesiniku kohta Euroopas. See koondab erinevaid tegevussuundi – teadusuuringutest ja innovatsioonist tootmise ja infrastruktuuri kaudu kuni rahvusvahelise mõõtmeni. Strateegias uuritakse, kuidas taastuva vesiniku tootmine ja kasutamine võib aidata Euroopa Liidu majandust kuluefektiivsel viisil vähendada süsinikdioksiidi heitgaase ja aidata kaasa ka Covid-19 majanduse taastumisele. Tõenäoliselt sõltuvad mõned sektorid ka tulevikus põlevkütustest. See tähendab, et Euroopa Liidu süsinikuneutraalseid eesmärke ei saavutata ainult suurema elektrifitseerimise kasutamisega. Üks võimalik lahendus on taastuvate energiaallikate muutmine vesinikuks, kuna töödeldud vesinik annab kõrgekvaliteetset soojust, mida saab kasutada mootori kütusena, tööstuses ja põllumajanduses. Vesiniku salvestamise potentsiaal on eriti kasulik elektrivõrkudele, kuna vesinik võimaldab taastuvenegiat säilitada mitte ainult suurtes kogustes, vaid ka pikka aega. See tähendab, et vesinik võib aidata parandada energiasüsteemide paindlikkust ja nõudlust, kui elektrit toodetakse liiga palju või liiga vähe. Samuti see aitab tõsta ka energiatõhusust kogu Euroopas. [1]

Euroopa Puhta Vesiniku Liit loodi koos Euroopa Liidu vesinikustrateegiaga 2020. aastal. Liit ühendab tööstuse, riiklikud ja kohaliku ametiasutused, kodanikuühiskonna ja muud sidusrühmad. Selle eesmärk on vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtt aastaks 2030, ühendades taastuva ja vähese süsiniku sisaldusega vesiniku tootmist, tööstuse nõudlust, transpordis ja muudes sektorites ning vesiniku ülekande ja jaotamise. [1]

Vesinikku saab toota mitmesuguste protsesside abil. Need tootmisrajad on olenevalt tehnoloogiast ja energiaallikast ning neil on erinevad kulud ja materjali vajadused. Euroopa Liidu prioriteediks on peamiselt taastuva vesiniku väljatootamine tuule ja päikeseenergia abil. Taastuv vesinik on pikas perspektiivis Euroopa kliimaneutraalsuse ja nullreostuse eesmärgile kõige sobivam variant. Taastuva vesiniku valik põhineb selle tootmises elektrolüüsi teel Euroopa tööstuslikul võimsusel. See annab uusi töökohti ja majanduskasvu ning toetab kulutõhusat integreeritud energiasüsteemi. Aastaks 2050 peab taastuv vesinik olema laiemalt kasutusele võetud. See protsess on juba alustanud. [1]



Joonis 1.1 Euroopa Liidu vesinikustrateegia [1]

Joonisel 1.1 on näha Euroopa Liidu strateegiat ja vaheetappi. Esimeses etapis, aastatel 2020–2024, on strateegia eesmärk paigaldada vähemalt 6 GW taastuva vesiniku elektrolüüsi teel tootmist. Tootmise kogus oleks kuni üks miljon tonni taastuvat vesinikku. [1]

Teises etapis, aastatel 2025–2030, on strateegia eesmärk paigaldada vähemalt 40 GW taastuva vesiniku elektrolüüsi teel tootmist. [1]

Kolmandas etapis, alates 2030. aastast ja aastani 2050, peaksid taastuva vesiniku tehnoloogiad jõudma küpsuseni ja neid tuleks laiemalt kasutusele võtta, et jõuda kõikidesse süsinikdioksiidiheitega sektoritesse, kus muid alternatiive ei pruugi olla või millel on kõrgemad kulud. [1]

Vesinikumajanduse rajamine Euroopas nõuab täielikku väärtusahela lähenemist. Vesiniku tootmine taastuvatest või madala süsinikusisaldusega allikatest, infrastruktuuri arendamine vesiniku tarnimiseks lõpptarbijatele ja turunõudluse tekitamine peavad käima paralleelselt. See nõuab ka tarnekulude vähendamist. Elutsükli põhises lähenemises on vaja minimeerida negatiivseid kliima- ja keskkonnamõjusid vesinikusektoris. Vesiniku nõudluse ja pakkumise suurendamiseks on tõenäoliselt vaja erinevaid toetusi, diferentseeritud vastavalt selle strateegia visioonile seada esikohale taastuvenergia vesiniku kasutuselevõttu. Euroopa Liit on toetanud vesiniku uurimistööd ja innovatsiooni juba aastaid traditsiooniliste koostööprojektide kaudu. Need jõupingutused on võimaldanud mitmel Euroopa Liidu tehnoloogial saavutada ülemaailmne juhtpositsioon tulevate tehnoloogiate osas, eriti elektrolüüsi ja vesiniku tanklade osas. Tagamaks täielik vesinikuahel, tuleb teostada täiendavaid uuringuid. [1]

1.1.1. EL investeeringud vesiniku strateegia eesmärkide saavutamiseks

Aastaks 2024 ja 2030 nõuab selles Euroopa Liidu strateegias eesmärkide saavutamine tugevat investeerimiskava, mis kasutab ära sünergia ja tagab avaliku toetuse erinevate Euroopa Liidu fondide ja EIP rahastamise vahel, kasutades võimendavat mõju ja vältides liigset toetust. Nüüdsest kuni 2030. aastani võivad investeeringud elektrolüüsiseadmetesse ulatuda 24–42 miljardi euroni. Lisaks oleks sama perioodi jooksul vaja 220–340 miljardit eurot, et suurendada ja otse ühendada elektrolüüsiseadmed 80–120 GW päikse- ja tuuleenergia tootmisega, et varustada vajalikku elektrit. Investeeringud olemasolevate tehaste moderniseerimiseks süsiniku kogumise ja säilitamise väärtuseks on 11 miljardit eurot. Samuti on vesiniku transpordiks, jaotamiseks ja ladustamiseks ning vesiniku tankimiseks vaja 65 miljardit eurot. Nüüdsest kuni 2050. aastani ulatuksid investeeringud tootmisvõimsustesse 180–470 miljardi euroni. Lõpuks nõuab ka kasutussektorite kohandamine vesiniku tarbimise ja vesinikupõhiste kütustega olulisi investeeringuid. Maanteetranspordi sektoris täiendava 400 väiksemahulise vesiniku tankla rajamine võib nõuda 850–1000 miljonit eurot investeeringut. Nende investeeringute ja terve vesiniku ökosüsteemi toetamiseks Komisjon käivitab Euroopa Puhta Vesiniku Liidu. Sellel alliansil on käesoleva strateegia meetmete rakendamine ja investeeringute otsustav roll. See toob kokku riikliku, piirkondliku ja kohaliku tööstuse ametiasutusi ja kodanikuühiskondi. Alliansi põhiülesanne on investeerimisprojektide ülesehitamine. See hõlbustab kooskõlastatud investeeringuid ja vesiniku väärtusahelat ning era- ja avaliku sektori sidusrühmade koostöö kogu Euroopa Liidus, vajaduse korral avaliku toetuse pakkumine ja erainvesteeringute tõrjumine. Samuti saab muuta neid projekte nähtavaks ja võimaldada sobivat tuge leida. Praegu on uued 1,5–2,3 GW taastuvvesiniku tootmisprojektid juba ehitamisel ja täiendavad 22 GW elektrolüüsi projektid vajavad täpsustamist ja kinnitust. Allianss omakorda hõlbustab samal ajal suurte investeerimisprojektide koostööd mitmel tasandil vesiniku väärtusahelas, sealhulgas IPCEI projektide jaoks. Spetsiaalne IPCEI vahend võimaldab anda suurte turutõrgete kõrvaldamiseks vesinikust saadud kütuste integreeritud projektid, mis annavad märkimisväärse panuse kliima eesmärkide saavutamiseks. Lisaks on osa uuest taastamisinstrumendist Next Generation EU, Invest EU programmi võimsus suureneb enam kui kahekordselt. See toetab jätkuvalt vesiniku kasutuselevõttu. Uuendatud säästva rahanduse strateegia, mis võeti vastu 2020. aasta lõpuks, ja Euroopa Liidu säästva rahanduse taksonoomia juhivad vesinikku tehtavaid investeeringuid peamistes majandusvaldkondades, edendades tegevusi ja projekte, mis annavad olulise panuse dekarboniseerimisse. Mitmed riigid määratlesid taastuva ja vähese süsinikusaldusega vesiniku kui riikliku energia- ja kliima kava strateegiline osa. Need riigid peavad ka arvestama Euroopa Liidu strateegiaga. Järgmise

rahastamisperioodi raames 2021–2027. aastatel teeb Komisjon koostööd liikmesriikide, piirkondlike ja kohalike ametiasutustega, et need fondid toetaksid taastuenergia ja vähese süsinikusaldusega uuenduslike lahendusi vesiniku valdkonnas. [1]

1.2. Vesiniku tootmise tehnoloogiad

Selles peatükis käsitletakse kõige populaarsemaid ja kasutatavaid vesiniku tootmise tehnoloogiad ning nende eeliseid. Need on auru metaani reformimine, söe gasifikatsioon, elektrolüüs ja termokeemilised protsessid.

1.2.1. Auru metaani reformimine

Praegu kasutatakse vesiniku tootmiseks väga palju süsivesiniku aurumuundamise meetodit. Tavaliselt on lähteaine selleks protsessiks metaan. Põhiprotsess hõlmab süsivesiniku auru soojendamist. Näiteks võib see olla maagaas (CH₄) katalüütilises reaktoris. Maagaas reageerib kõrge rõhu ja temperatuuri all oleva veeauruga, mille tulemuseks on süsinikoksiid ja vesinik:



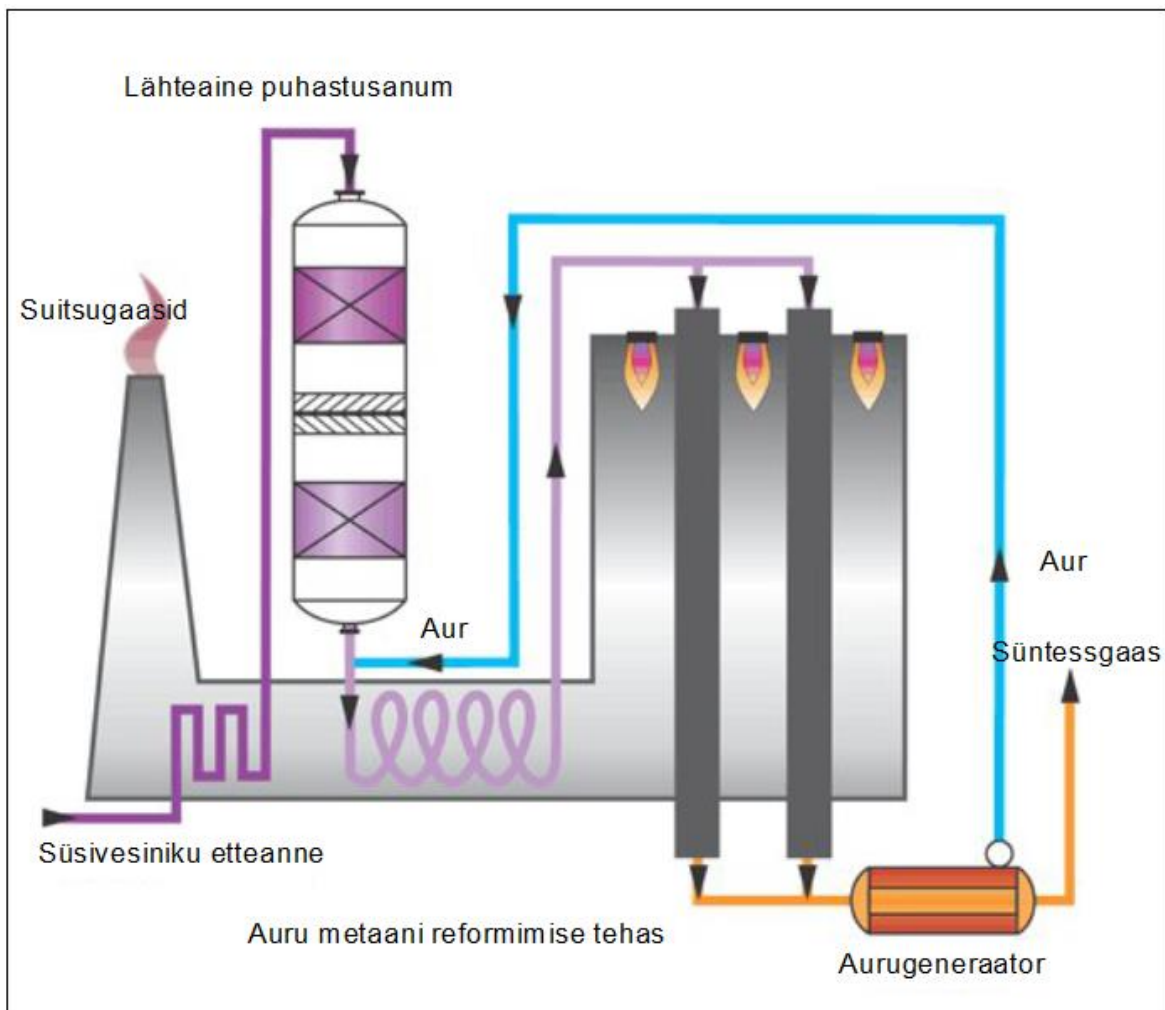
Seejärel hõlmab protsess vee-gaasi vahetuse etappi. [3]

Aurumuundamine on võimalus suuremahulise ja väikesemahulise tsentraliseeritud rajatise jaoks. Kuna vesiniku tootmine eelistab suuremaid tsentraliseeritud jaamu, siis vesiniku transportimise kulud lõppkasutuspunkti ei ole väga tähtsad.

Järgmine arvestatav kulu on maagaas, millest vesinik tekib. Maagaasi kulud arvestavad sisendit ehk maagaasi ja vesinikuks muundamise kasutegurit, mida saab arvutada järgmise valemi järgi:

$$P_{\text{vesnik}} = \frac{P_{\text{maagaas}}}{\eta} \quad (1.2)$$

Auru metaani muundamise tootmiskulud on lähteaine hinna suhtes väga tundlikud. Auru metaani reformimise kasutamise üks puudus on see, et lähteaine hind on väga volatiilne. Aga Nemanich hinnangul on auru metaani reformimine konkurentsivõimeline söe gaasistamisega. [3]



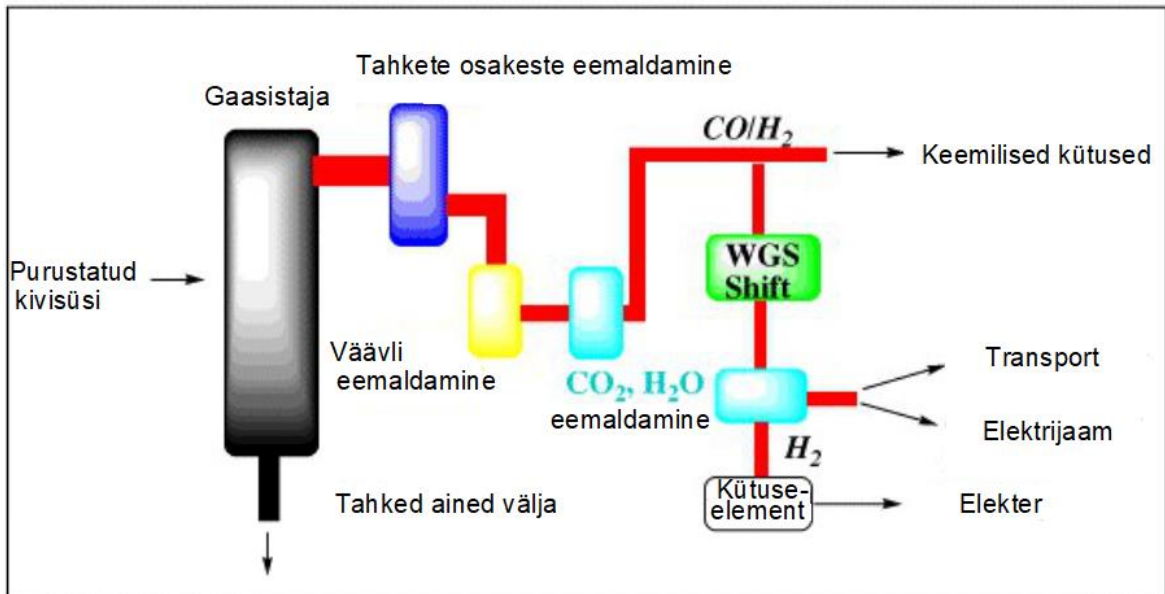
Joonis 1.2 Auru metaani reformimine [4]

Joonisel 1.2 on näha, kuidas toimub auru metaani reformimise protsess tehases.

