

TALLINNA REALKOOL

ROBIN MERE

12. KLASS

MOBIILSED PÄIKESEPANEELID EESTI KLIIMAS 3D-PRINDITUD TRIMARAANI NÄITEL

JUHENDAJAD ÕP REIVO MAASIK, VIKTOR RJABTŠIKOV (TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL)

SISSEJUHATUS

Esimene päikesepaneel leiutati juba 1950-ndatel, kuid need on populaarseks muutunud alles hiljuti. Päikesepaneelide toodetud elektri kogus on rohkem kui kolmekordistunud võrreldes aastaga 2015, mil sõlmiti Pariisi kliimakokkulepe. Prognooside järgi peaks see aastaks 2030 veel seitse korda kasvama. See kõik kinnitab, et päikesepaneelide tulevikupotentsiaal energiavaldkonnas on tohutu ning nende edasine uurimine on väga oluline. Päikesepaneelide efektiivsuse paranemine muudab neid populaarsemaks paljudes valdkondades: näiteks on päikesepaneelid juba kasutuses elektriautotööstuses. Euroopa Liidu soov on lõpetada uute sise põlemismootoriga autode müük aastaks 2035 – see ja paljud sarnased otsused suurendavad lähitulevikus mobiilsete päikesepaneelide kasutust eksponentsiaalselt. Kuigi mobiilsed päikesepaneelid on juba laialt kasutuses, pole nende efektiivsust palju uuritud ega statsionaarsete päikesepaneelidega võrreldud. Need vähesed uuringud, mis on tehtud, pole aset leidnud Eestiga sarnases kliimas, mille tõttu on antud uurimistöö eriti oluline.

Uurimistöö eesmärk on võrrelda mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkust. Selleks ehitati trimaraan, millega testiti mobiilseid päikesepaneele Eesti kliimas.

Uurimistöö raames püstitati hüpotees ja kolm uurimisküsimust. Hüpotees, millele otsiti tõestust, on: mobiilsete päikesepaneelide tootlikkus on madalam kui statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkus. Hüpotees püstitati eeldusel, et mobiilsetele päikesepaneelidele langev päikesevalguse kogus ei ole sama konstantne kui päikesevalguse kogus, mis langeb statsionaarsetele päikesepaneelidele. Siinse uurimistöö uurimisküsimused on järgmised:

- millist tüüpi päikesepaneelid on mobiilsetesse olukordadesse kõige sobilikumad;
- kui palju muutub mobiilsete päikesepaneelide tootlikkus võrreldes statsionaarsete päikesepaneelidega;

- kuidas muutub mobiilsete päikesepaneelide investeringu tasuvusaeg võrreldes statsionaarsete päikesepaneelidega?

Uurimistöo koosneb kahest osast. Esimeses osas kirjeldatakse päikesepaneelide tööpõhimõtet ning nende tüüpe. Teises peatükis käsitletakse praktilises osas kasutatavaid komponente ning korraldatakse mobiilse ja statsionaarse päikesepaneeli tootlikkuse eksperimendid ja mõõtmised. Teises peatükis on esitatud praktilise osa tulemused ja analüüs, mille põhjal vastatakse uurimisküsimustele ning kontrollitakse hüpoteesi.

Töös on kasutatud erinevaid teaduslikke artikleid, internetis kättesaadavaid õpikuid ja õppekeskkondi ning varasemaid uurimusi päikesepaneelidest ja nende tüüpidest. Lisaks kasutati modelleerimiskeskonda Fusion 360.

Autor tänab siinkohal juhendajaid Reivo Maasikut ning Viktor Rjabtšikovi heade nõuannete ja abi eest.

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	1
1. PÄIKESEPANEELIDE ÜLEVAADE.....	5
1.1. Päikesepaneeli tööpõhimõte.....	5
1.1.1. Tsooniteooria	5
1.1.2. Valguse neeldumine.....	8
1.1.3. Päikeseelement kui fotodiod ja selle karakteristikud.....	9
1.2. Päikeseelementide tüübid	14
1.2.1. Esimese generatsiooni päikeseelemendid.....	14
1.2.2. Teise generatsiooni päikeseelemendid	15
1.2.3. Kolmanda generatsiooni päikeseelemendid	17
2. PÄIKESEPANEELI TOOTLIKKUSE EKSPERIMENDID JA MÕÕTMISED.....	20
2.1. Trimaraani disainimis-, ehitus- ja uurimisprotsess	20
2.2. Tulemused, analüüs ja järeldused	28
KOKKUVÕTE	34
RESÜMEE	36
Mobiilsed päikesepaneelid Eesti kliimas 3D-prinditud trimaraani näitel	36
ABSTRACT	37
Mobile Solar Panels in the Estonian Climate: A Case Study using a 3D-Printed Trimaran as an Example Vehicle	37
KASUTATUD MATERJALID	38
LISA 1. Praktilise osa komponentide tabel	41
LISA 2. Arduino mikrokontrollerile päikesepaneelide omaduste mõõtmiseks kirjutatud kood.....	43
LISA 3. Maapinnal viieminutilise statsionaarse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast	46
LISA 4. Maapinnal 15-minutilise statsionaarse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast	47
LISA 5. Maapinnal 15-minutilise mobiilse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast.....	48
LISA 6. Pirita jõel 15-minutilise mobiilse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast.....	49

1. PÄIKESEPANEELIDE ÜLEVAADE

1.1. Päikesepaneeli tööpõhimõte

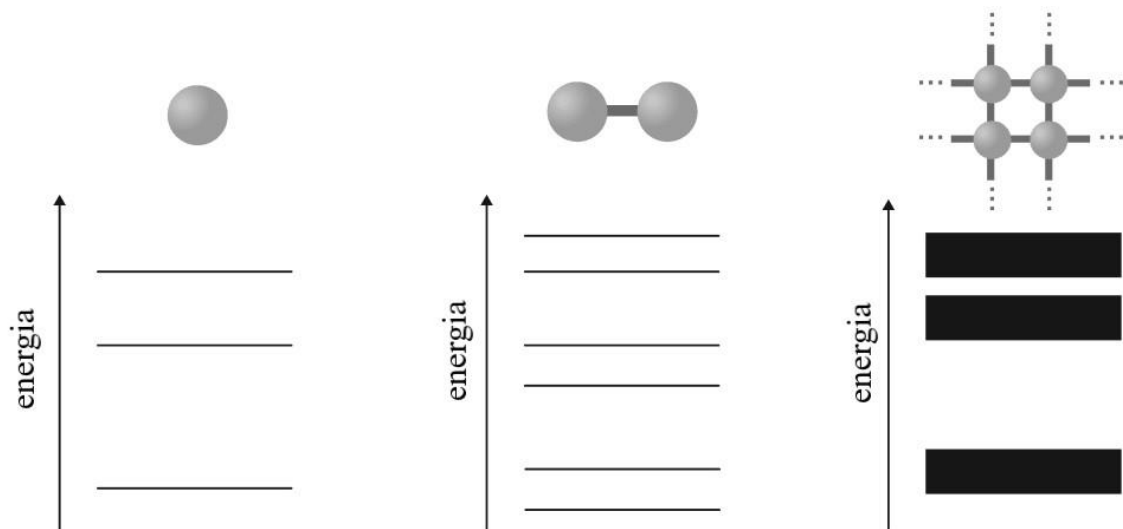
Päikesepaneel koosneb mitmest päikeseelemendist, mis muundavad valgusenergia elektrienergiaks. Päikeseelemendi tööpõhimõte baseerub sisemisel fotoefektil. See on füüsikaline ja keemiline nähtus, kus valgus neeldub ja ergastab laengukandja kõrgema tasemega olekusse. (Chemistry Explained) Sisefotoefekt sarnaneb välisfotoefektiga, mida selgitas esimest korda 1905. aastal Albert Einstein. Ta mõistis, et valgus koosneb täpselt määratletud energiakvantidest, mida hiljem hakati nimetama footoniteks. (Smets *et al.*, 2016, lk 62) Footoni energia on energia, mida kannab üks footon ja see antakse kujul:

$$E = hf, \tag{1}$$

kus h on Plancki konstant ja f on valguse sagedus (Smets *et al.*, 2016, lk 62). Metallile suunatud valguskiire footonid ergastavad aatomeid ja kui footoni sagedus on piisav elektroni aatomist välja löömiseks, tekitab kokkupõrge välisfotoefekti. Einstein sai selle töö eest 1921. aastal füüsikas Nobeli auhinna. (Ameerika Füüsikalts) Välis- ja sisefotoefekti vahe on see, et kui välisfotoefektis löövad valguse footonid elektronid materjalist täielikult välja, siis sisefotoefekti käigus löövad footonid elektronid välja ainult nende aatomiorbitaalidelt ehk elektronid saavad materjalis vabalt liikuda ja moodustada elektrivoolu (LibreTexts Engineering a).

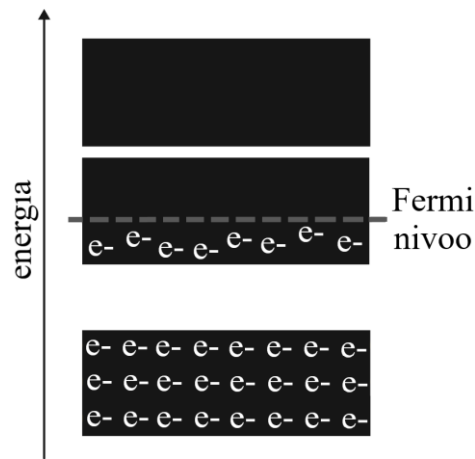
1.1.1. Tsooniteooria

Sisefotoefekt ilmneb ainult teatud tüüpi materjalis, mida nimetatakse pooljuhiks. Pooljuhtideks nimetatakse materjale, mille elektrijuhtivus on halvem kui elektrijuhtidel, kuid parem kui dielektrikutel. Nende peamine erinevus metallidest on see, et kui metallide eritakistus temperatuuri tõustes suureneb, siis pooljuhtide eritakistus hoopis väheneb. (TaskuTark a) Et aru saada, kuidas pooljuhid töötavad, peab mõistma, kuidas elektronid nendes materjalides liiguvad ja käituvad. Selleks võib alustada üksikust aatomist ja sellest, kuidas see töötab. Bohri aatomimudelil tiirlevad elektronid ümber tuuma, kuid seal on ainult kindlad orbitaalid, millele elektron saab viibida. Elektron ei saa hõivata nende kindlate orbitaalide vahelisi orbitaale. Kõik need orbitaalid on seotud elektroni energiatasemega ehk kaugemad orbitaalid on seotud kõrgema energiatasemega. See, et elektronid saavad hõivata ainult kindlaid orbitaale, tähendab seda, et on olemas ka kindlad energiatasemed, millele elektronid viibida saavad. Seda on näha joonise 1 vasakpoolsel joonisel, kus paralleelsed jooned tähistavad energiatasemeid. (Brilliant) Samuti on oluline mõista, et aatomis ei saa kunagi olla kaks elektroni, mis on täpselt samas kvantolekus (Füüsika leksikon a). Seda Pauli printsiibi tõttu, mis väidab, et igal aatomorbitaalil võib olla ainult piiratud arv elektrone.



Joonis 1. Energiatasemed aatomis, molekulis ja tahkises. Hallid kerad tähistavad aatomeid, paralleelsed jooned tähistavad energiatasemeid ja riskülikud (parempoolsel paneelil) tähistavad energiatasemete tsoone (Brilliant)

Molekul koosneb mitmest omavahel seotud aatomist, mis tähendab, et võrreldes üksiku aatomiga on rohkem tuumasid, millel igaühel on oma aatomorbitaalid. Joonise 1 keskmisel joonisel on näha, et kahest aatomist koosneval molekulil on kaks korda rohkem aatomorbitaale (tähistatud horisontaalsete joontena), kui sellel samal molekuli moodustanud üksikul aatomil. (Brilliant) Tahkistes on aatomite arv väga suur ja seega on ka tohutu suur arv energiatasemeid, mis kõik paiknevad üksteisele väga lähedal, nii lähedal, et tasemed hakkavad muutuma eristamatuks (Füüsika leksikon b). Seega on tahketes ainetes lubatud mitte ainult konkreetsed tasemed, vaid energiatasemete tsoonid, mida on näha joonise 1 parempoolsel joonisel (Brilliant). Lubatud energiatsioonid on üksteisest lahutatud keelutsoonidega, mida elektronidel on võimatu hõivata (Füüsika leksikon b). Kuna energiatsioon koosneb paljudest erinevatest orbitaalidest, hoiavad ka tsoonid ainult piiratud arvu elektrone ja ergastamata elektronid täidavad alati esimesena ära materjali madalaimad energiatasemed energia miinimumi printsiibi tõttu. Joonisel 2 näeme, et ergastamata elektronid hõivavad energiatasemeid kuni kindla punktini, mida nimetatakse Fermi nivooks. (Brilliant kodulehekülg) Fermi nivoo on energiataase, mille hõivab aatomorbitaal temperatuuril 0 K ja hõivatuse tase määrab erinevate materjalide elektrijuhtivuse (LibreTexts Engineering b).



Joonis 2. Fermi nivoo ehk kindel punkt, milleni ergastamata elektronid energiatasemeid hõivavad (Brilliant)

Fermi nivoo on materjalile elektroni lisamise energeetiline kulu või samaväärselt energia, mis saadakse materjalist elektroni eemaldamisel. Fermi nivoo vastab kindlale energiatasemele ja seda nimetatakse Fermi energiaks (E_F) ning seda mõõdetakse elektronvoltides (eV). Materjali loomulikus olekus on Fermi energia 0 eV, sellele materjalile energiat andes elektronide arv materjalis säilib ja elektronid muutuvad energilisemaks ehk materjali kuumutamades või seda valgustades Fermi nivoo ei muutu. Kui Fermi nivoo asub energiatsooni keskel, on see riba elektronidega osaliselt täidetud nagu näha joonisel 2. Selline energiadiagramm vastab metallile, sest osaliselt täidetud energiatsoonis on elektronidel palju ruumi liikuda ehk neil on kõrge elektrijuhtivus. Kui Fermi nivoo asub keelutsoonis, täituvad nivooost madalamal olevad tsoonid elektronidega ja kõrgemal asuvad tasemed jäävad tühjaks. Selline energiadiagramm vastab pooljuhtidele ja dielektrikele, sest ergastamata elektronide korral on kõik elektronid Fermi nivooost madalamal asuvas energiatsoonis ja neil puudub ruum liikumiseks ehk elektrijuhtivus on väga madal. Kuid materjali, mille temperatuur on kõrgem kui 0 K, elektronidel on soojusenergia, mis võib tõsta mõne elektroni kõrgemale energiatasemele kui Fermi nivoo. Suhtelist tõenäosust, et elektron hõivab kõrgema energiataseme, saab arvutada Maxwell-Boltzmanni jaotusega, mis antakse kujul:

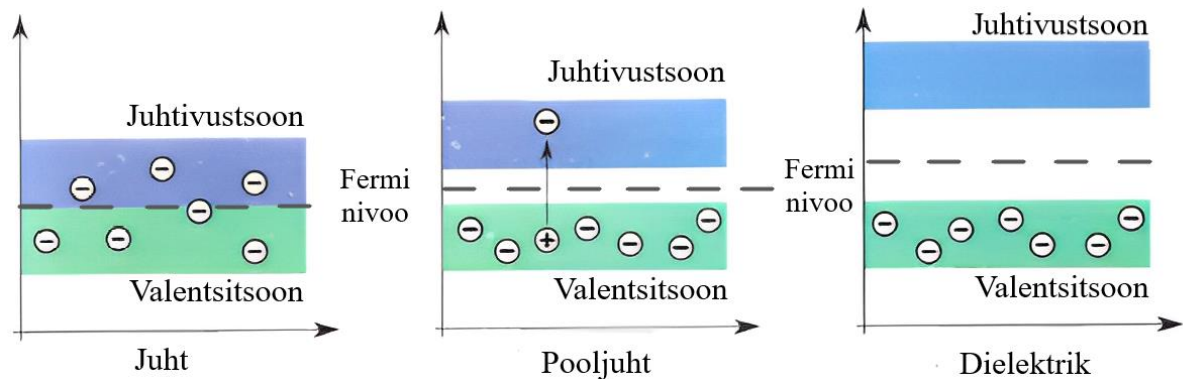
$$P \propto e^{-E/(kT)}, \quad (2)$$

kus P on tõenäosus, e tähistab elektroni, E on energiataseme energia, k on Boltzmanni konstant ja T on materjali temperatuur. Maxwell-Boltzmanni jaotuse suhe kahel erineval energiatasemel annab Boltzmanni konstanti, mis antakse kujul:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{-E_2/(kT)}}{e^{-E_1/(kT)}} = e^{(E_1 - E_2)/(kT)}, \quad (3)$$

kus Boltzmanni konstant on ühel energiatasemel hõivatud elektronide suhe teise energiataseme suhtes. Boltzmanni konstanti kasutatakse selleks, et määrata, kas materjal on pooljuht või dielektrik. Võrreldakse keelutsooni, kus asub ka Fermi nivoo, all oleva

energiatsooni kõige kõrgemat taset ja keelutsooni üleval oleva energiatsooni madalaimat taset. Need asetatakse valemisse 3, kust saadakse tõenäosus, et üks elektron 10^x -st suudab ületada keelutsooni. Materjalid, mille elektroni keelutsooni ületamise tõenäosus on piisavalt suur, ongi pooljuhid, sest osa elektrone suudavad liikuda kõrgemasse energiatsooni, kus nad saavad vabalt ringi liikuda ja juhtida elektrit. Pooljuhid on materjalid, mille keelutsoon on suurusjärgus 1–2 eV ja materjalid, mille keelutsoon on suurem kui 2 eV on dielektrikud, sest piisav arv elektrone ei suuda ületada keelutsooni. Joonisel 3 on illustreeritud erineva elektrijuhtivusega materjalide energiadiagrammid. (Brilliant)



