

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS
FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

SAULES PANELU EFEKTIVITĀTE LATVIJAS KLIMATĀ

BAKALAURA DARBS

Autors: **Viktorija Leimane**

Studenta apliecības Nr.: v116047

Darba vadītājs: Dr. Phys. Andris Jakovičs

RĪGA 2019

ANOTĀCIJA

Darba mērķis ir noteikt optimālo saules paneļu izvietojuma veidu Latvijas klimatiskajos apstākļos. Pētot divu veidu saules paneļus, kas novietoti piecās dažādās telpiskajās orientācijās Latvijas Universitātes Botāniskā dārza teritorijā, tiek noteikta solāro paneļu efektivitātes atkarība no parametriem:

1. Saules paneļu tips (JA vai LG)
2. Telpiskā orientācija (R.13, A.13, D.13, D.40, D.90)
3. Gada mēnesis (janvāris - aprīlis)
4. Meteoroloģiskie apstākļi (saules apstarojums un mākoņainība).

Iegūtie monitoringa rezultāti tiek analizēti kontekstā ar saules izstarojuma intensitāti, paneļu potenciālās efektivitātes fizikālo novērtējumu un citu mērījumu rezultātiem.

Rezultāti liecina, ka optimālie parametri ir LG panelis D virziena 40 grādu leņķī. Pētījuma datu analīzes rīks ir pieejams <https://github.com/chararchter/solR>.

Atslēgas vārdi: Saules enerģijas paneļi, atjaunojamo energoresursu enerģija

ABSTRACT

The aim of this thesis is to determine optimal solar panel arrangement for the climatic conditions of Latvia. By studying two types of solar panels placed in five different spatial orientations in the University of Latvia Botanical Garden area, the dependency of solar panel efficiency on following variable parameters is established:

1. Type of solar panels (JA or LG)
2. Spatial orientation (W.13, E.13, S.13, S.40, S.90)
3. Month of year (january - april)
4. Meteorological conditions (solar irradiance and clouds)

The results of the monitoring are analysed in the context of solar irradiance intensity, the physical assessment of the potential efficiency of the panels and the results of other measurements. The results show that the optimal parameters are LG panel at a direction south 40 degree angle. The study data analysis tool is available in <https://github.com/chararchter/solR>.

Keywords: Solar panels, renewable energy

SATURS

APZĪMĒJUMU SARKSTS.....	4
IEVADS	5
1 LITERATŪRAS APSKATS	7
1.1 Saules apstarojums.....	7
1.2 Saules diennakts kustība	10
1.3 Klimats Latvijā.....	13
1.4 Saules paneli	18
1.4.1 Panelu veidi	19
1.4.2 Saules panelu izmantošana pasaule.....	20
1.5 Darba aktualitāte	23
2 REZULTĀTI	24
2.1 Saules apstarojums.....	24
2.2 Saules paneli	26
2.2.1 Saules panela tipa ietekme uz ražīgumu	26
2.2.2 Efektivitāte	27
2.2.3 Saules panela leņķa ietekme uz ražīgumu	27
2.2.4 Saules panela virziena ietekme uz ražīgumu	27
2.2.5 Saules panela leņķa un virziena ietekme uz dienā saražotās enerģijas sa- dalījumu	27
2.2.6 Gada mēneša ietekme uz ražīgumu	28
SECINĀJUMI	37
PATEICĪBAS	38
IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI	39
PIELIKUMS	42
.1 Autora rezultātu dalība konferencēs	42
.2 Autora ieguldījums darbā	42

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

TSI - Kopējais saules apstarojums, Wm^{-2}

SSI - Saules spektrālais apstarojums, $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$

PV - fotoelektriskais elements

Si - silīcijs PVOUT – Saules fotoelementa potenciālā jauda, kWh/kWp

GHI – Globālais horizontālais apstarojums, kWh/m^2

DNI – Tiešais normālais apstarojums, kWh/m^2

AU - astronomiskā vienība

P - jauda, W

Pmax - maksimālā jauda, W

Debespuses A - austrumi

R - rietumi

D - dienvidi

Saules kustības leņķi

θ - staru krišanas leņķis uz saules paneli.

δ - Saules deklinācija — leņķis starp virzieniem uz Sauli un uz debess ekvatoru solārajā pusdienu laikā, pozitīvs Z virzienā.

ϕ - ģeogrāfiskais platums, pozitīvs Z virzienā.

β - paneļa slīpums — leņķis starp Saules paneļa virsmu un horizontāli.

γ - paneļa azimuts — leņķis starp virsmas normāles projekciju uz horizontālu plakni un D virzienu, negatīvs A virzienā.

ω - solārais stundu leņķis — leņķis starp Saules stara virziena projekciju uz horizontālu plakni un D virzienu (kas mainās Zemes rotācijas ap savu asi dēļ), negatīvs no rīta.

IEVADS

Apvienoto Nāciju Organizācijas Klimata konferencē Parīzē 2015. gada decembrī daudzas pasaules valstis vienojās ierobežot globālo sasilšanu zem 2°C salīdzinājumā ar pirmsindustriālo laikmetu. Tāpēc Eiropas Savienībā noteikts dalībvalstīm saistošs mērķrādītājs – vismaz 32% atjaunojamās energijas īpatsvars līdz 2030. gadam [1].

Ne mazāk būtiska ir atjaunojamo energoresursu loma energoapgādes neatkarības un drošības veicināšanā, tehnoloģiju attīstībā un inovācijās, vienlaikus sniedzot labumu videi un sabiedrībai, kā arī nodrošinot svarīgus priekšnosacījums nodarbinātībai, reģionālajai attīstībai un elektrības nodrošināšanai grūti pieejamās vietās [1].

Dažādu pieejamo atjaunojamo resursu - Saule, vējš, zeme, ūdens - starpā Saules enerģija ir viens no kandidātiem klimata pārmaiņu un to seku mazināšanai un efektīvas energoapgādes nodrošināšanai. Pēdējā desmitgadē veiktās investīcijas Saules enerģijas izmantošanā manifestējās inovācijās saules paneļu ražošanā, un gala rezultātā tie ir kļuvuši efektīvāki un finansiāli pieejamāki patēriņajiem, piemēram, silīcija saules paneļu cena sastāda mazāk nekā 30% no kopējām saules paneļu sistēmas uzstādīšanas izmaksām un to saražotā enerģija atmaksājas vidēji trīs gadu periodā [2].

Tomēr bez klimata to efektivitāti ietekmē arī daudzi citi faktori, to skaitā telpiskā orientācija.

Šī pētījuma **mērķis** ir analizēt un praktiski pārbaudīt divu tipu (JA un LG) saules paneļu efektivitāti atšķirīgos telpiskās orientācijās risinājumos – pētītas trīs dažādu virzienu (dienvidi, rietumi, austrumi) un trīs leņķu pret horizontu (13° , 40° , 90°) paneļu grupas – un tiek salīdzināta to piemērotība Latvijas klimatiskajiem apstākļiem.

Darba uzdevumi

- Ievākt, atlasīt un analizēt saules paneļu jaudas (P) datus.
- Izveidot iespējami automatizētu datu apstrādes sistēmu R valodā ilgtermiņa montioringa vajadzībām.
- Salīdzināt paneļu efektivitāti gada laikā mēnešu intervālos atbilstoši tipa un telpiskās orientācijas apakšgrupām.
- Novērtēt datu kvalitāti no fizikālo apsvērumu un saules apstarojuma mērījumu viedokļa.

Darba struktūra

Darba pirmo daļu veido literatūrā pieejamo Saules apstarojuma novērtējumu raksturojums un apskata par Saules redzamo pārvietošanās pie debess sfēras diennakts laikā janvāra un aprīļa mēnešos. Otrajā daļā aplūkota saules paneļu uzbūve un darbības princips, kā arī apskatīta sistēmas shēma un saues paneļu konkrētās instalācijas LU Botāniskajā dārzā parametru raksturojums. Trešā daļā ir aprakstīti iegūtie rezultāti, tie ir salīdzināti savā starpā, ar cita saules paneļa uzstādījuma mērījumu rezultātiem un ar eksperimentālā poligona meteostacijas datiem par solāro apstarojumu šajā laika periodā.

1. LITERATŪRAS APSKATS

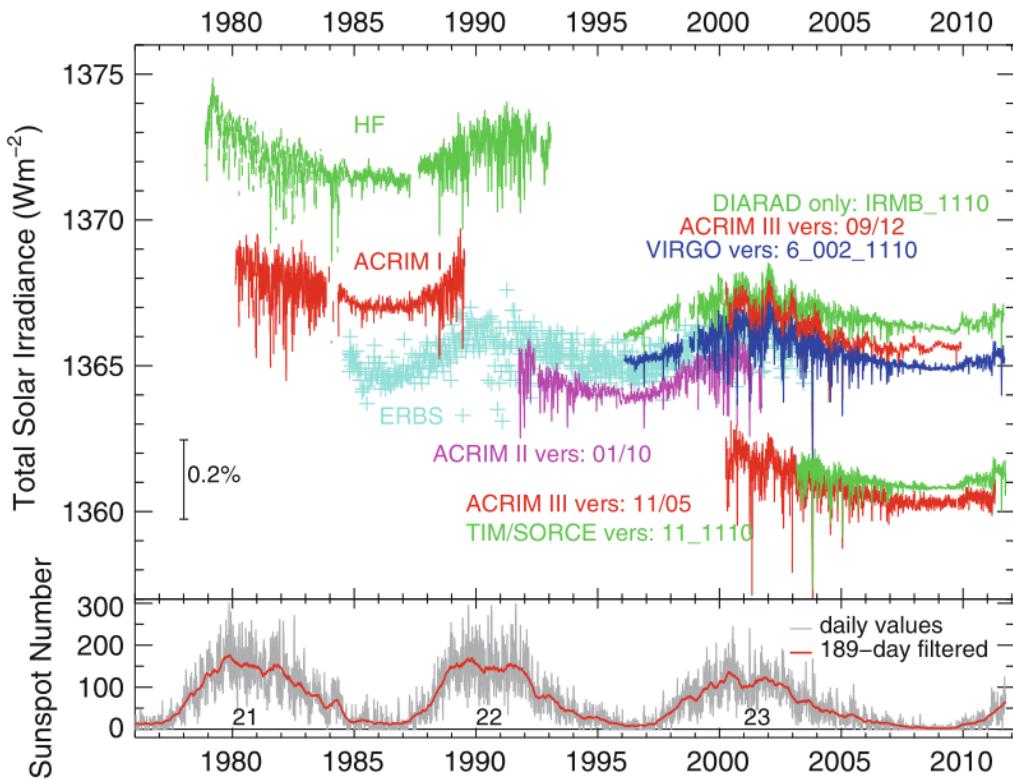
1.1. Saules apstarojums

Lielākā daļa Saules izstarotās enerģijas tiek saražota kodolreakcijās fotosfērā. Kopējais saules apstarojums (*Total Solar Irradiance – TSI*) raksturo Saules starojuma absolūto intensitāti – enerģiju uz virsmas perpendikulāri starojuma izplatīšanas virzienam 1 AU attālumā no Saules, integrētu visā saules enerģijas diskā un visā saules enerģijas spektrā. TSI vērtībai novērojama aptuveni 11 gadus ilga periodiska variācija, kas korelē ar saules plankumu skaitli (1.1. att.) – par Saules plankumu sauc magnētiskās plūsmas koncentrāciju bipolāros klāsteros vai grupās izraisītos tumšos plankums uz Saules fotosfēras; Saules plankumu skaitlis ir atkarīgs no individuālu Saules plankumu un to grupu skaita [3].

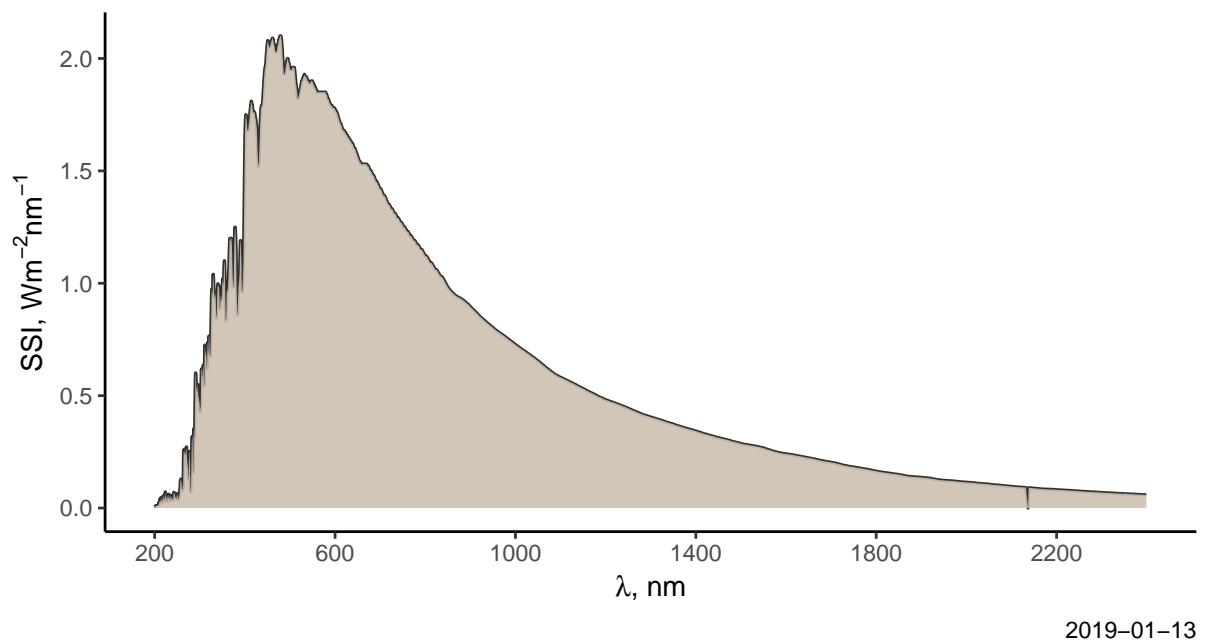
TSI norāda uz solārās radiācijas izmaiņām, kas ietekmē saņemto solārās enerģijas apjomu, kas nonāk Zemes atmosfēras augšējos slāņos. Papildus ir noderīgi zināt Saules emitētā starojuma spektrālo sadalījumu (*Spectral Solar Irradiance – SSI*) – 1.2. att. redzams, ka aptuveni puse starojuma tiek saņemta salīdzinoši mazu vilņu garumu - 380 – 780 nm diapazonā.

TSI novērojumi no kosmosa tiek veikti kopš 1978. gada un instrumentu specifikas dēļ iegūtas dažādas absolūtās vērtības (skat. att. 1.1.), tāpēc šī fizikālā lieluma tikai daļēji pārkājušos novērojumu laikrindu apvienošana kompozītā ir gan zinātnisks, gan statistisks izaicinājums un neviens kompozīts (piemēram, PMOD, ACRIM, IRBM) līdz šim nav kļuvis par absolūtu standartu solārā apstarojuma pētnieku kopienā.