1.2.2. Sõe gaasistamine

Vesinik saab toota sõe gaasistamise abil. Riikides nagu Ameerika Ühendriigides, Indias ja Hiinas on suurte reservidega sõe gaasistamine vesiniku suuremahuliseks tarnimiseks kõige odavam ja sobilikum variant. [3]

Kivisõest vesiniku tootmise protsess algab osalise oksüdatsiooniga, mis tähendab, et sõele lisatakse veidi õhku, mis tekitab süsinikdioksiidi traditsioonilisel põlemisel. Süsinikdioksiid reageerib ülejäänud sões oleva süsinikuga, moodustades süsinikmonoksiidi. See on endotermiline gaasistamisreaktsioon, mis vajab soojust sisendit. Gaasivoolus olev süsinikmonoksiid reageerib nüüd edasi auruga, tekitades vesinikku ja süsinikdioksiidi. Sel viisil toodetud vesinik ei ole saastevaba kütus. [3]



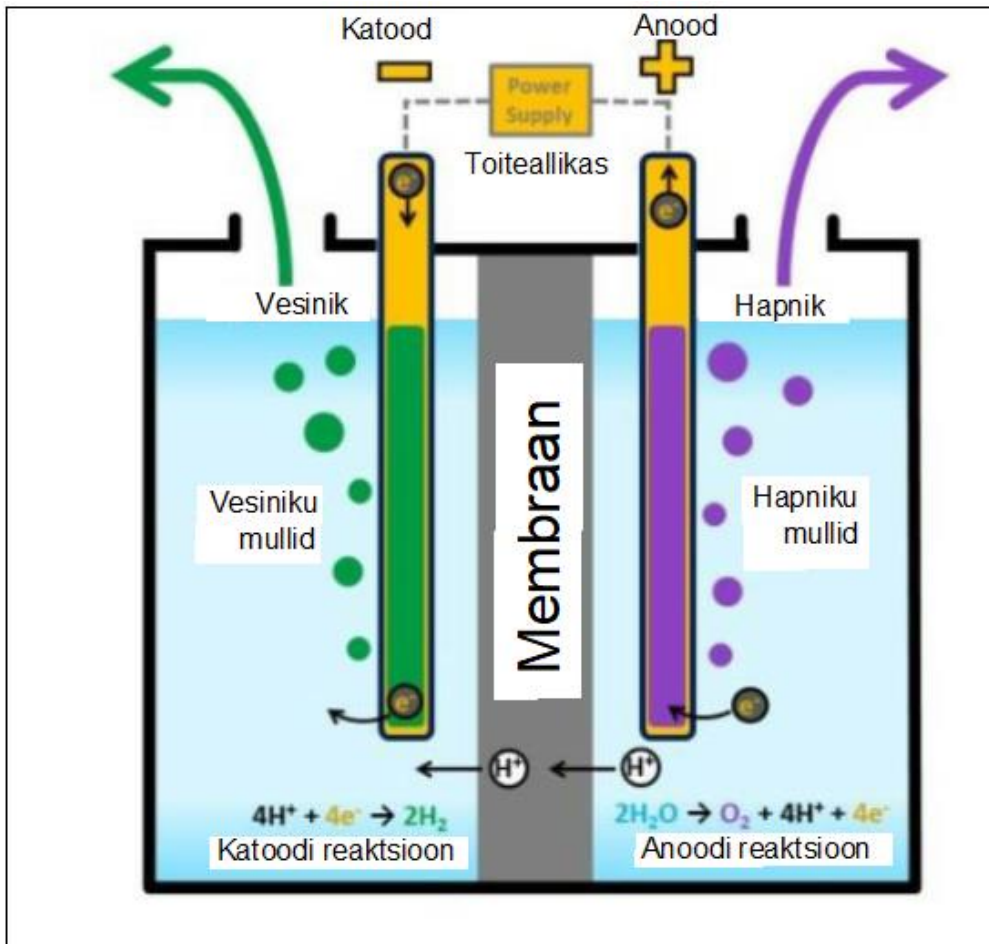
Joonis 1.3 Sõe gasifikatsiooni protsess [5]

Joonisel 1.3 on toodud sõe gasistamise protsess ning vesiniku kasutamismõisted.

1.2.3. Elektrolüüs

Elektrolüüs on kaubanduslikult kättesaadav tehnoloogia vesiniku tootmiseks taastuvatest (tuule-, päikese- ja hüdroenergia) ning tuumaressurssidest ja tänapäeval kasutatakse seda puhta hapniku tootmiseks haiglates ja allveelaevades. Elektrolüüs on protsess, mille käigus kasutatakse vee lagunemist vesinikuks ja hapnikuks. Elektrolüüsiseade koosneb kahest elektroodist, mis on ühendatud vooluallikaga. Anoodil oksüdeeritakse vesinik ja katoodil redutseeritakse hapnik. Elektrolüüsiseadmed võivad olla erineva suurusega. [3]

Kuna elektrolüüsi teel ei ole vesiniku tootmine piiratud, siis elektrolüüs on otstarbekas variant detsentraliseeritud tootmiseks. Samuti suurendab elektrolüüsi varustuse mitte piisavas mahus kasutamine eeldatud kulusid. [3]



Joonis 1.4 Elektrolüüsi protsess [6]

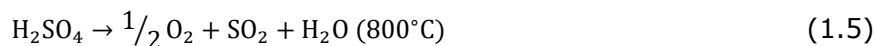
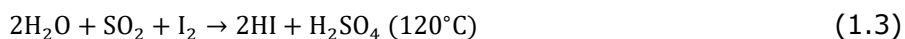
Joonisel 1.4 on näha elektrolüüsi protsessi. Elektrolüüsi teel vesiniku tootmise eeliste ja majandusliku tasuvuse hindamisel tuleb arvestada vajalikku elektrienergia allikat, sealhulgas selle maksumust ja efektiivsust. Elektrolüüsi kapitalikulude hinnangud on sõltuvalt tüübist ja suuruselt väga erinevad, kuna elektrolüüsi tehnoloogia on veel arenemas. Elektrolüüsi protsessi efektiivsus on vahemikus 70–85%. Eeldatakse, et üks kümnendik sendist kWh eest tuleb ekspluatatsiooni- ja hoolduskulude jaoks. Samuti on elektrolüüsi esmane maksumus elektrienergia, mis on elektrolüüsi protsessi teostamiseks vajalik. [3]

1.2.4. Termokeemilised protsessid

Termokeemiliste protsesside abil saab toota vesinikku, kasutades vee kuumendamist tuuma- või päikeseenergiat. Vesiniku tootmisel on üle 100 termokeemilise tsükli temperatuurivahemikus 600 – 2500 °C, kus toimub otsene vee dissotsiatsioon. Üldiselt, kui temperatuur langeb, siis tsükllitel on rohkem keemilisi vaheetappe ja efektiivsus on madalam. [3]

Põhiprotsess hõlmab vee ühendamist vääveldioksiidi ja joodiga temperatuuril umbes

120 °C. Sellest protsessist tulevad H₂SO₄ ja HI. Temperatuuril 450 °C moodustatakse HI-st joodi ja vesinikku. H₂SO₄ on töödeldud temperatuuril 800 °C, et toota vääveldioksiide, hapnikku ja vett. [3]



Selle tsükli eelis on selles, et kemikaalid on ringluses. Samuti ei ole heitvett. Peamine väljakutse on see, et protsess nõuab kõrgemat temperatuuri. [3]

Päikeseenergia tehnoloogia kasutamine on palju parem kui tuumaenergia. Eelised on sellised:

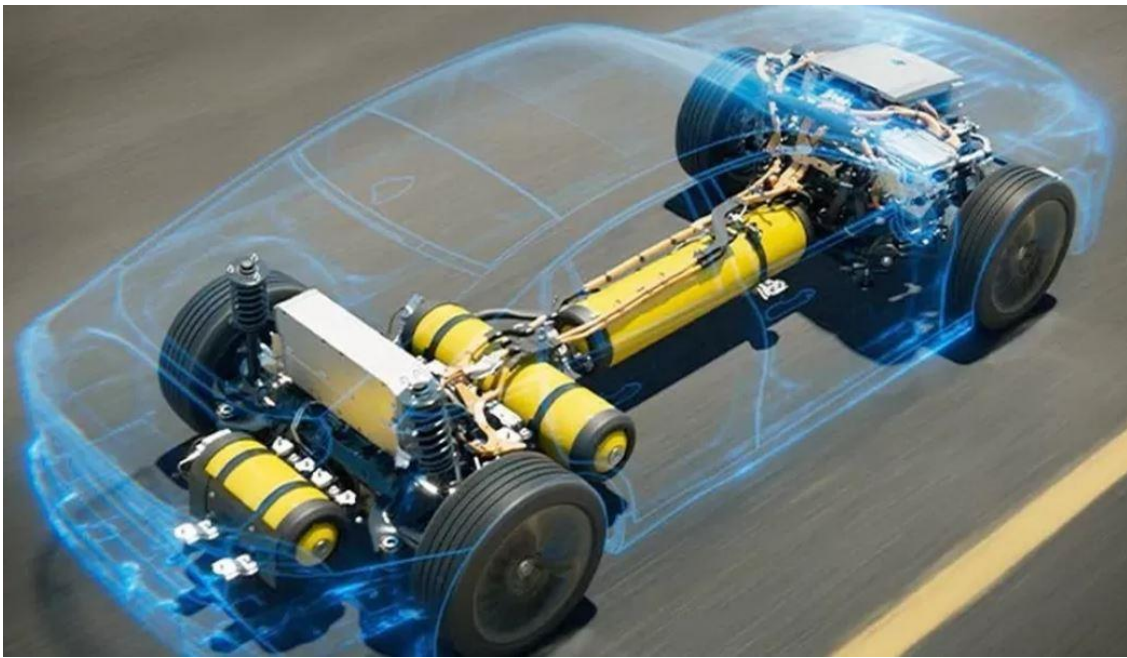
1. Ööpäevane maismaa päikeseressursside iseloom võib soodustada efektiivse soojustagamisega tsükleid.
2. Võib kuumutada reagente otsese valgustuse kaudu kasutades kontsentreerimiseks päikesetehnoloogiaid. Vähendab materjalide takistusi, see on seotud sellega, et tsüklid toimuvad väga kõrgel temperatuuril. [3]

1.3. Vesinik nagu tulevik mootorikütus

Vesiniku potentsiaal kasvab ja pakub lootust, et võimaldab meil lahti saada fossiilkütustest. Vesinikust saab uus mootorikütus. Aga see veel on arenemas. Vaatamata sellele arvavad valitsused ja ettevõtted, et vesinik on energiasüsteemis märkimisväärne osa. Kütuseelemendiga autode eelis on selles, et heitgaase ei ole ja nende tankimine võtab vähem aega kui elektriautodel. Praegu on puudus see, et puuduvad tanklad ja vesiniku tehnoloogiad on väga kallid. Tänapäeval on praktiliselt igal autoettevõttel programmid, mis on suunatud kütuseelementidele või vesinikul töötavate mootoritele. [3]

Paljud esimesed kütuseelementide katsed on tehtud bussidega, sest kütuseelemendid saab paigalda bussi katusele. Enamikul autoettevõttel on valmis vähemalt üks kütuseelemendiga auto prototüüp. Need ettevõtted on: Honda, Ford, DaimlerChrysler, Toyota ja General Motors. [3]

Maailmas on üks tuntud ettevõtte Plug Power, mis arendab vesinikulahendusi, mis muudavad e-mobiilsust, materjali käitlust ja statsionaarse elektrienergia turgu. Nende põhieesmärk on teha rohelist vesinikku kasutatavaks kütuseks. GenFueli teenused hõlmavad projekteerimist, hankimist, ehitamist, ehitamist, kasutuselevõttu, mis on vajalikud vesiniku edukaks säilitamiseks suurtes või väikestes kogustes. [7]

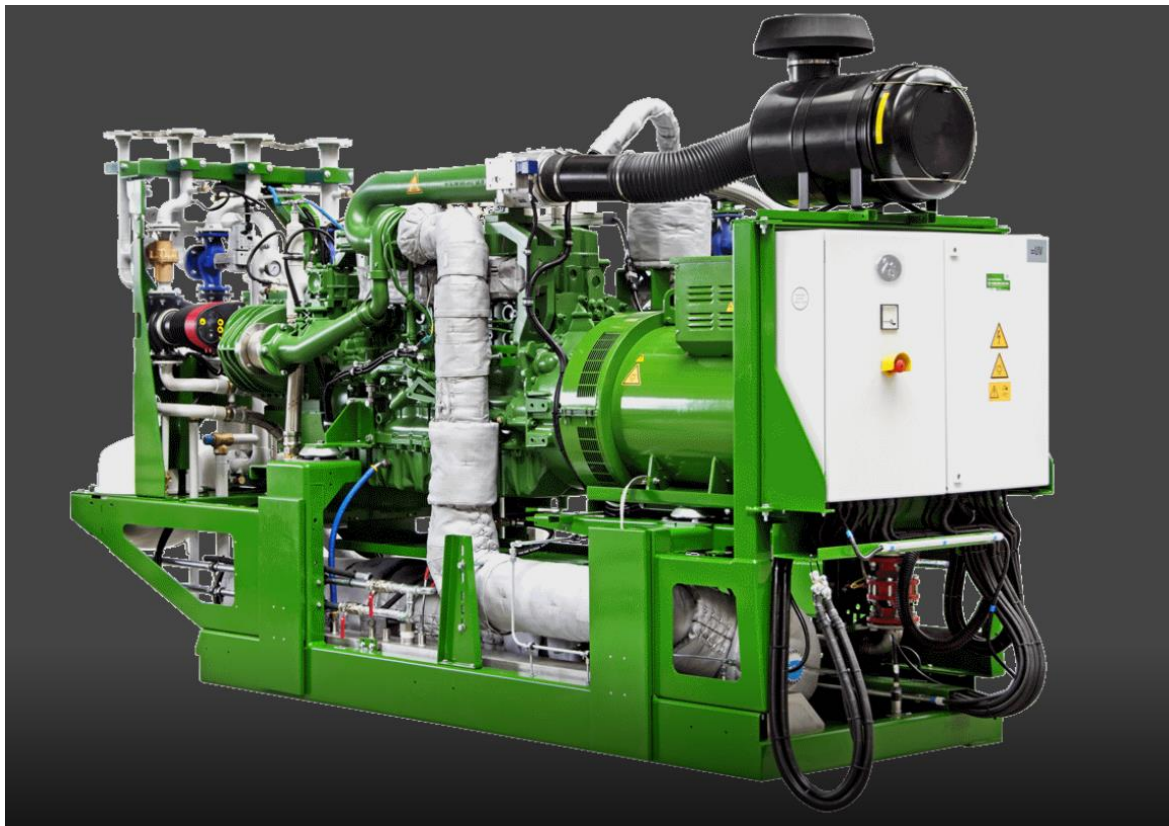


Joonis 1.2 Auto vesiniku tehnoloogia [8]

1.4. Roheline vesinik kui kliimaneutraalne kütus koostootmisjaamades

Koostootmisjaamad on töötanud traditsioonilistel kütustel ja tänapäeval kasutatakse väga palju maagaasi. Sellist koostootmise kasutamist võib pidada „CHP 1.0-ks”, mis on esimene fossiilkütustel põhinevate koostootmistehnoloogiate laine. Samal ajal võib koostootmiseadmeid toita taastuvatest ja väiksema süsinikusaldusega kütustest, nagu biogaas, taastuv maagaas, biometaan ja vesinik. Nende väiksema süsinikusaldusega kütuste kasutamine võib võimaldada koostootmissüsteemidel heitkoguseid veelgi vähendada kui CHP 1.0 puhul. Sellised kütused nagu biogaas ja maagaas on koostootmissüsteemides juba kasutusel ning täiendavad olemasolevad süsteemid võiksid nende kütustega töötada, pakkudes lähiajal lahendust heitkoguste edasiseks vähendamiseks. Praegu võivad traditsioonilistel kütustel töötavad tootmiseadmed olla võimelised üle minema madalama süsinikusaldusega kütustele, sealhulgas biogaasile, maagaasile ja vesinikule. Lisaks olemasoleva gaasijuhtme infrastruktuuri kasutamine võib olla odav võimalus nende uute kütuste tarnimiseks ning tänapäeval uuringute käigus uuritakse, kuidas see olemasolev infrastruktuur vesinikku jaotada suudab. Vesiniku transport ja ladustamine on veel üks väljakutse vesinikkütuse laialdasele kasutuselevõtule lähiajal. Vesiniku uue torujuhtme ehitamise esialgsed kulud takistavad vesiniku torujuhtme tarneinfrastruktuuri laiendamist. Gaasilise vesiniku transportimine olemasolevate torujuhtmete kaudu on vesiniku kohaletoimetamiseks

odav võimalus, kuigi on vaja täiendavaid uuringuid vesiniku transportimise mõjude kohta olemasolevate torujuhtmete kaudu. Kuid lähiajal saab vesiniku tootmisel kasutusele võtta hajutatud tootmise tehnoloogiaid nagu koostootmine. See võimaldaks kasutada koostootmissüsteemides vesinikukütust. [9]



Joonis 1.5 2G vesiniku koostootmisjaama tehnoloogia [10]

Joonisel 1.5 on näha, kuidas näeb välja vesiniku koostootmisjaama tehnoloogia, mis on välja töötatud 2G Energy AG ettevõtte poolt. Samuti tehakse tööd selle nimel, et suurendada koostootmissüsteemides kasutatava vesinikukütuse mahtu. Näiteks gaasiturbiinide tootjad pakuvad seadmeid, mis mahutavad suurema protsendi väiksema süsinikusisaldusega kütuseid. Erinevad ettevõtted USA-s ja välismaal võtavad kasutusele või töötavad selle kallal ning 2019. aastal on mitmed Euroopa ettevõtted võtnud kohustuse pakkuma gaasiturbiine, mis suudavad 2020. aastaks taluda 20% vesinikusisaldust kütuses ja 100% 2030. aastaks. [9]

1.5. Vesiniku salvestamine

Pärast vesiniku tootmist on vaja seda kuhugi salvestada. Vesinikku võib hoida kolme erinevate variantidega: surugaas, veeldatud ja metallhüdriidides. Igal variandil on erinevad kulud, mis on seotud vesiniku muundamisega tootmise olekust säilitamise

olekusse. Salvestamise kogumaksumus põhineb kahel peamisel faktoril: tootmise määra ja salvestus. Lisaks salvestusaeg koosneb osaliselt toodangu määra ja ka transpordi kauguse funktsioonist. Kui vesiniku tootmine on madal, siis salvestusaeg pikeneb. [3]



Joonis 1.6 Vesiniku hoidla [11]

Joonisel 1.6 on toodud vesiniku hoidla. Vesiniku surugaasi ladustamine toimub maapeal paakides või maa all teatud koobastes. Mõlemad ladustamise gaasilised viisid nõuavad vesiniku kokkusurumist. Surugaasi maapealne ladustamine nõuab kõrgsurvet paake. Maa all ladustamine pakub surugaasi alternatiivset võimalust. Kuid see valik on saadaval väga piiratud kohtades, nõuab teatud tüüpi koopa. Veeldatud vesinik pakub lahendust sellele probleemile. Veeldatud vesinikku saab hoida väiksemates ruumides. Aga see nõuab väga madalat temperatuuri aurustumise vältimiseks. Gaasilise ja veeldatud vesiniku säilitamise alternatiiv on ladustamine tahke aineena metallhüdriidi kujul. Metallhüdriidid pakuvad tahkes olekus ladustamisvõimalust, milles vesinik imendub metalli võre sisse. Tänapäeval on see salvestamise võimalus kõige vähem mõistetav, aga mõne aja pärast muutub see atraktiivsemaks. Näiteks võib kunagi olla võimalik ehitada sõiduki raam materjalist, mis hoiab vesinikku. Vesiniku säilitamine metallhüdriidi kujul nõuab jahutamist ja kummutamist. Vesiniku imendumiseks metalli on vaja jahutamist, aga vesiniku eraldamiseks on vajalik aurusoojus. Teatud tootmisviiside puhul on mõistlik vesinikku enne transportimist varustada. Täiendavat salvestusruumi võib vaja kütusekohal. Samuti on võimalik vältida salvestamist tootmise juures, kus gaasi transporditakse torujuhtmete kaudu. [3]

2. VESINIKU TOOTMISE, HOIUSTAMISE JA KASUTAMISE MODELLEERIMINE

Elmises peatükis anti ülevaade erinevatest vesiniku tootmise ja hoiustamise tehnoloogiatest ja nendest edasiseks analüüsiks on valitud elektrolüüs, kuna see tehnoloogia on juhtiv taastuva vesiniku tootmise viis Euroopa Liidu eesmärke saavutamiseks. Elektrolüüsi teel toodetakse vesinikku taastuvenergia (tuule-, päikese- ja hüdroenergia) ja tuumaenergia abil. Selle tehnoloogia elektritootmisest kasvuhoonegaaside ja saasteainete heitkogused on praktiliselt nullid. See annab suure eelise elektrolüüsi tehnoloogiale võrreldes teiste tootmistehnoloogiatega, mille abil saab vesinikku toota. Suur mõju tuleb ka keskkonnale, kuna süsinikdioksiidi sisaldus väheneb. Lisaks on elektrolüüsi tootmisprotsess täiesti automatiseeritud. Seoses elektrolüüsi kasutuselevõtuga taastuvenergeetikas toimub tehnoloogiate kasv ja arenemine. Tänu oma suurele potentsiaalile leiab vesinik oma koha ka teistes valdkondades.