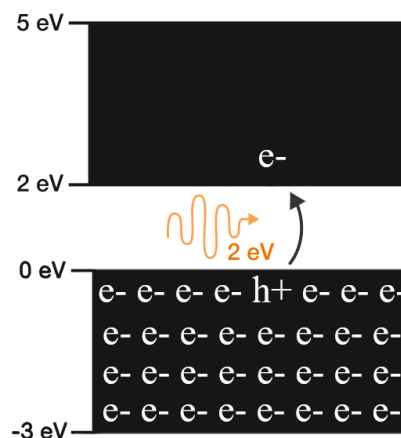
Joonis 3. Energiatsoonid erinevates materjalides (Vikipeedia, 2020)

Fermi nivoost allpool olevat energiatsooni nimetatakse valentsitsooniks ja Fermi nivoost kõrgemal asuvat energiatsooni nimetatakse juhtivustsooniks. Joonisel 3 on näha, et elektrijuhtis on juhtivustsoon ja valentsitsoon üheks ühildunud, mistõttu on elektronidel palju vaba ruumi liikumiseks ehk elektrit juhtimiseks. Dielektrikus pole juhtivustsoonis ühtegi elektroni, sest keelutsoon on väga lai ja liiga vähe elektrone suudab seda ületada. Pooljuhtis liigub mõni üksik ergastunud elektron juhtivustsooni ja jätab valentsitsooni positiivse laenguga augu, mis on võimaliku elektroni puudumine. Elektron võib ergastuda peale termilise energia ka footonilt saadud energia tõttu. (Brilliant)

1.1.2. Valguse neeldumine

Selleks, et mõista footoni energia neeldumist elektronis, peab esmalt aru saama, kuidas footonid üksikutes aatomites neelduvad. Bohri aatomimudeliga kinnitus fakt, et aatomitel on neeldumiseks ja kiirgamiseks kindlad spektrijooned ehk on olemas ainult teatud valguse lainepikkused, millega aatom on võimeline suhtlema. Iga lainepikkus on seotud konkreetse footoni energiaga, mis on antud valemis 1. Kui elektron langeb Bohri aatomimudelil madalamale energiatasemele, eraldub footon, mille energia vastab üleminekutele aatomis lubatud energiatasemete vahel. Aatomis toimib footoni neeldumine sarnaselt: kui langeval footonil on energia, mis vastab üleminekule aatomi kahe energiataseme vahel, saab footon neelduda ja elektron liigub kõrgemale energiatasemele. Footonid, mille energia ei ühti energiatasemete üleminekutega, ei neeldu. Tahketes ainetes on energiatasemete asemel

energiatsoonid ja footoni neeldumine ei piirdu ainult kindlate lainepikkustega, kuid energia jäävuse seadus peab kehtima, kui tahkises olevasse elektroni neeldub foton. Joonisel 4 on näha, et kui pooljuhi valentsitsoonis asuv elektron neelab sobiva energiaga footoni, ergastub elektron ja liigub valentsitsoonist juhtivustsooni ning jätab valentsitsooni tühja koha, mida nimetatakse auguks. Auku käsitletakse kui teist tüüpi osakest, mis käitub vastupidiselt elektronile ja kuna elektron kannab laengut $-q$, kannab auk laengut q . Joonisel 4 tähistab $h +$ positiivse laenguga auku, e^- tähistab negatiivse laenguga elektroni ja lainelise joonega tähistatakse neelduvat footonit, mis on energiaga 2 eV, sest ka keelutsooni laius on 2 eV ehk elektron, millesse neeldus foton, saab liikuda juhtivustsooni. (Brilliant)



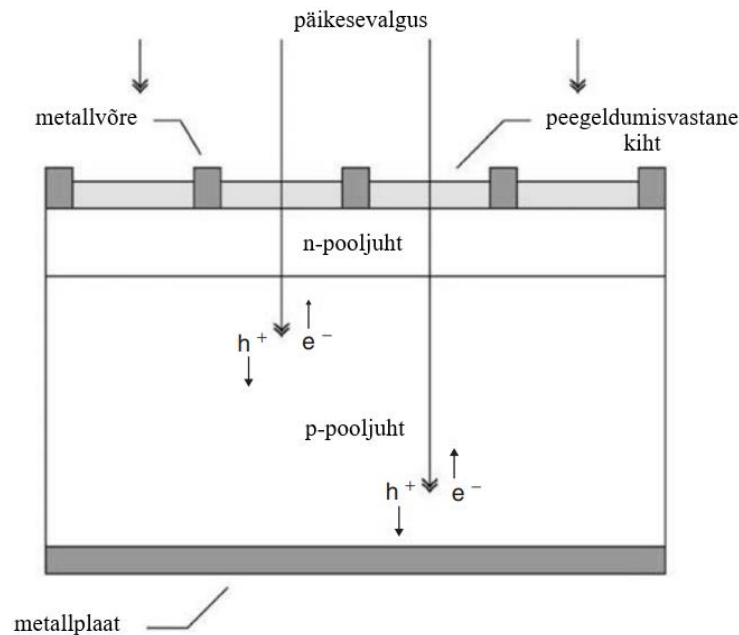
Joonis 4. Footoni neeldumine pooljuhis (Brilliant)

Joonisel 4 asub Fermi nivoo valentsitsooni ülaservas ehk seal on Fermi energia 0 eV, mis tähendab, et elektronid saavad hõivata nii positiivseid kui ka negatiivseid energiatasemeid, erinevalt üksikute aatomitega seotud elektronidest, kus on ainult negatiivsed energiatasemed. Elektron tahab alati hõivata kõige madalamat energiataset, mis võimalik, ja vastupidiselt elektronile tahab auk hõivata kõrgeimat energiataset, mis talle võimalik ehk kohe pärast footoni neeldumist, mille käigus tekkis kõrge energiaga elektron ja auk, liiguvad nad keelutsooni poole ja jäävad tsoonide äärtesse. Kuna energia jäävuse seadus ei lakka kehtimast muundub elektroni ja augu kaotatud energia soojusenergiaks ja pooljuht soojeneb. Tsooni servale jäänud elektron tahaks taas ühineda alumise tsooni ülaservas asuva auguga, kuid keelutsooni ületamine võtab elektronil aega, sest augu ja elektroni energiatasemed peavad ühtima ehk ta jääb mõneks ajaks juhtivustsooni ja see annab meile võimaluse selle energia kogumiseks. (Brilliant)

1.1.3. Päikeseelement kui fotodiood ja selle karakteristikud

Lihtsustatud päikeseelemendi struktuuri on näha joonisel 5, kus e^- tähistab negatiivse laenguga elektrone ja h^+ tähistab positiivse laenguga auke. Päikeseelemendi pealt pääseb sisse päikesevalgus, mis läbib peegeldumisvastast kihti, see suurendab pooljuhtidele langeva

valguse kogust, peegeldunud valguse tagasi suunamisega. (Luque *et al.*, 2011, lk 82) Päikeseelemendi keskel on monokristallilise pooljuhi ala, mida nimetatakse pn-siirdeks. Seal toimub üleminek aukjuhtivuselt ehk p-juhtivuselt elektronjuhtivusele ehk n-juhtivusele. (Eesti entsüklopeedia, 1994) P-pooljuhiks nimetatakse pooljuhti, kus enamik laengukandjaid on positiivse laenguga ning nad sisaldavad aktseptorlisandeid ehk aktseptoreid. Need haaravad elektrone naaberaatomitest, tekitades sinna auke ehk võimalike elektronide puudumist keemilistest sidemetest. P-pooljuhis on valdavaks juhtivusmehhanismiks aukjuhtivus ehk enamus laengukandjatest on augud. (Füüsika leksikon c)

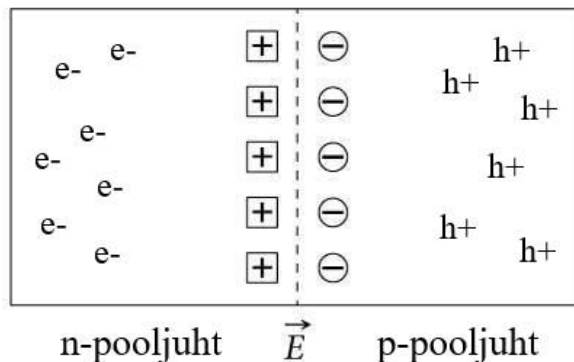


Joonis 5. Päikeseelemendi struktuur. e^- tähistab negatiivse laenguga elektrone ja h^+ tähistab positiivse laenguga auke (Luque *et al.*, 2011, lk 83)

N-pooljuhiks nimetatakse pooljuhti, kus enamus laengukandjaid on negatiivse laenguga ning nad sisaldavad doonorlisandeid ehk doonoreid. Doonorid on võõraatomid, mis loovutavad meelsasti elektrone, suurendades sellega juhtivuselektronide ehk vabade elektronide arvu. N-pooljuhis on valdav juhtivusmehhanism elektronjuhtivus ehk enamik laengukandjatest on elektronid. (Füüsika leksikon d) Selleks, et tekitada pooljuhis kaks erineva juhtivusega osa, kasutatakse legeerimist. Legeerimine on erinevate lisandite sisseviimine pooljuhtkristalli. (Reemann, 2015) Pooljuhtide peal on metallvõre ja all metallplaat, need moodustavad diodi ühendused.

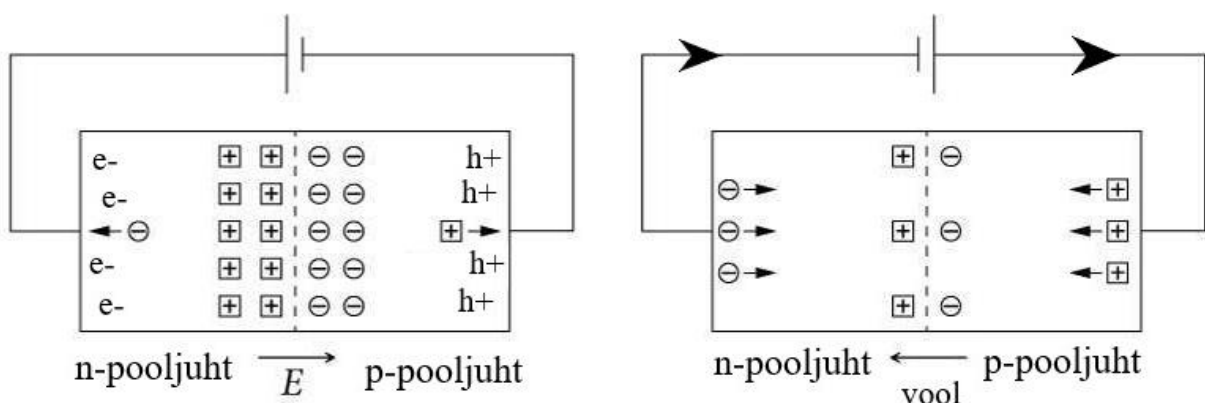
Päikeseelement on tööpõhimõttelt suurepinnaline fotodiod (Electrotopic). Diod on elektrooniline komponent, mis juhib elektrit peamiselt ühes suunas: sellel on madal takistus ühes suunas ja kõrge takistus teises suunas (Britannica). Diod töötabki p-n siirdega: n-osas on suur hulk vabu elektrone ja p-osas on palju auke ehk kohti, kuhu elektronid tahavad minna. Kui p-pooljuht ja n-pooljuht omavahel ühendatakse, hakkab ühenduskohas toimuma difusioon.

Joonisel 6 on näha, et difusiooni tõttu saab p-osa negatiivse laengu ja n-osa sama suure positiivse laengu, sest diod tervikuna on neutraalse laenguga. Laengukandjate difusioon toimub ainult siirdes, sest seda hakkab takistama tekkiv elektriväli (E). (Reemann, 2015)



Joonis 6. Diodi tasakaaluseisund (Reemann, 2015)

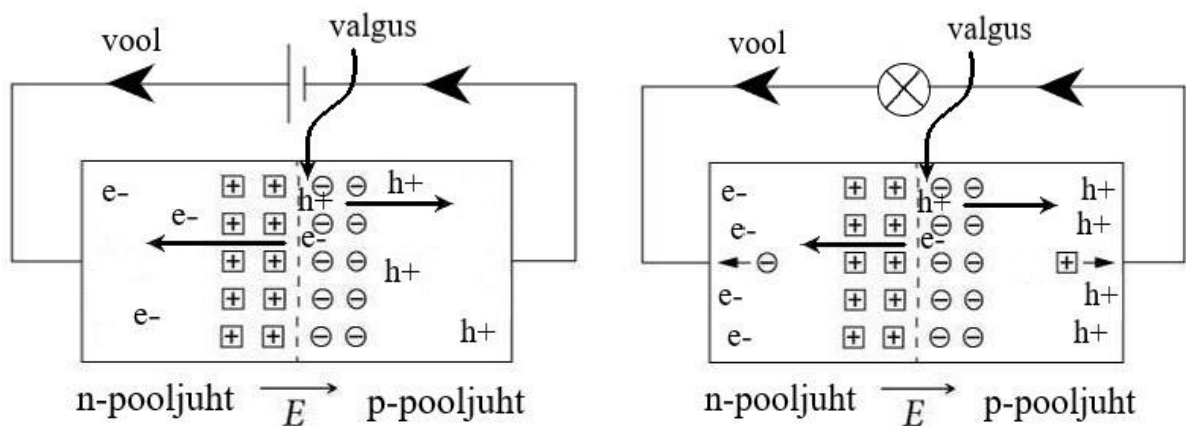
Positiivseid laengukandjaid ehk auke (h^+) hakkavad tõukama siirdes tekkinud positiivse laenguga ioonid ning sama kehtib negatiivse laenguga elektronide (e^-) ja negatiivsete ioonidega. Tekib justkui takistav kiht erineva juhtivusega osade piiril, millest pääsevad läbi üksikud kõrgema astme elektronid ja augud. (Reemann, 2015) Lõpuks saavutatakse tasakaal, kus need vähesed difusioonivad elektronid ja augud neutraliseeritakse vähemuslaengukandjate poolt ehk p-poolle olevate üksikute elektronide liikumisega n-poolle ja vastupidi, n-poolle peal asuvate üksikute aukude liikumisega p-poolle (Khan Academy). Kui ühendada diod vooluallikaga vastupingestatult ehk diodi p-osa on ühenduses vooluallika miinusklommiga ja n-osa vooluallika plussklommiga, nagu näha joonise 7 vasakpoolsel joonisel, siis vastaslaengud tõmbuvad ja siirde elektriväli suureneb veelgi. Selle tulemusel vooluringis ei teki elektrivoolu. (Reemann, 2015)



Joonis 7. Vastu- (vasakpoolsel paneelil) ja päripingestatud (parempoolsel paneelil) diod. Vastupingestatud diodi puhul p-osa on ühenduses vooluallika miinusklommiga ja n-osa vooluallika plussklommiga, päripingestatud diodi p-osa on ühenduses vooluallika plussklommiga ja n-osa vooluallika miinusklommiga (Reemann, 2015)

Kui ühendada diodid vooluallikaga päripingestatult ehk diodi p-osa on ühenduses vooluallika plussklemmiga ja n-osa vooluallika miinusklammiga, nagu näha joonise 7 parempoolsel joonisel, siis tõkkeküki väheneb ja difusioon suureneb. Negatiivse laenguga elektronid hakkavad liikuma läbi siirde positiivse laenguga aukude poole ning terves vooluringis tekib elektronide ringlus ehk tekib elektrivool. (Khan Academy)

Fotodiod on diod, mis on ühendatud vooluallikaga vastupingestatult ja selle peamine ülesanne on valguse intensiivsuse mõõtmine. Vastupingestatud fotodiodi keskel on tugev elektrivälj, mis tõrjub eemale nii augud kui ka elektronid: seda ala, kus pole ühtegi elektroni ega auku, kutsutakse ammendumise piirkonnaks. Kui ammendumise piirkonnale langeb piisava energiaga footoneid, nagu näha joonise 8 vasakpoolsel joonisel, ergastub elektron ja liigub valentsitsoonist juhtivustsooni. (Khan Academy) See tekitab ammendumise piirkonnas auk-elektron paari ja enne kui need vabad laengukandjad saavad võimaluse taas ühineda, tõukab elektrivälj augu p-osa poole ja elektroni n-osa poole ehk tekib elektrivool, mis on vastassuunaline elektronide liikumise suunale (TaskuTark b).

