

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS
FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

SAULES PANEĻU EFEKTIVITĀTE LATVIJAS KLIMATĀ

BAKALaura DARBS

Autors: **Viktorija Leimane**

Studenta apliecības Nr.: vl16047

Darba vadītājs: Dr. Phys. Andris Jakovičs

RĪGA 2019

ANOTĀCIJA

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

1. solāro paneļu tips
2. telpiskā orientācija
3. gada mēnesis
4. meteoroloģiskie apstākļi.

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

Atslēgas vārdi: Saules enerģijas paneļi, atjaunojamo energoresursu enerģija

ABSTRACT

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

1. type of solar panels
2. spatial orientation
3. month of year
4. meteorological conditions.

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.

Keywords: Solar panels, renewable energy

SATURS

| | |
|---|----|
| APZĪMĒJUMU SARAKSTS | 4 |
| IEVADS | 5 |
| 1 LITERATŪRAS APSKATS | 7 |
| 1.1 Saules apstarojums..... | 7 |
| 1.2 Saules diennakts kustība | 14 |
| 1.3 Klimats Latvijā..... | 17 |
| 1.4 Saules paneļi | 19 |
| 1.4.1 Paneļu veidi | 20 |
| 2 REZULTĀTI UN DISKUSIJA..... | 21 |
| 2.1 Saules apstarojums..... | 21 |
| 2.2 Saules paneļi | 24 |
| SECINĀJUMI | 32 |
| PATEICĪBAS | 33 |
| IZMANTOTĀ DARBA LITERATŪRA UN AVOTI | 34 |

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

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

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

PV - Saules fotoelements

PVOUT – Saules fotoelementa potenciālā jauda, kWh/kWp

GHI – Globālais horizontālais apstarojums, kWh/m^2

DIF – Difūzais horizontālais apstarojums kWh/m^2

GTI – Globālais apstarojums virsmai optimālā slīpumā, kWh/m^2

OPTA – Optimālais slīpums enerģijas ieguves maksimizēšanai gada griezumā, $^{\circ}$

DNI – Direct normal irradiation, kWh/m^2

DSR - Direct solar radiation

AU - astronomical unit, astronomiskā vienība

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 enerģijas īpatsvars līdz 2030. gadam [3].

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 [3].

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 patērētājiem, piemēram, rakstā [6] norādīts, ka silīcija saules paneļu cena sastāda mazāk nekā 30% no kopējām saules paneļu sistēmas uzstādīšanas izmaksām un to saražotā enerģija atmaksājas vidēji trīs gadu periodā.

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 (13, 40, 90) paneļu grupas – un tiek salīdzināta to piemērotība Latvijas klimatiskajiem apstākļiem.

Darba uzdevumi

- Ievākt, atlasīt un analizēt saules paneļu datus.
- Izveidot iespējami automatizētu datu apstrādes sistēmu R valodā ilgtermiņa monitoringa vajadzībām.
- Salīdzināt paneļu efektivitāti mēnešu un gada laikā atbilstoši to parametru (paneļu tipa un telpiskās orientācijas) apakšklasēm.
- Novērtēt datu kvalitāti no fizikālo apsvērumu un citu 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 saules paneļu konkrētās instalācijas LU Botāniskajā dārzā parametru raksturojums. Trešajā 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

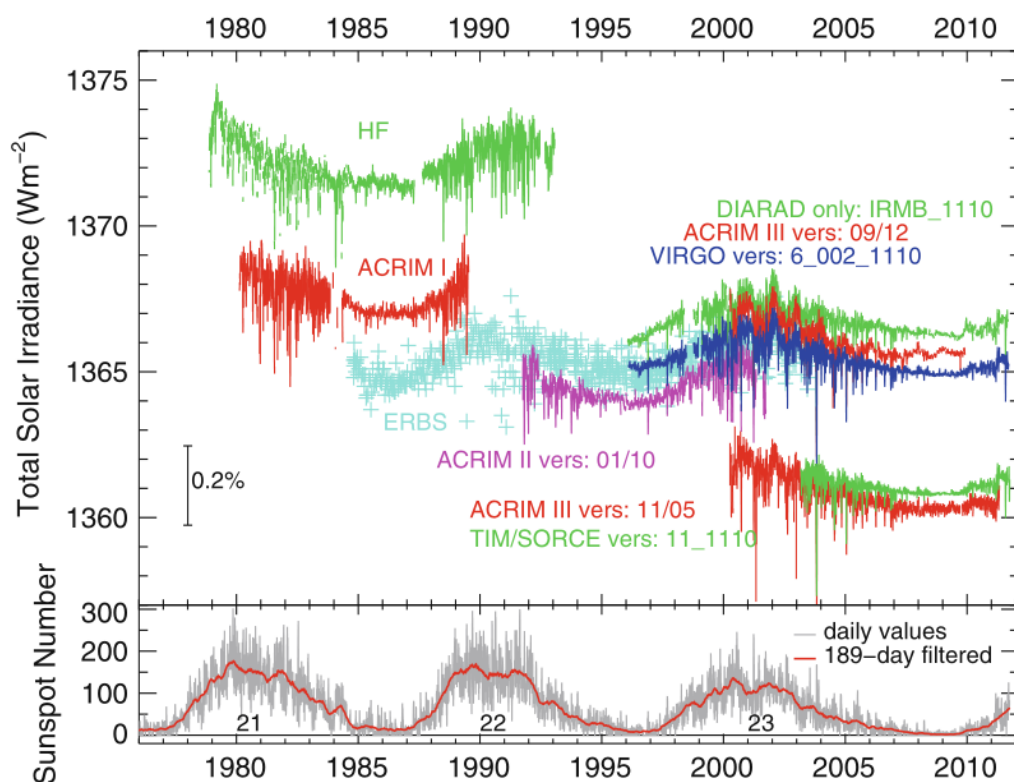
Lielākā daļa Saules emitētās enerģijas tiek saražota kodolreakcijās fotosfērā. Kopējais saules apstarojums (*Total Solar Irradiance* – TSI) raksturo Saules starojuma absolūto intensitāti, enerģiju uz virsmas perpendikulāri starojuma izplatīšanas virzienam 1 AU attālumā no Saules, integrēta visā saules 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 klāstēros vai grupās izraisītos tumšos plankums uz Saules fotosfēras; Saules plankumu skaitlis ir atkarīgs no individuālu Saules plankumu un to grupu skaita [1].

TSI norāda uz solārās radiācijas izmaiņām, kas ietekmē saņemto solārās enerģijas apjomu, kas nonāk Zemes atmosfēras augšējos slāņos. Papildus ir noderīgi zināt saņemtā starojuma spektrālo sadalījumu (*Spectral Solar Irradiance* – SSI) – 1.2. att. redzams, ka aptuveni puse starojuma tiek saņemta salīdzinoši mazu viļņu garumu - 380 – 780 nm diapazonā, kas padara iespējumu no tā iegūt enerģiju ar saules paneļu paņēmieni pēc formulām (1.1).

$$\nu \uparrow = \frac{c}{\lambda \downarrow} \quad E \uparrow = h\nu \uparrow \quad (1.1)$$

TSI novērojumi no kosmosa tiek veikti kopš 1978. gada (skat. tab. 1.1.) un instrumentu specifika dēļ iegūtas dažādas absolūtās vērtības, 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 guvis konsensu solārā apstarojuma pētnieku kopienā (skat. att. 1.1.).

Par labāko Saules apstarojuma mērījumu reprezentāciju tiek uzskatīti 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 $0.014 \text{ Wm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ un precizitāte ar 0.48 Wm^{-2} [5] – dēļ, tāpēc šajā darbā grafiki balstās uz šiem mērījumiem, pēc kuriem absolūtā kopējā saules apstarojuma vērtība ir $1360.8 \pm 0.5 \text{ Wm}^{-2}$ [4].

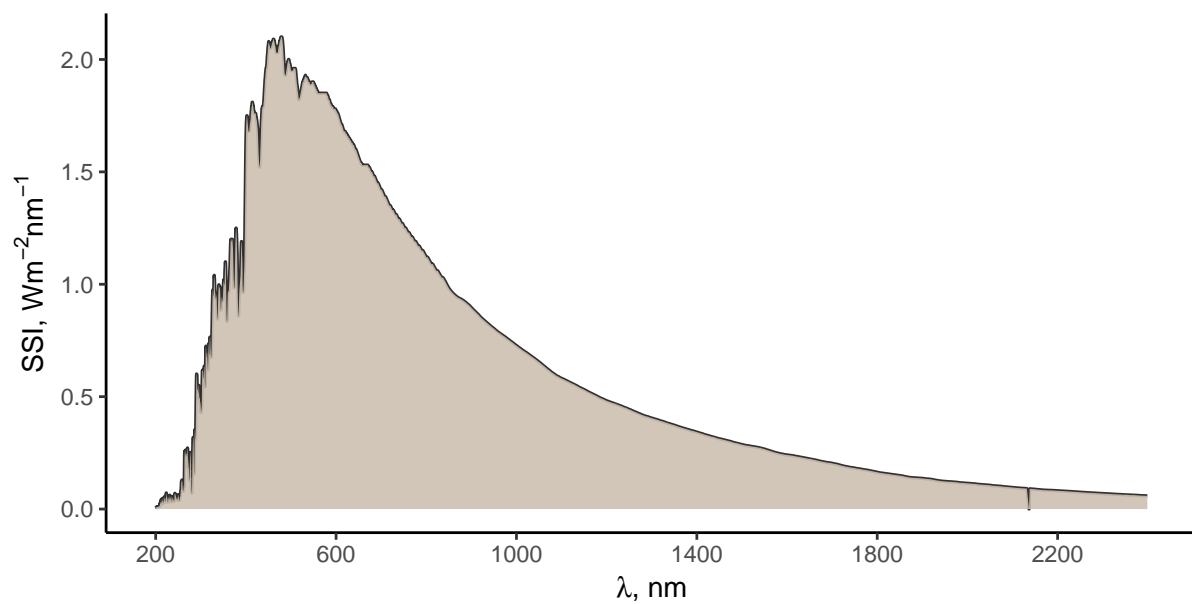


1.1. att. Salīdzinājums dienā vidējotiem saules kopējā apstarojuma datiem no dažādām kosmiskajām misijām un Saules plankuma skaitlis, lai ilustrētu solārās aktivitātes variabilitāti trīs ciklos [4].