2.1. Modelleerimistarkvara energyPRO

Modelleerimistarkvara energyPRO on loodud Taani ettevõtte EMD International poolt. Tarkvara kasutatakse olemasolevate kui ka uute energiaprojektide tehnilise ja finantsanalüüsiks, mis annab kasutajale väga detailset ülevaadet koostatud mudeli kohta. Modelleerimistarkvara energyPRO võimaldab modelleerida ja optimeerida elektri-, soojus-, jahutus- ja kütusetööd. Programm sobib ka projekti äriplaani koostamiseks, kus on toodud kõik tehnilised ja majanduslikud aspektid. Lisaks aktsepteeritakse programmi abil koostatud majanduslikku aruannet pankades ja teistes majandusorganisatsioonides. [12]

Käesolevas töös on tähelepanu elektrienergia toodangu ja tarbimise ning vesiniku toodangu mudelile. Tarbimise mudeli koostamiseks kasutatakse Eesti elektri süsteemi koormuse andmed, mis on võetud 2021. aasta ametlikute andmetest Nord Pool Spot Eesti tunnipõhiste tarbimise andmed tabelist. [13]

Toodangu poole läheb tuulepargi, päikese, elektrolüüseri ja koostootmisjaama toodangu modelleerimine ja sisestatakse tehnilised parameetrid. Mudelis on ka kasutatud vesiniku hoidla. Finantsmoodulis on kajastatud elektrituruhinnad. Tarkvara arvutab kokku ja kuvab toodangu, elektrituru tunnipõhise börsihindade, hoidla kasutamise ning tarbimise graafikuid päeva, nädala, kuu ja aasta lõikes. Saadud graafikutest võib teha analüüsi ja järeldusi koostatud mudeli kohta.

Elektrolüüsi tehnoloogia modelleerimiseks tuleb sisestada järgmised väärtused:

- tuulepark (tuulekiirus, võimsusköver, tuuliku masti kõrgus, kõrgus tuulekiiruse mõõtmiseks, Hellmani eksponent);
- päikesepaneelid (päikesekiirus, välistemperatuur, päikesepaneeli tehnilised andmed, kaldenurk, võimsus);
- elektrolüüsi tehnoloogia;
- vesiniku hoidla;
- koostootmisjaam.

Modelleerimistarkvara võimaldab saada väljundandmetena:

- modelleeritud tunnipõhine vesiniku toodang;
- modelleeritud tunnipõhine tuulepargi toodang;
- modelleeritud tunnipõhine päikesepargi toodang;
- modelleeritud tunnipõhine koostootmisjaama toodang;
- hoidla kasutamise graafik;
- elektrituru tunnipõhine börsihind;
- kogu projekti aruanne.

2.2. Modelleritud tehnoloogia

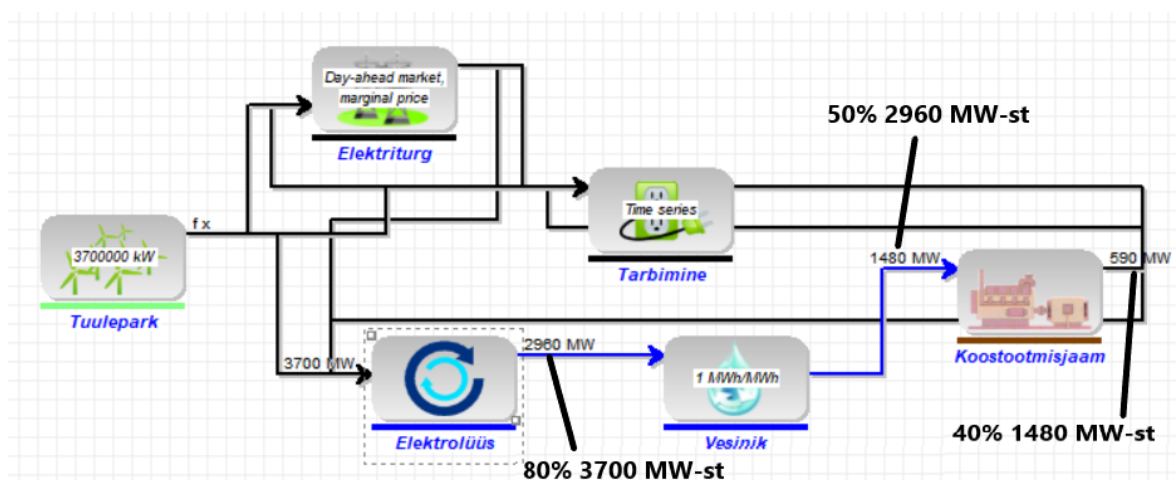
Tarkvara energyPRO võimaldab meil modelleerida vesiniku tootmist põhimõtteliselt ainult elektrolüüsi kaudu ja salvestada hoidlasse. Mis puudutab vesiniku kasutamist, siis seal on erinevad võimalused modelleerimiseks. Näiteks, võib modelleerida koostootmisjaama, kus koostootmisjaam toodab vesinikust elektrit. Tarkvara uues versioonis on võimalik kasutada vesinikku transpordi kütuseks. Samal ajal saab modelleerida anaeroobse kääritamise protsessi, et toota metanooli. Seejärel võib modelleerida metanooli müüki ja analüüsida majanduslikute tulemusi.

Selle töö raames võivad alternatiivide mudelite tööpõhimõtted olla ka erinevad. Näiteks, üks võimalus on toota vesinikku lihtsalt eraldiseisva äriprojektina ja siis sõltuvalt elektrituru hinnast. Vesiniku abil elektrienergia salvestamine tähendaks, et odavam

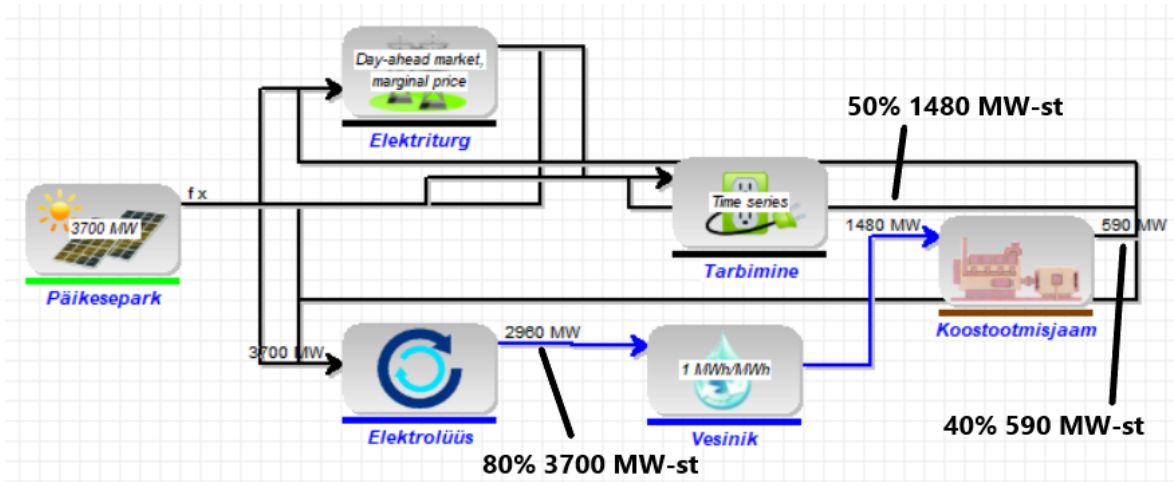
elektrituru hinna korral toodetakse hüdrolüüseriga vesinikku ning kõrgema elektri hinna korral toodetakse sellest kütuseelemendiga taas elektrit.

Teine võimalus on kasutada ülejäänud elektrienergiat taastuvallikate poolt vesiniku tootmiseks, siis salvestada hoidlasse ja vesinikust koostootmisjaama abil taas elektrit toota. Selle mudeli tööpõhimõtte eelis on selles, et ülejäänud toodang on salvestatud ja on võimalik elektrit uuesti toota, kui teatud perioodil taastuvallikad ei saa toota nii palju, et katta elektritarbimist. Kuna sellise süsteemi järgi on leitud toodangu bilanss, siis valisin selle modelleerimiseks.

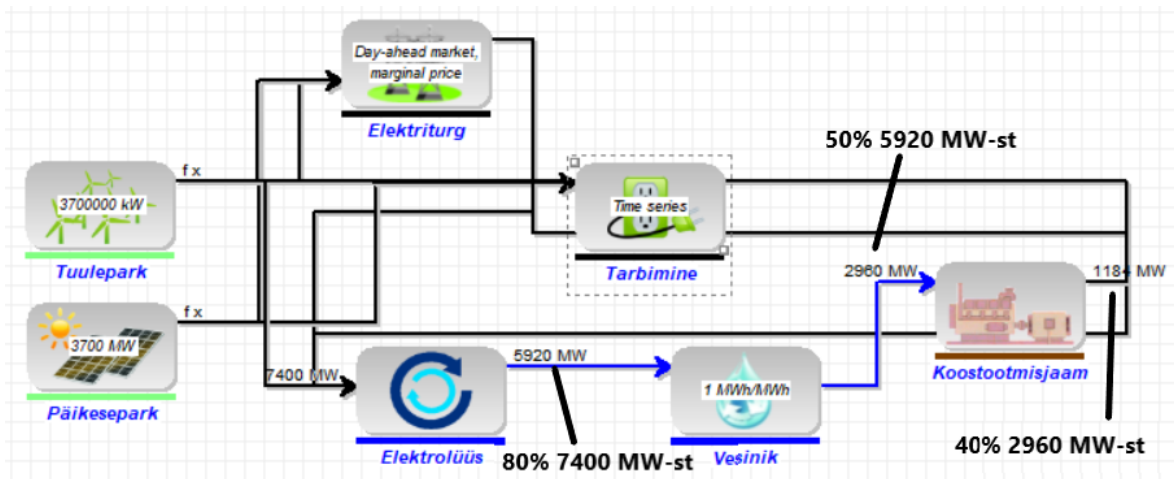
Käesolevas töös kasutakse elektritoodanguna taastuvallikatest päikeseparki ja tuuleparki, siis selgub, et tuleb modelleerida kolm alternatiivi, kus neid käsitletakse eraldi ja koos ning analüüsitakse. Kogu mudeli protsess põhineb sellel, et kui elektri toodang taastuvallikatest võimaldab katta elektri tarbimist Eestis ja toodang läheb üle, siis selle elektri toodangust toodetakse vesinik ja see on valmis kasutamiseks. Esimene alternatiiv on modelleeritud koos elektrituulikute, elektrolüüsiseadme ja koostootmisjaamaga. Teises alternatiivis on loogika samasugune, ainult elektrituulikute asemel on tootmiseks sama võimsusega päikesepark. Kolmandas mudelis on elektri tootmiseks võetud mõlemad taastuvad energiaallikad. Kõik mudelid on kujutatud Joonisel 2.1, 2.2 ja 2.3. Seejärel võib neid mudeleid võrrelda ja analüüsida ning tulemuste põhjal järeldusi teha. Lõpuks saab valmis harjutusülesanne koos teoreetilise taustaga. Jooniste 2.1, 2.2 ja 2.3 järgi on näha, et kõik alternatiivide komponendid on modelleeritud ja numbrid sisestatud ning järgmistes peatükkides on kirjeldatud detailsemalt võimsuste valik.



Joonis 2.1 EnergyPro mudeli ülesehitus Alternatiiv 1 elektrituulikutega

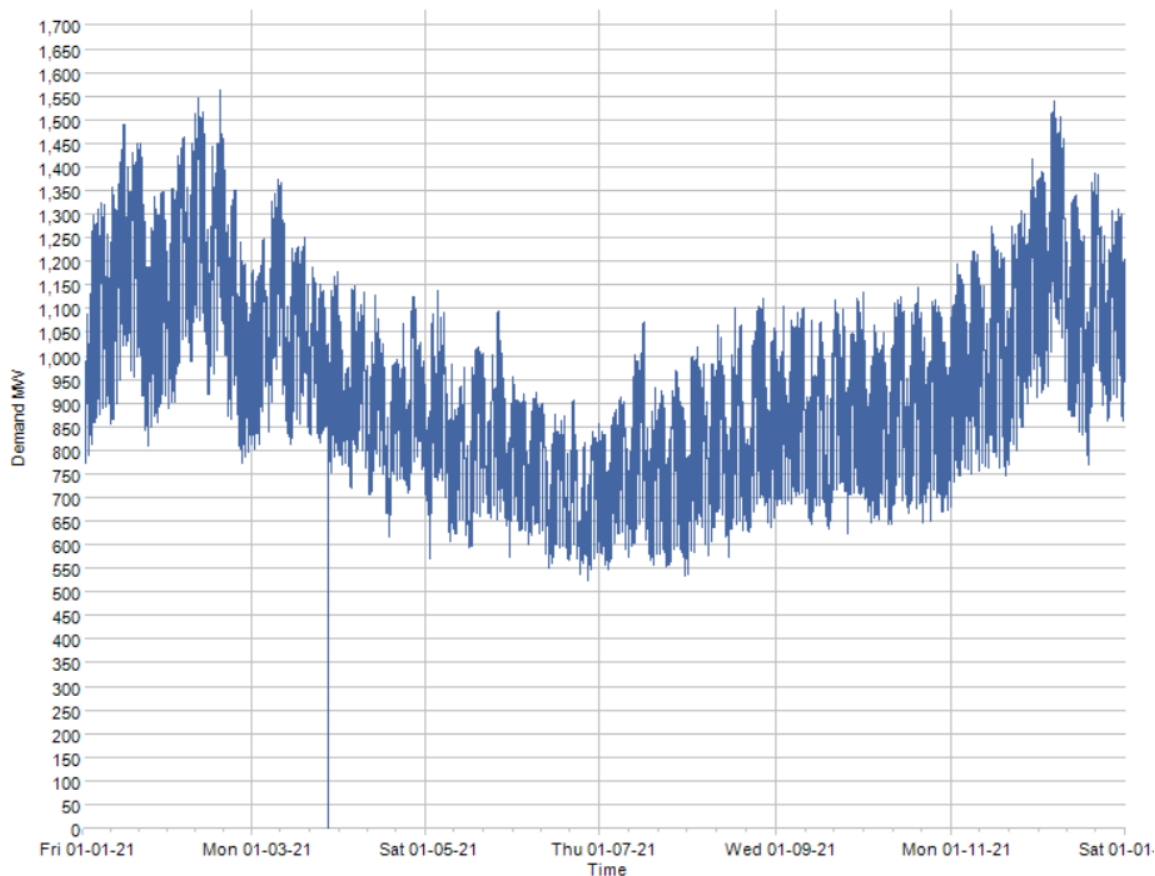


Joonis 2.2 EnergyPro mudeli ülesehitus Alternatiiv 2 päikesepargiga



Joonis 2.3 EnergyPro mudeli ülesehitus Alternatiiv 3 elektrituulikute ning päikesepargiga

Mudelis on modelleeritud ka Eesti elektrisüsteemi koormus, et oleks näha, kui suur on toodang koormuse tagapõhjal. Andmed on võetud 2021. aasta ametlike andmete portaalist Nord Pool Spot. [13]

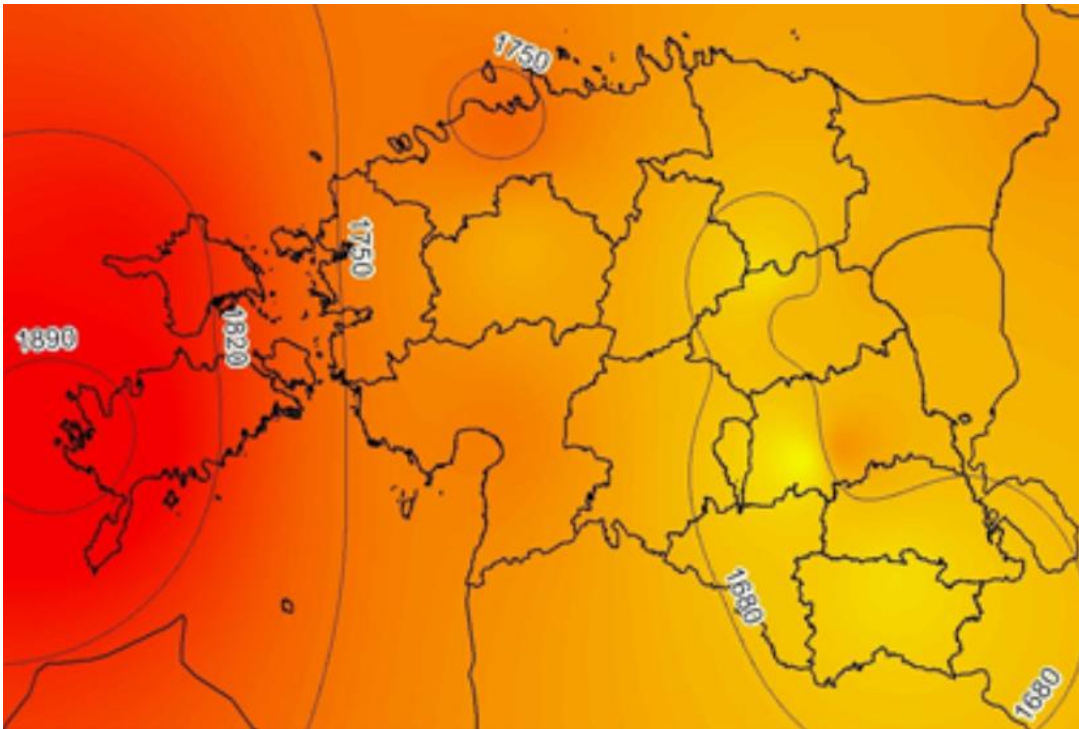


Joonis 2.4 2021. aasta tunnipõhine Eesti elektri süsteemi koormus

Joonisel 2.4 on näha, et 2021. aasta jooksul Eesti elektrisüsteemi tunnipõhine koormus muutus vahemikus 530–1550 MW. Kõige suurem tarbimine on detsembri, jaanuari ja veebruari kuudes. Kõige madalam koormus on juuni, juuli ja augusti kuudes.

