

UUSIUTUVA ENERGIA
KRIISINHALLINTA OPERAATIOISSA JA SEN
LISÄÄMISMAHDOLLISUUDET

Fokus aurinkosähkössä



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Tuotekehityksen koulutusohjelma

HAMK Riihimäki, 30.8.2010 – 31.12.2015

A handwritten signature in blue ink that reads "Jari M. Mustonen".

Jari M. Mustonen

RIIHIMÄKI

Tuotekehityksen koulutusohjelma

Tekijä	Jari M. Mustonen	Vuosi 2015
Työn nimi	Uusiutuva energia kriisinhallintaoperaatioissa ja sen lisäämismahdollisuudet – fokus aurinkosähkössä.	

TIIVISTELMÄ

Uusiutuva energia eri muodoissaan, etenkin auringon säteilyenergian hyödyntäminen niin lämmöksi kuin valosähköilmiön avulla suoraan sähköenergiaksi, on kriisinhallintaoperaatioissa tällä hetkellä lähes hyödyntämätön energiaressurssi. Teknologiset ratkaisut aurinkoenergian käytön lisäämiseen myös kenttäolosuhteissa, siis kohtuullisin kustannuksin ja kun koko elinkaaren aikaiset kustannukset sekä ympäristövaikutukset huomioidaan, ovat jo tällä hetkellä olemassa. Siten se, että mitä uutta energiateknologiaa em. kenttäolosuhteissa otetaan tulevaisuudessa käyttöön - on ensisijaisesti toiminnan ympäristövaikutuksiin kokonaisvaltaisesti liittyvä ratkaisu ja ennen kaikkea energiapolitiittinen valinta. Tähän asiaan on nyt herätty mm. Yhdistyneiden Kansakuntien rauhanturvatoimialallakin. Maailman laajuisesti nousussa olevat aurinkosähköteknologiat sekä niiden kehittyneet kenttäsovellukset ovat tulossa yhä lisääntyvässä määrin myös kriisinhallintaoperaatioiden energiahuollon valikoimaan.

Opinnäytetyöni tavoitteena on ollut ensisijaisesti tuotekehityksen näkökulmasta löytää tähän asiakastarpeeseen vastaavia uusiutuvan energian, nykyteknologialla toteutettavissa olevia, sovelluksia. Sisällössä käsitellään aurinkosähköjärjestelmän suunnittelun näkökulmasta keskeinen valosähköilmiön teoreettinen tausta ja aurinkokennon tehontuottoon liittyvät tekijät.

Kiinnostukseni tämän opinnäytetyön aiheeseen, siis uusiutuvan energian ja erityisesti aurinkoenergian hyödyntämiseen on herännyt vuosien 1998 – 2014 kuluessa palvellessani tähän mennessä yhteensä kuuteen eri otteeseen kv. kriisinhallintaoperaatioissa. Lisäksi mainiona kannustimena tähän aiheeseen on ollut jo aiemmin, vv. 2007–2008, Hämeen Ammattikorkeakoulussa suorittamani bioenergian erikoistumisopinnot. Jatkotoimenpiteenä tälle työlleni, siis tästä eteenpäin, olisi yksityiskohtaisen tuotemuotoilun ja sovellussuunnittelun aloittaminen, loppukäyttäjän tarpeisiin valmistettavien tuotteiden kehittämiseksi.

Avainsanat Aurinkosähkö, kansainvälinen, kriisinhallintaoperaatio, tuotekehitys, uusiutuva energia, valosähköilmiö.

Sivut 47 sivua + liitteet 13 sivua.

RIIHIMÄKI

Degree program of product development

Author	Jari M. Mustonen	Year 2015
Subject of Bachelor's thesis	Renewable energy in peace support operations and its multiplying potential on forthcoming future - focused to the solar electricity generation by applied photovoltaics.	

ABSTRACT

Currently – renewable energy, with its broad range of options, especially exploitation of solar energy – in the form of thermal energy as well as the direct conversion of solar energy to electricity using photovoltaic devices - has been an almost untapped source of energy in international peace keeping operations. The key technological solutions to increase solar power utilization in the field, bearing reasonable cost level through life-span of the system's life and environmental impacts in mind, exists already. Thus what kind of energy technologies will be deployed in big picture to the field operations on future will be primarily environmental resolution and ultimately matter of the applied energy policies. This concern has recently drawn attention also in the United Nations Department of the Peacekeeping Operations. Globally the direct conversion of solar radiation to electricity using of the photovoltaic technologies and its matured field applications are increasingly reaching also the peace support operations.

From the product development point of view my personal goal for this dissertation was primarily to find contemporary applications of the modern sustainable energy technologies that will meet the needs of the field operations and can be implemented to the prevailing field conditions. The content of this thesis brings to light the theory behind the photovoltaics and the main planning and design principles of the photovoltaic systems as well as the output parameters of the solar panel.

My personal interests for the subject of this dissertation has developed during my service in international peacekeeping operations. The next phase following this work has now completed for the B.Sc. of Eng. Thesis that will be the detailed among with planning process for an end user level of the sustainable energy solutions for the field, covering design, mechanical and electrical plans.

Keywords International, peace support operation (PSO), photovoltaics (PV), product development (PD), renewable energy (RE), solar power.

Pages 47 pages + appendices 13 pages.

1 TERMIT JA LYHENTEET

6 DS = + 6 °C Skenaario on perus skenaario, missä meneillään olevat kehitystrendit jatkuvat. Sen mukaan maailman energian tarve tulee lisääntymään enemmän kuin 2/3 vuodesta 2011 vuoteen 2050 mennessä. Tähän yhdistettynä CO₂ päästöt tulevat nousemaan vielä nopeammin, minkä seurauksena maapallon ilmaston keskilämpötila nousee 6 °C nykytasosta.

AM = Air Mass index = ilmamassan vahvuutta kuvaava vertailuluku

CGH = Compressed Gaseous Hydrogen (H₂) = paineistettu vetykaasu.

CHP = Combined Heat and Power Production (Plant) = yhdistetty lämpö ja sähkövoimalaitos.

CNG = Compressed Natural Gas (CH₄) = paineistettu maakaasu.

CNRS = Le Centre National de la Recherche Scientifique = The National Center for Scientific Research = Ranskan valtion tieteellinen tutkimuslaitos.

CSP = Concentrated Solar Power = Auringonsäteilyn hyödyntäminen energiantuotannossa kohdentamalla valo tiettyyn pisteeseen peilien ja/tai optiikan avulla, käytetään myös STG, ks. alla.

DFS = The Department of Field Support in DPKO = YK:n kriisinhallintaoperaatioiden huolto- ja tukiosasto.

DPKO = The United Nations Department of Peace Keeping Operations eli Yhdistyneiden Kansakuntien rauhanturvatoimiala.

EIA = The United States Energy Information Administration = Yhdysvaltain energiatietohallinto.

EJ = Eksajoule = 10¹⁸ J

ETP = Energy Technology Perspectives

eV = Elektornivoltti, 1 eV = 1,602177 x 10⁻¹⁹ J; Elektronivoltti on liikeenergia, jonka elektroni saa läpäistessään tyhjiössä voltin suuruisen potentiaalieron tai sama asia toisin sanoen täsmenään; 1 eV vastaa energiaa, joka tarvitaan elektronin siirtämiseen 1 V:n jännitteen yli.

Ex Works = Incoterms 2010 -toimituslausekkeen mukaan myyjä toimittaa tavaran ostajalle silloin, kun hän asettaa sen ostajan käytettäväksi tiloissaan tai muussa nimetyssä paikassa, esim. tuotantolaitoksessa tai varastossa. Myyjän ei tarvitse lastata tavaraa sitä noutavaan ajoneuvoon eikä huolehtia mahdollisesti sovellettavasta vientiselvityksestä. Ostaja vastaa kaikista kustannuksista ja riskeistä viedessään tavaran sovitusta kohdasta nimetyltä toimituspaikalta. (ICC Incoterms 2010)

IEA = International Energy Agency = Kansainvälinen Energiajärjestö.

MINURCAT II = The United Nations 2nd Mission in Central African Republic and Chad = YK:n 2. Rauhanturvaoperaatio Keski-Afrikan Tasavallassa ja Tshadissa.

MIT = Massachusetts Institute of Technology.

NATO = North Atlantic Treaty Organization eli Pohjois-Atlantin liitto.

NGO = Non-governmental organization = kansalaisjärjestö.

NOCT = Nominal Operating Cell Temperature

NREL = The United States Department of Energy's – National Renewable Energy Laboratory, NREL, Golden, Colorado, USA.

PV = Photovoltaics = suora valosähkötekniikka.

PSO = Peace Support Operations = Kriisinhallintaoperaatio – kansainvälisessä asiayhteydessä.

RE = Renewable Energy = uusiutuva energia = UE.

STC = Standard Test Conditions = Aurinkokennojen testaukseen määritetyt, vakioidut, testausolosuhteet.

STG = Solar Thermal Generation = Aurinko-lämpö-voimantuotanto = CSP.

TWh = Terawattitunti = 10^{12} Wh.

UN = United Nations eli Yhdistyneet Kansakunnat = YK.

UNDP = The United Nations Development Program = Yhdistyneiden Kansakuntien kehitysohjelma UNDP.

UNHCR = The United Nations High Commissioner for Refugees = Yhdistyneiden kansakuntien pakolaisavun järjestö.

UNIFIL = The United Nations Interim Force in Libanon = Yhdistyneiden kansakuntien (väliaikainen) rauhanturva joukko Libanonissa.

UNMIL = The United Nations Mission in Liberia eli Yhdistyneiden Kansakuntien Rauhanturvaoperaatio Liberiassa.

UNTSO = The United Nations Truce Supervision Organization in Egypt, Israel, Jordan, Lebanon and Syrian Arab Republic = Yhdistyneiden kansakuntien, Israelin sekä sitä ympäröivien arabivaltioiden, aseleposopimusten tarkkailu ja valvonta organisaatio.

USAID = The United States Agency for International Development = Yhdysvaltain kansainvälisen ulkomaanavun toimisto.

USD = United States Dollar, Amerikan Yhdysvaltain, rahayksikkö, Dollari.

W_p = Watts peak = Aurinkopaneelin valmistajan standardiolosuhteissa tietylle aurinkosähköpaneelille määrittämä nimellisteho.

YW = Jottawatti = 10^{24} W

SISÄLLYS

1	TERMIT JA LYHENTEET.....	3
2	JOHDANTO	6
2.1	Aurinkosähkön mahdollisuudet.....	9
3	TYÖN TAUSTAA	11
3.1	Energiatehokkuuden ja elinkaariajattelun näkökulma	15
4	TEORIA.....	16
4.1	Yleistä aurinkoenergiasta	16
4.2	Aurinko energian lähteenä	17
4.3	UE-tietokanta – the National Renewable Energy Laboratory, NREL	23
4.4	Aurinkokennon ja aurinkopaneelin toimintaperiaate	23
4.5	Aurinkopaneelin hyötysuhde.....	29
4.6	Aurinkopaneelien kestävyys	32
4.7	Aurinkopaneelin tehontuotto käytännössä	34
4.8	Aurinkosähkölaitteiden karkea luokittelu.....	38
5	KENTTÄKELPOISET SOVELLUKSET KÄYTÄNNÖSSÄ.....	39
5.1	Yleisluontoiset ohjeet uuden teknologian soveltamiselle YK:n kriisinhallintaoperaatioissa	39
5.2	Suosituksia liittyen uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämiseksi YK:n kriisinhallintaoperaatioissa	39
5.3	Kriisinhallintaoperaatioon soveltuva uusiutuvan energian sovellus esimerkki	40
5.3.1	Aurinkosähkö (PV) – hybridi-DC/AC-järjestelmä.....	41
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	44
6.1	Aurinkosähkö kriisinhallintaoperaatioissa	44
6.2	Kestävän kehityksen näkökulma.....	45
6.3	Uusiutuva energia ja mobiilit sovellukset	47
6.4	Dekarbonisaatio.....	48
	LÄHTEET	49

Liite 1, UNITED NATIONS PEACE KEEPING OPERATIONS, DEC2014

Liite 2, UN UNIFIL PROCUREMENT SECTION; Purchase of the UNIFIL Solar Panels with accessories, 9FIL-200426 and 9FIL-200725

Liite 3, NREL; 2015-06-09, Best Research-Cell Efficiencies

Liite 4, MITSUBISHI ELECTRIC US Inc; MLE-series PV Modules – specification sheet

Liite 5, LASKENTATULOKSET

2 JOHDANTO

”Kun maailman vuoriöljyvarastot ovat todennäköisesti rajoitetut, niin on laskettu, että jo ehkä noin 100 vuoden kuluttua alkaa vuoriöljytuotteiden saanto olla lopussa ja jo huomattavasti sitä ennen kiristyy. ... on kuitenkin selvää, että hyvissä ajoin on ryhdyttävä harkitsemaan, mitä juoksevaa polttoainetta vuoriöljytuotteiden sijasta voitaisiin käyttää. Tämän lisäksi monella kansalla on aivan erikoiset syynsä voida tarpeen tullen olla riippumaton vuoriöljytuotteista. Nämä syyt ovat taloudellinen ja sotilaallinen itsenäisyys.” – Yrjö Talvitie kirjansa ”Automobiilien polttoaineet ja kaasuttajat” esipuheessa vuonna 1929. (Werner Söderström Osakeyhtiö; 1930, Yrjö Talvitie; Automobiilien polttoaineet ja kaasuttajat)

Yllä olevilla Yrjö Talvitien saatesanoilla on hyvä aloittaa myös tämä opinnäytetyö ja sen kirjallinen osuus. Hänen sanoissaan minua miellyttää erityisesti lause *”Nämä syyt ovat taloudellinen ja sotilaallinen itsenäisyys”*. Itsenäisyyden tavoite pätee myös energiahuoltoon ja sen toimintavarmuuteen kaikissa oloissa, etenkin juuri nyt kun kaikenlainen epävarmuus koko maailmassa tuntuu lisääntyvän. Nykyajalle on myös jollain tapaa tyypillistä tietynlainen huolettomuus kaikessa toiminnassa ja luottamus teknologioiden kaikkivoipaisuuteen - siis siihen, että teknologian avulla kaikki eteen tulevat haasteet voitaisiin ratkaista kulloinkin niitä kohdattaessa.

Kansainvälisissä kriisinhallintaoperaatioissa on tällä kuluvalle vuosikymmenellä, oikeastaan vasta aivan viime vuosina, alettu yhä lisääntyvässä määrin kiinnittämään huomioita myös operaation ympäristövaikutuksiin ja sitä myötä myös tapaan tuottaa kunkin operaation tarvitsema energia, eri muodoissaan. Toiminnan luonteesta ja sen erityispiirteistä johtuen mm. sähköenergiantuotanto ja käyttö kenttäolosuhteissa, useimmiten toimivien, kaupallisten, sähköverkkojen ulottumattomissa, on ollut tähän saakka yksi haasteellisimmista osa-alueista. Myöskään energiatehokkuuteen ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota.

Tällä hetkellä kriisinhallintaoperaatioissa yleisimmin käytössä oleva, tarvittavan käyttösähkön, ensisijainen tuotantotapa on diesel-moottori käyttöiset sähkögeneraattorit, mitkä on valittu teholuokittain ja käyttötarpeen mukaan. Tässä yhteydessä on hyvä palauttaa mieleen, että parhaimmillaankin diesel-sähkögeneraattorilla saadaan vain noin 30 – 35 % diesel-polttoaineen sisältämästä kokonaisenergiasta muunnettua käyttökelpoiseksi sähköenergiaksi. Tällöin muuntoprosesseissa, missä ensin polttoaineen sisältämästä kemiallisesta energiasta noin 1/3 osa muunnetaan mekaaniseksi työksi ja noin 2/3 osaa lämmöksi sekä seuraavassa muuntovaiheessa mekaanisesta työstä sähköenergiaksi. Tällöin noin 65 – 70 % em. polttoaineen kokonaisenergiasta muuttuu lämmöksi ja lauhdutetaan ympäröivään ilmaan. Tämä kaikki tapahtuu olosuhteissa, missä yleensä on jo muutenkin riittävän lämmintä, muista ympäristövaikutuksista, kuten pakokaasupäästöistä, puhumattakaan. Tätä voidaan mielestäni pitää aikamoisena tuhlauksena.

Niin Yhdistyneiden Kansakuntien, Pohjois-Atlantin liiton, Afrikan Unionin ja muidenkin kriisinhallinta-alan instituutioiden johtamissa operaatioissa, ns. operatiiviset vaatimukset käytännössä määrittävät niiden kulloinkin käyttämien teknisten ratkaisujen tärkeimmät ominaisuudet. Niiden pohjalta tehdyt valinnat eivät tähän saakka ole olleet energiatehokkuuteen kannustavia tai uusiutuvien energiamuotojen käyttöä suosivia, tahi ylipäätään ympäristövaikutuksia huomioon ottavia. Lisäksi niissä käytössä olevat teknologiat ja käytännön tekniset ratkaisut pohjautuvat varsin usein kulloinkin operaatioon osallistuvien ja siihen joukkoja toimittavien maiden omien kansallisten instituutioiden tai yhteenliittymien kotimaassaan tekemiin teknisiin valintoihin.

Yhdistyneiden Kansakuntien rauhanturvatoimialan joulukuussa 2014 julkaisemassa ”Performance Peacekeeping – Final Report of the Expert Panel on Technology and Innovation in UN Peacekeeping” – teknologiaraportissa uusituvan energian parempi hyödyntäminen ja energiatehokkuuden lisääminen mainitaan yhtenä monista kriisinhallintaoperaatioiden teknologisista painopistealueista ja erityisistä kehittämiskohteista tulevaisuudessa.

Suurin osa maailmalla tälläkin hetkellä menossa olevista kriisinhallintaoperaatioista tapahtuu alueilla missä ilmasto-olosuhteet ovat varsin lämpimät. Näin ollen niissä olevia kiinteitä rakennuksia ja rakennelmia ei tarvitse juurikaan lämmittää muutoin kuin poikkeustapauksissa. Luonnollisesti poikkeuksena edelliseen lämmitystarvetta esiintyy niillä alueilla missä se on ilmastosta johtuen välttämätöntä, kuten esimerkiksi mm. vuoristoinen Jammu ja Kashmirin osavaltio Intian ja Pakistanin välissä. Muutoin kiinteiden rakennusten ja rakennelmien osalta ensisijainen käyttövoiman tarve kohdistuu em. tilojen koneelliseen jäähdytykseen sekä käyttösähköön.

Auringossa tapahtuvien lämpöydin- eli fuusioreaktioiden tuottama sähkömagneettinen säteily on aikojen alusta saakka ollut maapallolla elämää ylläpitävä voima ja elämän mahdollistava energian lähde. Maapallon merkittävistä energianlähteistä kaikki muut paitsi ydinvoima, geoterminen energia ja vuorovesivoima ovat peräisin aurinkosta. Siten myös nyt hyödynnettävät fossiiliset polttoaineet ovat aikojen saatossa syntyneet saman auringon tuottaman energian avulla.

Karkeasti arvioiden voidaan sanoa, että aurinkosta ilmakehän yläosiin kohdistuva säteily on noin 12 000 kertainen verrattuna ihmiskunnan koko energian kulutukseen, minkä arvioitiin vuonna 2005 olleen 450 EJ (EJ = Eksajoule= 10^{18} J). (Studentlitteratur AB Lund; 2009, Göran Siden, Förnybar energi, s.11)

Kansainvälisen Energiajärjestön IEA:n mukaan; ” Aurinkoenergia on kaikkein runsain energian lähde maapallolle kun 885 TWh saavuttaa maan pinnan vuosittain. Tämä on 6 200 kertaa suurempi kuin koko ihmiskunnan kaupallisen primäärienergian kulutus vuonna 2008 ja 3500 kertainen siihen nähden mitä ihmiskunnan on laskettu kuluttavan vuonna 2050”. (IEA 2011, 2014b; ETP 2014, 6 DS skenaario)

Aurinko energian lähteenä on huomattavasti suurempi kuin mikään muu energian lähde maapallolla. Maapallon yläilmakehään kohdistuu koko ajan noin 174 000 terawattia (TW) on auringonsäteilyenergiaa. Koko ihmiskunnan hetkellinen energiankulutus arvioidaan olevan keskimäärin noin 17 TW. Näin ollen auringosta maapal- lolle yhden tunnin aikana tuleva energia määrä on enemmän kuin mitä ihmiskunta nykyisellään kuluttaa vuodessa. (The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, The Solar Resource, s. 253)

Edellä olevaan perustuen voidaan sanoa, ettei koko maapallolla ole ylipäättäen mi- tään energiapulaa. Enneminkin kysymys on tuotantotaloudellinen eli mitä energia resursseja voidaan kulloinkin taloudellisesti hyödyntää ja mitä energian muuntome- netelmiä valitaan käyttöön sekä sarja kulloinkin käytettävissä oleviin teknologioihin sidottuja valintoja. Uusiutuvien energialähteiden hyödyntämiseen tähtäävien uusien teknologioiden kehitys on ollut nopeaa, etenkin viime vuosikymmeninä. Lisäksi, ar- vioni mukaan tällä jo hetkellä olisi meneillään maailman laajuinen aurinkosähkö ”boomi”.

Yleisesti tiedetään, että ns. ”likainen” öljyaika tulee jäämään hyvin lyhyeksi, n. 200 vuoden mittaiseksi ajanjaksoksi ihmiskunnan historiassa. *“Kivikausi ei loppunut ki- vien loppumiseen, ja öljykausi loppuu paljon ennen kuin öljy loppuu. Muutos edel- lyttää vain ajattelun kehittymistä – teknologian kehitys on jo tapahtunut”* (muokattu The Economist-lehdessä 25.10.2003 olleesta pääkirjoituksesta)

Tulevaisuudessa raakaöljyn käyttöä liikenteessä ja myös muissa mobiileissa ratkai- suissa joudutaan välttämättä vähentämään dramaattisesti sekä ympäristösyistä että resurssisyistä eli raakaöljyn globaalien pumppaushuipun ohittamisen johdosta. Re- surssit sallivat sen korvaamisen joko muilla, pääasiassa kiinteillä, fossiilisilla poltto- aineilla tai uusiutuvilla energialähteillä. Kiinteät fossiiliset polttoaineet nostavat polttoaineen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä noin kaksinkertaiseksi raakaöljy- pohjaisiin polttoaineisiin verrattuna, joten ne ovat ympäristösyistä mahdoton valinta.

Lopullinen pitkän tähtäimen ratkaisu on resursseiltaan suurimpien ja päästöttömien uusiutuvien energialähteiden, erityisesti aurinko-, tuuli- ja aaltoenergian, käyttö. Näitä voidaan käyttää motorisoidun liikenteen ja muiden mobiiliratkaisujen energi- anlähteenä monilla tavoilla. Esimerkiksi tuulienergiaa voidaan hyödyntää tuulisäh- könä, tuulivetynä, tuulimetaanina ja tuulisähköllä paineistetulla ilmalla. Pääsääntöi- sesti bioenergia toimii vain siltana, mutta koska jätteitä joka tapauksessa tuotetaan, jäteperäinen liikenne-energia on osa myös lopullista ratkaisua. (Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu; 2012, Ari Lampinen, Tiekartta uusiutuvaan metaanitalouteen, s. 65)

2.1 Aurinkosähkön mahdollisuudet

Maailman laajuisesti, aurinkosähkö (PV) ja keskitetty aurinkovoima (CSP) ovat tällä hetkellä nopeimmin kasvavia uusiutuvan sähkövoiman tuotantoteknologioita – vuosien 2000 ja 2013 välisenä aikana aurinkosähkön tuotanto maailman laajuisesti kasvoi melkein 68 kertaiseksi vuoteen 2000 verrattuna. (US Department of Energy; 2013 Renewable Energy Data book, s. 4)

Tuoreen Massachusetts Institute of Technology'ssä (MIT) Toukokuussa 2015 julkaistun aurinkoenergian tulevaisuutta käsittelevä raportin mukaan; ”Tällä hetkellä hallitseva aurinkosähköteknologia (PV) on kiteiseen piihin, sen eri muodoissaan, perustuva aurinkokennoteknologia, mitä on käytetty maailmanlaajuisesti noin 90 % asennetusta aurinkosähkökapasiteetista. Tämä teknologia on riittävän kypsää ja sitä tukee nopeasti kasvava, maailmanlaajuinen, teollisuus mikä on halukas edelleen kehittämään sen suorituskykyä ja kustannustehokkuutta. Kilpailukykyisillä tukkusähkömarkkinoilla suoran aurinkosähkötuotannon markkinahinta (ja arvo) laskee sitä mukaa kun aurinko sähkö tuotanto ja suhteellinen osuus lisääntyy kokonaismarkkinalla. Piin asema keskeisenä aurinkosähkökennojen materiaalina tulee säilymään vielä ainakin 2030 luvun alkupuolelle. (The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, summary for policy maker's xi)

Vertailuna edellä esitettyyn - MIT:n arvion mukaan kumulatiivisesti laskien aurinkosähkön (PV) tuotantokapasiteetti maailmanlaajuisesti on kasvanut noin 47 % vuoteen 2001 verrattuna. (The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, PV Scaling and Materials Use, s. 125)

Toinen keskeinen aurinkoenergian hyödyntämisteknologia on keskitetty aurinkovoima (CSP) tai siitä käytetään myös nimitystä aurinkolämpötuotanto (STG). Keskitetty aurinkovoima on yhä voimakkaassa kehitysvaiheessa ja sen myötä kaupallisiin keskitetyn aurinkovoiman hankkeisiin liittyy ainakin vielä erittäin suuria kokonaisriskejä. Lisäksi keskitetty aurinkovoima (CSP) on, ainakin tällä hetkellä vielä, yksikkökustannuksiltaan suoraa aurinkosähköä selvästi kalliimpaa. Muun muassa juuri edellä mainituista syistä suora aurinkosähköteknologia tulee ainakin keskitähtäyksellä säilymään tärkeimpänä aurinkoenergian tuotantoteknologiana.

