

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 šiem 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).

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)

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 the 40 degree angle of south direction. The study data analysis tool is available in <https://github.com/chararchter/solR>.

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	10
1.3 Mākoņainība Latvijā.....	13
2 SAULES PANELI	19
2.1 Darbības princips	19
2.2 Izmantošana pasaулē	20
3 SAULES PANELI LU BOTĀNISKAJĀ DĀRZĀ	23
3.1 Tipi.....	23
3.2 Elektriskā shēma	24
3.3 Telpiskās orientācijas.....	26
4 REZULTĀTI	31
4.1 Saules apstarojums.....	31
4.2 Efektivitātes atkarība no parametriem	33
4.2.1 Saules paneļa tipa.....	33
4.2.2 Saules paneļa leņķa.....	33
4.2.3 Saules paneļa virziena.....	33
4.2.4 Saules paneļa leņķa un virziena kombinācijas	34
4.2.5 Gada mēneša.....	35
4.3 Salīdzinošā analīze	42
4.4 Salīdzinājums ar citas saules panelu spēkstacijas mērījumu rezultātiem	43
SECINĀJUMI	45
PATEICĪBAS	46
IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI	47
PIELIKUMS	51

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

Klimats

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

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

TIM - Kopējā apstarojuma novērotājs

GHI – Globālais horizontālais apstarojums, kWh/m^2

DHI – Difūzais horizontālais apstarojums, kWh/m^2

DNI – Tiešais normālais apstarojums, kWh/m^2

CMF - Mākoņu modifikācijas reizinātājs

AU - astronomiskā vienība

Saules kustības leņķi

θ - staru krišanas leņķis uz saules paneli

δ - Saules deklinācija – leņķis starp virzieniem uz Sauli un debess ekvatoru solārajā pusdienlaikā.

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 horizontālo plakni un D virzienu.

ω - solārais stundu leņķis – leņķis starp Saules stara virziena projekciju uz horizontālo plakni un D virzienu; negatīvs no rīta.

Saules paneli

PV - fotoelektriskais elements

Si - silīcijs

P - jauda, W

P_{max} - maksimālā jauda, W

PVOUT – Saules fotoelementa potenciālā jauda, kWh/kWp

E_{norm} , kWh/m^2 - enerģija normēta uz saules paneļa laukuma vienību.

Debespuses

A - austrumi

R - rietumi

D - dienvidi

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 atjaunojamo energijas resursu - saules, vēja, ģeotermālo un 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 $\leq 30\%$ no kopējām saules paneļu sistēmas uzstādīšanas izmaksām un to saražotā enerģija atkarībā no atrašanās vietas un paneļa veida atmaksājas pēc ≥ 3 gadu perioda [2]. Tomēr bez klimata to efektivitāti ietekmē arī daudzi citi faktori, kas tiek analizēti šajā darbā, piemēram, saules paneļu tips un 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 (dienvidu (D), rietumu (R), austrumu (A)) 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 aktualitāte

Darba nozīme atklājas detalizētas paneļu efektivitātes analīze nepieciešamībā tieši Latvijas klimatiskajiem apstākļiem. 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 saules paneļu spēkstaciju pielietojuma aspektiem Latvijā.

Darba struktūra

Darba pirmo daļu veido literatūrā pieejamo Saules apstarojuma novērtējumu raksturojums un apskats par Saules redzamo pārvietošanās pie debess sfēras diennakts laikā 60 dienu intervālos. Otrajā daļā aplūkota saules paneļu uzbūve un to darbības princips. Trešajā daļā tiek apskatīta saules paneļu sistēmas elektriskā shēma un raksturoti LU Botāniskā dārza spēkstacijas instalācijas parametri. Ceturtajā daļā ir aprakstīti iegūtie rezultāti, tie ir salīdzināti savā starpā, ar citas saules paneļu spēkstacijas mēriju rezultātiem, ar eksperimentālā poligona meteostacijas datiem par solāro apstarojumu šajā laika periodā, kā arī aplūkoti no teorētiskās pusvadītāju fizikas aspektiem.

Autores 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. izstrādātāji VRM sistēmai.

Mans ieguldījums ir koda arhitektūras plānošana, rakstīšana un uzturēšana līdz šim brīdim. Esmu 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.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Saules apstarojums

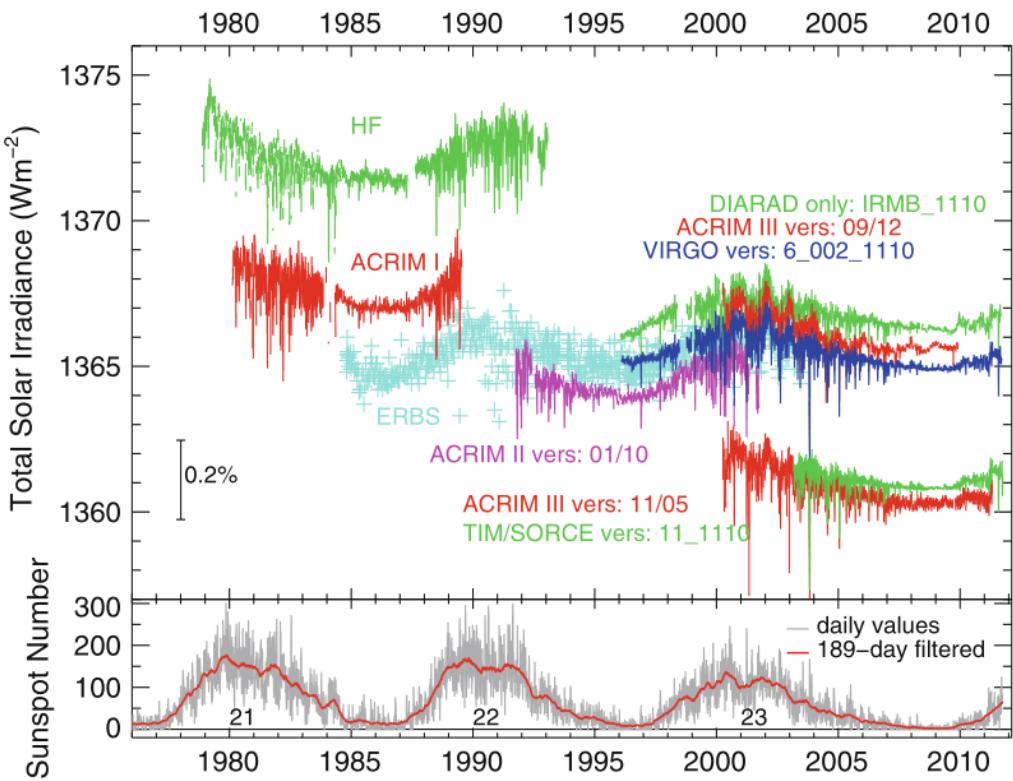
Lielākā daļa Saules izstarotās enerģijas tiek saražota kodolreakcijās fotosfērā. Kopējais saules apstarojums (*Total Solar Irradiance*, TSI) raksturo Saules starojuma absolūto intensitāti – enerģiju uz virsmas perpendikulāri starojuma izplatīšanas virzienam 1 AU attālumā no Saules, integrētu visā saules enerģijas diskā un visā saules enerģijas spektrā (skat. 1.3. att.). TSI vērtībai novērojama aptuveni 11 gadus ilga periodiska variācija, kas korelē ar saules plankumu skaitli. Par Saules plankumu sauc magnētiskās plūsmas koncentrāciju bipolāros klāsteros vai grupās izraisītos tumšos plankums uz Saules fotosfēras, savukārt Saules plankumu skaitlis ir atkarīgs no individuālu Saules plankumu s un to grupu g skaita, kā arī observatorijas atrašanās vietas faktora k pēc (1.1) formulas [3].

$$R = k(10 \cdot g + s) \quad (1.1)$$

TSI norāda uz solārās radiācijas izmaiņām, kas ietekmē Zemes atmosfēras augšējos slāņos saņemto solārās enerģijas apjomu. Papildus ir noderīgi zināt Saules emitētā starojuma spektrālo sadalījumu (*Spectral Solar Irradiance*, SSI) – 1.2. att. redzams, ka aptuveni puse starojuma tiek saņemta salīdzinoši maza vilņu garumu - 380 – 780 nm diapazonā [3].