2.3. Päikesepargi toodangu modelleerimine

Päikeseenergia ressurs on hea päikesekiirguse kasutamine elektrienergia tootmiseks. Kuna päikesepaiste kestus on väga muutuv, siis on raske toota elektrienergiat nii palju kui on vajalik. Aga kuna Eestis viimasel ajal on päikesepaneelide paigaldamine väga levinud, siis kasutatakse käesolevas projektis päikesepargi mudelit elektri taastuva allikana elektrolüüsi jaoks. Samuti sõltub päikesepaneelide tootlikkus päikesekiirgusest, välistemperatuurist, kaldenurgast maapinna ja ilmakaarte suhtes, varjudest, paneelide tehnilistest andmetest ja inverterist. Päikesepargi toodangu modelleerimist on kasutatud teises mudelis, kus see on ainuke elektri taastuv allikas, ja kolmandas mudelis, kus tuulepark toodab elektrit koos päikesepargiga. [14]



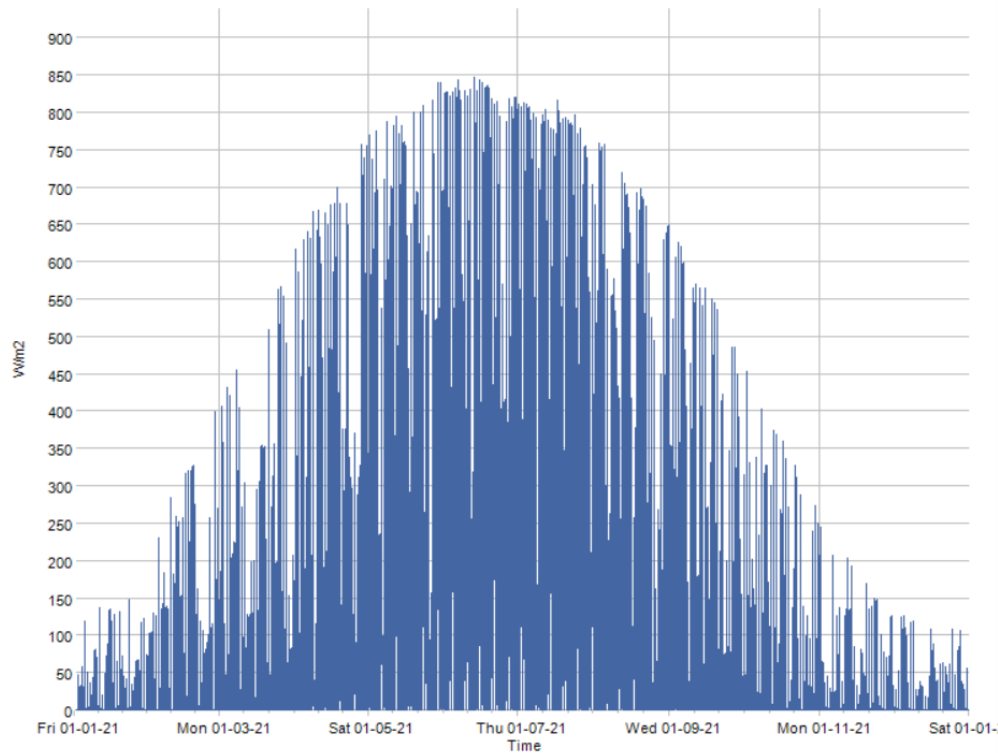
Joonis 2.5 Aasta keskmine päikesepaiste kestus (h) Eestis [15]



Joonis 2.6 Päikesekiirguse kaart [16]

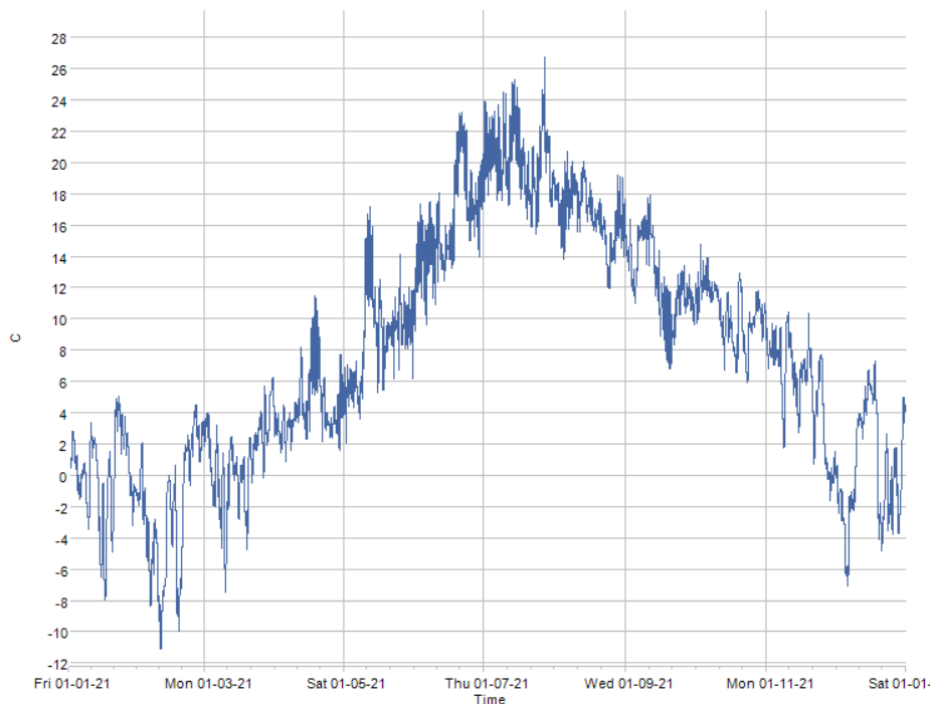
Joonisel 2.5 ja 2.6 on näha, et Eesti läänes rannikul ja saartel on rohkem päikesekestust ja päikesekiirgust. Vastavalt nendele joonistele on päikesepargi asukoha modelleerimiseks valitud Saaremaa, sest sellel asukohal on kõige rohkem päikesekiirgust. See võimaldab toota elektrit märkimisväärselt suurema kogusega, sest päikesepargi toodang sõltub päikesekiirgusest.

Pärast päikesepargi uuritava asukoha valikut tuleb saada päikesekiirguse, tuulekiiruse ja välistemperatuuri andmeid Saaremaal, kuna tuule- ja päikesepargi toodang sõltub ilmastikutingimustest ja need on vajalikud modelleerimiseks. Need andmed võetakse energyPRO andmebaasist ja need on kajastatud Joonisel 2.7, 2.8 ja 2.11.



Joonis 2.7 Päikesekiirguse mõõteandmed energyPRO andmebaasist

Joonisel 2.7 on näha, et valitud asukohas on kõige suurem päikesekiirguse hulk aprillist kuni oktoobrini. Aga novembrist märtsini on päikesekiirguse hulk väiksem ja samal ajal päeva pikkus on tunduvalt lühem.



Joonis 2.8 Välistemperatuuri andmed energyPRO andmebaasist

Joonisel 2.8 on toodud välistemperatuuri andmed vaadeldud asukohas energyPRO andmebaasist. Välistemperatuur muutus $-11...27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Talvel on jahutustingimused paremad, aga suvel need on kehvemad.

PV päikesepaneelid paigaldatakse kogu võimsusega 3700 MW, mis on lääne suunas kaldenurgaga 35° maapinnast. Alguses tehti mudeli katse esimeses alternatiivis taastuvallika 320 MW võimsusega ja võimsuse valik oli tehtud lähtudes Eesti tuuleparkide koguvõimsusest, mis on umbes 320 MW. Aga sellest võimsust ei piisanud, sest vesiniku tootmiseks polnud ülejäänud elektrienergiat tuulepargi toodangust isegi talvisel perioodil, kus tuulepargi toodang on tavaliselt kõrge. Samal ajal oli päikesepargi võimsus sama, sest kui taastuvallika võimsus on samasugune, siis on lihtsam alternatiive omavahel võrrelda. Seejärel mängiti võimsuse väärtusega ja samuti vaadati graafikutele, et oleks ülejääk elektrienergiast vesiniku tootmise jaoks ja kasutada vesinikku taas elektri tootmiseks sellisel juhul, kui tarbimine ei ole kaetud. [17]

Päikesepaneelid töötavad kõige tõhusamalt siis, kui need on suunatud päikesele ja nende pind on päikesekiirtega risti.

Vastavalt sellele päikesepargi elektri tootmine on maksimaalne, kui kaldenurk on 35° ja päikesepaneelid on suunatud lääne suunda. Selle kaldenurgaga need on maapinnal, kuna selle suure võimsusega paikesepargile on vaja piisavalt pindala. [17]

Päikesepargi mudelisse on sisestatud välistemperatuuri ning päikesekiirguse andmed ja need on võetud online-andmebaasist tarkvaras EnergyPRO uuritavas kohas. Päikesekiirgus on mudelis kumulatiivne ja see faktor mõjutab elektri toodangut.

Välitemperatuur mõjub samuti elektri tootmisele. Kui päikesepaneeli temperatuur tõuseb üle 25 °C järgi, siis vool suureneb ja pinge langeb kiiremini. Temperatuuri tõusuga paneeli väljundvõimsus väheneb. Tavaliselt on päikesepaneelide temperatuuritegur -0,4...-0,5%. See tähendab, et iga kraadi kohta üle 25 °C väheneb väljundvõimsus selle protsendi võrra. Kui temperatuur langeb, siis väljundvõimsus uuesti suureneb. Kuna Eestis on mõõdukas kliima, siis suvel kaotatud elektrienergia toodang oleks tagastatud talvel. [17]

Et valida päikesepaneeli ja sisestada tehnilisi andmeid mudelisse, tuleb teha andmete võrdlust. Kõige populaarsemad päikesepaneelide tootjad on valitud ja põhimõtteliselt võrdlus põhineb temperatuuri teguri ja nominaalse töötemperatuuri andmetel. Päikesepaneelide tootjad ja nende tehnilised andmed on toodud Tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Päikesepaneelide tootjad ja tehnilised andmed [18] [19] [20] [21]

Tootja	Võimsus	Temperatuuri tegur	NOCT
Canadian Solar	540 W	-0,34%/°C	41±3 °C
Trina Solar	540 W	-0,34%/°C	43 °C
JA Solar	540 W	-0,35%/°C	45±2 °C
SunPower	540 W	-0,34%/°C	45±2 °C

Tabelist 2.1 tuleb järeldus, et sobilik päikesepaneel on SunPower, kuna samal ajal tema temperatuuri tegur on madalam ja nominaalne töötemperatuur on kõrgem.

Keskmiselt on päikesepaneelide kaod 10%, mida on samuti vaja mudelisse sisestada.

Kõik sisestatud tehnilised andmed päikesepargi mudelisse on näha Joonisel 2.9.

Size and Position	
Installed capacity	3700.0 MW
Inclination of photovoltaic	35 degree
Orientation of photovoltaic (Deviation from South)	0 degree

Select Input Time Series	
Ambient temperatures	Välitemperatu °C
Radiation on horizontal plane	
<input checked="" type="radio"/> Aggregated Radiation	
<input type="radio"/> Direct and Diffuse Radiation	
Aggregated radiation	Päikesekiirgus

PV module specification	
Maximum power	540 W
Temperature coefficient of power	-0.34 %/°C
NOCT	45 °C

Miscellaneous	
Aggregated Losses from module to grid	10 %
Number of PV modules	6851852

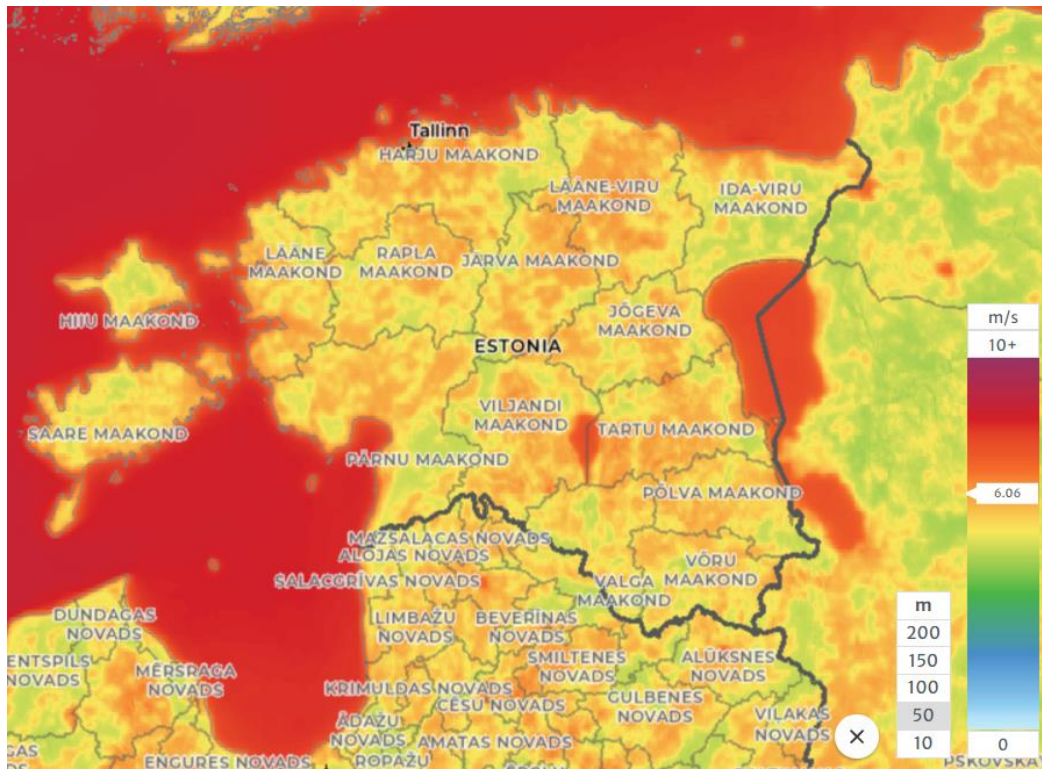
Joonis 2.9 Päikesepargi mudel tehniliste andmetega

Päikesepaneelid koosnevad paljudest väikestest fotogalvaanilistest elementidest, mis tähendab, et nad suudavad päikesepaiste elektriks muuta. Need elemendid on valmistatud pooljuhtivatest materjalidest, enamasti ränist, mis suudab elektrit juhtida, säilitades elektrivälja tekitamiseks. [14]

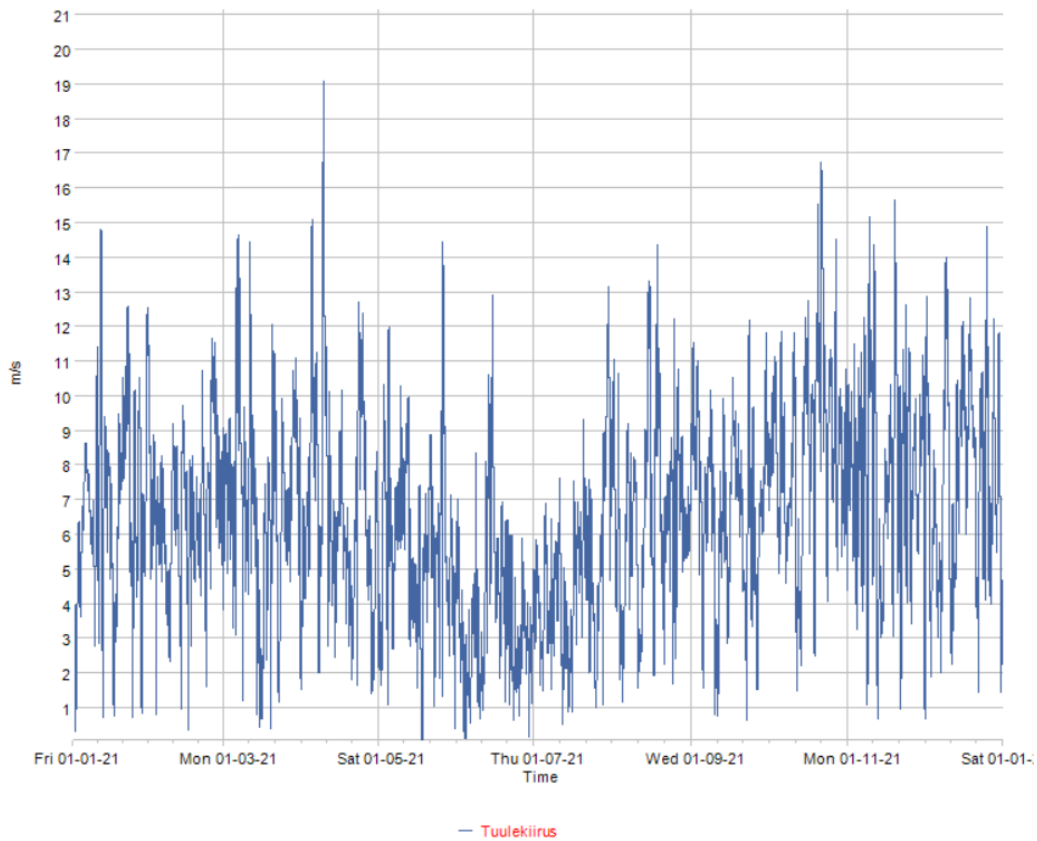
Päikesepaneelide toodang toimub mitmetest etappidest. Päikesepaiste tabab päikesepaneelidele ja tekitab elektrivälja. Tekkiv elekter voolab paneelide servadeni ja juhtivasse juhtmesse. Juhtiv juhe toob elektri inverterisse, kus muundatakse alalisvoolust vahelduvvooluks, mida kasutatakse hoonete toiteks. Teine juhe transpordib vahelduvvoolu elektri inverterist elektrikilpi, mis jaotab elektri vastavalt vajadusele kogu hoones. Tootmisel mittevajalik elekter suunatakse läbi kommunaararvesti ja kommunaaelektrivõrku. [14] [22]

2.4. Tuulepargi toodangu modelleerimine

Seni kõige rohkem elektri tootmiseks kasutatud taastuvenergia ressurss Eestis on tuuleressurss. Eesti päikekestus on väike, seetõttu on tuuleressurss Eesti taastuvenergeetikas esimesel kohal. Suuremad tuulekiirused on rannikualadel ja avamerel, samuti kõrgustike piirkondades. Tuulepargi asukoha modelleerimiseks oli valitud Saaremaa rannikuala, sest seal on tuulekiirused palju suuremad ja tuulepargi efektiivsus on kõrgem. Tuulekiiruse andmed on võetud online-andmebaasist tarkvaras energyPRO.