1.1. tabula

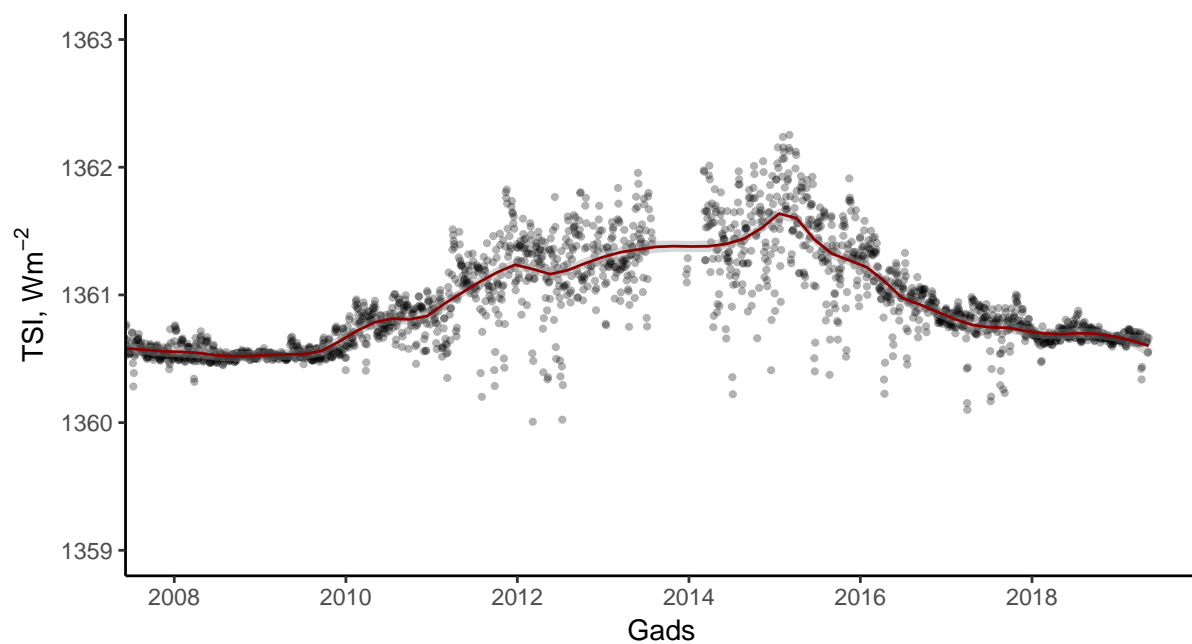
TSI mērījumu vēsture

| Radiometrs | Misija | Darbības laiks |
|----------------|---|----------------|
| Hickey-Frieden | NIMBUS-7 | 1978–1992 |
| ACRIM I | Solārā Maksimuma Misija (SMM) | 1980–1989 |
| ACRIM | Zemes Radiācijas Budžeta Satelīts (ERBS) | 1984–2003 |
| ACRIM II | Augšējās Atmosfēras Izpētes Satelīts (UARS) | 1991–2001 |
| VIRGO | Solārā un Heliosfēras observatorija (SOHO) | 1996–pašlaik |
| ACRIM III | ACRIMSAT | 2000–pašlaik |
| TIM | Saules Radiācijas un Klimata Eksperiments (SORCE) | 2003–pašlaik |

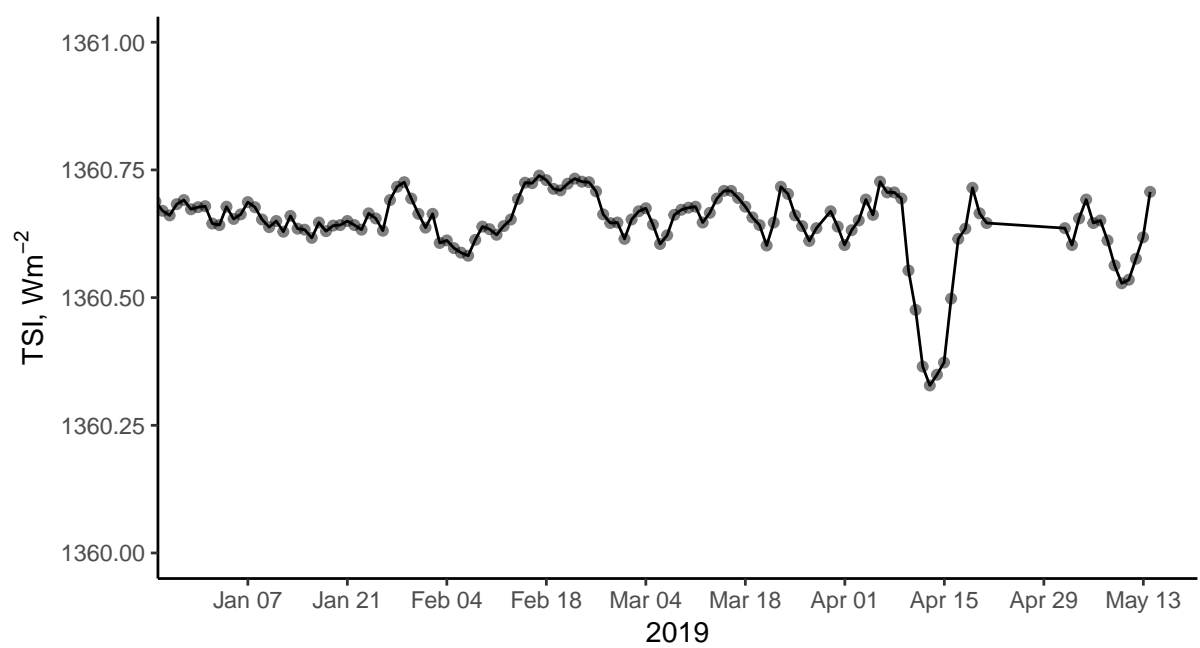


2019-01-13

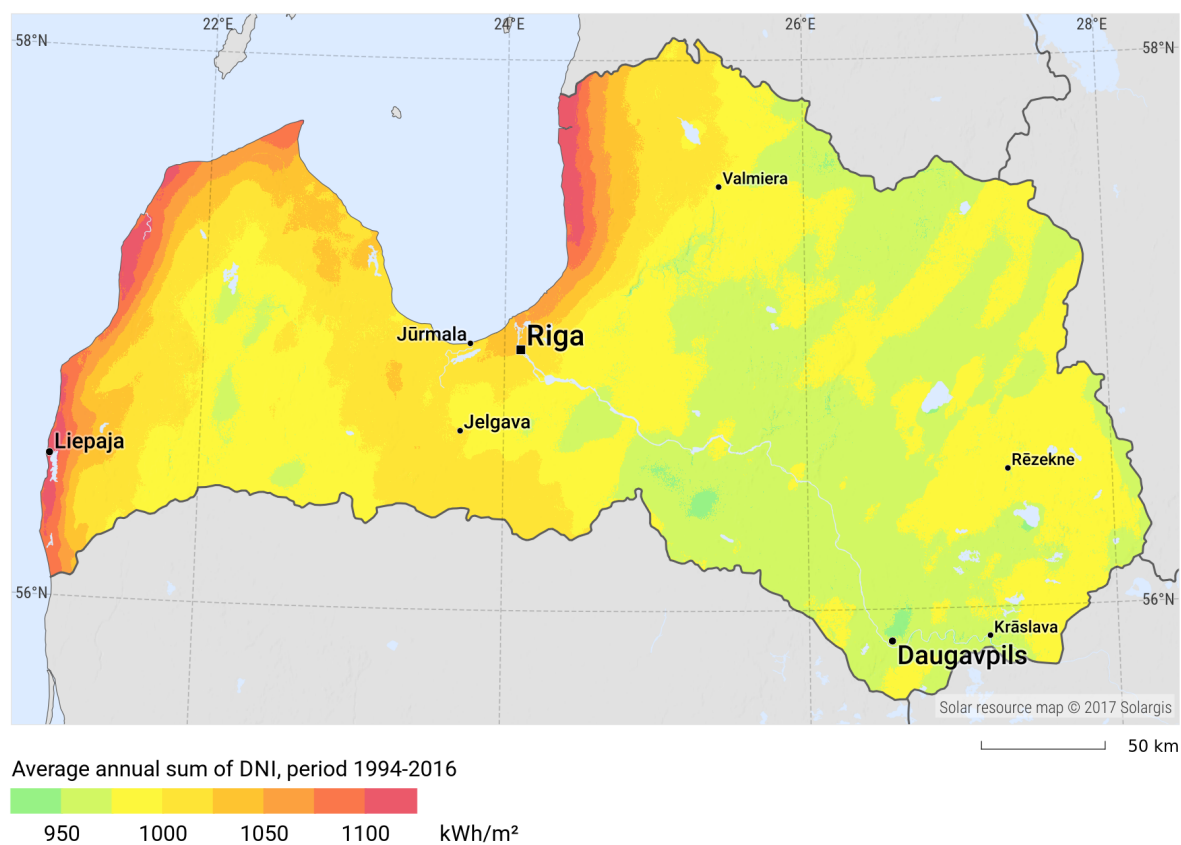
1.2. att. SSI 1AU attālumā (24 h vidējā vērtība) [10].



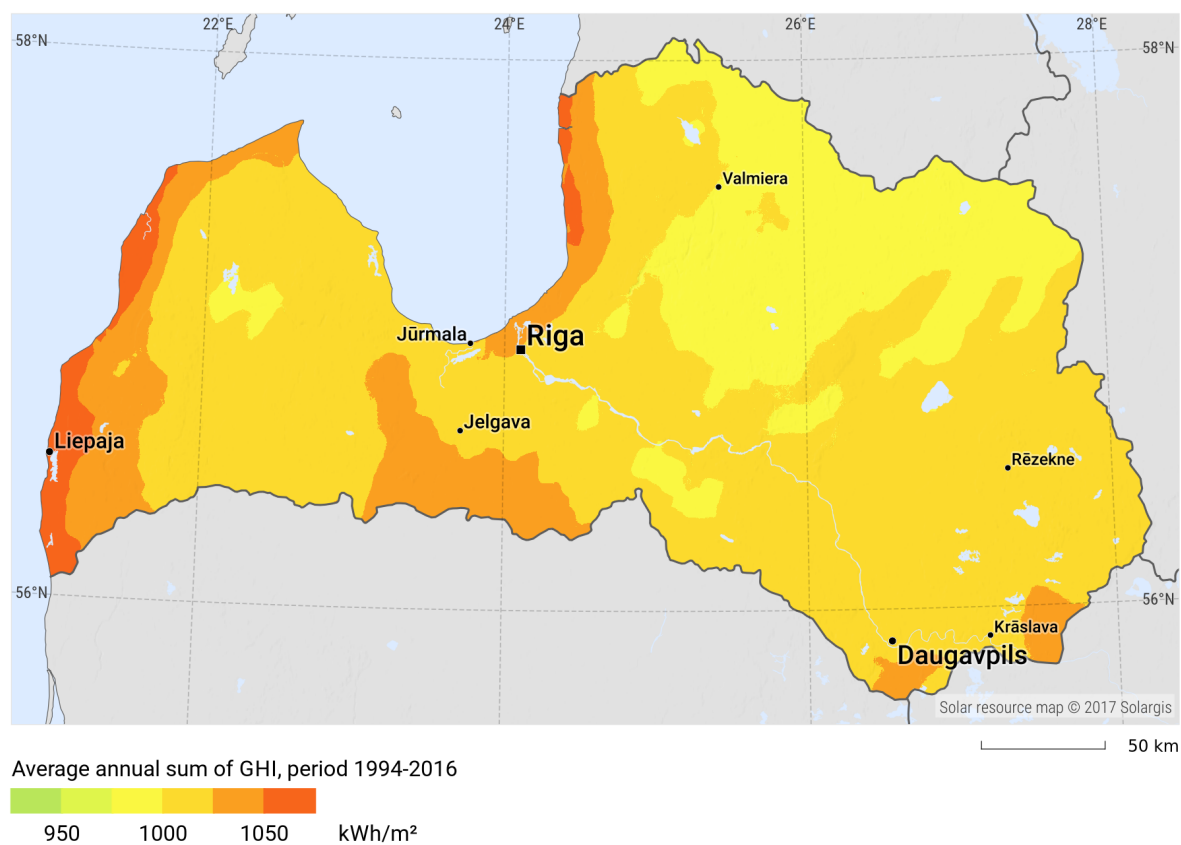
1.3. att. TSI 24. saules ciklā 1AU attālumā (24 h vidējā vērtība)[5].