Nykyisellään investoinnit aurinkosähköjärjestelmiin ovat taloudellisesti perusteltavissa ja niillä tuotetaan paikallista, käyttöpaikallaan päästötöntä energiaa. Seuraavassa taulukossa on vertailtu eri energiamuotojen kasvihuonekaasu (GHG) -päästöjä ja erityisesti tuuli- sekä aurinko energia ovat aivan omassa luokassaan alhaisten päästöjen vuoksi.

Taulukko 1., Kasvihuonekaasujen päästöt eri energialähteitä käytettäessä; g/kWh CO₂^{eq} eli hiilidioksiekvivalentiksi muunnettuna. (www.epia.org; 2015, European Photovoltaic Industry Association)

Energianlähde	Kasvihuonekaasujen päästöt g/kWh, CO ₂ ^{eq} eli hiilidioksiekvivalentti arvona
Hiili	900 g/kWh CO ₂ ^{eq}
Öljy	850 g/kWh CO ₂ ^{eq}
Kaasu (CHP-laitos)	400 g/kWh CO ₂ ^{eq}
Biomassat	45 g/kWh CO ₂ ^{eq}
Aurinkosähkö (PV), monikiteinen Pii, Si	37 g/kWh CO ₂ ^{eq}
Aurinkosähkö (PV), ohutkalvotekniikka, Cadmium Telluriitti, CdTe	18 g/kWh CO ₂ ^{eq}
Tuuli	11 g/kWh CO ₂ ^{eq}

Aurinkosähkökennojen ja moduulien hinnat ovat laskeneet todella nopeasti viime vuosina. Kun IEA:n mukaan vuonna 2008 aurinkosähköpaneelien keskihinnaksi muodostui 4 USD / W_p, niin vuonna 2012 se oli enää 0,8 USD / W_p. Lisäksi arvioidaan, vaikka hintojen laskukehitys hidastuu aiemmasta, että aurinkosähköpaneelien hintataso tulee laskemaan tasolle 0,3 – 0,4 USD / W_p vuoteen 2035 mennessä. (IEA 2014, Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy, 2014 edition, s. 22)

Tässä opinnäytetyössäni käsittelem joiain käytännön mahdollisuuksia lisätä uusituvan energian osuutta ja vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ensisijaisena energian lähteenä kriisinhallintaoperaation kaltaisissa kenttäolosuhteissa niin kiinteiden toimipaikkojen kuin mobiilien ratkaisujen osalta. Lopulliseen päätökseen koskien aihevalintaani vaikutti myös se, että olin jo aiemmin suorittanut Hämeen Ammattikorkeakoulussa Bioenergian erikoistumisopinnot vuonna 2008. Tarkastelun kohteena olevan aihealueen laajuudesta sekä tähän kytkeytyvästä hyvin kattavasta tutkimustiedosta johtuen, keskityn auringon valon hyödyntämiseen suoraan sähköksi, erityisesti kenttäolosuhteissa.

Mainittakoon myös, että maailman laajuisesti valosähköilmiö (PV) on ollut jo 1950 luvulta lähtien intensiivisen tutkimustoiminnan kohteena ja siten voidaan sanoa, että ainakaan laadukkaan tutkimustiedon puute ei tällä hetkellä voi olla esteenä aurinkoenergiajärjestelmien jatkokehitystyössä.

Se seikka, että tässä opinnäytetyössä viitataan usein Amerikan Yhdysvalloissa toimiviin tutkimuslaitoksiin ja tietolähteisiin, perustuu osaltaan siihen, että YK:n Kriisinhallintaoperaatioiden johto (DPKO) ja siten myös operaatioiden suunnittelu ja huoltologistiikan keskus sijaitsee YK:n päämajassa New Yorkissa. Em. syystä johtuen valtaosa kriisinhallintaoperaatioiden standardeista ja teknisistä määräyksistä perustuvat Pohjois-Amerikassa, siis Yhdysvalloissa ja Kanadassa voimassa oleviin määräyksiin, säännöksiin ja tutkimustuloksiin.

Tätä työtä tehdessäni olen osaltani tutustunut, merkittävään määrään aurinkosähköstä Pohjois-Amerikassa julkaistua aineistoa, kuten myös muiden uusituvan energian alalla kärkimaiksi lukeutuvien maiden kuten Kiinan, Ranskan, Saksan ja Tanskan tutkimuslaitosten sekä yritysten aikaan saannoksiin aurinkoenergian alalla. Myös osa kotimaisista tietolähteistä täällä Suomessa ja Aalto-yliopiston FinSolar-projekti ovat tämän työn myötä tulleet minulle tutummiksi.

3 TYÖN TAUSTAA

Oma kiinnostukseni tämän opinnäytetyön aiheeseen on herännyt hiljalleen vuosien 1998 – 2014 kuluessa palvellessani, yhteen laskien yli viisi vuotta, useissa eri kv. kriisinhallintaoperaatioissa eripuolilla Balkania sekä lisäksi kolmeen eri otteeseen Afrikan mantereella, Tshadissa, Liberiassa ja Malissa. Kaikissa näissä em. kohteissa kriisinhallintaoperaation tarvitsema käyttösähkö on tuotettu pääasiassa diesel-käyttöisillä generaattoreilla. Lisäksi kaikki käytössä olleet liikkuvat ajoneuvot ja koneet ovat olleet joko polttomoottorikäyttöisiä polttoaineenaan, monesti vaihtelevan laatuiset, nestemäiset, raakaöljystä valmistetut polttoaineet.

Nykyaikaiseen elämäntapaan perustuvat kriisinhallintaoperaatiot tarvitsevat tehtäviensä toteuttamiseen energiaa kaikista ajateltavissa olevista näkökulmista tarkastellen; mm. sähköä tietotekniikkaa ja viestivälineitä varten, majoitustilojen lämmitykseen ja jäädytykseen, ruoan valmistukseen ja elintarvikkeiden varastointiin, terveyden huoltoon, kenttäsairaanhoitoon, lääkkeiden ja lääkintämateriaalien säilytykseen sekä niiden käyttökelpoisuuden varmistamiseen, nestemäisiä polttoaineita ajoneuvojen käyttövoimaksi, jne.. Useat operaatioalueet ovat ilman luotettavaa yhteyttä paikallisiin, toimiviin, sähköverkkoihin. Tämän vuoksi kv. kriisinhallintaoperaatiot ovat pakotettuja diesel-generaattorien käyttöön ensisijaisena energian lähteenään. Vaikkakin diesel-käyttövoima on kenttäolosuhteissa luotettavaa ne vaativat suuria määriä polttoainetta mitä joudutaan useimmiten kuljettamaan vaikeissa olosuhteissa varsin pitkiä matkoja. Lisäksi em. polttoainekuljetukset ovat alttiina ryöstelylle. (UN 2014, Performance Peacekeeping – Final Report of the Expert Panel on Technology and Innovation in UN Peacekeeping, s. 38.)

Em. raportissa mainituista pitkistä polttoaineen kuljetusmatkoista hyvänä esimerkkinä käy vaikkapa Tshadin kaakkoisosassa, Goz Beidassa, sijainnut YK:n MINURCAT II – operaation Eteläisen sektorin leiri mihin polttoaine tuotiin valtaosin puoliaavikon halki, erittäin huonoissa tai jopa olemattomissa tieolosuhteissa, Tshadin pääkaupungista n Djamenasta. Tällöin kuljetusmatkaa kertyi noin tuhat kilometriä ja viimeisellä n. 350 km osuudella ei käytännössä ollut edes teitä ja ylitettävänä oli useita jokiuomia joissa ei ollut minkäänlaisia siltoja. Toisena erityispiirteenä vallitsevista olosuhteista on huomioitava noin 3-4 kk kestävä sadekausi, mikä sateen määrästä johtuen tekee raskaat ja joskus jopa kevyetkin maakuljetukset mahdottomiksi. Edellä mainituista erityisolosuhteista johtuen tämän kaltaisissa leireissä pitää olla suuria, n. 35 – 500 tn., polttoaineiden varmuusvarastoja. Niitä tarvittiin niin diesel-polttoaineelle, kuin JET A1 – lentokonepolttoaineelle. Nämä varmuusva-

rastot herättivät myös ei toivottua kiinnostusta leirin ulkopuolisissa, paikallisissa, ta-
hoissa. Sadekauden aikana, mikäli polttoaine varastot pääsivät täydennysten puut-
tuessa ehtymään, ainoa korvaava, mutta kapasiteetiltaan perin rajallinen, kuljetus-
muoto olivat ilmakuljetukset.

Toinen vallitsevaa tilannetta hyvin kuvaava esimerkki voidaan ottaa Liberiasta, missä YK:n UNMIL – operaatio on toiminut Syyskuusta 2003 alkaen. Liberia on noin 4,3 milj. asukkaan itsenäinen valtio Atlantin rannalla, Länsi-Afrikassa, missä peräkkäisten sisällissotien seurauksena maan koko infrastruktuuri on käytännössä yhä raunioina. Bruttokansantuote asukasta kohden vuonna 2013 oli 453,34 USD ja väestöstä noin 51 % asuu maaseudulla. Liberiassa maaseudulla ei ole lainkaan julki-
sia sähköverkkoja tahi yleishyödyllistä sähköntuotantoa yhtä kuntaa, eli Gbanga’aa, Bong County’ ssä, lukuun ottamatta. Toki joillakin yksityisillä toimijoilla on poltto-
moottorikäyttöistä sähkövoiman tuotantoa omaan käyttöön myös maakunnissa. Asi-
oiden näin ollen Liberia lienee yksi maailman köyhimmistä valtioista. Vaikkakin maalla on maantieteellisestä sijainnistaan ja ilmasto-olosuhteista johtuen merkittä-
västi hyödyntämiskelpoista vesivoimaa olemassa, niin sitä ei ainakaan tällä hetkellä
siellä hyödynnetä energian tuotannossa. Nykyisessä tilanteessa Liberiassa kaikki
sähköenergia tuotetaan Diesel-generaattoreilla olosuhteissa missä mm. auringon va-
loa olisi päivä aikaan helposti hyödynnettävissä sähkön tuotantoon. Lisäksi Liberi-
assa olisi energiantuotannossa helposti hyödynnettävissä olevia metsäbiomassoja.
Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan mainita luonnonkumin viljelyssä käytetyn kumi-
puun (Tyräkkikasvien heimoon kuuluva Parakautsupuu eli Hevea Brasiliensis) uu-
distusalat. Tällöin päätehakkukypsiltä ja jälleen kumipuun kasvatukseen uudistet-
tavilta viljelyaloilta tuleva, kumin tuotannosta poistuva, puuraaka-aine voitaisiin hy-
vin helposti hyödyntää maan energiantuotannossa.

Maassa on tällä hetkellä sähköntuotantoa varten asennettua diesel-generaattori tehoa
noin 22,6 MW, josta noin 16–18 MW on kulloinkin tuotannossa. Tällä tavoin Libe-
riassa tuotetun sähkön hinta on yksi korkeimmista maailmassa, esim. Lokakuussa
2012 se oli 0,52 USD / kWh. Lisäksi mainittakoon, että vuonna 2014 maan koko
väestöstä vain noin 4,1 %:lla oli jonkinlainen yhteismahdollisuus liittyä sähköverk-
koon. (https://energypedia.info/wiki/Liberia_Energy_Situation#Energy_Situation)

Aurinkosähkön lisäämiseksi yksityisellä sektorilla on Liberiassa viime vuosina to-
teutettu vain pienehköjä aurinkosähköhankkeita, esim. Monroviassa tai sen lähialu-
eella katujen valaisuun tai jonkin pienen, yksittäisen, kohteen sähkön tarpeen katta-
miseksi. Useimmat näistä aurinkosähköhankkeista on toteutettu kansainvälisen avun
turvin tai muutoin lahjoitusvaroin. Merkittävimpiä lahjoitusrahoittajia Liberian ener-
giahankkeissa ovat olleet USAID, UNDP ja eräät muut NGO - organisaatiot, kuten
Norjan, Ruotsin ja Tanskan ulkomaanavun hakkeisiin keskittyvät kansalaisjärjestöt.
Kaikkien infrastruktuuriin ja siten myös energian tuotantoon liittyvien hakkeiden to-
teuttamista maassa rajoittaa taloudellisten resurssien vallitseva niukkuus.

Edellä mainitun, Liberian valtion alueella yleisesti vallitsevan, käyttökelpoisen ener-
gian saatavuus pulman takia myös YK:n UNMIL-operaatio on pakotettu tuottamaan

kaiken käyttösähkön diesel-generaattoreilla. Kaiken kaikkiaan useimmissa meneillään olevissa kriisinhallintaoperaatioissa on huomattavia, tällä hetkellä hyödyntämättömiä, mahdollisuuksia siirtyä käyttämään paikallisia uusiutuvia energian lähteitä, esim. aurinko- ja tuulivoimaa. Toisaalta uusiutuva energia, mm. aurinko- ja tuulivoima sekä jätteiden hyötykäyttö, voisi siten toimia fossiilisia polttoaineita korvaavana energian lähteenä tai ns. täydentävänä, toissijaisena energian lähteenä. Useimmissa kriisinhallintaoperaatioissa ja niiden suunnitteluun ja toteutukseen liittyvissä organisaatioissa tarvitaan ensisijaisesti asennemuutosta, jotta uusituvan energian mahdollisuudet sekä kaiken kattava ympäristövaikutusten huomioiminen voitaisiin toteuttaa myös käytännössä. Kun tämä poliittinen valinta on ensin tehty, niin yleensä siitä seuraa se, että voimavaroja myöskin suunnataan riittävästi näiden päätösten toteuttamiseksi meneillään olevissa kriisinhallintaoperaatioissa tai pian alkamaan suunniteluissa uusissa operaatioissa.

Liitteessä 1. on kuvattu YK:n viime Joulukuussa meneillään olleet kriisinhallintaoperaatiot, valottaen toiminnan laajuutta YK:n rauhanturvatoimialan osalta. Vuodesta 1948 lähtien YK on toimeenpannut noin 70 rauhanturvaamisoperaatiota. Parhailtaan niitä on käynnissä 16, joissa palvelee 125 396 (4/2015) henkilöä. Sotilaiden määrä on yli 93 000. Poliiseja on yli 13 000. Suurimmat yksittäiset YK:lle joukkoja luovuttavia valtioita olivat Bangladesh (n. 9 400), Pakistan (n, 8 400) ja Intia (n. 8 100). Suomi oli sijalla 41. (UN DPKO 2015)

Seuraavassa on vielä yleisesti ja esimerkinomaisesti esitetty edellä mainittujen kahden eri kriisinhallintaoperaation alueella esiintyviä auringonsäteilymääriä:

Esim. 1, keskimääräinen auringonsäteilyn voimakkuus maanpinnan tasalla;

- meneillään oleva kriisinhallintaoperaatio; UNMIL, vuodesta 2003 alk.
- paikkakunta; Monrovia, Liberia
- aurinkosähköpaneelin suuntaus: suoraan etelään
- mitattu kWh / m² / vuorokausi

Kuukausi	Aurinkopaneelit asetettu 84° kulmaan pystysuoraan nähden = paras vuotuinen tuotto kiinteästi asennettuna	Aurinkopaneelit asetettu vaakasuoraan alustalle eli 90° kulmaan pystysuoraan nähden	Yksikkö
Tammikuu	5,61	5,08	kWh / m ² / vuorokausi
Helmikuu	5,70	5,42	kWh / m ² / vuorokausi
Maaliskuu	5,35	5,41	kWh / m ² / vuorokausi
Huhtikuu	5,03	5,16	kWh / m ² / vuorokausi
Toukokuu	4,72	4,69	kWh / m ² / vuorokausi
Kesäkuu	4,06	4,00	kWh / m ² / vuorokausi
Heinäkuu	3,85	3,82	kWh / m ² / vuorokausi
Elokuu	3,67	3,73	kWh / m ² / vuorokausi
Syyskuu	3,82	3,95	kWh / m ² / vuorokausi
Lokakuu	4,59	4,50	kWh / m ² / vuorokausi
Marraskuu	4,94	4,58	kWh / m ² / vuorokausi
Joulukuu	5,32	4,77	kWh / m ² / vuorokausi
Vuoden keskiarvo	4,72	4,59	kWh / m ² / vuorokausi

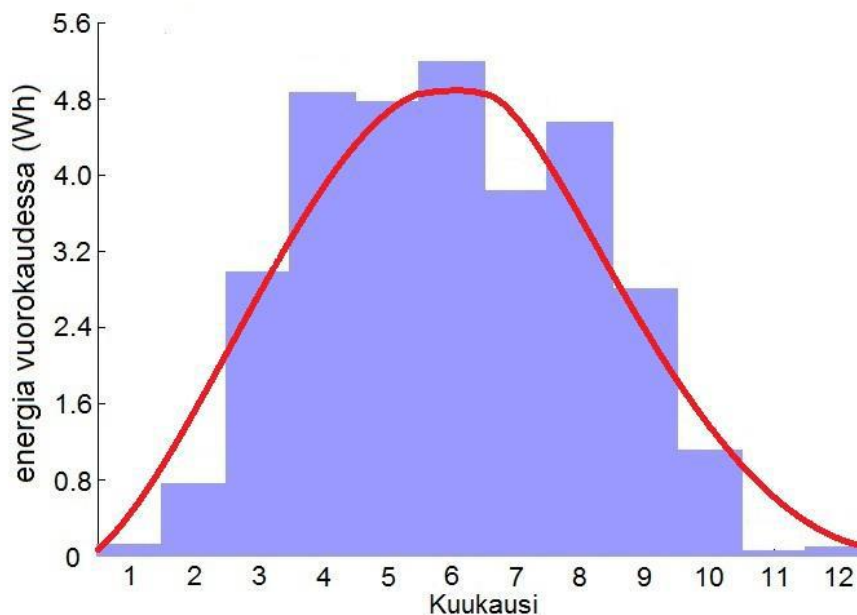
Ref: <http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html>

Vertailun vuoksi toisena esimerkkinä keskimääräinen auringonsäteilyn voimakkuus maanpinnan tasalla;

- meneillään oleva kriisinhallintaoperaatio; UNTSO, vuodesta 1948 alk.
- paikkakunta; Jerusalem, Israel
- aurinkosähköpaneelin suuntaus: suoraan etelään
- mitattu kWh / m² / vuorokausi

Kuukausi	Aurinkopaneelit asetettu 58° kulmaan pystysuoraan nähden = paras vuotuinen tuotto kiinteästi asennettuna	Aurinkopaneelit asetettu vaakasuoraan alustalle eli 90° kulmaan pystysuoraan nähden	Yksikkö
Tammikuu	3,89	2,80	kWh / m ² / vuorokausi
Helmikuu	4,43	3,51	kWh / m ² / vuorokausi
Maaliskuu	5,32	4,71	kWh / m ² / vuorokausi
Huhtikuu	6,04	5,94	kWh / m ² / vuorokausi
Toukokuu	6,38	6,95	kWh / m ² / vuorokausi
Kesäkuu	6,76	7,73	kWh / m ² / vuorokausi
Heinäkuu	6,69	7,49	kWh / m ² / vuorokausi
Elokuu	6,42	6,64	kWh / m ² / vuorokausi
Syyskuu	6,16	5,62	kWh / m ² / vuorokausi
Lokakuu	5,10	4,14	kWh / m ² / vuorokausi
Marraskuu	4,24	3,10	kWh / m ² / vuorokausi
Joulukuu	3,73	2,59	kWh / m ² / vuorokausi
Vuoden keskiarvo	5,43	5,10	kWh / m ² / vuorokausi

Ref: <http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html>



Kuva 1. Edellä olevien kahden esimerkin taulukoiden kuukausittaisen vaihtelun havainnollistamiseksi - pitkän aikavälin säteilyintensiteettikeskiarvoihin perustuva keskiarvotuotanto aurinkosähkövoimalalle Suomessa, jonka nimellisteho on 1 W. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 72)

Tässä opinnäytetyössä aurinkosähköjärjestelmän ohjeellisena investointi kustannuksena käytetään yksikköhintaa 2,33 €/W_p (2,60 USD/ W_p) ja se perustuu Yhdysvalloissa toimivan National Renewable Energy Laboratories kustannusanalyysiin vuodelta 2014. Keskimääräisenä ostosähkön hintana käytetään YK:n huolto-osaston, UNIFIL-operaation aurinkovoimahankkeen investoinnin laskentaperusteissa (liite 2.) mainittua, diesel-sähkön hintaa 0,234 €/KWh (0,26 USD / kWh)

Vertailun vuoksi, voidaan vielä toisen tutkimustietolähteen mainitsema järjestelmäoptimoitujen, stabiloitua verkkosähköä tuottavien, aurinkosähköjärjestelmien keskimääräinen investointikustannus Yhdysvalloissa; yksikköhinta 1,61 €/W_p (1,80 USD/W_p). (MIT; 2015, MIT analysis based on Solar Industry Association of America; Photon Consulting LLC; Feldman Margolis, and Boff; Bolinger and Weawer; and other industry and public sources.)

Tarkennuksen vuoksi on täsmennettävä, että edellä olevat hinnat ovat ns. teollisen mittakaavan aurinkosähköjärjestelmien hintoja, ilman arvonlisäveroa. Jos verrataan yksityistalouden tai vaikkapa pientaloasujan tarpeisiin tulevan, mittakaavaltaan pienemmän, järjestelmän kokonaishintaa hankittaessa, niin kustannustaso Yhdysvalloissa asettuu tasolle 2,90 €/W_p (3,25 USD/W_p). Tämän rinnalle vastaavaksi vertailuhinnaksi sopii ja samalla ehkä myös erääksi tavoitetasoksi, Euroopasta Saksan keskimääräisen järjestelmähinnan vuodelta 2014 mikä oli noin 1,83 €/W_p (2,05 USD/W_p). (MIT; 2015: The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, Solar PV Installations, s.100).

Lisäksi pelkkien piipohjaisten, kotimaassa valmistettujen aurinkosähköpaneelien viitehintana voitaneen pitää 1,00 €/W_p, Ex Works. (6/2015, Mr. Esa Areva, projektijohtaja, Areva Solar Oy)

Mainittakoon myös, että tätä opinnäytetyötä varten pyysin neljä erillistä tarjousta noin 50 kW_p hybridi-aurinkosähköjärjestelmästä Suomessa toimivilta aurinkosähköjärjestelmien toimittajilta. Yksikään, näistä tahoista keneltä sitä pyydettiin, ei vastannut tarjouspyyntöni. Tämän jälkeen soittamalla, 25.6.2015, eräälle Aalto-yliopiston FinSolar-projektin kv. työryhmään kuuluvalle järjestelmävalmistajalle sain suuntaa antavaa kustannustietoa.

3.1 Energiatohokkuuden ja elinkaariajattelun näkökulma

Koska energiatohokkuus ja sen huomioiminen, niin suunnittelussa kuin toiminnan tasolla ei tähän saakka ole kriisinhallintaoperaatioissa ollut tärkeysjärjestyksessä kovinkaan merkittävällä sijalla niin sen parantamisessa on nähtävissä, tällä hetkellä, hyödyntämätön potentiaali. Tähän näkökulmaan mm. aurinkoenergian lisäys sopii mainiosti, vaikka energian tuottaminen diesel-sähkögeneraattoreilla kenttäolosuhteissa on yhä suhteellisen edullinen sekä kenttäolosuhteet huomioiden joustava ja mobiili tuotantomuoto.

Tässä mielessä muutoksen käynnistäminen ja aikaan saaminen vaatii nykyisten toimintatapojen sekä ajattelutavan muutosta. Edellä olevan lisäksi tarvitaan luonnollisesti erityisesti tähän toimintaan kohdennettuja resursseja, niin taloudellisia kuin henkilöresurssejakin.

Mainittakoon myös, että energiantuotannon ja käytön lisäksi kriisinhallintaoperaatioista löytyy useita muitakin toiminnan osa-alueita, missä energiatehokkuuden ja elinkaariajattelun näkökulman huomioiminen voisi muuttaa toimintaa kokonaisuuden kannalta myös kustannustehokkaammaksi. Tästä yhtenä esimerkkinä voisi olla vaikkapa operaatioiden jätehuollon kehittäminen, nykyaikana niin usein esillä olevan kierrätys- ja hyötykäyttöajattelun mukaiseksi. Nykyisin esim. operaatioiden aikana syntyvän muovijätteen, mikä on määrällisesti merkittävä, uusiokäyttö joko kierrätykseen tai energiaksi on aivan toissijaisessa asemassa syntyvän jätteen uusiokäyttöarvoon nähden.