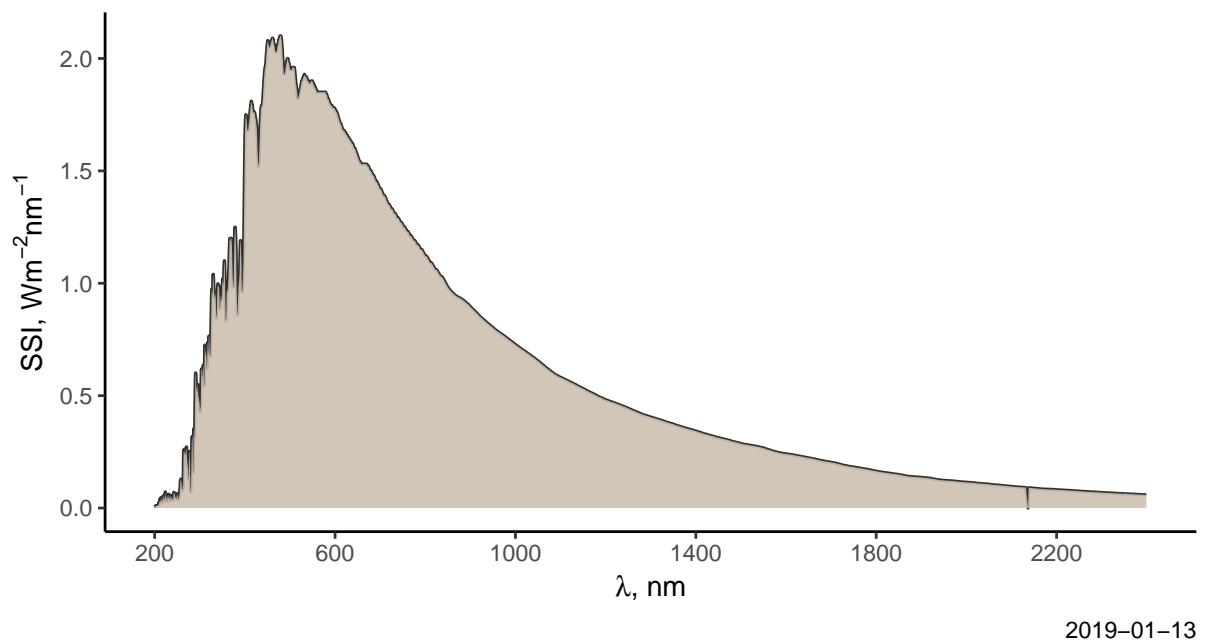
TSI novērojumi no kosmosa tiek veikti kopš 1978. gada un instrumentu specifikas dēļ ie-gūtas dažādas absolūtās vērtības (skat. att. 1.1.), tāpēc šī fizikālā lieluma tikai daļēji pārkājušos novērojumu laikrindu apvienošana kompozītā ir gan zinātnisks, gan statistisks izaicinājums un neviens kompozīts (piemēram, *PMOD*, *ACRIM*, *IRBM*) līdz šim nav kļuvis par absolūtu standartu solārā apstarojuma pētnieku kopienā [4].

Par labāko Saules apstarojuma mērījumu reprezentāciju tiek uzskatīti Saules Radiācijas un Klimata Eksperimenta (*Solar Radiation and Climate Experiment*, SORCE) misijas kopējā apstarojuma novērošanas instrumenta (*Total Irradiance Monitor*, TIM) 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 $0.014 \text{ W m}^{-2} \text{ gadā}^{-1}$ 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

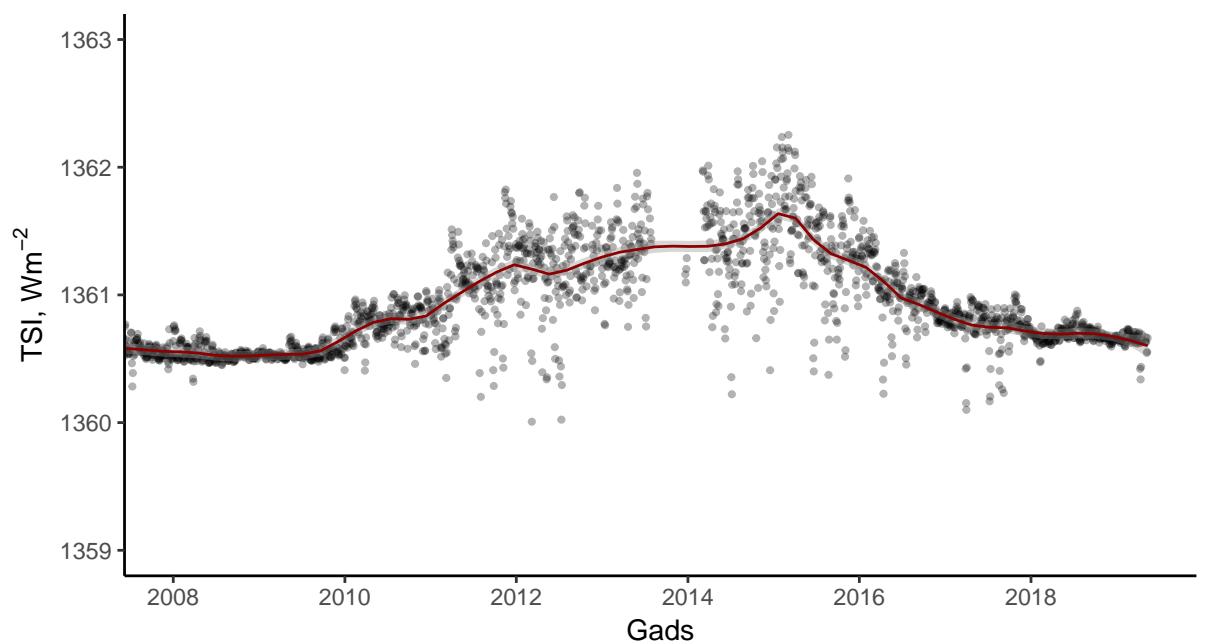


1.1. att. Salīdzinājums dienā vidējotiem saules kopējā apstarojuma datiem no dažādām kosmiskajām misijām un Saules plankuma skaitlis, lai ilustrētu solārās aktivitātes variabilitāti trīs ciklos [4].

$(1360.8 \pm 0.5)\text{W m}^{-2}$ [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 (1.2). Saules diennakts kustība, gadalaiku cikls, kā arī saules paneļa novietojums ir ievēroti $\cos \theta$ aprēķina izteiksmē (1.3), kur lietotie leņķi definēti 1.1. tabulā [3].

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

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

Saules deklināciju solārajā pusdienlaikā var aprēķināt pēc lietderīgas aproksimācijas, kur n apzīmē dienas kārtas numuru gadā un pārējie mainīgie atbilst empīriskiem koeficientiem $A = 23$; $k = 0.9863$; $b = 285$ [7].

$$\delta = A \sin(k(b+n)), \quad (1.4)$$

Ar vienādojumu (1.3) un (1.4) 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, tīka aprēķināta $\cos \theta$ atkarība no laika trīs datumiem: 1. janvārim, 1. martam 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 paneļu saražotās enerģijas izmaiņas gada griezumā, piemēram, starp uz dienvidiem orientētajiem paneļiem janvārī efektīvākais ir 90° leņķī vērstais, jo Saule atrodas zemu pie horizonta, bet aprīlī efektīvākais ir 40° leņķī.

1.1. tabula

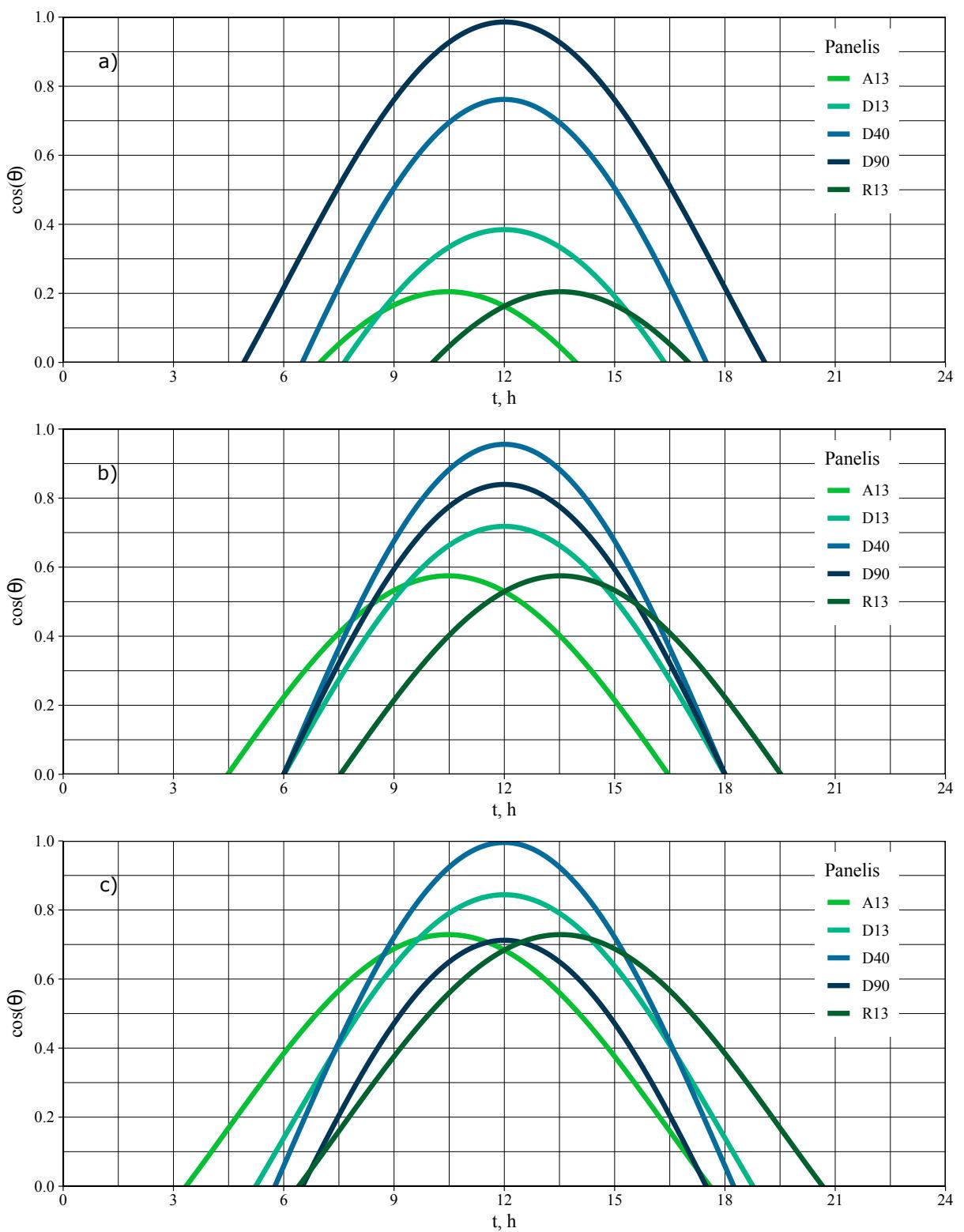
Lenķu, kas lietoti (1.3) vienādojumā, definīcijas.