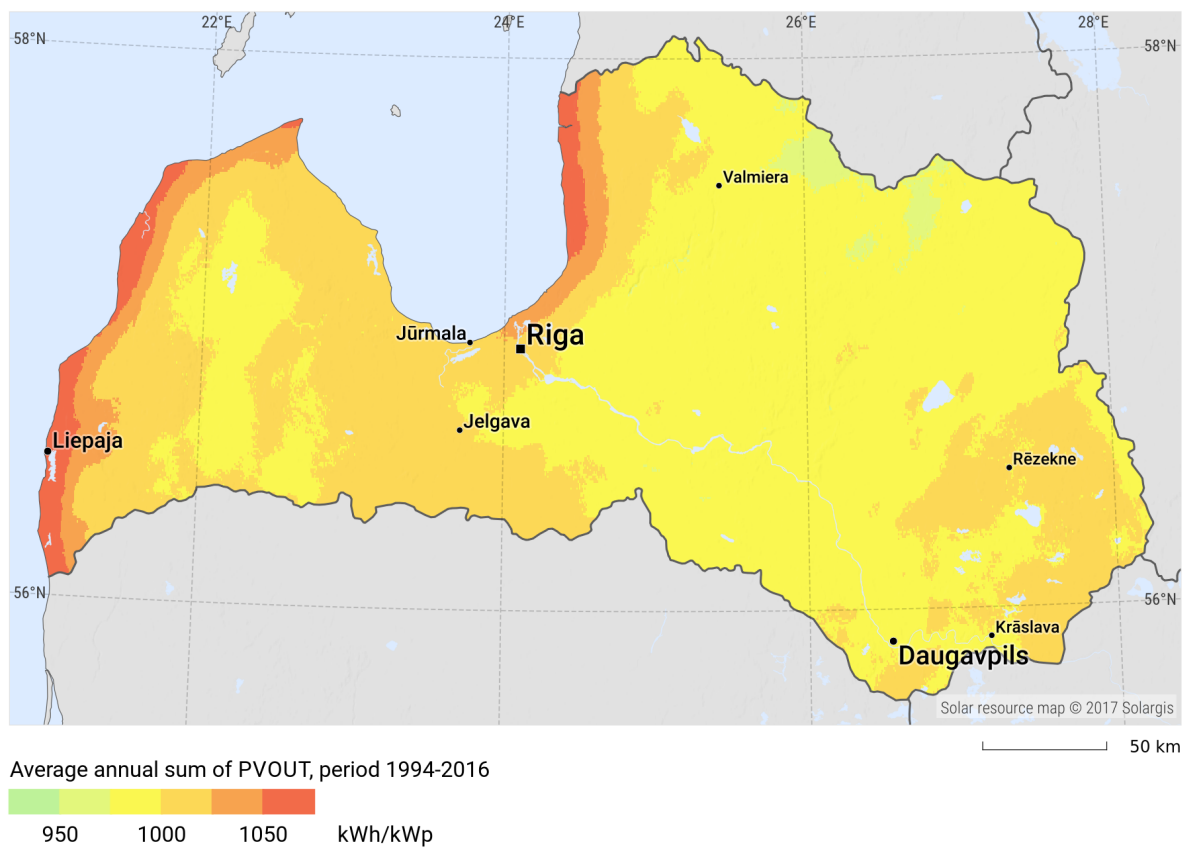
1.4. att. TSI izmaiņas solāro paneļu datu ieguves laikā 1AU attālumā (24 h vidējā vērtība)[5].



1.5. att. Tiešais normālais apstarojums [11]



1.6. att. Globālais horizontālais apstarojums Latvijā [11]



1.7. att. PV potenciālā jauda [11]

1.2. Saules diennakts kustība

Ģeometriskās attiecības 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 $\theta > 90^\circ$, t.i., Saules stari krīt uz paneļa apakšējo virsmu) pēc formulas (1.2). Saules diennakts kustība, gadalaiku cikls, kā arī saules paneļa novietojums ir ievēroti izteiksmē, kas ļauj aprēķināt $\cos \theta$ [1]:

$$E = I \cdot \cos(\theta) \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega, \end{aligned} \quad (1.3)$$

kur lietoti leņķi, kas definēti 1.2 tabulā. Saules deklināciju solārajā pusdienlaikā var aprēķināt pēc formulas

$$\delta = 23 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right), \quad (1.4)$$

kur n ir dienas kārtas numurs gadā.

Ar vienādojumu (1.3) un (1.4) palīdzību ir iespējams aprēķināt $\cos \theta$ laika atkarības, kas ir pirmais tuvinājums Saules apstarojuma izmaiņām dienas laikā. Parametru vērtības katram no darbā lietotajiem Saules paneļiem ir apkopotas 1.3. tabulā. Lietojot šos parametrus, tika aprēķinātas $\cos \theta$ atkarības no laika diviem datumiem: 1. janvārim un 30. aprīlim (skat. 1.8. att.). No tā secināms, ka austrumu virzienā uzstādītais panelis saņem vairāk apstarojuma no rīta nekā rietumu virzienā vērsta panelis. Pēc šī aprēķina iespējams prognozēt paneļu saražotās enerģijas izmaiņas gada griezumā, piemēram, no dienviņu paneļiem janvārī efektīvākais 90° leņķī vērsta, jo Saule atrodas zemu pie horizonta, bet aprīlī efektīvākais ir 40° leņķi.

1.2. tabula

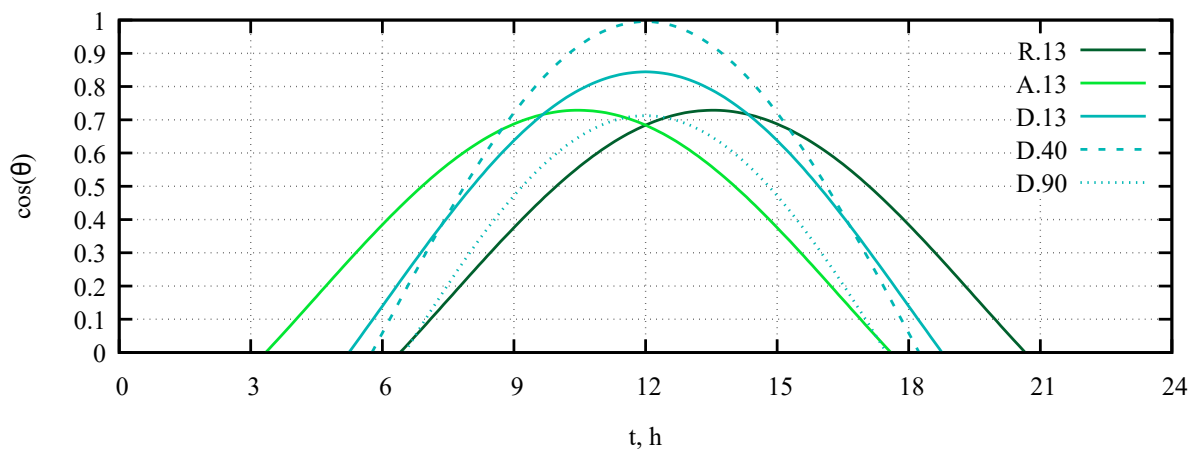
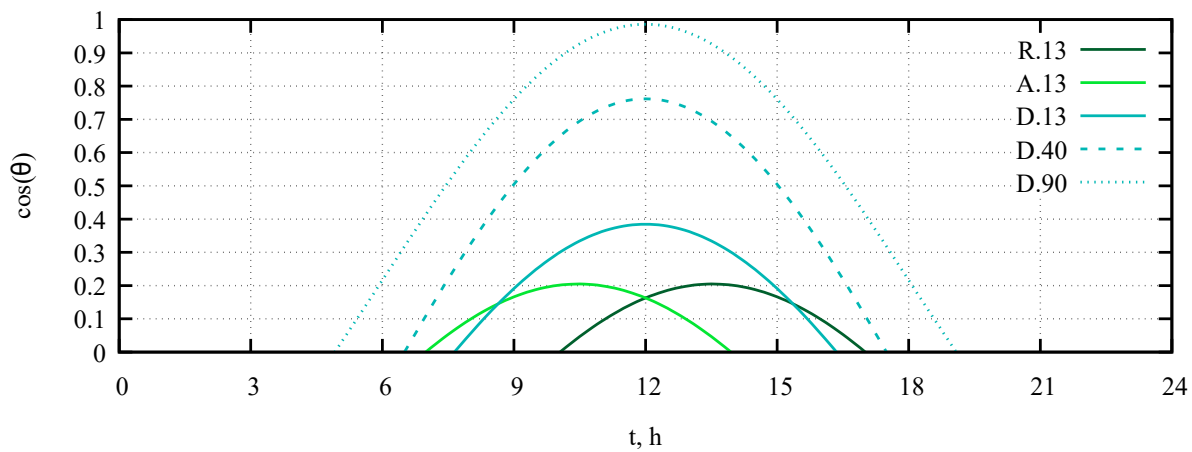
Leņķu, kas lietoti (1.3) vienādojumā, definīcijas.

| | apgabals | definīcija |
|----------|---------------------------|---|
| θ | $(0^\circ; 180^\circ)$ | staru krišanas leņķis uz Saules paneli |
| δ | $(-23^\circ; 23^\circ)$ | Saules deklinācija — leņķis starp virzieniem uz Sauli un uz debess ekvatoru solārajā pusdienlaikā, pozitīvs Z virzienā |
| ϕ | $(-90^\circ; 90^\circ)$ | ģeogrāfiskais platums, pozitīvs Z virzienā |
| β | $(0^\circ; 180^\circ)$ | paneļa slīpums — leņķis starp Saules paneļa virsmu un horizontāli |
| γ | $(-180^\circ; 180^\circ)$ | paneļa azimuts — leņķis starp virsmas normāles projekciju uz horizontālu plakni un D virzienu, negatīvs A virzienā |
| ω | $(-180^\circ; 180^\circ)$ | 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 |

1.3. tabula

Darbā lietotajiem Saules paneļiem atbilstošās leņķisko parametru vērtības, grādos.

