

# Fýsileiki virkjunar sólarorku á norðurslóðum: Reynsla af sólarpanelum IKEA á Íslandi

## *Feasibility of a small-scale photovoltaic systems in cold climate: IKEA solar array case study*

Sindri Þrastarson<sup>a</sup>, Björn Marteinson<sup>a</sup>, Hrund Ó. Andradóttir<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands, Hjarðarhaga 2-6, 107 Reykjavík.

### Fyrirspurnir:

Sindri Þrastarson

sth227@hi.is

Greinin barst 7. október 2019

Samþykkt til birtingar 7. desember 2019

### Ágrip

Á síðustu áratugum hefur verið gríðarleg þróun í nýtni á sólarcellum í heiminum og framleiðslukostnaður þeirra hefur lækkað mikið. Norðurlöndin hafa tekið markviss skref í að innleiða sólarafnkerfi þrátt fyrir takmarkaða inngeislun á veturna. Þáttaskil urðu á Íslandi þegar IKEA setti upp safnkerfi 65 sólarpanela með 17,55 kW framleiðslugetu í Garðabæ sumarið 2018. Markmið þessa verkefnis var að meta fýsileika sólarcella í Reykjavík á grundvelli mældrar heildargeislunar í Reykjavík, framleiddri orku safnkerfis IKEA og fræðum. Niðurstöður rannsóknarinnar gefa til kynna að heildargeislun í Reykjavík (64°N, 21° V) var að meðaltali um 780 kWh/m<sup>2</sup> á ári (árin 2008-2018), þar af mest 140 kWh/m<sup>2</sup> í júlí og minnst 1,8 kWh/m<sup>2</sup> í desember. Orkuframleiðsla á ársgrundvelli er hámarks ef sólarcellur snúa í suður í 40° halla, en lægri halli skilar sambærilegum árangri á sumrin. Hægt er að auka framleiðslu með því að auka halla panela á veturna yfir 60°. Safnkerfi IKEA framleiddi rúmlega 12 MWh á 12 mánaða tímabili, og var sköluð árleg orka (árs orku framleiðsla deilt með hámarksafli kerfis) 712 kWh/kW. Nýtingarhlutfall kerfis, þ.e. hlutfall af mestu hámarksnýtingu, reyndist vera 69% , sem er um 10% lægra en mælt hefur í tveimur viðmiðunarránsóknum á norðurslóðum. Rekja má þennan mun til snjó og skuggamyndunar á panela IKEA auk þess að ekki reyndist unnt að setja panela í kjörhalla vegna tæknilegra takmarkana. Endurgreiðslutími fjárfestingar IKEA reiknast sem 24 ár, sem tekur mið af lágu raforkuverði á dreifikerfi í Reykjavík og ófyrirsjáanlegs háa uppsetningarkostnaðar. Sólarorka getur verið ákjósanlegur valkostur í orkuframleiðslu á Íslandi þegar horft er til framtíðar, meiri reynsla hefur náðst í nýtingu og ef hægt er að selja raforkuna inn á dreifikerfið.

**Lykilorð:** Sólarpanelar, orkuframleiðsla, kostnaður, norðurslóðir.

## Abstract

The efficiency and production costs of solar panels have improved dramatically in the past decades. The Nordic countries have taken steps in instigating photovoltaic (PV) systems into energy production despite limited incoming solar radiation in winter. IKEA installed the first major PV system in Iceland with 65 solar panels with 17.55 kW of production capacity in the summer of 2018. The purpose of this research was to assess the feasibility of PV systems in Reykjavík based on solar irradiation measurements, energy production of a PV array located at IKEA and theory. Results suggests that net irradiation in Reykjavík (64°N, 21° V) was on average about 780 kWh/m<sup>2</sup> per year (based on years 2008-2018), highest 140 kWh/m<sup>2</sup> in July and lowest 1,8 kWh/m<sup>2</sup> in December. Maximum annual solar power is generated by solar panels installed at a 40° fixed angle. PV panels at a lower angle produce more energy during summer. Conversely, higher angles maximize production in the winter. The PV system produced over 12 MWh over a one-year period and annual specific yield was 712 kWh/kW and performance ratio 69% which is about 10% lower than in similar studies in cold climates. That difference can be explained by snow cover, shadow falling on the panels and panels not being fixed at optimal slope. Payback time for the IKEA PV system was calculated 24 years which considers low electricity prices in Reykjavik and unforeseen high installation costs. Solar energy could be a feasible option in the future if production- and installation costs were to decrease and if the solar PV output could be sold to the electric grid in Iceland.

**Keywords:** solar panels, energy production, cost aspects, northern hemisphere

## Inngangur

Hlýnun loftslagsins af völdum losunar gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum er ótvíræð. Frá árinu 1950 hefur hitastigið í lofthjúpunum og sjónum hækkað, jöklar bráðnað hraðar en nokkru sinni fyrr og sjávarstaða hækkað (IPCC, 2014). Árið 2016 var aðeins um 24,3% af raforku framleidd með endurnýjanlegum orkugjöfum á heimsvísu (IEA, 2018). Sólarcellur nýta orku sólarinnar með því að breyta geislun sólar beint í raforku með ljósspennuaðferð og framleiða jafnstraum (Boyle, 2004). Nýting sólarorku hefur vaxið um 30% á ársvísu síðan 2006 upp í 2,1 % hlutdeild raforkuframleiðslu á heimsvísu árið 2018 (IEA PVPS, 2018a). Með örri þróun sólarcella síðustu áratugi hefur kostnaður við þær lækkað, nýtni aukist ásamt því að uppsetning á sólarrafhlöðum er orðin vænlegri kostur en áður var. Frá árinu 1980 hefur kostnaður við hverja sólarcellu lækkað um 10% árlega og áætlað er að kostnaðurinn muni halda áfram að lækka um 10% á ári fram til ársins 2030 (Farmer & Lafonda, 2015).

Á Íslandi er 99,99% af raforku framleidd með endurnýjanlegum orkugjöfum, og þar af er vatnsorka 71% og jarðvarmaorka 29% (Orkustofnun, 2015). Áherslubreytingar í stefnu stjórnvalda til virkjanakosta landsins og álit almennings á umhverfisáhrifum vatnsafls- og jarðvarmavirkjana gætu haft töluverð áhrif á íslenska orkuframleiðslu. Sífellt reynist erfiðara að fá leyfi stjórnvalda til þess að virkja fallvötn og jarðvarma og gæti frekari virkjun vind- og sólarorku komið í auknum mæli inn í orkunýtingu Íslands í náninni framtíð. Áhugavert er að skoða þann möguleika að framleiða raforku með staðbundnum hætti til beinnar notkunar á heimilum eða fyrirtækjum með sólarcellum.

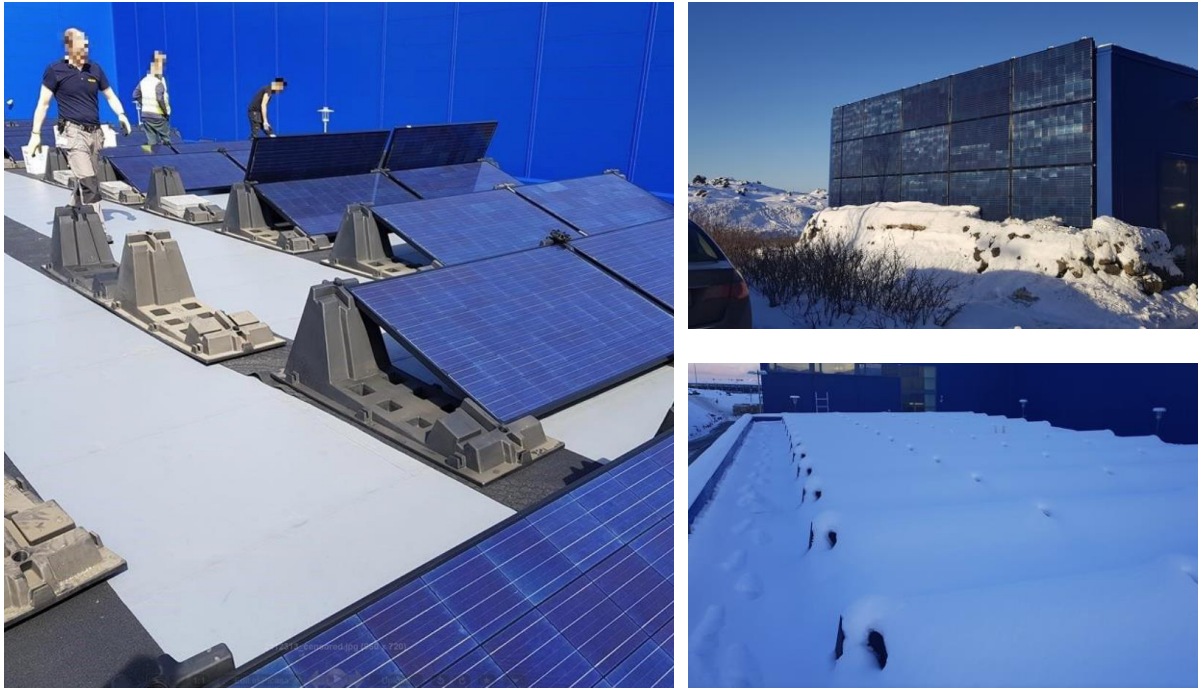
Nýting sólarorku á norðurslóðum til raforkuframleiðslu er takmörkuð af lítilli inngeislun sólar yfir veturinn en einnig mikils orkukostnaðar sólarorku. Framleiðslukostnaður sólarpanela fer