	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		

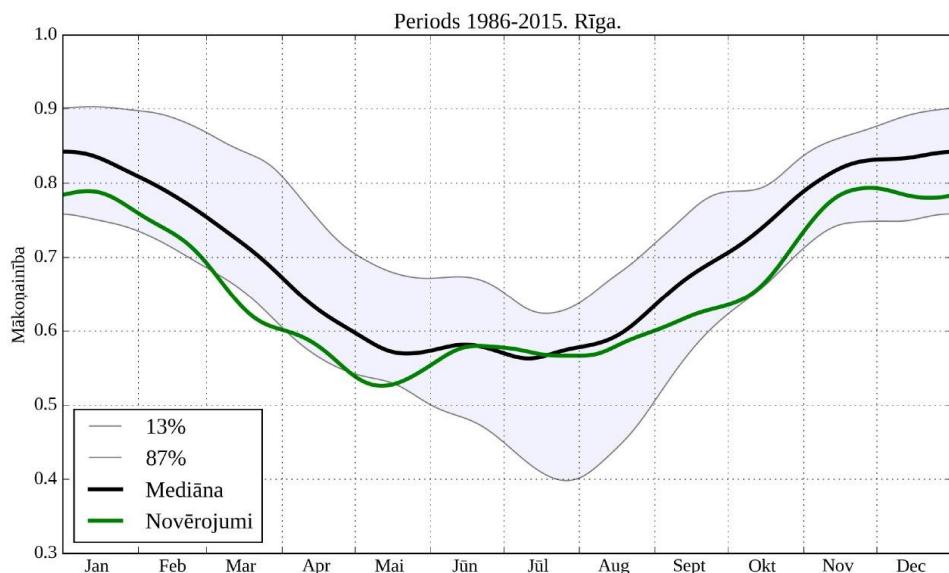


1.4. att. Diennakts laikā paredzētas $\cos(\theta)$ vērtības darbā lietotajiem Saules paneljiem, aprēķinātas pēc (1.3) izteiksmes 1. janvārim (a), 1. martam (b), 30. aprīlim (c).

1.3. Mākoņainība Latvijā

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

Kopējais mākoņu daudzums tiek iedalīts 10 klasēs no 0 (pilnīgi skaidrs) līdz 1 (pilnīgi apmācies). Mākoņainība Rīgā var sasniegt līdz 60% jūlijā un līdz pat 90% decembrī (skat. 1.5. att.). 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 [8].

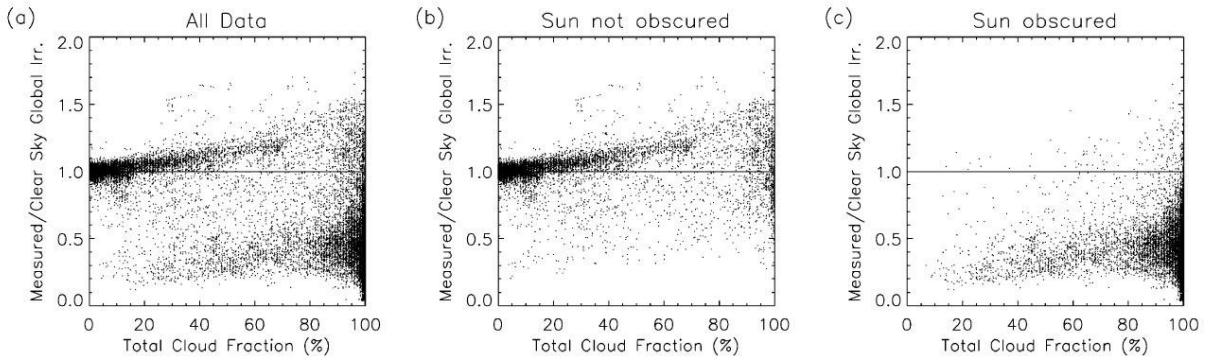


1.5. att. Vidējā mākoņainība Rīgā gada laikā, vidējota pa 20 gadu periodu [8].

Mākoņu ietekme uz Saules apstarojumu ir netriviāla un atkarīga no dažādiem parametriem. Piemēram, 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 (skat. 1.6. (b) attēlā), tādējādi tiešā normālā apstarojuma (*Direct normal irradiation*, DNI) komponentes samazināšanās tiek kompensēta ar palielinātu gaismas izkliedi [9].

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 enerģiju var uzskatīt par nelabvēlīgu. Pētījumi rāda, ka mākonji absorbē par 25 W/m^2 vairāk gaismas, nekā teorētiski paredzams, un šī vērtība nevar būt izskaidrojama ar troposfēras aerosoliem [10]. 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 [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 1.3. 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 [11].

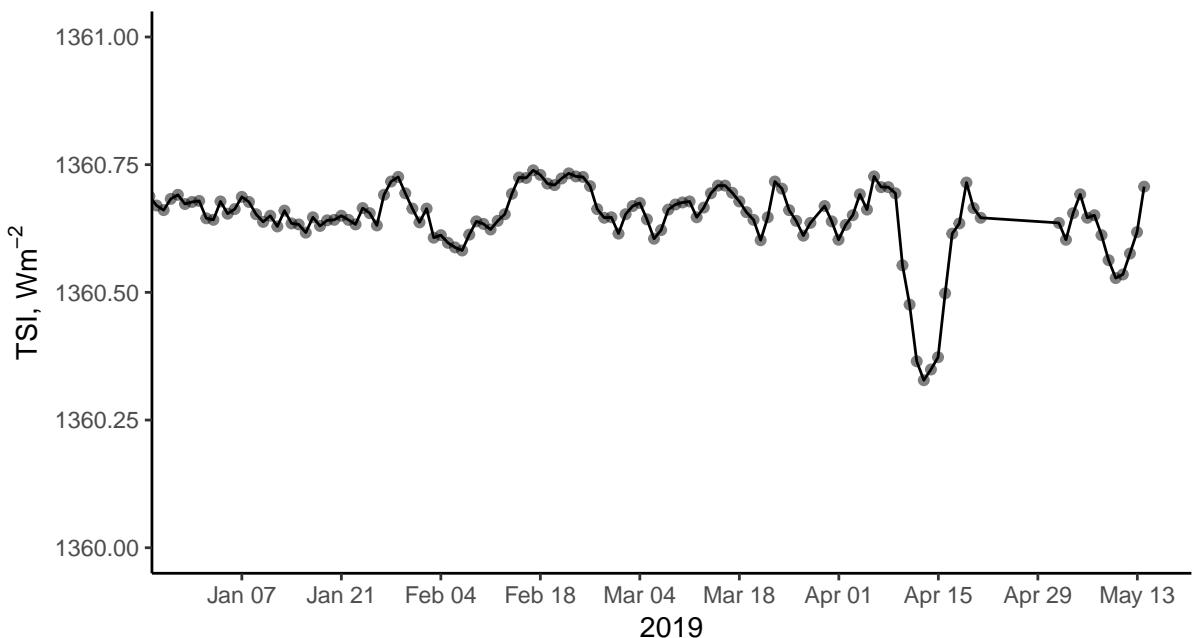
1.3. tabula

CMF intervāls atkarībā no mākoņu tipa [11], [12]