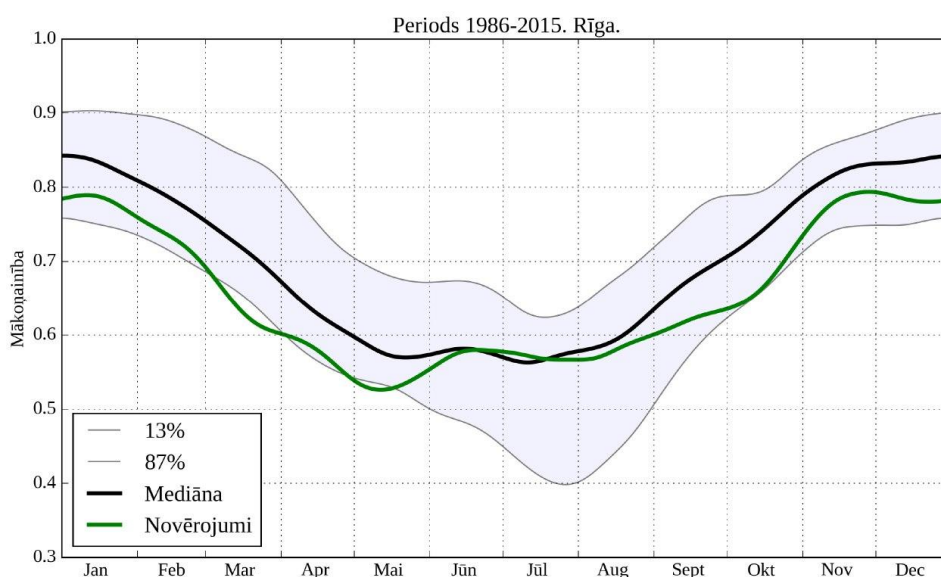
| | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| | R.13 | A.13 | D.13 | D.40 | D.90 |
| paneļa slīpums β | 13 | | | 40 | 90 |
| paneļa azimuts γ | 90 | -90 | 0 | | |
| ģeogrāfiskais platums ϕ | 57 | | | | |



1.8. att. Diennakts laikā paredzētas $\cos(\theta)$ vērtības darbā lietotajiem Saules paneļiem, aprēķinātas pēc (1.3) izteiksmes 1. janvārim (augšā) un 30. aprīlim (apakšā).

1.3. Klimats Latvijā

Saskaņā ar LU VTPMML klimatisko datu apkopojumu, kas parādīts 1.9. 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.

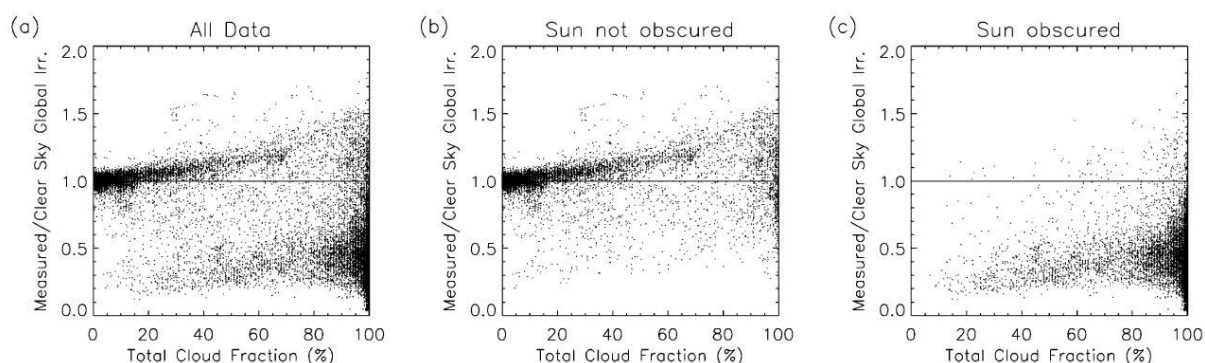


1.9. att. Vidējā mākoņainība Rīgā gada laikā, vidējota pa 20 gadu periodu [8].

Mākoņu ietekme uz Saules apstarojumu ir komplicēta un atkarīga no dažādiem parametriem. Piemēram, pētījumā [9] tiek parādīts, ka dažreiz mākoņainība var pat nedaudz palielināt Saules apstarojumu. Šis šķietami kontraintuitīvais rezultāts izskaidrojams ar to, ka Saule nav nosepta pilnībā, un baltie mākoņi mēdz būt gaišāki nekā pašas debesis saulainā dienā (sk. 1.10.(b) attēlā), tādējādi DNI komponentes samazināšanās tiek kompensēta ar palielinātu gaismas izkliedi.

Savukārt gadījumos, kad mākoņi aizsedz Sauli (sk. 1.10.(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 enerģiju var uzskatīt par nelabvēlīgu. Tomēr pētījuma autori norāda, ka, 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.



1.10. att. Attiecība starp izmērīto apstarojumu un tīrās debess gadījuma apstarojumu (a) visiem datiem, (b) gadījumos ar neaizsegto Sauli un (c) gadījumos ar aizsegto Sauli [9].

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 1.4. 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.

1.4. tabula

CMF intervāls atkarībā no mākoņu tipa [7]

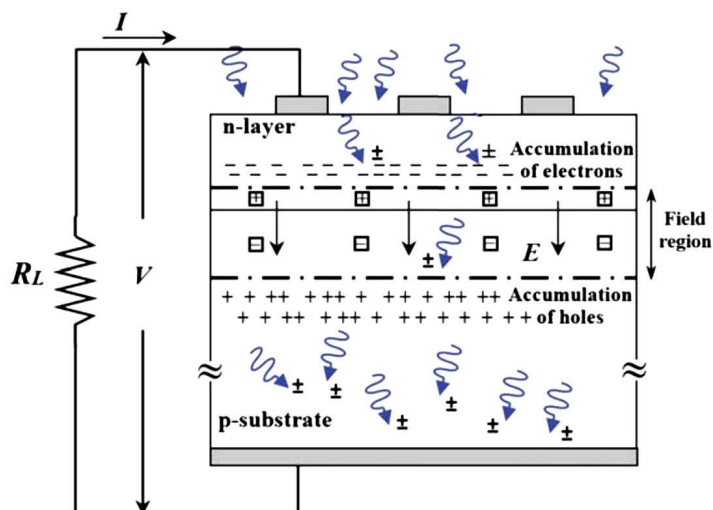
| | |
|--------------------|-------------|
| augstie gubumākoņi | < 0.7 |
| gubumākoņi | $0.2 - 1.3$ |
| spalvmākoņi | $0.6 - 1$ |

Mākoņu ietekmes uz Saules apstarojumu modelēšana ir ļoti sarežģīta. Mērījumi parāda, ka mākoņi absorbē par 25 W/m^2 vairāk gaismas, nekā teorētiski paredzams, un šī vērtība nevar būt izskaidrojama ar troposfēras aerosoliem [2].

1.4. Saules paneļi

Saules paneļi sastāv no fotoelementiem, kas pārveido gaismas enerģiju elektriskajā enerģijā. Fotoelements, kura uzbūves shēma ir parādīta 1.11. attēlā, ir p-n pāreja ar elektriskiem kontaktiem, kas pieslēgti pie lādētāja vai citas enerģijas patērētāja. 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.

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 slāņiem, kura ir negatīvi lādēta rekombinācijas dēļ. Negatīvi lādētā (no p-tipa pusvadītāja puses) robeža rada potenciālu starpību, kas veicina elektronu kustību pa vadiem uz patērētāju, tādā veidā radot elektrisko strāvu.



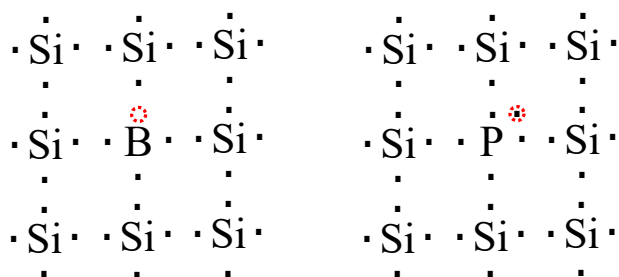
1.11. att. Saules paneļa shēma. Tas sastāv no fotoelementiem, kuru augšējais slānis veidots no p-tipa pusvadītāja, bet apakšējais — no n-tipa pusvadītāja.

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 1.12. 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 līniju. 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.

Ja silīcija kristālam pievieno fosfora atomus, izveidojas pretēja situācija — pie P atoma parādās elektrons, kas nepiedalās saites veidošanā (sk. att. 1.12., 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, un šādus pusvadītājus sauc par n-tipa pusvadītājiem.

Dopējot divus blakus esošus Si kristāla apgabali dažādā veidā, iegūst p-n pāreju. Uz robežas starp apgabaliem elektroni no n-tipa apgabala var difūzijas ceļā nokļūt uz p-tipa apgabalu un aizpildīt tos caurumus, kas atrodas pietiekami tuvu. To sauc arī par elektronu-caurumu rekombināciju. Tādā veidā p-tipa pusvadītāja mala uzlādējās negatīvi.



1.12. 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).