hratt lækkandi og norðurlönd hafa því stigið markviss skref í að nýta sólarorku (Adaramola & Vågnes, 2014). Á Íslandi hefur nýting sólarorku til raforkuframleiðslu verið takmörkuð við svæði þar sem dreifikerfi raforku er ekki til staðar t.d. á hálendinu, í sumarbústöðum, hjólhýsum, á ýmsum athugunarstöðvum og rafmagnsgirðingum bænda (Kristján Kristjánsson, 2007). Lengi vel hefur mesta framleiðslan á raforku með sólarrafhlöðum á Íslandi verið í Sesseljuhúsi í Grímsnesi en þar eru 16 stykki af 140 W sólarpanelum, samtals um 3 kW (Sólheimar, 2019). Sumarið 2018 urðu þáttaskil þegar IKEA á Íslandi setti upp sólarrafkerfi 65 panela, 270 W hver, sem skilar 17,55 kW hámarksafli árlega á höfuðborgarsvæðinu.

Markmið þessa verkefnis var því að meta rafmagnsframleiðslugetu og fjárhagslegan ávinning sólarcella í Reykjavík, sem liður í að bæta þekkingu á nýtingu sólarorku á norðurlöndum. Lögð var áhersla á að skilja betur fræðilega inngeslun sólar, áætla kjörstefnu og halla yfirborðs sólarcellu til þess að hámarka raforkuframleiðslu með sólarcellum. Leitað var til IKEA á Íslandi varðandi að fá aðgang að framleiðslu- og efnahagslegum gögnum frá fyrsta rekstrarári sólarorkukerfis þeirra til að leggja mat á rekstrargrundvöll raunverulegra kerfa. Þá var leitast við að leggja mat á umhverfis- og uppsetningarþætti sem hafa áhrif á framleiðslugetu sólarcella, eða geta leitt til tapa í kerfinu. Niðurstöður þessa verkefnis eiga að geta nýst áhugasömum einstaklingum, fyrirtækjum og stofnunum um frammistöðu sólarcellu kerfis hér á landi og hagkvæmni þess að setja upp slíkt kerfi. Þessi grein er byggð á meistaraverkefni Sindra Þrastarsonar (2019) í byggingarverkfræði við Háskóla Íslands. Hafa skal í huga að framsetning einstakra niðurstæða getur verið frábrugðin þeirri í ritgerðinni.

## Staðarlýsing: Safnkerfi IKEA

Safnkerfi 65 sólarpanela af gerð BISOL BMU270-35 var gangsett þann 15. júní 2018 á tæknihúsi við aðalbyggingu IKEA á Íslandi, staðsett í Garðabæ, 64° 04' 26.4"; N 21° 55' 12.0" W og um 38 metra yfir sjávarmáli. Yfir sólarcellunum er 3.2 mm þykkt hert gler með glampavörn, hannað til að hleypa ljósi vel í gegnum sig (BISOL, 2018). Hver sólarpanell er uppgefinn með 270 vött hámarksafligetu (sjá tæknilegar upplýsingar í töflu 1). Allir panelarnir snúa í hásuður. Samanlagt er uppsett hámarksafli 17,55 kW á 106 fermetra fleti. Ekki reyndist unnt að setja allar 65 sólarcellurnar á þak hússins með 45° halla frá láréttu vegna tæknilegra örðugleika við þakfestingar. Því voru 50 panelar settir á 82 fermetra þakflöt með 20° halla frá láréttu (alls 13,5 kW) og 15 panelar á 24 fermetra suður gaflinn á húsinu, þ.e. í lóðréttri stöðu (alls 4,05 kW). Samkvæmt tæknilegum upplýsingum framleiðanda er nýtni sólarpanels 16,5% og nýtni sólarcellu 18,5%. Lægri nýtni sólarpanels er eðlileg því milli einstakra cella er bil og því er ákveðinn hluti af orkunni sem ekki nýtist.



Mynd 1: Sólarpanelar IKEA í Garðabæ. (Tv.) uppsetning 28. maí 2018. (Th.) rekstrar aðstæður 31. janúar 2019.

Sellurnar sjálfar framleiða jafnspennu og fer spennan eftir því hversu margar eru á hverri rás. Panelarnir á þakinu eru tengdar í fjórar slaufur. Það er 12 og 13 panelar raðtengdir í hring. Rofabúnaður er á þakinu fyrir hverja slaufu fyrir sig. Þaðan liggur strengurinn niður í varbúnað í töflu og hverjar tvær slaufur sameinast og tengjast við spennubreytir að gerðinni Kaco 20.0 TL3. Veggpanelarnir eru raðtengdir í tvær slaufur, 7 panelar og 8 panelar saman. Tengjast þeir eins og panelarnir á þakinu í rofabúnað og inn á varbúnað í töflu áður en þeir tengjast inn á annan spennubreytir af gerðinni Kaco 4.6 TL1. Spennubreytarnir breyta spennunni frá panelum í 400 volta riðspennu og tengjast inn á aðaltöflu IKEA þar sem framleitt afl er nýtt jafnóðum.

Tafla 1: Tæknilegar upplýsingar um sólarsellur IKEA.

<b>BISOL BMU270-35</b>	<b>Eiginleiki</b>
Tegund	Fjölkrístalla silikon
Nýtni sólarsellu (e. cell efficiency)	18,5 %
Nýtni sólarpanels (e. module efficiency)	16,5 %
Hámarks afl (e. maximum power ( $P_{max}$ ))	270 W
Hámarks spenna (e. Maximum power voltage ( $V_{pm}$ ))	30,5 V
Mesti rafstraumur ( $I_{pm}$ )	8,85 A
Mesta spenna kerfis ( $V_{dc}$ )	1.000 V
Hitastuðull fyrir $P_{max}$	+0,049%/K
Heilarflatarmál panela	106,2 m <sup>2</sup>
NOCT (e. Normal operating cell temperature)	44 °C

Sólarpanelarnir koma með 15 ára framleiðsluábyrgð ásamt 25 ára ábyrgð á því að ekki minna en 85% af uppgefnum afköstum sellunnar sé náð. Því má gera ráð fyrir að afkastageta sólarzellunnar minnki um 0,6% á hverju ári (BISOL, 2018).

## Aðferðir

### Gögn

Veðurstofa Íslands mælir á veðurstofuhæð í Reykjavík heildargeislun á láréttan flöt (óvissa  $\pm 5 W/m^2$ ) á klukkustundar fresti með sjálfvirkum CM22 mæli af gerð Kipp & Zonen. Þessi mæligildi fengust fyrir árin 2008-2019. Mælingar á alls framleiddri raforku IKEA (bæði jafnstraum og riðstraum) í vatt-stundir fengust fyrir panela á þaki og hins vegar panela á vegg. Vandamál voru í upphafi mælinga á tímabilinu 15. júní 2018 fram til 22. ágúst 2018. Þess vegna verður viðmiðunarárið í þessu verkefni 1. september 2018 og nær fram til 30. ágúst 2019.

### Aðskilnaður beinnar og dreifðar geislunar á láréttan flöt

Gögnin frá Veðurstofu Íslands eru heildargeislun á láréttan flöt ( $I_t$ ), sem innifelur bæði beina sólgeislun ( $I_b$ ) og óbeina geislun frá himinhvolfi ( $I_d$ ), þ.e.

$$I_t = I_b + I_d \quad (1)$$

Bein geislun er sú geislun sem lendir beint á yfirborð jarðar frá sólinni. Óbein geislun er dreifð geislun sem kemur frá öllu himinhvolfinu. Óbein geislun veldur ekki skugga eins og bein sólargeislun, sem er mjög stefnuháð. Á skýjuðum degi kemur næstum öll orka sólar sellu frá óbeinni geislun meðan á heiðskírum degi er aðeins um 15-20% heildargeislunar óbein (Axaopoulos, 2015).