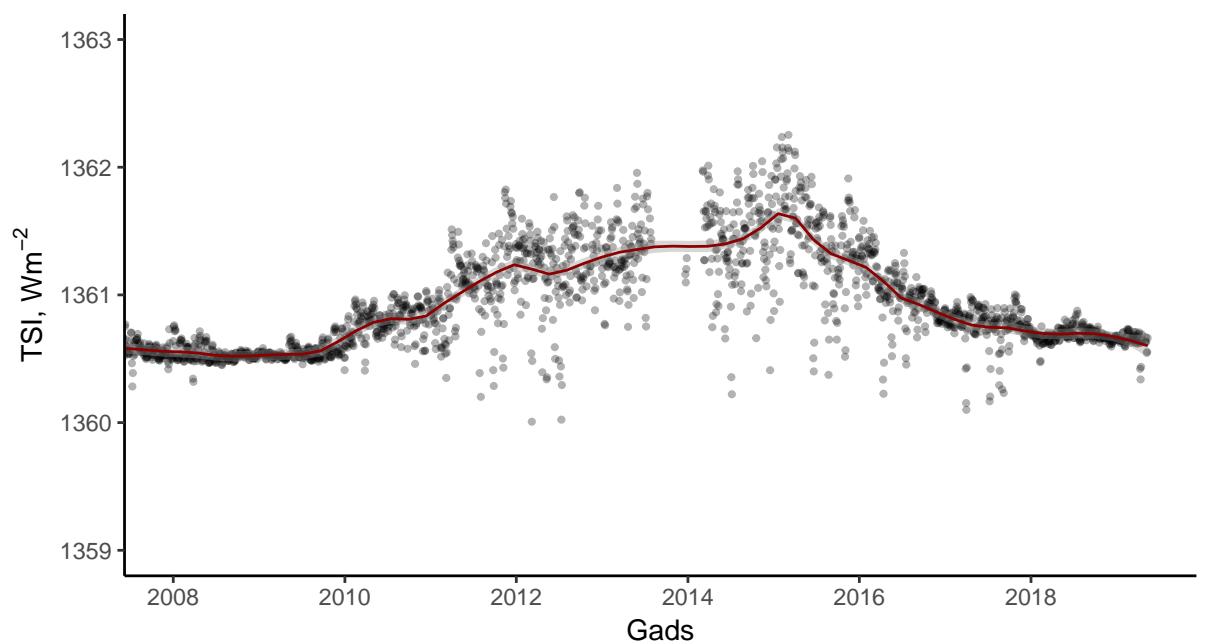
Par labāko Saules apstarojuma mērījumu reprezentāciju tiek uzskatīti Saules Radiācijas un Klimata Eksperimenta (SORCE) misijas Kopējā apstarojuma novērošanas (Total Irradiance Monitor, TIM) instrumenta dati mēraparāta uzbūves – atšķirībā no citiem radiometriem TIM precizitātes apertūra atrodas tuvu dobumam un redzeslauku bloķējošā apertūra ir pie instrumenta ieejas – un augstās precizitātes – nenoteiktība tiek novērtēta esam mazāk nekā $0.014 \text{ W m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ un precizitāte ar 0.48 W m^{-2} [5] – dēļ, tāpēc šajā darbā grafiki balstās uz šiem mērījumiem, pēc kuriem absolūtā kopējā saules apstarojuma vērtība ir $(1360.8 \pm 0.5)\text{W m}^{-2}$ [4].



1.1. att. Salīdzinājums dienā vidējotiem saules kopējā apstarojuma datiem no dažādām kosmiskajām misijām un Saules plankuma skaitlis, lai ilustrētu solārās aktivitātes variabilitāti trīs ciklos [4].



1.2. att. SSI 1AU attālumā (24 h vidējā vērtība) [6].



1.3. att. TSI 24. saules ciklā 1 AU attālumā (24 h vidējā vērtība)[5].

1.2. Saules diennakts kustība

Šajā nodaļā Saules apstarojums tiek aplūkots no ģeometriskajiem apsvērumiem - virziena, no kura staru kūlis sasniedz virsmu, leņķi uz virsmas un gada gaitā saņemtā starojuma daudzuma. Ģeometriskās sakarības starp saules paneļa virsmas plakni un ienākošo Saules starojuma kūli jeb Saules pozīcija relatīvi pret šo plakni tiek aprakstīta ar vairākiem leņķiem. Ar θ apzīmēsim staru krišanas leņķi uz saules paneli, pieņemot saules paneli par nekustīgu plakni. Tad, pie nemainīgas starojuma intensitātes, paneļa saņemtā enerģija būs proporcionāla $\cos \theta$ (ja $\theta < 90^\circ$) vai būs vienāda ar 0 (ja $\theta \geq 90^\circ$, t.i., Saules stari krīt uz paneļa apakšējo virsmu) pēc formulas (1.1). Saules diennakts kustība, gadalaiku cikls, kā arī saules paneļa novietojums ir ievēroti izteiksmē, kas ļauj aprēķināt $\cos \theta$ [3]:

$$E = I \cdot \cos(\theta) \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega, \end{aligned} \quad (1.2)$$

kur lietoti leņķi, kas definēti 1.1 tabulā. Saules deklināciju solārajā pusdienlaikā var aprēķināt pēc formulas

$$\delta = 23 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right), \quad (1.3)$$

kur n ir dienas kārtas numurs gadā.

Ar vienādojumu (1.2) un (1.3) palīdzību ir iespējams aprēķināt $\cos \theta$ laika atkarību, kas ir pirmais tuvinājums Saules apstarojuma izmaiņām dienas laikā. Parametru vērtības katram no darbā lietotajiem Saules paneļiem ir apkopotas 1.2. tabulā. Lietojot šos parametrus, tika aprēķināta $\cos \theta$ atkarība no laika diviem datumiem: 1. janvārim un 30. aprīlim (skat. 1.4. att.). No tā secināms, ka austrumu virzienā uzstādītais panelis saņem vairāk apstarojuma no rīta nekā rietumu virzienā vērstais panelis. Pēc šī aprēķina iespējams prognozēt panelu saražotās enerģijas izmaiņas gada griezumā, piemēram, no dienvidu paneļiem janvārī efektīvākais ir 90° leņķī vērstais, jo Saule atrodas zemu pie horizonta, bet aprīlī efektīvākais ir 40° leņķī.

1.1. tabula

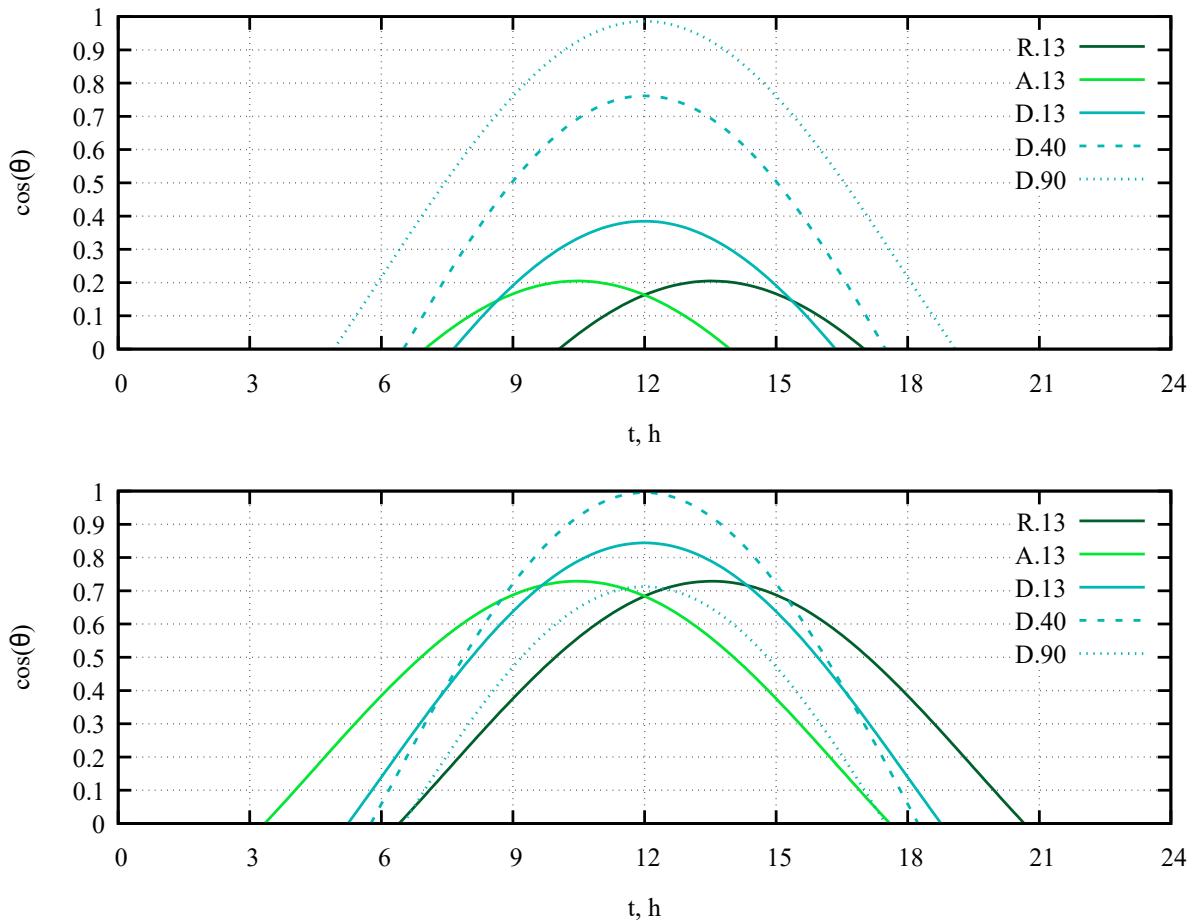
Lenķu, kas lietoti (1.2) vienādojumā, definīcijas.

	Apgabals	Definīcija
θ	(0°; 180°)	staru krišanas leņķis uz Saules paneli
δ	(−23°; 23°)	Saules deklinācija
ϕ	(−90°; 90°)	ģeogrāfiskais platumis
β	(0°; 180°)	paneļa slīpums
γ	(−180°; 180°)	paneļa azimuts
ω	(−180°; 180°)	solārais stundu leņķis

1.2. tabula

Darbā lietotajiem Saules paneļiem atbilstošās leņķisko parametru vērtības, grādos.

	R.13	A.13	D.13	D.40	D.90
paneļa slīpums β		13		40	90
paneļa azimuts γ	90	-90		0	
ģeogrāfiskais platumis ϕ			57		

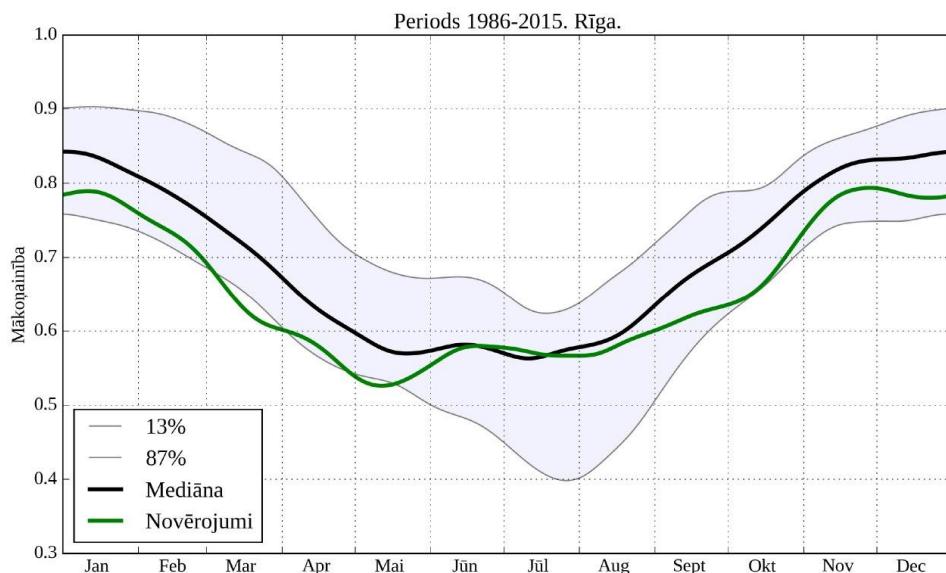


1.4. att. Diennakts laikā paredzētas $\cos(\theta)$ vērtības darbā lietotajiem Saules paneljiem, aprēķinātas pēc (1.2) izteiksmes 1. janvārim (augšā) un 30. aprīlim (apakšā).

1.3. Klimats Latvijā

Tiek apskatīta atmosfēras un mākoņu ietekme uz virsmas saņemto saules starojumu, un tās praktiskā nozīme, apstrādājot pieejamos Saules starojuma datus.

Saskaņā ar LU VTPMML klimatisko datu apkopojumu, kas parādīts 1.5. att., mākoņainība Rīgā var sasniegt līdz 60% jūlijā un līdz pat 90% decembrī. Tas nozīmē, ka Saules paneļu efektivitātes novērtējumam Latvijas klimatā mākoņainība ir ļoti būtiska un tā palīdzēs prognozēt nepieciešamos enerģijas uzkrājumus un papildavotus, ja solārā enerģija tiek izmantota kā pamata enerģijas avots.

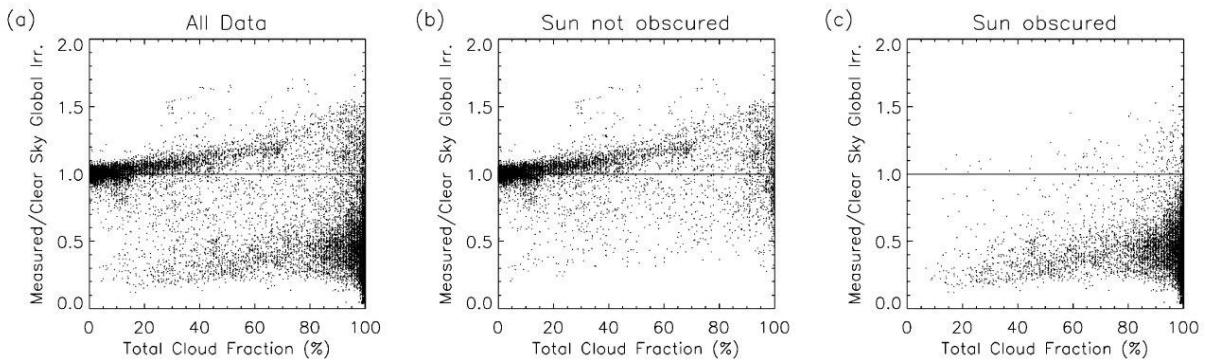


1.5. att. Vidējā mākoņainība Rīgā gada laikā, vidējota pa 20 gadu periodu [7].

Mākoņu ietekme uz Saules apstarojumu ir netriviāla un atkarīga no dažādiem parametriem. Piemēram, dažreiz mākonainība var pat nedaudz palielināt Saules apstarojumu [8]. Šis šķietami kontraintuitīvais rezultāts izskaidrojams ar to, ka Saule nav nosepta pilnībā, un baltie mākoņi mēdz būt gaišāki nekā pašas debesis saulainā dienā (skat. 1.6.(b) attēlā), tādējādi DNI komponentes samazināšanās tiek kompensēta ar palielinātu gaismas izkliedi.