Augstie gubumākoņi (<i>Altocumulus</i>)	< 0.7	
Gubumākoņi (<i>Cumulus</i>)	0.2 – 1.3	
Spalvmākoņi (<i>Cirrus</i>)	0.6 – 1	

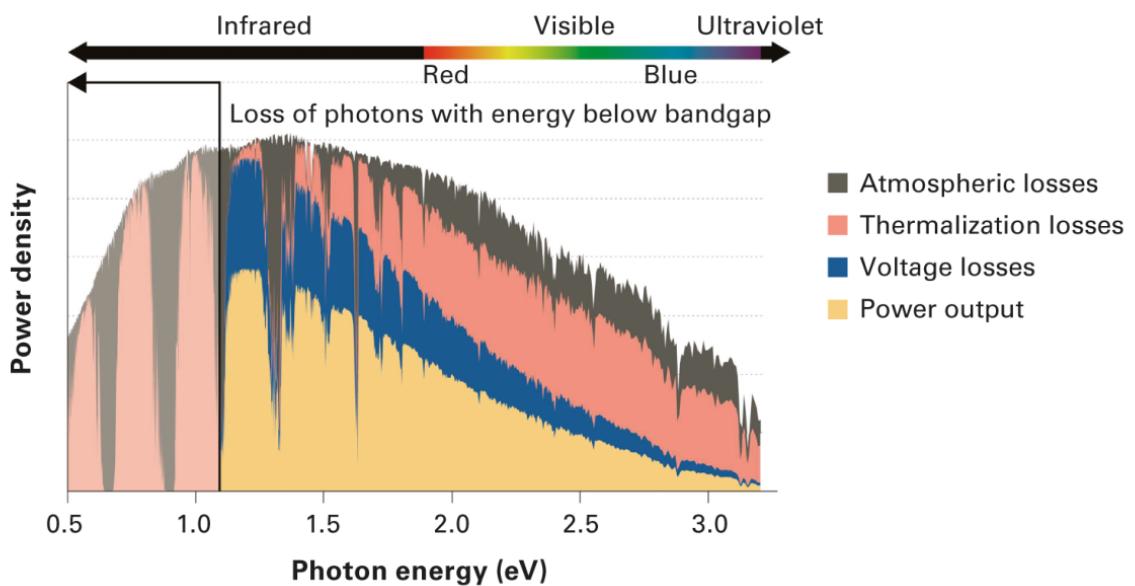
Modelēt saules apstarojumu, kas nonāk uz paneļu virsmas, sarežģī ne tikai mākoņu ietekme, bet arī Saules apstarojuma izmaiņas laikā. Tomēr šī darba ietvaros to var neņemt vērā, jo TSI mainās tikai ap $\pm 0.7 \text{ W/m}^2$ gadā (solāro paneļu datu uzņemšanas laikā tas mainās par $\pm 0.225 \text{ W/m}^2$ jeb 0.03 %), kā tas ir redzams 1.7. attēlā.

Atsaucoties uz TIM satelīta izmērīto saules gaismā ietverto enerģijas spektrālo sadalījumu (skat. 1.2. att.), attēlā 1.8. parādīti enerģijas zudumi dažādiem viļņu garumiem absorbējoties atmosfērā, kā arī siltuma un sprieguma zudumi saules šūnā (par saules šūnu šeit un turpmāk tiek dēvēts fotoelektriskais elements, kuru apvienojums veido saules paneļa modeli) [13].



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

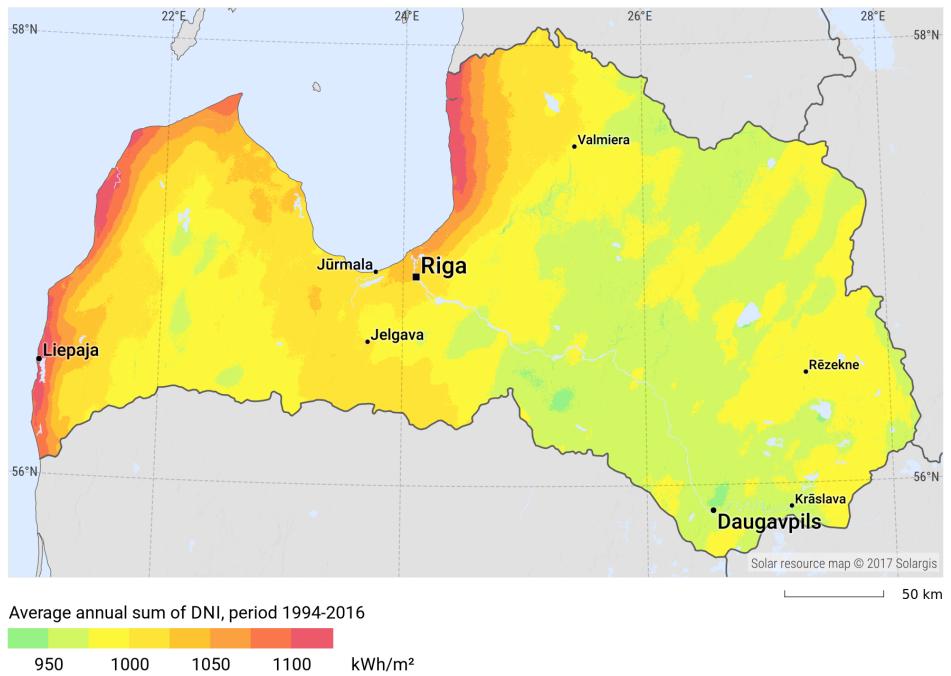
Pēc *Solargis* modeļa no satelītu un atmosfēras mērījumu datiem (klūda 3% līdz 10% robežās) secināms, ka piekrastē nonāk vairāk saules apstarojuma, tāpēc tur tiek prognozēta lielāka jauda 1.9. Apstarojums iedalās vairākās kategorijās: tiešais normālais apstarojums ir Saules apstarojums bez izkliedes atmosfērā. Globālais horizontālais apstarojums (*Global horizontal irradiance*, GHI) ir kopējais virsmas saņemtais apstarojums, ieskaitot gan DNI, gan starojumu, kas izkliedējas atmosfērā (*Diffuse Horizontal Irradiance*, DHI). Šos lielumus savā starpā saista attiecība (1.5), kur z ir zenīta leņķis, kas atbilst θ no 1.1. tab.) [13].



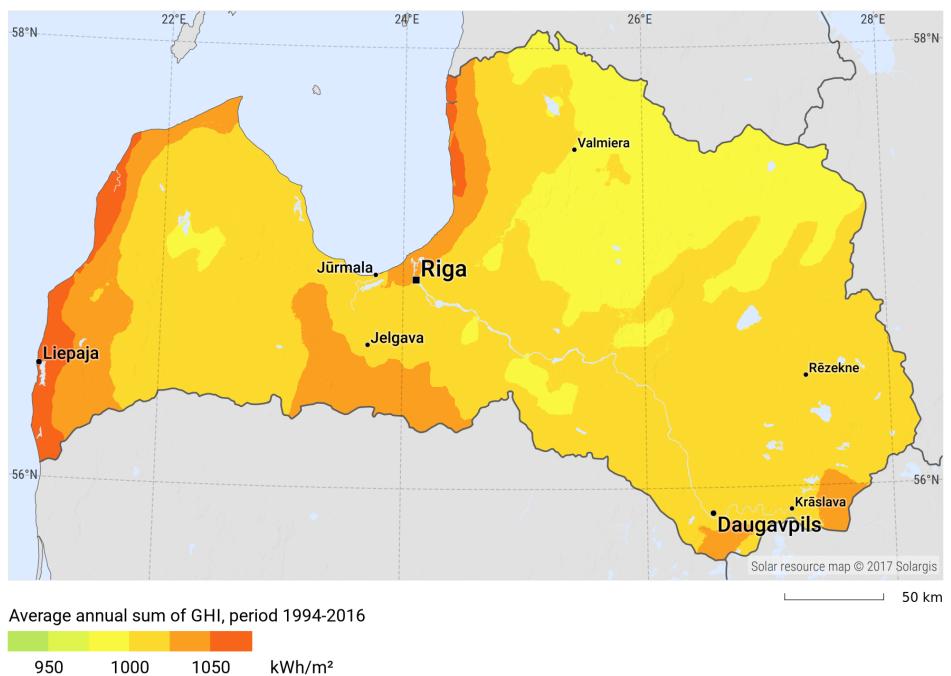
1.8. att. Saules enerģijas zudumi silīcijā balstītā saules šūnā. [13].