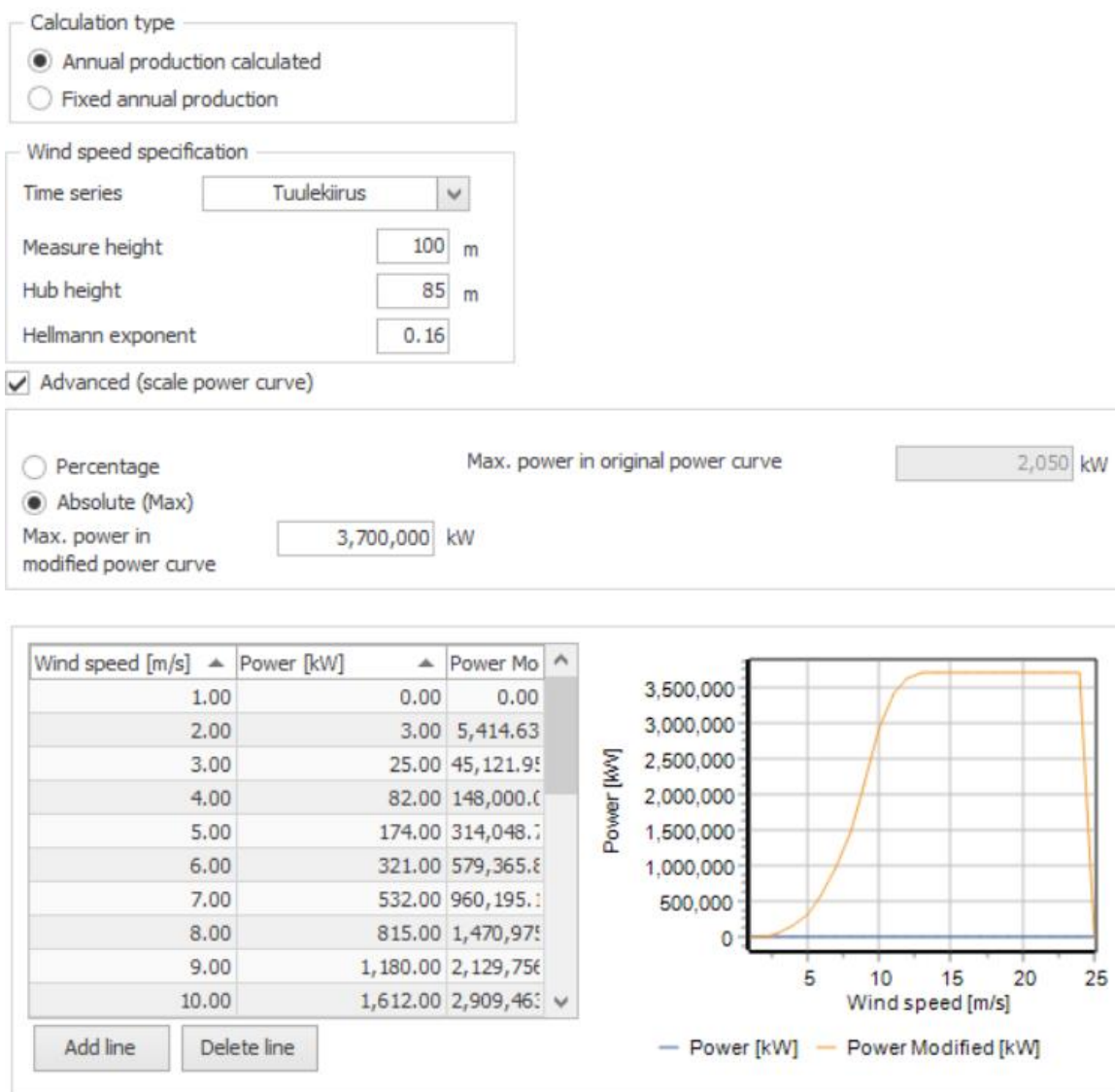


Joonis 2.10 Tuulekiirus 100 m kõrgusel Eestis [23]



Joonis 2.11 Tuulekiiruse mõõteandmed energyPRO-st

Joonisel 2.10 on näha, et rannikutel ja merel on tuulekiirust rohkem. Kuna päikesekiirguse järgi on uuritava kohaks valitud Saaremaa, siis Saaremaa sobib ka tuulekiiruse järgi. Joonisel 2.11 on näha, et võrreldes päikesekiirgusega jaotub tuulekiiruse graafik ühtlasemalt, aga juunis ja juulis on tuulekiirus keskmisest madalam. Võib öelda, et päikesepark ja tuulepark saavad teineteist teatud aegadel täiendada. Tuulekiiruse andmed olid sisestatud ja järgmine samm on tuulepargi mudeli loomine. Tuuleturbiini genereeritava elektrienergia kogusele mõjuvad mõned faktorid. Olulisemad faktorid on tuulekiirus ja tuulepargi asukoht. Elektrienergia toodangut arvutatakse, kasutades tuuleturbiini võimsuskõverat koos arvatud tundidega aastas erineva tuulekiiruse korral. Hea asukoha ja tuulekiirusega tuuleturbiinid võivad saada 40% kasutegurit. Elektrienergia toodangu modelleerimiseks vajalikud lähtandmed on esitatud joonisel 2.12.



Joonis 2.12 Tuulepargi mudel tehniliste andmetega

Tuuliku mudeli modelleerimiseks on kasutatud tootja andmeid. Tuuliku tüüp on valitud Enercon E-126, sest Eestis on Enercon elektrituulikuid palju kasutusel ja see on praeguse seisuga kõige võimsam mudel turul. Selle elektrituuliku mudeli võimsus on 7,58 MW. Vastavalt selle tuuliku tüübi tehniliste andmetele mudelis masti kõrgus on 135 m. See võimaldab vähendada turbulentsse tuule mõju. Antud masti kõrgus arvestatakse optimaalsena Eesti rannikuala jaoks. Tuuliku gondli peal on olemas mõõterist anemomeeter, millega võib mõõta tuule kiirust. [24] [25]

Samuti on mudelis vaja määrata Hellmani eksponendi väärtus, mis ühendab tuule kiiruse suurenemise, tingitud atmosfääritingimuste stabiilsusest, ja pinna kareduse üheks konstandiks. Tavaliselt võetakse Hellmani eksponendi väärtuseks 0,16. [26]

Modelleeritud tuulepargi võimsus on 3700 MW, et toota elektrit ja tarbimine oleks kaetud ning ületoodang läheb elektrolüüsiseadmesse vesiniku tootmiseks. Lähtuvalt E-126 tehnilistelt andmetelt on koostatud tuuleturbiini võimsuskõver, mis on näidatud joonisel 3.9. Tuuleturbiini võimsuskõver kajastab toodetud võimsust, mis on seotud hetkel oleva tuulekiirusega. Tuuleturbiinid hakkavad väikest kogust elektrit genereerima alates tuulekiirusest 3 m/s. [24]

Tuuleturbiinid töötavad lihtsal põhimõttel. Kõik need turbiinid koosnevad labade komplektist, nende kõrval asuvast kastist ja võllist. Tuul paneb labad pöörlema, luues kineetilist energiat. Labad panevad pöörlema ka võlli ja generaator muudab selle kineetilise energia elektrienergiaks. Anemomeeter mõõdab tuule kiirust ja kaitse- ja juhtimissüsteem jälgib tuule kiirust. Suur osa tuuleturbiinidest genereerivad elektrit juba tuulekiirusel 3–4 m/s ja maksimaalne elektri genereerimine on tuulekiirusel 12 m/s. Kui tuul on 25 m/s, siis automaatne võimsuse kontroll annab rootorile signaali pidurdamiseks, et ära hoida kahjustusi. [27]

2.5. Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modelleerimine

Teises peatükis kirjeldati kogu mudeli põhimõtet ning eraldi oli ka juttu päikese- ja tuulepargi mudelitest. Kui tuulepark või päikeseпарк toodavad üle, siis ülejäänud elekter läheb elektrolüüsiseadmesse, et toota vesinikku. Seejärel vesinik salvestatakse hoidlasse. Vesiniku salvestamine on vesinikuenergeetika kasutuselevõtul väga oluline. Oli juba mainitud, et praegu hoiustatakse vesinikku gaasilisel või vedelal kujul spetsiaalsetes väikesemahulistest balloonides. Seejärel võib vesinikku kasutada erinevates energeetika suundades. Antud mudelis vesinik on kasutusel koostootmisjaamas elektri tootmiseks, kui taastuvallikad ei suuda katta tarbimist. Koostootmisjaama elektriline kasutegur on 40%. Koostootmisjaam võtab vesinikku hoidlast ja toodab elektrit. Tänapäeval on vesiniku tootmiskadu päris märkimisväärne,

elektrolüüsi kasutegur on 80%. Vesiniku hoiustamisel on arvestatud kadudeks 50%. Vesiniku edastamisel torujuhtmete kaudu tekivad lekked ja vesiniku hoidla on esimene koht, kus saab kasutegurit tõsta, sest tänapäeval puudub vesinikulistika. [28] [29] [30]

Mudelides kõik elektrolüüsi, hoidla ja koostootmisjaama kasutegurid on arvatud iseseisvalt ja need on määratud joonisel 2.1, 2.2 ja 2.3.

■ Name:

Technical

Operational

Production unit type	User defined	▼
Fuel input	(no fuel)	▼
Fuel output	Vesinik	▼

Power curves

Operation	Fuel input	Elec. consump.	Heat Consump.	Fuel output
Performance	MW	MW	MW	MW
Linear	0	Tuule- või päikesepargi võimsus	0	Elektrolüüsi kasutegur, 80% tuule- või päikesepargi võimsusest

Joonis 2.13 Elektrolüüsi mudel tehniliste andmetega

Joonisel 2.13 on toodud elektrolüüsi mudel tehniliste andmetega näha, et põhimõtteliselt elektrolüüsi mudelisse tuleb sisestada kaks väärtust. Üks väärtus on tuule- või päikesepargi võimsus ja teine väärtus arvutatakse lähtudes esimese väärtusest ning võttes arvesse elektrolüüsi kasutegurit 80%. Samuti tuleb tootmisväljundiks märkida vesinik. [28]

Name: Koostootmisjaam

Technical Operational

Production unit type: CHP

Fuel: Vesinik

Power curves			
Operation	Fuel input	Heat	Elec. power
Performance	MW	MW	MW
Linear			0.0
	Vesinik, 50% hoidlast		Koostootmisjaama elektriline kasutegur - 40%

Joonis 2.14 Koostootmisjaama mudel tehniliste andmetega

Joonisel 2.14 on näha koostootmisjaama mudeli. Siin ka on vaja sisestada ainult kaks väärtust. Esimene väärtus on vesiniku kogus ja arvestatud 50% kadudeks ning teine väärtus on koostootmisjaama kasutegur, mis on 40%.

Järgmine samm on alternatiivide analüüs ja nende võrdlus. Seejärel võib teha tulemuste põhjal järeldusi ja töö kokku võtta.

3. VESINIKUL PÕHINEVA SALVESTUSE KASUTATAVUSE ANALÜÜS JA TULEMUSED

Teises peatükis oli modelleeritud kolm erinevat mudeli alternatiivi. Kõik vajalikud andmed sisestati mudelite sisse ja selles peatükis käsitletakse mudeli tulemused, nende analüüs ja antakse tulemustele hinnang.

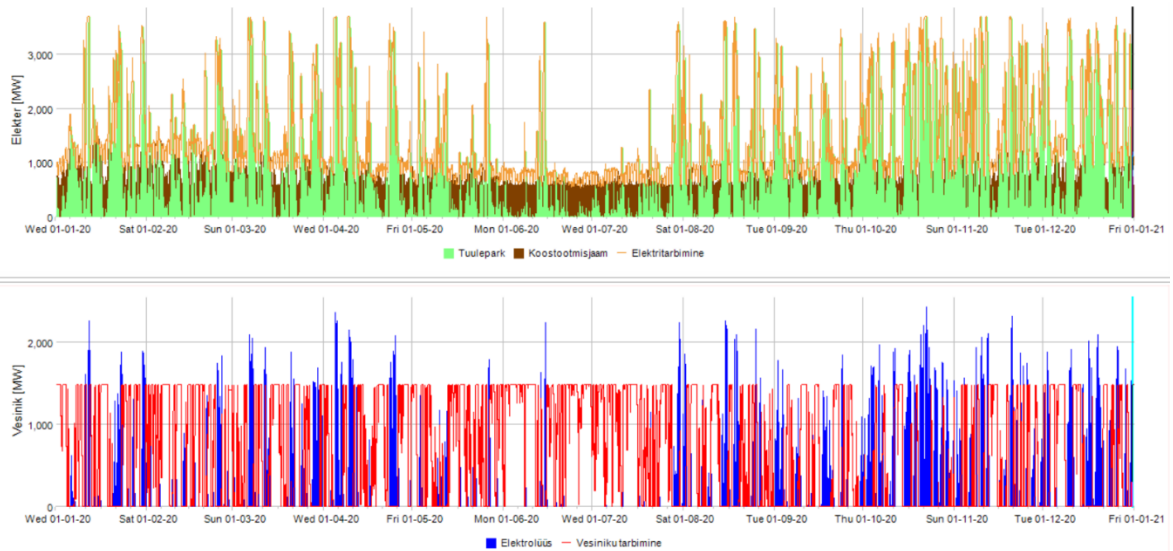
3.1. Esimese alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs

S Selles peatükis tehakse esimese alternatiivi tulemuste analüüs. Tabelis 3.1 on toodud: igakuine tuulepargi elektritoodang, elektrolüüsi vesinikutoodang ja koostootmisjaama elektritoodang. Kokku aastas oli toodetud elektrit 12,07 TWh, millest tuulepargi toodang on 9,8 TWh ja vesinikust toodetud elektrit koostootmisjaamaga on 2,27 TWh. Elektrolüüsi tehnoloogia abil vesiniku toodang on 3,48 TWh ühe aasta kohta.