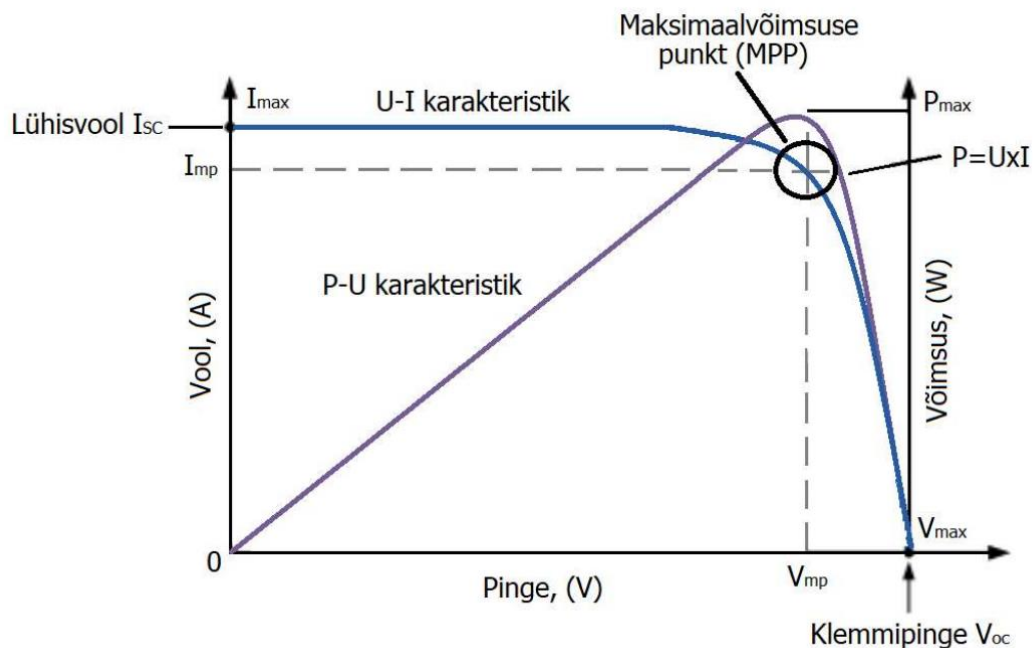


Joonis 8. Fotodiodi (vasakpoolne paneel) ja päikeseelemendi (parempoolne paneel) skeem (Reemann, 2015)

Fotodiod ja päikeseelement töötavad samal põhimõttel, aga nende ainuke erinevus on kasutusviisis, mida on näha joonisel 8. Fotodiodis liigub tekkinud auk-elektron paar kohe läbi välise toiteallika ja ühineb. See on oluline voolutugevuse koheseks mõõtmiseks, tänu millele saab täpselt mõõta fotodiodile langenud valguse intensiivsust. (Khan Academy) Päikeseelemendis puudu oleva välise toiteallika tõttu kumuleeruvad vabad laengukandjad päikeseelemendi otstesse ehk p-osas tekib positiivselt laetud aukude tõttu positiivne laeng ja n-osas tekib negatiivselt laetud elektronide tõttu negatiivne laeng. Päikeseelemendi otstele tekib potentsiaalide vahe ehk pinge ja seda nimetataksegi sisefotoefektiks. (TaskuTark b) Kui ühendada päikeseelement mingi seadmega, näiteks hõõglambiga, nagu on näha joonise 8 parempoolsel joonisel, hakkavad n-osas kumuleerunud negatiivselt laetud elektronid üksteist tõukama ja elektronid hakkavad konstantselt liikuma läbi vooluringi p-osas asuvate aukude

juurde selleks, et seal taas ühineda. Selle tulemusel tekib vooluringis vool ning hõõglamp põleb ehk päikeseelement käitub nagu aku. (Khan Academy)

Päikeseelemendi, -mooduli ja -paneeli töö iseloomustamiseks vaadeldakse selle voolu-pinge (I-U) ja võimsuse-pinge (P-U) karakteristikuid (Löper, 2020, lk 21). Need kirjeldavad detailselt päikeseelemendi, -mooduli või -paneeli päikeseenergia muundamise võimekust ja tootlikkust ning nende karakteristikute uurimine aitab määrata seadme väljundvõimsust ja üldist efektiivsust. Päikeseelemendi ja teiste päikeseelementidest koosnevate seadmete voolu-pinge graafik võtab kokku selle seadme peamised elektrilised omadused, kus päikeseelemendile langeva päikese kiirguse intensiivsus juhib väljundvoolu (I) ning päikeseelemendi temperatuuri muutus juhib väljundpinget (U). (Alternative Energy Tutorials) Joonisel 9 on näha kõige tavalisema päikeseelemendi voolu-pinge graafikut normaaltingimustes. Päikeseelemendi väljundvõimsus on väljundvoolu ja väljundpinge korrutis ning see on tähistatud tähega P (võimsust võib tähistada ka tähega N) ehk kehtib valem $P = U \cdot I$. (Löper, 2020, lk 21) Kui päikeseelement pole vooluringi ühendatud, on vool ligilähedane nulliga ja pinge on maksimaalne. Joonisel 9 on see märgitud kui V_{max} , mis on võrdne avatud vooluahela pingega (ingl *open circuit*, kust tuleb lühend oc) ehk V_{oc} -ga. Kui päikeseelement on lühistatud ehk takistus läheneb nullile, on pinge ligilähedane nulliga ja vool, mis vooluringis liigub, on maksimaalne. Joonisel 9 on see märgitud kui lühisvoolutugevus ehk I_{max} , mis on võrdne lühistatud vooluahela vooluga (ingl *short circuit*, kust tuleb lühend sc) ehk I_{sc} -ga. (Alternative Energy Tutorials)



Joonis 9. Voolu-pinge ja võimsuse-pinge graafik (Löper, 2020, lk 21)

Need punktid on küll päikeseelemendi suurimad pinge ja voolu tööpunktid, kuid reaalselt nendes punktides võimsuse väljastamist ei toimu, sest võimsus on pinge ja voolu korrutis, aga kui üks neist on maksimaalne tähendab see seda, et teine on ligilähedane nulliga ja korrutise tulemus on siis ka ligilähedane nulliga ehk võimsus on põhimõtteliselt null. Maksimaalse pinge ja maksimaalse voolu punktide vahele jääv ala on elemendi tööpiirkond, kus on võimalik võimsuse edastamine süsteemist välja. Päikeseelemendil on aga üks tööpunkt, kus elemendi väljundvõimsus on maksimaalne. See on maksimaalvõimsuse punkt ehk MPP (ingl *Maximum Power Point*) ning seal on väljundpinge ja väljundvoolu korrutis kõige kõrgem. Joonisel 9 on see punkt tähistatud ringiga ning on ka näha, et sellel samal pinge väärtusel asub ka võimsuse-pinge graafiku kõrgeim punkt ehk maksimaalne võimsuse väärtus. Maksimaalvõimsuse punkt on päikeseelemendi ideaalne tööpiirkond, kus on kõige suurem päikesevalguse elektrienergiaks muundamise efektiivsus. (Löper, 2020, lk 21)

1.2. Päikeseelementide tüübid

Päikeseelementide tootmises on kasutusel väga palju erinevaid materjale ja tehnoloogiaid ning pidevalt arendatakse uusi päikeseelementide tüüpe, mis on päikeseenergia muundamisel elektrienergiaks efektiivsemad ja/või odavamad. Päikeseelementide tüübid jaotatakse kolme generatsiooni:

- esimese generatsiooni päikeseelemendid on kõige traditsioonilisemad, neid kasutatakse tavapära olukordades kõige sagedamini ja nad koosnevad kristallilisest ränist;
- teise generatsiooni päikeseelemendid on erinevat tüüpi õhukese kilega kaetud elemendid ning neid integreeritakse hoonetesse, kuid peamiselt kasutatakse päikeseelektrijaamades ja väiksemates päikeseenergia süsteemides;
- kolmanda generatsiooni päikeseelemendid põhinevad nanotehnoloogiatel, aga enamik neist on alles uurimis- või arendusfaasis ja need ei ole veel tavakasutuseks saadaval. (Greenmatch)

1.2.1. Esimese generatsiooni päikeseelemendid

Ränil (Si) põhinevad päikeseelemendid olid esimesed, mis muutusid tavakasutajale kättesaadavaks ning moodustavad tänaseks rohkem kui 80% maailmas installeeritud päikeseelementidest ja hõlmavad 90% kõigist müüdüd päikeseelementidest. Need on populaarsed tänu nende suhteliselt suurele efektiivsusele ja need koosnevad materjalidest, mis põhinevad paksudel kristallilise räni kihtidel. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 5) Peamiselt jaotatakse esimese generatsiooni päikeseelemendid kahte kategooriasse: monokristallilisest ränist koosnevad päikeseelemendid ja polükristallilisest ränist koosnevad päikeseelemendid.

Monokristallilisi elemente toodetakse ühest suurest räni kristallist Szochralski protsessi abil, mille käigus lõigatakse suur kristall kõrge täpsusega väiksemateks plokkideks. (Löper, 2020, lk 21) Monokristallilisi päikeseelemente valmistatakse, kas täiesti puhtast ränist või lisatakse väikeses koguses muid elemente selleks, et muuta päikeseelemendi pooljuhtomadusi (Bagher *et al.*, 2015, lk 102). Monokristallilisi päikeseelemente kasutatakse just nende suure efektiivsuse tõttu, mis on 15–24 protsenti. Selle efektiivsuse kõrge vahemik on võimalik saavutada ainult laboritingimustes, kuid reaalsetes tingimustes on oodatav efektiivsus 17–18 protsenti päikeseelemendile langenud valgusest. Monokristallilise päikeseelemendi keelutsooni laius on 1,1 eV ja neil on ka pikk eluiga, umbes 25 aastat. Nende peamised eelised on: stabiilsus, kõrge jõudlus ja pikk kasutusiga. Monokristalliliste päikeseelementide piirangud on: kõrge tootmiskulu, materjali kadu, temperatuuritundlikkus ja päikesevalguse neeldumise probleemid. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 5)

Polükristallilisi päikeseelemente valmistatakse kõrge puhtusastmega räni sulatamisel ja siis selle kristalliseerimisel, mis on võrreldes monokristalliliste päikseelementide valmistamisega palju kiirem ja odavam protsess. See toob kaasa madalama lõpphinna, aga ka madalama efektiivsuse, ruumitõhususe ja lühema eluea. (Greenmatch) Polükristallilise päikeseelemendi efektiivsus on 10–18 protsenti, nende keelutsooni laius on umbes 1,7 eV ning eluiga on 14 aastat. Polükristallilise päikseelemendi peamised eelised on: kerge tootmisprotseduur, kasumlik toota, vähendatud räni raiskamine ja suurem päikesevalguse neelduvus võrreldes monokristalliliste päikeseelementidega. Polükristalliliste päikeseelementide piirangud on: madalam efektiivsus ning kõrge temperatuuritundlikkus. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 6) Polükristallilised päikeseelemendid on kõige levinum päikeseelementide tüüp kiiresti kasvaval päikeseenergia turul ja nendest päikeseelementidest koosnevaid päikesepaneeli kasutatakse ka selle uurimistöö praktilises osas.

1.2.2. Teise generatsiooni päikeseelemendid

Teise generatsiooni päikeseelemendid, mis on amorfsed õhukese ränikihiga elemendid (a-Si), õhukese kaadmium-telluur kihiga elemendid (CdTe) ja õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga elemendid (CIGS), loodi kristallilisest ränist päikeseelementide odavamaks asendajaks. Need pakuvad täiustatud mehaanilisi omadusi, mis sobivad ideaalselt paindlikkust vajavatesse rakendustesse, kuid sellega kaasneb efektiivsuse vähenemise oht. Kui esimese generatsiooni päikeseelemendid oli näide mikroelektronikast, siis õhukese kilega kaetud elementide areng avas sektori teistele valdkondadele, sealhulgas elektrokeemiale. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 9)

Amorfsed õhukese ränikihiga elemendid on olnud turul õhukese kilega kaetud elementidest kõige kauem ja need on ka enim arendatud. Amorfsed õhukese ränikihiga elemendid kasutavad kolmekihilist tehnoloogiat, millesse neeldub umbes 90 protsenti kõigist piisava energiaga footonitest. (Bagher *et al.*, 2015, lk 95) Amorfseteks nimetatakse neid sellepärast,

et neil puudub korrapärane kristallstruktuur (Löper, 2020, lk 19). Amorfsete õhukese ränikihiga päikeseelementide peamine miinus on nende vähene efektiivsus, mis jääb umbes seitsme protsendi lähedale, kuid nende tootmiskulud on väga väikesed, mis muudab need väga konkurentsivõimeliseks. Kuid sama võimsuse tootmiseks, kasutavad amorfsed õhukese ränikihiga päikeseelemendid ära väga palju rohkem ruumi, kui teised päikeseelementide tüübid, ehk nad ei ole väga ruumitõhusad. (Bagher *et al.*, 2015, lk 95) Amorfsete õhukese ränikihiga elementide keelutsooni laius on 1,7 eV ning eluiga on umbes 15 aastat. Nende peamised eelised on: odav hind, saadavus suurtes kogustes, mittetoksiline ja kõrge neeldumistegur. Amorfsete õhukese ränikihiga päikeseelementide piirangud on: vähene efektiivsus, raskused legerimise materjalide valimisel ja vähemuslaengukandjate kehv eluiga. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 10)

Õhukese kaadmium-telluur kihiga (CdTe) päikeseelemendid on ainus õhukese kilega kaetud elementide tehnoloogia, mis on odavam kui tavalised kristallilisest ränist valmistatud päikeseelemendid mitmekilovatistes süsteemides. Kui võrrelda päikeseelementide elutsükleid, on kaadmium-telluur kihiga päikeseelementidel kõigist päikeseenergia tehnoloogiatest väikseim süsiniku jalajälg, madalaim veekasutus ja lühim energia tasuvusaeg. (Bagher *et al.*, 2015, lk 97) CdTe elementide huvitav omadus on selle suurus. Selle suure spektraalse efektiivsuse tõttu saab neelduri paksust vähendada umbes ühe mikromeetri ilma, et efektiivsus suuremal määral langeks. Lisaks saab kaadmium-telluuriga toota läbipaistvaid päikesepaneele, mis saavad asendada hoonete aknapaneele. Nende läbipaistvus varieerub umbes kümnest protsendist kuni viiekümne protsendini, kuid puuduseks on see, et läbipaistvuse suurenemine tinglikult madaldab paneeli efektiivsust. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 11) Kaadmium kuulub ka kuue kõige surmavama ja toksilisema teadaoleva materjali hulka ning selle kasutamine tekitab endiselt ebaselgusi ja avalik arvamus on selle tehnoloogia vastu skeptiline. Ameerika Ühendriikide Energiaministeeriumi Brookhaveni Riikliku Laboratooriumi teadlased on leidnud, et kaadmium-telluur päikeseelementide laiaulatuslik kasutamine ei kujuta tervisele ega keskkonnale ohtu ning päikeseelementide ringlusesse võtt pärast nende kasutusaja lõppu lahendab kõik keskkonnaprobleemid. Kuid Euroopa Liidus ja Hiinas suhtutakse CdTe ohutusse palju ettevaatlikumalt kui mujal maailmas: kaadmiumi ja kaadmiumiühendeid peetakse Euroopa Liidus toksilisteks kantserogeenideks ning Hiina määrused lubavad kaadmiumi tooteid ainult ekspordiks. (Bagher *et al.*, 2015, lk 97) Õhukese kaadmium-telluur kihiga päikeseelementide efektiivsus on 10–15 protsenti, keelutsooni laius on 1,45 eV ja eluiga on umbes 20 aastat. Nende peamised eelised on kõrge neeldumistegur ja tootmiseks vajatakse vähem materjali. Õhukese kaadmium-telluur kihiga päikeseelementide piirangud on temperatuuritundlikkus, madalam efektiivsus, kaadmiumi toksilisus ning telluuri saadavus on piiratud. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 10)

Õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga (CIGS) päikeseelementid loodi samuti selleks, et saada lahti suurest pooljuhtmaterjalide sõltuvusest ning nüüdseks on CIGS päikeseelementide tõhusus jõudnud võrreldavale tasemele ränielementide parima efektiivsusega. Vask-indium-gallium-seleen kihiga päikeseelementide rekordtõhusus on 23,4 protsenti, mis ei ole küll tööstuslikult suuremas pildis saavutatav, aga sellest hoolimata on CIGS päikeseelementide üle 20 protsendiline efektiivsus juba reaalsus. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 10) Nende valmistamiseks kantakse klaas- või plastalusele õhuke kiht vaske, indiumit, galliumi ja seleniidi ning voolu kogumiseks elektroodid esi- ja tagaküljel. Kuna sellisel materjalil on kõrge neeldumistegur, pole vaja nii paksu kile kui teistel pooljuhtmaterjalidel. Nagu kaadmium-telluur ja amorfse õhukese ränikihiga elementid on ka õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga päikeseelementid painduvad. (Bagher *et al.*, 2015, lk 98) Nende efektiivsus jääb tavaliselt vahemikku 12–20 protsenti, keelutsooni laius on 1,7 eV ning eluiga on umbes 12 aastat. Õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga päikeseelementide peamised eelised on keskkonnasõbralikkus ja väiksem materjali kulu tootmisel. Nende piirangud on: kõrge hind, temperatuuritundlikkus ning ebastabiilsus ja madal töökindlus. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 10)

1.2.3. Kolmanda generatsiooni päikeseelementid

Kolmanda generatsiooni päikeseelementid, mille hulka kuuluvad tandem-, perovskiit, värvidega sensibiliseeritud, orgaanilistest materjalidest ja muud uued esilekerkivate kontseptsioonidega päikeseelementid, esindavad laia hulka lähenemisviise alates odavatest ja väheefektiivsetest süsteemidest kuni kallite väga efektiivsuse süsteemideni. Need on mõeldud erinevate rakenduste jaoks, mis varieeruvad alates hoonetesse integreerimisest kuni kosmoses kasutamiseni. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 14) Kolmanda generatsiooni päikeseelemente nimetatakse tihti just esilekerkivateks kontseptsioonideks, sest enamikku neist pole veel kaubanduslikult rakendatud ja need on alles uurimis- või arendusfaasis (Bagher *et al.*, 2015, lk 95). Nendel vähestel, mis on kaubanduslikult saadaval, on väga madal turuhõive isegi, kui mõnda neist on juba arendatud üle 25 aasta (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 14). Kolmanda generatsiooni päikeseelementidesse on investeeritud väga palju uuringuid tootmistehnoloogia ja tõhususe parandamiseks, sest need töötavad saavutada odavate ja efektiivsete päikeseelementide tootmise eesmärgi (Bagher *et al.*, 2015, lk 95).