Viime vuosikymmenen aikana kertyneiden käytännön kokemusten pohjalta arvioidaan, että uusiutuvien energialähteiden, kierrätyksen ja hyötykäytön sekä elinkaariajattelun lisääminen kriisinhallintaoperaation toiminnalliseen konseptiin vähentäisi merkittävästi operaation aiheuttamia ympäristövaikutuksia, niin yleisellä tasolla kuin siitä johtuvia välittömiä ympäristövaikutuksia isäntämaan, usein kovinkin herkkään, luontoon.

4 TEORIA

4.1 Yleistä aurinkoenergiasta

Kautta ihmiskunnan historian, aurinkoenergiaa on hyödynnetty kotitalouksissa mm. lämmitykseen ja ruoan valmistukseen. Euroopassa niin Kreikkalaiset kuin Roomalaisetkin ovat todistettavasti käyttäneet auringon energiaa hyväkseen jo yli 2000 vuotta sitten. Vuonna 1772 Ranskalainen kemisti Antoine Lavoisier (1743 – 1794) kehitti oman versionsa aurinkolämmittimestä, missä auringon valo linssien avulla kohdistettiin tiettyyn pisteeseen. Tällä tavoin hän pääsi n. 1700 °C lämpötilaan, vrt. Platinan sulamispiste 1768 °C. Hänen keksintönsä oli tyypiltään ”optisten linssien avulla toimiva aurinkoenergian keräin” eli nykytermein CSP. (MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s 646)

Vuonna 1921 Saksalaisen Zeiss Yhtiöiden Rudolf Straubel työvereineen kehitti ensimmäisen nykyaikaisen, peiliheijastusmenetelmään perustuvan, aurinkokeskittimen. Tämän laitteen, lasista valmistettujen, halkaisijaltaan n. 183 cm (6 ft.) ja polttoväliltään n. 61 cm (2 ft.), parabolisten peilien avulla he saavuttivat noin 3000 °C lämpötilan. (Engineering and Science Magazine, February, 1956 Volume XIX)

Toinen suurimmista nykyisin käytössä olevista aurinkokokumentimista on Font-Romeu-Odeillo-Via'ssa, Ranskan ja Espanjan välisellä rajaseudulla, 1535 m korkeudella merenpinnasta, Pyreneiden vuoristossa sijaitseva CNRS:n hallinnoima Odeillon järjestelmä. Laitos otettiin tutkimuskäyttöön vuonna 1970. Sen tasopeilijärjestelmien ja parabolisen keskittimen avulla voidaan saavuttaa jopa 3500 C° lämpötila valon keskityspisteessä. Laitoksen sijaintipaikassa kertyy 300 aurinkoista päivää vuodessa, mikä tarkoittaa noin 2750 aurinkoista tuntia vuosittain. Laitoksen nimellisteho on noin 1000 kW. (CNRS; 2015, www.cnrs.fr)

Nyt jo yli sadan vuoden ajan on auringon energiaa yritetty aktiivisemmin hyödyntää ihmiskunnan käyttöön. Kuitenkin insinööritaidon, tieteen ja tutkimuksen edistymisen myötä vasta viimeiset 60 vuotta ovat olleet yhä kiihtyvemmän kehityksen aikaa aurinkoenergian alalla.

Nykyisin keskeisimmät aurinkoenergian hyödyntämisen teknologiat keskittyvät kolmeen osa-alueeseen, seuraavasti:

- suora aurinkolämpö joko passiivisia tai aktiivisia keräysmenetelmiä käyttäen
- aurinkolämmön hyödyntäminen keskitettyjen aurinkokokumentimien avulla (CSP = Concentrated Solar Power)
- suora auringon valon muuttaminen sähköksi valosähköilmiön avulla (PV = Photovoltaic)

(MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s. 646)

Nykyisen kaltaisten, valosähköilmiöön ja pn-liitokseen perustuvien, puolijohdemaateriaaleista valmistettujen aurinkosähkökennojen kehitys alkoi merkittävässä määrin vasta 1950 luvun alkupuolella Yhdysvaltain ja silloisen Neuvostoliiton avaruushjelmiin tehtyjen panostusten myötä.

Ensimmäinen nykyaikainen aurinkosähkökenno valmistettiin vuonna 1954 ja se otettiin käyttöön Yhdysvaltalaisessa Vanquard-avaruussatelliitissa vuonna 1958. (MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, s. 8)

4.2 Aurinko energian lähteenä

Meistä jokainen voi, ainakin kesäaikaan täällä Suomessa, tuntea ihollaan auringon valon energian sekä kokea sen vaikutukset inhimilliseen elämään. Seuraavassa käsitellään lyhyesti aurinkoa energian lähteenä ja säteilyn saapumista ilmakehän läpi maan pinnan tasalle.

Aurinko on maata lähinnä oleva tähti, jonka etäisyys maasta on noin 1.5×10^8 km. Suuruusluokkahahmotelma auringon valtavasta koosta saadaan, kun huomataan sen olevan halkaisijaltaan (1.4×10^6 km) yli 100-kertainen ja massaltaan (2.0×10^{30} kg) yli 330.000-kertainen maahan verrattuna.

Auringon arvellaan nykyisellään olevan suurin piirtein elinkaarensa puolivälissä. Kyse on siitä, että auringon energiantuotanto perustuu vedyn fuusioitumiseen heliumiksi, ja nykyarvioiden mukaan noin 50 % ytimen vetyvaroista on käytetty. Aurinko koostuu pääasiassa vedystä (71 %) ja heliumista (27 %) muiden alkuaineiden osuuden jäädessä noin 2 %:iin. Auringon iän arvellaan olevan noin 4.5×10^9 vuotta. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 10)

Auringon sisäsyntyinen energian lähde on sen ytimessä tapahtuva lämpöydin eli fuusioreaktiot, missä vety-atomin ytimet eli protonit yhtyvät helium ytimiksi nopeudella 4×10^9 massamuutosta sekunnissa (Hindrichs, 1996). Siis joka sekunti noin 600 miljoonaa tonnia vetyä fuusioituu noin 596 miljoonaksi tonniksi heliumia. Einsteinin suhteellisuusteorian $E=mc^2$ mukaisesti yhden sekunnin aikana siis noin 4 miljoonaa tonnia materiaa muuttuu energiaksi. Auringon teho arvioidaan olevan noin 383 jottawattia (YW), mikä vastaa sadan miljardin megatonnin tehoisen vetypommin räjähdystä joka sekunti. Tästä huolimatta suunnattomien mittasuhteiden vuoksi auringon ytimen tehotiheys on vain noin 0,272 wattia kuutiometriltä. Ytimessä syntyneen energian täytyy kulkeutua auringon ylempien kerrosten halki ennen vapautumistaan auringonvalona tai aurinkotuulen mukana. Auringon fuusioreaktioiden seurauksena sen näkyvän pintakerroksen - valokehän eli fotosfäärin pintalämpötila on noin 5500 - 6000 °C. Tämä noin, 100 km vahvuinen, pintakerros säteilee energiaa valonnopeudella ympäröivään avaruuteen sähkömagneettisen säteilyn kaikilla aallonpituuksilla, pääasiassa näkyvänä valona ja infrapunasäteilynä sekä jonkin verran myös ultraviolettisäteilynä. (MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s. 647)

Edellä mainitusta suhteellisuusteoriasta tutuksi tulleen yhtälön avulla päästään arvioimaan auringon energian tuotantoa:

$$E = mc^2 \quad (1.0)$$

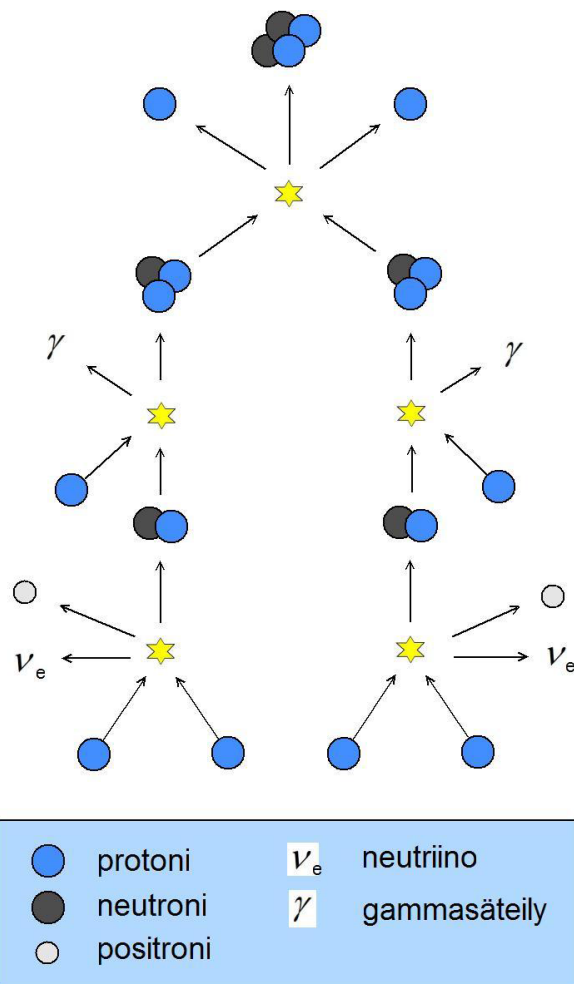
Missä m = massa ja c on valonnopeus. Tästä päästään kiinni auringon fuusioreaktion tehoon, koska tiedetään, että yllä mainittu massan muutos energiaksi tapahtuu joka sekunti. Täten auringon fuusioreaktion tehoksi saadaan noin 3.6×10^{26} W. Vedyn muuttuminen fuusioreaktiossa heliumiksi voi tapahtua useita reittejä.

Auringon energiantuotannon kannalta tärkein reitti on protoni-protoni-sykli, joka alkaa kahden protonin, eli vety-ytimen, fuusioitumisella ja päättyy helium-4-ytimen syntymiseen. Protoni-protoni-sykliä voidaan kuvata reaktioyhtälöillä;



Missä p on protoni, e^+ positroni ja D deuterium, joka on neutronin sisältävä vety-ytimen isotooppi. Positroni on elektronin antihyökkänen, jolla on sama massa kuin

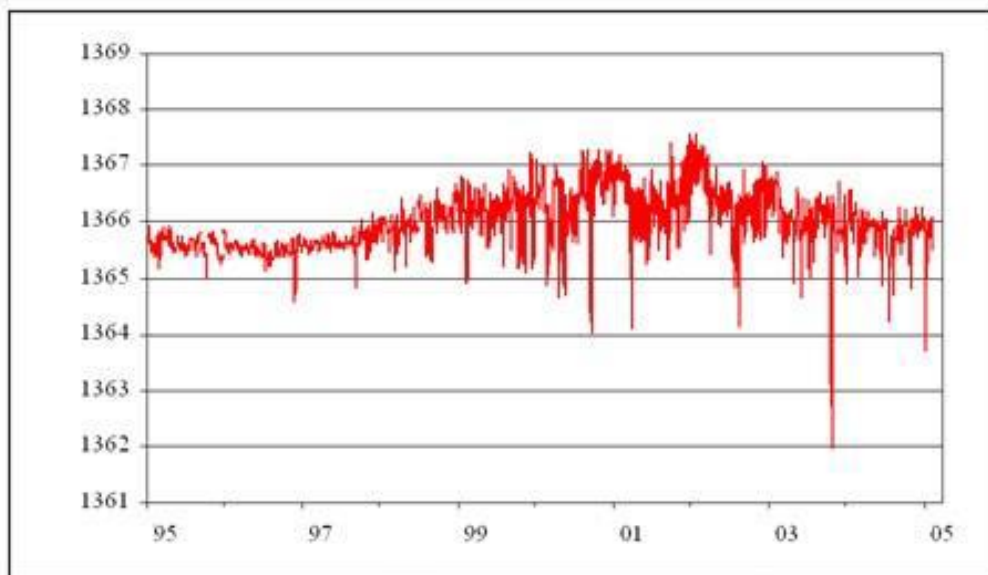
elektronilla mutta vastakkaismerkkinen varaus. Yhtälössä (1.1) esiintyvä ν_e on neutriinoksi kutsuttu alkeishiukkanen, ja yhtälön (1.2) γ kuvaa reaktiossa vapautuvaa gammasäteilyä. Protoni-protoni-sykli päättyy yhtälön (1.3) mukaisesti kahden ${}^3\text{He}$ -ytimen yhdistyessä. Tällöin syntyy protonien lisäksi ${}^4\text{He}$ -ydin. Näiden helium-isotooppien ero on siinä, että molemmissa on kaksi protonia, mutta ${}^4\text{He}$:ssä on kaksi neutronia ${}^3\text{He}$:n yhden neutronin sijaan. Täten kahdesta protonista on lopulta syntynyt ${}^4\text{He}$ -ydin.



Kuva 2. Protoni-protoni-sykli havainnollistettuna, tähän sykliin perustuu valtaosta auringon energiantuotannosta. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 12)

Auringosta peräisin oleva sähkömagneettisensäteily kulkee 8,3 minuutissa avaruudessa 150 miljoonan kilometrin matkan ennen kuin se saavuttaa maapallon yläilmakehän. Valtavasta etäisyydestä johtuen auringonsäteily osuu kaikkialle maapallon yläilmakehään jokseenkin samansuuntaisesti. Sen vuoksi aurinkoa voidaan pitää yhdensuuntaisen valon lähteenä. Ilmakehän yläosiin saapuvan auringonsäteilyn määrä eli intensiteetti on keskimäärin 1.366 W/m^2 ; tätä arvoa nimitetään *aurinkovakioksi*. Sen intensiteetti vaihtelee noin $\pm 3,3 \%$ vuosittain johtuen maan lievästi elliptisestä

kiertoradasta. Lisäksi auringon toiminnan syklisyys aiheuttaa pientä vaihtelua saapuvan säteilyn määrään mikä on vähemmän kuin +/- 0,1 % auringon 11 vuoden mittaisen auringonpilkku syklin aikana. (MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, the Solar Resource, s. 254)



Kuva 3. Mitattuja aurinkovakion arvoja, W/m^2 , vuosina 1995 -2005. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 12)

Riippuen vuoden-, vuorokaudenajasta, sijainnista ja kulloinkin vallitsevasta säästä se säteilyn määrä mikä lopulta saavuttaa maanpinnan vaihtelee välillä 0 – 1.050 W/m^2 . Lisäksi maan ilmakehä vaikuttaa suodattimen lailla myös maanpinnalle saapuvan auringonsäteilyn spektriin (kirjo), siis siihen mitä aallonpituuksia kulloinkin pääsee maanpinnalle asti. Karkeasti arvioiden noin puolet yläilmakehään saapuvasta auringon säteilystä etenee maan pinnan tasalle saakka. Tästä määrästä noin 21 % tulee maan pinnalle saakka suorana säteilynä sekä noin 29 % epäsuorana, heijastuneena ja hajasäteilynä. (MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s. 53)

Sähkömagneettisella säteilyllä on sekä aaltoliikkeen että hiukkasten ominaisuuksia. Sähkömagneettisen säteilyn energia on kvantittunut. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ettei säteilyn energia voi saada mitä tahansa arvoja, vaan yksittäisellä aallonpituudella kokonaisenergia on tietyn energiakvantin monikerta. Sähkömagneettisen säteilyn massatonta perushiukkasta, joka määrittää aallonpituudesta riippuvan energiakvantin, kutsutaan fotoniksi.

Fotonin energian W_f riippuvuutta sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudesta kuvataan yhtälöllä:

$$W_f = hc / \lambda \quad (2.0)$$

Missä; h = Planckin vakio, 6.626×10^{-34} Js, c = valonnopeus ja λ = aallonpituus.

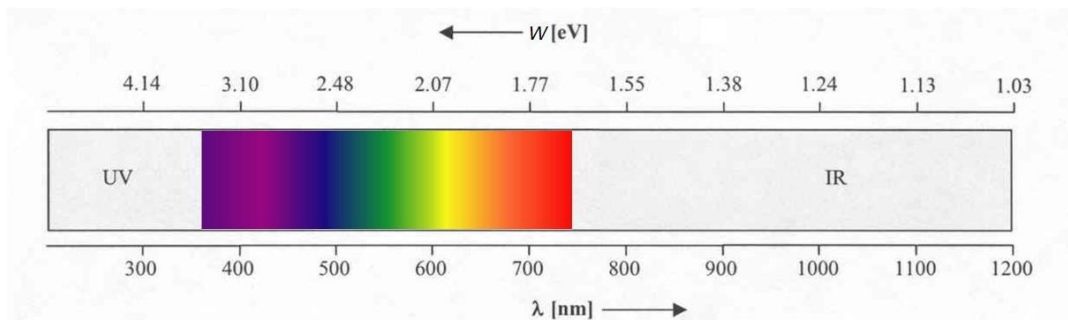
Auringon säteilyintensiteettijakaumassa aallonpituus vaihtelee likimain välillä 250 - 2500 nm, joten fotonin energia on tällöin noin 8×10^{-20} - 8×10^{-19} J. Elektronivoltteina vastaava energiaväli on likimain 0.5 - 5 eV (*). Fotonin energia vaikuttaa merkittävästi säteilyn vaimenemiseen ilmakehässä, sillä ilmakehän molekyylien kyky absorboida säteilyenergiaa riippuu oleellisesti fotonin energiasta ja siten säteilyn aallonpituudesta.

Kuvassa 4. on esitetty auringonsäteilyn likimääräinen aallonpituusalue sekä fotonin energian riippuvuus aallonpituudesta. Sähkömagneettisen säteilyn taajuuden f ja aallonpituuden välillä on riippuvuus:

$$c = f\lambda \quad (2.1)$$

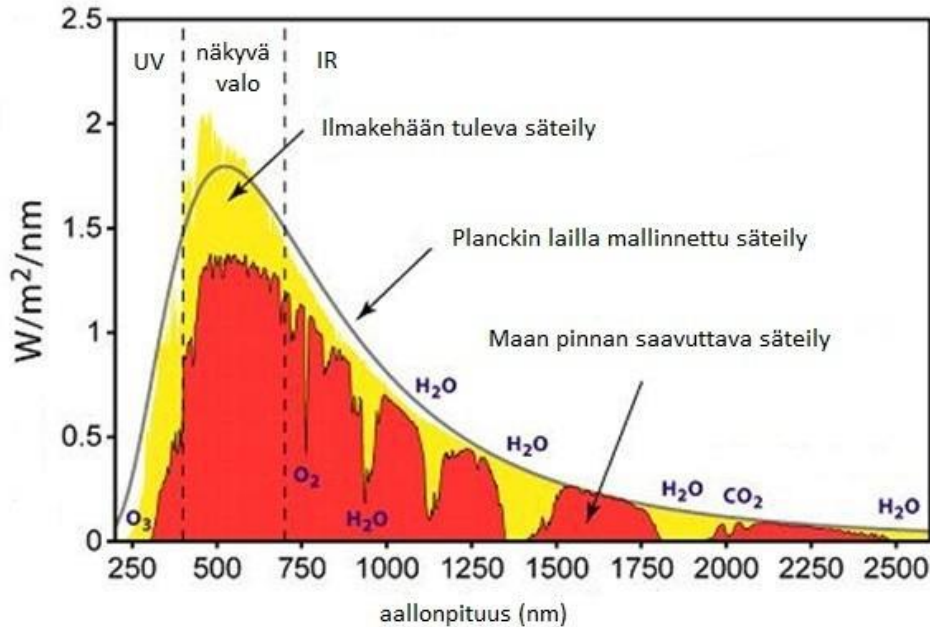
Ihminen aistii sähkömagneettisesta säteilystä vain tietyn aallonpituusalueen. Lämpö- eli infrapunasäteily (IR) on sähkömagneettisen säteilyn spektristä se aallonpituusalue, jonka ihminen aistii lämpönä. Tällöin puhutaan yleensä 700 nm:n ylittävästä aallonpituusalueesta. Kun ihminen altistetaan tälle pitkäaaltoiselle sähkömagneettiselle säteilylle, seurauksena on lämpövaikutus. Kun säteilyn aallonpituudessa ollaan likimain välillä 350–700 nm, puhutaan näkyvästä valosta. Tämä on se sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusväli, jonka ihminen pystyy aistimaan silmillään.

Näkyvän valon eri aallonpituudet edustavat ihmisen silmän kannalta eri värejä. Kun mennään edelleen pienempiin sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksiin, välillä 100–350 nm puhutaan ultraviolettisäteilystä (UV). Ihminen ei havaitse välittömästi altistumista tämän aallonpituusalueen sähkömagneettiselle säteilylle, mutta viiveellä altistus on havaittavissa ihon ruskettumisena tai palamisena. Korostettakoon, ettei sähkömagneettisen säteilyn spektri tokikaan rajoitu kuvassa 4. esitettyyn alueeseen, vaan kyseessä on se aallonpituusalue, jota auringon lähettämä sähkömagneettinen säteily edustaa. Esimerkiksi gamma-säteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituusalue on alle 10 pm. Tällöin fotonilla on jo niin paljon energiaa, että säteily pystyy ionisoimaan ihmiskehon atomeja ja on siksi tuhoisaa eläville soluille.



Kuva 4. Auringonsäteilyn aallonpituus- ja taajuusalueet

(*) 1 eV vastaa energiaa, joka tarvitaan elektronin siirtämiseen 1 V:n jännitteen yli: $1 \text{ eV} = 1.6021773 \times 10^{-19} \text{ J}$.



Kuva 5. Auringonsäteilyn vaimentuminen ilmakehän kaasujen vaikutuksesta.

Kun tarkastellaan ilmakehän ulkopuolista säteilyä kuvasta 5., havaitaan, että Planckin lailla mallinnettu ja todellinen intensiteettijakauma ovat varsin lähellä toisiaan. Maan pinnan saavuttavassa säteilyssä havaitaan yleinen intensiteetin pienentyminen, mutta sen lisäksi tietyillä säteilyn aallonpituuksilla on tapahtunut erityisen voimakasta vaimenemista. Yleinen intensiteetin pienentyminen on pääosin seuraus säteilyn heijastumisesta ilmakehässä. Toisin sanoen osa ilmakehään tulevasta säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen. Voimakkaat intensiteetin pienenemiset liittyvät siihen, että sähkömagneettinen säteily luovuttaa osan energiastaan ilmakehän molekyyleille.

Maan pinnan saavuttava säteily jaetaan yleensä suoraan ja diffuusiin säteilyyn. Suoralla säteilyllä tarkoitetaan sitä osaa auringonsäteilystä, joka läpäisee ilmakehän siroamatta. Diffuusi säteily on pilvistä ja ilmakehän molekyyleistä sironnutta säteilyä. Suoran ja diffuusin säteilyn osuudet riippuvat voimakkaasti sääolosuhteista ja ilmakehän pilvisyydestä, joten yleispäteviä lukemia niiden osuuksista on vaikea antaa. Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta, että kirkkaana päivänä diffuusin säteilyn osuus voi olla luokkaa 10–20% maan pinnan saavuttavasta kokonaissäteilystä, kun vastaava lukema pilvisenä päivänä voi nousta yli 90 %:n. Teoriassa suoran ja diffuusin säteilyn osuuksilla on merkitystä aurinkokennon toiminnan kannalta, sillä niiden energiaspektrit poikkeavat jonkin verran toisistaan. Käytännössä erot aallonpituusjakaumissa ovat kuitenkin energiantuotannon kannalta lähes merkityksettömiä, jos säteilyn kokonaisintensiteetti ei muutu.

Maan pinnalla säteilyintensiteettilukemat jäävät selvästi aurinkovakiota pienemmiksi. Käytännössä säteily vaimenee ilmakehän vaikutuksesta siten, että kirkkaana kesäpäivänä maan pinnalla päästään parhaimmillaan noin 1000 W/m^2 :n säteilyinten-

siteettiin. Lukema luonnollisesti vaihtelee, 0 – 1050 W/m² välillä, mm. maantieteellisen sijainnin mukaan ja on suurimmillaan päiväntasaajalla, jossa aurinko paistaa keskipäivällä zenitiksi kutsutusta taivaan lakipisteestä. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 16 – 17 ja s. 20 - 21)

4.3 UE-tietokanta – the National Renewable Energy Laboratory, NREL

Tämän opinnäytetyön myötä koin myös todellisen yllätyksen ja oppimisen iloa, kun aiheeseen liittyvää tietoa eri lähteistä etsiessäni ja kootessani lopulta tajusin kuinka valtavan työn sekä koko maailman kattavan tietokannan ja online-työkalujen valikoiman Yhdysvaltain hallituksen energiaministeriön, Golden, Coloradossa sijaitseva, uusituvan energian laboratorio on vuosien mittaan mm. aurinkoenergiaan liittyen luonut. (The United States Department of Energy's – National Renewable Energy Laboratory eli NREL at Golden, Colorado). Tämä tietopankki löytyy internetistä os: www.nrel.gov. (Lisäksi: John Wiley & Sons Inc.; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, s. 141)

Tutustuttuani NREL:n internetsivuilla tarjolla olevien tietokantojen ja laskentavälineiden määrään arvioin, pelkästään jo heidän tarjoavan tällä hetkellä kohtuulliset suunnittelun työkalut mikäli tässä työssä käsiteltyjä aurinkoenergia järjestelmiä jouduttaisiin käytännössä suunnittelemaan ja mitoittamaan kenttäolosuhteisiin, johonkin kriisinhallintaoperaatioon, jossain päin maailmaa. Opinnäytetyössäni, jäljempänä, NREL:n PV Watts – on-line-laskinta on käytetty kun esimerkin mukaisen aurinkosähköjärjestelmän vuotuista energian tuotantomäärä on arvioitu.