Óbein geislun var metin sem

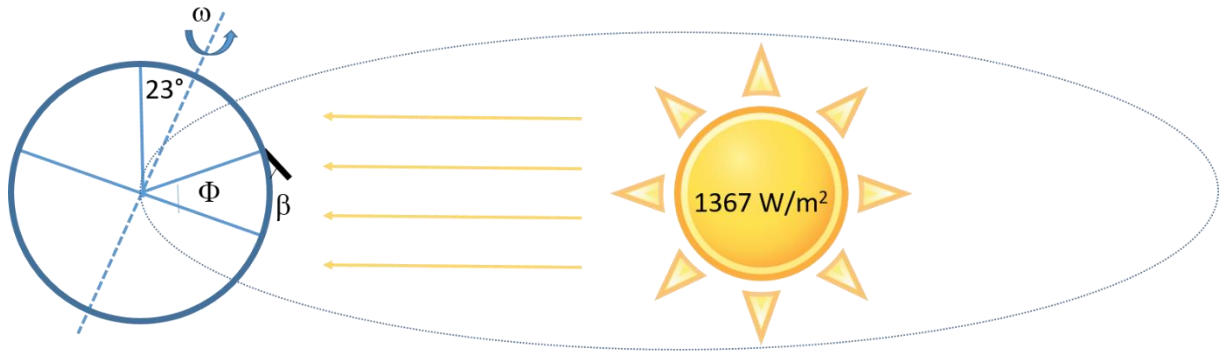
$$I_d = I_t * k_d \quad (2)$$

Stuðull óbeinnar geislunar af heild,  $k_d$ , var fenginn frá reynsluvenslu Lam og Li (1996) sem

$$k_d = \begin{cases} 0,974 & k_t \leq 0,15 \\ 1,192 - 1,349k_t & 0,15 < k_t \leq 0,7 \\ 0,259 & k_t > 0,7 \end{cases} \quad (3)$$

og stuðull skerðingar himingeislunar (e. clearness index),  $k_t$ , var metinn sem

$$k_t = \frac{I_t}{I_0} \quad (4)$$



Mynd 2: Inngeislun sólar á hallandi flöt ræðst af breiddargráðu ( $\Phi$ ), hvernig jörðin snýr gagnvart sólu (ræðst af tíma dags og árstíð) og halla flatar ( $\beta$ ) frá láréttnu.

Fræðileg himingeislun sólar á láréttan flöt  $I_0$  er reiknuð frá sólar fastanum  $I_{SC} = 1367 \frac{W}{m^2}$ , númeri dags innan árs  $N$ , og inngeislunarhorni (e. angle of incident) sólar á lárétt yfirborð  $\cos\theta_z$  sem (Axaopoulos, 2015):

$$I_0 = I_{SC} * \left[ 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] * \cos\theta_z \quad (5)$$

Inngeislunarhorn sólar á láréttan flöt fer eftir breiddargráðu  $\Phi$ , stjörnuþreidd og tímahorni sólar

$$\cos\theta_z = \cos\Phi\cos\delta\cos\omega + \sin\Phi\sin\delta \quad (6)$$

Stjörnuþreidd sólar ( $\delta$ ) er hornið milli geisla sólar og plans miðbaugs jarðar og breytist á bilinu  $\pm 23,45^\circ$  á hverju ári og er í há- og lágpunkti á sumar- og vetrarsólstöðum. Hornið var reiknað fyrir hvern dag ársins sem

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left[\frac{360}{365}(284 + N)\right] \quad (7)$$

Þar sem  $N$  er númer dags innan árs, t.d. 1. janúar:  $N = 1$ . Tímahorn sólar ( $\omega$ ) er hornið milli stöðu sólar í sólargangi og stefnu sólar frá suðri. Hornið fer hækkandi í vestur og minnkandi í austur. Útreikningar miðast við sannan sólartíma sem er sá tími sem fylgir sól þannig að sól er í hásuðri kl. 12:00.

Bein geislun reiknast sem mismunur heildar- og óbeinnar geislunar

$$I_b = I_t * (1 - k_d) \quad (8)$$

Þegar búið var að skipta mældri heildargeislun upp í beina- og óbeina geislun var útreikningur inngeislunar mögulegur á flöt með valfrjálsa stefnu og halla frá láréttnu.

### Geislun á hallandi flöt

Flötur með halla  $\beta$  fær mismikla geislun, eftir því hvort geislunin er bein, eða dreifð. Með notkun breytistuðla,  $R_b$  og  $R_d$ , má skrifa heildargeislun á hallandi flöt sem

$$I_T = I_b R_b I_{AM} + I_d R_d \quad (9)$$

Breytistuðull fyrir beina geislun  $R_b$  ræðst af hvernig flötur snýr m.t.t. stefnu geisla sólar (Axaopoulos, 2015):

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (10)$$

Inngeislunarhorn fyrir hallandi flöt ræðst af breiddargráðu staðar  $\Phi$ , stjörnuþreidd  $\delta$ , tímahorni sólar  $\omega$ , halla panels frá lárettu  $\beta$  og stefnuhorni panels  $\gamma_s$  (mælt eins og tímahorn sólar), þ.e. stefna hans  $0^\circ$  í suður, + í vestur og - í austur. Inngeislunarhorn beinnar geislunar, hornið milli sólargeislunar og normals á flöt, var metið sem

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \Phi \cos \beta - \cos \Phi \sin \delta \sin \beta \cos \gamma_s + \cos \delta \cos \omega \cos \Phi \cos \beta \\ & + \sin \Phi \cos \delta \cos \omega \sin \beta \cos \gamma_s + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma_s \sin \omega \end{aligned} \quad (11)$$

ASHRAE breytistuðullinn ( $I_{AM}$ ) gefur til kynna, háð innfallshorni, hversu stór hluti geislunar nýtist fletinum (afgangurinn endurkastast), þ.e.

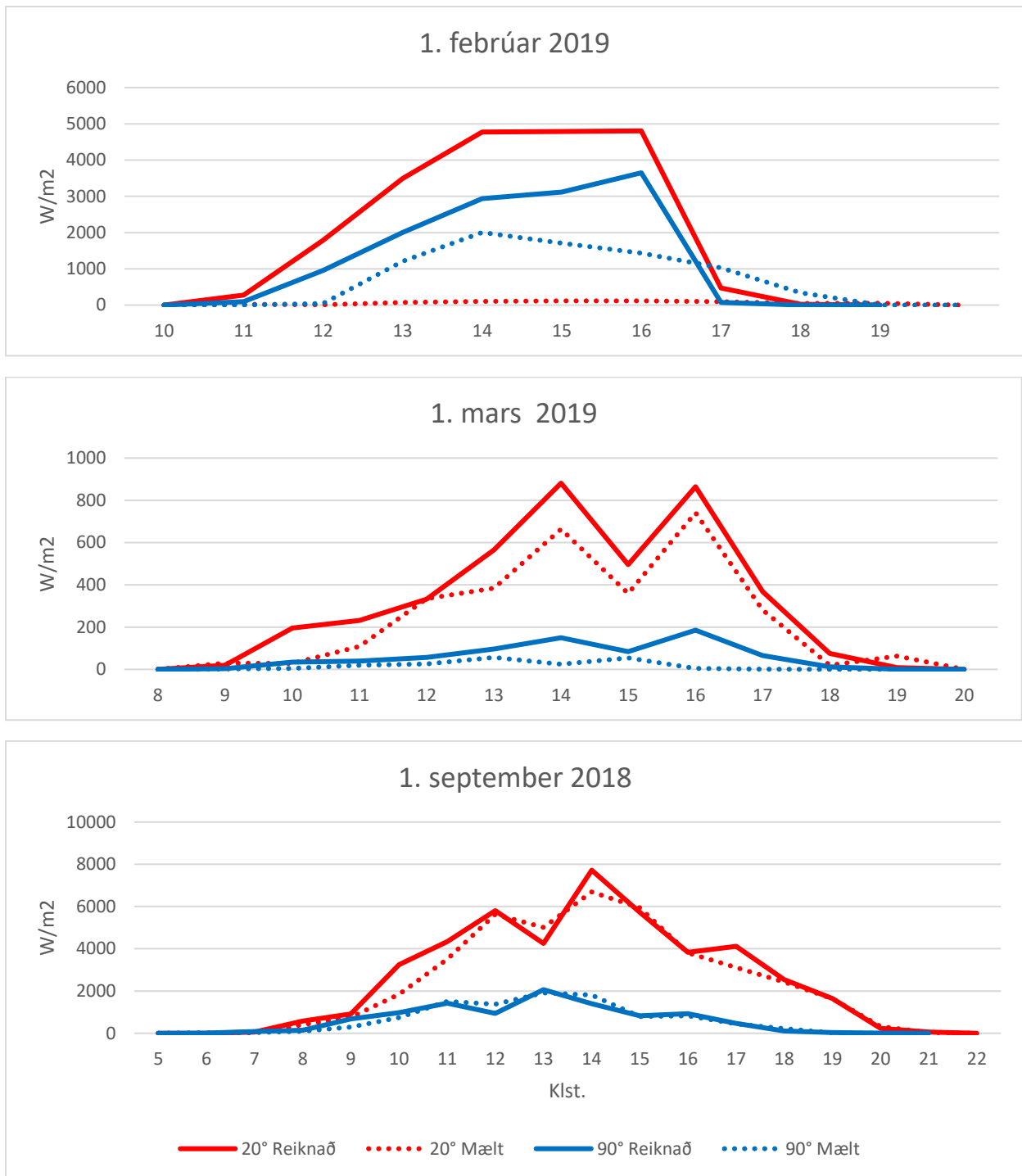
$$I_{AM} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (12)$$

þar sem stuðullinn  $b_0$  er gefinn sem 0,05 fyrir yfirborð kísilsella (PVsyst, 2019).