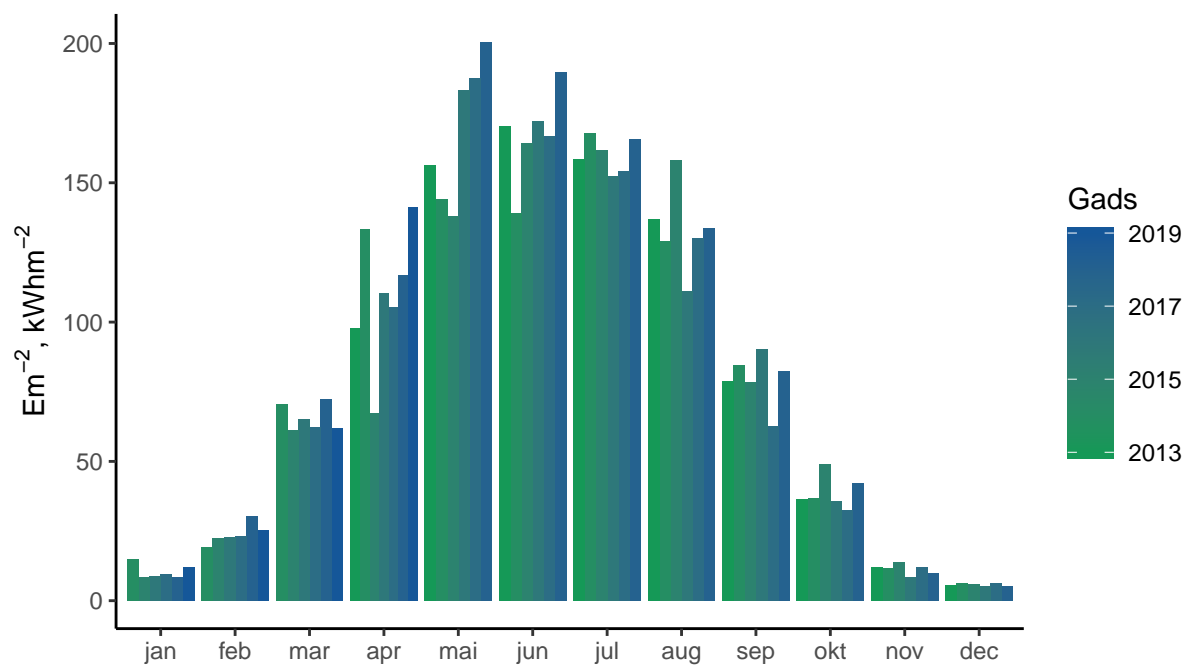
1.4.1. Paneļu veidi

Darbā ir apskatīti divi Saules paneļu veidi:

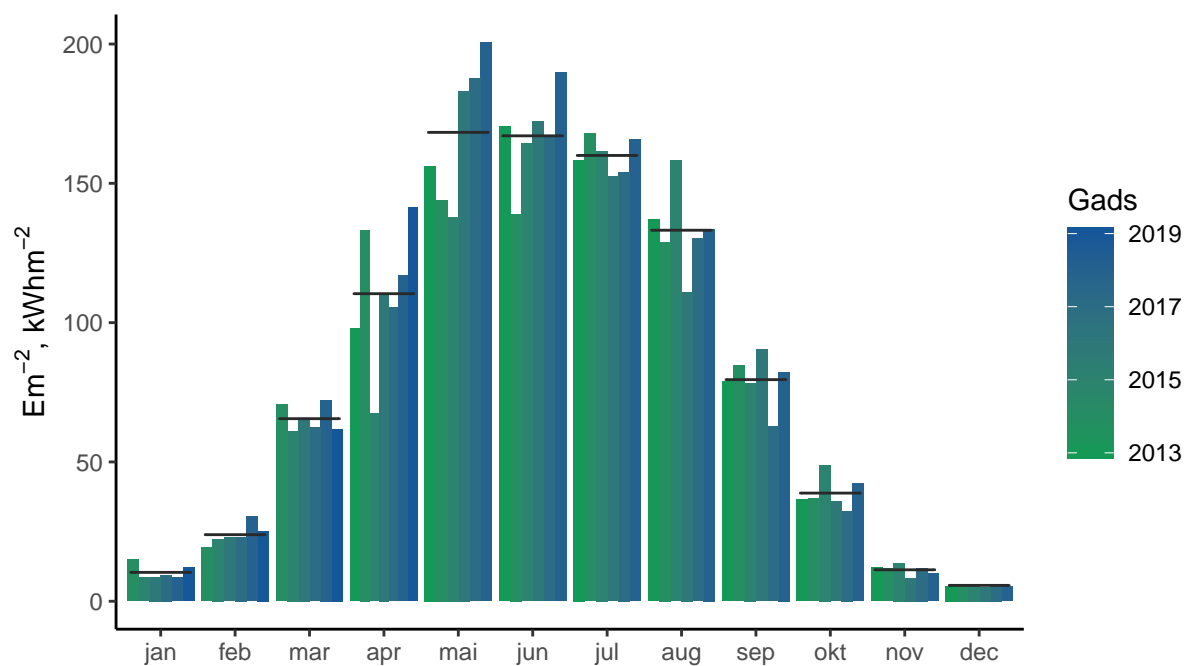
- LG
- JA

2. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

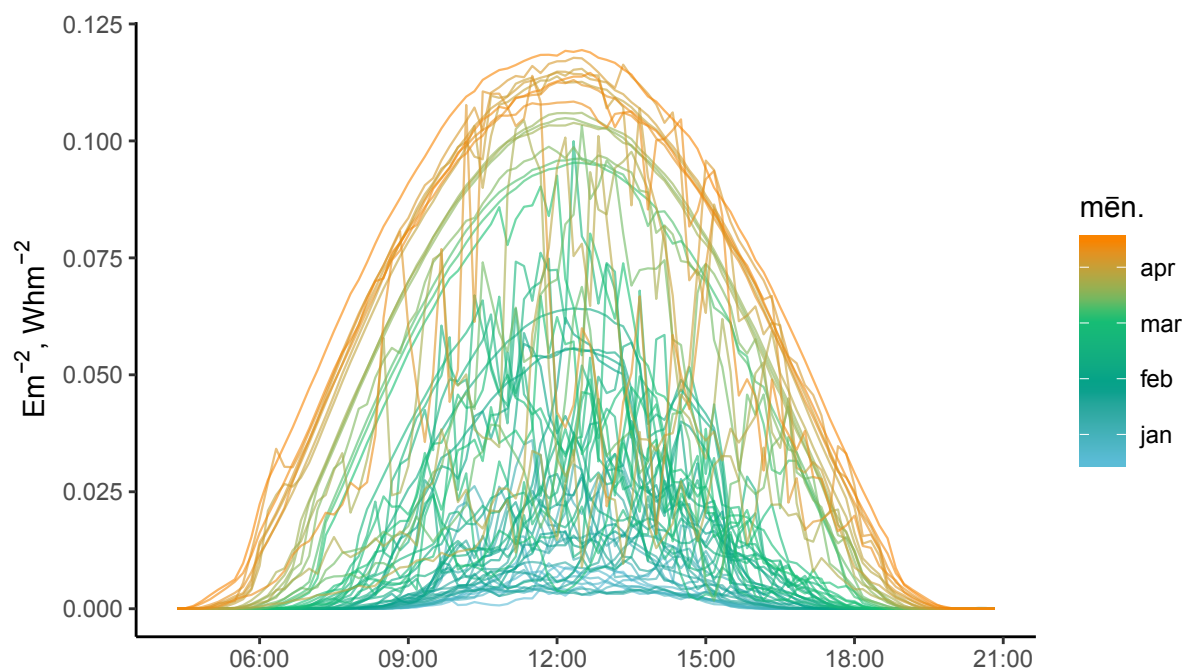
2.1. Saules apstarojums



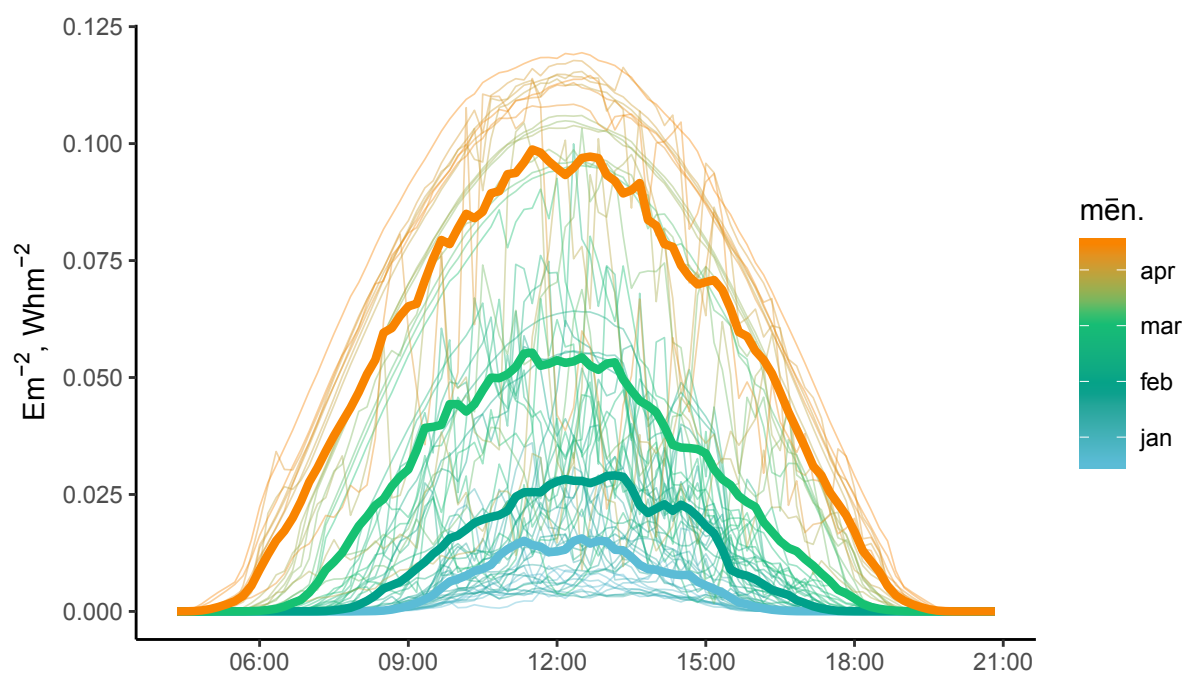
2.1. att. Solārā apstarojuma laika integrāļa atšķirības gada gaitā. Eksperimentālā poligona meteorostacijas stacijas dati 2013 – 2019 periodā.