4.4 Aurinkokennon ja aurinkopaneelin toimintaperiaate

Yksittäinen valosähköilmiöön perustuva aurinkokenno on aurinkosähköjärjestelmän keskeisin komponentti. Kun useita yksittäisiä aurinkokennoja kytketään yhteen moduuleiksi ja näitä moduuleja liitetään edelleen esim. tasolevyille saadaan aikaan aurinkopaneeli. Suurissa aurinkosähköjärjestelmissä saattaa olla jopa tuhansia aurinkopaneeleita yhteen kytkettynä jonkin tietyn tehontarpeen / kuorman kattamiseksi.

Valosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan yleensä sähköisiä muutoksia valolle altistetussa kappaleessa. Pohjimmiltaan kyse on kuitenkin sähkömagneettisen säteilyn ja varausten välisestä vuorovaikutuksesta, jota tapahtuu kaikilla sähkömagneettisen spektrin aallonpituuksilla. Auringonsäteilyn vaimeneminen ilmakehässä on yksi esimerkki valosähköisestä ilmiöstä, sillä auringosta tuleva sähkömagneettinen säteily luovuttaa osan energiastaan ilmakehän varauksille. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 24)

Valosähköisessä ilmiössä aineen elektronit saavat energiaa sähkömagneettiselta säteilyltä. Siksi elektronin energia on oleellinen käsite valosähköisen ilmiön ymmärtämisessä. Jos aineeseen tulevan fotonin energia (valon energia) on riittävän suuri, se

pystyy irrottamaan kappaleen pinnasta elektroneja. Tätä kappaleeseen kohdistuvan valon kykyä synnyttää kappaleesta irtoava elektronivirta sanotaan valosähköiseksi ilmiöksi – Engl. photovoltaic effect (PV). Jos fotonin energia hf on suurempi kuin elektronin irrottamiseen tarvittava työ W_0 , se antaa irtoavalle elektronille liike-energian jonka, jonka maksimi arvo saadaan oheisesta kaavasta, (3.0). Elektronien nopeus ei kasva säteilyintensiteetin kasvaessa, mutta aikayksikössä irtoavien elektronien lukumäärä sen sijaan lisääntyy.

$$1/2m_e v^2_{max} = hf - W_0 \quad (3.0)$$

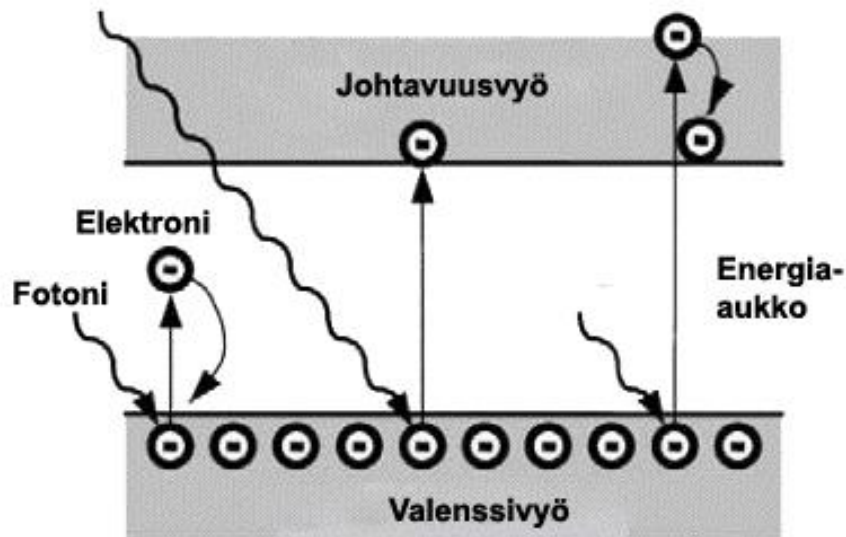
Missä, hf = fotonin energia, W_0 = irrotustyö, m_e = elektronin massa.

(Genesis-Kirjat Oy; 10/2007, Esko Valtanen, Matematiikan ja Fysiikan käsikirja, 2. painos, s. 243)

Kiinteiden aineiden sähkönjohtokyky vaihtelee suuresti. Tämän perusteella kiinteä aineet jaetaan *johteisiin* eli metalleihin, *puolijohteisiin* ja *eristeisiin*. Nämä erot voidaan suureksi osaksi selittää aineiden atomien energiakaistarakenteen avulla. Perussääntö on, että johteissa jokin energiakaista on vain osaksi tai kokonaan täytetty ja valenssi- ja johtavuusvyöt voivat olla limittäin. Elektronit voivat liikkua kiteissä ja aiheuttaa elektronijohtavuuden osittain miehityllä johtavuusvyöllä. Eristeissä taas ylimmän täyden kaistan ja alimman tyhjän kaistan välissä on merkittävä energiarako – engl. band gap. Lisäksi eristeillä ja puolijohteilla tilanne eroaa siinäkin mielessä, että matalissa lämpötiloissa, $T \sim 0$ K, valenssivyö on täynnä ja johtavuusvyö tyhjä. (Oulun Yliopisto; 2014, Erkki Thuneberg, Fysiikan laitos, Kiinteän aineen fysiikka - opetusmateriaalit, s. 21)

Ero eristeiden ja puolijohteiden välillä on energia-aukon suuruus. Eristeillä elektronin nostamiseen valenssivyöltä johtavuusvyölle tarvitaan suuri määrä energiaa suuren energia-aukon vuoksi ($E_g \geq 3$ eV). Puolijohteilla johtavuusvyö on eristeiden tapaan tyhjä, mutta pienemmän energia-aukon vuoksi ($E_g < 3$ eV) elektronit nousevat helpommin johtavuusvyölle. Puolijohteilla pelkkä lämpö riittää nostamaan elektroneja johtavuusvyölle ja lämpötilan noustessa elektroneja nousee yhä enemmän johtavuusvyölle. Siksi puolijohteen sähkönjohtavuus kasvaakin lämpötilan funktiona. Myös fotonit, joiden energia on energia-aukkoa suurempi, voivat nostaa elektroneja johtavuusvyölle. Tätä on havainnollistettu kuvassa 6. Vastaavasti fotoni, jonka energia on energia-aukkoa pienempi, ei voi nostaa elektronia johtavuusvyölle. Mikäli taas fotonin energia on energia-aukkoa suurempi, elektronin noustua johtavuusvyölle fotonin energiasta energia-aukon ylittävä osuus muuttuu lämmöksi.

Tietyissä puolijohteissa auringonsäteily sen sijaan saa aikaan aineen sähköisen käyttäytymisen kannalta merkittäviä muutoksia, minkä vuoksi puolijohteet ovat nykytietämyksen mukaan parhaita materiaaleja valosähköisen ilmiön hyödyntämiseen.



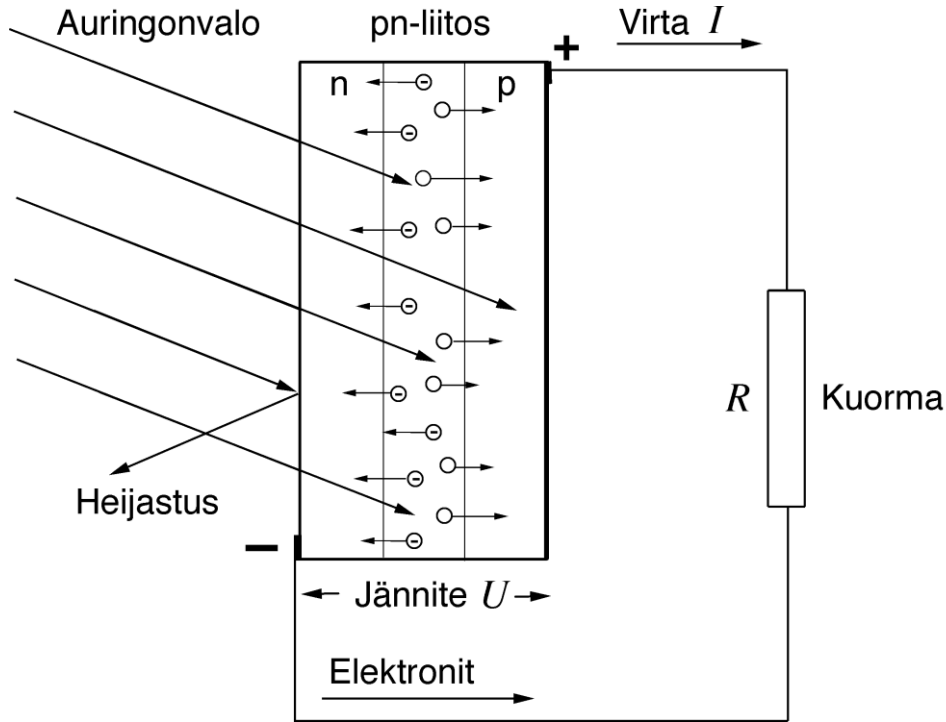
Kuva 6. Valon energia nostaa elektronin valenssivyöltä johtavuus vyölle

(Tuomas Lapp; 2009, Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä, s. 22 ja John Wiley & Sons; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, s. 226)

Perinteisten puolijohdeaurinkokennojen toiminta perustuu valosähköisen ilmiön lisäksi pn-liitokseen. Kirjain "p" (positive) viittaa p-tyyppin puolijohdeeseen, jossa atomien välisiin sidoksiin ilmestyy puolijohde seostamisen seurauksena ylimääräisiä tyhjiä elektronipaikkoja. Vastaava n-tyyppi (negative) on puolijohde, jossa kiderakenteesta irronneiden elektronien lukumäärää on kasvatettu seostamalla.

Aurinkokennossa on siten yhdistetty kerroksittain kaksi erityyppistä puolijohdemateriaalia, p- ja n-tyytit. Kun auringon valo osuu aurinkokennoon, niin osalla valohiukkasista (fotoni) on niin suuri energia, että ne pääsevät aurinkokennon pn-liitokseen ja voivat siellä muodostaa ns. elektroni-aukkopareja. Lähellä pn-liitosta muodostuvista pareista elektronit kulkeutuvat n-puolelle ja aukot p-puolelle. Rajapintaan muodostuneen sähkökentän vuoksi elektronit voivat kulkea vain tiettyyn suuntaan. Elektronien on kuljettava ulkoisen johtimen kautta p-tyyppin puolijohdeeseen, missä ne vasta voivat yhdistyä sinne kulkeutuneiden aukkojen kanssa. Toisin sanoen fotonien absorptio synnyttää sähkövirran aurinkokennon puolijohdemateriaalien pn-liitokseen. Auringonvalolla valaistun liitoksen eri puolilla on siten jatkuvasti vastakkaismerkkiset varauksen kuljettajat, ja näin ollen, liitos voi toimia ulkoisen piirin jännitelähteenä. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 35 - 38)

Aurinkokennon toimintaperiaate on esitetty seuraavassa kuvassa 7.



Kuva 7. Aurinkopaneelin toimintaperiaate

Aurinkosähkökennossa käytetyt n- ja p-tyypin Pii-materiaalit saadaan aikaiseksi seostamalla epäpuhtauksia puhtaaseen Piihin. Negatiivinen eli n-tyypin Pii syntyy kun puhtaaseen materiaaliin seostetaan haluttu epäpuhtaus eli ns. ”dopataan”, tässä tapauksessa sekoitetaan pieni määrä Fosforia (P). Ja vastaavalla menetelmällä tehdään myös positiivinen eli p-tyypin Pii aurinkosähkökennoa varten, tässä tapauksessa puhtaaseen Piihin sekoitetaan pieni määrä esimerkiksi Booria (B). (MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s. 678)

Yhden aurinkokennon antama jännite on tyypillisesti 0,5 – 0,6 V. Käyttötarpeen mukaan kennoja sarjaan kytkemällä, siis moduuleiksi ja aurinkopaneeleiksi, saadaan aikaiseksi haluttu jännitetaso. Esimerkiksi 36 kennon paneelilla saadaan jo riittävä jännite, esim. 12 V:n akkujen lataamiseksi. Aurinkokennosta saatu sähkövirta on verrannollinen muodostuvien elektroni-aukkoparien lukumäärään. Sen vuoksi saatu sähkövirta riippuu kennon pinta-alasta ja auringon säteilyn voimakkuudesta. Jos kennot on kytketty sarjaan, on aurinkopaneelistä saatava virta yhtä suuri kuin yhden kennon tuottama virta. (Suntekno Oy; 2015, aurinkopaneelin toimintaperiaate.pdf)

Hyvissä auringon säteilyolosuhteissa säteilyn määrä aurinkopaneelin pinnalla voi olla jopa $1 \text{ kW}_e/\text{m}^2$, tällöin paneelin aurinkosähkökennot tuottavat noin $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$ sähkövirran.

Aurinkokennon sähkötehon tuotto, ($P = I \times U$), on lähes suoraan verrannollinen kennoon tulevan auringonsäteilyn määrään. (John Wiley & Sons Inc.; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, s. 233)

Aurinkopaneelien tehot ilmoitetaan tietyissä, vakioituissa, olosuhteissa, jotta niitä voitaisiin vertailla keskenään. Nämä standardi testiolosuhteet (STC) ovat:

- 1) Auringon säteilyn voimakkuus 1000 W/m^2
- 2) Paneelin lämpötila $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3) Auringonvalon spektri ja säteilyvaikutus vakioitu ilmamassalle $1,5 \text{ AM}$ (Tällöin se vastaa auringon asemaa $41,81 \text{ }^\circ$ horisontin yläpuolella)

Edellisen lisäksi valmistajat antavat useimmiten aurinkopaneeleille tehontuottoarvot todellisen käyttölämpötilan kaltaisissa olosuhteissa eli NOCT-määritysten mukaan. Tämä siksi, että normaalin toiminnan aikana aurinkopaneelin kennojen lämpötila on yleensä huomattavasti korkeampi kuin $25 \text{ }^\circ\text{C}$, jos säteilyn intensiteetti on korkea.

Tällöin mittaukset tehdään olosuhteissa, missä:

- NOCT – tarkoittaa todellista kennon lämpötilaa, kun $G = 800 \text{ W/m}^2$ ilman lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja tuulennopeus 1 m/s
- Kiteisillä Pii-aurinkokennoilla NOCT asettuu yleensä välille $40 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$

Valosähköisessä ilmiössä energia välittyy yhden kvantin, fotonin, kokoisina annoksina yksittäiselle elektronille. Elektroni ei siis voi kerätä irtoamiseen tarvitsemaansa energiaa useilta fotoneilta, vaan sen on saatava se yhtenä paketina. Voidaan ajatella, että fotonit antavat elektroneille tietyn suuruisia iskuja: jos elektroni ei irtoa yhdellä iskulla, se ei irtoa lainkaan, vaikka sitä kuinka pommitettaisiin.

Säteilykvantin eli fotonin energian täytyy olla tarpeeksi suuri, että se voisi irrottaa elektronin. Jotta elektroni irtoaisi, tarvitaan tietty määrä energiaa. Tämä energia, irrotustyö W , on ominainen kullekin materiaalille. Jotta elektroni irtoaisi fotonilla täytyy siis olla vähintään energia W_0 . Fotonin energia, E , voidaan laskea sen taajuuden tai vaihtoehtoisesti aallonpituuden avulla yhtälöllä;

$$E = hf = hc / \lambda \quad (4.0)$$

missä $h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J sec}$ (= Planckin vakio), f = saapuvan säteilyn taajuus, c = on valon nopeus tyhjiössä ($= 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$) ja λ sen aallonpituus.

Edellä olevasta havaitaan, että valon aallonpituuden täytyy olla tarpeeksi lyhyt, jotta elektroni irtoaisi. Jos fotonin energia on suurempi kuin irrotustyö, loput fotonin energiasta muuttuu irronneen elektronin liike-energiaksi. (Aalto Yliopisto; 2015, <http://per.physics.helsinki.fi/FTK2011/Valosahkoilmio.pdf>).

Elektronin irrottamiseen tarvittavaa energia riippuu kulloinkin käytössä olevasta materiaalista mihin sähkömagneettinen säteily kohdistuu ja sen kuvaamiseen käytetään yksikköä elektronivoltti eV.

Seuraavassa joidenkin materiaalien ja eräiden aurinkosähköpaneelissa käytettyjen alkuaineiden / yhdisteiden ominaisuuksia vertailtuna, elektronin irrotus energian W_0 (Band Gap Energy) suhteen:

Taulukko 1., Valosähköisten materiaalien (oranssi täyttöväri) tyypillisiä elektronin irrotus energioita (Band Gap Energies). (John Wiley & Sons Inc.; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, John Wiley & Sons Inc. 2010, s. 227 ja MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, the Photovoltaics Primer, s. 276 sekä Oulun Yliopisto, 2014, Erkki Thuneberg, Fysiikan laitos, Kiinteän aineen fysiikka - opetusmateriaalit, s.21)

Materiaali	”Band Gap” energia, eV
Metallit	0
Indium Antimoni, InSb	0,17
Lyijy Sulfaatti, PbS	0,4
Germanium, Ge	0,67
Pii, Si	1,11-1,12
Kadmium Telluriitti, CdTe	1,44
Kadmium Sulfiitti, CdS	2,42
Kupari Indium Diselenidi, CuInSe ₂	1,01
Gallium Arseeni, GaAs	1,40
Gallium Fosfaatti, GaP	2,24
Indium Fosfaatti, InP	1,27
Hiili, C, timantti-muodossa	5,5
Ruokasuola, NaCl	9,0
Piidioksidi, SiO ₂	11,0
Litium Fluoridi, LiF	13,6

Esimerkiksi Piille (Si) voidaan laskea tarvittava valon aallonpituus mikä vastaa eo. taulukossa mainittua Piin irrotusenergiaa, 1,11 – 1,12 eV, seuraavasti:

Käytetään edellä esitetystä kaavasta (4.0) johdettua kaavaa:

$$\lambda = hc / E \quad (4.1)$$

$$= 6,625 \times 10^{-34} \text{ J sec} \times 3 \times 10^8 \text{ m/sec} \times (1 / 1,11 \text{ eV}) \times (\text{eV}/1,6 \times 10^{-19} \text{ J})$$

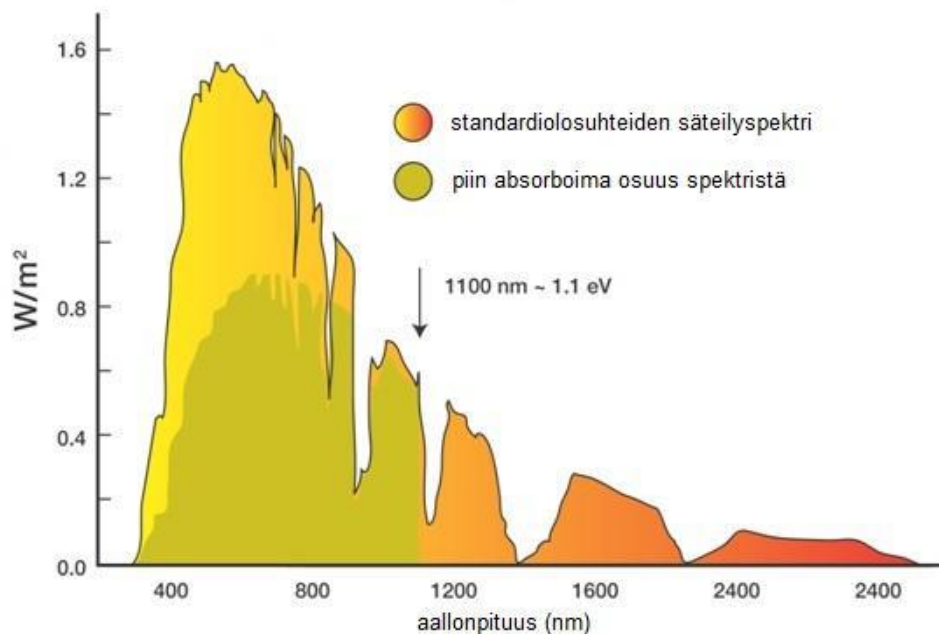
$$= 1,1183 \times 10^{-6} \text{ m} = 1,12 \text{ } \mu\text{m}$$

Tämän mukaan valon aallonpituudella 1,12 μm on riittävä energia elektronin irrottamiseen Piissä (Si). (John Wiley & Sons Inc.; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, s. 228)

Näkyvän valon alueen fotonien energia ulottuu energiasta 1,6 eV energiaan 3,2 eV, ks. myös kuva 4. (Teknillinen Korkeakoulu, Espoo; 2015, Fysiikan opetusmoniste, luku 7.10 Sähkömagneettisen säteilyn ja kiteisen aineen välinen vuorovaikutus, s.338)

Suurin aallonpituus, millä fotoni saa aikaan elektroni-aukkoparin Piissä (Si) on 1,15 μm . Sitä vastaava valo on lyhytaaltoista infrapunasäteilyä, jonka aallonpituus on lähellä näkyvän alueen rajaa. Säteily, minkä aallonpituus on suurempi kuin 1,15 μm ainoastaan kuumentaa kennoja, mutta ei synnytä sähkövirtaa. Lisäksi Pii-kennot eivät pysty hyödyntämään lyhytaaltoista Ultraviolettivaloa. (Suntekno Oy, 2015, aurinkopaneelin toimintaperiaate.pdf)

Voidaan verrata edellä olevaa seuraavaan kaavioon, koskien auringon säteilyn spektriä:



Kuva 8. Standardiolosuhteiden, STC, säteily spektri ja piin absorboima osuus säteily spektristä, mikä siten kuvaa hyvin myös kiteisen pii (Si) aurinkokennon – kennon absorptioaluetta. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 35)

4.5 Aurinkopaneelin hyötysuhde

Aurinkosähkökenno on aurinkopaneelin hyötysuhteen kannalta keskeinen komponentti ja samalla myös suurin yksittäinen kustannustekijä mm. käytettävistä materiaaleista ja valmistustekniikoista johtuen. Toisaalta koko aurinkosähköjärjestelmää ajatellen siihen liittyy myös lukuisia muita komponentteja jotka on oltava keskenään tasapainossa, jotta koko järjestelmän sähkötehon tuotto voidaan optimoida.

Näitä komponentteja ovat virtaliitännät, johdotukset, tehon käsittely ja säätölaitteet, ohjauslaitteet sekä jakeluverkkoon liityntäpisteiden komponentit. Lisäksi energian varastointilaitteiden, yleensä akkujen, ominaisuuksilla on vaikutusta koko järjestelmän tehon tuottoon, silloin kun niitä on liitetty järjestelmään.

Alla esitetyt teoreettiset hyötysuhteet on kullekin materiaalille, useimmiten yhdelle aurinkokennolle, optimoiduissa laboratorio olosuhteissa mitattuja teoreettisia hyötysuhteita. Käytännön olosuhteissa saatavat aurinkosähköpaneelijärjestelmien hyötysuhteet jäävät alhaisemmiksi.

Taulukko 2., Teoreettisia ja mitattuja hyötysuhteita yleisesti tunnetuilla aurinkosähkökennojen materiaaleilla. (John Wiley & Sons Inc.; 2010, *Alternative Energy Systems and Applications*, B.K. Hodge, s. 229).

Materiaali	Teoreettinen hyötysuhde %	Mitattu hyötysuhde %
Pii, Si	24	18
Kadmium Telluriitti, CdTe	21	7
Kadmium Sulfiitti, CdS	16	7
Kupari Indium DiSelenidi, CuInSe ₂	26	19
Gallium Arseni, GaAs	24	11
Gallium Fosfaatti, GaP	17	1
Indium Fosfaatti, InP	23	3

Liitteessä 3. on National Renewable Energy Laboratories'n julkisesta tietokannasta löytyvä aurinkosähkökennojen tutkimusolosuhteissa mitattujen hyötysuhteiden kehitys viimeisen 40 vuoden ajalta. (NREL; 2015, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg)

Viime vuosina noin 90 % asennetuista aurinkosähköjärjestelmistä on perustunut Piin (Si) käyttöön aurinkosähkökennoissa, joko sen yksikiteiseen (Single chrystalline Silicon) muotoon tai monikide-paneeli (Polychrystalline Silicon) -tekniikkaan. Myös ns. ohutkalvotekniikkaan perustuvat Pii-aurinkosähkökennot ovat tasaisesti lisänneet osuuttaan. Yksikiteisen Pii-paneelin hyötysuhde on noin 2 – 3 % parempi verrattuna monikidepaneeliin. Kääntöpuolena asiassa vain on yksikiteisen Piin valmistusmenetelmästä johtuvat huomattavasti korkeammat tuotantokustannukset. Tänä päivänä tavanomaisen pii-aurinkosähkökennon fyysiset mitat ovat; 1 m x 1,5 m x 0,04 m ja tehontuotto vaihtelee 260 W_p– 320 W_p. (Motiva; 2015, http://www.motiva.fi/files/9179/Photovoltaic_Energy_Electricity_from_the_Sun_EPIA.pdf)

Kiteiset piikennot ovat yleensä noin 200 – 500 µm paksuja ja pinta-alaltaan (90–160) mm x (120–160) mm. Monikiteiset piikennot voidaan tehdä neliskulmaisista aihioita ja näin niiden materiaali tulee tarkemmin hyväksi käytettyä. Yksikidepaneelin piikiekoissa käytetty pii on yhtä ainoaa piikidettä ja ne sahataan aihioista, jonka halkaisija on 100 – 160 mm. Ohutkalvotekniikalla valmistetut aurinkokennot ovat paksuu-

deltaan 1 – 10 μm . Ohutkalvotekniikalla valmistettujen osuus pii-aurinkosähkökennoista on tällä hetkellä noin 10 %. Edellä olevien piin kidemuotojen lisäksi, amorfisesta piistä valmistetut kennot ovat taipuisia ja valmistuskustannuksiltaan halvempia, mutta niiden hyötysuhde jää alhaisemmaksi.