Orgaanilistest ja polümeersetest materjalidest päikeseelementid (OSC) on paindlike päikeseelementide tüüp, mis on valmistatud polümeeridest ehk suurtest korduvate struktuuriüksustega molekulidest. Võrreldes ränil põhinevate tehnoloogiatega on orgaanilistest ja polümeersetest materjalidest päikeseelementid kerged, potentsiaalselt ühekordselt kasutatavad, odavad valmistada, paindlikud, kohandatavad molekulaarsel tasandil, neil on ka väiksem keskkonnamõju ning samuti võivad need olla osaliselt läbipaistvad. Orgaanilistest ja polümeersetest materjalidest päikeseelemente on võimalik toota lahustest, mis tähendab, et

neid saab trükkida või katta, mis muudab tootmisprotsessi väga palju odavamaks ja kergemaks võrreldes esimese generatsiooni päikeseelementidega. (Bagher *et al.*, 2015, lk 106) Orgaanilistest ja polümeersest materjalidest päikeseelementide efektiivsus jääb kümne protsendi ümbrusesse ning see koos lühikese elueaga ongi nende kõige suurem puudus (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 15).

Värvidega sensibiliseeritud päikeseelementide (DSSC) tehnoloogiat saab võrrelda kunstliku fotosünteesiga, kuna see jäljendab valgusenergia neeldumist looduses. Värvidega sensibiliseeritud päikeseelemente saab kasutada elektri tootmiseks mitmesugustes valgustingimustes, nende tootmine on kerge, need on osaliselt paindlikud ja läbipaistvad ning enamik kasutatavaid materjale on madala hinnaga. Kuigi värvidega sensibiliseeritud päikeseelementide konversioonitõhusus on madalam kui parimatel õhukese kilega kaetud elementidel, peaks teoreetiliselt selle hinna ja jõudluse suhe olema piisavalt hea, et võimaldada neil konkureerida fossiilkütustest elektritootmisega. (Bagher *et al.*, 2015, lk 99) Värvidega sensibiliseeritud päikeseelementide peamised väljakutsed on praegu madal efektiivsus ja halb elemendi stabiilsus. Suurim teoreetiline efektiivsus on hinnanguliselt 32%, kuid praktikas on suurim saavutatud efektiivsus ainult 13%. Käimas on palju arendusi efektiivsuse tõstmiseks, kuid tõhususe tõusuga kaasneb ka materjali kulu kasv, mis on järgmine suur probleem, millele on vaja tulevikus lahendus leida. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 16)

Perovskiit-päikeseelementide nimi tuleneb selle kristallilisest struktuurist, kus hapnik on kuubilise ühikraku tahkude keskel ja sellist struktuuri nimetatakse perovskiitseks (Vikipeedia, 2016). See on hübriidne orgaaniline-anorgaaniline materjal, mis on sisuliselt orgaaniline ühend, millele on kinnitatud anorgaaniline ühend, ja see on arenenud hämmastava kiirusega. Perovskiit-päikeseelementid ilmusid esimest korda alles 2012. aastal, kuid nende efektiivsus on juba üle 20 protsendi, mis on päikeseenergia uurimise valdkonnas uus tase. Neid saab ka toota väga kergelt ja odavalt, sest neid on võimalik alusele kanda vedela lahusega. Kuid nagu ka orgaanilistest ja polümeersest materjalidest päikeseelementidel, on ka perovskiit-päikeseelementid pikaajaliselt väga ebastabiilsed ning lisaks on need veel eriti tundlikud niiskuse vastu: paar tilka vett võib materjali täielikult hävitada. Perovskiit-päikeseelementide kallal uurimis- ja arendustöö jätkub ning kui potentsiaal on võimalik realiseerida, võib see päikeseenergia maailma täielikult muuta. (Bagher *et al.*, 2015, lk 105)

Kvanttäpp-päikeseelemente tuntakse ka nanokristalliliste päikeseelementidena ja nendega püütakse asendada puistematerjale nagu räni, CIGS ja CdTe. Kvanttäpp-päikeseelementide keelutsooni laiust saab muuta kvanttäppide suuruse muutmisega. See omadus muudab kvanttäpid eriti atraktiivseks päikeseelementides, sest pool Maale jõudvast päikeseenergiast on infrapunane ja ülejäänud enamik selle läheduses. Kvanttäpp-päikeseelementid muudavad infrapunaenergia sama kättesaadavaks kui mistahes muu energia. (Bagher *et al.*, 2015, lk 108)

Praegu on kvanttäpp-päikeseelementide efektiivsus 11–17 protsendi vahemikus ning nende peamised eelised on madal tootmiskulu ja energiatarve. Kvanttäpp-päikeseelementide piirangud on looduses kõrge toksilisus ning degradeerumine. (Pastuszak, Węgierek, 2022, lk 17)

Tandem-päikeseelemendid on mitme p-n siirdega päikeseelemendid, mis on valmistatud erinevatest pooljuhtmaterjalidest. Iga materjal toodab elektrivoolu erinevas valguse lainepikkuses ja seega võimaldab mitme pooljuhtmaterjali kasutamine neelduda laiemal lainepikkuste vahemikul ehk päikeseelemendi päikesevalguse elektrienergiaks muundamise efektiivsus suureneb. Tavaliste ühe p-n siirdega päikeseelementide maksimaalne teoreetiline efektiivsus on 34 protsenti, kuid lõpmatu arvu p-n siiretega päikeseelemendi maksimaalne teoreetiline efektiivsus kõrge intensiivsusega päikesevalguse käes oleks 86,8 protsenti. Praegu on tandem-päikeseelementidega saavutatud maksimaalne efektiivsus üle 43 protsendi, aga see tõhusus saavutatakse suurenenud keerukuse ja tootmismaksumuse arvelt. Praegu on nende kõrge hind piiranud nende kasutamist ainult eriülesanneteks, eriti kosmosetööstuses, kus tandem-päikeseelementide kõrge võimsuse ja kaalu suhe on vajalik. (Bagher *et al.*, 2015, lk 103)

2. PÄIKESEPANEELI TOOTLIKKUSE EKSPERIMENDID JA MÕOTMISED

Uurimistöö eesmärk oli võrrelda mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkust. Selleks ehitati 3D-prinditud trimaraan (kolme ühendatud kerega laev), millega testiti mobiilseid päikesepaneele Eesti kliimas. Selle uurimistöö uurimisküsimused, millele otsitakse vastust teoreetilise ja praktilise osa põhjal, on järgmised:

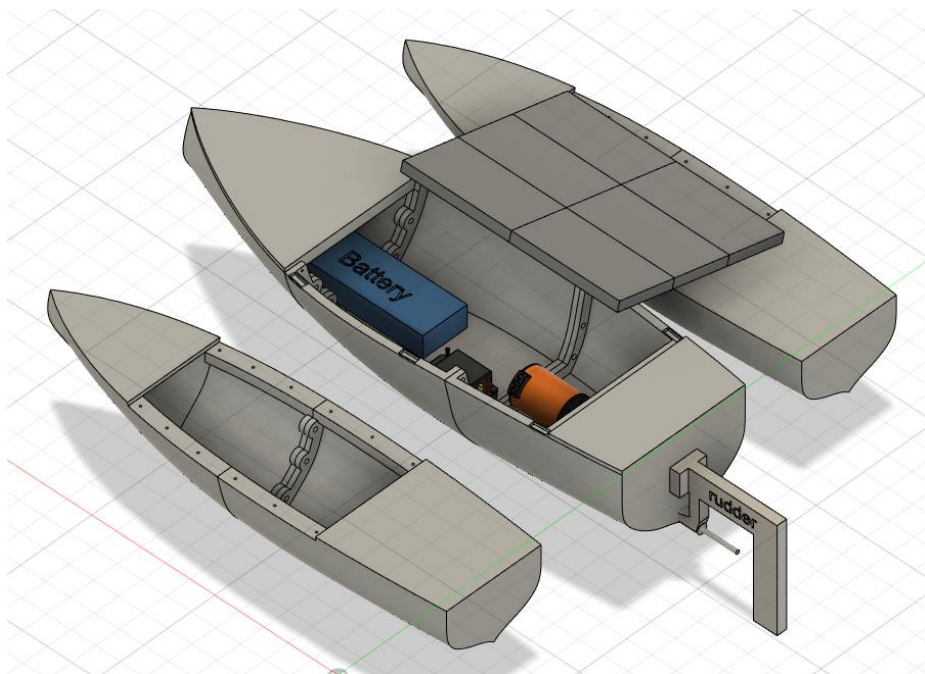
- millist tüüpi päikesepaneelid on kõige sobilikumad mobiilsetesse olukordadesse;
- kui palju muutub mobiilsete päikesepaneelide tootlikkus võrreldes statsionaarsete päikesepaneelidega;
- kuidas muutub mobiilsete päikesepaneelide investeringu tasuvusaeg võrreldes statsionaarsete päikesepaneelidega?

Mobiilsete päikesepaneelide mõõtmistulemuste graafikut võrreldakse samadel tingimustel statsionaarsete päikesepaneelide mõõtmistulemuste graafikuga ning lisaks võrreldakse mõlemat graafikut laboris tehistingimustel saadud päikesepaneeli karakteristikutega. Nende graafikute analüüsi põhjal vastati uurimisküsimustele ning jõuti järelduseni mobiilsete päikesepaneelide kasutatavusest Eesti kliimas.

2.1. Trimaraani disainimis-, ehitus- ja uurimisprotsess

Esimesele uurimisküsimusele vastatakse ainult teoreetilise osa põhjal, sest praktilises osas kasutati päikesepaneelide kalli hinna tõttu ainult üht tüüpi päikesepaneele. Päikesepaneelide testimiseks tehti kolm eksperimenti. Esimene tehti Tallinna Tehnikaülikooli laboris, kus mõõdeti päikesepaneeli parameetreid ning koostati päikesepaneeli voolu-pinge ja võimsuse-pinge graafikud. Joonisel 12 on näha esimese eksperimendi ülesehitust.

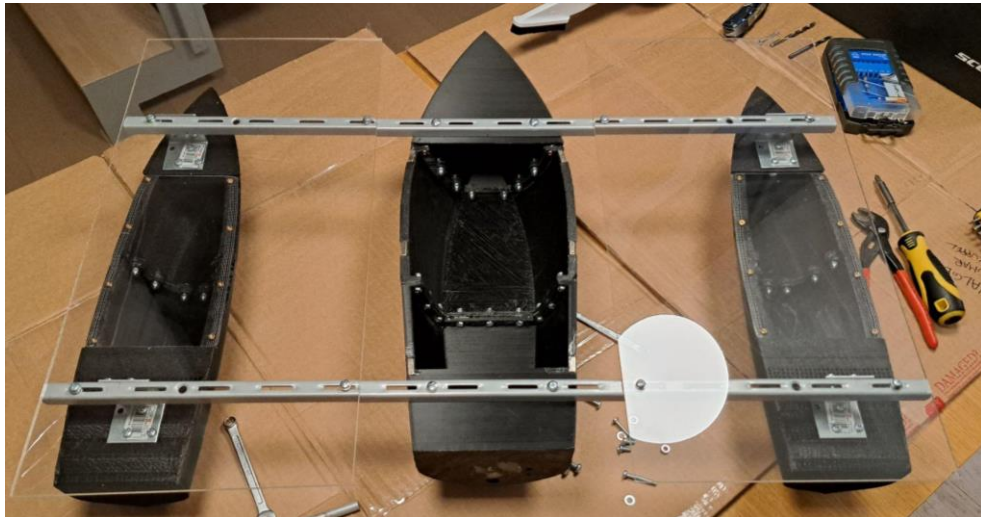
stabiilsed, sest neil on kolm toetuspunkti erinevalt ühe kerega laevast. Trimaraani disainimiseks kasutati vabavarana saadaval Fusion 360 (Autodesk) programmi. Programmi õppimiseks kasutati erinevaid YouTube'i laaditud Fusion 360 programmi õpetusvideoid. Trimaraani disainimisel kasutati inspiratsiooniks erinevaid päris trimaraane selleks, et saavutada õige kuju. Kõige rohkem kasutati inspiratsiooniks Grainger Designs TR36 Performance Cruising trimaraani (Grainger Designs), sest sellest olid internetis saadaval head joonised. Trimaraani disainimisel tehti ka mitu prototüüpi, mille põhjal muudeti ja parandati disaini. Lõplik disain, mis on uurimistöo autori omalooming, koosneb ühest suuremast peakerest ja kahest identsest väiksemast kerest, mis jäävad peapaadi külgedele. Peapaat on 50 cm pikk, 17 cm lai ja 13 cm sügav. Küljepaadid on 45 cm pikad, 11,5 cm laiad ning 12,5 cm sügavad. Trimaraani disaini Fusion 360 programmis on näha joonisel 10.



Joonis 10. Trimaraani disain Fusion 360 programmis (Foto: autori erakogu)

Trimaraan prinditi PLA plastist ja selle printimisel kulus umbes 2,5 kilogrammi plasti. Peapaat koosneb kolmest ja küljepaadid kahest osast, sest see oli maksimaalne suurus, mida sai 3D-printeriga printida. Osade ühendamiseks disainiti plastitüübid ja poldiaugud ning ühendamisel kasutati epoksiidliimi ning M4 polte, seibe ja lukustusmutreid. Pealmise osa katmiseks kasutati akrüülklaasi ning akrüülklaasi ja paadi vahele lisati ka veekindel tihend. Küljepaatidel kinnitati akrüülklaas lihtsalt kruvidega, aga peapaadil kinnitati akrüülklaas magnetitega selleks, et peapaadi sisemusse, kus asub kõik elektroonika, oleks kiire ligipääs. Magnetid kinnitati epoksiidliimiga peapaati disainitud aukudesse ja akrüülklaasile tihendite vahele. Paadid ühendati omavahel perforatsioonide ning nurgikutega. Trimaraani laius jäi 60,5 cm ja trimaraani kere kaal ilma elektroonika ning juhtimissüsteemita oli 3,6 kilogrammi. Küljepaadid

jäeti nurgikute abil pealmise pinna suhtes 3 cm võrra madalamale selleks, et paatide põhi oleks samal kõrgusel. Trimaraani ühendamisel kasutati M4 ning M5 polte, mutreid ja seibe. Paatide vahele kinnitati akrüülklaasid, kuhu peale pandi hiljem päikesepaneelid. Ühendatud trimaraani on näha joonisel 11. Pindala, kuhu sai kinnitada päikesepaneel, oli 2500 cm². Päikesepaneelid kinnitati kahepoolse teibiga. Keskmise trimaraani sees olev elektroonika pandi igaks juhuks ka sulguritega kilekottidesse ning enamik komponentidest kinnitati trimaraani kahepoolse teibiga.