Savukārt gadījumos, kad mākoņi aizsedz Sauli (skat. 1.6.(c) attēlā), apstarojums $\approx 99\%$ gadījumu samazinās, kā tas bija paredzams. Apskatot visu datu kopu, var secināt, ka vairākumā gadījumu mākoņu ietekmi uz Saules paneļu saražoto energiju var uzskatīt par nelabvēlīgu. Pētīju-

mi rāda, ka mākoņi absorbē par 25 W/m^2 vairāk gaismas, nekā teorētiski paredzams, un šī vērtība nevar būt izskaidrojama ar troposfēras aerosoliem [9]. Neskatoties uz to, ka mākoņainība ir galvenais Saules paneļu efektivitāti ietekmējošs faktors, ar informāciju par mākoņainību nepietiek, lai pilnvērtīgi izskaidrotu un paredzētu paneļu saražotās enerģijas izmaiņas.



1.6. att. Attiecība starp izmērīto apstarojumu un tīrās debess gadījuma apstarojumu (a) visiem datiem, (b) gadījumos ar neaizsegtu Sauli un (c) gadījumos ar aizsegtu Sauli [8].

Mākoņu ietekme ir atkarīga arī no to veida. Mākoņu modifikācijas reizinātājs (*Cloud Modification Factor* - CMF), ko definē kā attiecību starp apstarojumu gadījumos ar un bez mākoņiem, atkarībā no mākoņu tipa ir apkopots 1.3. tabulā. Ir jāņem vērā, ka CMF ir atkarīgs no viļņa garuma. Tomēr ultravioletais CMF no redzamās gaismas CMF ir atkarīgs lineāri ar koeficientiem $\approx 0.6 - 1$ gubumākoņu gadījumā un eksponenciāli spalvmākoņu gadījumā.

1.3. tabula

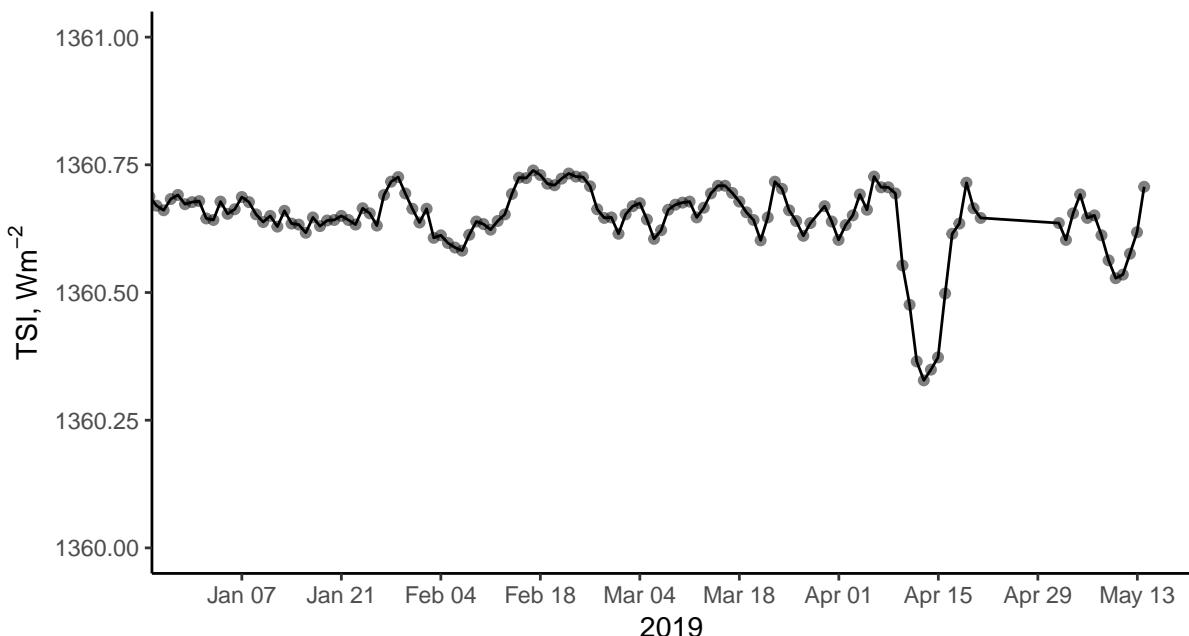
CMF intervāls atkarībā no mākoņu tipa [10]

augstie gubumākoņi	< 0.7
gubumākoņi	$0.2 - 1.3$
spalvmākoņi	$0.6 - 1$

Modelēt saules apstarojumu, kas nonāk paneļu virsmas, laikā komplicē ne tikai mākoņu ietekme, bet arī Saules apstarojuma izmaiņas laikā. Tomēr šī darba ietvaros to var neņemt vērā, jo globālais horizontālais apstarojums (GHI) mainās tikai ap $\pm 0.7 \text{ W/m}^2$ gadā ($\pm x\% \text{ solropane udu datu uzemanasa}$

kā tas ir redzams 1.7. attēlā.

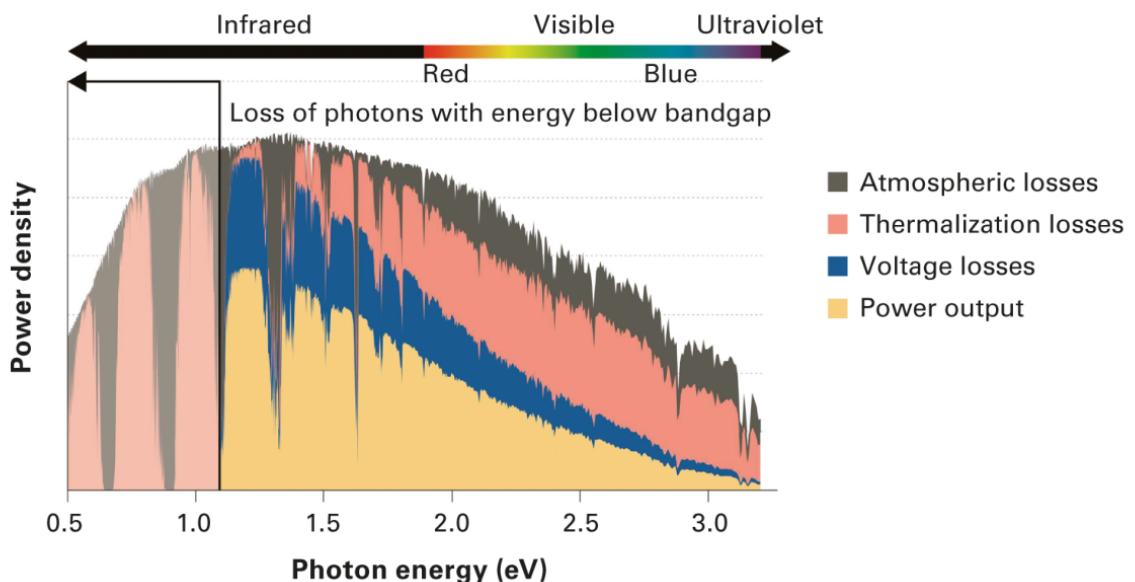
Atsaucoties uz TIM satelīta izmērīto saules gaismā ietverto enerģiju (skat. 1.2. att.), šis grafiķs (skat. 1.8. att.) attēlo enerģijas zudumus dažādiem vilņu garumiem absorbējoties atmosfērā, kā arī siltuma un sprieguma zudumus saules šūnā.



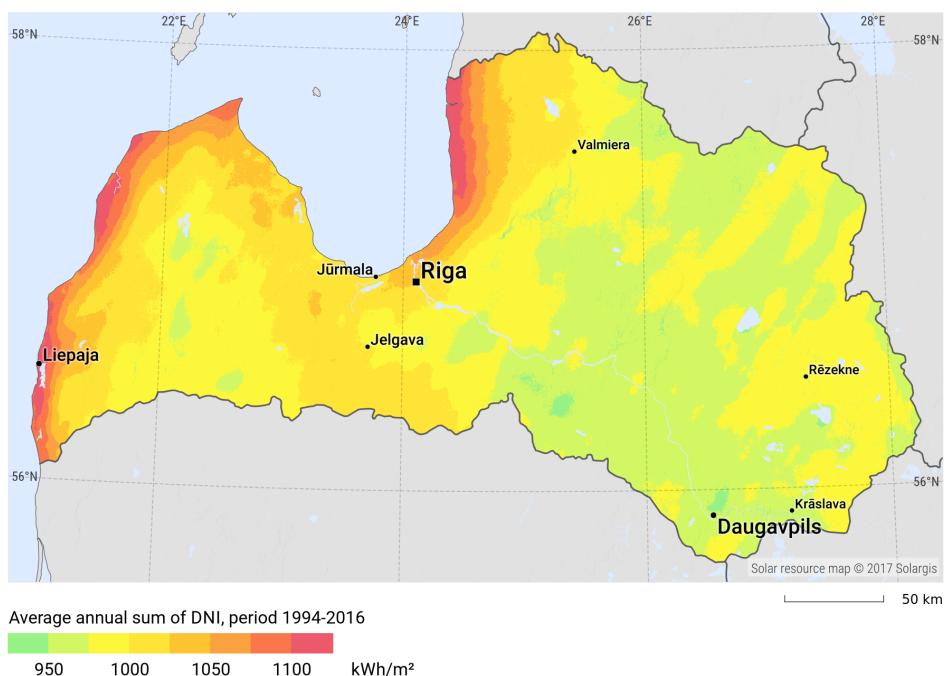
1.7. att. TSI izmaiņas solāro paneļu datu ieguves laikā 1 AU attālumā (24 h vidējā vērtība)[5].

Pēc Solargis modeļa no satelītu un atmosfēras mērījumu datiem ar klūdu 3% līdz 10% robežās secināms, ka piekrastē ir vairāk saules apstarojuma un līdz ar to arī lielāka prognozētā jauda. Tiešais normālais apstarojums (*Direct normal irradiance* - DNI) ir Saules apstarojums bez izklīdes atmosfērā Globālais horizontālais apstarojums (*Global horizontal irradiance* - GHI) ir kopējais virsmas saņemtais apstarojums, ieskaitot gan DNI, gan starojumu, kas izkliedējas atmosfērā.

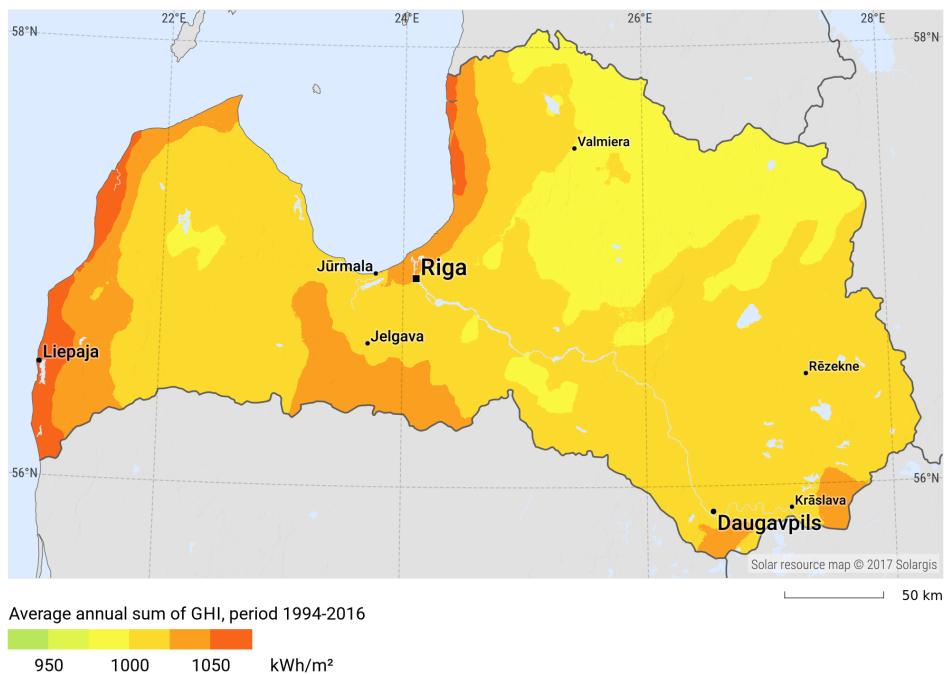
Salīdzinot 1.9. un 1.9. attēlus redzams, ka GHI ir nedaudz lielāks par DNI, tātad redzams izkliedētā starojuma ieguldījums. PVOUT karte sniedz apkopojušu par prognozēto saules fotoelementu (PV) enerģijas ražošanas apjomu, pieņemot 1kW jaudas silīcija PV spēkstacijas, gada patēriņam optimizētu slīpuma leņķi 1.11. Pēc šiem datiem kopumā var secināt, ka saules paneli, ir piemērots risinājums enerģijas ieguvei arī Latvijā.



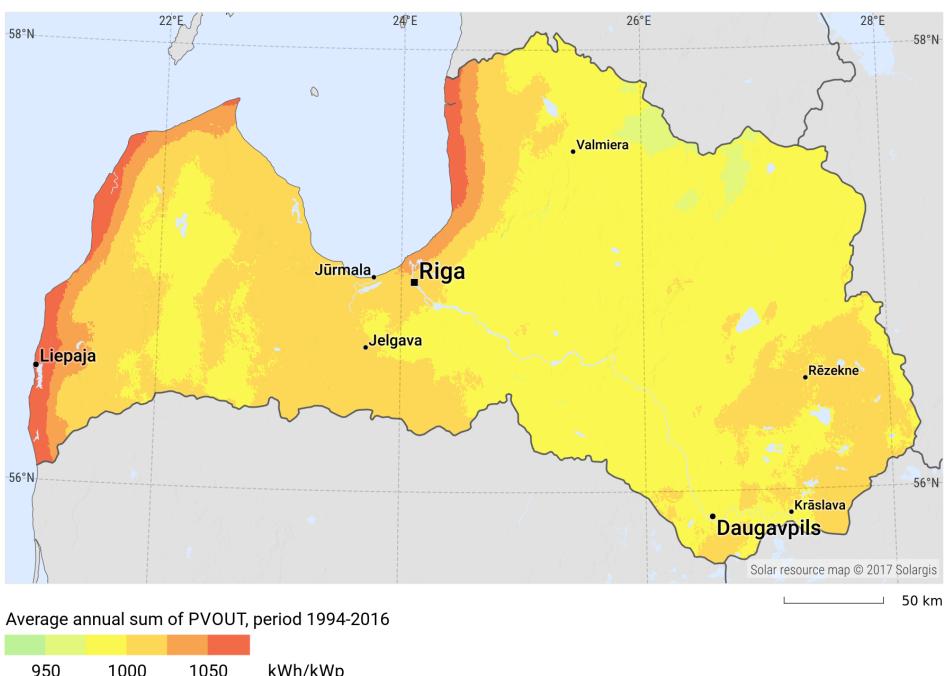
1.8. att. Saules enerģijas zudumi silīcijā balstītā saules šūnā. [11].