Aurinkokennon hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät:

- Fotonin ylimääräinen energia muuttuu lämmöksi (piille $\eta_{max} \sim 44\%$). Toisaalta osalla auringonsäteilyn fotoneista on liian vähän energiaa.
- Resisttiivisten häviöiden vuoksi osa sähköenergiasta muuttuu kennossa ja johtimissa lämpöenergiaksi.
- Kaikki auringonsäteilyn synnyttämät varauksenkuljettajat eivät saavuta kennon virtakontakteja. Tätä nimitetään keruuhäviöksi.
- Osa auringonsäteilystä heijastuu kennon pinnasta ja toisaalta kennon pinnalla olevat metalliset virtakontaktit vähentävät aktiivista pinta-alaa.
- Kidevirheissä ja puolijohde-metalli-liitoksissa tapahtuu rekombinaatiota. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 65)

NREL:n käyttää pii-aurinkokennoihin pohjautuvissa laskelmissa seuraavia hyötysuhdelukuja:

- Aurinkosähköpaneelin hyötysuhde 17 %
- Järjestelmähäviöt yhteensä 14 %
- Vaihtosuuntaajien hyötysuhde 96 %

Lisäksi, MIT:n mukaan, eräissä Kalifornian ja Massachusettsin osavaltioihin, vielä suunnitelma-asteella olevissa, kaupallisen mittakaavan 20 MW_p hankkeissa on he ovat käyttäneet seuraavia lähtöarvoja ja oletuksia laskelmissaan:

- Kiinteästi asennettavat monikide-pii-aurinkosähköpaneelit.
- Järjestelmän suunnitelman mukainen pitoaika oletetaan 25 vuodeksi.
- Aurinkosähköpaneelien degradaatio eli auringonsäteilyn vaikutukselle altistumisesta johtuva tehontuoton alenema oletetaan olevan 1 % vuodessa, jolloin paneelien tehontuotto pitoajan lopussa eli 25 vuoden kuluttua olisi noin 79 % ensimmäisen vuoden tehontuotosta.
- Laskelmissa he eivät ole ottaneet huomioon mahdollista nimellistehon arviointiin sisältyvää virhettä sekä varjostuksen ja aurinkopaneelien virheellisen suunnituksen vaikutusta tehontuottoon.
- Tehontuotto, 310 W_p DC, hyötysuhde 16 %
- Tasavirrasta, DC -> Vaihtosähköksi, AC muunnon kokonaishyötysuhde ~ 86 %, mikä koostuu seuraavista tekijöistä; vaihtosuuntaajien ja muuntajien hyötysuhde 0.977, komponenttien keskinäinen yhteensopimattomuus 0.98, puolijohdetekniikan ja liitäntöjen häviöt 0.995, tasavirtapiirin johdotuksen häviöt 0.98, vaihtovirtajohdotusten häviöt 0.99, maadoitus häviöt 0,95 ja järjestelmäpiirien katkokset 0,98.

Matemaattisesti esitettynä sama: $0.977 \times 0.98 \times 0.995 \times 0.98 \times 0.99 \times 0.95 \times 0.98 = 0,8605075 \times 100\% \Rightarrow \sim \underline{86,05\%}$.

(MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, chapter 5 – Economics of Solar Electricity Generation, s. 107 ja NREL; 6/2015, www.nrel.gov)

Käytännön tasolla, minkä tahansa aurinkokeräimen tai aurinkosähköpaneelin hyötysuhdetta, η , voidaan kuvata keräimen tuottaman käyttökelpoisen tehon ja keräimelle tulevan säteilyn suhteena:

$$\eta_{\text{solar}} = (P / SA) \times 100 \%, \text{ missä} \quad (5.0)$$

P = on keräimen antoteho, S = auringonsäteilyn voimakkuus, A = keräimen pinta-ala

Aurinkokeräimestä saatu käyttökelpoinen energia voi olla joko termistä energiaa eli lämpöä tai sähköenergiaa (virta I (A) x jännite U (V)). Aurinkolämpökeräimissä hyötysuhde voi nousta suhteellisen korkeaksi, ollen tasolla 30 – 60 %, mahdollisesti jopa enemmänkin. Valosähköilmiöön perustuvissa aurinkosähköpaneeleissa hyötysuhde jää merkittävästi alhaisemmaksi, tyypillisesti, 8 – 15 %. Tietolähteestä riippuen, aurinkosähköpaneelien osalta, puhutaan myös käytännön hyötysuhdeluvuista alueella 3 – 19 %. Keräimen hyötysuhteeseen vaikuttaa olennaisesti myös sen sijainti maapallolla ja suuntaus kohtisuoraan kulloinkin siihen kohdistuvaan vallitsevaan auringonsäteilyyn nähden. Parhaisiin tuloksiin ja hyötysuhteisiin päästään aurinkokeräinjärjestelmillä mitkä seuraavat auringon asemaa maapallon pyöriessä ja muuttavat reaaliajassa keräimien asentoa optimaaliseksi aurinkoon nähden. (MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s. 651)

Tästä eteenpäin on lisäksi huomioitava, että koska valosähköilmiöön perustuvat järjestelmät muuntavat vastaanottamansa auringonsäteilyn suoraan sähkövirraksi, niitä ei sellaisenaan voida suoraan verrata eri energialähteiden välillä. Esimerkiksi vertailussa fossiilisiin polttoaineisiin ja muihin energialähteisiin on aina huomioitava muuntomenetelmien väliset erot ja erot energian tuotantoprosessien kokonaishyötysuhteissa. (MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s. 56)

4.6 Aurinkopaneelien kestävyys

Auringonvalon ja kulloinkin vallitsevien sääolosuhteiden vaikutuksen alaiseksi joutuvien yksittäisten aurinkokennojen kestävyys on yksi tärkeimmistä tekijöistä arvioitaessa aurinkopaneelien kestävyyttä. Koska aurinkosähköjärjestelmien investointi kustannus on yhä korkea, niin pelkästään tästä lähtökohdasta sille odotetaan pitkäkestoista toiminta-aikaa ja huoltovapautta tai suhteellisen vähäistä huoltotarvetta käyttöaikanaan. Etenkin kuumissa ilmasto-olosuhteissa tulee merkittäväksi paneelin kyky säilyttää paras mahdollinen hyötysuhteensa, kestää usein varsin ankaria säävaihteluita sekä vastustaa auringonvalon, erityisesti sen UV-säteilyn, aiheuttamaa

rakenteen hajoamisvaikutusta (degradation). Yleisesti teknillis-taloudellisesta näkökulmasta asiaa tarkastellen, aurinkosähköjärjestelmän pitäisi kestää 10 – 30 vuoden pitoaika käyttöönottoaikahankohdasta lukien.



UN Photo/Pasqual Gorriz

Kuva 9. Aurinkosähköpaneeleita sähkön tuotannossa YK:n UNIFIL – operaation esikunnan (HQ) alueella Naqourassa, Libanonissa

Kenttäkokeissa on todettu eri aurinkokennoteknologioiden välillä eroja. Yleisimmät kiteisestä piistä valmistetut aurinkopaneelit ovat saaneet hyviä tuloksia kestävydessä ja luotettavuudessa. Kiteisen piin degradaatio on alle prosentin luokkaa vuodessa. Ohutkalvotekniikasta ei ole niin paljoa tutkimustuloksia saatavilla. (Tuomas Lapp; 2009, Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä, s.52)

Valmistajien tuotteilleen myöntämät takuut vaihtelevat 10 – 30 vuoteen. Tässä opinäytetyössä yhtenä esimerkkinä olevalle Mitsubishi Electric US Inc:n markkinomalle 270 W_p yksikide- Pii (Si) -aurinkopaneelin mallille; PV-MLE270HD2 valmistaja myöntää 10 vuoden takuun materiaaleille ja työlle sekä 25 vuoden takuun tehontuoton muutoksille lineaarisesti.

Yleisesti sopii olettaa, valmistajien ja puolueettomien tutkimuslaitosten testaustoitinnasta huolimatta, ettei viime vuosina käyttöönotettujen aurinkosähköpaneelien ikääntymiseen ja kestävyteen liittyviä kaikkia, oletetun n. 30 vuoden, elinkaaren aikaisia vikaantumismekanismejä edes tunneta tällä hetkellä vielä kovinkaan tarkasti.

4.7 Aurinkopaneelin tehontuotto käytännössä

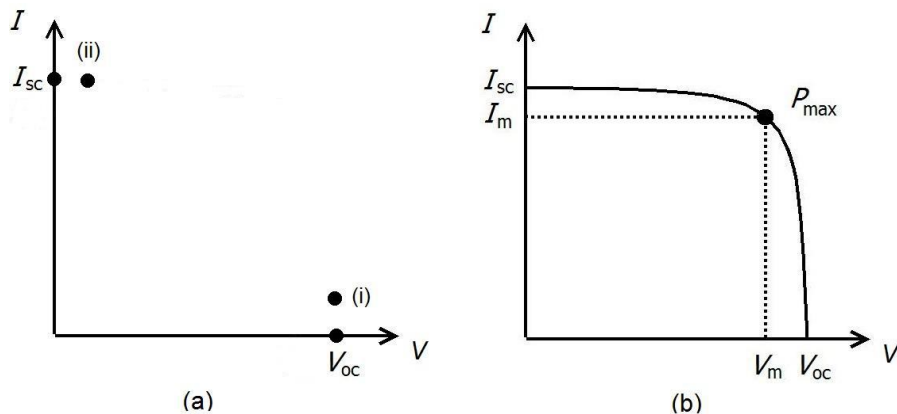
Aurinkopaneelin ominaiskäyrä ilmoittaa millä virran ja jännitteen arvoilla se voi toimia. Oikosulkuvirta on paneelin tuottama enimmäisvirta, kun paneelin navat on kytketty oikosulkuun. Tyhjäkäyntijännite on paneelin suurin jännite, mikä saadaan silloin kun, kun paneeliin ei ole kytketty kuormaa.

Tärkeä piste ominaiskäyrällä on maksimitheopiste, P_{max} tai toimintapiste. Sillä tarkoitetaan niitä virran ja jännitteen arvoja, millä saavutetaan suurin ulostuloteho tietyissä käyttöolosuhteissa. Käytännössä tätä pistettä on vaikea saavuttaa, koska säteilyolosuhteet vaihtelevat ja vallitsevien olosuhteiden vaikutuksesta paneelin lämpötila saattaa nousta, mikä taas pienentää paneelin tehoa.

Aurinkopaneelin käytännön tehontuottoon vaikuttaa ainakin vallitsevat säteilyolosuhteet (esim. sijainti maapallolla, vuoden- ja vuorokaudenaika, sää, ilmakehän absorptio), paneelien suuntaus vallitsevaan auringon säteilyyn nähden, paneelin pintamateriaalin ominaisuuden (heijastukset, pinnan puhtaus eli valonläpäisevyys), paneelien lämpötila, kuorman resistanssi ja siirtojohtimien aiheuttamat häviöt. Aurinkopaneelin tuottama energia riippuu siis paneeliin osuvasta auringon säteilyenergiasta. Paneelin saavuttama auringon säteilyenergia taas riippuu maantieteellisen sijainnin lisäksi paneelin kallistuskulmasta sekä paneelin atsimuuttikulmasta eli kompassisuunnasta, jota kohti paneeli on asennettu.

Mainittakoon myös, että niissä järjestelmissä missä aurinkopaneelit ovat koko auringonpaisteajan optimaalisesti kohdistettuna aurinkoon nähden voidaan saavuttaa merkittäviä lisäyksiä sähkötehontuottoon. Optimaalisesta kallistuskulmasta poikettaessa häviöiden kasvamiselle voidaan sanoa suuntaa-antavana kertoimena noin 0,2 % astetta kohden. Atsimuuttikulman vaikutus on vielä pienempi. Optimaalisesta atsimuuttikulmasta poikettaessa voidaan arvioida häviöiden kasvavan vain noin 0,08 % astetta kohden. Tästä johtuen esimerkiksi monet rakennusten katot ja seinät soveltuvat hyvin aurinkoenergiajärjestelmien asennuspaikaksi, vaikka ne eivät olisikaan suoraan etelää kohti. (Tuomas Lapp; 2009, Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä, s. 38)

Eräessä Arizonassa tehdyssä viisivuotisessa tutkimuksessa yksi- ja kaksiakselisen auringonseurausjärjestelmän avulla saadut energian tuotannon lisäykset olivat 23 % ja vastaavasti 37 % verrattuna kiinteästi asennettuihin paneeleihin. (John Wiley & Sons Inc.; 2005, Moore L, et al. Photovoltaic Power Plant Experience at Arizona Public Service; A 5-year assessment. Progress in PV – Research and Applications, vol. 13., s. 353 – 363)



Kuva 10. Esimerkkinä erään aurinkokennon virta-jännite- eli ominaiskäyrän muodostuminen; (a) tyhjäkäynti ja oikosulku sekä näistä hieman poikkeavat toimintapisteet (i) ja (ii), kokonainen virta-jännitekäyrä eri säteilyvoimakkuuksilla ja maksimitehopiste, P_{max} .

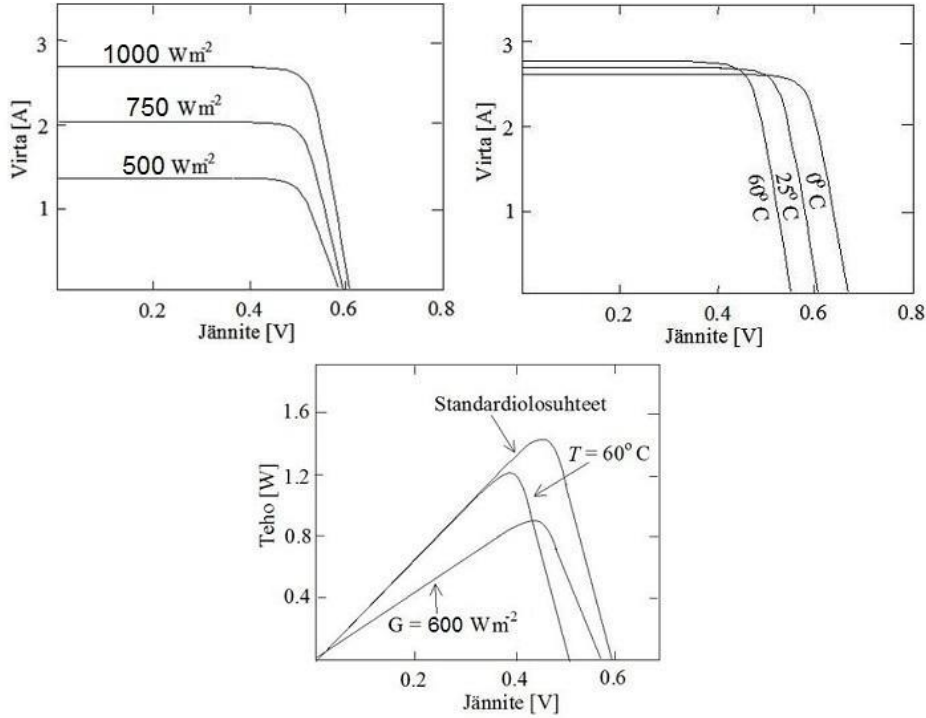
Kuvassa 10. esitetyn virta-jännite-käyrän eli ominaiskäyrän jokainen piste edustaa tasapainotilaa aikayksikköä kohden kertyneiden varausten (jännite) ja ulkoista piiriä pitkin purkautuneiden varausten (virta) välillä. Aurinkokennon maksimitehopiste, P_{max} , edustaa rajatilannetta aikayksikköä kohti pn-liitoksen eri puolille kertyvien varausten ja ulkoista piiriä pitkin purkautuvien varausten välillä. (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 50)

- tyhjäkäyntijännite V_{oc} on virta-jännite-käyrän suurin jännitteen arvo, tällöin $I = 0$ A
- oikosulkuvirta I_{sc} on virta-jännite-käyrän suurin virran arvo, tällöin $V = 0$ V
- aurinkokennon toiminnan kannalta kiinnostavin on se virta-jännite-käyrän piste, missä virran ja jännitteen tulo on maksimissaan
- tämä maksimitehopiste (V_m, I_m) kertoo sähkötehon suurimman arvon, mikä kenosta voidaan tietyissä olosuhteissa saada.

Kaksi tärkeintä olosuhdemuuttujaa, mitkä vaikuttavat merkittävästi aurinkokennon toimintaan ovat:

- a) kennon lämpötila T
 - Tyhjäkäyntijännite V_{oc} pienenee huomattavasti pn-liitoksen lämpötilan kasvaessa => yksittäiselle piiaurinkokennolle pätee $dV_{oc}/dT \sim -2,3$ mV/K.
 - Oikosulkuvirta kasvaa hieman pn-liitoksen lämpötilan kasvaessa
- b) säteilyintensiteetti G
 - Tyhjäkäyntijännite kasvaa vain hiukan säteilyintensiteetin kasvaessa
 - Oikosulkuvirran riippuvuus säteilyintensiteetistä on likimain lineaarinen
 - Säteilyintensiteetin G ja oikosulkuvirran I_{sc} välillä on likimain lineaarinen riippuvuus $I_{sc} \sim aG$, jossa a on vakio.

Aurinkokennon toiminnan ymmärtämisen kannalta kaikki olosuhderiippuvuudet ovat yhtä tärkeitä, mutta energiantuotannon kannalta oikosulkuvirran riippuvuus säteilyintensiteetistä on hallitseva.



Kuva 11., Yksittäisen piiaurinkokennon jännitteen, virran ja tehon periaatteellinen käyttäytyminen säteilyintensiteetin ja kennolämpötilan muuttuessa eli aurinkokennon tärkeimpien olosuhderiippuvuuksien keskinäinen vertailu (Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luentomoniste, s. 63)

Aurinkopaneeliin kytketty kuorma tai akusto määrää paneelin jännitteen, mitä vastaan pisteeseen virta hakeutuu kulloinkin vallitsevaa säteilyä ja lämpötilaa vastaanavalla ominaiskäyrällä. Kuorman suuruus voidaan laskea Ohmin lain perusteella:

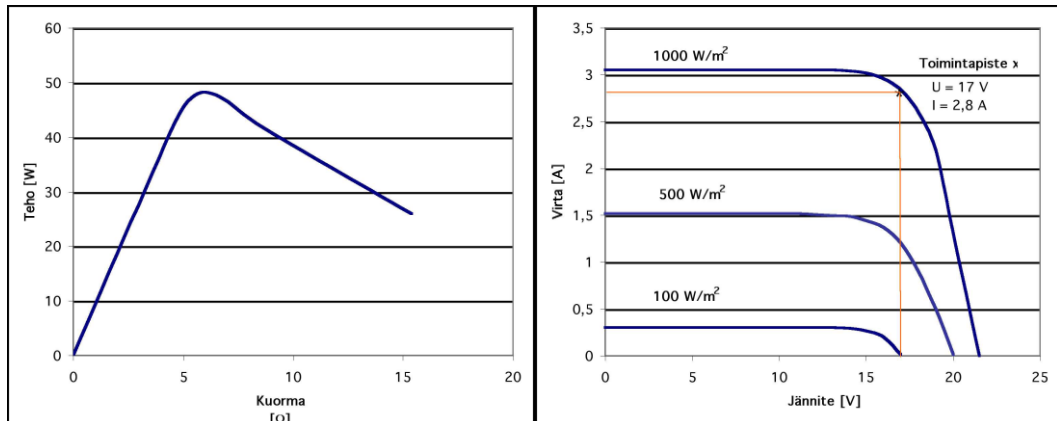
$$R = U / I \quad (6.0)$$

missä R on kuorman resistanssi Ohmia (Ω), U on aurinkopaneelin napajännite, ja I on virta.

Kuvassa 12. on kuvattu kuorman vaikutusta erään ($50 W_p$) aurinkopaneelin tehoon. Jos kuorman resistanssi on pieni, jää paneelin jännite myös pieneksi ja silloin paneelin tuottama teho on pieni. Toisaalta liian suuri resistanssi pienentää virtaa ja myös silloin teho tulee pieneksi. Suurin teho saadaan tästä ($50 W_p$) paneelista täydessä auringonpaisteessa, kun kuorman resistanssi on noin 6Ω , mikä tässä tapauksessa on sama kuin jännitteen ja virran suhde toimintapisteessä ($17 V / 2,8 A = 6,07 \Omega$).

Kun auringonsäteilyn voimakkuus muuttuu, muuttuu myös toimintapisteen paikka. Tästä johtuen optimikuorma muuttuu säteilyn voimakkuuden muuttuessa ja myös

paneelin lämpötilan muuttuessa. Vasemman puoleisen käyrän huippu on terävä ja sen vuoksi pienetkin heitot optimitilanteesta pudottavat merkittävästi paneelista saatavaa tehoa.



Kuva 12. Kuorman vaikutus $50 W_p$ aurinkopaneelin tehoon, vasemman puoleisen käyrän säteilyintensiteetti on $1000 W/m^2$. (Suntekno Oy; 2015, aurinkopaneelin toimintaperiaate.pdf)

Liitteessä 4. on esimerkin vuoksi Mitsubishi Electric US Inc:n markkinoiman erään $270 W_p$ yksikide- Pii (Si) -aurinkopaneelin malli; PV-MLE270HD2 – tekniset tiedot.

Aurinkopaneelin tuottama teho saadaan kaavasta:

$$P = UI = I^2R = U^2/R \quad (7.0)$$

Missä P on teho (W), U jännite (V), I virta (A) ja R resistanssi (Ω). Paneelin tuottama energia E tai W = työ (J) saadaan, kun teho kerrotaan ajalla

$$W = Pt = UI t \quad (8.0)$$

Yleensä sähköenergia annetaan yksikössä wattitunti (Wh) tai kilowattitunti (kWh = 1000 Wh). Tällöin siis aika on annettava tunteina (h).

Esimerkiksi jos paneelin napajännite on 24 V ja virta 4,5 A kahdeksan tunnin ajan, on ko. paneelin teho $P = UI = 24 V \times 4,5 A = 108 W$ ja tuotettu energia $E = Pt = 108 W \times 8 h = 864 Wh$. (Genesis-Kirjat Oy; 10/2007, Esko Valtanen, Matematiikan ja Fysiikan käsikirja, 2. painos, s. 251)

Kun tiedetään tietyn kohdepaikkakunnan sijaintiin perustuen sinne kulloinkin kohdistuva, vuoden aikana kertyvä auringon säteilyn määrä ja sen intensiteetti sekä suunnitellun aurinkopaneelijärjestelmän tehontuottokyky kohteessa vallitsevissa olosuhteissa niin voidaan laskea järjestelmän vuotuinen energian tuotanto, kWh/a. Lisäksi jokaiseen käyttöönotettavaan aurinkosähköjärjestelmään tulee liittää riittä-

vän yksityiskohtainen tuotetun energiamäärän, kulloinkin vallinneen auringonsäteilyn ja sään mittausjärjestelmä, jotta järjestelmän elinkaaren aikainen tuottovertailu tulee luotettavasti mahdolliseksi.

Lisäksi tässä kappaleen lopussa on kertauksen vuoksi hyvä todeta vielä, että yksittäinen aurinkosähkökenno on tasavirtalaite (DC) ja siten sen tuottama sähköteho joudutaan vaihtosuuntaaja- eli invertteri-tekniikan avulla muuttamaan sähköverkoissa yleisesti käytettyyn siniaalto-vaihtosähkömuotoon, esim. vaihtovirta 50 hz (AC). Useiden, tällä hetkellä, markkinoilla myytävien DC to AC inverttereiden valmistajat ilmoittavat laitteilleen jopa yli 95 % olevia hyötysuhdearvoja.

Kaikista sähkötehon muunto- ja käsittelyvaiheista aiheutuu tehohäviötä ja luonnollisesti häviöiden kokonaismäärän vaikuttaa kulloinkin valittu järjestelmäratkaisu sen komponenttien keskinäinen tasapaino eli Balance of System eli BOS. Todellisessa käyttötilanteessa koko järjestelmän hyötysuhde saattaa kuitenkin jäädä laskennallista hyötysuhdetta alhaisemmaksi.