Gerandi ráð fyrir að óbein geislun sé jafndreifð og inngeislun á hallandi flöt ræðst af þeim hluta himinhvolfs sem flöturinn „sér“ þá var breytistuðull fyrir óbeina geislun metinn (Axaopoulos, 2015) sem:

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (13)$$

Samanburður á mældri og metinni heildarframleiðslu sólarpanela á þremur dögum er sýndur á mynd 3. Fyrir 1. febrúar 2019 var áætluð framleiðsla 33,6 kWh en mæld dægurframleiðsla var 8,4 kWh, þennan dag var 25 sm snjóhula. Þetta gefur til kynna að aðeins brot af sólarorkunni komst í gegnum snjóinn á þessum annars sólríka degi, og mestur munur í reiknaðri og mældri geislun er fyrir hallalitlu panelana. Á hinum dögum var snjólaust, þungskýjað og lítilsháttar rigning. Við þessar kringumstæður fylgdust mælingar og reiknuð gildi vel að, nema hvað framleiðsla byrjaði hægar en gert er ráð fyrir í útreikningum 1. mars sem gæti skýrst af skuggamyndun meðan sól var lág. Reiknuð framleiðsla yfir 1. mars gefur 4,8 kWh og mæld framleiðsla var 3,2 kWh. Áætluð framleiðsla yfir 1. september var mun meiri og nær mælingum, þ.e. 55,5 kWh í samanburði við 51,3 kWh.



Mynd 3: Samanburður á mældri (heil lína) og reiknaðri (brotalína) sólarinngeslun á þremur dögum.

### Orkuframmistaða og arðsemi

Tæknileg frammistaða sólarorkukerfis IKEA var metin út frá stuðlum frá Ayompe o.fl. (2011) og Adaramola og Vagnes (2014), sjá töflu 2. Fjárhagsleg gögn voru greind skv. stöðluðum aðferðum. Nánari upplýsingar um greiningarnar má finna í MS ritgerð Sindra Þrastarsonar (2019).



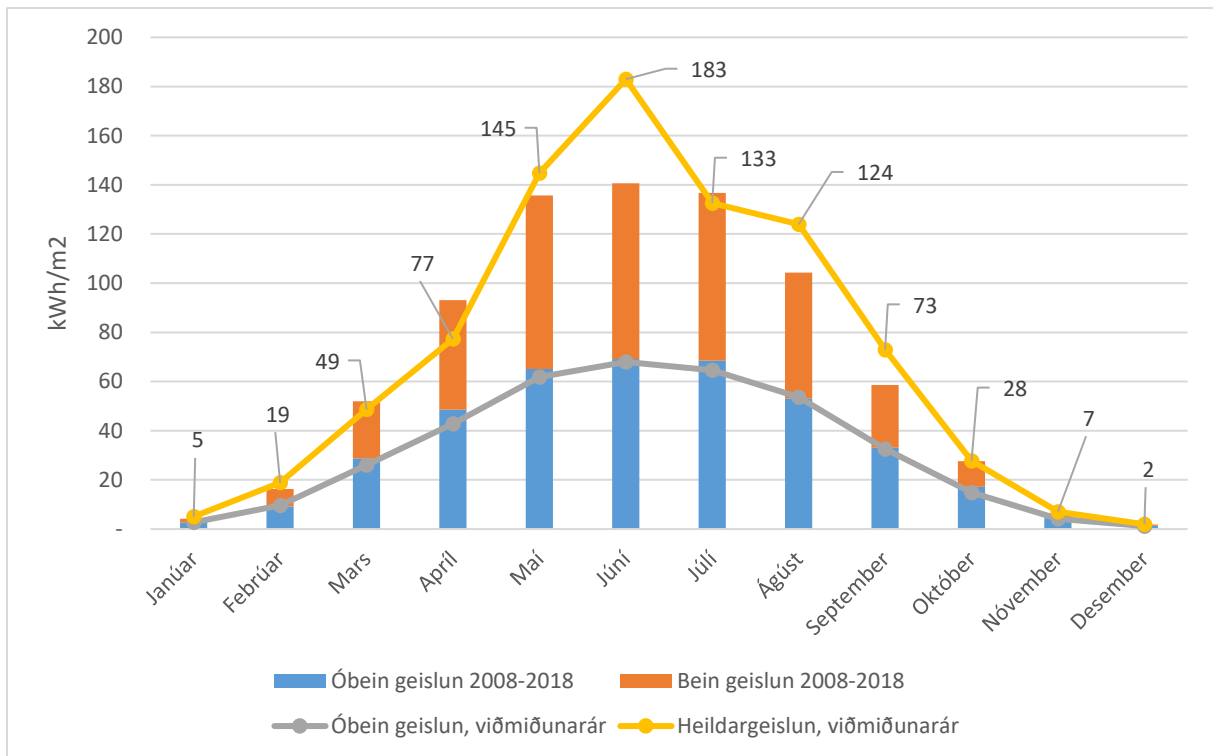
Tafla 2: Meðalframmistaða sólarafnkerfis IKEA

Mælikvarði	Enska	Lýsing	Meðaltal
Viðmiðunarstuðull	Reference yield	Hlutfall mældrar inngeslunar (kWh/m <sup>2</sup> /dag) og viðmiðunargeislunar (1 kW/m <sup>2</sup> )	2,7 klst/dag
Safnkerfisstuðull	Array yield	Hlutfall mælds jafnstraum (DC, kWh/dag) við uppgafið afl safnkerfis (IKEA: 17,55 kW)	1,94 klst/dag
Lokastuðull	Final yield	Hlutfall mælds riðstraums (AC) við uppgafið afl safnkerfis	1,89 klst/dag
Nýtingarhlutfall	Performance ratio	Hlutfall framleiddrar orku og hámarksframleiðslugetu	69%
Framleiðslugeta	Capacity factor	Hlutfall af framleiddri orku kerfis og þeirri orku sem kerfið hefði geta framleitt væri það með full afköst allan tímann (IKEA: 12,5 MWh / 153 MWh)	8,1%
Nýtni sólarcellu	PV module efficiency	Hlutfall mældrar jafnstraumsorku og heildargeislunar orku á láréttan flöt	9,8%
Skilvirkni safnkerfis	System efficiency	Hlutfall mældrar riðstraums orku og heildargeislunar orku á láréttan flöt	9,4%
Skilvirkni spennubreytis	Inverter efficiency	Hlutfall mælds riðstraums og jafnstraums	95,2%

## Niðurstöður

### Sólarorka í Reykjavík

Ísland er staðsett norðarlega í Evrópu og fjöldi sólartíma hér á landi því minni heldur en í löndum nær miðbaugi. Árleg heildargeislun sólar á láréttan flöt hefur verið mæld á klukkustundar fresti síðan 2008 í Reykjavík af Veðurstofu Íslands. Mánaðarleg geislun á tímabilinu 2008-2018 var að meðaltali minnst 1,8 kWh/m<sup>2</sup> í desember og mest 140 kWh/m<sup>2</sup> í júlí (mynd 4). Mánaðarlegt meðaltal er 64,8 kWh/m<sup>2</sup> og heildargeislun yfir árið 780 kWh/m<sup>2</sup>. Bein geislun var metin sem ráðandi á ársgrundvelli, eða 55% af heildargeislun (sjá jöfnur 2-8), sem samræmist niðurstöðum á suðlægari breiddargráðum í mið-Evrópu (Axaopoulos, 2015). Óbein geislun frá himinhvolfi var hins vegar ráðandi á veturna. Mæld heildargeislun yfir athugunarárið var aðeins yfir meðaltali, eða 844 Wh/m<sup>2</sup>.