1.9. att. Tiešais normālais apstarojums Latvijā [12]



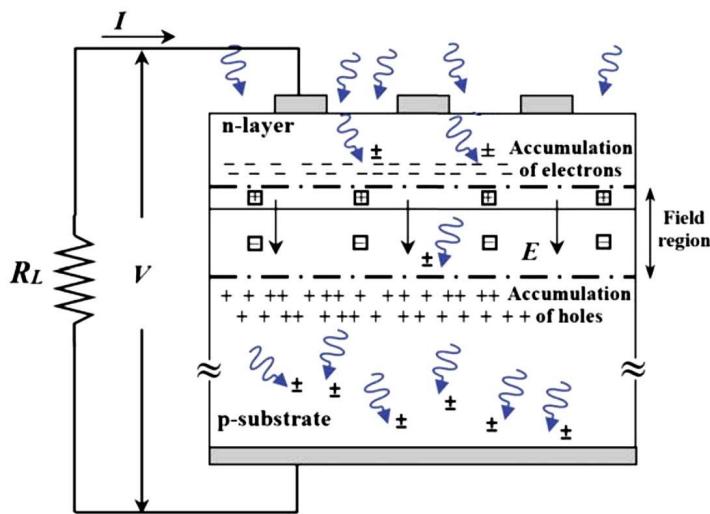
1.10. att. Globālais horizontālais apstarojums Latvijā [12]



1.11. att. PV potenciālā jauda Latvijā [12]

1.4. Saules paneli

Saules paneli sastāv no fotoelementiem, kas pārveido gaismas enerģiju elektriskā lauka enerģijā. Fotoelements, kura uzbūves shēma ir parādīta 1.12. attēlā, ir p-n pāreja ar elektriskajiem kontaktiem, kas pieslēgti pie lādētāja vai cita enerģijas patēriņtāja. Fotoelementa apakšējā daļa sastāv no n-tipa pusvadītāja, kurā lādiņa pamatnesēji ir elektroni, bet augšējā daļa – no p-tipa pusvadītāja, kur lādiņa pamatnesēji ir caurumi.



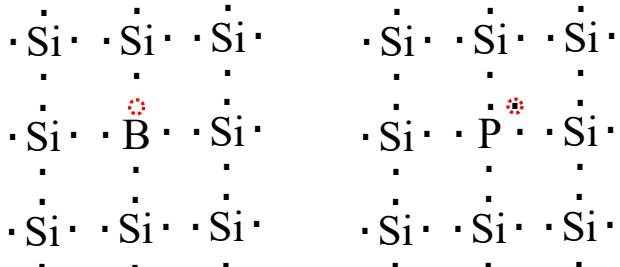
1.12. att. Saules panela shēma. Tas sastāv no fotoelementiem, kuru augšējais slānis veidots no p-tipa pusvadītāja, bet apakšējais — no n-tipa pusvadītāja [13].

P-tipa un n-tipa pusvadītāja īpašības var panākt, piemēram, dopējot silīcija kristālu ar attiecīgi III vai V grupas elementiem. Ja silīcija kristālam pievieno bora atomus nelielā koncentrācijā, izveidojas 1.13. att. pa kreisi redzamā situācija. Katram Si atomam ir četri elektroni ārējā čaulā, ar kuru palīdzību atoms izveido četras kovalentās saites ar četriem citiem atomiem. Savukārt bors, būdams III grupas elements, var izveidot tikai trīs saites. Tādā veidā pie bora atoma parādās "caurums" – nenoslēgta kovalentā saite, kas attēlā apzīmēta ar sarkanu apli. Uz šo vietu var pārvietoties kāds no blakus esošiem elektroniem, bet tad neaizpildīta vieta parādīsies pie blakus esošā atoma. Tādā veidā var uzskatīt, ka caurums pārvietojas, un nosaukt to par pozitīvo lādiņa nesēju. Šādus pusvadītājus sauc par p-tipa pusvadītājiem. [13]

Ja silīcija kristālam pievieno fosfora atomus, izveidojas pretēja situācija – pie P atoma parādās elektrons, kas nepiedalās saites veidošanā (sk. att. 1.13., pa labi). Lai pārvietotos, brīvajam

elektronam ir nepieciešams mazāk enerģijas nekā elektroniem, kas veido kovalentās saites starp Si atomiem. Tātad, lādiņa pamatnesēji n-tipa pusvadītājos ir elektroni.

Dopējot divus blakus esošus Si kristāla apgabalus dažādā veidā, iegūst p-n pāreju. Uz robežas starp apgabaliem elektroni no n-tipa apgabala var rekombinēties jeb difūzijas ceļā noklūt uz p-tipa apgabalu un aizpildīt pietiekami tuvu esošus caurumus, tāpēc p-tipa pusvadītājā mala uzlādējas negatīvi.



1.13. att. Silīcija kristāla 2D izklājums, atomu ārējās čaulas elektroni ir apzīmēti ar punktiem. Pievienojot bora atomu, iegūst p-tipa pusvadītāju (pa kreisi), bet fosfora atomu — n-tipa pusvadītāju (pa labi).

Fotoelementa darbība balstās uz iekšējo fotoelektrisko efektu – parādību, kad elektrons tiek ierosināts ar gaismas kvantu un pāriet no valences zonas uz vadītspējas zonu. Kad tas notiek augšējā slānī (p-tipa pusvadītājā), elektrons atgrūžas no robežas starp slāniem, kura ir negatīvi lādēta rekombinācijas dēļ. Negatīvi lādētā (no p-tipa pusvadītāja puses) robeža rada potenciālu starpību, kas veicina elektronu kustību pa vadiem uz patēriņtāju, tādā veidā radot elektrisko strāvu.

1.4.1. Paneļu veidi

Darbā ir apskatīti divi Saules paneļu veidi. Ražotāju referenču lapās LG tiek prognozēta labāka atdeve saulainās dienās [14], bet JA labāka atdeve vājas gaismas intensitātes vidēs [15].

Paneļu maksimālā jauda (P_{max}) tiek testēta pie:

- standarta testa nosacījumiem (*Standart test condition - STC*):

Saules izstarojums 1000 W/m^2 ; apkārtējā temperatūra 25°C .

- nominālās šūnas darba temperatūras (*Nominal operating cell temperature - NOCT*):

Saules izstarojums 800 W/m^2 ; apkārtējā temperatūra 20°C ; vēja ātrums 1 m/s

1.4. tabula

JA un LG panelu tipu salīdzinājums [15] [14]

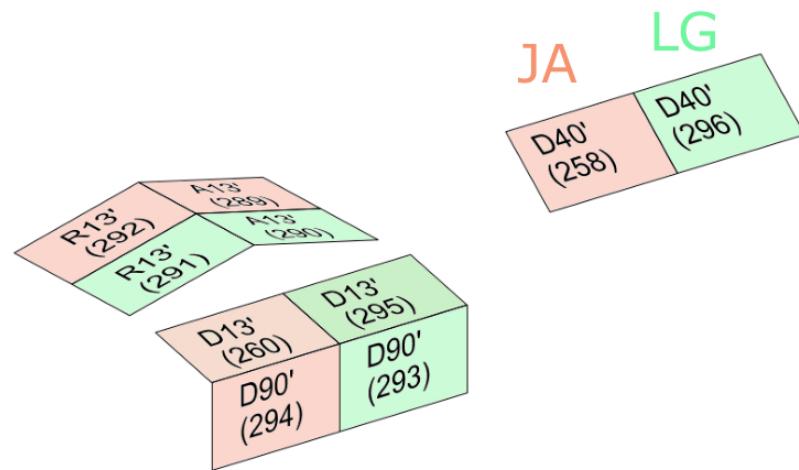
Tips	JA	LG
Modelis	JAP60-275/4BB	LG365Q1C-A5
Kristāla veids	Polikristālisks	Monokristālisks
Šūnu skaits	60	60
Virsmas laukums, m^2	1.64	1.72
STC Pmax, W	270	365
NOCT Pmax, W	196	275
Efektivitāte, %	16	20

1.4.2. Saules paneļu izmantošana pasaule

Silīcija Saules paneļu attīstības intensīvākais posms bija apmēram no 1980. līdz 2000. gadam, kad to maksimālā efektivitāte palielinājās no 15% līdz 25% [11]. Nākamajos 20 gados efektivitātes pieaugums bija gandrīz desmit reizes mazāks. Tieki pētīti arī citi Saules paneļu pusvadītāju veidi, piemēram CdTe vai GaAs, tomēr monokristāliskā un polikristāliskā silīcija Saules paneļi joprojām aizņem lielāko daļu no tirgus, piemēram, Vācijā Si sastādīja vairāk nekā 90% no Saules paneļu tirgus pēdējo septiņu gadu laikā [16]. Tas tādēļ, ka Si ir pieejamāks un lētāks nekā GaAs[17], un vairāk izpētīts nekā CdTe pusvadītāji [11].

Svarīgi ievērot, ka Saules paneļu efektivitāte ir atkarīga no vairākiem faktoriem, kas mainās līdz ar ģeogrāfisko novietojumu: ģeogrāfiskā platuma, gadalaika, mākoņainības un gaisa piesārņojuma. Tātad, detalizēta Saules paneļu efektivitātes analīze var būt noderīga katrā valstī, lai precīzāk izvērtētu solārās enerģijas lietošanas perspektīvas tajā. Var minēt dažus šādu pētījumu piemērus.

- Indijas pilsētā Bangalorē izpētīja, ka efektivitāte musona un pēc-musona periodos ir augstāka, nekā ziemā un vasarā. To var saistīt ar lielu nokrišņu daudzumu musona periodā, kas labi dzesē Saules paneļus, un ar lielāku Saulaino dienu skaitu pēc-musona periodā [10].

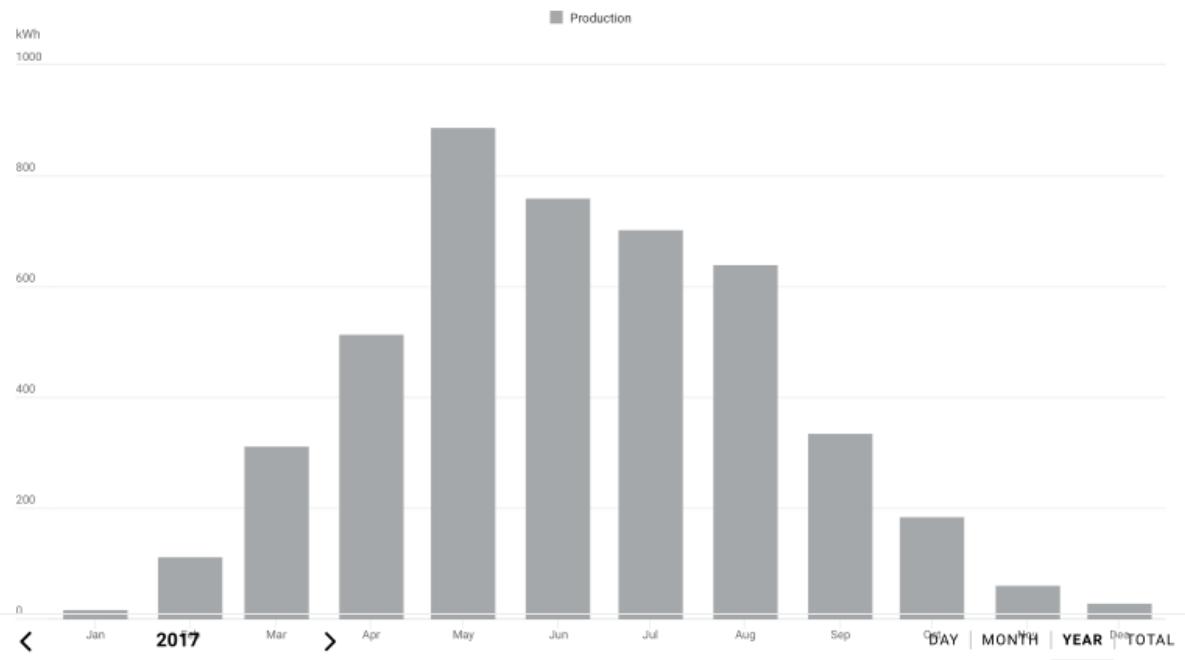


1.14. att. Saules paneļu telpisko orientāciju shēma

- Eksperiments Mumbajā [18] ļauj secināt, ka karsts un sauss klimats ne tikai samazina enerģijas pārvērtības lietderības koeficientu, bet arī izraisa defektus un silīcija bojājumus, kas palielina enerģijas zudumus. Tieka norādīts, ka šādā klimatā tipiskais Saules paneļu dzēsēšanas risinājums – ūdens izsmidzināšana – nav pielietojams, jo tieši šādā klimatā ūdens trūkums ir svarīga problēma.
- Indonēzijā pētnieki novēroja, ka mitruma un vēja ātruma palielināšana samazina Saules paneļu efektivitāti [18]. [19]. Atšķirībā no iepriekšējā pētījumā, aplūkotajā temperatūras apgabalā ($42 - 52^{\circ}\text{C}$) temperatūra pozitīvi korelē ar paneļu efektivitāti, kas iespējams saistīts ar GHI palielināšanos.
- Arī Latvijā jau ir uzstādītas saules paneļu sistēmas. Piemēram, Ulbrokā 2017. gadā 20 paneļu sistēma kopā saražoja 4554.06 kWh – vidēji 227.703 kWh gadā no viena paneļa (skat. 1.16).