Tätä voidaan havainnollistaa esimerkiksi mikä jälleen on poimittu Yhdysvalloista eli siellä saatujen käytännön tutkimusten valossa aurinkosähköjärjestelmien nimellinen vaihtosähkötehon (AC) tuotto verkkoon kytkentäpisteessä on ollut välillä 70 % - 85 % kokojärjestelmän nimellisestä tasasähkötehon (DC) tuotosta. Tässä on siis kysymys koko järjestelmän häviöistä tehontuottoa muunnettaessa tasasähköstä vaihtosähköksi. (MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, the integration of distributed photovoltaic generators, s. 158)

Mainittakoon, että Yhdistyneet Kansakunnat käyttää tällä hetkellä suunnitellussa ja niihin liittyvissä laskelmissa DC to AC muuttokertoimena 0,77, mikä on lähellä edellä mainittujen muuntosuhdelukujen keskiarvoa eli 0,775.

4.8 Aurinkosähköjärjestelmien karkea luokittelu

Nykypäivänä aurinkosähköjärjestelmiä on tarjolla todella laajalla tehoalueella mitä erilaisimpiin käyttötarkoituksiin. Toimintaperiaatteen ja käyttötarkoituksen mukaan ne voidaan jakaa kahteen pääluokkaan:

- A) Itsenäiset, yleisestä sähköjakeluverkosta erillään toimivat eli ”stand-alone” – järjestelmät
- Suorakytketyt laitteistot
 - Akkuvarmistetut suorakytketyt laitteistot
 - Varavoimalaitteella varmistetut (yl. polttomoottori generaattori) laitteistot
 - Hybridi laitteistot missä on piirteitä yllä mainituista järjestelmistä. Lisäksi niissä voi olla sekä tasavirta (DC) – kuormaa ja/tai vaihtovirta (AC) kuormaa

- B) Yleiseen sähkösiirtoverkkoon kytketyt, stabiloitua verkkosähköä tuottavat aurinkosähköjärjestelmät

(University of Central Florida; 2015, The Florida Solar Energy Center, http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/types_of_pv.htm)

5 KENTTÄKELPOISET SOVELLUKSET KÄYTÄNNÖSSÄ

5.1 Yleisluontoiset ohjeet uuden teknologian soveltamiselle YK:n kriisinhallintaoperaatiossa

Joulukuussa 2014 julkaistussa YK:n kriisinhallintaoperaatioiden uutta teknologiaa ja innovaatioita käsitelleen asiantuntija paneelin loppuraportissa määriteltiin joukko peruseriaatteita, jotka operaatioiden tulee ottaa huomioon uuden teknologian lisäämisen osalta. Nämä peruseriaatteet sisältävät seuraavia vaatimuksia:

1. Pyrittävä yleisesti saavilla oleviin ratkaisuihin ja vältettävä turvautumasta sovel-luskohtaisiin, suppeasti sovellettuihin teknologioihin
2. Asetettava liikkuvuus / liikuteltavuus (mobility) etusijalle – niin operaation ka-luston helpon liikuteltavuuden suhteen kuin tietojärjestelmien mobiilien sovel-lusalojen suhteenkin.
3. Otettava käyttöön käyttötarkoitukseensa sopivaa, kenttäolosuhteissa kestävää teknologiaa, siis teknologiaa mikä on hankittu ja tehty vastaamaan selkeästi mää-riteltäviä operatiivisia ja teknologisia tarpeita. Lisäksi sen tulee olla suhteellisen helppoa huoltaa ja ylläpitää kenttäolosuhteissa.
4. Työnnettävä teknologia niin eteen organisaatiossa kuin mahdollista, vahvistaen tuetaan-tuettua konseptia (”supporting-supported” concept)
5. Ylläpidettävä korkeatasoista läpinäkyvyyttä huomioiden teknologian ja sovel-lusalojen omaksumisen, käyttöönoton ja käytön, sekä
6. Hankittava tarvittava teknologia paikallisesti, tai alueellisesti, missä se vain on mahdollista ja niiltä osin kuin sitä ei voi toimittaa jokin operaatioon osallistuvista jäsenvaltioista.

(United Nations; 2014, Performance Peacekeeping – Final Report of the Expert Panel on Technology and Innovation in UN Peacekeeping, s. 21.)

5.2 Suosituksia liittyen uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämiseksi YK:n kriisinhallinta-operaatioissa

Edellä mainittujen yleisten periaatteiden lisäksi YK:n asiantuntija paneeli antoi lop-puraportissaan operaatioiden energiahuoltoa koskevia suosituksia, mm. seuraavasti:

1. Rauhanturvatoimialalla pitäisi ensitilassa ottaa käyttöön järjestelmällinen vaihto-toehtoisten energiamuotojen integraatio kaikista kenttäoperaatioiden näkökul-mista ja samalla yhdistää siihen myös niiden elinkaaren kattava lähestymistapa.

2. Välittömiä hyötyjä tarjoavan, yleisesti käytössä olevan teknologian hankkimiseen tulisi ryhtyä viipymättä ja mahdollisista esteistä välittämättä.
3. Asiantuntija paneeli suosittaa myös pysyvän energia vaatimusten määrittely toimikunnan perustamista, arvioimaan niitä käyttösovelluksia ja sovellusalueita missä vaihtoehtoiset energiamuodot voisivat korvata tai täydentää perinteistä energian tuotantoa.
4. YK:n osastojen tulisi jatkaa fossiilisia polttoaineita korvaavien lisävaihtoehtojen etsintää ja tehdä niille kenttätestausta.
5. Vaihtoehtoisia energiamuotoja pitäisi aggressiivisesti soveltaa siellä missä se vain olisi mahdollista, erityisesti niitä energiamuotoja mitä voidaan hankkia paikallisesti tai alueellisesti. Niitä pitäisi myös hyödyntää alhaisen energiatehokkuuden toiminnoissa ja myös tarpeellisenä ylimääränä.
6. Huolto-osaston (DFS) tulisi tuottaa yleiskuva yleisesti saatavilla olevista energian säästö teknologioista ja laitteista sekä suunnitella priorisoitu strategia näiden teknologioiden esittelyyn jokaiselle kriisinhallintaoperaatiolle.
7. Operaatio-olosuhteiden niin salliessa huolto-osaston pitäisi asettaa polttoaineiden kulutukselle rajat edistääkseen vaihtoehtoisten energiamuotojen käyttöä sekä lisäksi luoda leiriolosuhteita varten varustesarjoja millä uusiutuvia energialähteitä voitaisiin käyttää varavirtalähteinä.
(United Nations; 2014, Performance Peacekeeping – Final Report of the Expert Panel on Technology and Innovation in UN Peacekeeping, s. 41.)

5.3 Kriisinhallintaoperaatioon soveltuva uusiutuvan energian sovellus esimerkki

Edellä on esitetty perusteita ja joukko yleisiä vaatimuksia, mitä ainakin osittain tulisi ottaa huomioon kenttäkelpoisia uusiutuvan energian järjestelmiä sekä käyttöönottoa suunniteltaessa. Pysyväisluonteisten, samalla paikalla yli 12 kk sijaitsevien, rakennelmien ja kuten tukikohtien, majoitus-, korjaamo- yms. tilojen, osalta uusituvilla energioilla voidaan saavuttaa helpommin ja suhteessa alhaisemmin kustannuksin todellisia hyötyjä sekä käytönaikaisten kustannusten säästöä. Poikkeuksetta uusiutuvan energian tuominen lisäenergian lähteeksi nostaa merkittävästi koko energian tuotantojärjestelmän hankintakustannuksia.

Koska kriisinhallintaoperaatioille on tyypillistä varsin haastavat toimintaolosuhteet, niin kohdemaiden ja niiden toimipaikkojen sijainnin suhteen, kuin turvallisen sekä vakaan yhteiskunnan ja toimintaympäristön suhteen. Lisäksi, koska toiminnan on lähtökohtaisestikin tarkoitettu olevan väliaikaista, kestäen alkutilanteen kuukausista aina vuosiin, niin se asettaa kaikelle toiminnalle erityisiä logistiikkaan liittyviä vaatimuksia. Tosin, tässä yhteydessä, on kyllä muistutettava, että joissakin tapauksessa tämä väliaikainen on muuttunut jokseenkin pysyväksi, kuten esimerkin kohteena olevassa UNTSO-operaatioissa, mikä on alkanut jo vuonna 1948.

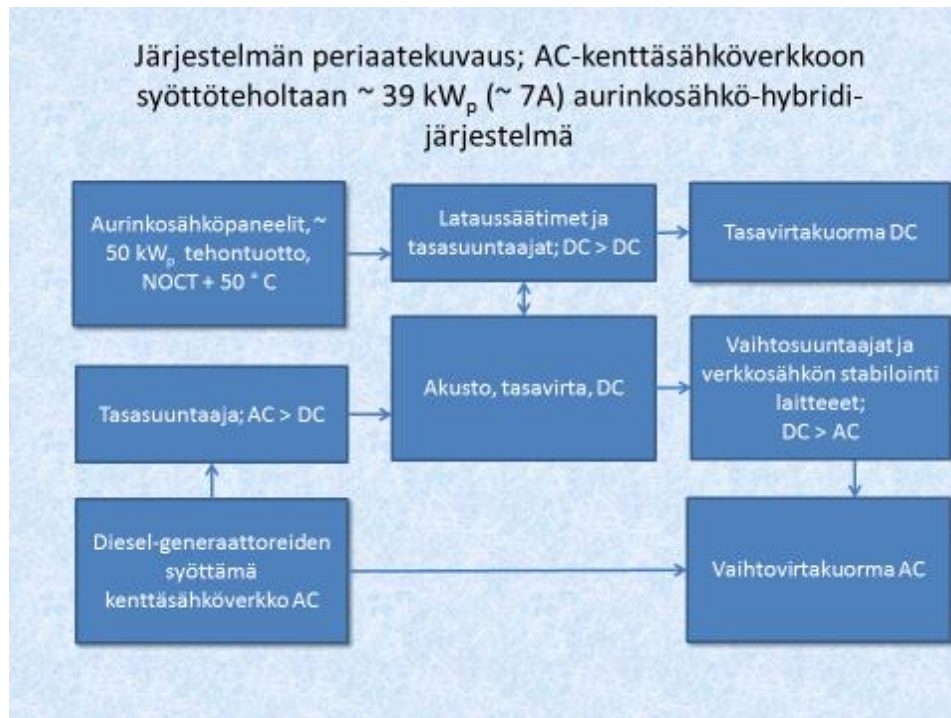
Logistiikan näkökulmasta asiaa tarkastellen, kaikki operaatioihin toimitettava materiaali käsitellään logistisessa toimitusketjussa mahdollisimman pitkälle koneellisesti. Siten, logistisia moduuleja ovat 10', 20' ja 40' merikontit. Tämä vaikuttaa myös

mahdollisten aurinkosähköjärjestelmien mitoittamiseen siten, että myös ne on pystytävä kuljettamaan mahdollisimman rationaalisesti jonkin, edellä mainittujen, merikonttikokojen sisätilavuudessa. Lisäksi järjestelmän yksityiskohtia suunniteltaessa, on huomioitava niiden nopean kokoonpanon, helpon huollettavuuden, purkamisen ja siirtelyn mahdollisuus, mistä seuraa erityisiä vaatimuksia järjestelmien tuoteominaisuuksien ja siten mm. myös mekaniikan ja sähkötekniikan suunnittelulle.

5.3.1 Aurinkosähkö (PV) – hybridi-DC/AC-järjestelmä

Tässä kuvataan ns. hybridi-tyyppinen, aurinkosähköjärjestelmä mikä voitaisiin jo nyt toteuttaa lähes missä tahansa, meneillään olevassa tai alkavassa kriisinhallintaoperaatiossa. Aurinkosähköjärjestelmän perustana näissä ovat yleisesti tunnetut kiteiseen piihin perustuvat, laajasti eripuolilla maailmaa valmistettavat, aurinkosähköpaneelit.

Alla olevassa kaaviossa on esitetty diesel-generaattoreiden syöttämän kenttäverkko-
verkon täydennysvoimaksi tarkoitettun hybridi-aurinkosähköjärjestelmän periaatekuvaus. Tehontuotto optimitilanteessa on noin 39 kW. Periaatekuvaan on merkitty myös erillinen tasavirta-akusto varavoimalähteeksi aurinkosähköjärjestelmälle. Tämä järjestelmä voidaan yhtä hyvin toteuttaa myös ilman akustoa, jolloin se toimii täydentävänä aurinkovoimalaitoksena auringonpaistetuntien aikana. Esimerkin mukaisen järjestelmän aurinkopaneelien ja paneelirakenteiden vaatima maapinta-ala on noin 450 - 500 m².



Kaavio 1. Hybridi-aurinkosähköjärjestelmän periaatekuvaus

Aurinkosähköjärjestelmän laskennallista energian tuottoa käytetään pohjana kaikille laskettaville suorituskykyparametreille ja talouden tunnusluvuille, joilla perustellaan investoinnin kannattavuutta. Laskennallinen energian tuotanto on aina ennuste. Vuodet eivät ole koskaan samanlaisia, minkä vuoksi aurinkosähköjärjestelmän energian tuotantolaskelmat poikkeavat todellisuudesta.

Esimerkin hybridi-aurinkosähköjärjestelmän tunnuslukuja, kaikki hinnat Alv 0 %:

> Investointikustannusarvio $50000 W_p \times 2,33 \text{ €} / W_p = 116.500 \text{ €}$

> Laskennallinen energiantuotanto noin 78.064 kWh/a eli noin 78 MWh/a

> Kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen, - 63.446 kg CO₂^{eq}, muutettuna ja verrattuna siihen, että 78.000 kWh tuotanto tuotettaisiin diesel-polttoaineella;

Taulukko 5., Kasvihuonekaasujen, GHG, tuotantomäärien vertailu dieselin ja aurinkosähkön välillä.

Energialähde	GHG kg/kWh CO ₂ ^{eq}	Tuotettu energia kWh	GHG päästöt kg CO ₂ ^{eq}
Diesel-polttoaine	0,850	78064	66354,40
Aurinkosähkö, c-Si	0,037	78064	2888,37
Erotus	- 0,813		- 63446,03

Kannattavuuden arviointia varten vuotuiset tuotantomäärät ja energia arvot laskettiin NREL-PV Watts-laskimella aurinkopaneelien kahdelle eri asennustavalle ja kolmelle tuotantomäärälle seuraavasti:

- Huonoimman tuotantoennusteen skenaario, laskettu Ateenan säteilymäärätiedoilla; kiinteä asennus, perussuunta etelään, aurinkopaneelien kallistus 20°, tuotantomääräarvio 70.840 kWh vuodessa. Tässä aurinkosähkön hinnaksi muodostui 0,108 € / kWh.
- Kiinteä asennus, perussuunta etelään, kallistus 20°, tuotantomääräarvio 78.064 kWh vuodessa. Tässä aurinkosähkön hinnaksi muodostui 0,099 € / kWh.
- Aurinkoa seuraava paneelijärjestelmä, 2-akselinen seuranta, perussuunta etelään, tuotantomääräarvio 98.413 kWh vuodessa. Vastaavasti tällä vuotuisen tuotannon määrällä tuotetun aurinkosähkön hinnaksi muodostui 0,072 € / kWh.

Tässä yhteydessä on huomioitava, että aurinkosähköjärjestelmän tuottaman energiamäärän laskentaa varten on huonoimman tuotantoennusteen skenaariossa käytetty Kreikan pääkaupungin Ateenan säteilymäärätietoja. Vertailun vuoksi mainittakoon, että Ateenan säteilymäärätietoja oli käytetty myös YK:n UNIFIL-operaatiossa, kun he olivat aiemmin, vuonna 2008, laskeneet Libanonin Naqourassa sijaitsevan aurinkovoimalan vuotuista energian tuottoa.

Lisäksi kahdessa jälkimmäisessä, suurempien sähköenergian tuotantomäärän pohjalta tehdyissä, laskelmissa ja niiden sähkön tuotantomäärän ennusteissa on käytetty Jerusalemissa noin 400 km länsi-lounaaseen sijaitsevan Egyptin pääkaupungin Kairon auringon säteilymäärätietoja. Kairo on sijaintinsa puolesta lähempänä Jerusalemia kuin Ateena, jolloin laskentaan sisältyvä virhe jäänee tällä tavoin pienemmäksi. Todellisuudessa sähkön toteutuva tuotantomäärä on näiden kahden laskenta paikkakunnan tietojen pohjalta saatujen arvioiden välimaastossa. Tätä eroa voi verrata vaikkapa tämän opinnäytetyön alussa olleeseen, <http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html> - sivuston, auringon kuukausittaista säteilymäärää Jerusalemissa koskevaan arvioon, mikä on tehty eri tietolähteen ja laskentamenetelmän tiedoilla kuin mitä NREL PV Watts-laskuri käyttää.

Tällä tavoin tarkastellen, siis vertailemalla vuoden ajalta laskettua päivä keskiarvoa ($\text{kWh/m}^2/\text{vuorokaudessa}$) huonomman skenaarion mukaan eli kiinteän asennustavan vaihtoehtojen välillä toisiinsa, auringon säteilymäärä Jerusalemissa olisi noin $\sim 9,9\%$ alhaisempi kuin Kairon säteilymäärä. Mainitun eron tarkkuudeksi riittää kun se pyöristetään ylöspäin, lähimpään täyteen prosenttilukuun eli 10% :n. Tämä ero pitää luonnollisesti huomioida laskennassa ja myös mahdollisessa päätöksenteossa, kun arvioidaan vuotuista energian tuotantomäärää ja siten hankkeen taloudellisuutta kohteessa.

Liitteessä 5 on NREL, PV Watts-laskimella, kahdella eri paneelien asennus- ja käytötavalla, lasketut vuotuiset aurinkosähköjärjestelmän tuottamat energiamäärät. Lisäksi, samasta liitteestä löytyy sisäisen korkokannan menetelmällä lasketut nettonykyarvot vaihtoehtoisilla korkokannoilla kolmelle eri energian vuosituotantomäärälle eli 98.413 kWh/a , 78.064 kWh/a ja 70.000 kWh/a . Tämä osa laskennasta tehtiin Aalto-yliopiston FinSolar-projektin tuottamalla aurinkosähköjärjestelmän kannattavuuden arviointi-työkalulla (MS Excel-taulukko). Aalto-yliopiston FinSolar projektin tekemien vertailujen myötä on todettu, että aurinkosähköjärjestelmien investointien kannattavuuden arvioinnissa tulisi ensisijaisesti käyttää sisäisen korkokannan menetelmää takaisinmaksuajan menetelmän sijasta. Varsin usein takaisinmaksuajan menetelmällä tehdyt laskelmat antavat aurinkosähköinvestoinnille takaisinmaksuajan mikä on pidempi kuin sen teknillis-taloudellinen, suunniteltu, pitoaika eli pidempi kuin $10 - 30 \text{ v}$.

Toki riippuu aurinkosähköinvestoinnin kokonaiskustannuksista ja sen kanssa kilpailevien energiamuotojen tuottaman sähkön markkinahinnoista, mutta joidenkin lähteiden mukaan aurinkovoimalan takaisinmaksuaika on vähintäänkin kaksinkertainen sen suunniteltuun elinkaareen ja pitoaikaan verrattuna.

Investoinnin sisäinen korkokanta on se laskentakorko, jolla investoinnin nettonykyarvo on nolla eli tietynä vertailuajankohtana diskontatut tulot ja menot ovat yhtä suuret. Investoinnin kannattavuus riippuu sisäisen korkokannan suuruudesta ja yleensä yritys määrittää itse sisäisen korkokannan tavoitteellisen minimiarvon. Sisäinen korkokanta i saadaan helpoiten selvitettyä piirtämällä nykyarvo laskentakoron funktiona. Nykyarvo N saadaan laskettua lausekkeesta

$$N = -H + \sum_{t=1}^n \frac{k_t}{(1+i)^t} + \frac{J}{(1+i)^n} = 0, \quad (9.0)$$

Missä, H on investoinnin hankintameno, n on pitoaika vuosissa, t on kyseessä olevan vuoden järjestysluku, J on jäännösarvo ja k_t on nettotulo kunkin jakson lopussa. (Tuomas Lapp; 2009, Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä, s.85 - 88)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

6.1 Aurinkosähkö kriisinhallintaoperaatiossa

Tärkeimpänä tavoitteenani tässä opinnytetyössäni on ollut esittää tunnetulla nykyteknologialla mahdollinen sovellusesimerkki, siis kuinka uusiutuva energia voitaisiin kytkeä kriisinhallintaoperaation energiahuoltoon. Toisaalta tätä on tehty pääasiassa tuotekehityksen, ympäristön suojelullisten arvojen ja kriisinhallintaoperaatioiden käyttäjätarpeen näkökulmasta, kuin mistään muusta lähtökohdasta. Tästä opinnytetyöstä seuraava jatkokehitysvaihe voisi olla kokonaisen kenttäolosuhteisiin toteutettavan hybridi-aurinkosähköjärjestelmän yksityiskohtainen sovellussuunnittelu, käsittäen niin tuotemuotoilun, mekaniikan kuin sähkötekniikankin suunnittelun.

Kuinka tämä sitten käytännössä toteutuu on ensisijaisesti riippuvainen energiapolitiittisista valinnoista ja tahdosta monipuolistaa kriisinhallintaoperaatioissa tarvittavien energian tuotantomenetelmien valikoimaa. Kuten jo aiemmin tuli mainituksi, tekniset ratkaisut tähän ovat jo olemassa. Jos otetaan tärkeimmäksi tavoitteeksi vähentää energian tuotannosta aiheutuvia päästöjä ja kasvihuonekaasujen määrää sekä lisätä energiantuotantojärjestelmien vikasietoisuutta ja huoltovarmuutta, niin siihen matalahiiliset uusiutuvan energian tuotantometelmät, siis aurinkosähkö ja tuulisähkö, sopivat hyvin.

Aurinkosähköjärjestelmien valintaa puoltavat ainakin seuraavat seikat:

- aurinkosähkö on äänetön sähkön tuotantometelmä.
- ei aiheuta päästöjä ympäristöönsä käyttöpaikalla.
- ei liikkuvia tai kulutus osia, vähäinen huoltotarve koko elinkaarensa aikana.
- ei tarvitse erillistä polttoainejärjestelmää, eikä siten myöskään tarvita polttoainejärjestelmän vaatimaa logistista toimitusketjua.
- mahdollistaa sähköenergian tuotannon kaupallisten, ym., sähköjakeluverkkojen ulkopuolella, joko itsenäisenä järjestelmänä tai toisen energialähteen rinnalla.
- ei tarvitse raskasta perustamista kuten tuulivoima tai ei tarvitse raskasta poraustekniikkaa, kuten geotermien energia.
- modulaarinen, helppo kuljettaa, asentaa, ottaa käyttöön ja tarvittaessa laajentaa.

Lisäksi, eikä ihan vähäisimpänä etuna - mitä tulee aurinkosähkön liittämiseen kriisinhallintaoperaatioissa yleisesti käytettyjen diesel-sähkögeneraattoreiden rinnalle - on todella tuo aiemmin mainittu vikasietoisuuden parantaminen. Nimittäin, kuumiin ilmasto-olosuhteisiin mitoitetuista dieselien – jäähdytysjärjestelmistä huolimatta, varsin usein niissä esiintyy päivän kuumimpien tuntien aikana ylikuumentumisoongelmia. Tällöin puhutaan ulkoilman lämpötiloista + 40 °C - + 50 °C varjossa. Siten, syöttämällä aurinkosähkötehoa kenttäverkkoon samanaikaisesti voitaisiin pienentää diesel-sähköjärjestelmän kuormitusta.

Luonnollisesti aurinkosähköjärjestelmillä on myös joitain haittoja:

- Korkea investointikustannus aloitettaessa, joskin aurinkosähköjärjestelmien tuotantokapasiteetin lisääntyessä yksikkökustannusten €/W_p odotetaan alentuvan tulevaisuudessa.
- Energian tuotanto yöaikaan vaatii joko toisen tuotantomenetelmän aurinkosähkön rinnalle, esim. generaattorit tai energiavaraston, yleensä käytettään akustoa (DC).
- Tuotettu sähköteho on jokseenkin suoraviivaisesti riippuvainen aurinkosähköpaneelille kohdistuvasta auringon säteilyn määrästä ja intensiteetistä.
- Alhainen hyötysuhde ja alhainen tehontuotto, suuret tehontarpeet vaativat runsaasti maa-pinta-alaa sekä koko pinta-alalle esteetöntä näkyvyyttä aurinkoon.
- Aurinkopaneelien tuotannon eri valmistusvaiheissa, toki tuotantoteknologiasta riippuen, käytetään yhä runsaasti myrkyllisiä raaka-aineita, tuotannon apuaineita ja raskasmetalleja, kuten kadmium, elohopea, lyijy, ym. Uusien aurinkosähköteknologioiden arvioidaan pienentävän tuotantovaiheen päästöjä ja myrkyllisyyttä tulevaisuudessa.

Kuten edellä ja liitteenä olevista laskelmista käy ilmi aurinkosähköllä tuotettu sähköenergia on edullisempaa eli vaihdellen 0,072 – 0,108 €/kWh kuin YK:n vertailuhintana käyttämä diesel-sähkön hinta eli 0,234 €/kWh.

Yleisesti ottaen arvioidaan, että suora aurinkosähkö on yksi niistä harvoista matala hiilisistä energiateknologioista millä on mahdollisuus kasvaa globaalisti todella suureen mittakaavaan. (MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, summary for policy maker's xi).