Joonis 11. Prinditud ja ühendatud trimaraan (Foto: autori erakogu)

Päikesepaneelid, elektroonika ja trimaraani juhtimissüsteemi komponendid, mida ei olnud Tallinna Tehnikaülikooli laboris, osteti Saksamaa Amazonist ja Hobimaailmast. Tallinna Tehnikaülikoolist saadi servomootor ja juhtimispuul trimaraani raadioteel juhtimiseks. Ülejäänud komponentide valimiseks tehti arvutused YouTube'i video ja Radio Control Info kodulehe järgi. Alustati trimaraani vajaliku võimsuse arvutamisest, mille valem antakse kujul:

$$N = 4.279 \cdot (HL)^2 - 163.1 \cdot (HL) + 1901.5, \quad (4)$$

kus HL tähistab paadi kere pikkust tollides ja teised arvud on Rcexplained (YouTube) valemist etteantud konstandid. Trimaraani kere pikkus tollides oli ümardatult 20 tolli ja kui see asetada valemisse 4 saadakse vastuseks 351 vatti ehk hea võimsuse vahemik trimaraanile oleks 300–400 vatti. Selle põhjal leiti süsteemi voolutugevus, kui kasutatakse 7,4-voldist akut, mis tuleb valemist $I = \frac{N}{U}$. Süsteemi voolutugevuseks saadi 40–54 amprit. Vajalik mootori võimsus saadi valemist:

$$Nm = N \cdot 1,4, \quad (5)$$

kus 1,4 tähistab võimsusekonstanti, selleks et mootor ei peaks kogu aeg maksimumvõimsusel töötama. Kasutades valemit 5 saadi sobiliku mootori võimsuse vahemikuks 420–560 vatti.

Sarnaselt mootorile leiti ka kiiruse regulaatori (ingl *electronic speed controller* ehk ESC) sobilik voolutugevus, mis saadi valemist:

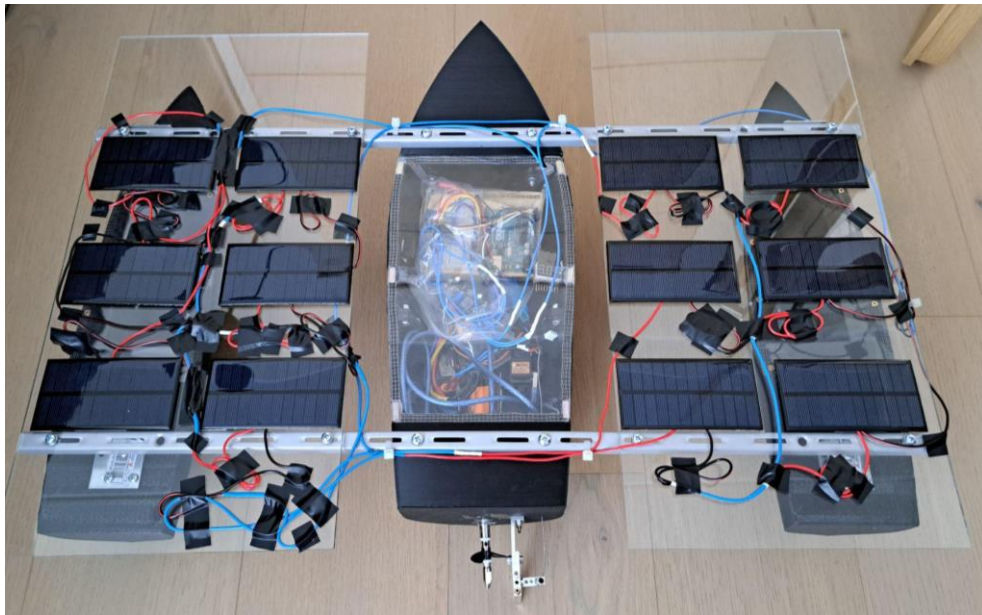
$$I_e = I \cdot 1,3, \quad (6)$$

kus 1,3 tähistab voolutugevusekonstanti, selleks et ESC ei peaks kogu aeg maksimumvõimsusel töötama. Kasutades valemit 6 saadi sobiliku kiiruse regulaatori voolutugevuse vahemikuks 52–70 amprit. Viimasena arvutati sobiliku propelleri diameeter, mille valem antakse kujul:

$$d = 11.452 \cdot N^{0.1787}, \quad (7)$$

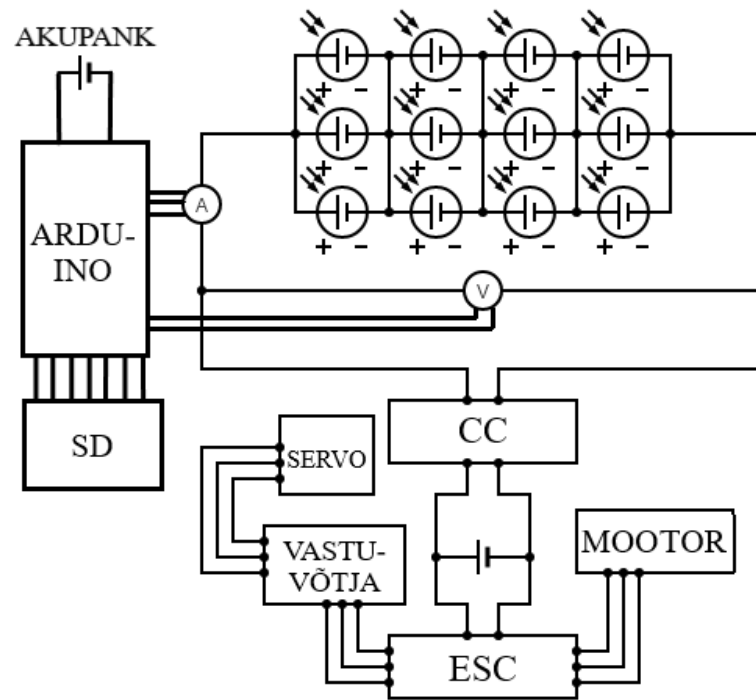
kus N tähistab trimaraani vajalikku võimsust ja teised arvud on RCexplained valemist etteantud konstandid. Üles ümardades saadi valemit 7 kasutades sobilikuks propelleri diameetriks 35 mm. Nende tulemuste põhjal hakati valima trimaraani juhtimissüsteemi komponente, milleks olid mootor, kiiruse regulaator, tüür, võll, propeller ja raadioside vastuvõtja. Valiti umbes 550-vatine mootor ja 60-amprine kiiruse regulaator. Tüür oli alumiiniumist ja seda juhiti servomootoriga. Alguses valiti ka eraldi alumiiniumist propeller, kuid see ei tulnud kohale ning seega kasutati võlliga kaasa tulnud plastmassist propellerit. Raadioside vastuvõtja valiti Tallinna Tehnikaülikoolis olemasoleva puldi järgi, sest kõik vastuvõtjad ei sobi kõigi saatjatega. Päikesepaneelide valimisel tehti palju võrdlusi erinevate paneelide vahel ning lõpuks jäädki kuuevoldise ning ühevattise päikesepaneeli juurde. See peaks teoorias suutma toota ühe vatti iga 66 cm² kohta. Päikesepaneeli osteti 12 tükki, need olid polükristallilisest ränist ja need ühendati 4S 8P ehk neli tükki jadamisi ning kaheksa tükki paralleelselt. Sellise konfiguratsiooni korral oleks päikesepaneelide maksimaalne teoreetiline pinge 24 volti, voolutugevus 1,3 amprit ja võimsus seega 31 vatti. Kuigi teoorias mahutaks trimaraan ära üle 30-ne sellise päikesepaneeli, jäädki päikesepaneelide kalli hinna tõttu 12-ne juurde, mis läks maksma 70 eurot. Tulevikus saab päikesepaneelide arvu maksimeerida ja uuesti uurida. Päikesepaneelide akuga ühendamiseks oli vaja ka laadimiskontrollerit ning selleks, et vältida LiPo aku ületühjenemist, kasutati akumonitori, millel käivitus alarm, kui aku hakkas liiga tühjaks saama. Laadimiskontroller ühendati aku ja päikesepaneelide vahele ning see kasutas MPPT (ingl *maximum power point tracking*) tehnoloogiat. MPPT algoritmi kasutatakse päikeseelemendist maksimaalse võimsuse kätte saamiseks, see paneb päikeseelemendid töötama kõige tõhusamal pingel ehk maksimaalvõimsuse punktis (Leonics). Kõik komponendid, mis ei olnud seotud Arduino mikrokontrolleriga, aga mida kasutati praktilises osas, on näha tabelis lisas 1. Selleks, et mõõta päikesepaneelide toodetud pinget ja voolutugevust trimaraaniga sõitmise ajal, kasutati Arduinot, pingeandurit, vooluandurit ja SD-kaardi moodulit. Pingeandur ühendati päikesepaneelidega rööbiti ja vooluandur jadamisi enne laadimiskontrollerit, sest laadimiskontrollerist tuleb välja konstantne pinge ja ei saaks koostada voolu-pinge graafikut. Arduinole anti voolu akupangast ja mõõtmiseks kirjutati Arduinole kood, mida on näha lisas 2.

Kood salvestas kõik tulemused SD-kaardile nii, et sellest sai pärast kõik andmed mugavalt Excelisse importida. Valmis trimaraani on näha joonisel 12.



Joonis 12. Valmis trimaraan (Foto: autori erakogu)

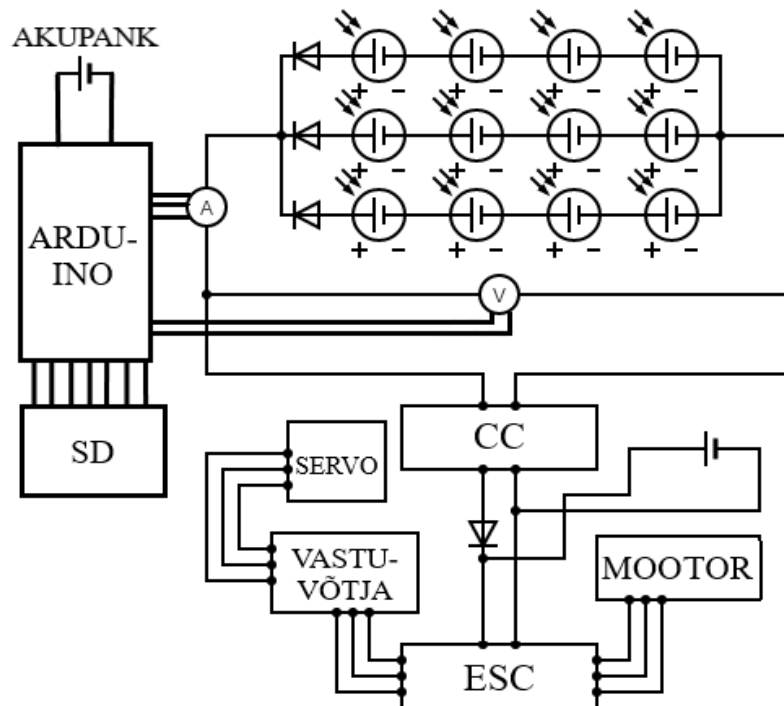
Hinnanguliselt võib pakkuda sellise praktilise töö kogumaksumuseks kuni 500 eurot. Selle konkreetse uurimistöö praktilise osa maksumus oli väiksem, sest osa komponente oli Tallinna Tehnikaülikoolil juba olemas. Ülejäänud komponentide eest tasus ka Tallinna Tehnikaülikool, kuna trimaraan koos kõigi komponentidega jäi peale uurimistöö valmimist neile. Kogu trimaraani elektroonika ühendusskeem on näha joonisel 13, kus üleval on näha päikesepaneelide ühendamist. Päikesepaneelid ühendati 4S 8P ehk neli tükki jadamisi ja kaheksa tükki rööbiti. Alguses ühendati päikesepaneelid valesti, mida on näha ka joonisel 13. Päikesepaneelidelt tuleb vasakult positiivne juhe ja paremalt negatiivne juhe, mis ühendati laadimiskontrollerisse, mis on joonisel tähistatud lühendiga CC.



Joonis 13. Esialgne elektroonika ühendusskeem

Päikesepaneelide ja laadimiskontrolleri vahele kinnitati rööbiti pingeaundur, mis on skeemil vultmeetri tähisega, ja jadamisi positiivsele juhtmele vooluandur, mis on skeemil tähistatud ampermeetri tähisega. Mõlemad andurid ühendati Arduino mikrokontrolleriga, mis ühendati ka SD kaardi mooduliga. Arduino kontrolleri sai voolu akupangast. Laadimiskontroller ühendati akuga ja aku ühendati XT90 ühendustega kiiruse regulaatoriga, mis on joonisel tähistatud lühendiga ESC. Kiiruse regulaator ühendati mootori ja raadioside vastuvõtjaga, mis oli ühenduses servomootoriga. Sellise ühendusskeemiga tekkis mõningaid probleeme. Esimene viga tehti raadioside vastuvõtja ühendamisel, kus anti sellele voolu nii akust kui ka kiiruse regulaatorist, mistõttu sai vastuvõtja ülepinge ja põles läbi. Telliti uus raadioside vastuvõtja ja enne ühendamist leiti internetis, et vastuvõtjal tähistatud BAT (ehk ingl *battery*) klemme polnudki tegelikult vaja kasutada ja vastuvõtjale piisas ainult kiiruse regulaatoriga ühendamisest. Järgmine probleem tekkis päikesepaneelide ja laadimiskontrolleriga, kus päikesepaneelid ei tootnud piisavat võimsust ja aku ei laadinud. Probleemi lahendamiseks muudeti päikesepaneelide ühendamisviisi, võeti vahelt ära rööpühendused ja koostati kolm neljast päikesepaneelist koosnevat jadaühendust ning ühendati need omavahel rööbiti. Lisaks pandi iga jadaühenduse algusesse diodid, et päikesepaneelid ei hakkaks üksteist laadima, vaid vool liiguks laadimiskontrollerisse. Uut päikesepaneelide ühendamisviisi koos diodidega on näha joonisel 14. Järgmisena avastati, et laadimiskontrolleris oli tekkinud lühis. See oli arvatavasti tekkinud vastassuunalise voolu tõttu ning diodi lisamise vajadusest aku ja laadimiskontrolleri vahele saadi teada alles uue ja parema laadimiskontrolleri manuaalst.

Parandatud päikesepaneelide ühendamisviisi, uue laadimiskontrolleri ja diodidega hakkas aku laadima.



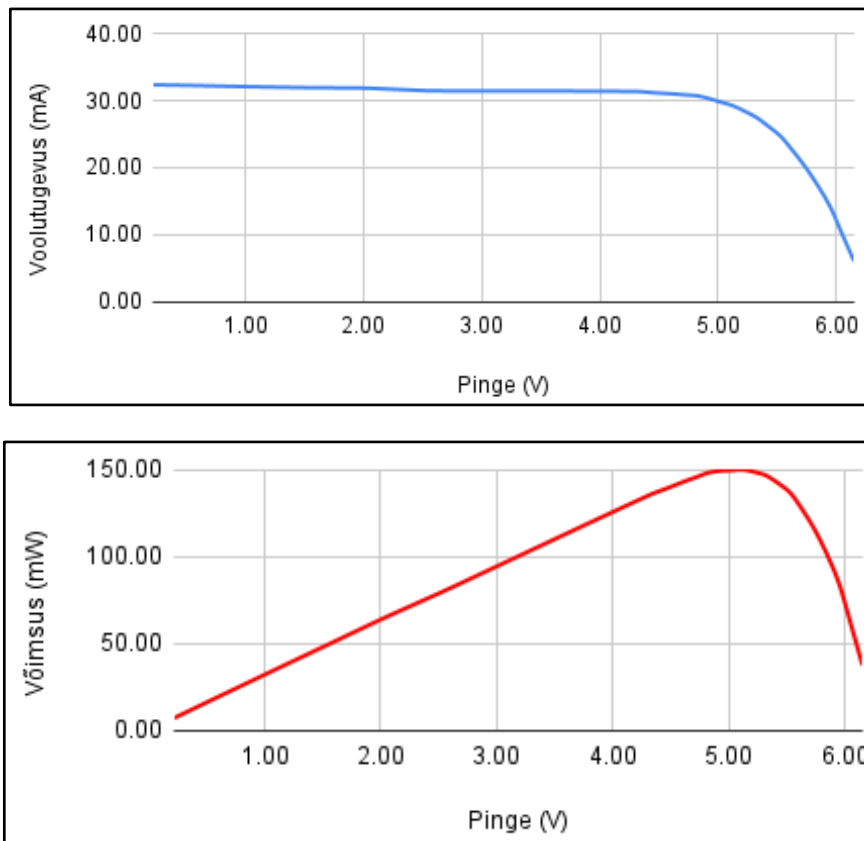
Joonis 14. Lõplik elektroonika ühendusskeem trimaraanil kasutamiseks

Viimane viga, mis tehti enne uue laadimiskontrolleri ostmist, oli seotud aku ühendamisega. Alguses ühendati algne laadimiskontroller rööbiti otse akuga ja aku ning kiiruse regulaator ühendati lahtikäiva XT90 ühendusega. Probleem tekkis sellega, et aku oli konstantselt ühenduses algse laadimiskontrolleriga ja diodi puudumise tõttu käitus laadimiskontroller tarbijana. Selle tagajärjel aku liigtühjenes ehk langes alla kindla pinge, mis kahjustas akut jäädavalt ja muutis selle kasutuskõlbmatuks, mistõttu tuli osta uus aku. Viga parandati laadimiskontrolleri kiiruse regulaatoriga rööbiti ühendamisega, mida on näha joonisel 14, kus XT90 ühendus jäi aku ning laadimiskontrolleri ja kiiruse regulaatori vahele. See tähendas, et aku oli süsteemiga ühenduses ainult kasutamise või laadimise ajal. Joonisel 14 toodud skeemiga toimis kõik väga hästi ja alustati päikesepaneelide testimisega. Mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide võrdlemiseks tehti neli mõõtmist, millest esimesed kolm tehti maapinnal ja viimane Pirita jõel. Selleks et simuleerida maa peal paadi liikumist, kinnitati trimaraan rula külge ja sõidutati rula nõori abil muru sees ringi. Maapinnal tehti kaks statsionaarset katset, üks viieminutiline ja teine 15-minutiline, ning üks mobiilne katse, mis kestis samuti 15 minutit. Pirita jõel toimunud katse kestis ka umbes 15 minutit, kuid trimaraan ei sõitnud vee peal ringi kogu katse ulatuses, sest seda pidi vahepeal veest välja võtma ja kontrollima, aga katse kestis piisavalt kaua selleks, et tulemused oleksid usaldusväärsed.