1.15. att. Saules panelu telpiskās orientācijas dabā (autors Māris Šinka)



1.16. att. 20 Saules panelu sistēmas saražotā enerģija Ulbrokā 2017. gadā. Virziens: D, leņķis 15 grādi [20]

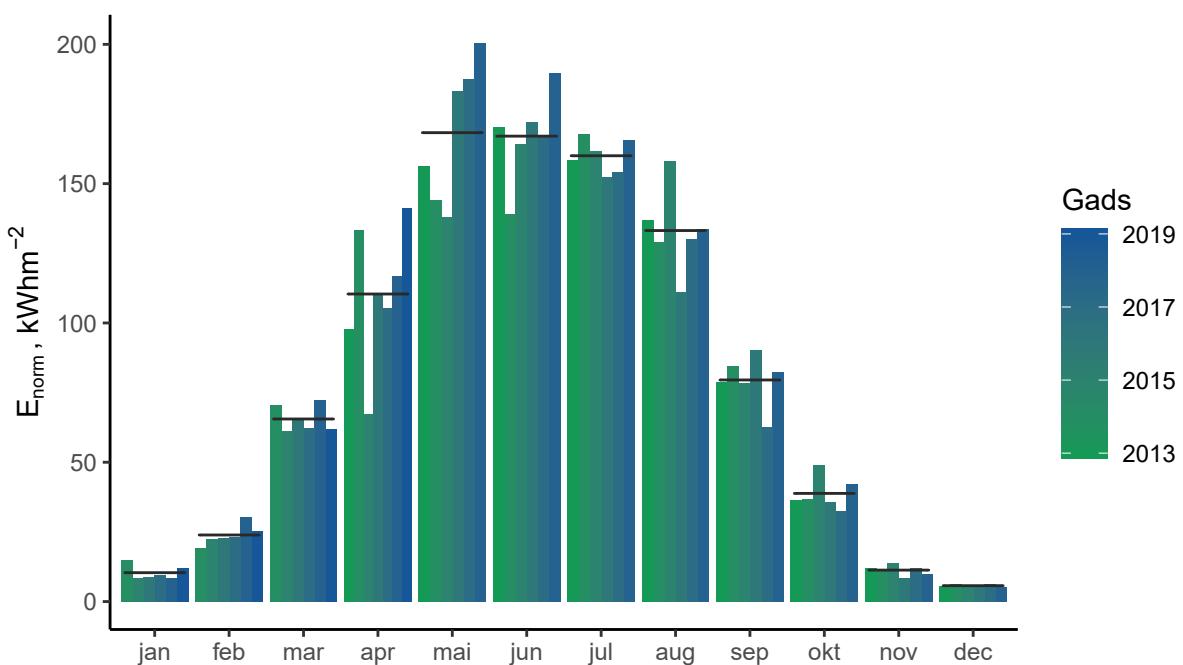
1.5. Darba aktualitāte

Latvijā veikto pētījumu daudzums un kvalitāte pagaidām neļauj iegūt pilnīgu priekšstatu par Saules paneļu lietošanas iespējām un prognozēt dažādu paneļu tipu efektivitāti reālā Latvijas klimatā. Tāpēc šī darba novitāte ietverta programmatūras izveidē, kas ļauj attēlot un apstrādāt Saules paneļu monitoringa datus, kas dos iespēju veikt turpmākus dzīlākus pētījumus par dažādiem solārās enerģijas pielietojuma aspektiem Latvijā.

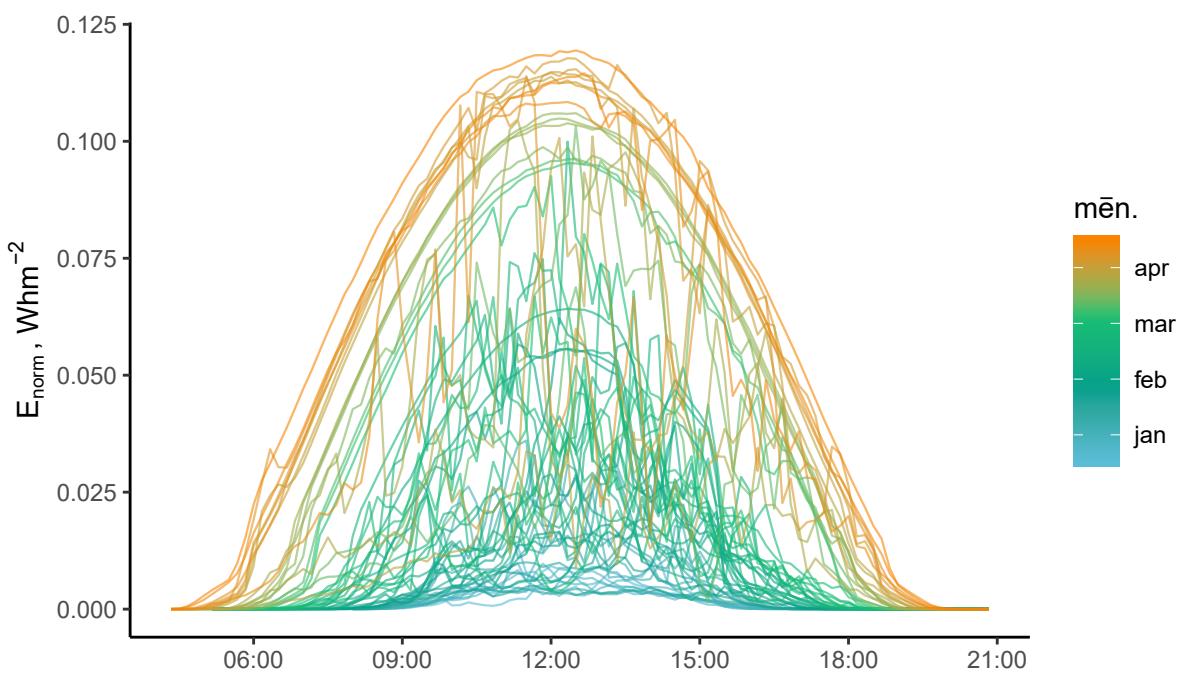
2. REZULTĀTI

2.1. Saules apstarojums

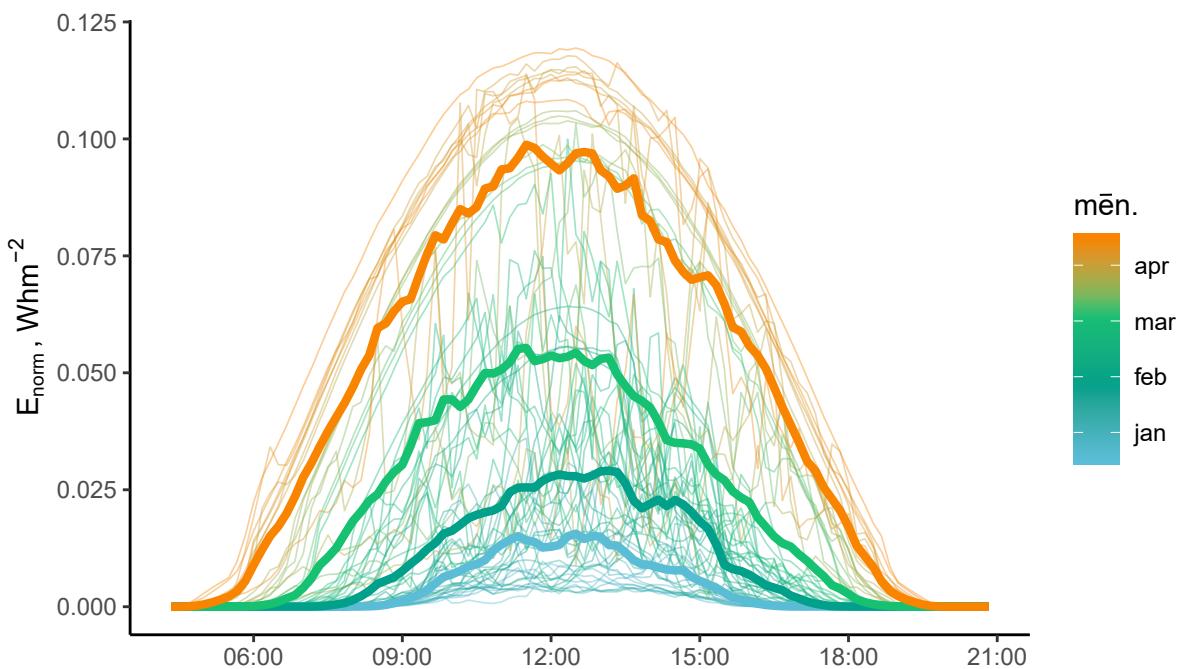
Tieši ilgtermiņa saules apstarojuma monitorings saules paneļu uzstādīšanas vietā ir svarīgs paneļu efektivitātes prognozēšanas rīks, jo ļauj izslēgt anomālu saulaina laika periodu svaru, kādi, piemēram, ir 2014. un 2019. gada aprīli (skat. 2.1. att.). Attēlos 2.2 un 2.3 redzams dienas saules apstarojumai izmaiņas novēroto četru mēnešu laikā, kas izskaidro turpmāk minētās atšķirības paneļu ražīgumā atkarībā no leņķa.



2.1. att. Solārā apstarojuma laika integrāla atšķirības gada gaitā un to vidējās vērtības. Eksperimentālā poligona meteostacijas stacijas dati 2013 – 2019 periodā.



2.2. att. Solārā apstarojuma izmaiņas dienas gaitā. Eksperimentālā poligona meteostacijas stacijas dati 2019-01-01 – 2019-04-31 periodā.



2.3. att. Mēnesī vidējotas solārā apstarojuma izmaiņas dienas gaitā. Eksperimentālā poligona meteostacijas stacijas dati 2019-01-01 – 2019-04-31 periodā.

2.2. Saules paneļi

2.2.1. Saules paneļa tipa ietekme uz ražīgumu

Pēc tabulām 2.1 un 2.2, kā arī grafikiem, kas integrēti diskusijā par citu saules paneļu parametru efektivitātēm (skat. gada griezumā), redzams, ka LG tipa paneļi konsistenti ir efektīvāki par JA tipu. Tas ir saistīts gan ar kristāla veidu - monokristāliska silīcija paneļi tipiski ir ražīgāki par polikristāliem, gan paneļu maksimālajām jaudām - LG tā ir lielāka nekā JA.

2.1. tabula

JA tipa paneļu saražotā enerģija uz kvadrātmetru

E, Whm ⁻²	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	meteo
jan	346.66	227.28	716.37	2461.00	2802.04	12138.68
feb	3198.12	2742.33	4266.63	6448.71	5989.95	25142.93
mar	8222.23	7397.80	9472.24	11938.03	8717.90	61764.12
apr	19886.40	19230.18	23268.02	25425.75	18249.96	141410.71
E_{sum} , kWhm ⁻²	31.7	29.6	37.7	46.3	35.8	240.5

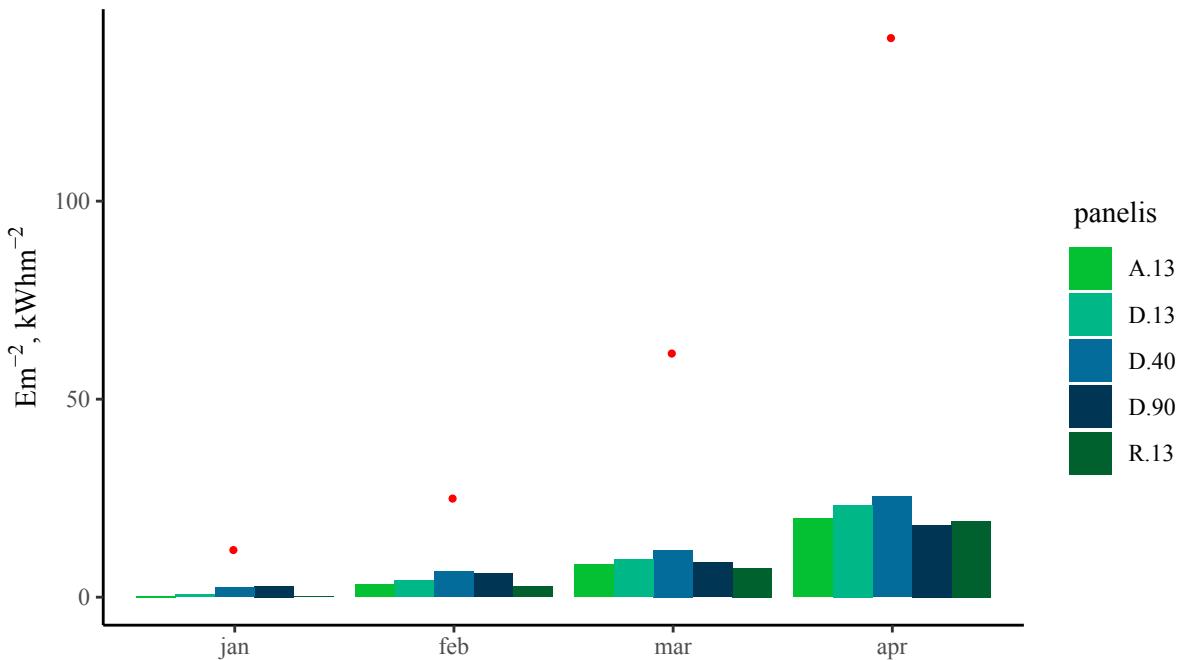
2.2. tabula

LG tipa paneļu saražotā enerģija uz kvadrātmetru

E, Whm ⁻²	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	meteo
jan	495.5	347.83	950.75	2816.81	3215.06	12138.68
feb	4431.55	3625.5	5046.58	8253.64	7413.21	25142.93
mar	10916.97	9267.88	11271.89	15694.83	11337.26	61764.12
apr	27632.28	25460.2	29136.2	34213.52	23176.05	141410.71
E_{sum} , kWhm ⁻²	43.5	38.7	46.4	70.0	45.1	240.5

2.2.2. Efektivitāte

Efektivitāte atšķiras no ražotāju tehniskajā dokumentācijā dotā. Iespējams tāpēc, ka visu paneļu saules apstarojuma references punktu izvēlējos eksperimentālā poligona meteostacijas datus un nepiereizināju tiem panelim atbilstošo leņķi, jo saules apstarojums mainās no leņķa.



2.4. att. JA tipa paneļu saražotais mēnesī salīdzinājumā ar eksperimentālā poligona meteostacijas stacijas saules apstarojuma datiem (sarkanā krāsā)

2.2.3. Saules paneļa leņķa ietekme uz ražīgumu

Kopumā var secināt, ka 90 grādu leņķi ir ražīgāki ziemas mēnešos un 13 grādu leņķi – vasaras mēnešos, jo tā paredz Saules diennakts kustības maiņa gada griezumā. Apkopojoši četru mēnešu datus un abus paneļu tipus, visražīgākais leņķis ir 40 grādu.

2.2.4. Saules paneļa virziena ietekme uz ražīgumu

Dienvidi ir visražīgākais virziens, tad austrumi, tad rietumi.

2.2.5. Saules paneļa leņķa un virziena ietekme uz dienā saražotās enerģijas sadalījumu

Kā redzams 2.10, 2.11, 2.12. att., eksperimentāli noteiktais dienas sadalījums sakrīt ar teorētiski prognozēto 1.4.att.