6.2 Kestävän kehityksen näkökulma

Kestävän kehityksen näkökulmasta, yksi ihanteellisimpia ominaisuuksia aurinkojärjestelmissä on niiden luontainen joustavuus tuotannon tarpeen ja sovellusvaihtoehtojen monipuolisuuden suhteen. Tällä hetkellä saatavilla oleva tehoalue kattaa, itsenäisistä, minikokoluokan 0,1 kW_p järjestelmistä aina suurin kaupallisen mittakaavan stabiloitua verkkosähköä tuottaviin järjestelmiin ja siten jopa yli 20 MW_p sähkön-tuottotehoon asti. Aurinkosähkön ja myös aurinkolämmön sovellusalueet ja mahdol-

lisuudet ovat todella laajat. Kuten aiemmin tuli jo esille aurinkosähkö soveltuu asennettavaksi myös rakennusten ulkoeristysten sekä vesikatton pintaan, toki tällöin sähkötehontuotto ominaisuudet heikkenevät koska optimaalista kohdistusta aurin- gon valon tulosuuntaan ei voida silloin saavuttaa.

Ruotsalainen IKEA:n säätiö on mennyt myös edennyt aika pitkälle omassa kehitystyössään, sillä he ovat kehittäneet UNHCR:n tarpeisiin koviin olosuhteisiin tarkoitettua modulaarisen, kuljetusta varten tiiviiksi pakattavan, aurinkopaneeleilla sähköistetyn, pakolaisten majoitus yksikön. Siitä on saatu kestävämpi kuin aiemmat pakolaisten käyttöön tarkoitettut, keveämmät, telttamajoitusratkaistu. Tämä IKEAN kehittämä tuote perustuu kaupunkityyppiseen asumiskonseptiin ja se voidaan koota rakennuspaikalla ilman sähkötyökoneita, käsityökaluja tai muitakaan kokoonpano välineitä. Säännöllisen huolto-ohjelman mukaan toimittaessa majoitusyksikön odotettavissa oleva tekninen kestoikä on suunnitelman mukaan kolme vuotta. (United Nations; 2014, Performance Peacekeeping – Final Report of the Expert Panel on Technology and Innovation in UN Peacekeeping, s. 31)

Tutkittaessa aurinkosähköjärjestelmien koko elinkaariajattelumallin mukaisia ympäristövaikutuksia, vaikka puhutaankin eräästä kasvihuonekaasupäästöjen suhteen alhaisimmista ja tuotannossa ollessaan lähes päästöttömästä sähköenergian tuotantomuodosta, niin tilanne ei ole aivan niin erinomainen kokonaisuutena kuin mitä sen käytönaikaisiin päästöihin tulee.

Mielestäni nykypäivänä on erittäin tärkeää, olipa kyseessä mikä tahansa tuote ja/tai palvelu ja niiden tuotantoprosessit, että koko elinkaaren aikaiset, siis raaka-aineprosesseista alkaen, läpi tuotannon ja tuotteiden käytön ajan, aina käytöstä poistetun tuotteen materiaalien kierrätykseen saakka, että niiden päästöt otetaan erityisen ja kokonaisvaltaisen tarkastelun alaiseksi. Toisaalta aurinkosähköjärjestelmille odotetaan pitkää, joka tapauksessa yli 25 vuoden pitoaikaa, mikä sinänsä tasoittaa koko elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia ja näin ollen parantaa myös kokonaistilannetta niiden osalta.

Esimerkiksi – vaikkapa aurinkosähkö-tuotteiden valmistuksen aikainen energian kulutus Pii-pohjaisten aurinkosähkökennojen tuotannon osalta on suurusluokaltaan karkeasti arvioiden sellainen, että niille tarvitaan noin kahden vuoden mittainen aurinkosähkön tuotantopaketti, että tuo em. valmistuksen ja paneelientuotannon aikainen energiankulutus saadaan katettua. Kuitenkin ohutkalvotekniikalla valmistettujen pii-pohjaisten aurinkosähkökennojen osalta tilanne, niin energiankulutuksen kuin niihin käytettyjen materiaalien suhteen on huomattavasti parempi. (MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, s. 691)

Toinen erityinen ympäristöä sekä päästöjä ympäristöön koskeva huolenaihe etenkin uudemmissa, edistyneemmissä, aurinkosähköjärjestelmissä on myrkyllisten alkuainesten, kuten esim. Kadmiumin (Cd) ja aineyhdistelmien, esim. Gallium Arseeni

(GaAs), ym., käyttö sekä vaarallisten ja myrkyllisten prosessi aineiden ja kemikaalien käyttö tuotantoprosesseissa.

Lisäksi isojen aurinkosähköjärjestelmien tarvitsema maa pinta-alan on suuri. Tämäkään seikka ei ole sinänsä aivan ongelmatonta, ei maankäytön kannalta, eikä myöskään siitäkään syystä, että suurten sähkötehojen kyseessä ollen näin tuotetun sähkön siirto, useimmiten maaseudulta, tiheän asutuksen alueella sijaitsevalle käyttöpaikalle muodostuu haasteellisemmaksi.

6.3 Uusiutuva energia ja mobiilit sovellukset

Mitä tulee mobiileihin ratkaisuihin, niin nestemäisten ja tänä päivänä useimmiten fossiiliseen raaka-öljyyn pohjautuvien, polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla on jo huomattavasti haasteellisempaa. Jo nyt toteuttamiskelpoisia sovelluksia löytyy kaasumoottori ja dual-fuel-polttoaineteknologioista. Toistaiseksi, tällä hetkellä on oltava myös realistinen ja ymmärrettävä, ettei millään nykyisin tunnetulla uusiutuvan energian muodolla voida siedettävien ja järkevästi perusteltavissa olevien kustannuksien korvata kokonaan diesel-generaattoreita kriisinhallintaoperaation energiantuotannossa.

Ainoana nyt toteutuskelpoisena ja siten harkittavana vaihtoehtona nykyisten diesel-generaattoreiden osalta on niiden muuttaminen ns. dual-fuel-diesel-generaattoreiksi tai uusien dual-fuel-generaattoreiden hankkiminen nykyisten sijaan. Tällöin niissä pystyttäisiin käyttämään toisena polttoaineena dieselin rinnalla ja samanaikaisesti ns. RE-metaania, CH₄ tai Vetyä, H₂, joko kaasuna tai nesteytettynä korkeassa paineessa, esim. 700 bar). Nykyaikaisille, elektronisesti ohjatuille ja pakokaasujen puhdistusjärjestelmiä käyttäville diesel-moottoreille soveltuvaa moottoripolttoainelaatuista UE-metaania voidaan jo nykyoloissakin tuottaa varsin monella eri tavalla eri raaka-ainelähteistä, joko paikallisesti tai lähialuetuotantona tai keskitetysti suurissa yksiköissä. Luonnollisesti toisen polttoaineen lisääminen käyttövoimaksi, edellyttää myös koko jakelujärjestelmän luomista kautta toimitusketjujen, jotta niiden käyttö kohteessaan on mahdollista sekä sujuu rationaalisesti ja kustannustehokkaasti.

Tällä, RE-liikennepolttoaineiden alalla kehitys tulee vielä ottamaan merkittäviä harppauksia, sillä teknologisen kehityksen edistyessä luonnollisesti jossain vaiheessa ollaan tulossa tilanteeseen mikä voi muuttaa edellä esitetyn realismin, mutta siihen tulee vielä menemään aikaa.

Taulukko 6., Mobiilien polttoainejärjestelmien vertailua massan ja tilavuuden mukaan, sisältää energian muuntojärjestelmän ja polttoaineen 500 km toimintasädetä varten. (Lithuanian Energy Institute, Center for Hydrogen Energy Technologies; 2014, Dr. Darius Milcius, Green Energy Solutions for Military Applications – MS PowerPoint esitys, mistä kirjoittajan toimesta on muunnettu kaasukäyttöiset teknologiat keskenään vertailukelpoisiksi).

Järjestelmä	Massa kg	Tilavuus l
Diesel-käyttöinen polttomoottori	43 kg	46 l
+ diesel-polttoaine 500 km toimintasäteelle	33 kg	37 l
CNG-kaasukäyttöinen polttomoottori	170 kg	200 l
- CNG-polttoaine, 500 km toimintasäteelle	37 kg	156 l
tai RE Metaani, CH ₄ , 700 bar, ~ 200 kWh _e	6 kg	170 l
CGH ₂ - polttokenno + sähkömoottorit	125 kg	260 l
+ CGH ₂ , 700 bar, polttoaine = 6 kg H ₂ = 200 kWh kemiallista energiaa	6 kg	170 l
Ladattaviin akkuihin perustuva sähkömoottori-järjestelmä	830 kg	670 l
+ Litium-ioni akusto, 100 kWh sähköenergiaa	540 kg	360 l
- tai vertailun vuoksi lyijyakusto, 100 kWh _e	~2000 kg	~1500 l

6.4 Dekarbonisaatio

Dekarbonisaatio tarkoittaa hiilen osuuden vähentämistä ja vedyn osuuden lisäämistä polttoaineiden energiasisällössä, ja myös uusiutuvan hiilen osuuden kasvua fossiilisen hiilen kustannuksella. Metaanilla, CH₄, on kaikista hiilivedyistä pienin hiilen osuus ja suurin vedyn osuus, joten metaani maksimoi dekarbonisaatiomahdollisuudet hiilivedyjen joukossa. Puhdas vety, H₂ on hiilivapaa, joten se tarjoaa kemiallisista polttoaineista parhaan dekarbonisaatiomahdollisuuden. Luonnollisesti sekä metaanin että vedyn tapauksessa on otettava huomioon polttoaineen koko elinkaari.

Siirtyminen uusiutuvan metaanin ja vedyn käyttöön on osa polttoaineiden käytön pitkän aikavälin dekarbonisaatiokehitystä. Aluksi oltiin kiinteiden polttoaineiden varassa, nykyään nestemäisillä polttoaineilla on suuri rooli ja tulevaisuudessa sekä kiinteät että nestemäiset polttoaineet korvautuvat kaasumaisilla. Syihin lukeutuvat kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen ja kaasumaisten polttoaineiden fundamentealisesti parhaat poltto-ominaisuudet eli täydellisempi palaminen ja sitä kautta saatavissa olevat korkeampi hyötysuhde ja alhaisemmat päästöt. Myös kaasumaisten polttoaineiden molekyylien keveys vaikuttaa päästöjen alhaisuuteen ja kaikkein haitallisimpien, raskaiden päästökomponenttien ja hiukkaspäästöjen puuttumiseen. Kaasumaiset polttoaineet tarjoavat sopivuuden kaikkiin lämpövoimakonetyppeihin ja niiden lisäksi polttokennoihin.

Liikennekäytössä ja myös muissa mobiileissa ratkaisuisa fundamentealisesti puhtaampi polttoprosessi on vielä tärkeämpi kuin sähkön ja lämmön tuotannossa, sillä tekniset mahdollisuudet savukaasujen puhdistusjärjestelmien lisäämiseen ovat oleellisesti pienemmät ajoneuvoissa kuin stationäärisissä voimaloissa ja lämpölaitoksissa. (Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu; 2012, Ari Lampinen, Tiekartta uusiutuvaan metaanitalouteen, s.66)

LÄHTEET

Werner Söderström Osakeyhtiö; 1930, Yrjö Talvitie; Automobiilien polttoaineet ja kaasuttajat, esipuhe.

Studentlitteratur AB, Lund; 2009, G. Sidén, Förnybar energi, s.11.

IEA; 2011, 2014b; ETP, Energy Technology Perspectives, 6 DS scenario.

MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, The Solar Resource, p. 253.

Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu; 2012, Ari Lampinen; Tiekartta uusiutuvaan metaanitalouteen, s. 65 – s. 66.

US Department of Energy; 2013 Renewable Energy Data book, p. 4.

MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, summary for policy maker’s xi, including - PV Scaling and Materials Use, p. 125.

Aalto Yliopisto, FinSolar-projekti; 2015 - http://www.finsolar.net/?page_id=1363.

European Photovoltaic Industry Association; 2015, www.epia.org-sivusto.

IEA; 2014, Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy, 2014 edition, p. 22.

United Nations; 2014, Performance Peacekeeping – Final Report of the Expert Panel on Technology and Innovation in UN Peacekeeping, p. 38.

Energypedia Community; 2015, https://energypedia.info/wiki/Liberia_Energy_Situation#Energy_Situation.

United Nations; 2015, Department of Peacekeeping operations, <http://www.un.org/en/peacekeeping/operations/current.shtml>.

Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014, Aki Korpela, Aurinkosähkön perusteet – luontomoniste, s.10, s.12, s.16 - 19, s.20 – 24, s.50, s. 61 – 63 ja s.72.

MIT; 2015, MIT analysis based on Solar Industry Association of America; Photon Consulting LLC; Feldman Margolis, and Boff; Bolinger and Weawer; and other industry and public sources.

MIT; 2015: The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, Solar PV Installations, p.100.

Areva Solar Oy; 6/2015, puhelinhaastattelu Mr. Esa Areva, projektijohtaja.

CNRS; 2015, www.cnrs.fr.

MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, p. 53, p. 56, p. 646 – p. 647 and p. 651

MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, p. 8 and the Solar Resource, p. 254 .

Suntekno Oy; 2015, <http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/aurinkoenergia.pdf>.

John Wiley & Sons Inc.; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, p. 141.

Genesis-Kirjat Oy; 10/2007, Esko Valtanen, Matematiikan ja Fysiikan käsikirja, 2. painos, s. 243.

Oulun Yliopisto; 2014, Erkki Thuneberg, Fysiikan laitos, Kiinteän aineen fysiikka - opetusmateriaalit, s. 21.

Tuomas Lapp; 2009, Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä, s.22 ja John Wiley & Sons; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, p. 226.

MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, p. 678.

John Wiley & Sons Inc.; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, p. 233, p. 228 and p. 229.

Aalto Yliopisto; 2015, <http://per.physics.helsinki.fi/FTK2011/Valosahkoilmio.pdf>.

John Wiley & Sons Inc.; 2010, Alternative Energy Systems and Applications, B.K. Hodge, John Wiley & Sons Inc. 2010, s. 227 ja MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, the Photovoltaics Primer, p. 276 sekä Oulun Yliopisto, 2014, Erkki Thuneberg, Fysiikan laitos, Kiinteän aineen fysiikka - opetusmateriaalit, s.21.

Teknillinen Korkeakoulu, Espoo; 2015, Fysiikan opetusmoniste, luku 7.10 Sähkömagneettisen säteilyn ja kiteisen aineen välinen vuorovaikutus, s.338.

NREL; 2015, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.

Motiva; 2015, http://www.motiva.fi/files/9179/Photovoltaic_Energy_Electricity_from_the_Sun_EPIA.pdf.

MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, chapter 5 – Economics of Solar Electricity Generation, p. 107 ja NREL; 6/2015, www.nrel.gov.

Tuomas Lapp; 2009, Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä, s. 38, s. 52 ja sivut 85 - 88.

John Wiley & Sons Inc.; 2005, Moore L, et al. Photovoltaic Power Plant Experience at Arizona Public Service; A 5-year assessment. Progress in PV – Research and Applications, vol. 13., p. 353 – p. 363.

Genesis-Kirjat Oy; 10/2007, Esko Valtanen, Matematiikan ja Fysiikan käsikirja, 2. painos, s. 251.

MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, the integration of distributed photovoltaic generators, p. 158.

University of Central Florida; 2015, The Florida Solar Energy Center, http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/types_of_pv.htm.

United Nations; 2014, Performance Peacekeeping – Final Report of the Expert Panel on Technology and Innovation in UN Peacekeeping, p. 21, 31 and p. 41.

MIT; 2015, The Future of Solar Energy – an interdisciplinary MIT study, 5/2015, summary for policy maker's xi.

MIT Press; 2014, Sustainable Energy – Choosing Among Options, 2nd edition, Tester, Drake, Driscoll, Colay, Peters, p. 691.

Lithuanian Energy Institute, Center for Hydrogen Energy Technologies; 2014, Dr. Darius Milcius, Green Energy Solutions for Military Applications – MS Power Point presentation.

LIITTEET

Liite 1

UNITED NATIONS PEACE KEEPING OPERATIONS, December 2014, 1 sivu.

Liite 2

UNIFIL PROCUREMENT SECTION; Purchase of the UNIFIL Solar Panels with accessories, 9FIL-200426 and 9FIL-200725, yhteensä 2 sivua.

Liite 3

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORIES – NREL; 2015-06-09, Best Research-Cell Efficiencies, yhteensä 2 sivua.

Liite 4

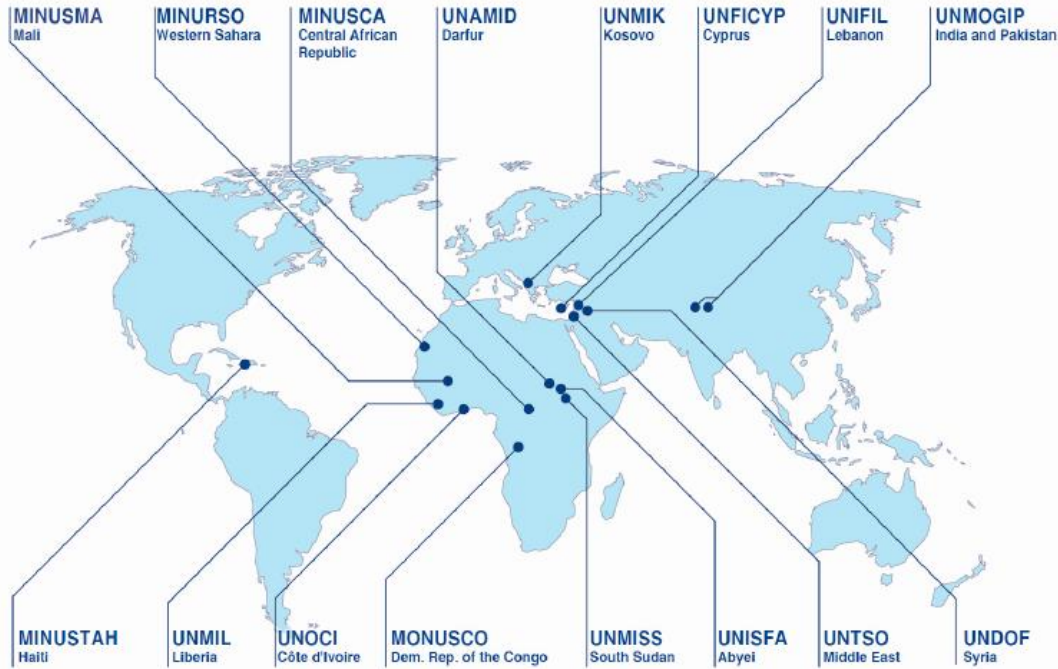
mitsubishi electric us inc; MLE-series Photovoltaic Modules – specification sheet, yhteensä 2 sivua.

Liite 5

LASKENTA TULOKSET; NREL PV Watts kWh / a - laskimesta ja FinSolar - MS Excel sisäisen kirkokannan menetelmällä, yhteensä 4 sivua.

UNITED NATIONS PEACEKEEPING OPERATIONS

December 2014



UNITED NATIONS PEACEKEEPING

A GLOBAL PARTNERSHIP



PEACEKEEPING IS SUPPORTED BY

193 member states

WHO CONTRIBUTE
PERSONNEL, EQUIPMENT & FUNDS

***BUDGET 7.83** BILLION
LESS THAN **0.5%** OF WORLD MILITARY EXPENDITURES

122,969 TOTAL FIELD PERSONNEL
128 COUNTRIES CONTRIBUTING TROOPS, POLICE & MILITARY PERSONNEL

Data used from 2013-2014
*Approved resources for the period from 1 July 2013 to 30 June 2014

WORKING WITH OUR INTERNATIONAL PARTNERS

AU African Union
EU European Union

AND OUR UN PARTNERS INCLUDING

The World Bank
UNDP United Nations Development Programme
UN WOMEN

PEACEKEEPING HAS A GLOBAL LOGISTICS OPERATION

	56	AIRPLANES
	12	SHIPS
	144	HELICOPTERS
	34,742	VEHICLES
	30	HOSPITALS
	284	MEDICAL CLINICS

PEACEKEEPING INCLUDES

UN ACROSS **4** CONTINENTS
16 MISSIONS

SECOND LARGEST MISSION IS IN

[UNAMID] **Darfur**
16,096 personnel
IN PARTNERSHIP WITH **AU** African Union

WORKING IN PARTNERSHIP WITH THE HOST COUNTRIES WE HELP PEOPLE AROUND THE WORLD


7M TOTAL AREA OF COUNTRIES WE OPERATE IN
125M LOCAL POPULATION OF COUNTRIES WE OPERATE IN


UNITED NATIONS PEACEKEEPING
A FORCE FOR PEACE. CHANGE THE FUTURE.

un.org/peacekeeping

Source: United Nations Peacekeeping

Map: Cartographic Section / Department of Field Support

Description: UNIFIL Solar Panels	
Picture or Logo	
Purchasing Authority	Procurement Action by UNIFIL Procurement Section Requisitioned by CITS (Communications and IT systems).
Contract Title	Solar Panels. Purchase of Solar Panels with accessories 9FIL-200426 & 9FIL-200725 9FIL-200426 was issued on 10 Dec 08 and received on 26 Feb 09 9FIL-200725 was issued on 0 May 09 with delivery due date on 25 Sep 09.
Sustainability Criteria	Following instructions from UN HQ for 2008/2009, Missions should explore the possibility of using alternative environmentally friendly power sources for CITS equipment. Several forms of "eco Friendly" electricity production equipment are in the market now, some of them quite promising while some others still on preliminary research status. Most Missions should target to generate at least 15% of the total electricity used by Communications and IT systems by non-fossil fuel energy sources by the end of FY08/09".
Cost Implications	<p>PO# (9FIL-200426) US\$226,650.00 PO# (9FIL-200725) US\$253,325.00 In a total of US\$479,975.00. The cost of 1KW produced by Solar Panels vrs. Diesel Generator: Calculation for Solar Panels provided by the CITS:</p> <p>The calculations is purely theoretical and based on data for Athens (No data available for Lebanon in the calculator used), the output will increase the further south the PV panels is installed. The value is very conservative, it is expected that the cost recovery will be around 15 years, the calculated cost recovery is 21.8 Years.</p> <p>The calculations are based on 3 PV panel banks, total of 100 PV panels.</p> <ul style="list-style-type: none"> -The total DC KW rated output is 19.95 Kw -The DC to AC conversion factor used is 0.77 -This will give an effective output 15.4 Kw (This will most like increase, due to more effective inverters) -The annual Energy production is calculated to be 31687 KW/h (Base on 6.12 KWh/m2/day)

Description: UNIFIL Solar Panels	
Picture or Logo	
Purchasing Authority	Procurement Action by UNIFIL Procurement Section Requisitioned by CITS (Communications and IT systems).
Contract Title	Solar Panels. Purchase of Solar Panels with accessories 9FIL-200426 & 9FIL-200725 9FIL-200426 was issued on 10 Dec 08 and received on 26 Feb 09 9FIL-200725 was issued on 0 May 09 with delivery due date on 25 Sep 09.
Sustainability Criteria	Following instructions from UN HQ for 2008/2009, Missions should explore the possibility of using alternative environmentally friendly power sources for CITS equipment. Several forms of "eco Friendly" electricity production equipment are in the market now, some of them quite promising while some others still on preliminary research status. Most Missions should target to generate at least 15% of the total electricity used by Communications and IT systems by non-fossil fuel energy sources by the end of FY08/09".
Cost Implications	<p>PO# (9FIL-200426) US\$226,650.00 PO# (9FIL-200725) US\$253,325.00 In a total of US\$479,975.00. The cost of 1KW produced by Solar Panels vrs. Diesel Generator: Calculation for Solar Panels provided by the CITS:</p> <p>The calculations is purely theoretical and based on data for Athens (No data available for Lebanon in the calculator used), the output will increase the further south the PV panels is installed. The value is very conservative, it is expected that the cost recovery will be around 15 years, the calculated cost recovery is 21.8 Years.</p> <p>The calculations are based on 3 PV panel banks, total of 100 PV panels.</p> <ul style="list-style-type: none"> -The total DC KW rated output is 19.95 Kw -The DC to AC conversion factor used is 0.77 -This will give an effective output 15.4 Kw (This will most like increase, due to more effective inverters) -The annual Energy production is calculated to be 31687 KW/h (Base on 6.12 KWh/m2/day)



The National Renewable Energy Laboratory (NREL) maintains a plot of compiled values of highest confirmed conversion efficiencies for research cells, from 1976 to the present, for a range of photovoltaic technologies.

Devices included in this plot of the current state of the art have efficiencies that are confirmed by independent, recognized test labs (e.g., NREL, AIST, Fraunhofer) and are reported on a standardized basis. The measurements for new entries must be with respect to Standard Test or Reporting Conditions (STC) as defined by the global reference spectrum for flat-plate devices and the direct reference spectrum for concentrator devices as listed in standards IEC 60904-3 edition 2 or ASTM G173. The reference temperature is 25°C and the area is the cell total area or the area defined by an aperture.

Cell efficiency results are provided within different families of semiconductors: (1) multijunction cells, (2) single-junction gallium arsenide cells, (3) crystalline silicon cells, (4) thin-film technologies, and (5) emerging photovoltaics. Some 26 different subcategories are indicated by distinctive colored symbols.