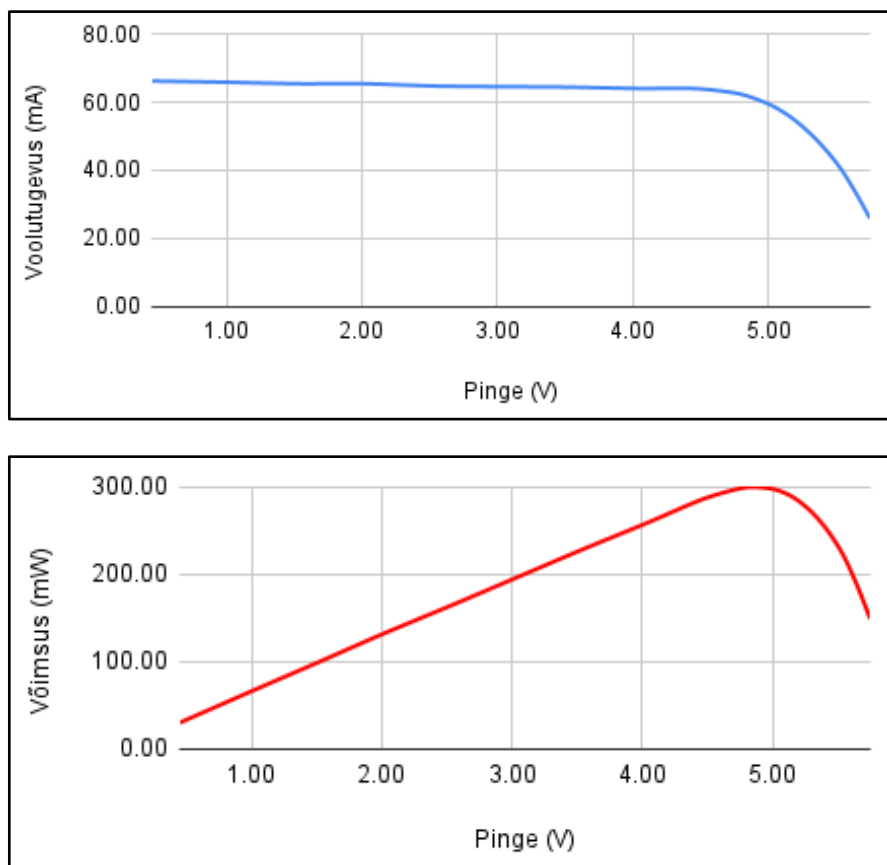
2.2. Tulemused, analüüs ja järeldused

Esimesele uurimisküsimusele, milleks oli: millist tüüpi päikesepaneelid on mobiilsetesse olukordadesse kõige sobilikumad, vastatakse ainult teoreetilise osa põhjal päikesepaneelide kalli hinna tõttu. Peatüki 1.2 põhjal tuldi järeldusele, et üksi päikeseelementi tüüp ei ole mobiilsetesse olukordadesse otseselt parem kui teine, vaid olulised on omadused, mida on mobiilsetes olukordades tavapäraselt vaja. Need on näiteks kerge kaal, ruumitõhusus ehk efektiivsus ja vajadusel ka painduvusvõime. Kui päikeseelementide valimisel hinda mitte arvestada, siis teoreetiliselt oleks parim valik kolmanda generatsiooni tandempäikeseelementid, sest need on kõige efektiivsemad. Paraku kaasnevad suure efektiivsusega kallid hinnad, mistõttu on need praegu kasutusel peamiselt erijuhtudel, näiteks kosmoses. Kui päikeseelementide valikul arvestada ka hinda, siis parim valik oleks esimese ja teise generatsiooni päikeseelementide kombinatsioon. See sisaldaks võimalikult suure lapiku pinna katmist monokristalliliste päikeseelementidega ja selleks, et maksimeerida kogu mobiilse keha pinna kasutus, tuleks katta ülejäänud kohad, mis vajavad painduvust, õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga (CIGS) päikeseelementidega, kuid ka sellise lahenduse hind on pigem kallis. Parimaks hinna-efektiivsuse suhteks tuleks monokristallilised päikeseelementid asendada polükristalliliste päikeseelementidega ja õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga (CIGS) päikeseelementid tuleks asendada õhukese kaadmium-telluur kihiga (CdTe) päikeseelementidega. Selline lahendus saavutaks küll natukene väiksema efektiivsuse kui eelmine lahendus, aga oleks see-eest palju soodsam.

Tallinna Tehnikaülikoolis tehti kaks päikesepaneeli parameetrite mõõtmist. Esimesel mõõtmisel näitas multimeeter valguse intensiivsuseks enne referentspaneeli tootja antud teguriga läbi korrutamist pinget 5,5 millivolti ja teisel mõõtmisel 9,2 millivolti. Antud referentspaneel pidi päikesevalguse intensiivsuseks näitama heades tingimustes pinget umbes 30 millivolti, mis seletab päikesepaneeli madalat voolutugevust ja seega ka võimsust. Mõõtmistulemuste põhjal koostatud graafikuid on joonistel 15 ja 16.



Joonis 15. Esimese katse voolu-pinge (ülemine paneel) ja võimsuse-pinge (alumine paneel) graafikud valguse intensiivsusel 5,5 mV



Joonis 16. Teise katse voolu-pinge (ülemine paneel) ja võimsuse-pinge (alumine paneel) graafikud valguse intensiivsusel 9,2 mV

Praktilises osas kasutatud päikesepaneelid pidid kirjelduse järgi suutma toota ühe vati. Kui esimese katse maksimaalne võimsus 5,5 millivoldise valguse intensiivsuse korral teisendada päikesevalguse intensiivsuseks ehk 30 millivoldiks, siis tuleb vastuseks ümardatult 818 millivatti. Kui sama teha ka teise katsega, tuleb vastuseks ümardatult 976 millivatti. Kahe katse tulemuste vahe võis tulla maksimaalvõimsuse punkti (MPP) asukoha erinevusest. Esimesel katsel asus maksimaalvõimsuse punkt pingel 5,12 voldi juures (joonis 15), aga teisel katsel asus maksimaalvõimsuse punkt pingel 4,81 voldi juures (joonis 16). Saadud parameetrite põhjal peaks joonisel 14 näha olev päikesepaneelide ühendus koos diodidega, mis vähendavad pinget 1,5 voldi võrra, maksimaalne võimsus olema 10,8 vatti. Sellele võimsusele trimaraanil tehtud katsed lähedale ei jõudnud. Selle põhjusteks olid nurga erinevus paneelide ja valgusallika vahel, katse kuupäeval arvatavasti ei olnud päikesevalguse intensiivsus 30 millivolti ning see, et Tallinna Tehnikaülikoolis ei katsetatud kõiki päikesepaneele, vaid ainult kahte. Laboris tehtud katsetel oli päikesepaneeli ja valgusallika vaheline nurk täpselt 90 kraadi, aga trimaraanil tehtud katsetel olid päikesepaneelid paralleelselt maapinnaga ja nurk sõltuv päikese kõrgusest ehk päikesepaneelide efektiivsus oli seetõttu palju väiksem. Lisaks toimus katse 23. aprillil ning päikesevalguse intensiivsus oli siis kindlasti madalam kui 30 millivolti. Kõigi päikesepaneelide katsetamine oleks olnud ka oluline, sest kui päikesepaneelid on omavahel ühendatud süsteemi ja üks paneelidest toodab madalamat võimsust kui teised, siis toodab kogu päikesepaneelide süsteem võimsust vastavalt sellele paneelile, mis toodab kõige vähem. Trimaraanil tehtud katsete väiksem võimsus võrreldes laboris tehtud testidega ei mõjutanud praktilise osa katse tulemust, sest oluline oli statsionaarsete ja mobiilsete päikesepaneelide võrdlus samades tingimustes ning varem nimetatud madalama võimsuse põhjustajad püsisid konstantsena. Statsionaarselt tehti kaks katset: üks viieminutiline ja üks 15-minutiline. Nende katsete mõõtmistulemusi on näha lisades 3 ja 4. Mõõdeti päikesepaneelide toodetud pinget ja voolutugevust ning selle põhjal arvutati ka võimsus. Graafikud koostati sõltuvalt ajast, milleks kasutati Arduino mikrokontrollerile kirjutatud koodi, mis pani selle andmeid mõõtma iga sekundi tagant. Katses ei olnud see sada protsenti täpne, vahepeal mõõtis Arduino kiiremini ja vahepeal aeglasemalt, aga see konstant, üks mõõtmine ühes sekundis, võeti kasutusele graafiku koostamisel. Kõikidel katsetel kasutati täpseks aja mõõtmiseks kella. Katse tehti 23. aprillil ja sellel päeval oli ilm pilvitu ja päikesepaisteline. Maapinnal tehtud katsed kestsid 13.41–14.38 koos pausidega, et katsed üles seada ja Pirita jõel tehtud katse kestis 16.05–16.20.

Mõlemal maapinnal tehtud statsionaarsel katse puhul on lisades 3 ja 4 toodud graafikutel näha, et pingel püsis väga konstantsena ja ainult voolutugevus vahepeal muutus, mistõttu võimsuse ja voolutugevuse graafikud näevad peaaegu identsed välja. 15-minutilisel statsionaarsel katsel määrati ära ka aku laetustase enne ja pärast katset. Kasutati 4100 milliamprist akut. Katse algas kell 14.23, kui aku laetustase oli 7,76 volti, ja lõppes kell 14.38, kui aku laetustase oli

7,78 volti. 15-minutilise statsionaarse katse keskmine voolutugevus oli 0,25 amprit ja keskmine võimsus oli 2,15 vatti. Selle voolutugevusega võtaks täiesti tühja aku täis laadimine aega 17,3 tundi. Viie-minutilise statsionaarse katse keskmine voolutugevus oli 0,29 amprit ning selle voolutugevusega võtaks laadimine aega 14,9 tundi. Mobiilne katse maapinnal tehti kahe statsionaarse katse vahel ja ilmastikutingimused muutusid katsete ajal minimaalselt. Mobiilse katse andmete põhjal koostatud graafikuid on näha lisa 5 ja Pirita jõel tehtud katse graafikuid on näha lisa 6. Maapinnal tehtud 15-minutilist mobiilset katse alustati kell 14.00, kui aku laetustase oli 7,72 volti, ja test lõpetati kell 14.15, kui aku laetustase oli 7,75 volti. Maapinnal tehtud mobiilse katse graafikutest (lisa 5) on näha, et võrreldes statsionaarsete testidega kõikus pinge rohkem, aga püsis enam-vähem konstantsena, kuid voolutugevus kõikus väga palju, mistõttu ka võimsuse joon graafikul kõigub väga palju. Voolutugevuse kõikumise põhjuseks võis olla paneelide ja päikese vahelise nurga konstante muutumine paadi vänderdava liikumise tõttu, mis imiteeris paadi liikumist lainetes aga võimalik, et ka selle liikumise kiiruse ja suuna tõttu. Maapinnal tehtud 15-minutilise mobiilse katse keskmine voolutugevus oli 0,21 amprit, mille korral võtaks tühja 4100 milliampertunnise aku laadimine aega 20,6 tundi, ja keskmine võimsus oli 1,79 vatti. See oli 17 protsenti madalam 15-minutilise statsionaarse katse ja 27 protsenti madalam viie-minutilise statsionaarse katse keskmisest võimsusest. Mobiilne katse Pirita jõel, mida on näha joonisel 17, kestis 16.05–16.20. Pirita jõel tehtud katse oli edukas, aga katse lõpuks hakkasid küljepaadid ikkagi veega täituma ning tõenäoliselt hakkas veega täituma ka peapaadi alumine korrus, mida pole näha, mistõttu trimaraan läks üpris raskeks ja selle raskuskese vajuks ka liiga ette. Need probleemid saab tulevikus kergelt ära parandada trimaraani veekindlaks tegemisega. Katse ajaks kinnitati trimaraani külge nõor, mis pandi sinna hädaolukorral trimaraani veest välja tõmbamiseks. Nõor kuidagi mõõtmist ei seganud.



Joonis 17. Mobiilsete päikesepaneelide test trimaraanil Pirita jõel (Foto: autori erakogu)

Pirita jõel tehtud mobiilse katse graafikutes on näha suuri kõikumisi nii pinges kui ka voolutugevuses. Pinge muutus 25-voldiseks, siis kui päikesepaneelid olid mingil põhjusel süsteemist lahti ühendatud. Ehk päikesepaneelid sellel hetkel ei laadinud akut ega andnud voolu juhtimissüsteemile. Voolutugevuse suur kõikumine oli jällegi põhjustatud päikese ja paneelide vahelise nurga konstantsest muutumisest. Lisaks oli voolutugevus palju madalam, kui kõigil teistel katsetel. Selle põhjus võis olla erinev kellaaeg ja mootori järsust pidurdamisest tulenev vastuvool, mille tõttu on graafikul näha ka negatiivset voolutugevust. Järelduste tegemisel keskendun peamiselt maapinnal tehtud katsetele, sest need katsed erinesid üksteisest vähem, tulemused on uuritud tingimustes usaldusväärsemad. Veekogul tehtud mobiilset katset tuleb korrata, et kindlaid järeldusi teha. Pirita jõel tehtud 15-minutilise mobiilse katse keskmine voolutugevus oli 0,05 amprit, mille korral võtaks tühja 4100 milliamperitunnise aku täis laadimine aega 86,3 tundi, ja keskmine võimsus oli 0,6 vatti. Hiljem avastati, et vooluandur, mida selles uurimistöös praktilises osas kasutati, on tundlik liigutamisele. See tähendab, et kui süsteemis voolu ei ole ja vooluandurit liigutada, näitab vooluandur liigutamisele vastavalt muutust voolutugevuses, mis suurendas mõlema mobiilse katse mõõtemääramatust ja muutis katsete tulemused palju ebatäpsemaks. Saadud andmeid tuleks korduskatsetega kontrollida, et kinnitada katsetes nähtud tulemusi.

Töö üldine järeldus on, millele viitavad saadud esialgsed tulemused, et statsionaarsed päikesepaneelid on efektiivsemad ja mobiilses olukorras, eriti veel sõitmise ajal, toodavad päikesepaneelid üsna vähe võimsust. Kui võrrelda maapinnal tehtud mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide katseid, sest nende katsete mõõtemääramatused on madalaimad, siis mobiilsete päikesepaneelide tasuvusaeg on kolmandiku võrra suurem statsionaarsete päikesepaneelide tasuvusajast. Pirita jõel tehtud katsel oli keskmine voolutugevus viis korda madalam ning keskmine võimsus oli kolm ja pool korda madalam kui statsionaarsel testil. Katsete tulemuste põhjal oleks targem kasutada päikesepaneeli aku täis laadimiseks enne sõitu, mitte sõiduaegse energiaallikana. Hüpotees, millele otsiti tõestust, oli: mobiilsete päikesepaneelide tootlikkus on madalam kui statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkus. Hüpotees püstitati eeldusel, et mobiilsetele päikesepaneelidele langev päikesevalguse kogus ei ole sama konstantne kui päikesevalguse kogus, mis langeb statsionaarsetele päikesepaneelidele. Katsetest tuli välja, et hüpotees oli korrektne ja ka hüpoteesi püstitamisel kasutatud mõtteviis oli õige, kuid täpsem põhjendus oleks, et ei muutu mitte päikesepaneelidele langev päikesevalguse kogus, vaid päikesepaneelide ja päikesevalguse vaheline nurk, mis madaldab päikesepaneelide efektiivsust. Antud uurimistöös praktilise osa katsete mõõtemääramatused olid suured, mistõttu oleks vajalik teha edasisi katseid ja mõõtmisi. Edasine uurimine võiks alata kohe ja esimesena tuleks välja vahetada vooluandur, mis ei oleks tundlik liigutamisele. Veel peaks ära mõõtma eraldi kõigi päikesepaneelide karakteristikud ja parameetrid, et hinnata päikesepaneelidelt oodatavat võimsust täpsemalt. Lisaks tuleks teha rohkem mõõtmisi erinevatel päevadel ja kellaaegadel,

et mõõtmistulemused oleksid täpsemad, ning ka trimaraaniga veekogul tehtud mobiilsetel katsetel tuleks teha statsionaarsed testid samas kohas ja võimalikult samasugustes tingimustes. Enne veekogul katsetamist tuleks muuta trimaraan ka veekindlamaks, et trimaraani uppumisoht ei segaks katseid.