$$GHI = DHI + DNI \times \cos(z) \quad (1.5)$$

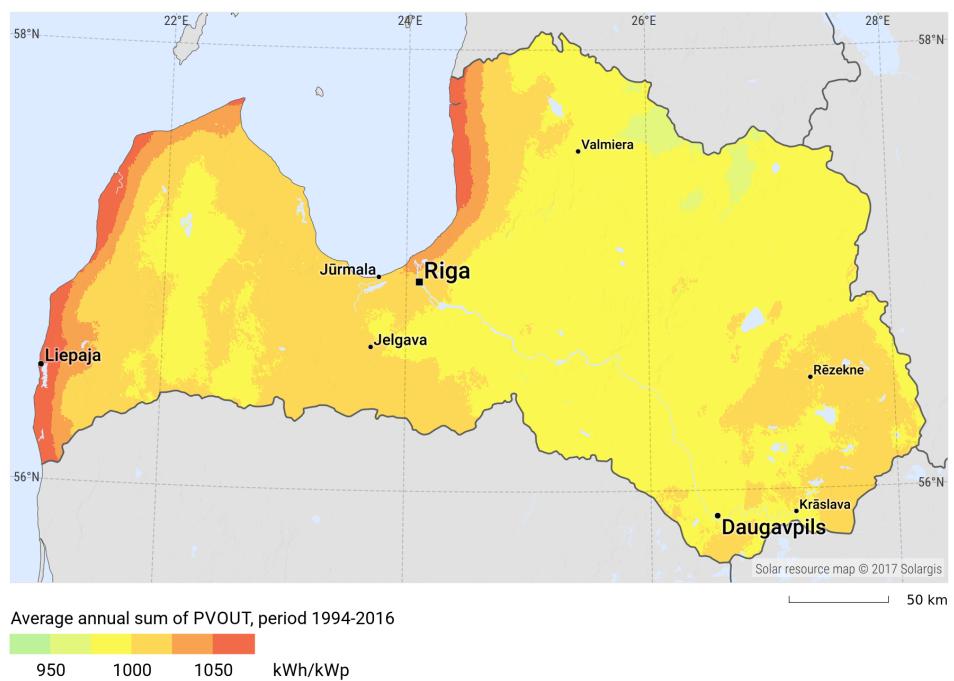
Salīdzinot 1.9. un 1.10. attēlus redzams, ka GHI ir nedaudz lielāks par DNI, tātad redzams izkliedētā starojuma ieguldījums. Saules fotoelementa potenciālās jaudas (*Photovoltaic power potential*, PVOUT) karte sniedz apkopojumu par prognozēto saules fotoelektrisko elementu (*photovoltaics*, PV) enerģijas ražošanas apjomu, pieņemot 1kW jaudas Si materiāla PV spēkstacijas, gada patēriņam optimizētu slīpuma leņķi, kas pēc dotā modeļa ir 40°(skat. 1.11. att.). Pēc šiem datiem kopumā var secināt, ka saules paneļiem ir potenciāls klūt par enerģijas ieguves risinājumu arī Latvijā.



1.9. att. Tiešais normālais apstarojums Latvijā [14]



1.10. att. Globālais horizontālais apstarojums Latvijā [14]

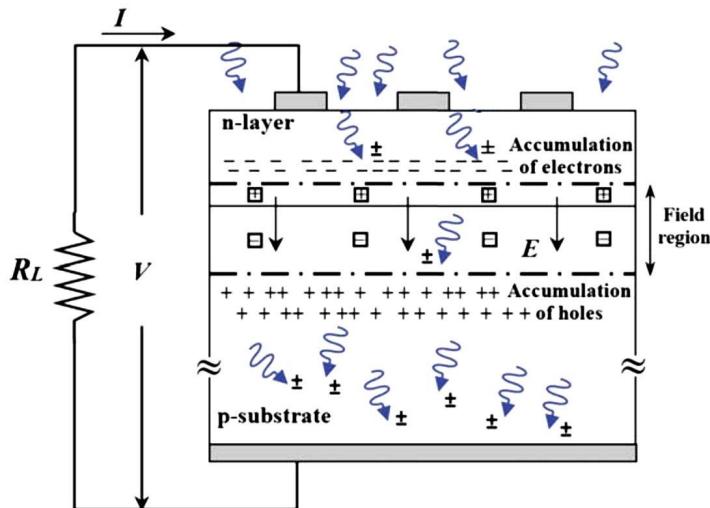


1.11. att. PV potenciālā jauda Latvijā [14]

2. SAULES PANELI

2.1. Darbības princips

Saules paneli sastāv no fotoelementiem, kas pārveido gaismas enerģiju elektriskā lauka enerģijā. Fotoelements, kura uzbūves shēma ir parādīta 2.1. 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.



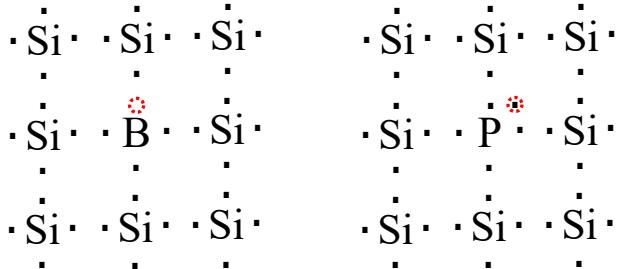
2.1. att. Saules panela shēma. Tas sastāv no fotoelementiem, kuru augšējais slānis veidots no p-tipa pusvadītāja, bet apakšējais — no n-tipa pusvadītāja [15].

P-tipa un n-tipa pusvadītāja īpašības var panākt, piemēram, dopējot silīcija (Si) kristālu ar attiecīgi III vai V grupas elementiem. Ja Si kristālam pievieno bora atomus nelielā koncentrācijā, izveidojas 2.2. 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 [15].

Ja Si kristālam pievieno fosfora atomus, izveidojas pretēja situācija – pie P atoma parādās

elektrons, kas nepiedalās saites veidošanā (sk. att. 2.2., pa labi). Lai pārvietotos, brīvajam elektronam ir nepieciešams mazāk energijas 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 [3].



2.2. 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 patēriņu, tādā veidā radot elektrisko strāvu [13].

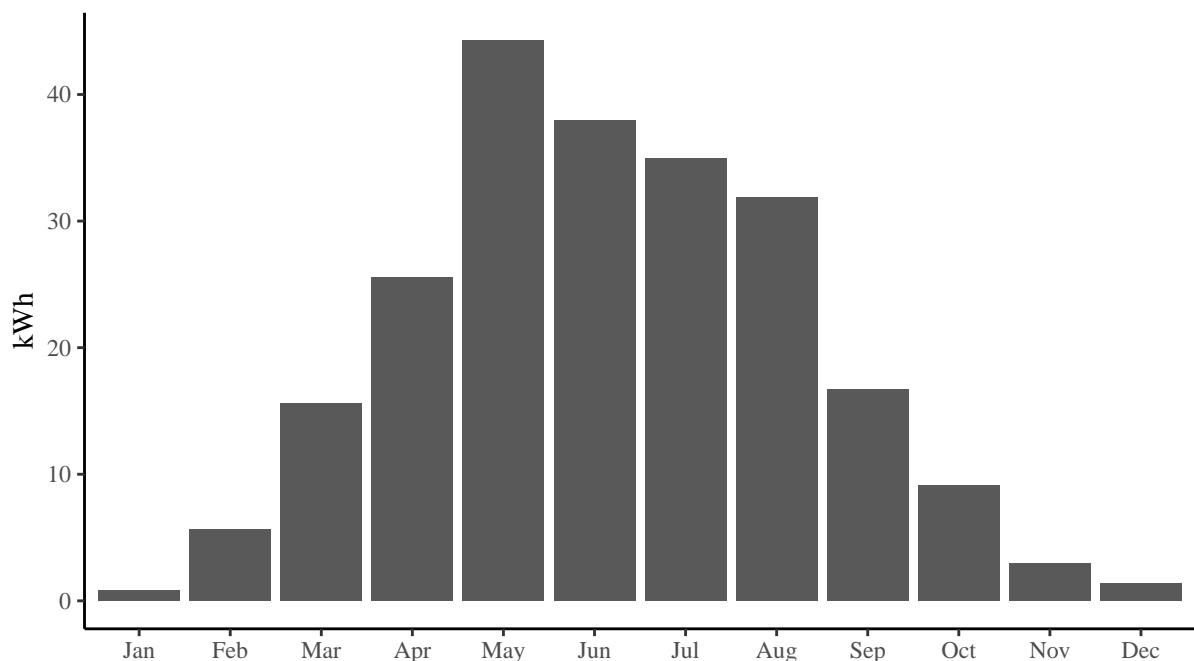
2.2. Izmantošana pasaule

Silīcija Saules paneļu attīstības intensīvākais posms bija apmēram no 1980. līdz 2000. gadam, kad to maksimālā efektivitāte palielinājās no 15% līdz 25% [13]. Nākamajos 20 gados efektivitātes pieaugums bija gandrīz desmit reizes mazāks. Tieki pētīti arī citi Saules paneļu pusvadītāju veidi, piemēram, kadmija telurīda (*cadmium telluride*, CdTe) vai gallija arsenīda (*Gallium arsenide*, GaAs), tomēr monokristāliskā un polikristāliskā Si 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 [13].