Mynd 4: Mánaðarleg meðalgeislun á láréttan flöt í Reykjavík á árunum 2008-2018 ásamt viðmiðunarári skipt í beina og óbeina geislun. Gögn: Veðurstofa Íslands (2019)

Mælingar Veðurstofunnar (mynd 4) taka ekki tillit til snjóhulu vegna þess að mælitækið bræðir snjó af sér jafnóðum. Að meðaltali má búast við að snjóhula liggi yfir lítið hallandi sólarpanelum helming allra daga í desember til mars (tafla 3). Hægt er að fá sólarpanela sem bræða af sér snjó með utanaðkomandi orku en ólíklegt er að slíkt borgi sig þar sem inngeslun sem tapast vegna snjóhulu er ekki mikil í samhengi ársgeislunar.

Tafla 3: Hlutfall daga með snjóhulu innan hvers mánuðar á tímabilinu 1981-2010 (Jónsson, 2012).

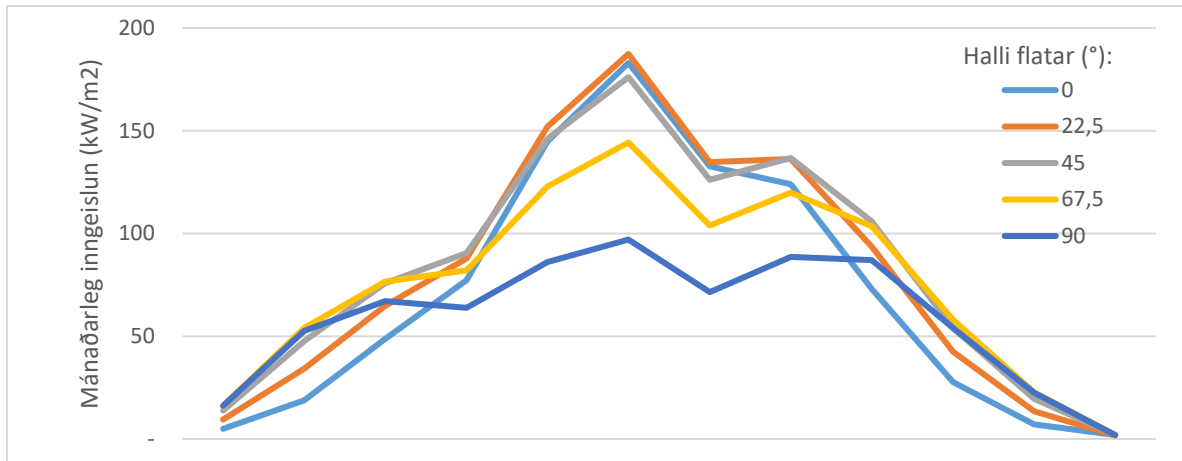
Mánuður	Jan	Feb	Mar	Apr	Mái	Jún	Júl	Ágú	Sept	Okt	Nóv	Des
Meðalsnjóhula [%]	52	54	50	17	1	0	0	0	6	26	26	45

### Mat á inngeslun á hallandi flöt

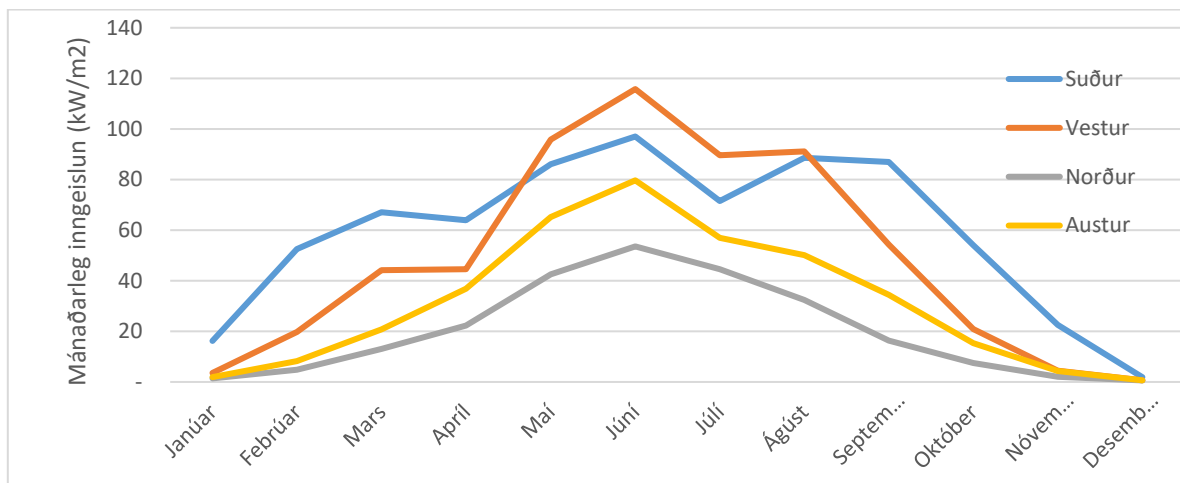
Magn beinnar geislunar ræðst af því hvernig flöturinn snýr m.t.t. stefnu geisla sólar. Óbein geislun ræðst hins vegar einungis af halla flatar. Áhrif mismunandi halla frá lárétu  $\beta$  og stefnu sólarpanela voru metin með hjálp jafna 9-13. Kjörhalli sólarpanela yfir vetur (okt-mars) var  $67,5-90^\circ$  en  $0-45^\circ$  á sumrin (mynd 5a). Ljóst er að  $22,5^\circ$  halli skilar mjög góðum niðurstöðum yfir sumarið og  $67,5^\circ$  halli yfir veturinn. Uppsetning í suður skilar mestri inngeslun þar sem geislar sólar vara lengst í þá stefnu yfir árið (mynd 5b). Að snúa lóðréttum panel um  $10^\circ-20^\circ$  í austur eða vestur hefur ekki ýkja mikil áhrif á heildargeislun. Uppsetning í vesturátt gefur meiri inngeslun heldur en suðurátt yfir hásumarið. Austurátt sem nær morgunsólinni gefur heldur minna en suður og vestur. Uppsetning í norður gefur minnsta orku og stafar það af mjög takmarkaðri beinni sólarorku. Til að mynda er nær engin bein geislun á tímabilinu október-mars þar sem sólin rís og sest áður en geislar hennar ná að lenda á

yfirborðinu er snýr í norður. Mesta beina geislunin fæst þegar yfirborðinu er hallað um  $51^\circ$  frá láréttu og mesta óbeina geislun þegar flötur er láréttur ( $0^\circ$ ) til að fanga alla geislun frá himinhvolfinu. Heildargeislun var mest á flötinn, það er samtala beinnar og óbeinnar geislunar, þegar yfirborðinu var hallað um  $40^\circ$  frá láréttu. Ef á að sækjast eftir sem mestri ársgeislun skiptir hallinn yfir sumarmánuðina mestu máli.

a)

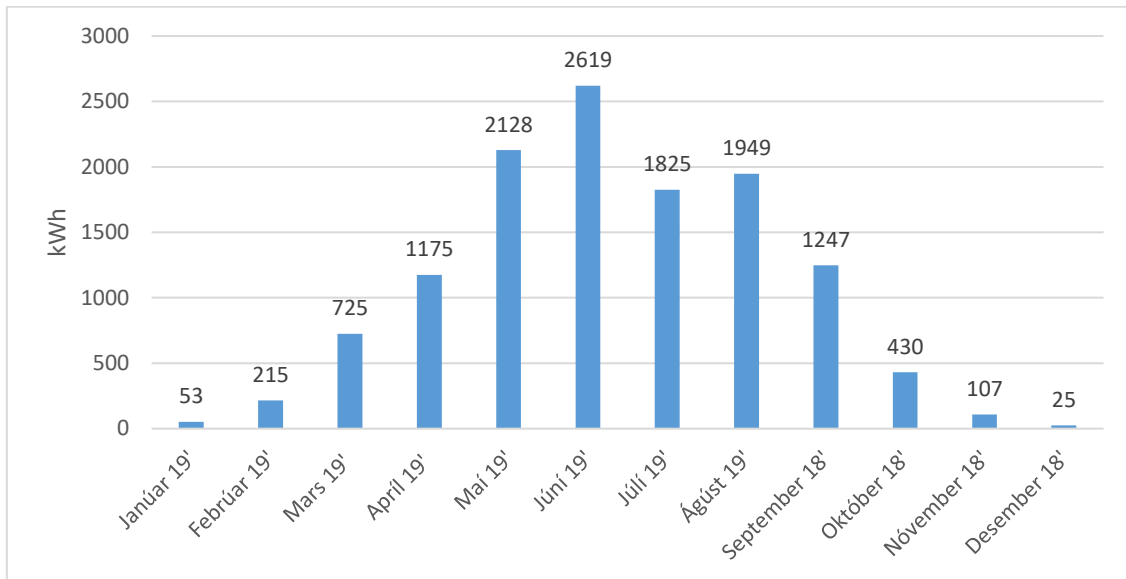


b)



Mynd 4: Reiknuð framleiðsla mánaða m.v. 1 kW uppsett afl; áhrif a) halla á panel snúandi í suður og b) stefnu sólarpanels með  $90^\circ$  halla við  $64^\circ N$  fyrir viðmiðunarárið september 2018 til ágúst 2019.