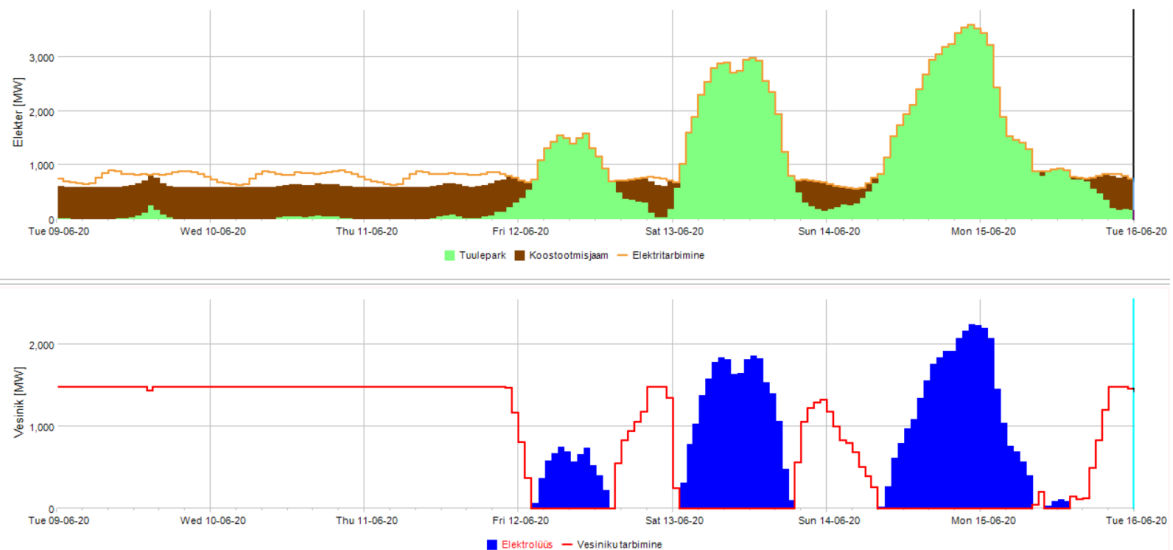
Tabel 3.1 Esimese alternatiivi igakuise toodangute andmed

	Elektrolüüsi vesiniku toodang GWh	Tuulepargi elektritoodang GWh	CHP elektritoodang GWh
Jaanuar	264	886	211
Veebruar	151	703	219
Märts	323	937	175
Aprill	343	866	173
Mai	145	532	230
Juuni	66	230	328
Juuli	103	397	261
August	301	805	161
September	269	804	135
Oktoober	637	1363	74
November	433	1124	137
Detsember	446	1150	175
Kokku:	3482	9795	2273

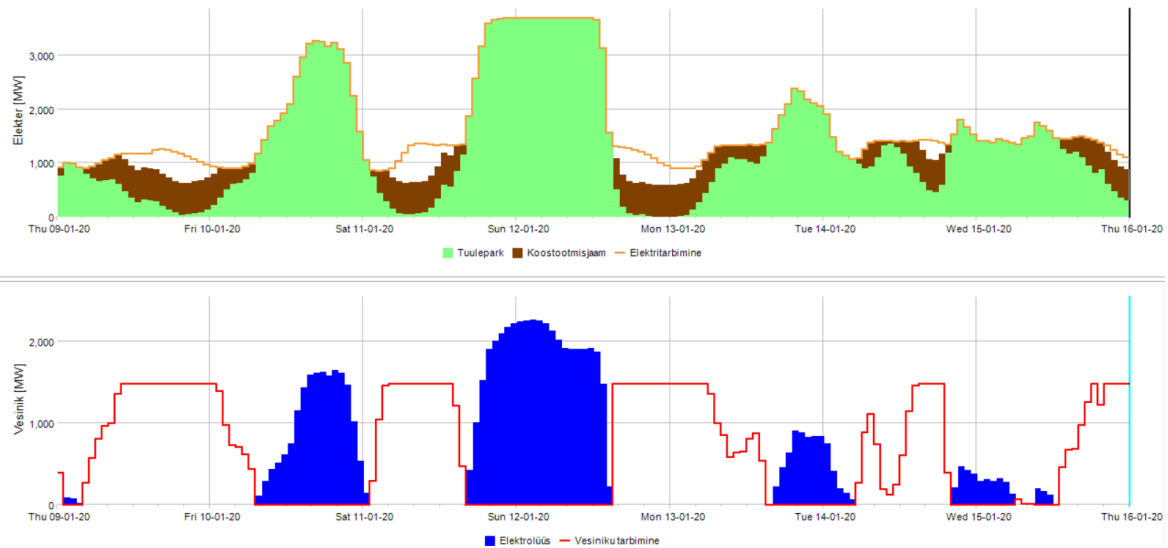
Tabelist 3.1 selgub, et kõige suurem tuulepargi elektritoodang on oktoobrikuus – 1363 GWh – ja kõige väiksem on juunis – 230 GWh. See tähendab, et kuna suvisel perioodil on tuult vähe, siis tuleb kasutada elektri tootmiseks vesinikku, mis on salvestatud tuulepargi ületoodangu korral. Elektrolüüsi vesinikutoodang on samuti kõige suurem oktoobris – 637 GWh – ja kõige väiksem on juunis – 66 GWh.



Joonis 3.1 Kogu aasta ulatuses toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud

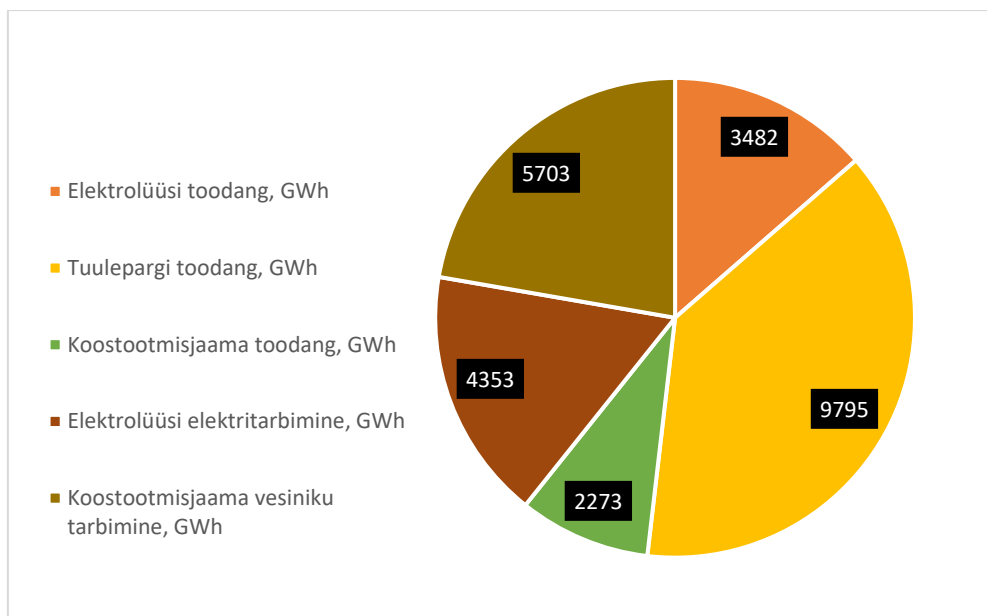


Joonis 3.2 Ühe suve kuu lõigu toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud



Joonis 3.3 Ühe talve kuu lõigu toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud

Joonisel 3.1 on toodud graafikud ühe aasta jooksul, kus on näha, et juuni algusest kuni augustini tuulepargi toodang oluliselt langeb ja selles vahemikus peab koostootmisjaam tootma rohkem salvestatud vesinikust. Samal ajal on ülemisel graafikul olemas väiksed tühikud, kus elektritarbimine ei ole täiesti kaetud. Joonisel 3.2 on kajastatud ühe suvekuu lõigu tuulepargi ja koostootmisjaama elektritoodang ning ülemisel graafikul elektritarbimine Eestis. Alumisel graafikul on näha vesiniku toodang ja selle elektri tootmiseks kasutamine. Joonisel 3.3 on samad graafikud talvekuus. Kahte joonist võrreldes võib öelda, et talvel on rohkem tuult ja tuulepargi elektritoodang on palju suurem kui suvel. Talvel on momendid, kui tuulepark toodab üle ning see energia läheb elektrolüüsiseadmesse, et elektrist vesinikku toota. Vesinikku salvestatakse ja pärast kasutab koostootmisjaam vesinikku elektritootmiseks, kui tuulepark tarbimist katta ei saa. Vastavalt mudeli andmetele toimub see põhiliselt talveperioodil.



Joonis 3.4 Esimese alternatiivi diagramm elektritoodangu, vesiniku toodangu ja elektritarbimisega

Joonisel 3.4 on toodud esimese alternatiivi ringikujuline diagramm. Eestis oli elektritarbimine 2021. aastal 8,3 TWh ja 4,35 TWh elektrolüüsi elektritarbimisega on tarbitud kokku 12,65 TWh elektritoodangust. Tuulepargi toodang on 9,8 TWh ja koostootmisjaama toodang on 2,27 TWh. Kokku on elektritoodangut toodetud 12,07 TWh. Kokku tarbitud elektritoodangut on 12,65 TWh, mis on isegi pisut rohkem toodetud elektritoodangust 0,58 TWh võrra. Diagrammist selgub, et koostootmisjaam tarbis vesinikku ka 1350 GWh võrra rohkem kui on toodetud. Seega, kui taastuvallikatest on ainult 3700 MW võimsusega tuulepark, ei anna see kindlust, et Eestis oleks elektritarbimine kaetud ja üle jäänud elektritoodangust piisavalt vesinikku salvestatud.

3.2. Teise alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs

Eelmises peatükis oli analüüsitud esimese alternatiivi tulemused, aga selleks, et saada täielikku ülevaadet alternatiividest, millel alternatiivil on rohkem potentsiaali, tuleb teha analüüsi ka teistele mudelitele. Teises mudelis on tuulepargi asemel on päikesepark ja kõik muud elemendid jäävad samaks. Tabelis 3.2 on toodud: igakuine päikesepargi elektritoodang; elektrolüüsi vesinikutoodang ja koostootmisjaama elektritoodang.

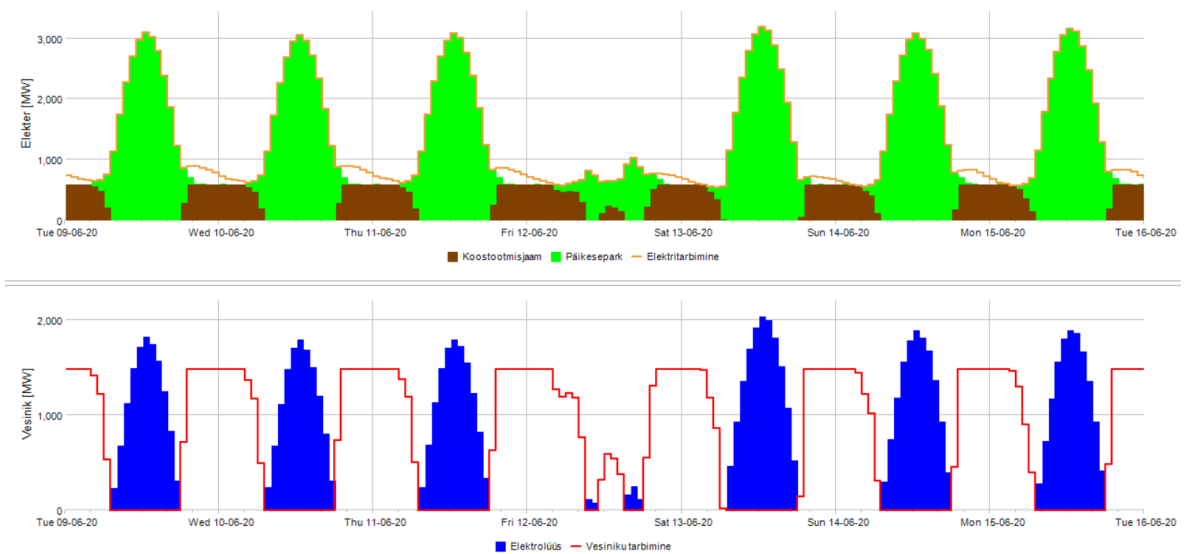
Tabel 3.2 Teise alternatiivi igakuise toodangute andmed

	Elektrolüüsi vesiniku toodang GWh	Päikesepargi elektritoodang GWh	CHP elektritoodang GWh
Jaanuar	1	67	428
Veebruar	43	230	359
Märts	69	296	361
Aprill	206	533	267
Mai	277	642	255
Juuni	354	737	202
Juuli	339	741	218
August	191	528	272
September	145	409	308
Oktoober	83	276	348
November	15	108	393
Detsember	1,5	61	425
Kokku:	1726	4627	3837

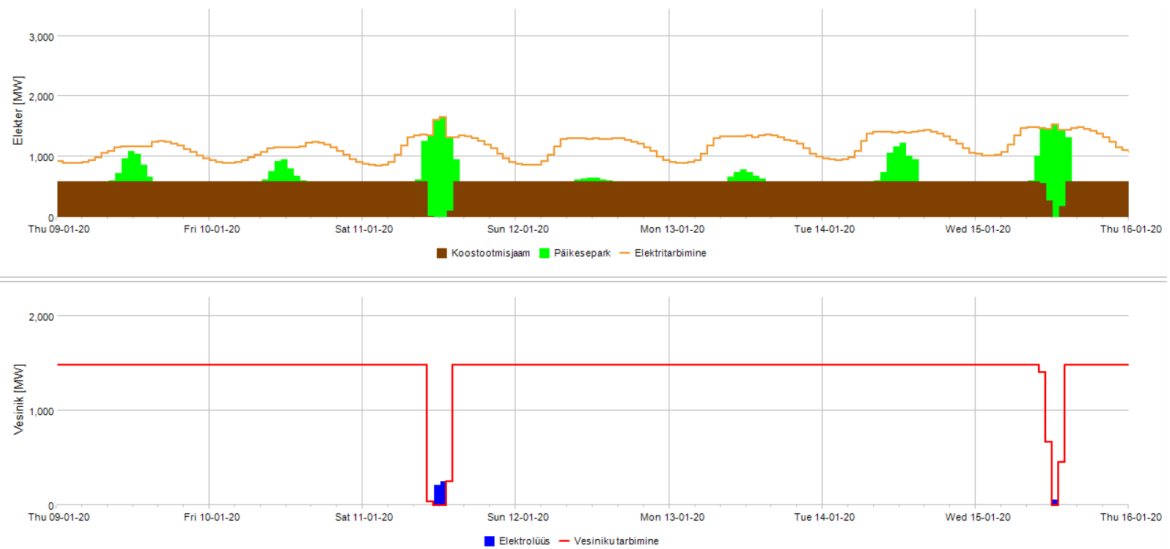
Võrreldes esimese mudeliga võib märgata, et vesiniku toodang on väiksem. Põhimõtteliselt toodab päikesepark palju elektrienergiat maikuust septembrikuuni, kuna sellel ajavahemikul on Eestis kõige rohkem päikesepaistet ja päevad on pikemad. Kõige suurem päikesepargi elektri toodang on juulis 741 GWh ja kõige väiksem on detsembris 61 GWh. Kui hakkab talveaeg, siis päeva kestus on lühem ja paljud päevad on pilvised ja päikesepaneel ei saa päikesekiirguse puudumise tõttu midagi toota. Vastavalt sellele tulemusele toodab elektrolüüs juulis palju rohkem ning detsembris ja jaanuaris liiga vähe.



Joonis 3.5 Kogu aasta ulatuses toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud

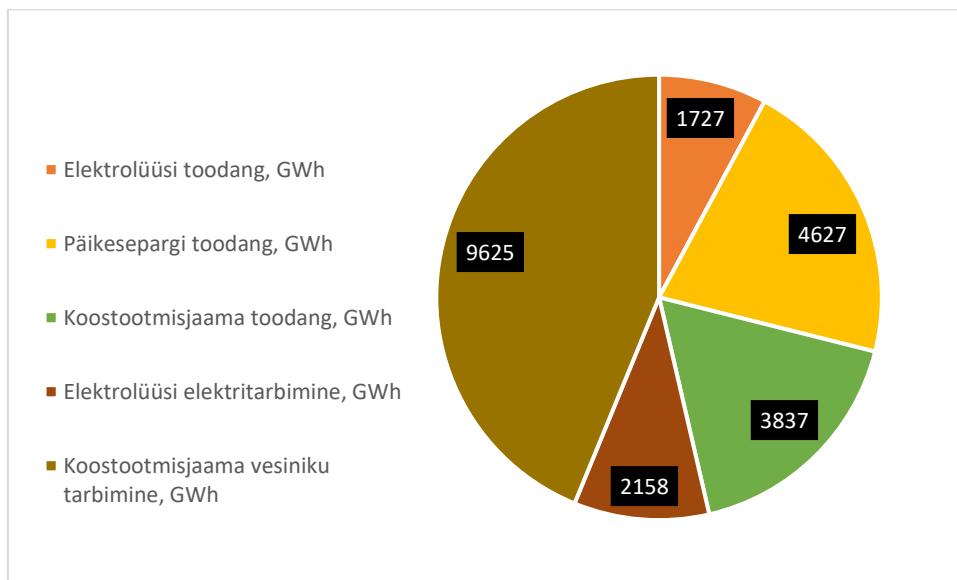


Joonis 3.6 Ühe suve kuu lõigu toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud



Joonis 3.7 Ühe talve kuu lõigu toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud

Joonistel 3.6 ja 3.7 on näha, et talvel päikesepargi toodang põhimõtteliselt puudub ja koostootmisjaam ei saa elektri tarbimise katmist tagada ning töötab oma täisvõimsusel. Aga suvel situatsioon muutub positiivsele poolele ja päikesepark toodab üle ning tänu sellele võib talvel kasutada elektri tootmiseks vesinikku. Ikka on graafikul olemas tühikud. Joonisel 3.5 on näha, et kogu aasta jooksul töötab koostootmisjaam täisvõimsusel ja suur osa tarbimisest ei ole kaetud.

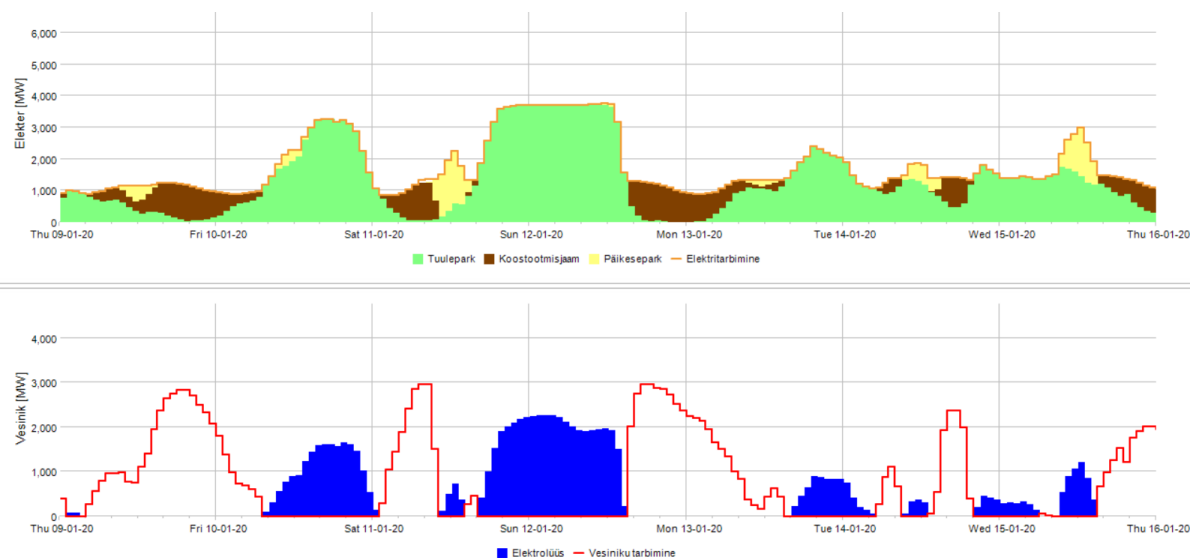


Joonis 3.8 Teise alternatiivi diagramm elektritoodangu, vesiniku toodangu ja elektritarbimisega

Kokku aastas oli toodetud elektrit 8,47 TWh, millest päikesepargi toodang on 4,63 TWh ja vesinikust toodetud elektrit koostootmisjaamaga on 3,84 TWh. Võrreldes esimese alternatiiviga aastane elektritoodang on märkimisväärselt madalam ja päikesepargi toodang on tuulepargi toodangust 2 korda väiksem. Tarbitud elektrienergiat on kokku 10,46 TWh, millest elektrolüüsi elektritarbimine on 2,16 TWh ja Eesti elektri tarbimine on 8,3 TWh. Selles mudelis toodetud energiat on vähem kui elektritarbimist 1,99 TWh võrra. Teise alternatiivi tulemused ei ole positiivsed, aga Eesti kliima on pigem tuuline ning elektrituulikute potentsiaal on suurem. Samal ajal tarbis koostootmisjaam vesinikku 4,45 korda rohkem kui on toodetud. Järgmises peatükis käsitletakse kolmanda alternatiivi tulemused, kus mudel taastuvallikatena on kasutusel nii päikeseпарк kui ka tuulepark.