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 [11].
- Eksperiments Mumbajā ļauj secināt, ka karsts un sauss klimats ne tikai samazina enerģijas pārvērtības lietderības koeficientu, bet arī izraisa defektus un silīcija bojājumus, kas palieina enerģijas zudumus. Tieka norādīts, ka šādā klimatā tipiskais Saules paneļu dzesēšanas risinājums – ūdens izsmidzināšana – nav pielietojams, jo tieši šādā klimatā ūdens trūkums ir svarīga problēma [18].
- Indonēzijā pētnieki novēroja, ka mitruma un vēja ātruma palielināšana samazina Saules paneļu efektivitāti [18], [19]. Atšķirībā no iepriekšējā pētījumā, darbā [19] aplūkotajā temperatūras apgabalā ($42 - 52^{\circ}\text{C}$) temperatūra pozitīvi korelē ar paneļu efektivitāti, kas, iespējams, saistīts ar GHI palielināšanos.
- Arī Latvijā vairākās vietās 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. 2.3).



2.3. att. Viena saules paneļa saražotā enerģija Ulbrokas saules paneļu spēkstacijā 2017. gadā. Virziens: D, leņķis 15° [20] (datu nolasīšana: Valts Krūmiņš).

3. SAULES PANЕĻI LU BOTĀNISKAJĀ DĀRZĀ

3.1. Tipi

Botāniskā dārza saules paneļu sistēmu raksturo divi saules paneļu tipi – JA un LG. Šajā nodalā saules paneļu tipi tiek salīdzināti savā starpā, gan apskatīti kontekstā ar maksimālo teorētisko efektivitāti.

Ideāli efektīva saules šūna uzņem un iesloga visu krītošo gaismu un konvertē to elektriskajos nesējos, kas tiek efektīvi savākti, reālās saules šūnas ir nepilnīgas vienā vai abos no šiem aspektiem. Fundamentālās saules šūnu efektivitātes robeža pēc Šokleja-Ķoizera (*Shockley-Queisser*, S-Q) detalizētā balansa modeļa ir 33.7%, balstoties uz modeli monokristālisks Si ir sasniedzis $> 75\%$ no S-Q robežas, bet polikristālisks Si 50 līdz 75% no S-Q robežas [21].

Monokristāla Si šūnu efektivitātes rekords ir 25.6%, tās ir sasniegūšas gandrīz pilnīgu gaismas slazdošanu un nesēju savākšanu, un lielākoties tās ierobežo nesēja rekombinācijas zudumi. Polikristālisko Si šūnu efektivitātes rekords ir 21.3%. Polikristālisks Si pusvadītāja plāksnes tiek izgrieztas no stieņa ar virzītās kristalizācijas metodi, un to izgatavošanas izmaksas ir mazākas nekā monokristāliskām plāksnēm. Taču polikristāliskam Si ir zemāka elektroniskā kvalitāte kristāla graudu robežu un iekšgraudu defektu dēļ, kā arī lielāka piemaisījumu koncentrācija, tāpēc polikristāliskai saules šūnai ir lieli sprieguma zudumi. Gaismas slazdošana šajās šūnās ir mazāk efektīva, jo ideālā piramīdas virsmas tekstūra, ko parasti izveido sārmainā kodināšana Si(100) uz (111) virsmas plaknēm, nevar realizēties polikristāliskā virsmā [21].

Ražotāju referenču lapās LG tiek prognozēta labāka atdeve saulainās dienās [22], bet JA labāka atdeve vājas gaismas intensitātes apstākļos [23]. Nēmot vērā nespēju šos apgalvojumu patiesumu praktiski pārbaudīt patentēto (*proprietary*) modeļu dēļ, atsevišķi izvērtējot tikai 1.3. nod. aprakstītos mākoņainības apsvērumus, Latvijas klimatam piemērotāks būtu JA.

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

3.1. tabula

JA un LG panelu tipu salīdzinājums [23] [22]

Tipa abreviatūra	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

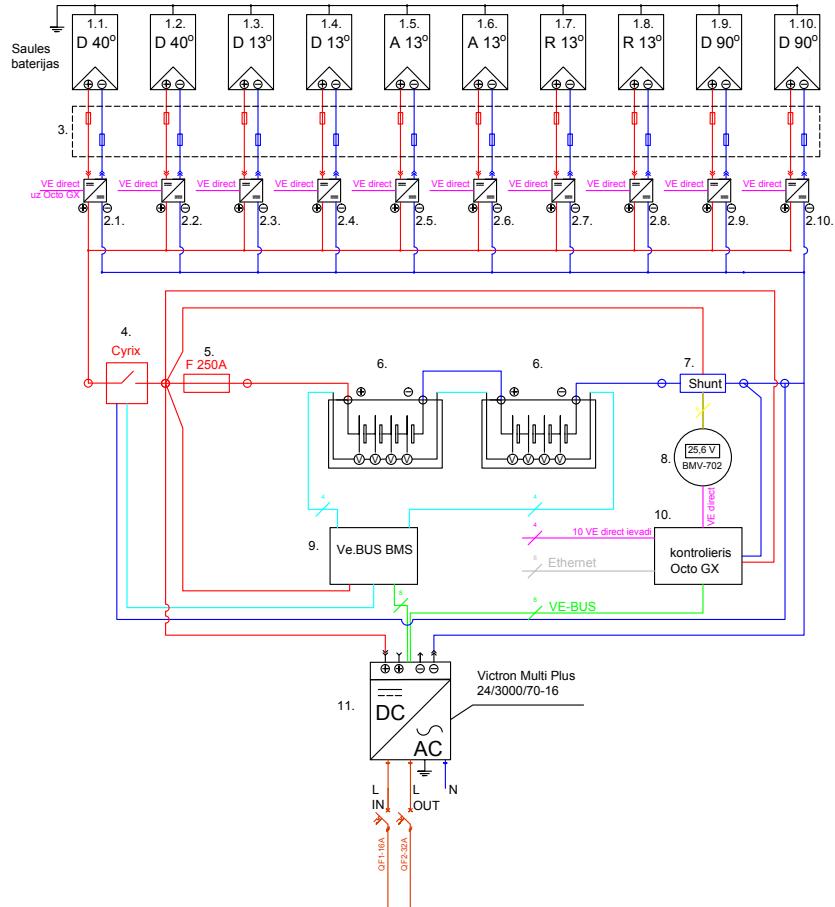
3.2. Elektriskā shēma

Šajā nodaļā tiek paskaidrotas elektroniskās shēmas (skat.3.1.att.) komponentes un to funkcionalitāte.

1. Saules baterijas (skat. 2.1. un 3.1. nodaļas)
2. *SmartSolar MPPT* – Saules enerģijas lādētājs savāc enerģiju no saules bateriju paneļiem un noglabā to akumulatoros. Tā mērķis ir novērst bateriju izlādēšanās izraisītos bojājumus. Pirmais skaitlis modeļa nosaukumā apzīmē maksimālo PV slēguma spriegumu, otrs – maksimālo uzlādes strāvu.
3. Līdzstrāvas drošinātāju skapis – nepieciešamības gadījumā izolē slēgumu no barošanas avota.
4. *Cyrix-Li-Charge 12/24V -120 A* – Lādēšanas ierobežotājs atslēdzas, kad tā kontroles izvade klūs brīvi peldoša (*free floating*), signalizējot par baterijas pārspriegumu vai paaugstinātu temperatūru. Tas pievieno akumulatora lādētāju ar 3 sekunžu aizkavi, ja VE.Bus BMS lādiņa atvienošanas (*Charge Disconnect*) izvade ir augsta (*high*), spriegums uz akumulatora lādētāja savienojuma spailes ir ≥ 13.7 V vai spriegums uz akumulatora spailes ir ≥ 2 V.