## Framleidd orka IKEA



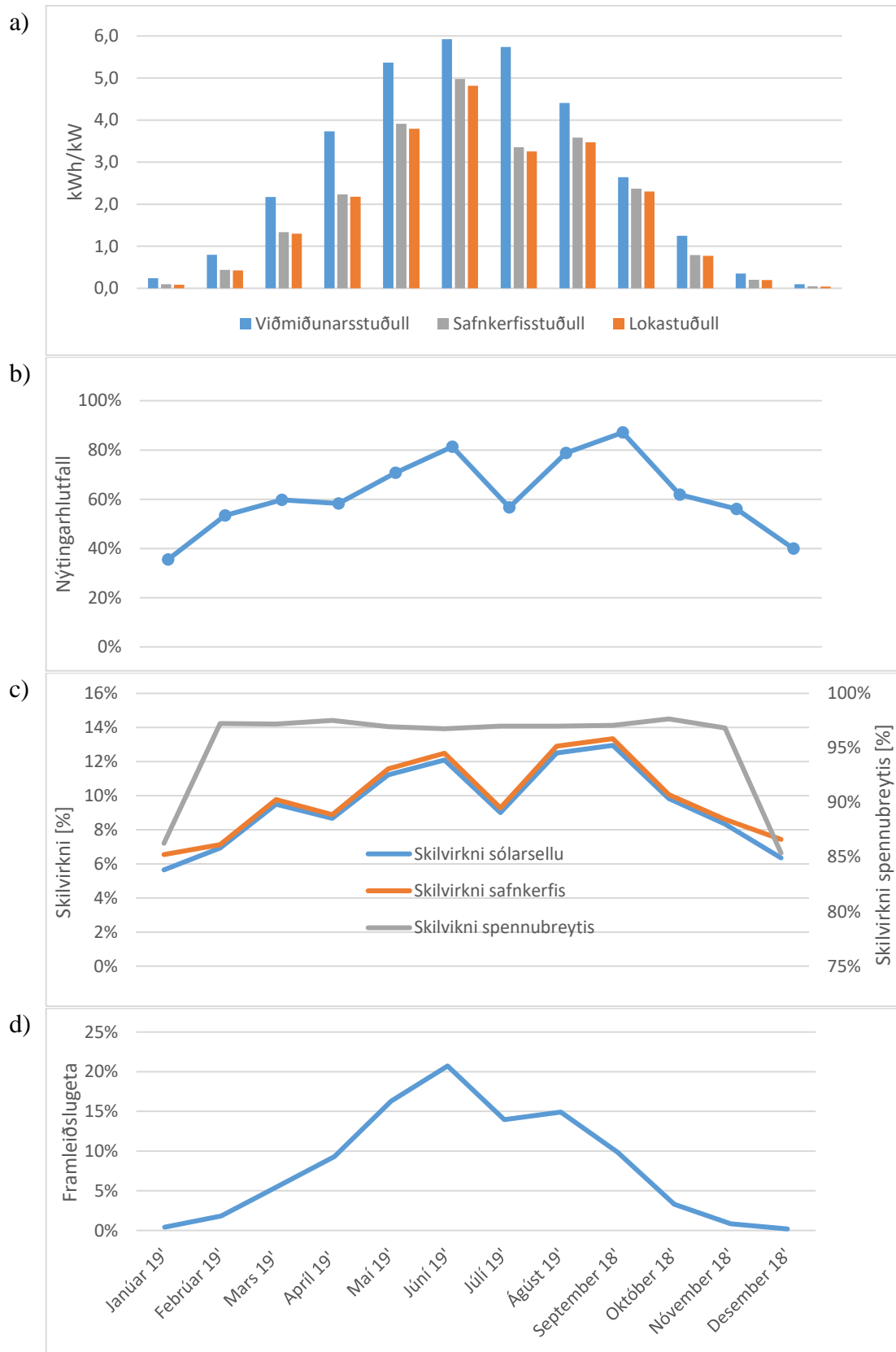
Mynd 5: Framleidd orka frá safnkerfinu hjá IKEA

Yfir viðmiðunarárið framleiddu sólarpanelar á þaki IKEA 10.105 kWh og á gaflinum 2394 kWh eða samtals 12.499 kWh (DC). Framleidd mánaðarleg orka var á bilinu 25 kWh í desember og 2,6 MWh í júní sem er rúmlega 100 faldur munur (mynd 5). Meðaltal mánaðarlegrar framleiðslu var því um 1042 kWh. Mánaðarlegt meðaltal frá sólarcellunum var milli 1,4 kWh/kW í desember og 149 kWh/kW í júní. Sköluð árleg orka frá kerfinu yfir viðmiðunarárið, heildarframleiðsla deilt með hámarksafli, var 749 kWh/kW fyrir panela með 20° halla og 591 kWh/kW á gaflinum við 90°. Mest framleiðsla mældist þegar sólin var lengst á lofti, nálægt sumarsólstöðum 21. júní og minnsta framleiðslan þegar sólin var styst á lofti, nærri vetrarsólstöðum 21. desember. Framleiðslan yfir vetrarmánuðina (nóvember til febrúar) var mjög lág í samanburði við aðra mánuði ársins. Þetta má rekja til lægri inngeislunar og snjóhulu yfir safnkerfið. Einnig kom í ljós að aðalbygging IKEA varpaði skugga á panelana þegar sólin var lágt á lofti (yfir vetrarmánuðina) snemma morguns. Eins varð ljóst að sólarpanelarnir voru of þétt lagðir á þakinu og vörpuðu skugga hver á annan þegar sólin var lágt á lofti þrátt fyrir lítinn halla á panelum. Inngeislun sem tapaðist vegna skugga er ekki talin vera mikil þar sem hún átti sér stað þegar sólin er lágt á lofti og stór hluti inngeislunar hefði tapast vegna endurkasts frá panelunum. Skuggamyndun og snjóhula er líkleg til þess að hafa áhrif á samanburð reiknaðra og mældra gilda. Það er því ljóst að snjóhula hafði áhrif á panelana sem voru á þakinu við 20° og framleiðslan í þeim datt alveg niður þar til snjója leysti. Snjóhulan hafði hins vegar ekki mikil áhrif á panelana á gaflinum við 90°.

## Orkuframmistaða

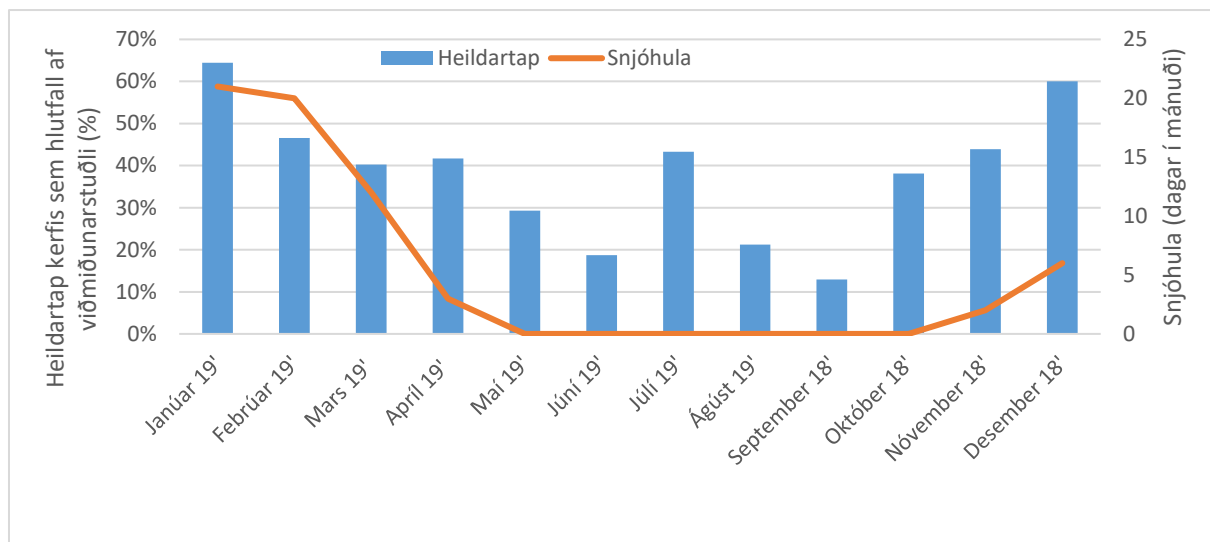
Mánaðarleg frammistaða sólarcellukerfis IKEA er sýnd á mynd 6 og meðaltöl yfir viðmiðunarárið eru gefin í töflu 2. Hæst gildi viðmiðunar-, safnkerfis- og lokastuðuls mældust í júní, 4,8-5,9 kWh/(kW-dag), og lægst í desember, <0,10 kWh/(kW-dag). Nýtingarhlutfallið, þ.e. hlutfall framleiddrar orku af framleiðslugetu kerfisins, var á bilinu 36% í janúar til 87% í september en meðaltal ársins var 69%. Framleiðslugetan (tafla 2) var að meðaltali 8,1% yfir allt árið, lægst 0,2% í desember og hæst 20,7% í júní. Skilvirkni sólarcellu var 9,8% og safnkerfis 9,4%. Skilvirkni spennubreytis var mjög stöðug í kringum 97% en í desember og

janúar féll nýtingin niður í 86% þegar heildarframleiðsla kerfisins er mjög lítil og spennubreytirinn afkastar minna.