3.3. Kolmanda alternatiivi toodangu ja salvestuse analüüs

Kolmandas alternatiivis on võimsust rohkem kui esimesel ja teisel alternatiivil, kuna elektrit toodab tuulepark koos päikesepargiga. Muud mudeli komponendid jäävad samaks.



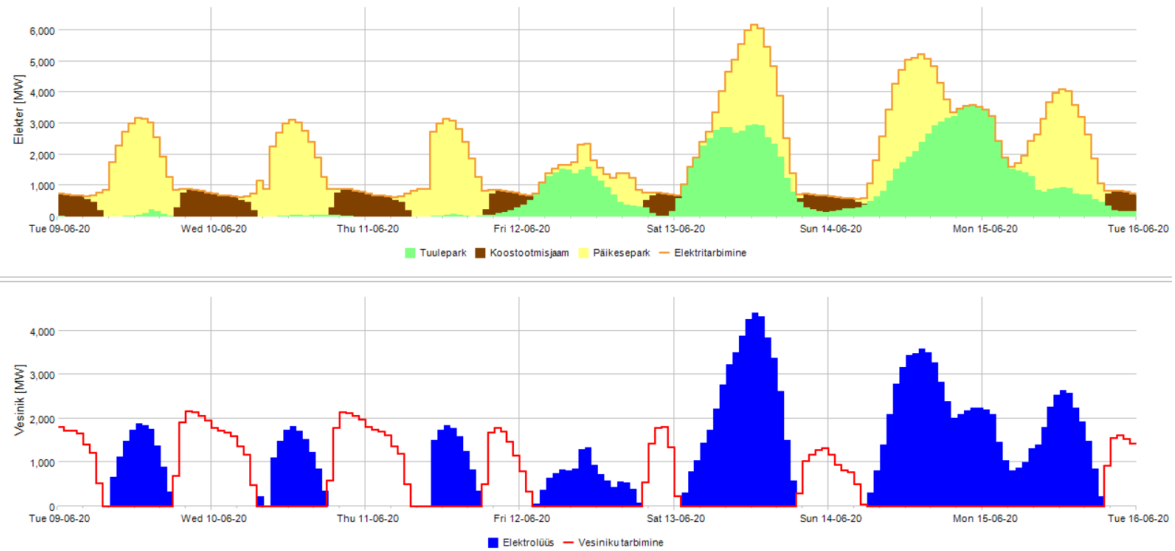
Joonis 3.9 Kogu aasta ulatuses toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud

Joonisel 3.9 on hästi näha, et elektritarbimine on kogu aeg kaetud ning üle jäänud elektrienergia salvestatakse elektrolüüsiseadme abil. Samuti toodab suure osa tuulepark ja päikeseпарк koostootmisjaamaga täiendavad toodangut.

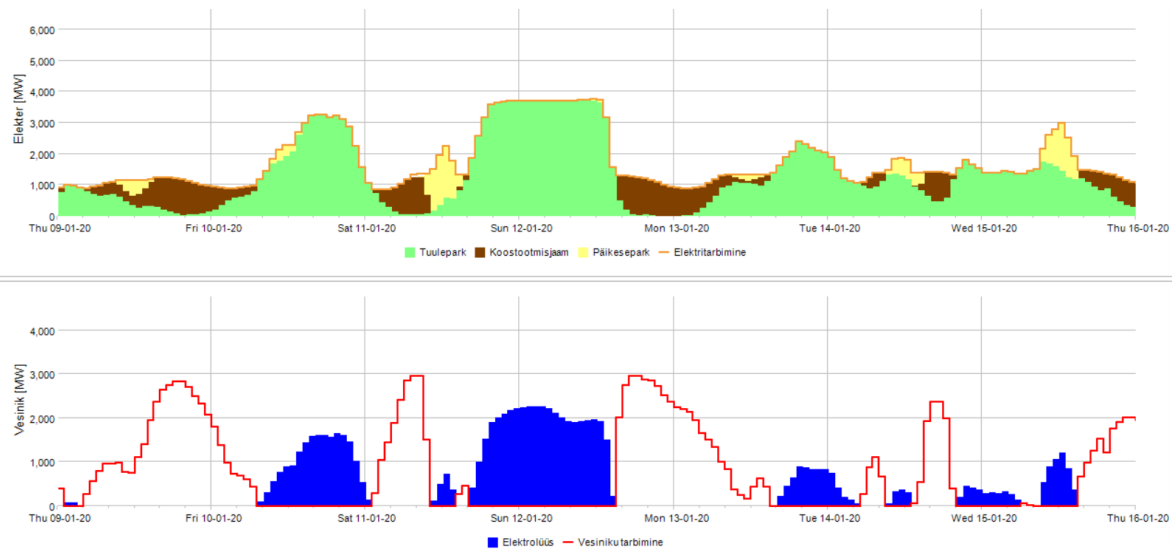
Tabel 3.3 Kolmanda alternatiivi igakuise toodangute andmed

	Elektrolüüsi vesiniku toodang GWh	Tuulepargi elektritoodang GWh	Päikesepargi elektritoodang GWh	CHP elektritoodang GWh
Jaanuar	290	886	67	252
Veebruar	265	703	227	219
Märts	505	937	295	170
Aprill	687	866	532	100
Mai	546	532	637	127
Juuni	457	230	696	175
Juuli	529	397	701	134
August	639	805	528	87
September	529	804	396	95
Oktoober	830	1363	275	56
November	495	1124	108	131
Detsember	476	1150	61	238
Kokku:	6247	9795	4523	1784

Tabelis 3.3 on toodud toodangute andmed. See alternatiiv erineb teistest, kuna siin tuulepark ja päikesepark täiendavad teineteist. Samal ajal on selles alternatiivis elektritoodang palju suurem, seega on ka vesinikutoodang suurem võrreldes esimese ja teise alternatiiviga oluliselt. Tuulepargi ja päikesepargi toodang jääb samaks ning ainult koostootmisjaamal ja elektrolüüsil on toodang erinev. Koostootmisjaama kõige suurem toodang on jaanuaris – 252 GWh –, see on seotud sellega, et talvel päikesepark eriti ei tooda ja elektritootmises aitab tuuleparki tarbimise katmiseks koostootmisjaam. Kõige väiksem koostootmisjaama toodang on oktoobris – 56 GWh.

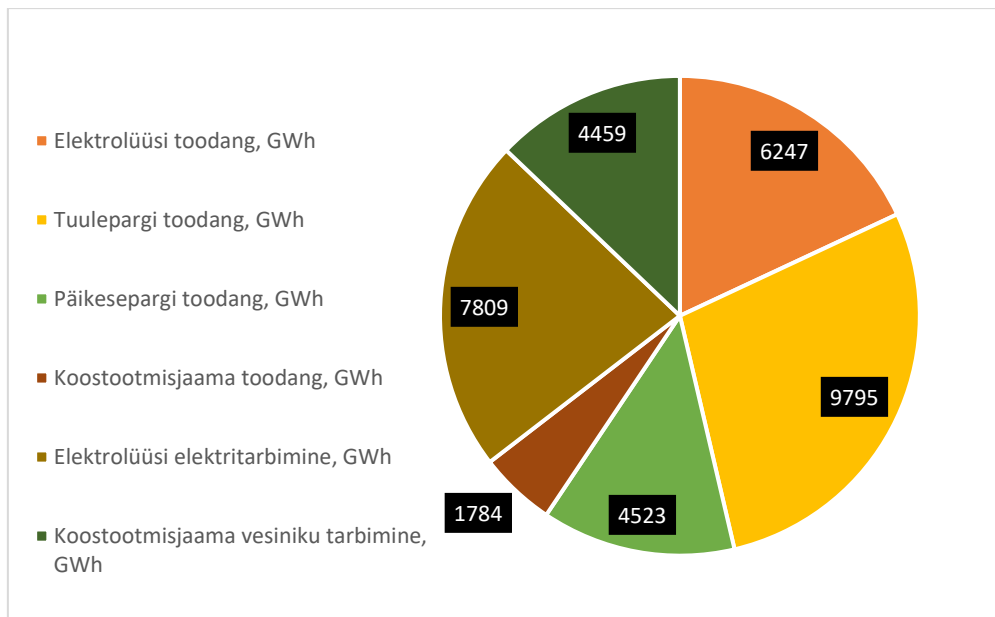


Joonis 3.10 Ühe suve kuu lõigu toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud



Joonis 3.11 Ühe talve kuu lõigu toodangu, salvestuse ja tarbimise graafikud

Joonisel 3.10 ja 3.11 on näha, et suvel toodab päikesepark palju rohkem ja tuulepark koostootmisjaamaga aitavad elektrienergiat juurde toota. Samal ajal üle jäänud elektrienergia kogu aeg salvestatakse. Talvel tuulepark toodab rohkem ja koostootmisjaam täiendab ning mõnikord päikesepark toodab juurde. Mõlemal joonisel on ilusti nähtav, et kogu aeg on elektrisüsteem tagatud elektrienergia toodanguga ja ei ole ühtegi tühikut, mida oleks elektritarbimises täita vaja .



Joonis 3.12 Kolmanda alternatiivi diagramm elektritoodangu, vesiniku toodangu ja elektritarbimisega

Selles alternatiivis on elektritarbimine kokku 16,10 TWh, aga toodetud elektrienergia on ka 16,10 TWh. Elektritoodang klapib elektritarbimisega. Selles mudelis on leitud elektritoodanguga bilanss. Suvel toodab päikesepark rohkem kui tuulepark, aga talvel olukord muutub. Võib märgata, et igal perioodil taastuvallikad toodavad ja kogu aeg toodetakse elektrist vesinikku ning salvestatakse hoidlasse. Vajaduse korral tuleb vesinik elektritootmiseks kasutusele. Selles alternatiivis on vesinikutoodang suurem koostootmisjaama vesinikutarbimisest 1788 GWh võrra. See on üllatavalt hea tulemus, sest vesinik on toodetud varuga. Kolmandas alternatiivis on kõige tähtsam see, et ahel võimaldab katta kogu elektritarbimist ja vesiniku olemasolu hoidlas on suurem kui selle tarbimine koostootmisjaama poolt.

3.4. Alternatiivide võrdlus

Käesoleva töö käigus kõik alternatiivid on modelleeritud ja analüüsitud. Kõikide alternatiivide eelis on see, et kogu elektri toodang toimub taastuvallikate ja elektrolüüsi seadme abil ning tundub alandab CO₂ heidet. Keskkonnale, õhule ja loodusele see mõjub väga positiivselt. Esimeses alternatiivis tuulepargi toodang on 9,8 TWh aastas, aga teises alternatiivis toodab päikesepark sama võimusega 2 korda vähem. Seega on vesiniku toodang ka 2 korda väiksem kui esimeses alternatiivis. Vahe elektritarbimise ja elektritoodangu vahel on samuti erinev. Esimeses alternatiivis see vahe on ainult 0,58 TWh, aga teises alternatiivis see vahe on palju suurem – 1,99 TWh. Selle tulemusest selgub, et päikesepaistet ei ole eriti palju ja Eesti on kliima mõttes pigem

tuuline. Samal ajal tarbimine – teise alternatiivi puhul töötab koostootmisjaam aasta jooksul oma täisvõimsusel ja siiski ei ole elektritarbimine täielikult kaetud. Need esimesed alternatiivid ei ole nii töökindlad ja hetkeks võivad mõned tarbijad olla ilma elektrita.

Mis puudutab kolmanda alternatiivi mudelit, siis ahelas on taastuvallikate võimsus 7400 MW ja see on 2 korda suurem kui esimesed kaks alternatiivi. Kolmandas alternatiivis toodab elektrit tuulepark koos päikesepargiga. Selle mudeli eelis on selles, et päikesepark ja tuulepark täiendavad teineteist ning elektrienergia toodangust jääb üle, mille võib salvestada elektrolüüsiseadme abil vesinikuna. Kui taastuvallikate elektritoodang langeb, siis koostootmisjaam tuleb appi ja kasutab vesinikku elektritootmiseks, et teatud ajavahemikul puuduvat elektrienergiat kompenseerida. Põhimõtteliselt toodab tuulepark iga kuu päris palju, aga kui suvel läheb tema toodang madalamaks, siis hakkab tootma rohkem päikesepark. Kolmandas alternatiivis oli elektrienergiat kokku toodetud 16,1 TWh ja Eesti 2021. aastal tarbimine on samasugune. Samal ajal vesiniku toodang on 6,25 TWh aastas, aga vesiniku tarbimine on 4,46 TWh aastas. See näitab, et vesinik on peale tarbimist veel alles ja kogu aeg elektritarbijad on tagatud elektrienergiaga.

Kogu süsteemi võib projekteerida ja ehitada nii, et paigaldada üle Eesti hoidlaid ning transportida vesinikku koostootmisjaamani torujuhtmete kaudu. Koostootmisjaamast vesinikust toodetud elekter läheb jaotusvõrku ja seejärel lõpptarbijatele. Samuti on esimene koht, kus võib kasutegurit tõsta, vesiniku hoiustamine, sest hoiustamisel ja vesiniku torujuhtmete kaudu edasi viimisel tekivad lekked.

Vastavalt Euroopa Liidu strateegiale see on ülihea võimalus kasutada taastuvenergiat, et toota elektrit ja salvestada ülejääki. Aga kogu selline süsteem nõuab investeringuid ja lisauuringuid ning praegu puudub vesinikulogistika kadude vähendamiseks. Kolmanda alternatiivi järgi on näha, et tehnilisest poolest on see lahendus teostav ja mõeldav, sest vesinikku võib hoida kaua ja sobival momendil kasutada elektri tootmiseks. Lisaks võib suurendada tuulepargi võimsust, et elektritoodang oleks varuga ja mitte ainult elektritarbimise katmiseks. Alternatiivide tulemustest selgub, et Eestis on tuulepargil rohkem potentsiaali.

3.5. Harjutusülesande koostamine

Viimane etapp on koostada harjutusülesanne õppeaines „Haja- ja taastuenergeetika“. Tudengid saavad tutvuda uue perspektiivse energeetika arengusuunaga ning iseseisvalt seda modelleerida tarkvaras energyPRO. Harjutusülesanne on koostatud vastavalt kolmele alternatiivile selle töö raames. Modelleerimiseks kõik vaheetapid on kirjeldatud eraldi järjestikku. Alguses valitakse koht, et saada vajalikud andmed ja need on päikese kiirgus, tuulekiirus ning välistemperatuur. Seejärel modelleeritakse tuulepargi mudel sisestades tehnilisi andmeid. Järgmine etapp on modelleerida elektrolüüsi seade koos hoidlaga ning lisada koostootmisjaama mudel. Lõpus tuleb võtta elektrituruhindade ja Eesti elektri süsteemi koormuse andmeid ametlikust portaalist Nord Pool Spot. Teises alternatiivis põhimõte on samasugune ja ainult on vaja tuulepargi asemele panna päikesepargi. Kolmandas alternatiivis tuleb esimese alternatiivi juurde lisada päikesepargi mudelit ja vahetada võimsused elektrolüüsi, hoidla ning koostootmisjaama mudelides. Pärast iga alternatiivi modelleerimist tudengitele on koostatud küsimused alternatiivi tulemuste põhjal. Näiteks kui palju tuule- või päikesepark toodab elektrit, mis on vesiniku toodang aastas ja millised kuud on paremad elektri tootmiseks. Kõik alternatiivid tuleb modelleerida eraldi failina, et midagi ei läheks segamini. Harjutusülesanne annab tudengitele natukene visiooni uuest salvestuslahendusest ja on võimalik analüüsida erinevaid alternatiive ning anda hinnang kui kasulik on selline salvestuslahendus Eesti elektri süsteemi jaoks. Kogu valmis harjutusülesanne on lisas 1.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärk oli koostada õppeaine Haja- ja taastuenergeetika tarbeks vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise harjutusülesanne ning anda selle teostamiseks vajalik teoreetiline taust. Tarkvara energyPRO oli peamine tööriist mudelite loomiseks. See tarkvara võimaldab luua mudeleid ja sisestada erinevaid väärtusi tootmise, hoiustamise ja kasutamise analüüsiks. Enne modelleerimise alustamist oli tehtud põhjalik ülevaade vesiniku tootmistehnoloogiatest, hoiustamisest ja kasutamisvaldkondadest. Tänapäeval on põhilised vesiniku tootmistehnoloogiad: auru metaani reformimine, söe gaasistamine, elektrolüüs ja termokeemilised protsessid. Seejärel käsitleti, kuidas vesinikku pärast tootmist saab hoiustada. Vesinikku saab hoida kolme erineva variandiga: surugaasine, veeldatult ja metallhüdriidides. Lisaks oli vaadatud kasutamisevõimalused: vesinik kui tuleviku mootorikütus ja roheline vesinik kui kliimaneutraalne kütus koostootmisjaamades. Samuti tuli määrata erinevad energyPRO tarkvara vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise võimalused ning vaadati üle ka erinevad salvestuslahenduste strateegiad. Kuna tegemist on Euroopa Liidu poolt välja pakutud perspektiivse rohepöördetehnoloogiaga ja lähtudes energyPRO tarkvara võimalustest, oli modelleeritud kolm erinevat alternatiivi. Esimene alternatiiv on modelleeritud koos elektrituulikute, elektrolüüsiseadme ja koostootmisjaamaga. Teises alternatiivis loogika on samasugune, ainult elektrituulikute asemel tootmiseks kasutati sama võimsusega päikeseparki. Kolmandas mudelis on elektri tootmiseks võetud mõlemad taastuvad energiaallikad. Kõikide alternatiivide ahela tööpõhimõtte on kasutada taastuvallikate poolt üle jäänud elektrienergiat vesiniku tootmiseks, siis salvestada see hoidlasse ja koostootmisjaama abil vesinikust taas elektrit toota. Selle mudeli tööpõhimõtte eelis on selles, et üle jäänud toodang on salvestatud ja on võimalik uuesti elektrit toota, kui teatud perioodil taastuvallikad ei saa elektritarbimise katmiseks piisavalt toota.