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



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



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

2.2. Saules paneļi

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 |

2.2. 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 |

2.3. tabula

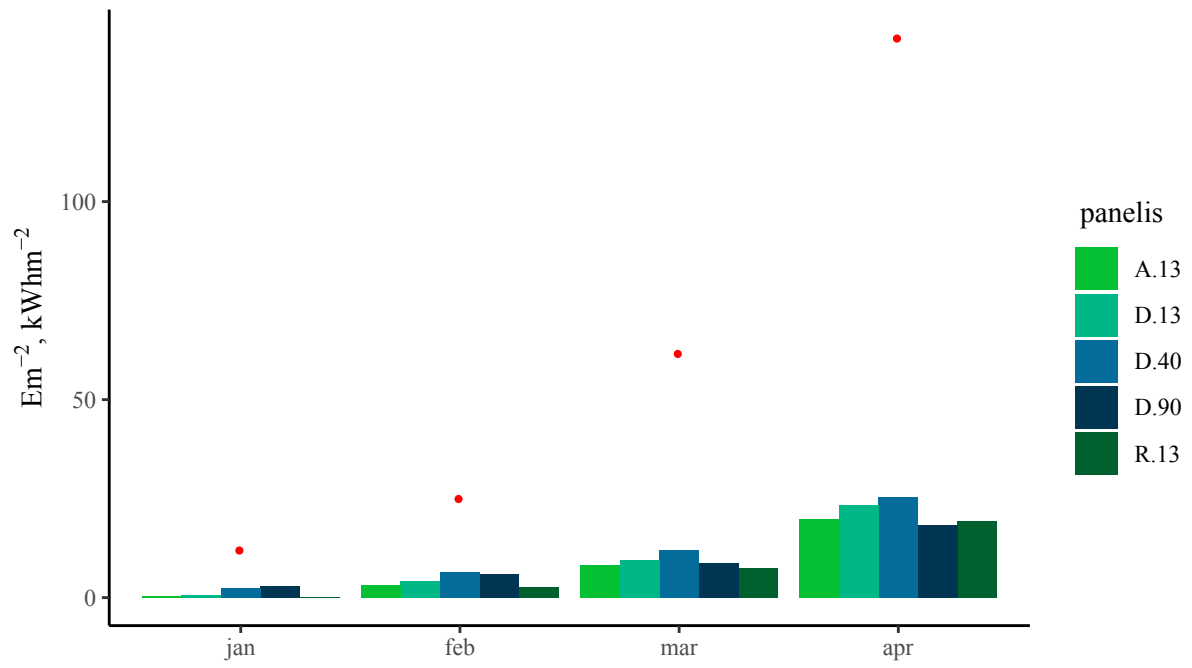
LG tipa paneļu saražotā enerģija uz kvadrātmetru

| 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 |

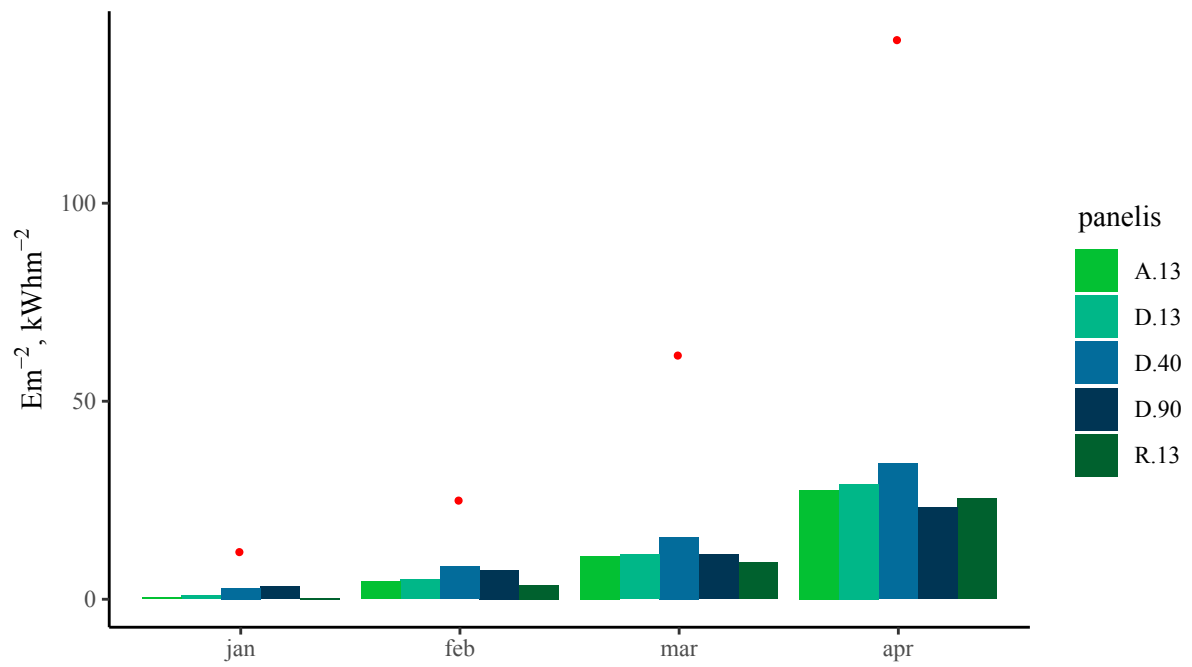
2.4. tabula

LG tipa paneļu efektivitāte procentos

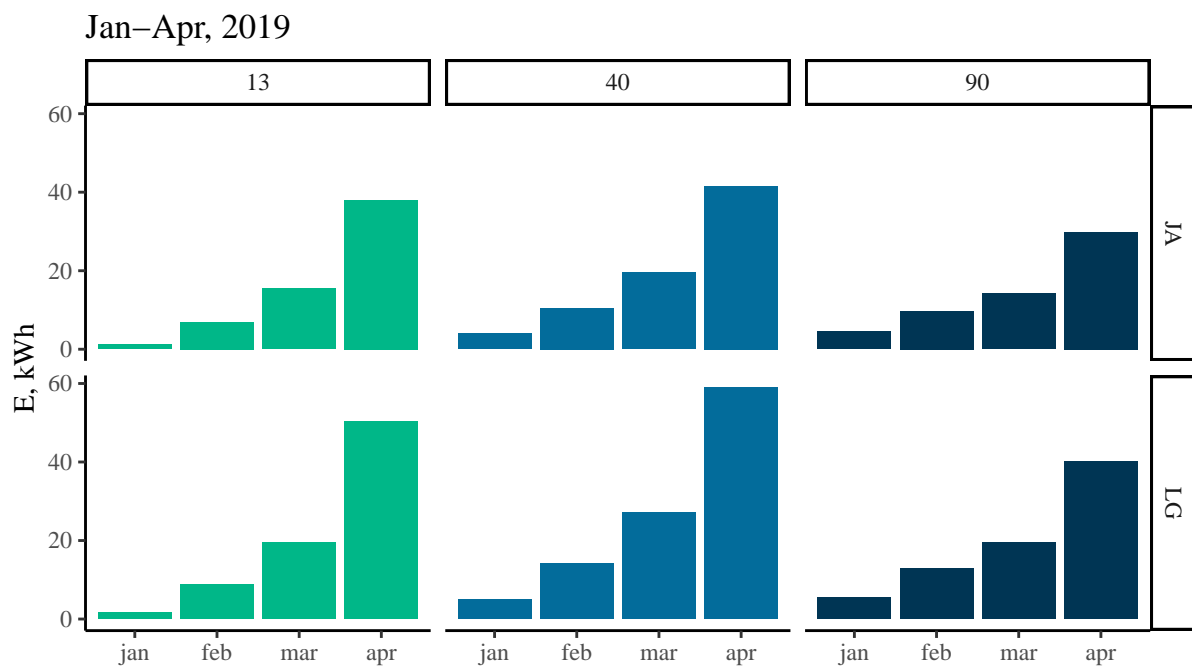
| E, % | A.13 | R.13 | D.13 | D.40 | D.90 |
|------|------|------|------|------|------|
| jan | 4.1 | 2.9 | 7.8 | 23.2 | 26.5 |
| feb | 17.6 | 14.4 | 20.1 | 32.8 | 29.5 |
| mar | 17.7 | 15.0 | 18.2 | 25.4 | 18.4 |
| apr | 19.5 | 18.0 | 20.6 | 24.2 | 16.4 |
| vid | 14.7 | 12.6 | 16.7 | 26.4 | 22.7 |