5. Kūstošais drošinātais – izkūst pārslodzes gadījumā, novēršot dārgāku instrumentu bojāšanu.
6. *LiFeO₄ akumulators 13.8V/90Ah - BMS*
7. Šunts – mazas pretestības ceļš, ko pieslēdz paralēli galvenajam elektriskās ķēdes posmam, lai tajā samazinātu strāvu. PV sistēmās lietots, lai apietu nevēlamu īssavienojumu starp saules baterijas priekšējo un aizmugurējo virsmas kontaktu, ko parasti izraisa pusvadītāja plāksnes bojājumi.
8. *BMV-702 Smart* – Akumulatora monitors aprēķina akumulatora spriegumu, strāvas stiprumu, patērieto ampērstundu skaitu, uzlādes stāvokli un atlikušo sistēmas darbības laiku pie pašreizējās izlādes ātruma.
9. *VE.BUS BMS* – Bateriju vadības bloks pasargā no akumulatoru bojājumiem uzlādes nelīdzsvatorības dēļ. Baterija ar nedaudz lielāku iekšējās noplūdes strāvu izraisīs konkrētās baterijas un paralēli savienoto bateriju nepietiekamu uzlādi un virknē savienoto bateriju pārlādi. Taču virknē savienotām baterijām nepieciešams vienāds sākotnējais uzlādes līmenis. Mazas atšķirības uzlādes līmenī tiks novērstas absorbcijas vai izlīdzināšanās ceļā, bet lielas atšķirības izraisīs bojājumus pārmērīgas pārlādes izraisītas gazifikācijas dēļ baterijām ar lielāku sākotnējo uzlādes līmeni un nepietiekamas uzlādes izraisītās sulfācijas dēļ baterijām ar mazāku sākotnējo uzlādes līmeni.
Bateriju vadības bloks pielīdzina uzlādes līmeni divām bateriju virknēm vai daudzām paralēli savienotām bateriju virknēm. Kad uzlādes spriegums bateriju sistēmai palielinās līdz sistēmā iestatītajai robežai, baterijas vadības bloks salīdzina spriegumus divās virknēs savienotajās baterijās un samazina strāvas padevi akumulatoram (vai paralēli savienotām baterijām) ar augstāko spriegumu. Rezultātā izveidotais uzlādes strāvas diferenciālis nodrošinās, ka visas baterijas konverģēs vienā uzlādes stāvoklī.
10. *Octo GX* – instalācijas sakaru centrs ar tālvadības konsoli tiešraides datu uzraudzībai un iestatījumu maiņai, kurai var piekļūt caur Victorn Attālinātās Pārvaldības Portālu(*Victron Remote Management Portal*, VRM) vai lokālo LAN/WiFi tīklu.

11. *MultiPlus 24/3000/70-16 230V VE.Bus* – Autonoms lādētājs pārnēm strāvas padevi tīkla avārijas vai ģeneratora strāva atvienošanās gadījumā < 20 ms laikā, lai elektroniskās iekārtas turpina darboties bez traucējumiem [24].



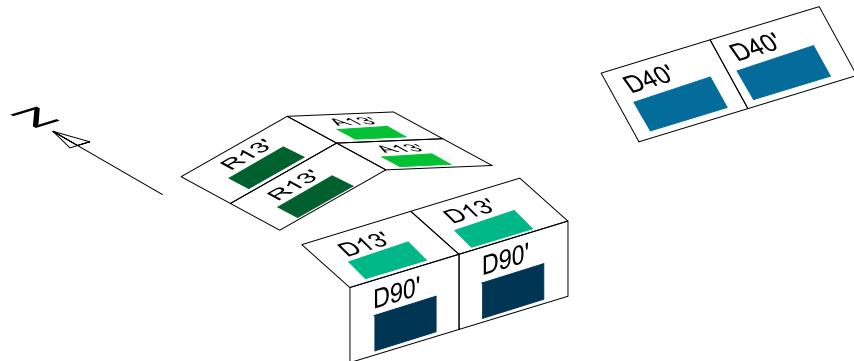
3.1. att. Saules panelu elektriskā shēma (autors Valdis Gailītis, modifikācijas Viktorija Leimane)

3.3. Telpiskās orientācijas

Pēc telpiskās orientācijas saules paneli tiek iedalīti divās grupās:

- 13 grādu leņķī (R13, A13, D13)
- D virzienā (D13, D40, D90)

LU Botāniskā dārzā uzstādīto saules paneļu telpiskās orientācijas uzskatāmi parādītas 3.2. att. (shematisch) un 3.3. att. (dabā). Lai lasītājam atvieglotu rezultātu interpretāciju, šīs grupas grafikos tiek apzinātas ar krāsām: leņķu grupa tiek apzīmēta ar zaļo krāsu, D virziena grupa ar zilo, abām grupām kopīgais panelis D13 – ar tirkīzzilu, krāsu paletes leģenda pieejama 3.2. att.



3.2. att. Saules paneļu telpisko orientāciju shēma (autors Valdis Gailītis, modifikācijas Viktorija Leimane)



3.3. att. Saules paneļu telpiskās orientācijas dabā (fotogrāfijas autors Māris Šinka)

¹ library(lubridate)

```

2
3 pltMonth = function(solName){
4     colIndex = which( colnames(datSol)==solName )
5     return(data.frame(timestamp, datSol[, datSol$timestamp]))
6 }
7
8 trapezoidArea = function(x, y, t = 0, s = 0){
9     for (i in 1:(length(x)-1)){
10         yvid = (y[i] + y[i+1])/2
11         s[i] = yvid * as.numeric(difftime(x[i+1], + x[i], unit
12             ="secs"))
13         t = t+s[i]
14     }
15     return(t)
16 }
17
18 findIndex = function(x, lower, delta_t, upper = lower + delta_t
19 ){
20     strtIndex = which(date(x) == date(lower) & hour(x) == hour(lower) & minute(x) == minute(lower))[1]
21     endIndex = which(date(x) == date(upper) & hour(x) == hour(upper) & minute(x) == minute(upper))[1]
22     if (is.na(strtIndex)){
23         strtIndex = which(date(x) == date(lower + minutes(1)) &
24             hour(x) == hour(lower + minutes(1)) & minute(x) ==
25                 minute(lower + minutes(1)))[1]
26     }
27     if (is.na(endIndex)){
28         endIndex = which(date(x) == date(upper + minutes(1)) &
29             hour(x) == hour(upper + minutes(1)) & minute(x) ==
30                 minute(upper + minutes(1)))[1]
31     }
32 }
```

```

26         hour(x) == hour(upper + minutes(1)) & minute(x) ==
27             minute(upper + minutes(1)))[1]
28
29     }
30
31 integrateInterval = function(x, y, delta_t, solname, from = min
32 (x, na.rm=TRUE), to = max(x, na.rm=TRUE)){
33
34     lowerLimit = from
35
36     upperLimit = lowerLimit + delta_t
37
38     itrTimes = floor(as.numeric(to - from) / as.numeric(
39
40         upperLimit - lowerLimit))
41
42     xres <- as_datetime(itrTimes)
43
44     yres <- numeric(itrTimes)
45
46     count = 0
47
48     while (interval(lowerLimit, upperLimit) %within% interval(
49         from, to)) {
50
51         indices = findIndex(x, lowerLimit, delta_t)
52
53         datInt = datTemp[indices[1]:indices[2],]
54
55         count = count + trapezoidArea(datInt$timestamp, datInt$  

56
57             solVar)/3600
58
59         xres[i] <- floor_date(x[indices[1]], unit = "5 mins")
60
61         yres[i] <- round(wh, digits=2)
62
63
64         lowerLimit = upperLimit
65
66         upperLimit = upperLimit + delta_t
67
68         i = i + 1
69
70     }
71
72     sumInt = data.frame("timestamp" = xres, "solVar" = yres)

```

```

50     colnames(sumInt)[2] <- toString(paste0(solname["dir"],
51                                         solname["degree"], solname["type"]))
52 
53
54 solNames = c("solD40", "solD13", "solA13", "solR13", "solD90")
55 types = c('JA', 'LG')
56 devices = '_PV_'
57 units = c('V', 'A', 'W')
58
59 for (solName in solNames){
60   for (type in types){
61     for (unit in units){
62       solname = paste0(solName, type, device, unit)
63       solName = interpretSolPanel(solname)
64       if (solName["unit"] == "W"){
65         datTemp = pltMonth(solname)
66         sumMin = integrateInterval(datTemp$timestamp,
67                                     datTemp$solVar, dminutes(5), "min", solname)
68       }
69     }
70   }

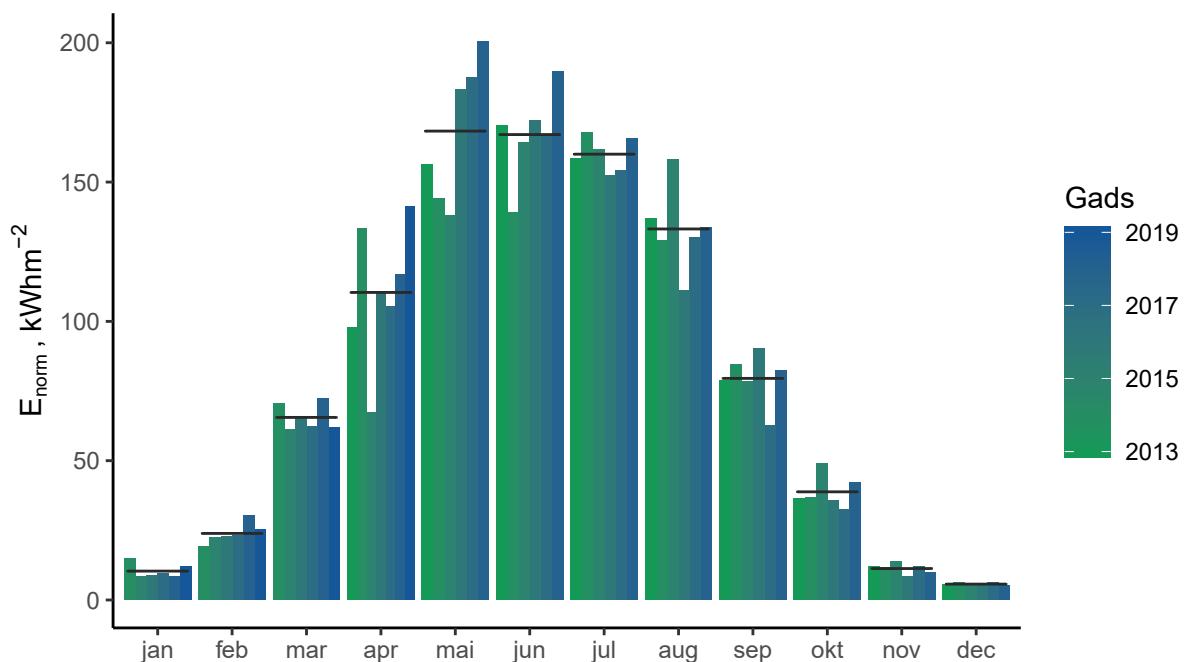
```