Esimene alternatiiv koos tuulepargi elektritootmisega näitas, et kokku on aastas toodetud energiat Eesti elektritarbimisest vähem 0,58 TWh. Teises alternatiivis, kus elektrit toodab päikesepark, on elektritarbimist tootmisest 1,99 TWh võrra rohkem. Võrreldes esimese alternatiiviga ei ole teine alternatiiv nii sobilik, kuna Eestis päikepaistet on vähe ja päikesepark ei suuda piisavalt toota, et ületoodang läheks elektrolüüsiseadmesse vesiniku tootmiseks ning et talveperioodil oleks piisavalt vesinikku, et toota vesinikust elektrit ja katta kogu tarbimist. Eesti riik on ilma mõttes pigem tuuline ja taastuvallikatest tuulepargil potentsiaal on elektri tootmiseks kõrgem. Aga kolmandas alternatiivis tuulepark päikesepargiga toodab elektrit ja 2021. aasta tulemuste põhjal elektritarbimine klapib elektritoodanguga. Kui need taastuvallikad

töötavad koos, siis kogu aasta ulatuses on võimalik tagada piisavalt elektrienergiat ja ületoodangust saab toota vesinikku. Selles alternatiivis on isegi vesiniku toodang suurem kui selle tarbimine koostootmisjaama poolt. Eesti elektrisüsteemi jaoks oleks sellisest uuest salvestuslahendusest kasu ja selline lahendus võimaldab kasutada taastuvallikaid koos elektrolüüsiseadmega ning salvestada ülejääki. Nii tuleb välja, et rohelist energiat kasutakse maksimaalselt ja hoitakse kaua vesinikus. Vajadusel korral toodab koostootmisjaam taas vesinikust elektrit. Kõikide alternatiivide eelis on see, et võib tunduvalt alandada CO₂ heidet. Aga väga hästi töötab ahel kolmandas alternatiivis, sest tuulepark päikesepargiga täiendavad teineteist ja koostootmisjaam aitab ka. Kogu ahela kasutegur on 16%. Seda tegurit on võimalik tõsta ja kõigepealt võib teha uuringuid, millisest hoidlast vesinik tarbimiseks läheb. Kadudeks on arvestatud 50%, sest ahelas on lekked.

Tulevikus on see lahendus teostatav ja vastab Euroopa Liidu energiapoliitika eesmärkidele. Euroopa Liidu strateegia järgi peab 2024. aastaks Euroopas taastuvate vesiniku elektrolüüsi tootmine olema vähemalt 6 GW. Praegu puudub süsteem, et vesinikku läbi torujuhtmete tarbimiseni suunata. Kuna vesinikutehnoloogiasse investeeritakse palju raha, siis need arenevad väga kiiresti. Siia maani vesinik on suhteliselt värske ja noor, aga siiski on see perspektiivne suund energeetikavaldkonnas.

Käesolevas bakalaureusetöös on läbi vaadatud vesiniku tootmistehnoloogia võimalused ja on antud hinnang, kui kasulik selline salvestuslahendus Eesti elektrisüsteemi jaoks on. Eelnevalt on uuritud energyPRO vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise võimalused. Tarkvaras energyPRO on olemas erinevad variandid vesiniku tarbimiseks, aga, mis puudutab tootmist ja salvestamist, siis väga palju võimalusi ei ole. energyPRO võimaldab vesiniku tootmist modelleerida ainult elektrolüüsi abil. Aga iga aasta uuendab energyPRO oma programmi ja lisab veel variante. Näiteks lisati 2022. aastal transpordimudel, kus vesinikku kasutatakse kütusena selle transpordiks. Selle töö mudelites tarbis vesinikku koostootmisjaam. Lõpuks koostati harjutusülesanne õppeaines „Haja- ja taastavenergeetika“. Aasta 2022 sügisel saavad tudengid juba tutvuda vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise võimalustega ning modelleerida seda tarkvaras energyPRO.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] European Commission. Communication from the commission to the European. [Võrgumaterjal] https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf [Kasutatud 12. 10. 2021]
- [2] T. Raig, Vesinik jõuab igapäevaellu. Sellega pannakse liikuma Tallinna taksod ja Tartu bussid ning köetakse soojaks hooned, *Ärileht*, Tallinn, 2022.
- [3] J. E. Thomas E.Drennen, *Pathways to a Hydrogen Future*, Great Britain: Elsevier, 2007.
- [4] AirScience. Steam Methane Reforming. [Võrgumaterjal] www.energy-xprt.com
- [5] P. Shapley. Goal gasification. [Võrgumaterjal] www.butane.chem.uiuc.edu
- [6] Green Power. Vee elektrolüüs vesiniku tootmiseks alaldis. [Võrgumaterjal] www.gprectifier-ar.com
- [7] Plug Power. Hydrogen. [Võrgumaterjal] <https://www.plugpower.com/hydrogen/genfuel/>
- [8] A. Ezov. Новый Toyota Mirai: три баллона, один мотор, 182 л.с., старт продаж — в декабре. [Võrgumaterjal] www.kolesa.ru
- [9] L. A. Kirshbaum. CHP 2.0: Using Hydrogen Fuel to Achieve Lower Emissions. [Võrgumaterjal] <https://chpalliance.org/chp-2-0-using-hydrogen-fuel-to-achieve-lower-emissions/>. [Kasutatud 02. 05. 2022]
- [10] 2G Energy AG. Home - 2G. [Võrgumaterjal] <https://www.2-g.com/en/>. [Kasutatud 02. 05. 2022]
- [11] FuelCellsWorks. Hydrogen storage challenges utrecht could provide answers. [Võrgumaterjal] <https://fuelcellsworks.com/news/hydrogen-storage-challenges-utrecht-could-provide-answers/>. [Kasutatud 2022 01. 27.]
- [12] EMD International. energyPRO. [Võrgumaterjal] www.emd.dk.
- [13] Nord Pool. Consumption. [Võrgumaterjal] <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Power-system-data/Consumption1/Consumption/EE/Hourly/?view=table>. [Kasutatud 2022 01. 02.]
- [14] Solectenergy. How do solar panels work? The science of solar explained. [Võrgumaterjal] https://solect.com/the-science-of-solar-how-solar-panels-work/?fbclid=IwAR3iljfCc0-Z4_TxLm_u9WeAIJDyn2nM3fZIT4baRtvrSfIQ0xAvj7W039g
- [15] Saare arenduskeskus. Saaremaal on jätkuvalt enim päikesepaistest Eestis. [Võrgumaterjal] <https://www.sasak.ee/est/uudised-1/saaremaal-jatkuvalt-enim-paikesepaistest-eestis>

- [16] PVOUT. Global Solar Atlas. [Võrgumaterjal]
<https://globalsolaratlas.info/map?c=11.523088,8.173828,3>. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [17] NSIA. Оптимальный угол наклона солнечных батарей. [Võrgumaterjal].
 Available: <https://nsia-energy.ru/info/articles/16-optimalnyj-ugol-naklona-solnechnykh-batarej>. [Kasutatud 30. 01. 2022]
- [18] Solarity. CANADIANSOLAR 540W MONO. [Võrgumaterjal]
https://shop.solarity.cz/modules_c4316442132534/canadiansolar-540w-mono_p2942. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [19] Solar Design Tool. Trina Solar TSM-540DE19 (540W) Solar Panel. [Võrgumaterjal] <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Trina-Solar/6296/TSM-540DE19/specification-data-sheet.html;jsessionid=20B7A5BF8D4A401FFD52384FC0593DD3>. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [20] Suministros del sol. JA Solar 540W JAM72S30 540/MR Solar Panel. [Võrgumaterjal] <https://suministrodelsol.com/en/panels-from-460-to-700w/1205-jasolar-540w-jam72s30-mr-solar-panel.html>. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [21] SunPro Power. 540 Watt Solar Panel. [Võrgumaterjal]
<https://www.sunpropoweronline.com/solar-panel/mono-solar-panel/540-watt-solar-panel.html>. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [22] Eesti Energia. Päikesepaneelid. [Võrgumaterjal]
https://www.energia.ee/et/ari/taastuvenergia/paikesepaneelid?fbclid=IwAR12696hc06bu9H2HUMUBCb_UxBOU3XgHxsvJLpXNAxF2yV3Z8V2dqk9GHU&solar-service=solar-power
- [23] DTU. Global Wind Atlas. [Võrgumaterjal] <https://globalwindatlas.info/>. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [24] wind-turbine-models.com. Enercon E-126 7.580. [Võrgumaterjal]
<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/14-enercon-e-126-7.580>. [Kasutatud 02. 05. 2022]
- [25] Tuuleenergia assotsiatsioon. Tuuleenergia Eestis. [Võrgumaterjal]
<https://tuuleenergia.ee/tuuleenergia-eestis/>. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [26] Windpowerlib. Wind speed.Hellman. [Võrgumaterjal]
https://windpowerlib.readthedocs.io/en/stable/temp/windpowerlib.wind_speed.hellman.html. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [27] Nationalgrid. How does a wind turbine work. [Võrgumaterjal]
<https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/how-does-wind-turbine-work>. [Kasutatud 25. 02. 2022]
- [28] ViDRIK, *Vesiniku veebiseminar "VESINIKUST MITME NURGA ALT"*. [Film]. Eesti: ViDRIK, TalTech, 2021.
- [29] P. Breeze. Hydrogen Energy Storage. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-energy-storage>. [Kasutatud 02. 05. 2022]

- [30] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. [Võrgumaterjal] https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch4s4-3-5.html. [Kasutatud 02. 05. 2022]
- [31] Soojapood. Päikese kiirgusandmed Eestis. [Võrgumaterjal] <https://www.soojapood.ee/et/p/paikese-kiirgusandmed-eestis>
- [32] Sustainable NI. Belfast Met lead €9.39m Smart Renewable Hydrogen Project. [Võrgumaterjal]. <https://www.sustainableni.org/blog/belfast-met-lead-%E2%82%AC939m-smart-renewable-hydrogen-project?fbclid=IwAR3jl0Sski1XmvE4XMn1LDFHn6xvq-6d48Zpmiw-cqdhBektka1u9lJh4U4>
- [33] Energiatalgud. Tuuleenergia ressurs. [Võrgumaterjal] https://www.energiatalgud.ee/?title=Tuuleenergia_ressurs. [Kasutatud 05. 12. 2015]
- [34] Postimees. Ametlik: 2019 tõusis Eesti kuumimate aastate esikohale. [Võrgumaterjal] <https://majandus24.postimees.ee/6862723/ametlik-2019-tousis-eesti-kuumimate-aastate-esikohale>. [Kasutatud 08. 04. 2021]

LISAD

LISA 1. Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise harjutusülesanne õppeaines „Haja- ja taastuenergeetika“.



Harjutuste metoodiline juhend
Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise
modelleerimine energyPRO tarkvara abil
Õppeaines „Haja- ja taastuenergeetika“

Õppejõud: Reeli Kuhi-Thalfeldt

Tallinn 2022

Töö eesmärk

Praktikumi eesmärgiks on vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise simuleerimine EnergyPRO tarkvara abil.

Töö teoreetiline taust

Antud laboratoorse töö eesmärk on modelleerida kolm erinevat alternatiivi energyPRO tarkvara abil ja analüüsida mudelide tulemusi. Kogu mudeli protsess põhineb sellel, kui elektri toodang taastuvatest allikatest võimaldab katta elektri tarbimist Eestis ja toodang läheb üle, siis selle elektri toodangust toodetakse vesinik ja ta on valmis kasutamiseks. Esimene alternatiiv on modelleeritud koos elektrituulikute, elektrolüüsiseadme ja koostootmisjaamaga. Teises alternatiivis loogika on samasugune, ainult elektrituulikute asemel tootmiseks läheb päikesepark sama võimsusega. Kolmandas mudelis elektri tootmiseks on võetud mõlemad taastuvad energiaallikad.

Töö käik

1. Tutvumine EnergyPRO tarkvaraga (andmete, aegridade sisestamine, tootmisvõimsuste seadistamine, tootmise modelleerimine)
2. Tuulepargi töö modelleerimine
3. Elektrolüüsiseadme töö modelleerimine
4. Koostootmisjaama lisamine
5. Elektrituru ja tarbimise lisamine
6. Esimese alternatiivi tulemuste vaatamine ja analüüsimine
7. Päikesepargi lisamise mudelisse tuulepargi asemel
8. Teise alternatiivi tulemuste vaatamine ja analüüsimine
9. Päikesepargi juurde tuleb lisada tuuleparki
10. Tulemuste vaatamine ja analüüsimine

Harjutus 1 – Esimese alternatiivi modelleerimine

1. Üldised siseandmed

Project calculation module: Design

Planning period (External conditions): 01.01.2021-01.01.2022

External conditions: välistemperatuuri, päikesekiirguse ja tuulekiiruse mõõteandmed Saaremaa kohta (Online data)

2. Elektrituuliku modelleerimise siseandmed

Annual production calculated

Time series: Tuulekiirus

Measure height: 50 m

Hub height: 135 m

Hellmann exponent: 0,16

Advanced (scale power curve)

Max. power in modified power curve: 3,700,000 kW

m/s	kW
1	0
2	3
3	55
4	175
5	410
6	760
7	1250
8	1900
9	2700
10	3750
11	4850
12	5750
13	6500
14	7000
15	7350
16	7500
17	7580
24	7580
25	0

Operational: partial load allowed

3. Elektrolüüsi seadme modelleerimise siseandmed

Energy conversion units: Add production unit → User defined unit

Name: Elektrolüüs

Fuel output: Vesinik

Electrical consumption: 3700 MW

Fuel Output: 2960 MW

Operational: partial load allowed

Operation dependent on other unit – allowed only when production on unit: Tuulepark

4. Vesiniku hoidla lisamine

Fuels: Add new fuel

Name: Vesinik

Unit: MWh

Heat value: 1 MWh

5. Elektribimine ja elektrituru lisamine

Demands: Add electricity demand (As timeseries; kopeerida aegrida Excelist)

External conditions: Elektrituru hind (Time series; kopeerida aegrida Excelist)

Elektriturg: Day ahead market

6. Koostootmisjaama lisamine

Name: Elektrolüüs

Fuel: Vesinik

Fuel Input: 1480 MW

Elec. Power: 590 MW

Esimese alternatiivi modelleerimise kontrollküsimused:

Mitu MWh elektrit tuulepark aastast toodab?

Mitu MWh elektrit koostootmisjaam aastast toodab?

Mitu MWh vesinikut elektrolüüsi seade aastast toodab?

Millises kuus on tuulepargi toodang suurim ja väiksem?

Millises kuus on koostootmisjaama toodang suurim ja väiksem?

Millises kuus on elektrolüüsi toodang suurim ja väiksem?

Mitu MWh elektrit elektrolüüsi seade aastast tarbib?

Kas toodetud elektrit on rohkem kui tarbitud aastast?

Mida Te arvate, kas selline alternatiiv sobiks Eesti energeetika jaoks?

Harjutus 2– Teise alternatiivi modelleerimine

1. Päikesepargi modelleerimise siseandmed

Installed capacity: 3700 MW

Inclination of photovoltaic: 35 degree

Orientation of photovoltaic (Deviation from South): 0 degree

Ambient temperature: viide temperatuuri aegreale

Aggregated radiation: viide päikesekiirguse aegreale

Maximum power: 540 kW

Temperature coefficient: -0,34

NOCT: 45°C

Aggregated losses from module to grid: 10 %

Operational: partial load allowed

2. Kõik ülejäänud komponendid ja võimsused jäävad samaks nagu esimeses alternatiivis

Teise alternatiivi modelleerimise kontrollküsimused:

- Mitu MWh elektrit päikesepark aastas toodab?
- Mitu MWh elektrit koostootmisjaam aastas toodab?
- Mitu MWh vesinikut elektrolüüsi seade aastas toodab?
- Millises kuus on päikesepargi toodang suurim ja väiksem?
- Millises kuus on koostootmisjaama toodang suurim ja väiksem?
- Millises kuus on elektrolüüsi toodang suurim ja väiksem?
- Mitu MWh elektrit elektrolüüsi seade aastas tarbib?
- Kas toodetud elektrit on rohkem kui tarbitud aastas?
- Mida Te arvate, kas selline alternatiiv sobiks Eesti energeetika jaoks?

Harjutus 3– Kolmanda alternatiivi modelleerimine

1. Päikesepargi ja tuulepargi modelleerimise siseandmed on samad nagu esimeses ja teises alternatiivis

2. Elektrolüüsi seadme modelleerimise siseandmed

Energy conversion units: Add production unit → User defined unit

Name: Elektrolüüs

Fuel output: Vesinik

Electrical consumption: 7400 MW

Fuel Output: 5920 MW

Operational: partial load allowed

Operation dependent on other unit – allowed only when production on unit:

Tuulepark

3. Vesiniku hoidla lisamine

Fuels: Add new fuel

Name: Vesinik

Unit: MWh

Heat value: 1 MWh

4. Koostootmisjaama lisamine

Name: Elektrolüüs

Fuel: Vesinik

Fuel Input: 2960 MW

Elec. Power: 1184 MW

5. Elektritarbimine ja elektrituru lisamine

Demands: Add electricity demand (As timeseries; kopeerida aegrida Excelist)

External conditions: Elektrituru hind (Time series; kopeerida aegrida Excelist)

Elektriturg:_Day ahead market

Kolmanda alternatiivi modelleerimise kontrollküsimused:

Mitu MWh elektrit tuulepark aastas toodab?

Mitu MWh elektrit päikesepark aastas toodab?

Mitu MWh elektrit koostootmisjaam aastas toodab?

Mitu MWh vesinikut elektrolüüsi seade aastas toodab?

Millises kuus on tuulepargi toodang suurim ja väiksem?

Millises kuus on päikesepargi toodang suurim ja väiksem?

Millises kuus on koostootmisjaama toodang suurim ja väiksem?

Millises kuus on elektrolüüsi toodang suurim ja väiksem?

Mitu MWh elektrit elektrolüüsi seade aastas tarbib?

Kas toodetud elektrit on rohkem kui tarbitud aastas?

Mida Te arvate, kas selline alternatiiv sobiks Eesti energeetika jaoks?