KOKKUVÕTE

Esimene päikesepaneel leiutati juba eelmise sajandi keskel, kuid need on alles viimaste aastatega muutunud konkurentsivõimeliseks teiste energiatootmise liikidega. Prognooside järgi peaks päikesepaneelide toodetud elektri kogus aastaks 2030 võrreldes aastaga 2015, kui sõlmiti Pariisi kliimakokkulepe, seitsmekordistuma. Päikesepaneelide tulevikupotentsiaal energiavaldkonnas on tohutu, mistõttu on nende edasine uurimine väga oluline. Päikesepaneelide hinna langus ja efektiivsuse tõus muudab neid populaarsemaks erinevates valdkondades ning just mobiilsete päikesepaneelide kasutus suureneb lähitulevikus eksponentsiaalselt. Kuigi mobiilseid päikesepaneele kasutatakse juba palju, pole nende efektiivsust palju uuritud ega võrreldud statsionaarsete päikesepaneelidega. Senised uuringud pole toimunud Eestiga sarnases kliimas, mistõttu on antud uurimistöo eriti oluline.

Käesoleva uurimistöo eesmärk oli võrrelda mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkust. Selleks ehitati trimaraan, millega katsetati mobiilseid päikesepaneele Eesti kliimas.

Esimene uurimisküsimuse vastuseks leiti, et kirjanduse alusel ei ole ükski päikeseelemendi tüüp mobiilsetes olukordades kasutamiseks oluliselt parem kui teine. Olulised olid omadused, mida on tavaliselt mobiilsetes olukordades vaja, mis on näiteks suur efektiivsus ehk ruumitõhusus, kerge kaal ja vajadusel painduvusvõime. Teoreetiliselt, kui hinda mitte arvesse võtta, oli parim valik kolmanda generatsiooni tandem-päikeseelemendid, sest neil oli kõrgeim päikesevalguse kasutamise efektiivsus. Parim päikesepaneelide valik, kui arvestada ka hinda, oli esimese ja teise generatsiooni päikeseelementide kombinatsioon, mis sisaldas võimalikult suure lapiku pinna katmist esimese generatsiooni päikeseelementidega ja ülejäänud kohtade, mis vajasisid painduvust, katmist teise generatsiooni päikeseelementidega. Kõige suurem efektiivsus on saavutatav sellise lahenduse korral monokristalliliste ja õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga päikeseelementidega. Kõige parem hinna-efektiivsuse suhe saavutatakse polükristalliliste ja õhukese kaadmium-telluur kihiga päikeseelementidega.

Teisele uurimisküsimusele leiti vastuseks, et mobiilsete päikesepaneelide tootlikkus oli madalam. Maapinnal tehtud 15-minutilises katses oli mobiilsete päikesepaneelide keskmine võimsus 17% madalam kui statsionaarsete päikesepaneelide keskmine võimsus. Kui võrrelda maapinnal tehtud 15-minutilise mobiilse katse keskmist võimsust viieminutilise statsionaarse katse keskmise võimsusega, siis mobiilsete päikesepaneelide keskmine võimsus oli 27% madalam statsionaarsete päikesepaneelide keskmisest võimsusest. Pirita jõel tehtud mobiilsete päikesepaneelide katse keskmine võimsus moodustas maapinnal tehtud statsionaarsete päikesepaneelide keskmisest võimsusest vähem kui kolmandiku, kuid nende katsete omavahelise võrdluse tulemused ei ole ilmselt paikapidavad, sest katsetel esineb liiga palju muutuvaid tegureid, mistõttu on nende võrdlemisel mõõtemääramatus väga suur.

Kolmanda uurimisküsimuse vastuseks leiti, et maapinnal tehtud mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide katsetel oli mobiilsete päikesepaneelide tasuvusaeg kolmandiku võrra suurem kui statsionaarsete päikesepaneelide tasuvusaeg. Maapinnal tehtud katsete tulemused olid ühtlasemad, sest nende katsete mõõtemääramatused olid madalamad. Piritajõel tehtud katsel oli mobiilsete päikesepaneelide katse peaaegu kuus korda suurem kui maapinnal tehtud viieminutilise statsionaarse testi tasuvusaeg. Nende katsete põhjal on mobiilsete päikesepaneelide tasuvusaeg nende kahe tulemuse vahel, kuid täpsemaks vastuseks on vaja teha korduskatseid.

Hüpoteesis väideti, et mobiilsete päikesepaneelide tootlikkus on madalam kui statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkus ning see leidis kinnitust. Hüpoteesi püstitamisel kasutatud mõtteviis oli õige, kuid katsetest tuli välja hüpoteesi täpsem põhjendus. Madalam tootlikkus tuli päikesepaneelide ja päikesevalguse vahelise nurga pidevast muutumisest, mitte päikesepaneelidele langeva päikesevalguse väiksemast kogusest.

Usaldusväärsemateks tulemusteks oleks vaja teha rohkem katseid ja mõõtmisi. Esimese asjana tuleks välja vahetada vooluandur, mis ei oleks tundlik liigutamisele. Lisaks peaks eraldi ära mõõtma kõigi katsetes kasutuses olevate päikesepaneelide karakteristikud ja parameetrid, et täpsemalt hinnata päikesepaneelidelt oodatavat võimsust. Kõige olulisem oleks teha rohkem mõõtmisi erinevates tingimustes ning minimeerida muutuvate tegurite hulk ja mõõtemääramatused võrreldavate katsete vahel.

RESÜMEE

Mobiilsed päikesepaneelid Eesti kliimas 3D-prinditud trimaraani näitel

Päikesepaneelide efektiivsuse ja hinna paranemine on muutnud neid populaarsemaks erinevates valdkondades ning just mobiilsete päikesepaneelide kasutus suureneb tulevikus eksponentsiaalselt. Kuigi mobiilsed päikesepaneelid on juba laias kasutuses, pole nende efektiivsust palju uuritud ega statsionaarsete päikesepaneelidega võrreldud ning need vähesed uuringud, mis on tehtud, pole aset leidnud Eestiga sarnases kliimas. Käesoleva uurimistöoga soovis autor võrrelda mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkust Eesti kliimas, milleks ehitati 3D-prinditud trimaraan, millel katsetati mobiilseid päikesepaneele.

Uurimistöö koosneb kahest osast. Esimeses osas kirjeldati päikesepaneelide tööpõhimõtet ning nende erinevaid tüüpe. Teises peatükis käsitleti praktilises osas kasutatavaid komponente ning korraldati mobiilsete ja statsionaarsete päikesepaneelide tootlikkuse eksperimendid ja mõõtmised. Lisaks analüüsiti ja võrreldi praktilise osa tulemusi, mille põhjal vastati uurimisküsimustele ja kontrolliti hüpoteesi.

Teoreetilise osa põhjal leiti, et ükski päikeseelementi tüüp ei ole mobiilsetesse olukordadesse otseselt parem kui teine, vaid olulised olid omadused, mida on tavapäraselt mobiilsetes olukordades vaja. Selgus, et kui hinda ka arvestada, siis suurim efektiivsus saavutati monokristalliliste ja õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga päikeseelementide kombinatsiooniga ja parim hinna-efektiivsuse suhe saavutati polükristalliliste ja õhukese kaadmium-telluur kihiga päikeseelementide kombinatsiooniga. Praktilise osa põhjal jõuti järelduseni, et statsionaarsed päikesepaneelid on palju efektiivsemad ja mobiilsetes olukordades, eriti veel sõitmise ajal, toodavad päikesepaneelid üpris vähe võimsust. Katsete tulemused viitasid sellele, et targem oleks päikesepaneele kasutada aku täislaadimiseks enne sõitu, mitte sõidu ajal. Katsetest tuli välja, et hüpotees oli korrektne, kuid täpsustati hüpoteesi püstitamisel kasutatud mõtteviisi. Avastati, et madalam tootlikkus tuli hoopis päikesepaneelide ja päikesevalguse vahelise nurga konstantsest muutumisest, mitte väiksemast päikesepaneelidele langevast päikesevalguse kogusest.

ABSTRACT

Mobile Solar Panels in the Estonian Climate: A Case Study using a 3D-Printed Trimaran as an Example Vehicle

Solar panels have become increasingly popular due to their improved efficiency and lower prices. The use of mobile solar panels is expected to grow exponentially in the future. However, the efficiency of mobile solar panels in comparison to stationary ones, especially in climates like Estonia, has not been extensively studied. This research paper aims to compare the productivity of mobile and stationary solar panels in the Estonian climate using a 3D-printed trimaran on which the mobile solar panels were tested.

The research paper consists of two parts. The first part describes the working principle of solar panels and their different types. The second chapter focuses on the components used in the practical part of the research and includes experiments and measurements of the productivity of mobile and stationary solar panels. The results of the practical part were compared and analyzed to answer the research questions and test the hypothesis.

Based on the theoretical part, it was found that no specific type of solar cell is inherently better than others for mobile applications. Instead, the important factors were the characteristics typically required in mobile situations. It was found that when also taking price into account, the highest efficiency was achieved with a combination of monocrystalline and thin-film copper-indium-gallium-selenide solar cells, while the best cost-effectiveness ratio was achieved with a combination of polycrystalline and thin-film cadmium-telluride solar cells. Based on the practical part of the research paper, it was concluded that stationary solar panels are more efficient and in mobile situations, especially while driving, solar panels generate relatively little power. The results of the experiments indicated that it would be wiser to use solar panels for charging the battery before driving rather than relying on them as a source of energy during the journey. The experiments revealed that the hypothesis was correct but further clarified the reasoning behind it. It was discovered that the lower productivity was actually due to the constant change in the angle between the solar panels and the sunlight, rather than a decrease in the amount of sunlight reaching the solar panels.

KASUTATUD MATERJALID

Alternative Energy Tutorials. Solar Cell I-V Characteristics. Kättesaadav:

<https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>
(07.01.2023).

Autodesk. Fusion 360. Kättesaadav: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (18.06.2022).

Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., Mohsen, M. 2015. Types of Solar Cells and Application [uurimistöö]. Kättesaadav:

https://www.researchgate.net/publication/281148723_Types_of_Solar_Cells_and_Application
n 29.09.2022.

Brilliant. Solar energy. Kättesaadav: <https://brilliant.org/courses/renewable-energy/pv-working-principle-2/> (03.01.2023).

Britannica. Diode. Kättesaadav: <https://www.britannica.com/technology/diode> (02.01.2023).

Böer, K. W. Solar cells. Kättesaadav: <http://www.chemistryexplained.com/Ru-Sp/Solar-Cells.html> (02.01.2023).

Chodos, A., Ouellette, J. 2005. Einstein and the photoelectric effect. Kättesaadav: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200501/history.cfm> (12.11.2022).

Eesti Entsüklopeedia nr 7 (EE 7) NÕUK-RAH 1994. Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus.

Electrotopic. What is the difference between photodiode and solar cell. Kättesaadav: <https://electrotopic.com/what-is-the-difference-between-photodiode-and-solar-cell/>
(02.01.2023).

Füüsikaleksikon a. Pauli printsiip. Kättesaadav: <https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/kvantteooria-alused/pauli-printsiip/> (03.01.2023).

Füüsikaleksikon c. P-pooljuhid. Kättesaadav: <https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/ainete-elektrijuhtivus/p-pooljuhid/> (13.11.2022).

Füüsikaleksikon b. Energiatsoonid. Kättesaadav: <https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/ainete-elektrijuhtivus/energiatsoonid/> (04.01.2023).

Füüsikaleksikon d. N-pooljuhid. Kättesaadav: <https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/ainete-elektrijuhtivus/n-pooljuhid/> (13.11.2022).

Grainger Designs. TR36 Trimaran. Kättesaadav: <https://www.graingerdesigns.net/custom-and-racing-multihulls/tr36-trimaran/> (26.06.2022).

Greenmatch. 7 Different Types of Solar Panels Explained. Kättesaadav: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels> (25.10.2022).

Khan Academy. Semiconductors. Kättesaadav: <https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/in-in-semiconductors> (14.11.2022).

Leonics. Basics of MPPT Solar Charge Controller. Kättesaadav: https://www.leonics.com/support/article2_14j/articles2_14j_en.php (22.03.2023).

LibreTexts Engineering a. Photovoltaic effect. Kättesaadav: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Solar_Basics/A._Introductory_Physics_for_Solar_Application/I._Atoms_and_Materials/2._Photovoltaic_Effect](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Solar_Basics/A._Introductory_Physics_for_Solar_Application/I._Atoms_and_Materials/2._Photovoltaic_Effect) (13.11.2022).

LibreTexts Engineering b. Fermi level. Kättesaadav: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Semiconductors/Fermi_level](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Semiconductors/Fermi_level) (04.01.2023).

Luque, A., Hegedus, S. 2011. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd Edition. Kättesaadav: <http://ee.sharif.edu/~sarvari/25798/solarcell-ch3.pdf> (12.11.2022).

Löper, M. 2020. Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes [magistritöö]. Kättesaadav: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/19b8b767-198e-4e4c-a4a4-45b735884032> (07.01.2023).

Pastuszak, J., Węgierek, P. 2022. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development [uurimistöö]. Kättesaadav: https://www.researchgate.net/publication/362696068_Photovoltaiic_Cell_Generations_and_Current_Research_Directions_for_Their_Development (07.01.2023).

Radio Control Info. RC Boat Calculator. Kättesaadav: <https://www.radiocontrolinfo.com/information/rc-calculators/rc-boat-calculator/> (21.07.2022).

Reemann, M. 2015. Energia. Kättesaadav: <https://opik.fyysika.ee/index.php/book/view/40#/section/4197> (14.11.2022).

Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Swaaij, R., Zeman, M. 2016. Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. Cambridge: UIT Cambridge Ltd, lk 62–66.

TaskuTark a. Elektrivool pooljuhtides. Kättesaadav: <https://www.taskutark.ee/elektrivool-pooljuhtides/> (02.01.2023).

TaskuTark b. Fotodiod. Kättesaadav: <https://www.taskutark.ee/fotodiod/> (03.01.2023).

Vikipeedia 2016. Perovskiiit. Kättesaadav: https://et.wikipedia.org/wiki/Perovskiiit#cite_note-Min-2 (11.03.2023).

Vikipeedia 2020. Tsooniteooria. Kättesaadav: <https://et.wikipedia.org/wiki/Tsooniteooria> (04.01.2023).

YouTube. Selecting a Brushless Motor, ESC, LiPo Battery and Prop for an RC Boat.

Kättesaadav: <https://www.youtube.com/watch?v=2tuvoAfPMYU> (21.07.2022).