Mynd 6: Frammistaða sólarorkukerfis IKEA á fyrstu 12 rekstrarmánuðum.

Eins og rætt var að framan var mæld framleiðsla alltaf lægri en reiknuð framleiðsla (mynd 3). Skýrist það að mestu leyti af óvissuþáttum í útreikningi tengdum umhverfis- og kerfislægum þáttum sem erfitt er að taka tillit til í fræðilegum útreikningi framleiðslunnar. Þá sér í lagi skuggamyndun og snjóhulu. Á mynd 7 má sjá heildartap kerfis sem hlutfall af viðmiðunarstuðli hvers mánaðar.



Mynd 7: Heildartap kerfis sem hlutfall af viðmiðunarstuðli. Dagur snjóhulu úr gögnum frá Væðurstofunni (2019).

## Arðsemi

Stofnkostnaðurinn á sólarafnkerfi IKEA var um 8 milljónir (allar tölur er íslenskar krónur með VSK). Efniskostnaðurinn var 4 milljónir sem innifelur bæði sólarcellur og uppsetningarbúnað. Valdir voru standar sem lyftu sólarcellunum upp um 20° án þess að skemma vatnsverndarlagið á þaki IKEA. Uppsetningarkostnaður fór fram úr áætlun og endaði sem 4 milljónir. Smíða þurfti stálfestingar fyrir sellurnar á gaflinn svo hægt væri að festa þær upp. Í þetta fór mikil vinna og sækja þurfti ráðgjöf sérfræðinga. Einnig var kostnaður við tengingar inn á töflu umtalsverður. Útskýrist því hár vinnuliður við uppsetningu með þeim hætti. Kostnaður við hvert uppsett kW var því 456 þúsund krónur.

Árlegur rekstrarkostnaður á safnkerfinu var áætlaður 1% af stofnkostnaði eða um 80 þúsund kr. Sá kostnaðarliður er aðallega vegna þess að skipta þarf um spennubreyti á kerfinu á u.þ.b. 10 ára fresti og einnig má gera ráð fyrir minniháttar viðhaldi og endurnýjun á kerfinu.

Yfir athugunarárið var framleidd raforka inn á kerfið hjá IKEA 12.1 MWh (AC) sem sparaði IKEA 182 þúsund kr. yfir tímabilið í innkaupum á raforku frá dreifikerfinu. Miðað við raforkuverð í þéttbýli 15 kr./kWh og hækkun á raforkuverði í takt við vísitölu neysluverðs er endurgreiðslutíminn á stofnkostnaði við verkefnið hjá IKEA 24 ár. Ef sama uppsetning á safnkerfi væri staðsett í dreifbýli þar sem raforkuverðið er 19,5 kr./kWh væri verkefnið 21 ár að borga sig upp án tillits til ávöxtunarkröfu.

Ef miðað er við 2,5% ávöxtunarkröfu í verkefninu á ábyrgðartíma kerfisins sem er 15 ár, er kerfið enn langt frá því að borga sig upp í dreif- og þéttbýli. Það tekur kerfið 25 ár að borga sig upp í dreifbýli en 30 ár í þéttbýli miðað við þessar forsendur. Hins vegar er líftíminn á

sellunum sagður a.m.k. 40 ár og er allt umfram 25 og 30 ár að koma vel út (tafla 4). Ávöxtunarkrafan fyrir verkefnið var sett í 2,5% svo hún væri jöfn verðbólguþáttmiði Seðlabanka Íslands. Eðlilegt þótti að ávöxtunarkrafan á verkefnið væri lág þar sem um tilraunarverkefni er að ræða.

Tafla 4: Núvirði safnkerfis hjá IKEA.

Tími (ár)	Dreifbýli	Þéttbýli
15	- 4.258.242	- 5.350.304
25	260.962	- 1.985.556
40	11.703.884	6.693.398

## Umræður

### Tæknileg frammistaða sólarsellukerfa á norðurslóðum

Halli og bil milli sólarsella er venjulega hagað með því móti að mestri mögulegri framleiðslu sé náð. Í þeim tilgangi má auka halla panela yfir vetrartímamann og minnka yfir sumarið þegar sólin er hátt á lofti. Vinsæl nálgun er að setja halla panels jafnt breiddargráðu til þess hámarka geislun yfir árið. Þá má auka hallann um 15° til að ná hámarks geislun yfir veturinn og minnka hallann um 15° til að ná hámarks geislun yfir sumarið (Stanciu & Stanciu, 2014). Slík nálgun útheimtir greiðan aðgang að þaki, og að festingar við þak séu stillanlegar. Eins og áður hefur komið var safnkerfi IKEA ekki með möguleikann á að breyta halla á panelum, en á móti kom að tveir mismunandi hallar voru á þeim (þak og veggur). Í samanburði við aðrar rannsóknir á norðurslóðum, var nýtni safnkerfisins IKEA á Íslandi meira en 15% lægri (sjá töflu 5). Þessi lága nýtni skýrist að hluta af umhverfis þáttum eins og snjóhulu, skugga frá nærliggjandi byggingu, og skugga frá panelum hvorn á annan.

Tafla 5: Samanburður þriggja sólarsellu verkefna á norðurslóðum.

Stað- og gangsetning	GPS	Hæð [m.y.s.]	Halli, Stefna	Gerð sólarsellu	Sköluð orka [kWh/kW]	Loka- stuðull [kWh/kW-dag]	Uppgefin nýtni sellu [%]	Nýtingar- hlutfall [%]
Ås, Noregi, 2013 <sup>1</sup>	60°N, 11°A	105	37°, S	Ein- og fjölkr.	931	2,5	13,3 - 14,5	83
Dublin, Írlandi, 2008 <sup>2</sup>	53°N, 6°A	--	53°, S	Einkr.	885	2,4	17,2	81,5
IKEA, Íslandi 2018	64°N, 22°A	38	20° 90°, S	Fjölkr.	712	1,89	16,5	69

<sup>1</sup> (Adaramola & Vågnes, 2014)

<sup>2</sup> (Ayompe, Duffy, McCormack, & Conlon, 2011)

### Hindranir

Þessi rannsókn beinir athygli að því að stofnkostnaður getur verið mjög hár ef ekki er hugað að frágangi og fyrirkomulagi panela strax í upphafi hönnunar byggingar. Huga þarf að festingum panela strax í upphafi, því sumar festingar geta skemmt vatnsvörn þaks. Ef fergja þarf festingarnar þá setur það skorður á halla panela. Til að mynda var talið óráðlegt að setja panela á þaki IKEA í kjörhalla (45°) vegna vinda. Að sama skapi getur 45° halli valdið skuggamyndun sem rýrir framleiðslugetuna eða setur hömlur á hversu marga panela megi

setja á láréttan flöt. Þá rýrir tíð snjóköma og skafrenningur, framleiðslugetu lítið hallandi panela, og mögulega líka lóðréttra panela (sjá mynd 2).

Endurgreiðslutími fyrstu verkefna í núverandi umhverfi er líklegur til að vera langur á svæðum sem hafa aðgang að ódýrri raforku frá vatnsafls- og jarðvarmavirkjunum. Til þess að hámarka nýtnina er best að selja umframorku inn á sameiginlegt rafmagnskerfi. . Það er ekki aðlaðandi fyrir örvirkjanir að tengjast netinu vegna kostnaðar og ekki sjálfsagt að netið vilji fá mikið inn af litlum, "óstöðugum", orkugjöfum og rekstrarumhverfi örvirkjanna takmarkað..