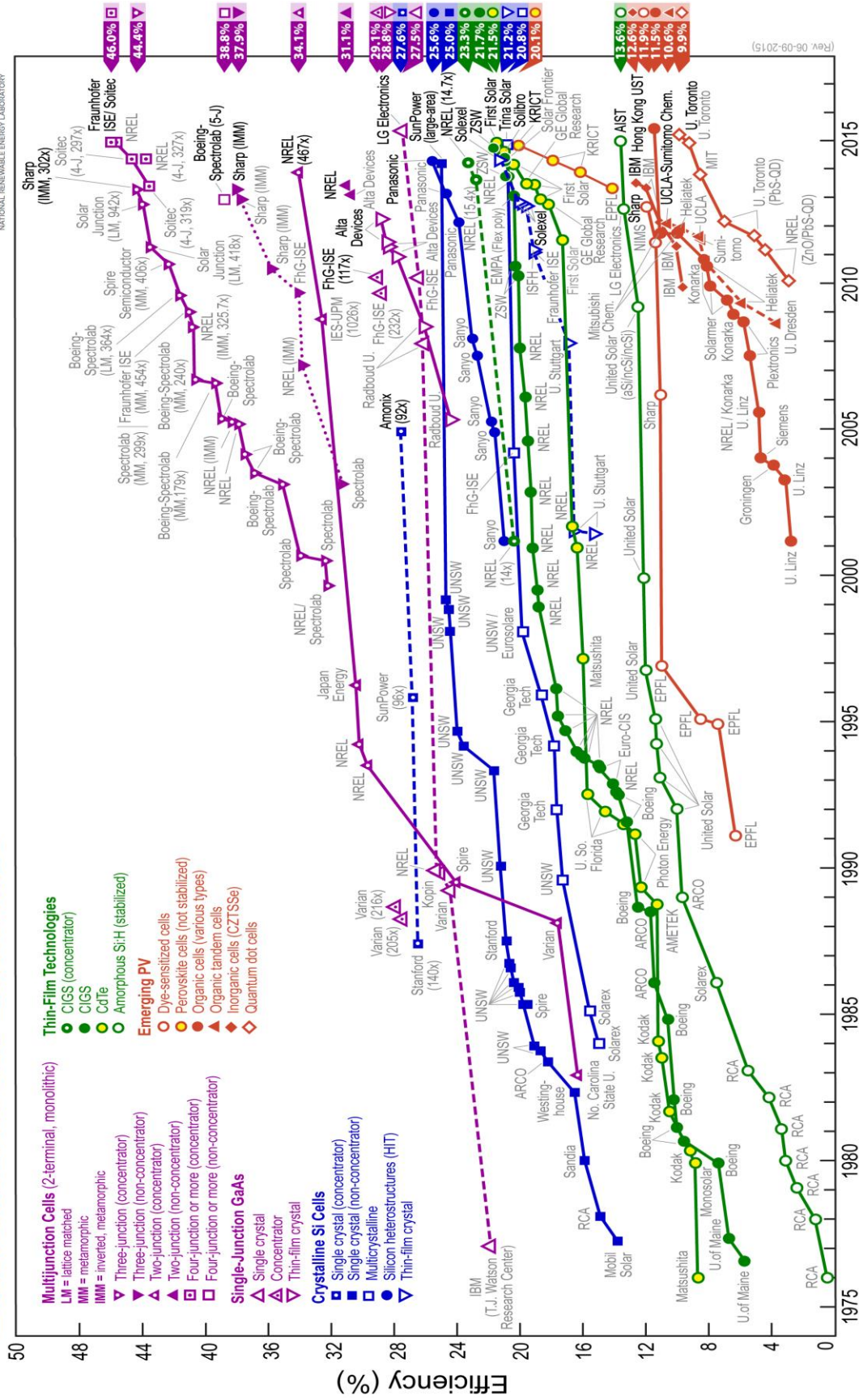
The most recent world record for each technology is highlighted along the right edge in a flag that contains the efficiency and the symbol of the technology. The company or group that fabricated the device for each most-recent record is bolded on the plot.

The information plotted by NREL is provided in good faith, but NREL cannot accept direct responsibility for any errors or omissions. The plot is not copyrighted and may be used in presentations and publications, with a notation included that states: "This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO."

15013 Denver West Parkway
Golden, CO 80401
Phone 303-275-3000

NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy
Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
Operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC

Best Research-Cell Efficiencies



(Reported 08-09-2015)

MLE series 270Wp PV-MLE270HD2

Photovoltaic Modules

Mitsubishi Electric is a global leader in providing superior-quality photovoltaic modules to businesses and residences around the world. With over 40 years experience in the photovoltaic industry, we manufacture products designed and built for optimal efficiency and reliability. With Mitsubishi Electric, you are getting the best.

■ High Power Output

Our modules are designed for high efficiency and high power output to utilize limited space while giving you a greater return on investment.

- Unique half-cut, four bus bar, monocrystalline cells increase module efficiency
- Positive (-0/+5%) tolerance ensures expected power generation
- Proprietary cell surface texturing process increases light absorption
- Straight electrical tabs ensure integrity of electrical connections and increase current flow
- Cells matched for electrical uniformity produce high power output and reliability

■ High Reliability

Superior craftsmanship, engineering excellence, and attention to the finest detail ensure longevity and optimal performance.

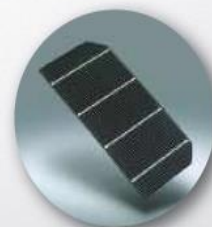
- Industry-leading 25-year linear performance warranty offers 5.5% more power output than standard tiered warranties
- Corrosion-resistant design allows installation next to saltwater
- Four-layer protective junction box reduces risk of failure from water or dust intrusion, enhancing reliability and safety
- Sturdy frame allows mounting in portrait or landscape orientations
- High static load rating of 5400Pa to endure high wind and snow loading

■ Mitsubishi Electric Quality

Our experienced engineers and meticulous manufacturing processes provide you with the highest quality products possible.

- 10-year materials and workmanship warranty guarantees quality
- Automated production lines ensure consistent high quality in every cell and module
- Each cell and module flash tested to ensure rated level of output
- Aesthetically pleasing black frame and cells
- Made with PV wire for safe use with transformerless inverters
- Lead-free solder protects health and the environment

monocrystalline



Technical Specifications

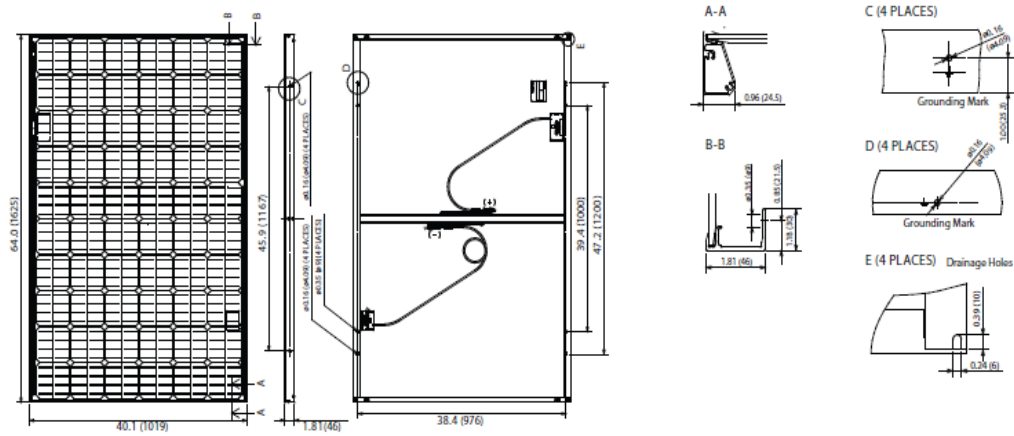


Mitsubishi Electric Photovoltaic Module

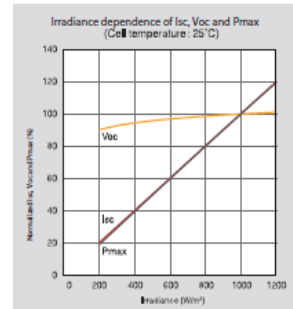
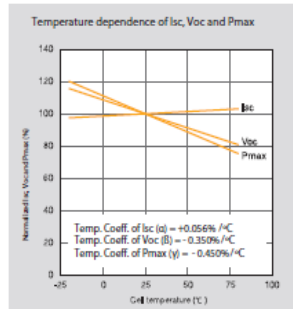
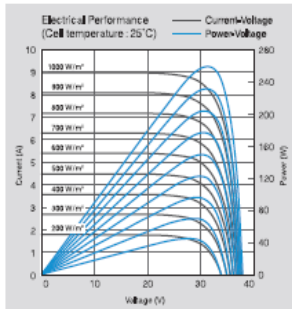
Specification Sheet

Manufacturer	MITSUBISHI ELECTRIC
Model name	PV-MLE270HD2
Cell type	Monocrystalline Silicon, 78mm x 156 mm
Number of cells	120 cells
Maximum power rating (Pmax)	270W
Warranted minimum Pmax	270.0W
PV USA test condition rating (PTC)	241.3Wp
Open circuit voltage (Voc)	38.4V
Short circuit current (Isc)	9.18A
Maximum power voltage (Vmp)	31.9V
Maximum power current (Imp)	8.48A
Module efficiency	16.3%
Aperture efficiency	17.6%
Tolerance of maximum power rating	-0/+5%
Static load test passed	5,400 Pa
Number of bus bars per cell	4 Bus bars
Normal operating cell temperature (NOCT)	46.5°C
Maximum system voltage, DC	600V & 1000V (UL), 1000V (IEC)
Fuse rating	15A
Dimensions	64.0 x 40.1 x 1.81 inch (1625 x 1019 x 46 mm)
Weight	44 lbs (20kg)
Number of modules per pallet	22
Number of modules per container (40 ft. container)	616
Output terminal	(+) 800mm, (-) 1250mm with SMK (PV-03) connector
Certifications	UL 1703, IEC 61215 2nd Edition, IEC 61730
Fire rating	Type 2, 5 & 8

Drawings and Dimensions Unit: Inch (mm)



Electrical Characteristics



Mitsubishi Electric US, Inc.
 5900-A Katella Avenue, CA 90630-5019
 Telephone: 714-236-6137 Email: pv@meus.mea.com

www.MitsubishiElectricSolar.com

1.7.2015

PVWatts Calculator



Caution: Photovoltaic system performance predictions calculated by PVWatts® include many inherent assumptions and uncertainties and do not reflect variations between PV technologies nor site-specific characteristics except as represented by PVWatts® inputs. For example, PV modules with better performance are not differentiated within PVWatts® from lesser performing modules. Both NREL and private companies provide more sophisticated PV modeling tools (such as the System Advisor Model at <http://sam.nrel.gov>) that allow for more precise and complex modeling of PV systems.

Disclaimer: The PVWatts® Model ("Model") is provided by the National Renewable Energy Laboratory ("NREL"), which is operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC ("Alliance") for the U.S. Department Of Energy ("DOE") and may be used for any purpose whatsoever.

The names DOE/NREL/ALLIANCE shall not be used in any representation, advertising, publicity or other manner whatsoever to endorse or promote any entity that adopts or uses the Model. DOE/NREL/ALLIANCE shall not provide

any support, consulting, training or assistance of any kind with regard to the use of the Model or any updates, revisions or new versions of the Model.

YOU AGREE TO INDEMNIFY DOE/NREL/ALLIANCE, AND ITS AFFILIATES, OFFICERS, AGENTS, AND EMPLOYEES AGAINST ANY CLAIM OR DEMAND, INCLUDING REASONABLE ATTORNEYS' FEES, RELATED TO YOUR USE, RELIANCE, OR ADOPTION OF THE MODEL FOR ANY PURPOSE WHATSOEVER. THE MODEL IS PROVIDED BY DOE/NREL/ALLIANCE "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL DOE/NREL/ALLIANCE BE LIABLE FOR ANY SPECIAL, INDIRECT OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OR ANY DAMAGES WHATSOEVER, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO CLAIMS ASSOCIATED WITH THE LOSS OF DATA OR PROFITS, WHICH MAY RESULT FROM ANY ACTION IN CONTRACT, NEGLIGENCE OR OTHER TORTIOUS CLAIM THAT ARISES OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE USE OR PERFORMANCE OF THE MODEL.

RESULTS

70,840 kWh per Year *

Month	Solar Radiation (kWh / m ² / day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (\$)
January	2.80	3,528	917
February	3.47	3,984	1,036
March	4.56	5,727	1,489
April	5.50	6,478	1,684
May	6.30	7,519	1,955
June	7.43	8,348	2,170
July	7.59	8,697	2,261
August	7.05	8,035	2,089
September	6.23	7,003	1,821
October	4.30	5,189	1,349
November	2.73	3,258	847
December	2.45	3,074	799
Annual	5.03	70,840	\$ 18,417

User Comments

The UNTSO HQ Solar radiation calculated by using solar data from Athens, GR. This can be the most realistic calculation, as getting the PV production of 70,000 kWh/a

Location and Station Identification

Requested Location	Athens
Weather Data Source	(INTL) ATHENS, GREECE 5.8 mi
Latitude	37.9° N
Longitude	23.73° E

PV System Specifications (Commercial)

DC System Size	50 kW
Module Type	Standard
Array Type	Fixed (open rack)
Array Tilt	20°
Array Azimuth	180°
System Losses	14%
Inverter Efficiency	96%
DC to AC Size Ratio	1.1

Initial Economic Comparison

Average Cost of Electricity Purchased from Utility	0.26 \$/kWh
Initial Cost	2.60 \$/Wdc
Cost of Electricity Generated by System	0.12 \$/kWh

These values can be compared to get an idea of the cost-effectiveness of this system. However, system costs, system financing options (including 3rd party ownership) and complex utility rates can significantly change the relative value of the PV system.

UUSIUTUVA ENERGIA KRIISINHALLINTAOPERAATIOISSA JA SEN LISÄÄMISMAHDOLLISUUDET

UNTSO HQ	Jari M. Mustonen	3.7.2015	VE 1	Paneelien kiinteä asennus, degradaatio 1 % / a huomioitu												
Parametrit	Vuosi tuotanto 70840 kWh															
0.234	Ostosähkön hinta €/kWh, alvittomana sisältäen tuotannon ja siirron muuttuvat kulut ja verot															
2%	Oletettu sähkön hinnan vuosittainen nousu															
50	Voimalan teho (kWp)															
70,840	Voimalan vuosituotanto (kWh)															
116,500	Voimalan hinta (€) Sisältäen asennuksen, mutta ei käytönaikaista huoltoa.															
0%	TEM investointituen tukiprosentti															
1.4168	Vuosituotanto kWh/Wp															
8%	Invertterin vaihdon kustannus + muut huoltokulut (% kokonaisinvestoinnista) Oletettu tapahtuvan kerran, 15. vuotena.															
2.33 €	Hankintahinta per Wp															
17.35%	Sisäinen korkokanta koko käyttöiän (30 vuotta) tarkastelujaksolla															
				Nettonykyarvo						Sähkön tuotantohinta (30v, tasalyhen						
				Korko	0%	2%	5%	7%	9%	11%	0%	2%	5%	7%	9%	11%
Vuosi	Investointi	Menot (€/Wp)	Tuotanto [kWh/wp/a]	Kassavirta [€/vuosi/Wp]	0	1.02	1.05	1.07	1.09	1.11						
1	Järjestelmän alkuhankinta	2.33	1.42	-2.00	-2.00	-2.00	-2.01	-2.02	-2.03	-2.03	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
2		0.00	1.40	0.33	-1.66	-1.68	-1.71	-1.73	-1.74	-1.76						
3		0.00	1.39	0.34	-1.33	-1.36	-1.42	-1.45	-1.48	-1.51						
4		0.00	1.37	0.34	-0.98	-1.05	-1.14	-1.19	-1.24	-1.29						
5		0.00	1.36	0.34	-0.64	-0.74	-0.87	-0.95	-1.02	-1.08						
6		0.00	1.35	0.35	-0.29	-0.43	-0.61	-0.71	-0.81	-0.90						
7		0.00	1.33	0.35	0.06	-0.12	-0.36	-0.49	-0.62	-0.73						
8		0.00	1.32	0.35	0.42	0.18	-0.12	-0.29	-0.44	-0.57						
9		0.00	1.31	0.36	0.77	0.48	0.11	-0.09	-0.27	-0.43						
10		0.00	1.29	0.36	1.14	0.78	0.34	0.09	-0.12	-0.31						
11		0.00	1.28	0.37	1.50	1.07	0.55	0.26	0.02	-0.19						
12		0.00	1.27	0.37	1.87	1.36	0.75	0.43	0.15	-0.08						
13		0.00	1.26	0.37	2.24	1.65	0.95	0.58	0.27	0.01						
14		0.00	1.24	0.38	2.62	1.94	1.14	0.73	0.39	0.10						
15	Invertterin vaihto	0.19	1.23	0.19	2.81	2.08	1.23	0.79	0.43	0.13						
16		0.00	1.22	0.38	3.20	2.36	1.41	0.92	0.53	0.21						
17		0.00	1.21	0.39	3.58	2.63	1.58	1.05	0.62	0.27						
18		0.00	1.19	0.39	3.98	2.91	1.74	1.16	0.70	0.33						
19		0.00	1.18	0.40	4.37	3.18	1.89	1.27	0.78	0.39						
20		0.00	1.17	0.40	4.77	3.45	2.05	1.38	0.85	0.44						
21		0.00	1.16	0.40	5.17	3.71	2.19	1.47	0.92	0.48						
22		0.00	1.15	0.41	5.58	3.98	2.33	1.56	0.98	0.52						
23		0.00	1.14	0.41	5.99	4.24	2.46	1.65	1.04	0.56						
24		0.00	1.12	0.41	6.40	4.49	2.59	1.73	1.09	0.59						
25		0.00	1.11	0.42	6.82	4.75	2.72	1.81	1.14	0.62						
26		0.00	1.10	0.42	7.25	5.00	2.83	1.88	1.18	0.65						
27		0.00	1.09	0.43	7.67	5.25	2.95	1.95	1.22	0.68						
28		0.00	1.08	0.43	8.11	5.50	3.06	2.02	1.26	0.70						
29		0.00	1.07	0.44	8.54	5.75	3.16	2.08	1.30	0.72						
30		0.00	1.06	0.44	8.98	5.99	3.27	2.14	1.33	0.74						



Caution: Photovoltaic system performance predictions calculated by PVWatts® include many inherent assumptions and uncertainties and do not reflect variations between PV technologies nor site-specific characteristics except as represented by PVWatts® inputs. For example, PV modules with better performance are not differentiated within PVWatts® from lesser performing modules. Both NREL and private companies provide more sophisticated PV modeling tools (such as the System Advisor Model at <http://sam.nrel.gov>) that allow for more precise and complex modeling of PV systems.

Disclaimer: The PVWatts® Model ("Model") is provided by the National Renewable Energy Laboratory ("NREL"), which is operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC ("Alliance") for the U.S. Department Of Energy ("DOE") and may be used for any purpose whatsoever.

The names DOE/NREL/ALLIANCE shall not be used in any representation, advertising, publicity or other manner whatsoever to endorse or promote any entity that adopts or uses the Model. DOE/NREL/ALLIANCE shall not provide

any support, consulting, training or assistance of any kind with regard to the use of the Model or any updates, revisions or new versions of the Model.

YOU AGREE TO INDEMNIFY DOE/NREL/ALLIANCE, AND ITS AFFILIATES, OFFICERS, AGENTS, AND EMPLOYEES AGAINST ANY CLAIM OR DEMAND, INCLUDING REASONABLE ATTORNEYS' FEES, RELATED TO YOUR USE, RELIANCE, OR ADOPTION OF THE MODEL FOR ANY PURPOSE WHATSOEVER. THE MODEL IS PROVIDED BY DOE/NREL/ALLIANCE "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL DOE/NREL/ALLIANCE BE LIABLE FOR ANY SPECIAL, INDIRECT OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OR ANY DAMAGES WHATSOEVER, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO CLAIMS ASSOCIATED WITH THE LOSS OF DATA OR PROFITS, WHICH MAY RESULT FROM ANY ACTION IN CONTRACT, NEGLIGENCE OR OTHER TORTIOUS CLAIM THAT ARISES OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE USE OR PERFORMANCE OF THE MODEL.

RESULTS

78,064 kWh per Year *

Month	Solar Radiation (kWh / m ² / day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (\$)
January	3.68	4,584	1,192
February	4.79	5,353	1,392
March	5.48	6,664	1,733
April	6.31	7,151	1,859
May	6.91	7,954	2,068
June	7.31	8,001	2,080
July	7.25	8,170	2,124
August	6.86	7,763	2,018
September	6.59	7,282	1,893
October	4.90	5,707	1,484
November	4.08	4,781	1,243
December	3.80	4,654	1,210
Annual	5.66	78,064	\$ 20,296

User Comments

The average cost of electricity is 0.26 USD/kWh as it was described in the UNIFIL HQ PV system

Location and Station Identification

Requested Location	UNTSO HQ, Jerusalem, Israel
Weather Data Source	(INTL) CAIRO, EGYPT 253 mi
Latitude	30.13° N
Longitude	31.4° E

PV System Specifications (Commercial)

DC System Size	50 kW
Module Type	Standard
Array Type	Fixed (open rack)
Array Tilt	20°
Array Azimuth	180°
System Losses	14.08%
Inverter Efficiency	96%
DC to AC Size Ratio	1.1

Initial Economic Comparison

Average Cost of Electricity Purchased from Utility	0.26 \$/kWh
Initial Cost	2.60 \$/Wdc
Cost of Electricity Generated by System	0.11 \$/kWh

These values can be compared to get an idea of the cost-effectiveness of this system. However, system costs, system financing options (including 3rd party ownership) and complex utility rates can significantly change the relative value of the PV system.

26.6.2015

PVWatts Calculator



Caution: Photovoltaic system performance predictions calculated by PVWatts® include many inherent assumptions and uncertainties and do not reflect variations between PV technologies nor site-specific characteristics except as represented by PVWatts® inputs. For example, PV modules with better performance are not differentiated within PVWatts® from lesser performing modules. Both NREL and private companies provide more sophisticated PV modeling tools (such as the System Advisor Model at <http://sam.nrel.gov>) that allow for more precise and complex modeling of PV systems.

Disclaimer: The PVWatts® Model ("Model") is provided by the National Renewable Energy Laboratory ("NREL"), which is operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC ("Alliance") for the U.S. Department of Energy ("DOE") and may be used for any purpose whatsoever.

The names DOE/NREL/ALLIANCE shall not be used in any representation, advertising, publicity or other manner whatsoever to endorse or promote any entity that adopts or uses the Model. DOE/NREL/ALLIANCE shall not provide

any support, consulting, training or assistance of any kind with regard to the use of the Model or any updates, revisions or new versions of the Model.

YOU AGREE TO INDEMNIFY DOE/NREL/ALLIANCE, AND ITS AFFILIATES, OFFICERS, AGENTS, AND EMPLOYEES AGAINST ANY CLAIM OR DEMAND, INCLUDING REASONABLE ATTORNEYS' FEES, RELATED TO YOUR USE, RELIANCE, OR ADOPTION OF THE MODEL FOR ANY PURPOSE WHATSOEVER. THE MODEL IS PROVIDED BY DOE/NREL/ALLIANCE "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL DOE/NREL/ALLIANCE BE LIABLE FOR ANY SPECIAL, INDIRECT OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OR ANY DAMAGES WHATSOEVER, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO CLAIMS ASSOCIATED WITH THE LOSS OF DATA OR PROFITS, WHICH MAY RESULT FROM ANY ACTION IN CONTRACT, NEGLIGENCE OR OTHER TORTIOUS CLAIM THAT ARISES OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE USE OR PERFORMANCE OF THE MODEL.

RESULTS

98,413 kWh per Year *

Month	Solar Radiation (kWh / m ² / day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (\$)
January	4.73	5,871	1,527
February	6.14	6,854	1,782
March	6.82	8,278	2,152
April	7.90	8,981	2,335
May	8.79	10,134	2,635
June	9.51	10,409	2,706
July	9.30	10,481	2,725
August	8.40	9,497	2,469
September	8.04	8,868	2,306
October	5.95	6,885	1,790
November	5.14	5,982	1,555
December	5.08	6,172	1,605
Annual	7.15	98,412	\$ 25,587

User Comments

The average cost of electricity is 0.26 USD/kWh as it was described in the UNIFIL HQ PV system

Location and Station Identification

Requested Location	UNTSO HQ, Jerusalem, Israel
Weather Data Source	(INTL) CAIRO, EGYPT 253 mi
Latitude	30.13° N
Longitude	31.4° E

PV System Specifications (Commercial)

DC System Size	50 kW
Module Type	Standard
Array Type	2-Axis Tracking
Array Tilt	58°
Array Azimuth	180°
System Losses	14.08%
Inverter Efficiency	96%
DC to AC Size Ratio	1.1

Initial Economic Comparison

Average Cost of Electricity Purchased from Utility	0.26 \$/kWh
Initial Cost	2.60 \$/Wdc
Cost of Electricity Generated by System	0.08 \$/kWh

These values can be compared to get an idea of the cost-effectiveness of this system. However, system costs, system financing options (including 3rd party ownership) and complex utility rates can significantly change the relative value of the PV system.