2.3. tabula

JA tipa paneļu efektivitāte procentos

E, %	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90
jan	2.86	1.87	5.90	20.27	23.08
feb	12.72	10.91	16.97	25.65	23.82
mar	13.31	11.98	15.34	19.33	14.11
apr	14.06	13.60	16.45	17.98	12.91
vid	10.74	9.59	13.67	20.81	18.48

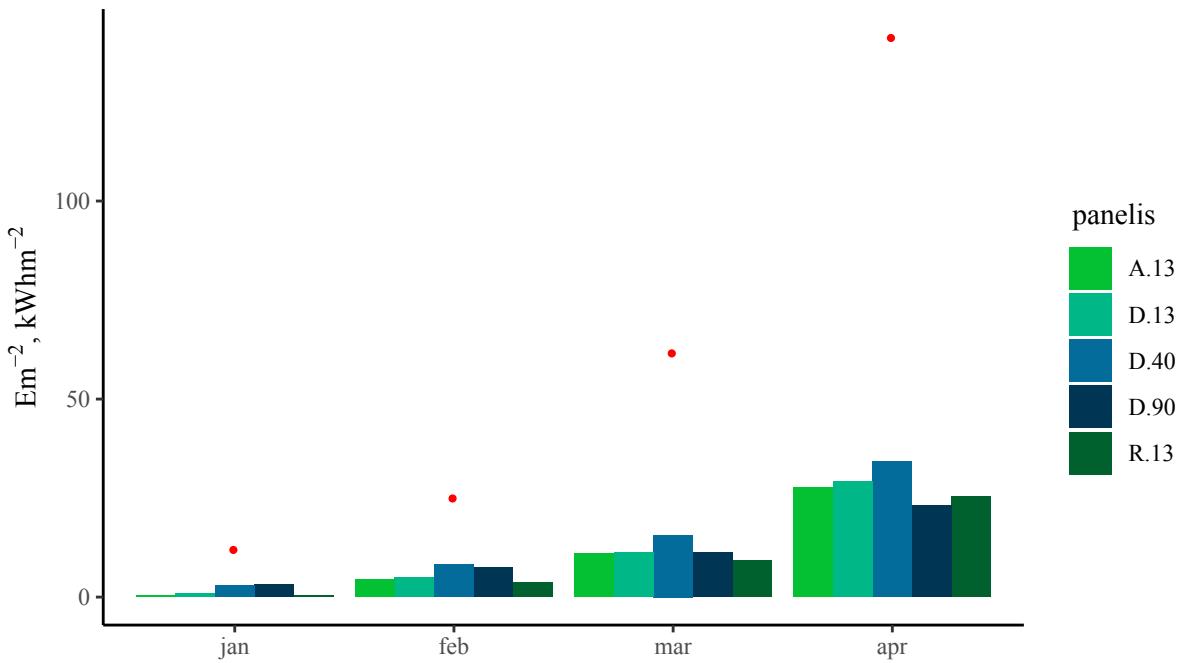
2.4. tabula

LG tipa paneļu efektivitāte procentos

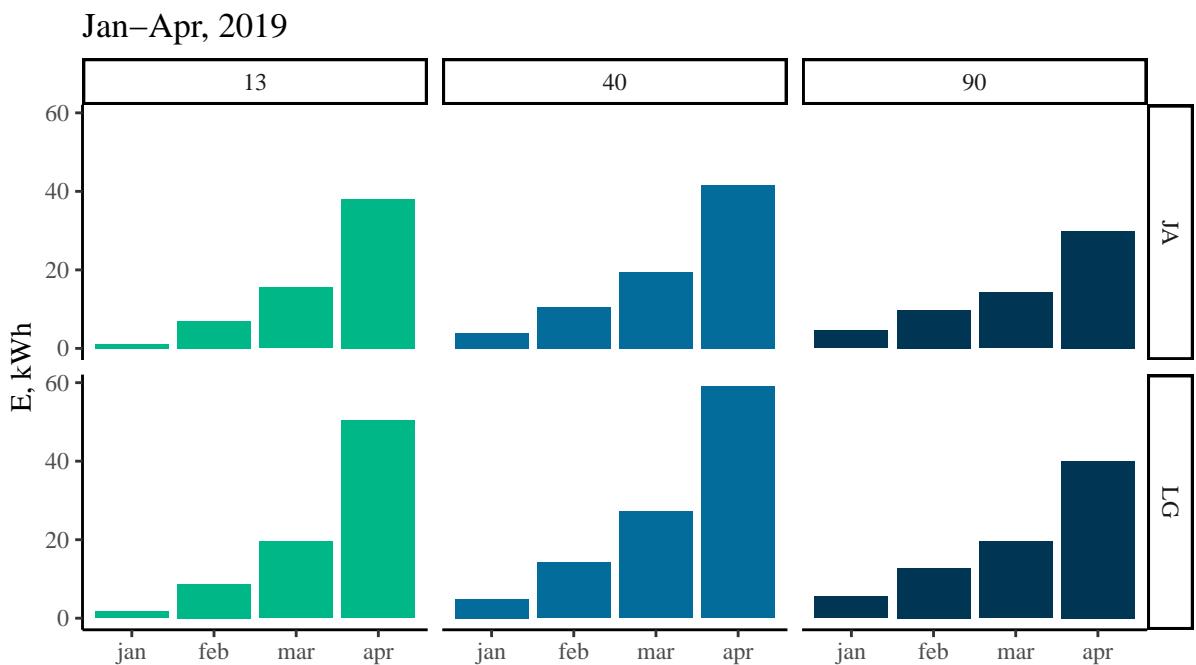
E, %	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90
jan	4.1	2.9	7.8	23.2	26.5
feb	17.6	14.4	20.1	32.8	29.5
mar	17.7	15.0	18.2	25.4	18.4
apr	19.5	18.0	20.6	24.2	16.4
vid	14.7	12.6	16.7	26.4	22.7

2.2.6. Gada mēneša ietekme uz ražīgumu

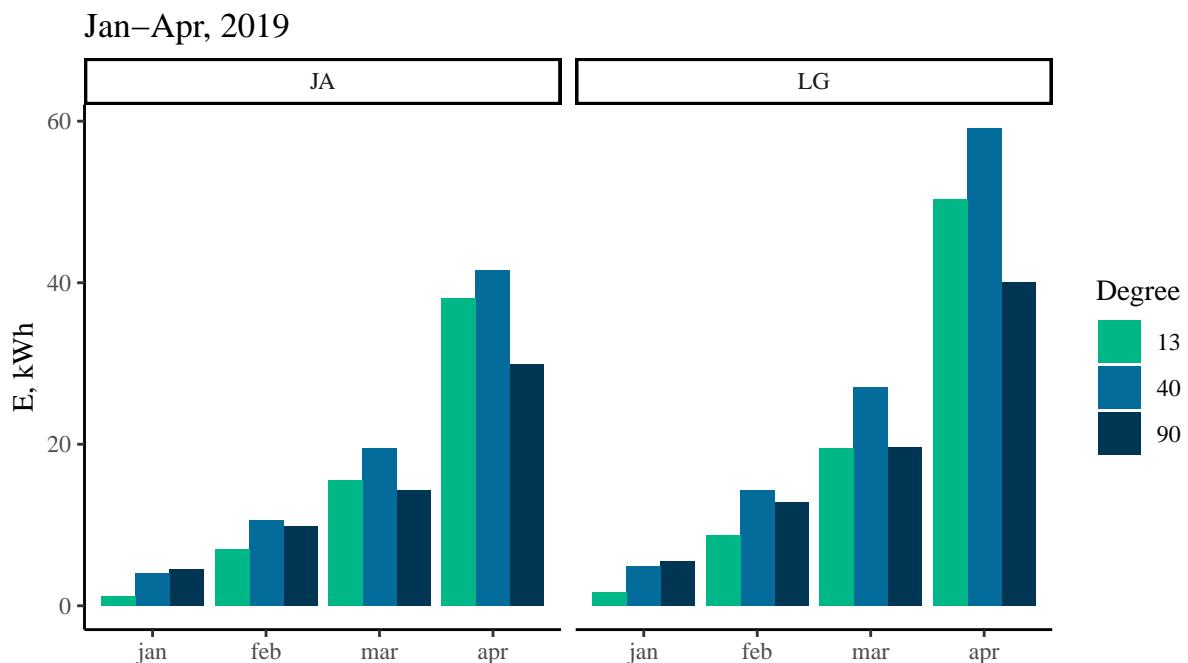
Pēc 2.13, ??, 2.16, 2.16. att., tiek izdarīti secinājumi par saules paneļu ražīguma atkarību no gada mēneša. Janvārī visražīgākais panelis ir D.90, otrs ražīgākais - D.40, kas atbilst janvārim raksturīgajai Saules diennakts kustībai – zemu pie horizonta. ???. att. redzams, ka februārī D.40 kļūst ražīgāks nekā D.90, tāpat redzams, ka mazāku leņķu paneli - R.13 un A.13 ir palielinājuši ražīgumu. Šī tendence turpinās arī marta un aprīļa mēnešos.



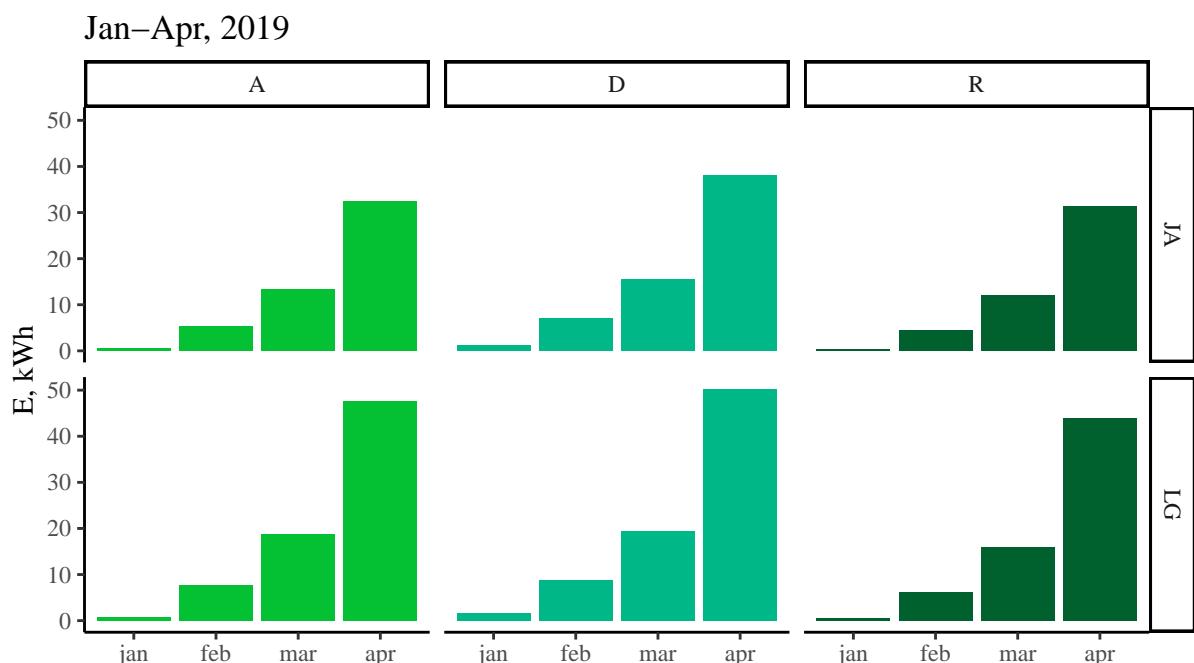
2.5. att. LG tipa paneļu saražotais mēnesī salīdzinājumā ar eksperimentālā poligona meteostacijas stacijas saules apstarojuma datiem (sarkanā krāsā)



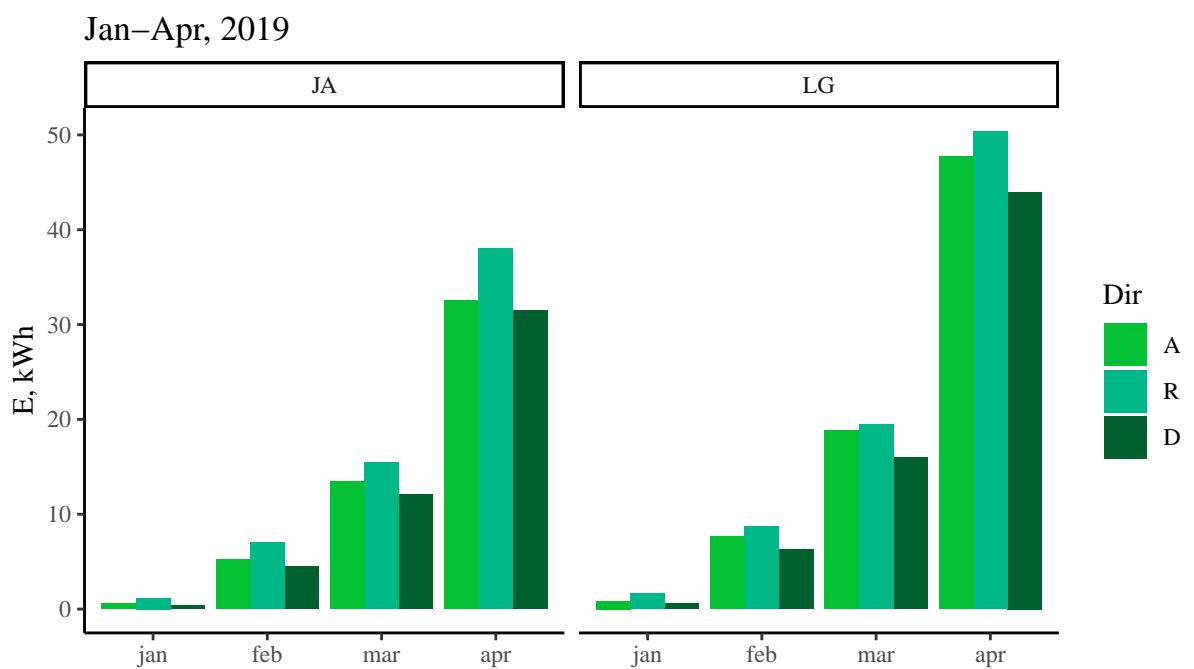
2.6. att. D virzienā vērsto saules paneļu saražotā enerģija atkarībā no lenķa un saules paneļu tipa



2.7. att. D virzienā vērsto saules panelu saražotā enerģija atkarībā no lenķa un saules panelu tipa

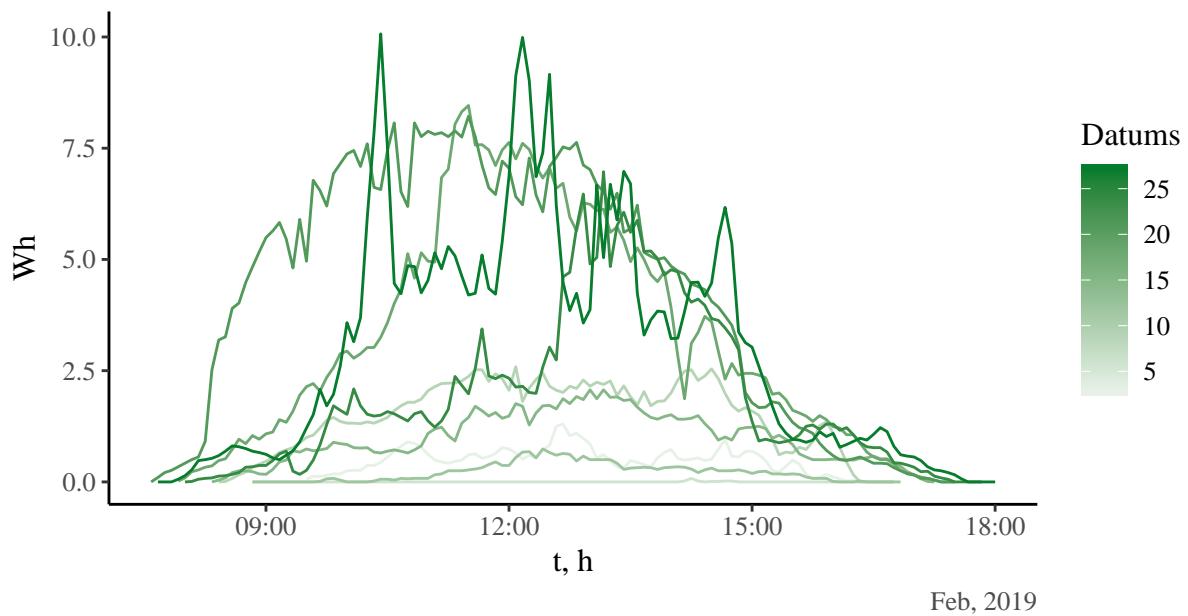


2.8. att. 13 grādu lenķi vērsto saules panelu atkarība no virziena un saules panelu tipa