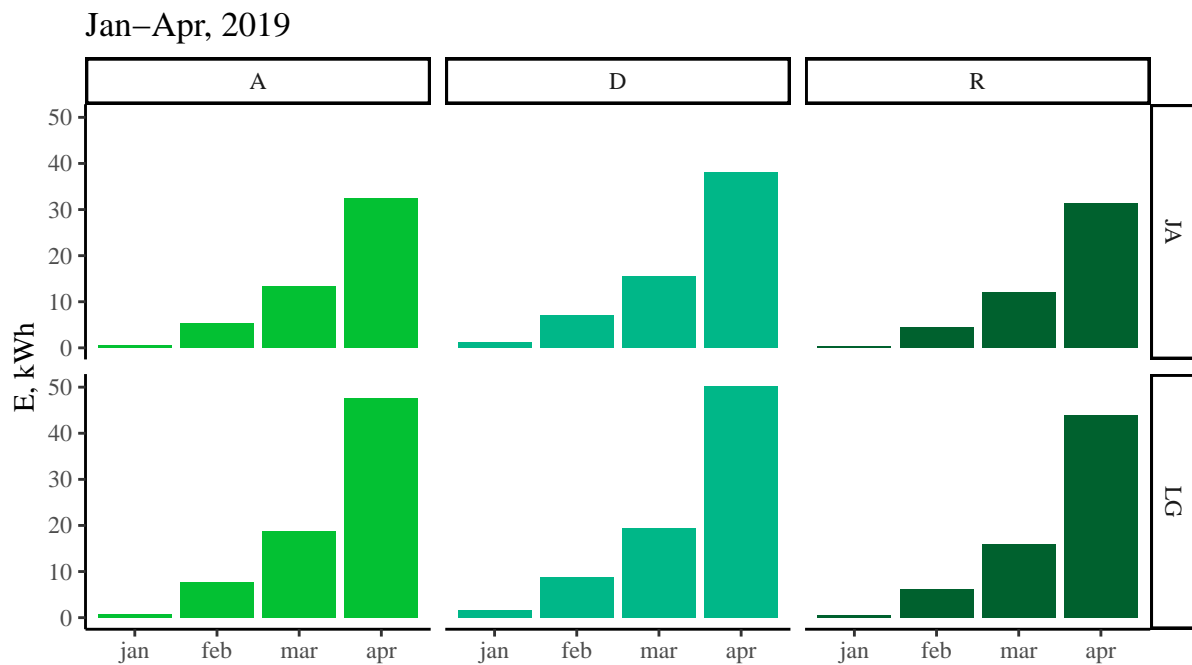
2.5. att. JA



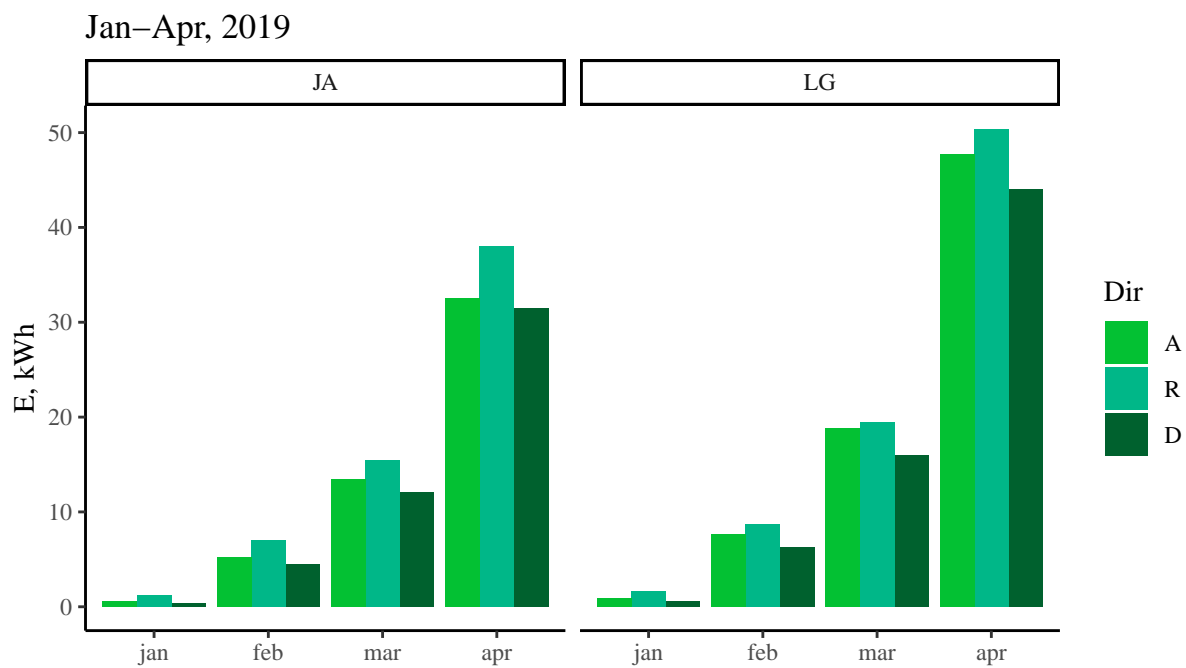
2.6. att. LG



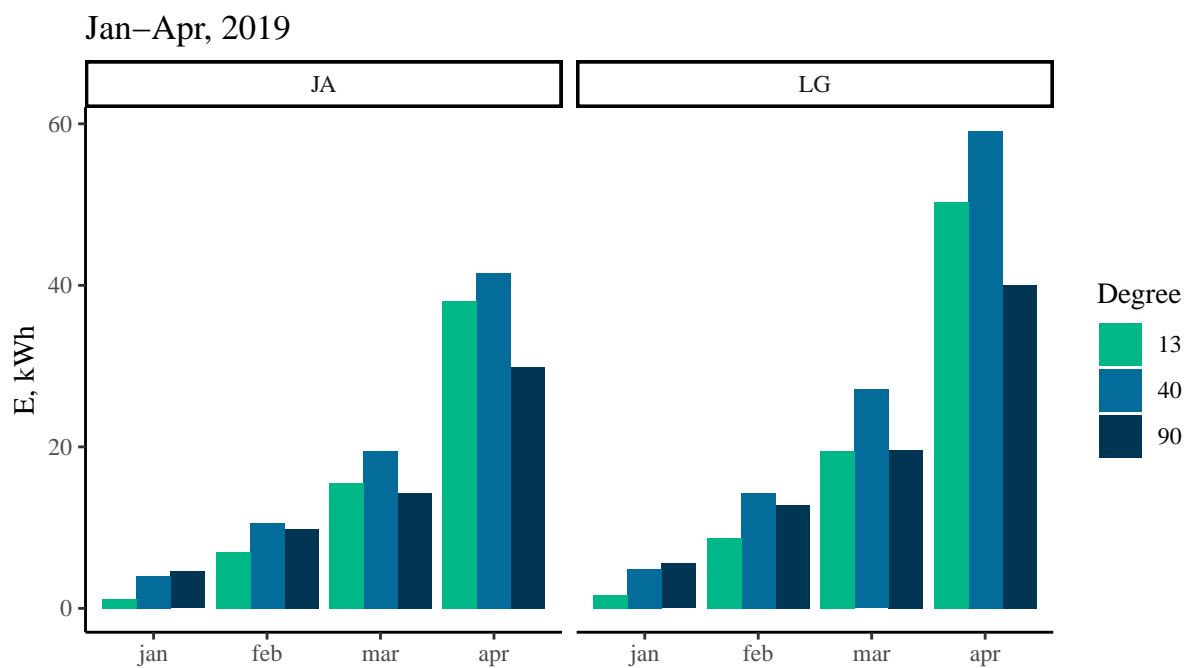
2.7. att. D virziena paneļu atkarība no lēnņa



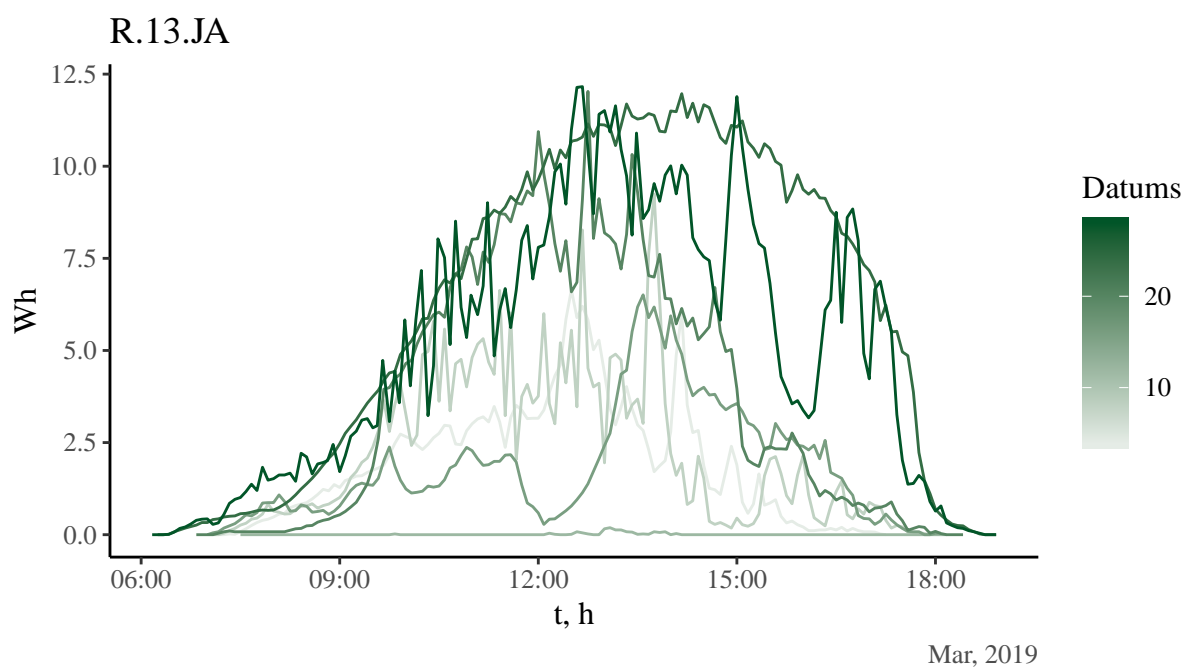
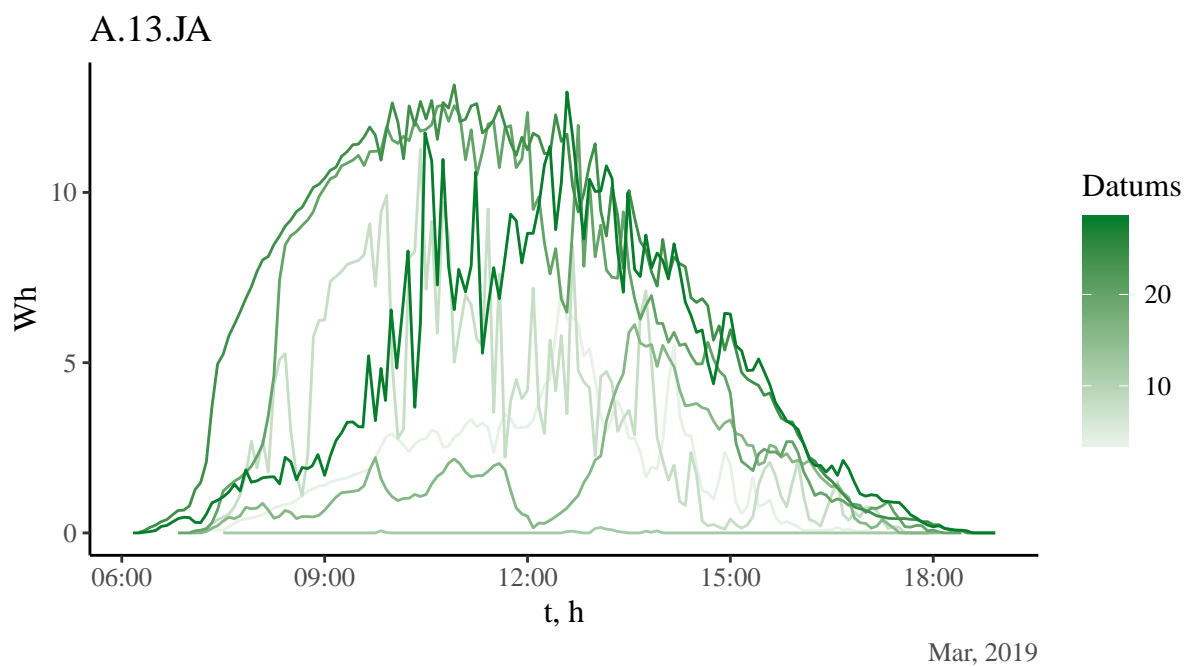
2.8. att. Paneļu ražīguma atkarība no virziena