### Tækifæri fyrir húseigendur og atvinnurekendur

Fyrir venjulegt heimili sem notar um 10-12 kWh á dag þyrftu alltaf að koma til rafgeymar eða tenging við dreifikerfið svo heimilið yrði ekki rafmagnslaust yfir vetrartímam. Yfir sumarmánuðina gæti 3 kW kerfi þjónustað heimili yfir daginn. Þau svæði sem eru sérstaklega áhugaverð til uppsetningar á sólarcellum eru köld svæði (þar sem jarðvarma nýtur ekki við) og einangruð svæði (sem ekki eru tengd við dreifikerfi raforkunnar). Á köldum svæðum fer upphitun húsa fram með raforku og á einangruðum svæðum er orkugjafinn jarðefnaeldsneyti sem ekki telst æskilegt.

Til þess að þetta gangi eru rafgeymar eða tenging við dreifikerfið nauðsynleg til að anna rafmagnseftirspurn á nóttunni, þegar safnkerfi framleiða ekki orku. Þó svo að sólarcellur nái líklegast ekki að uppfylla alla orkuþörf heimilis yfir veturinn er vel hægt að hugsa sér að sólarcellur sjái um hluta orkuöflunar og geti reynst vel í að minnka álag á dreifikerfi raforkunnar. Áhugavert væri að skoða möguleikann á því að tengja sólarcellukerfi við dreifikerfi raforkunnar, þá væri framleiðsla umfram notkun seld út á dreifikerfið og ef þörf væri á orku yrði hún aðkeypt. Áhugavert væri einnig að skoða möguleikann á því að setja upp sólarcellukerfi sem myndi hlaða beint inn á rafmagnsbíla á meðan þeir standa utan við vinnustað fólks á vinnutíma.

### Tækifæri fyrir stjórnvöld

Erlendis eru víða í boði styrkir eða aðrir hvatar fyrir aðila sem vilja framleiða orku sem einkum er til staðbundinnar notkunar. Í Svíþjóð er styrkja- eða niðurgreiðslukerfi til að styðja við endurnýjanlega orku en í öðrum löndum (t.d. Danmörku og Finnlandi) er notað kerfi sem byggir á kaupum endurnýjanlegrar orku inn á dreifikerfið sem byggir á hagkvæmasta vali hverju sinni (sjá samantektir á reglugerðum á <http://www.res-legal.eu>). Umhverfislega (og kostnaðarlega) er ekki heppilegt að þurfa að nota rafgeyma til að geyma orku og því áhugaverðari lausn að smáframleiðandinn noti eigin orku þegar hún er í boði en kaupir öðrum kosti orku af dreifineti. Erlendis er þá boðið upp á að umframorka sé seld út á netið til jöfnunar við orku sem þarf að kaupa þaðan. Þessu fylgja vissulega vandkvæði s.s. að staðbundna orkan verður ekki endilega til þegar orkuþurrð er á dreifinetinu og tryggja þarf að orkan sé rétt riðluð fyrir tenginetið. Þrátt fyrir þetta er áhugi á þessum aðferðum þar sem dreifð orkuframleiðsla muni gagnast dreifinetinu og umræðan snýst m.a. um hvernig þetta geti gagnast til að draga úr þörf á að styrkja dreifinet í borgum. Þrátt fyrir góðan aðgang héraðs að öðrum valkostum í orkuframleiðslu, þá er áhugavert að skoða hvaða tækifæri felast í dreifðri orkuframleiðslu, hvort sem um er að ræða vind- eða sólarorku.



## Ályktanir

Megin tilgangur þessa verkefnis var að meta hvort sólarpanelar væru ákjósanlegur kostur á Íslandi. Horft var á framleiðslugetu, nýtni og arðsemi. Niðurstaðan er sú að töluverðar hindranir standa í vegi fyrir því að sólarorka beri sig í þéttbýli sem hefur aðgang að ódýrri endurnýjanlegri raforku s.s. jarðvarma eða vatnsafla. Sér í lagi er uppsetningarkostnaður hár meðal frumherja, og rekstrarábati takmarkaður. Þá eru engar ívilnanir frá stjórnvöldum, og kostnaðarsamt fyrir húseigendur að selja raforkuna á kerfið þegar hún er ekki nýtt á staðnum. Þá getur tíð snjóhula og skuggi dregið úr nýtni sólarsella, og getur takmarkað þéttleika þeirra á þökum.

Uppsetning IKEA á 65 sólarpanelum er stærsta sólarorkuverkefni sem ráðist hefur verið í á Íslandi. Mikilvægt er að halda áfram að draga lærdóm af slíkri frumherja reynslu með frekari rannsóknum. Með lækkandi stofnkostnaði og hækkandi nýtni í sólarsellum er líklegt að rekstrarumhverfi þeirra verði hagstæðari. Sólarsellur hafa alla burði til þess að nýtast vel hér á landi, eins og þær hafa gert í nágrennalöndum s.s. Noregi og Svíþjóð. Mikilvægt er að greiða fyrir rekstrargrundvelli sólarpanela með regluverki, og ívilnunum, til þess að gera raforkuframleiðslu á Íslandi fjölbreyttari.

## Þakkir

Veðurstofu Íslands og IKEA á Íslandi er þakkað fyrir aðgang að gögnum sem lögðu grunn að verkefninu. Þórarni Ævarssyni, fyrrum framkvæmdastjóra IKEA og Ólafi Davíð Guðmundssyni hjá Hlaða ehf. er þakkað fyrir góðar ráðleggingar.

## Heimildir

- Adaramola, M. S., & Vågnes, E. E. (2014). Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 90, 458-465. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.028>
- Axaopoulos, P. (2015). *HeliosLab: Open Educational Resources*. Athens: Technological Educational Institute of Athens.
- Ayompe, L. M., Duffy, A. P., McCormack, S., & Conlon, M. F. (2011). Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 816-825. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.007>
- BISOL. (06 2018). Sótt frá Multicristalline PV Modules / BMU 255-280 Wp: [http://www.bisol.com/images/Datasheets/EN/BISOL%20Product%20Specification%20BMU\\_EN.pdf](http://www.bisol.com/images/Datasheets/EN/BISOL%20Product%20Specification%20BMU_EN.pdf)
- Boyle, G. (2004). *Renewable Energy*. Oxford : Oxford University Press.
- Farmer, J. D., & Lafonda, F. (2015). How predictable is technological progress? *Research Policy*, 45(3), 647-665.
- Fraunhofer Institute. (27. 08 2018). Photovoltaics report. Freiburg: Fraunhofer.
- Háskóli Íslands. (13. 02 2017). *Almanak Háskóla Íslands*. Sótt frá Útsýnisskífur og sólúr: <http://www.almanak.hi.is/solur.html>
- IEA. (2018). *Key world energy statistics*. International Energy Agency.
- IEA. (2018a). *Global EV Outlook 2018*. OECD/IEA.
- IEA PVPS. (2018a). *Snapshot of global photovoltaic markets 2018*. Paris: IEA.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jeffrey R. S. Brownson. (03. 02 2019). *2.11 Collector Orientation*. Sótt frá Solar Resource Assessment and Economics: <https://www.e-education.psu.edu/eme810/node/576>
- Jónsson, T. (2012). *Snjór í Reykjavík og á Akureyri, Meðaltal 1981 til 2010*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Kristján Kristjánsson. (2007). Sól & vindur. *Íslensk orka*, 19.
- Kymakis, E., Kalykakis, S., & Papazoglou, T. M. (2009). Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 433-438. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.009>
- Lam, J. C., & Li, D. H. (1996). Correlation between Global Solar Radiation and its Direct and Diffuse Components. *Elsevier - Building and environment*, 31(6), 527-535.

- Mondol, J. D., Yohanis, Y., Smyth, M., & Norton, B. (2006). Long term performance analysis of a grid connected photovoltaic system in Northern Ireland. *Energy Conversion and Management*, 47(18-19), 2925-2947.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.03.026>
- Orkustofnun. (9. Mars 2015). *Raforkuframleiðsla ársins 2014*. Sótt frá Orkustofnun: <https://orkustofnun.is/orkustofnun/frettir/nr/1645>
- PVGIS. (2012). *Photovoltaic solar electricity potential in european countries*. PVGIS.
- PVsystem. (13. 06 2019). *PVsystem*. Sótt frá Array incidence loss (IAM): [http://files.pvsystem.com/help/iam\\_loss.htm](http://files.pvsystem.com/help/iam_loss.htm)
- Sólheimar. (10. 01 2019). *Orkugarður Sólheima*. Sótt frá Sólheimar: <http://www.solheimar.is/sesseljuhus/orkugarður-solheima/>
- Stanciu, C., & Stanciu, D. (2014). Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. *Energy Conversion and Management*, 81, 133-143.
- Veðurstofa Íslands. (01. 05 2019). *Daglegt yfirlit veðurs í Reykjavík*. Sótt frá <https://www.vedur.is/vedur/vedurfar/daglegt/reykjavik/>