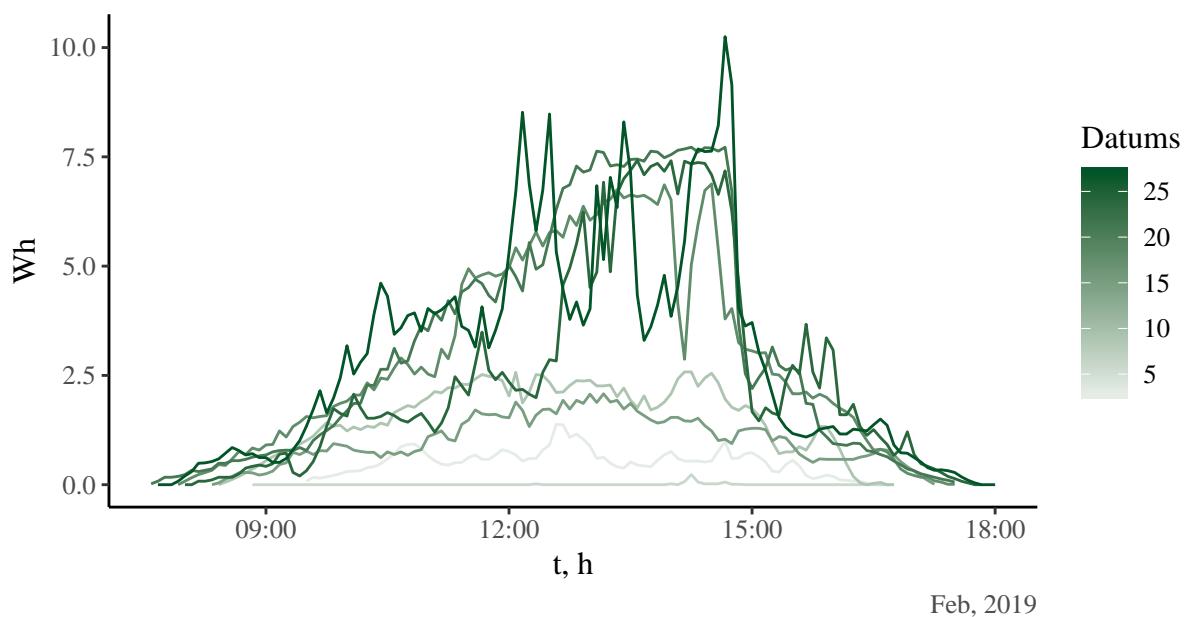


2.9. att. 13 grādu leņķī vērsto saules paneļu atkarība no virziena un saules paneļu tipa

A.13.JA

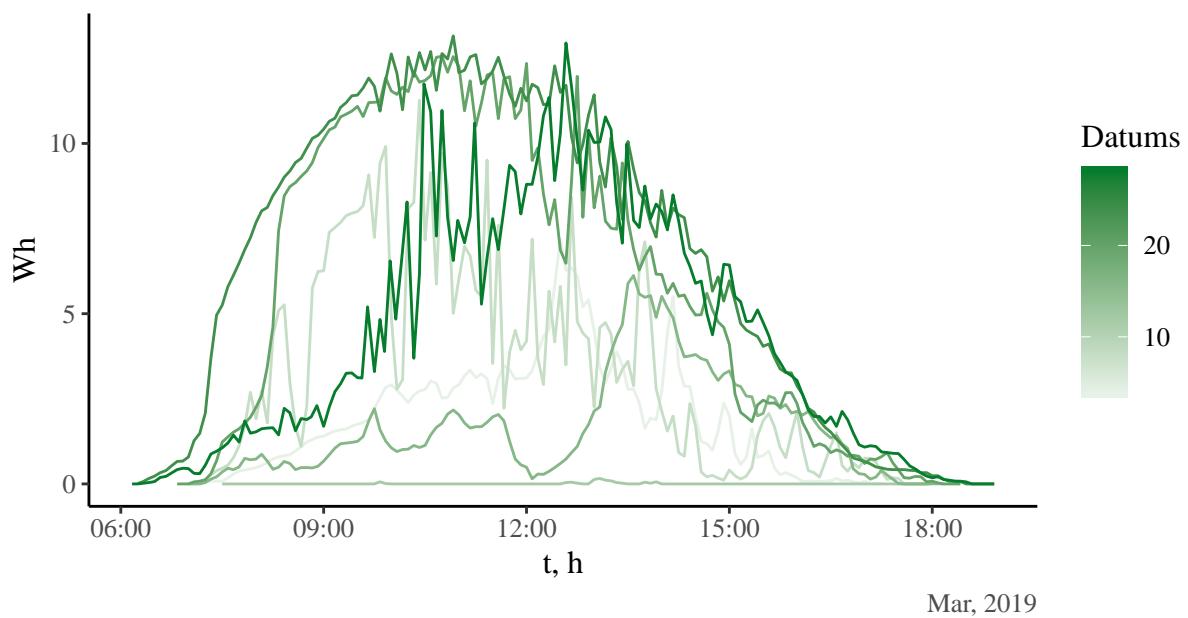


R.13.JA

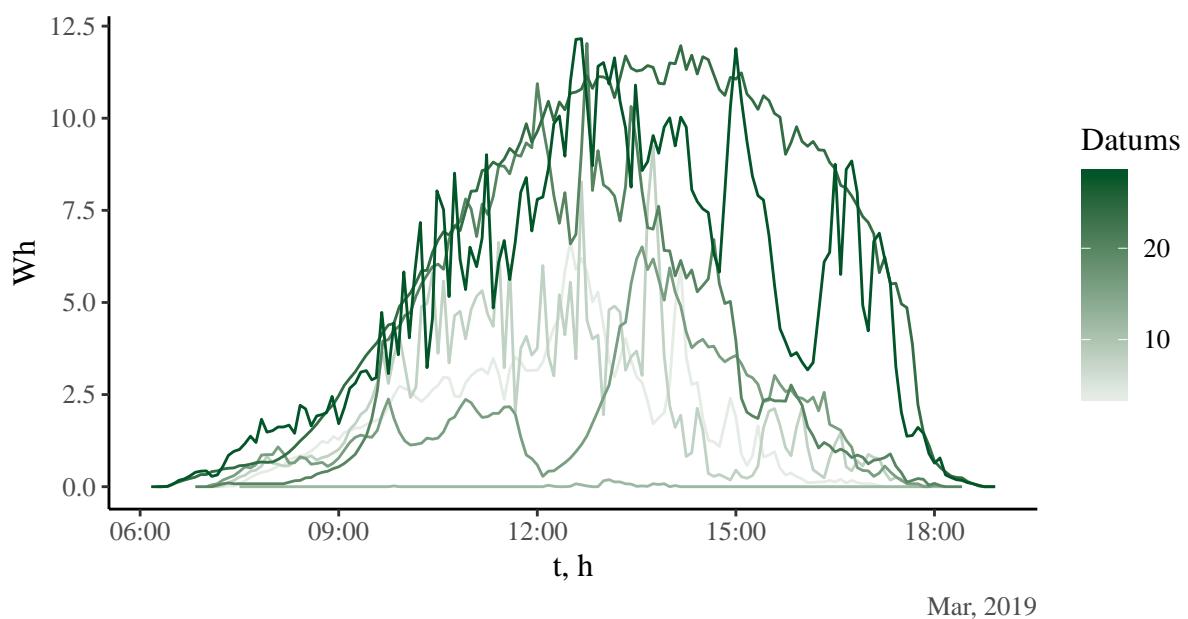


2.10. att. A un R virzieni saules paneļu 5 minūtēs vidējotu Wh dienas sadalījumi februārī

A.13.JA



R.13.JA



2.11. att. A un R virzieni saules paneļu 5 minūtēs vidējotu Wh dienas sadalījumi martā

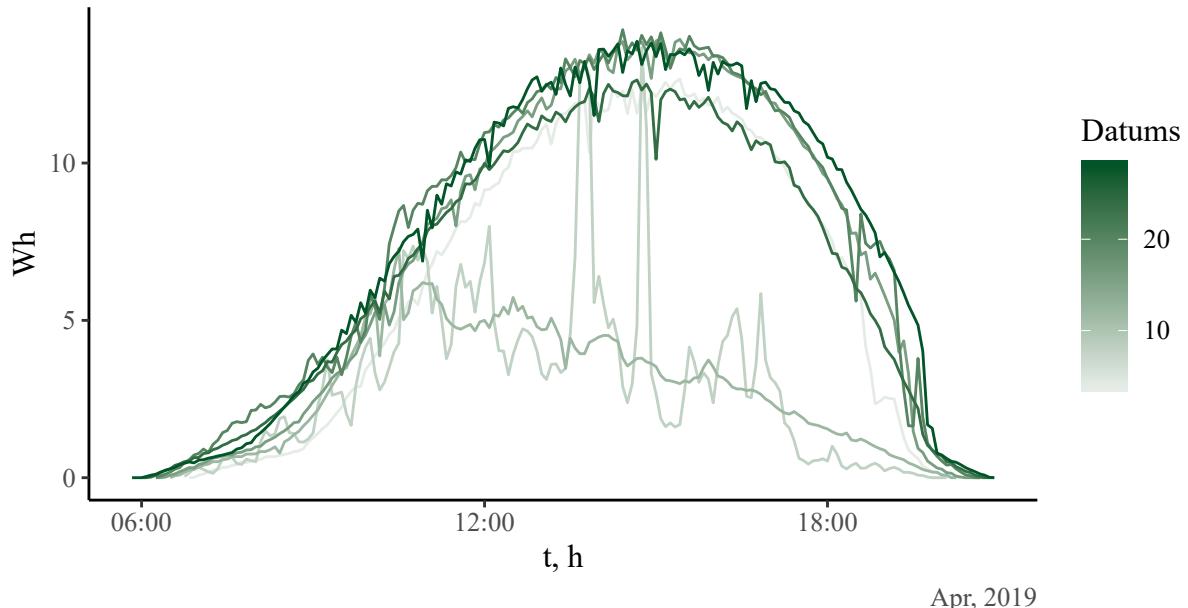
A.13.JA

Wh

t, h

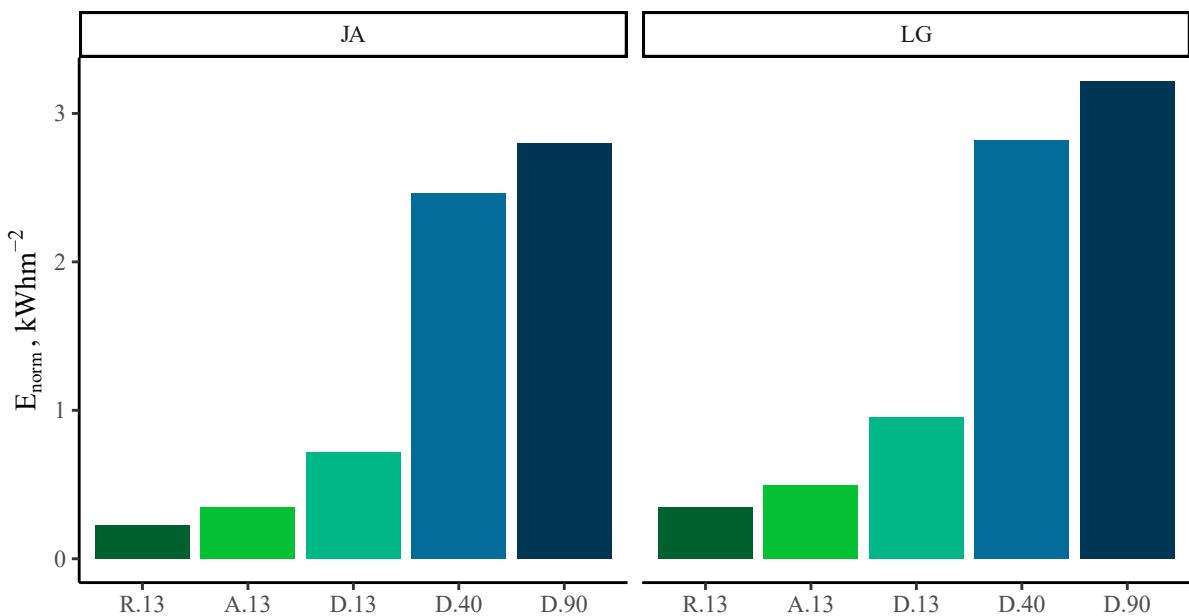
Apr, 2019

R.13.JA



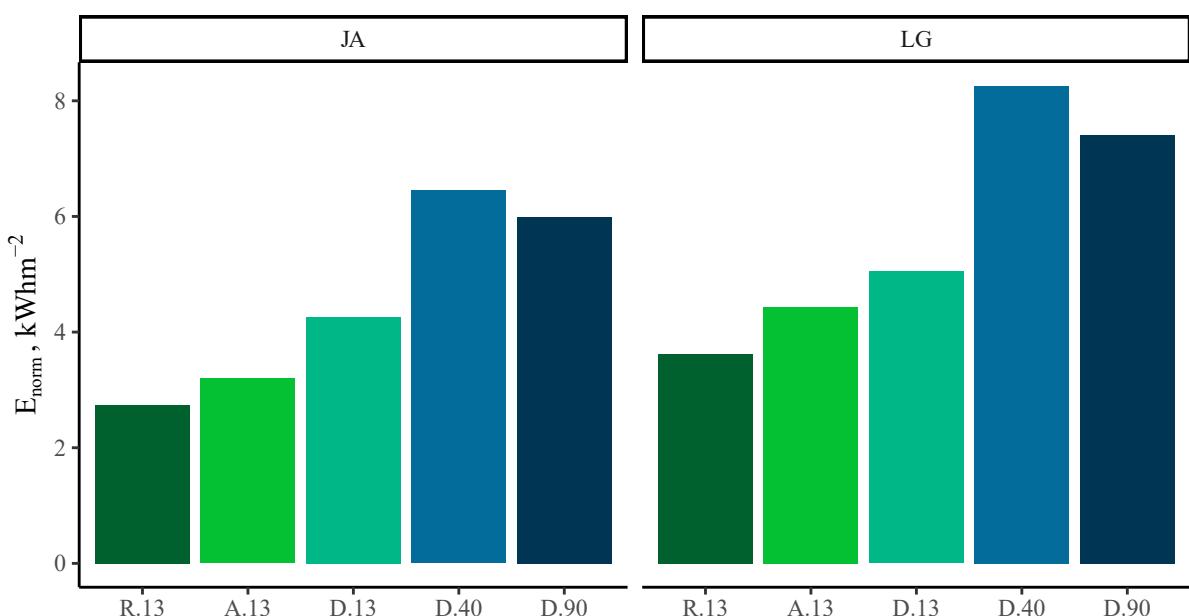
2.12. att. A un R virzieni saules paneļu 5 minūtēs vidējotu Wh dienas sadalījumi aprīlī