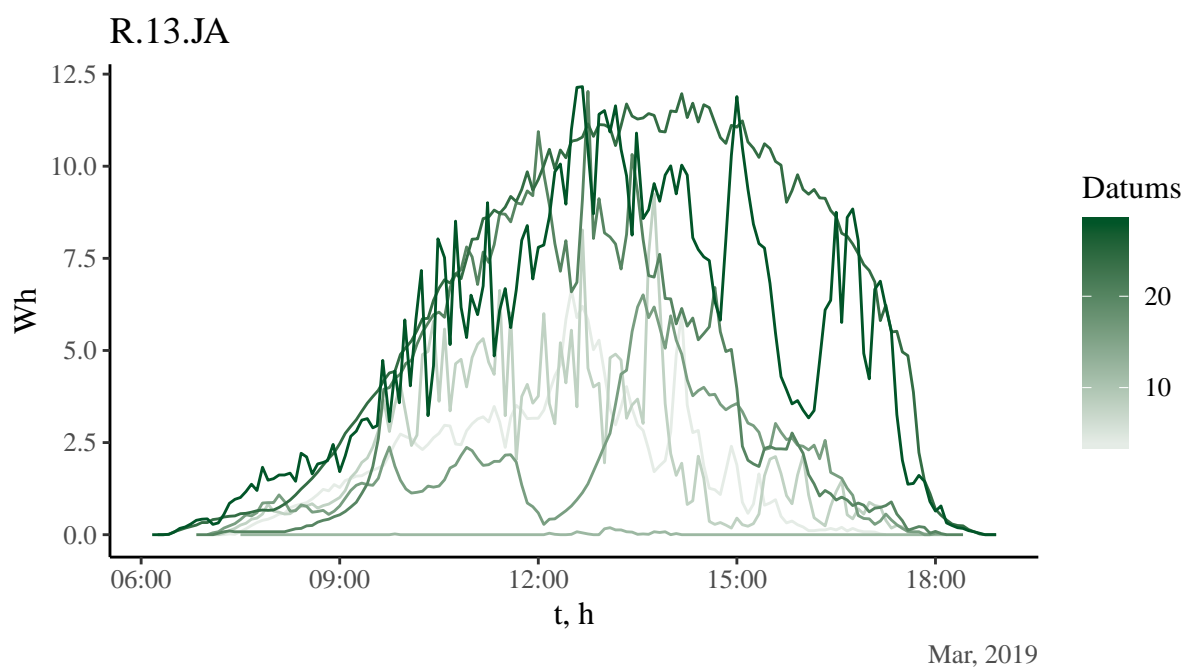
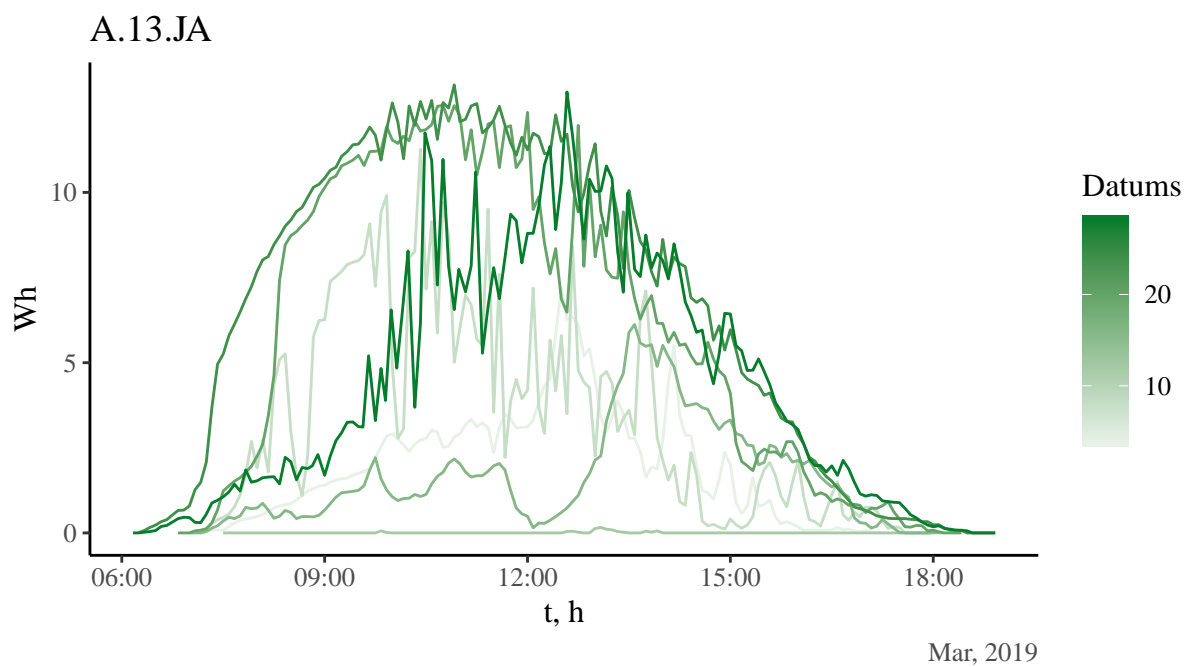
2.9. att. JA un LG atkarība no virziena



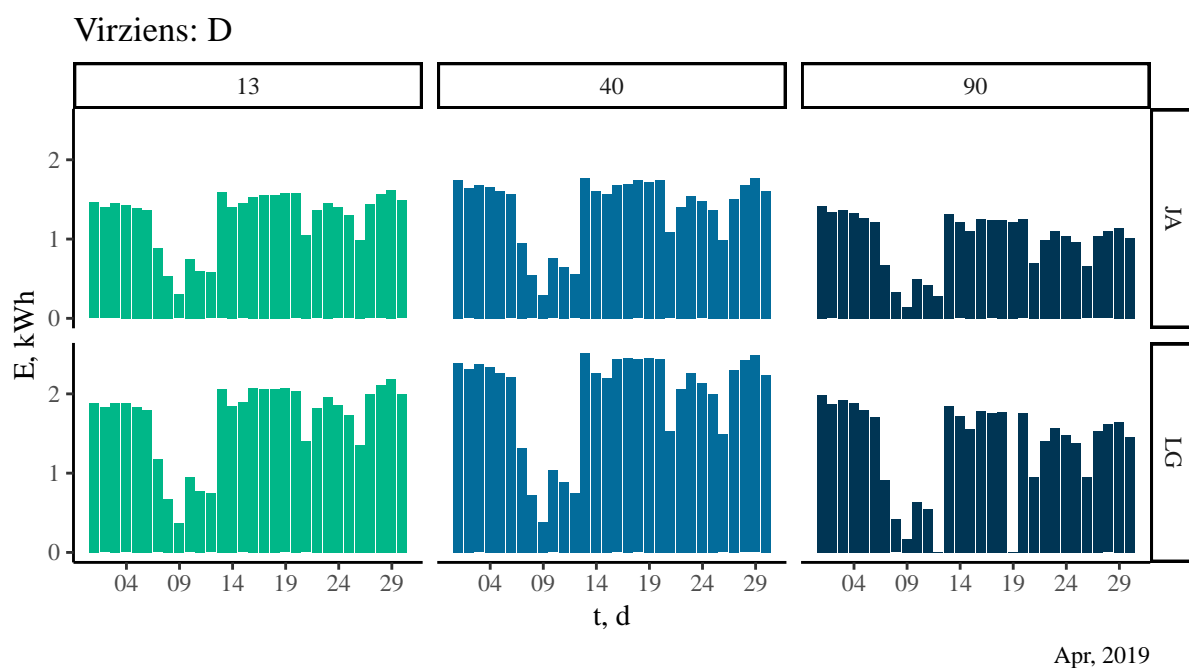
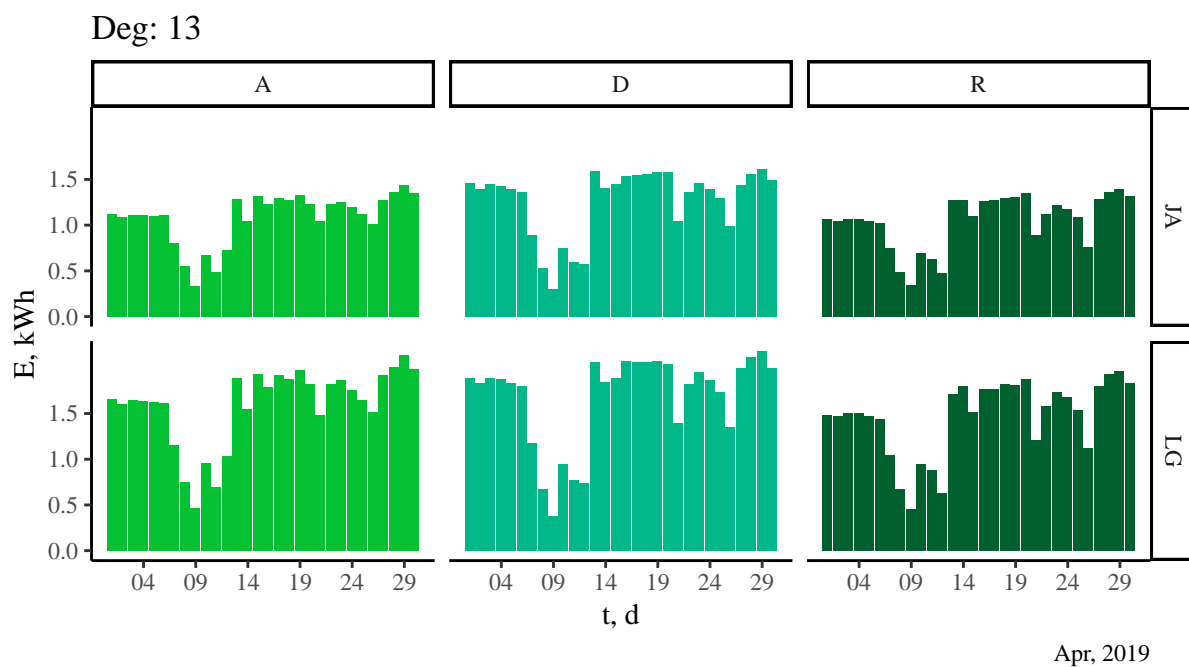
2.10. att. JA un LG atkarība no leņķa



2.11. att. A un R virzienu paneļu atšķirības februārī



2.12. att. A un R virzienu paneļu atšķirības martā



2.13. att. Leņķu un virzienu atšķirības aprīlī

SECINĀJUMI

PATEICĪBAS

Pateicos paroksetīnam, xanax, GNU/Linux, Pētera Draguna dzejas krājumam 'Tumšās stundas', Tarvi Verro for teaching me git, Valtam Krūmiņam un Annai Bulei par emocionālo atbalstu, Paulīnai Lodbrukai un Pēterim Ratniekam par ticību maniem spēkiem, Žeņam par kucēnu video, Solvitai par maģiju un Cilvēkam par pacietību. Paldies Aleksandrai Elbakjanai par sci-hub. Paldies "Puratos Latvia" un Asjas un Berndta Everts piemiņas fondam par stipendiju studiju laikā.

Darbs veikts ar Eiropas Reģionālās attīstības fonda 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 DARBA LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] John A. Duffie; William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. izdev. Wiley, 2013. ISBN: 9780470873663. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=84481e599cbcd1e3c70f82b3c1379d1c>.
- [2] R. D. Cess u. c. „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>.
- [3] *Direktīva (ES) 2018/2001 par no atjaunojamajiem energoresursiem iegūtās enerģijas 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>.
- [4] Claus 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] Greg 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] Nathan 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>.
- [7] María Laura López, Gustavo G. Palancar un Beatriz 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>.

- [8] NOSKAIDRO. *Mākoņainība Latvijā*. Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-26. Latvijas Universitātes Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija, NOSKAIDRO. URL: <http://www.modlab.lv/klimats/Parametri/cloud/Cloud.html>.
- [9] G. Pfister u. c. „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). URL: [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).
- [10] Erik 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/tsis/data/ssi-data/?doing_wp_cron=1558640803.1350839138031005859375.
- [11] Solargis. *Solar resource maps of Latvia*. Tehn. ziņ. Skatīts: 2019-05-20. World Bank Group, 2019. URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/latvia>.

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

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: _____