LISA 1. Praktilise osa komponentide tabel

Nimetus	Nimi	Arv	Hind
Päikesepaneelid	Edit DC 6V 1W 3pcs Epoxy Solar Panel Board DIY Battery Charger Kit with 30cm Cable for Solar Lawn Lights Solar Phone Chargers Size 110x60mm	4	69.60€
Aku	2S/7.4V LRP Antix 4100mah - 50C LiPo Hardcase - XT90	1	39.90€
Mootor ja esc	Keenso RC Brushless ESC, Waterproof 3650 4300KV Brushless Motor 60A ESC Programming Card Combo Set for 1/8 1/10 RC Car	1	67.35€
RC vastuvõtja	AR620 DSMX 6-Channel Sports Receiver	1	55.49€
Tüür	Fenteer Aluminium Alloy 95 mm RC Boat Rudder Boat Truder with Water Absorption, Silver	1	11.09€
Võll	SM SunnikMix Technical RC boat shafts with universal joint drive shaft for spare parts accessories, 10 x 5 cm, 4.0 mm	1	10.89€
Laadimiskontroller	MOUMOUTEN Charging module battery, 5 A charging module MPPT step down constant voltage constant current CV solar panel controller with charging indicator function module solar panel	1	10.49€
Aku monitor alarm	DollaTek 2PCS RC Lipo Battery Monitor Alarm Tester Checker Low Voltage Buzzer Alarm with LED Indicator for 1-8 S Lipo Life LiMn Li-Ion Battery	1	7.99€
Akrüülklaas	AKRÜÜLKLAAAS GUTTA HOBBY VÄRVITU 2 X 500 X 500 MM	1	4.90€
Kruvid	KRUUVI PEITPEEA KOLLANE ZN TX 3.0*12 50TK/PK	1	1.50€
Poidid	POLT KUUSKANT ZN M4* 16 8,8 DIN 933 25TK/PK	2	1.92€
Lukustusmutrid	LUKUSTUSMUTTER ZN M4 DIN 985 10TK/PK	3	2.40€
Selbid	SEIB ZN M4 DIN 125 10TK/PK	3	1.80€
Magnetid	Limitarv Neodüümmagnet Plokk 15x5x1.5mm	12	3.96€
Thend	TIHEND FISKOSTAR 2X8MM MUST	2	1.78€
Epoksiiliim	LIIM EPOXY 5 MIN	2	13.00€

Link	Lisamise kuupäev
https://www.amazon.de/gp/product/B08SWMNXT6V/ref=ox_sc_saved_title_1?smid=A1LDGZP38C2HIN&pssc=1	24.08.2022
https://www.hobimaailm.ee/eta/2s-7-4v-lrp-antix-4100mah-50c-lipo-hardcase-x190	06.03.2023
https://www.amazon.de/-/en/gp/product/B099S518M2/ref=ox_sc_saved_title_9?smid=A2BTSZU32SZ5O4&pssc=1	24.08.2022
https://www.amazon.de/-/en/gp/product/B07GSS6HXQP/ref=ox_sc_saved_title_1?smid=A1NAC3FSLRZQZK&pssc=1	24.08.2022
https://www.amazon.de/-/en/gp/product/B07HH9JZF/X/ref=ox_sc_saved_image_6?smid=A3JNNH7Y4SERIU&pssc=1	24.08.2022
https://www.amazon.de/-/en/gp/product/B0B125M835/ref=ox_sc_saved_title_4?smid=A2L6D3YVROOSOT&pssc=1	24.08.2022
https://www.amazon.de/dp/B09CPWCCQP?psc=1&ref_cm_sw_r_cp_ud_ct_BYPK328PSB1E266HW4Y1	22.01.2023
https://www.amazon.de/gp/product/B07DK3R4SY/ref=ox_sc_saved_title_1?smid=A3SCFTIO8CSK1X&pssc=1	24.08.2022
https://www.bauhaus.ee/akruuklaas-gutta-hobby-varvitu-2-x-500-x-500-mm.html	01.09.2022
https://espak.ee/epood/toode/kruvi-peitpea-kollane-zn-tx-3012-50tk-pk/	01.09.2022
https://espak.ee/epood/toode/polt-kuuskant-zn-m4-16-88-dln933-25tk-pk/	01.09.2022
https://espak.ee/epood/toode/ikustusmuter-zn-m4-dln-985-10tk-pk/	11.08.2022
https://espak.ee/epood/toode/seib-zn-m4-dln-125-10tk-pk/	11.08.2022
https://magnet.ee/elepood/liimitavad-magneetid/liimitav-neod%C3%BC%C3%BCmagnet-plokk-15x5x1.5mm-nikkel-detail	27.08.2022
https://www.bauhof.ee/et/p/478770/tihend-fiskostar-2x8mm-must	15.08.2022
https://www.bauhaus.ee/liim-epoxy-5-min.html	01.09.2022

LISA 2. Arduino mikrokontrollerile päikesepaneelide omaduste mõõtmiseks kirjutatud kood

```
#include <SPI.h>

#include <SD.h>

const int chipSelect = 4;

// Variables for Measured Voltage and Calculated Current

double Vout = 0;

double Current = 0;

// Constants for Scale Factor

const double scale_factor = 0.185;

// Constants for A/D converter resolution

// Arduino has 10-bit ADC, so 1024 possible values

// Reference voltage is 5V if not using AREF external reference

// Zero point is half of Reference Voltage

const double vRef = 5.00;

const double resConvert = 1024;

double resADC = vRef/resConvert;

double zeroPoint = vRef/2;

// Define analog input

#define ANALOG_IN_PIN A0

// Floats for ADC voltage & Input voltage

float adc_voltage = 0.0;

float in_voltage = 0.0;

// Floats for resistor values in divider (in ohms)

float R1 = 30000.0;

float R2 = 7500.0;

// Float for Reference Voltage

float ref_voltage = 5.0;

// Integer for ADC value

int adc_value = 0;
```

```
int pos = 0;    // variable to store the servo position

long interval = 1000;

void setup(){

    // Setup Serial Monitor

    Serial.begin(9600);

    while (!Serial) {

        ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only

    }

    Serial.print("Initializing SD card...");

    // see if the card is present and can be initialized:

    if (!SD.begin(chipSelect)) {

        Serial.println("Card failed, or not present");

        // don't do anything more:

        while (1);

    }

    Serial.println("card initialized.");

    Serial.println("DC Voltage and Current Test");

}

void loop(){

    // Read the Analog Input

    adc_value = analogRead(ANALOG_IN_PIN);

    // Determine voltage at ADC input

    adc_voltage = (adc_value * ref_voltage) / 1024.0;

    // Calculate voltage at divider input

    in_voltage = adc_voltage / (R2/(R1+R2));

    for(int i = 0; i < 1000; i++) {

        Vout = (Vout + (resADC * analogRead(A1)));

        delay(1);

    }

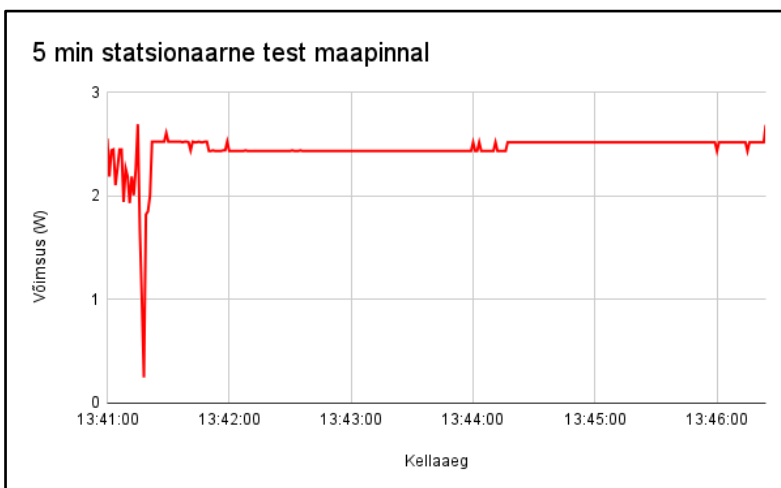
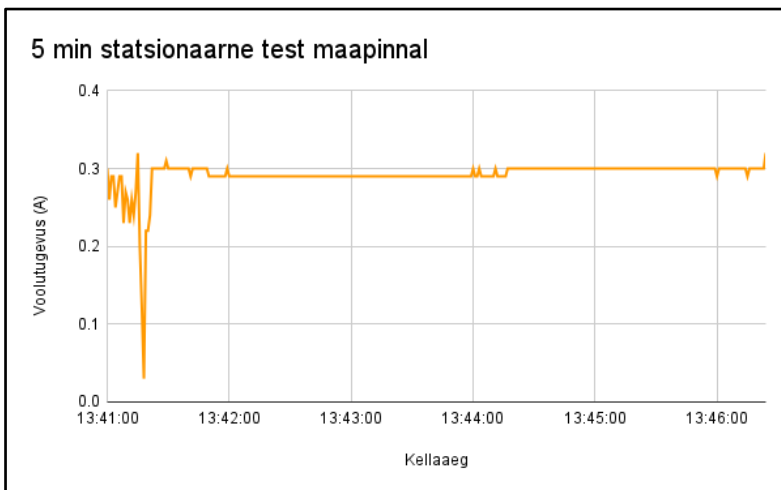
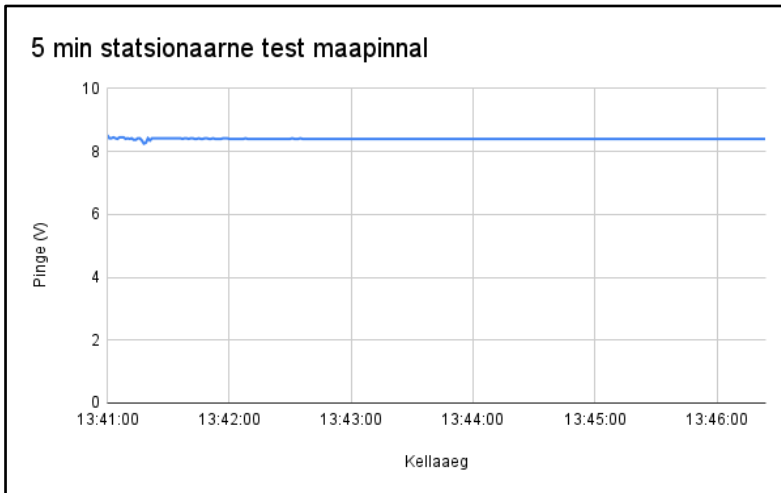
    // Get Vout in mv
```

```
Vout = Vout /1000;

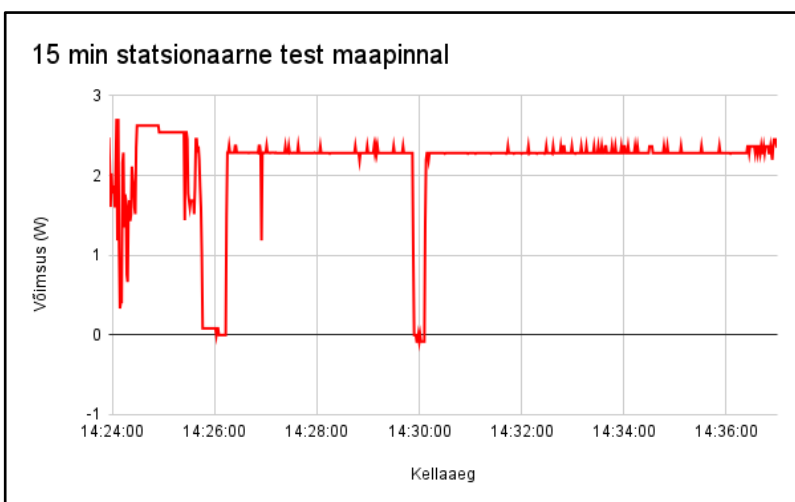
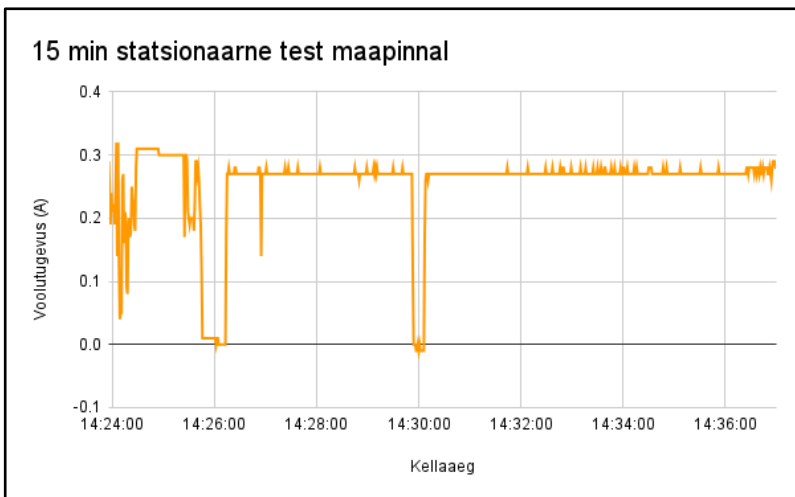
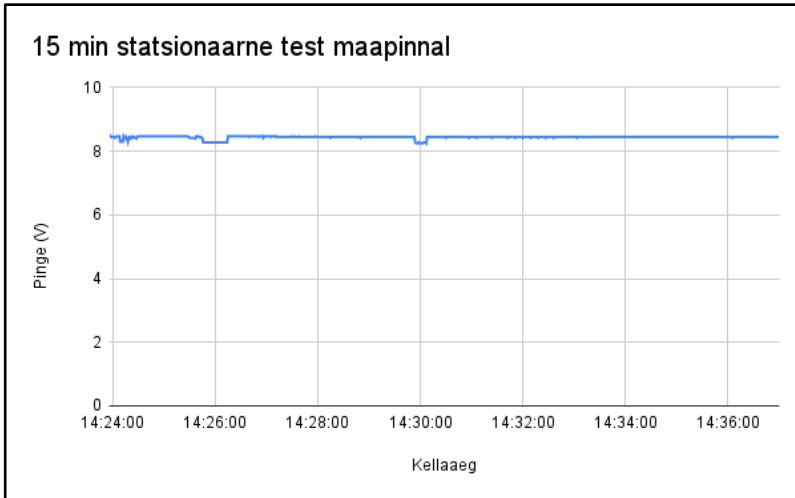
// Convert Vout into Current using Scale Factor
Current = (Vout - zeroPoint)/ scale_factor;

// open the file. note that only one file can be open at a time,
// so you have to close this one before opening another.
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
    dataFile.print(in_voltage, 2);
    dataFile.print(", ");
    dataFile.print(Current, 2);
    dataFile.print(", ");
    dataFile.println(Vout, 2);
    dataFile.close();
    // print to the serial port too:
    Serial.print(in_voltage, 2);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(Current, 2);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(Vout, 2);
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
    Serial.println("error opening datalog.txt");
}
// Short delay
delay(10);
}
```

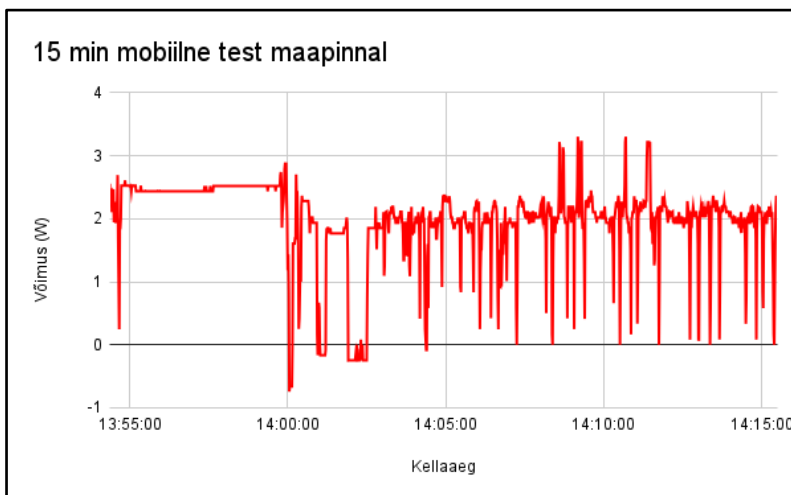
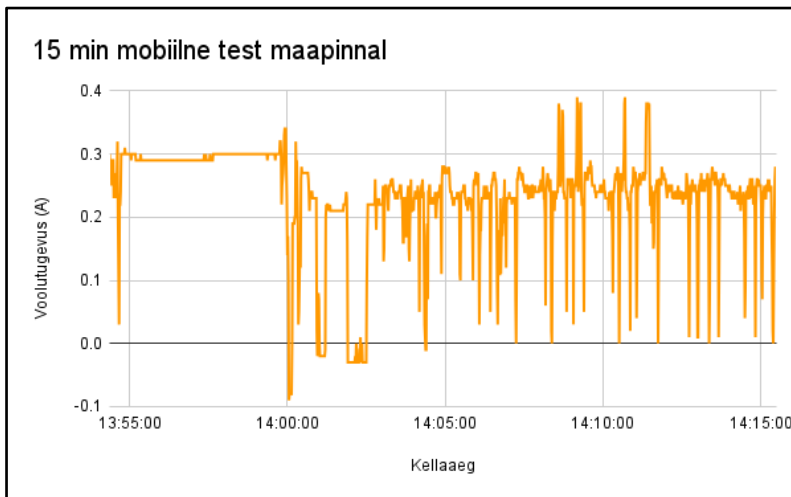
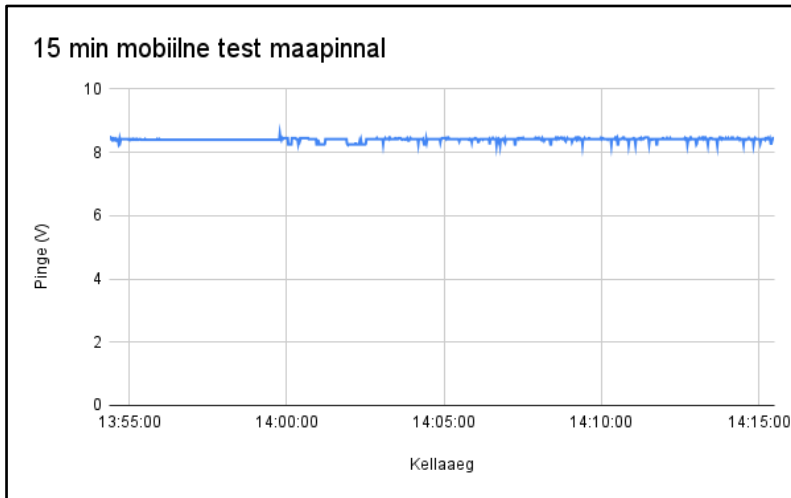
LISA 3. Maapinnal viieminutilise statsionaarse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast



LISA 4. Maapinnal 15-minutilise statsionaarse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast



LISA 5. Maapinnal 15-minutilise mobiilse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast



LISA 6. Pirita jõel 15-minutilise mobiilse katse pinge, voolutugevuse ja võimsuse graafikud sõltuvalt ajast