Jan, 2019



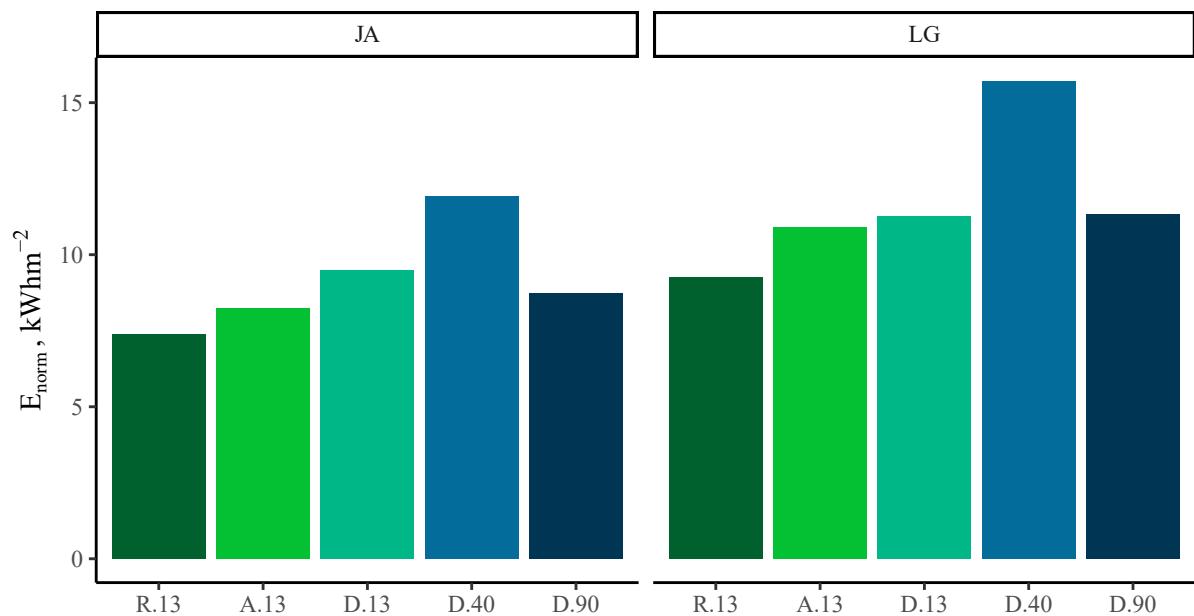
2.13. att. Saules paneļu saražotā enerģija janvārī

Feb, 2019



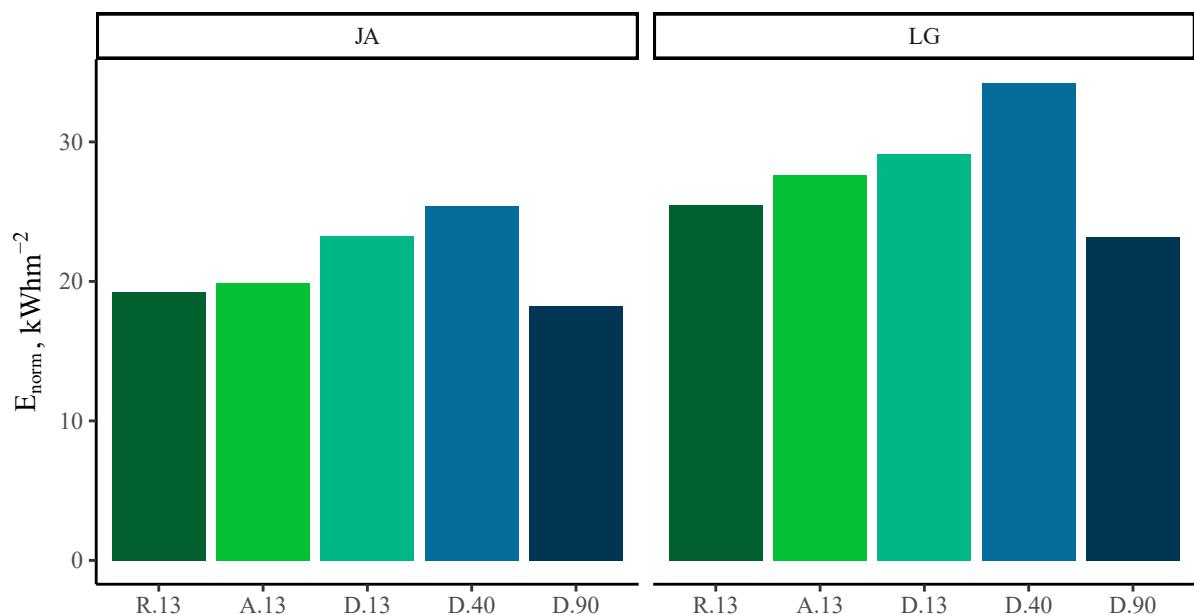
2.14. att. Saules paneļu saražotā enerģija februārī

Mar, 2019



2.15. att. Saules paneļu saražotā energija martā

Apr, 2019



2.16. att. Saules paneļu saražotā energija aprīlī

SECINĀJUMI

Darba laikā tika izveidota programmatūra, ar kuras palīdzību tika atlasīts, analizēts un apkopots liels datu apjoms par 10 saules paneļu darbību no 2019. gada 1. janvāra līdz 30. aprīlim. Pētījuma datu analīzes rīks ir pieejams <https://github.com/chararchter/solR>.

Darbā iegūtie rezultāti ļauj izdarīt secinājumus, ka no sistēmā esošajiem parametriem efektīvākā kombinācija ir:

- 40 grādu leņķis
- D virziens
- LG panelis
- aprīļa mēnesis

Saules paneļu efektivitātes dzīlāka izpratne pieprasītākus pētījumus, it īpaši nolietojuma, putekļu, vēja, nokrišņu un citu apstākļu ietekmes izpētei.

PATEICĪBAS

Pateicos darba vadītājam un Mihailam Birjukovam par vērtīgiem komentāriem. Paldies Aleksandrai Elbakjanai par sci-hub. Paldies "Puratos Latvia" un Asjas un Berndta Everts piemīnas fondam par stipendiju studiju laikā.

Darbs veikts ar Eiropas Reģionālās attīstības fonta projekta "Viedo risinājumu gandrīz nulles enerģijas ēkām izstrāde, optimizācija un ilgtspējas izpēte reāla klimata apstākļos" Nr ESS2017/209 1.1.1.1/16/A/192 finansiālo atbalstu.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] *Direktīva (ES) 2018/2001 par no atjaunojamajiem energoresursiem iegūtās energijas izmantošanas veicināšanu.* Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-26. Eiropas Parlaments un Eiropas Savienības Padome (ES), 2018/2001. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>.
- [2] N. S. Lewis. „Research opportunities to advance solar energy utilization”. *Science* 351.6271 (2016). ISSN: 0036-8075. doi: 10.1126/science.aad1920. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/351/6271/aad1920.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/351/6271/aad1920>.
- [3] J. A. Duffie; W. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. izdev. Wiley, 2013. ISBN: 9780470873663. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=84481e599cbed1e3c70f82b3c1379d1c>.
- [4] C. Fröhlich. „Total Solar Irradiance Observations”. *Surveys in Geophysics* 33.3 (2012), lpp. 453—473. ISSN: 1573-0956. doi: 10.1007/s10712-011-9168-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9168-5>.
- [5] G. Kopp. *SORCE Level 3 Total Solar Irradiance Daily Means, version 018*. Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-22. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Earth Science Data un Information Services Center (GES DISC), 2019. doi: doi : 10.5067/D959YZ53XQ4C. URL: http://lasp.colorado.edu/data/sorce/tsi_data/daily/sorce_tsi_L3_c24h_latest.txt.
- [6] E. Richard. *SORCE Level 3 Solar Spectral Irradiance Daily Means V001*. Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-23. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Earth Science Data un Information Services Center (GES DISC), 2018. doi: doi : 10.5067/TSIS/SIM/DATA302. URL: http://lasp.colorado.edu/home/tsyis/data/ssi-data/?doing_wp_cron=1558640803.1350839138031005859375.
- [7] et.al. U. Bethers. *Mākonainība Latvijā*. Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-26. Latvijas Universitātes Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija. URL: <http://www.modlab.lv/klimats/Parametri/cloud/Cloud.html>.

- [8] G. Pfister; R. L. McKenzie; J. B. Liley et. al. „Cloud Coverage Based on All-Sky Imaging and Its Impact on Surface Solar Irradiance”. *Journal of Applied Meteorology* 42.10 (2003), lpp. 1421—1434. doi: 10.1175/1520-0450(2003)042<1421:CCBOAI>2.0.CO;2. eprint: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1421:CCBOAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1421:CCBOAI>2.0.CO;2).
- [9] R. D. Cess; M. H. Zhang; P. Minnis et. al. „Absorption of Solar Radiation by Clouds: Observations Versus Models”. *Science* 267.5197 (1995), lpp. 496—499. issn: 0036-8075. doi: 10.1126/science.267.5197.496. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/267/5197/496.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/267/5197/496>.
- [10] M. L. López; G. G. Palancar; B. M. Toselli. „Effect of different types of clouds on surface UV-B and total solar irradiance at southern mid-latitudes: CMF determinations at Córdoba, Argentina”. *Atmospheric Environment* 43.19 (2009), lpp. 3130 —3136. issn: 1352-2310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.065>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009002349>.
- [11] V. Sivaram. *Taming the Sun: Innovations to Harness Solar Energy and Power the Planet*. The MIT Press, 2018. isbn: 978-0-262-03768-6. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=80eb8a6b6e8f1bb713a1d7b11c1d4188>.
- [12] Solargis. *Solar resource maps of Latvia*. Tehn. zin. Skatīts: 2019-05-20. World Bank Group, 2019. URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/latvia>.
- [13] I. Yahyaoui. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies: Volume 1: Solar and Wind Energies*. 1. izdev. Elsevier Science Ltd, Yahyaoui, Imene, 2018, lpp. 19—33. isbn: 978-0-12-812959-3, 012812959X. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=52151250ca3ff4f0e3772d8122baa8ed>.
- [14] LG NeON R solar module LG365Q1C-A5 data sheet. Skatīts: 2019-05-24. LG Electronics. 2019. g. febr. URL: https://www.lg.com/us/business/download/resources/BT00002151/LGS040219_DS_LG350-365Q1C-A5.pdf.

- [15] JA Solar solar module JAP60-275/4BB data sheet. Skatīts: 2019-05-25. JA Solar. 2016. g. apr. URL: <https://www.zonnepanelen-groothandel.com/uploads/documents/0b2218adfe6914c23838b87c95e7d0aa.pdf>.
- [16] Solar Cell Market Analysis By Product (Silicon Wafer, Monocrystalline, Multicrystalline, Cadmium Telluride, Copper Indium Gallium Selenide, Amorphous silica), And Segment Forecasts To 2022. Skatīts: 2019-05-30. Grand View Research. 2015. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/solar-cell-market>.
- [17] Garrett J. Hayes un Bruce M. Clemens. „Laser liftoff of gallium arsenide thin films”. *MRS Communications* 5.1 (2015), lpp. 1–5. doi: 10.1557/mrc.2015.2.
- [18] Chandrakant Wani un Krishna Kumar Gupta. „Towards improving the performance of solar photovoltaic energy system: A review”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 227 (2019. g. marts), lpp. 022009. doi: 10.1088/1755-1315/227/2/022009.
- [19] Arman Sani u. c. „Measuring the commercial solar panel performance”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 420 (2018), lpp. 012051. doi: 10.1088/1757-899x/420/1/012051. URL: <https://doi.org/10.1088%2F1757-899x%2F420%2F1%2F012051>.
- [20] Energy balance. Tehn. ziņ. Fronius International GmbH, 2019.

PIELIKUMS

.1. Autora rezultātu dalība konferencēs

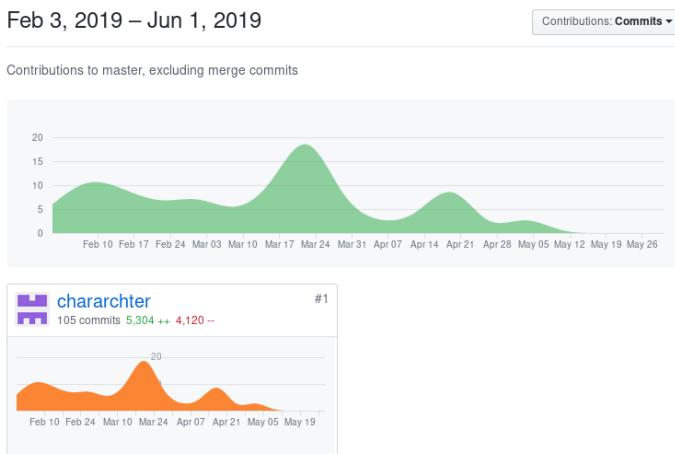
- Zinātniski praktisks seminārs ”Ceļā uz gandrīz nulles enerģijas ēkām (gNEĒ) Latvijā”. *LU eksperimentālā poligona monitoringa jaunumi: energoefektivitāte un solārā energēja.* Rīga, Latvija, 2019.g. 11. aprīlis (prezentācija).
- 7th European conference on renewable energy systems. *The role of solar panel arrangement on their efficiency in typical for Latvia weather conditions.* 2019. g. 10.–12. jūnijs, Madride (prezentācija).

.2. Autora ieguldījums darbā

Saules paneļu uzstādīšanu veica SIA EG Inženieri Valda Gailīša vadībā. Par datu ievākšanu no saules paneļu sistēmas datu uzkrājējiem jāpateicas Victron Energy B.V.

Mans ieguldījums ir 100% darba koda rakstīšanā un uzturēšanā līdz šim brīdim. Esmu absolūti vienīgais koda bāzes izstrādātājs. Darbā kopā veikti 318 iesūtījumi (*commits*) trīs zaros (105, 123 un 90 iesūtījumi attiecīgi), kas rezultējās 3140 koda rindās.

Darba gaitā veicu datu lejupielādi, datu informācijas aptveršanu, kā arī datu programmatisku atlasīšanu, apstrādi, apkopošanu, transformēšanu vizualizācijas vajadzību pielāgošanai un datu vizualizāciju.



.17. att. Darba autores ieguldījums master zarā.

Bakalaura darbs „**Saules paneļu efektivitāte Latvijas klimatā**” izstrādāts Latvijas Universitātes **Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultāte**.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: _____ /author/

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr. Phys. Andris Jakovičs _____ .

Recenzents: Dr. Phys. Aivars Vembris

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā .

Dekāna pilnvarotā persona: _____

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

_____.2019. prot. Nr. _____, vērtējums _____

Komisijas sekretārs: _____