4. REZULTĀTI

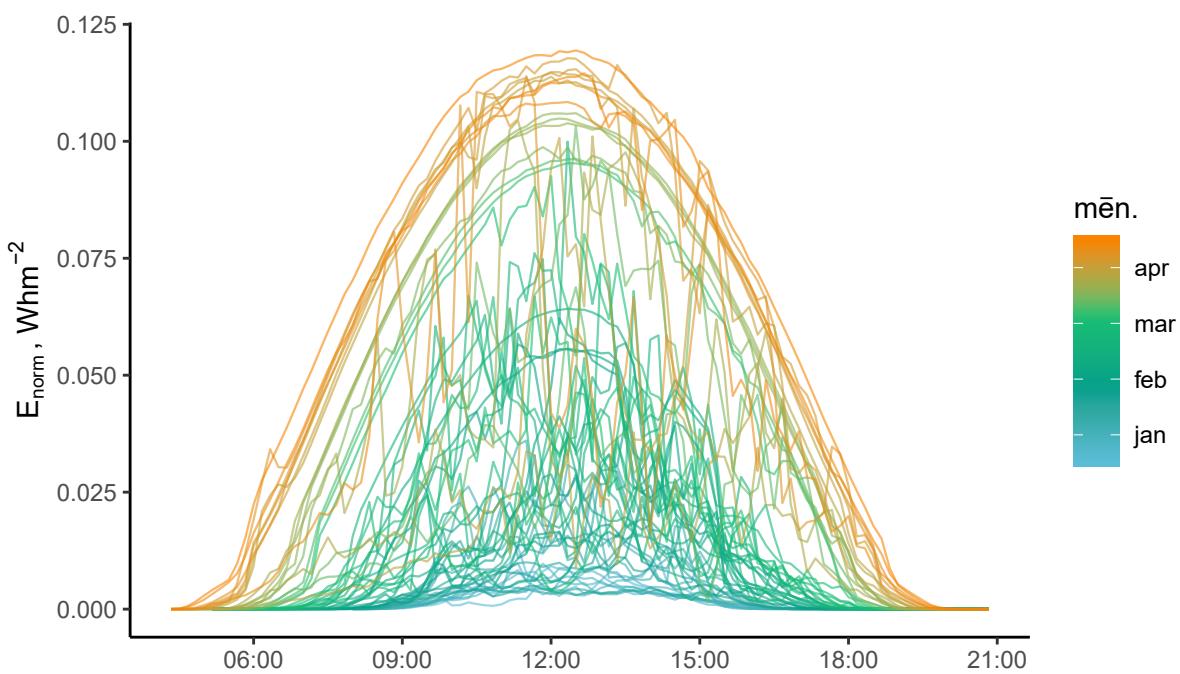
4.1. Saules apstarojums

Tieši ilgtermiņa saules apstarojuma monitorings saules paneļu uzstādīšanas vietā ir svarīgs paneļu efektivitātes prognozēšanas rīks, jo ļauj samazināt anomālu saulaina laika periodu svaru, kādi, piemēram, ir 2014. un 2019. gada aprīli (skat. 4.1. att.). PV sistēmas veikspējas monitoringam lietots Saules apstarojuma sensors (piranometrs), kas atrodas eksperimentālā poligona teritorijā. Šī mērīce saules apstarojumu uztver ar plaknes virsmu no 180° skata leņķa, ko sauc par puslodes saules apstarojumu, un tās klūda ir $\pm 1\%$ [25].

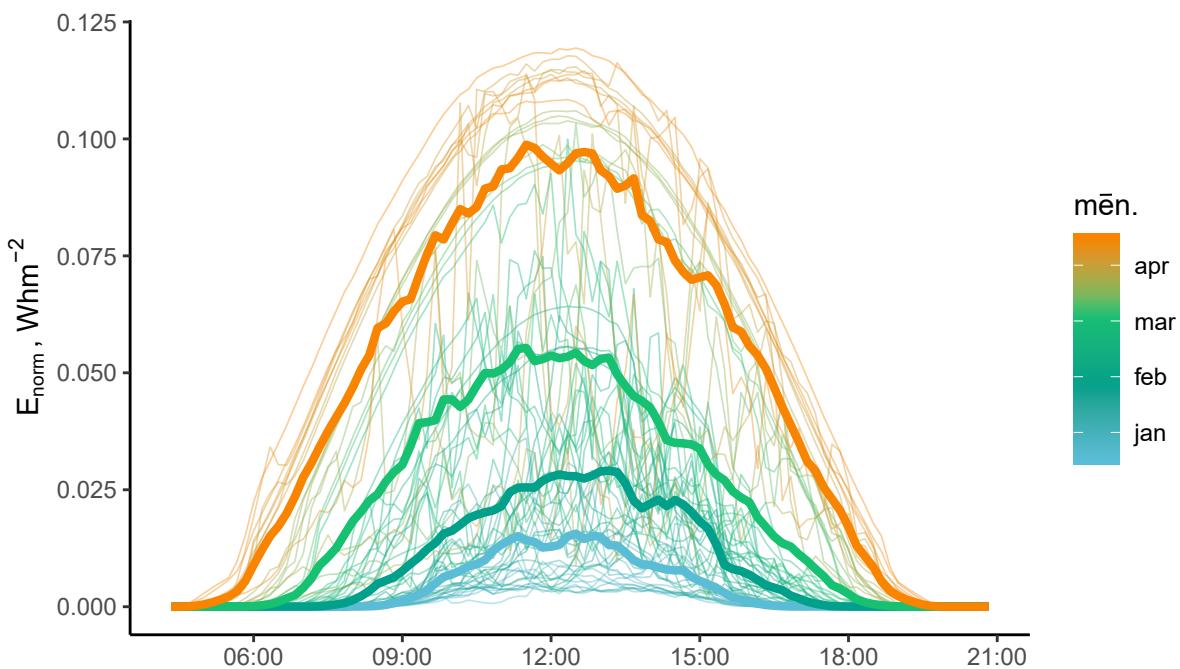
Attēlos 4.2 un 4.3 redzams gaišo diennakts stundu momentānā saules apstarojuma integrāli 5 minūšu intervālos novēroto četru mēnešu laikā, kas izskaidro turpmāk minētās atšķirības paneļu ražīgumā atkarībā no mēneša – palielinās gan Saules spīdēšanas ilgums dienā (x ass), gan saņemtās enerģijas daudzums (y ass).



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



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



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

4.2. Efektivitātes atkarība no parametriem

4.2.1. Saules paneļa tipa

Pēc tabulām 4.1 un 4.2, kā arī grafikiem, kas ietverti diskusijā par citu parametru ietekmi uz efektivitāti (skat. 4.2.5. nod.), redzams, ka LG tipa paneļi konsekventi ir efektīvāki par JA tipu. Tas ir saistīts gan ar kristāla veidu – kā parādīts 3.1. nod., monokristāliska Si paneļi ir ražīgāki par polikristāliem –, gan paneļu maksimālajām jaudām – LG ir lielāka nominālā jauda uz laukuma vienību nekā JA.

4.1. tabula

JA tipa paneļu saražotā enerģija uz kvadrātmetru salīdzināta ar enerģijas plūsmas blūvumu uz horizontālu virsmu

E, kWhm ⁻²	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	piranometrs
jan	0.35	0.23	0.72	2.46	2.80	12.14
feb	3.20	2.74	4.27	6.45	5.99	25.14
mar	8.22	7.40	9.47	11.94	8.72	61.76
apr	19.89	19.23	23.27	25.43	18.25	141.41
E_{sum} , kWhm ⁻²	31.7	29.6	37.7	46.3	35.8	240.5

4.2.2. Saules paneļa leņķa

Apkopojoši četru mēnešu datus un abus paneļu tipus, visražīgākais leņķis ir 40° (skat. 4.4. att.). Kopumā var secināt, ka pret D orientētais panelis 90° leņķī saražo vairāk enerģijas ziemas mēnešos un 13° leņķī – vasaras mēnešos, tātad apstiprinās teorijā (1.2.nod.) prognozētais.

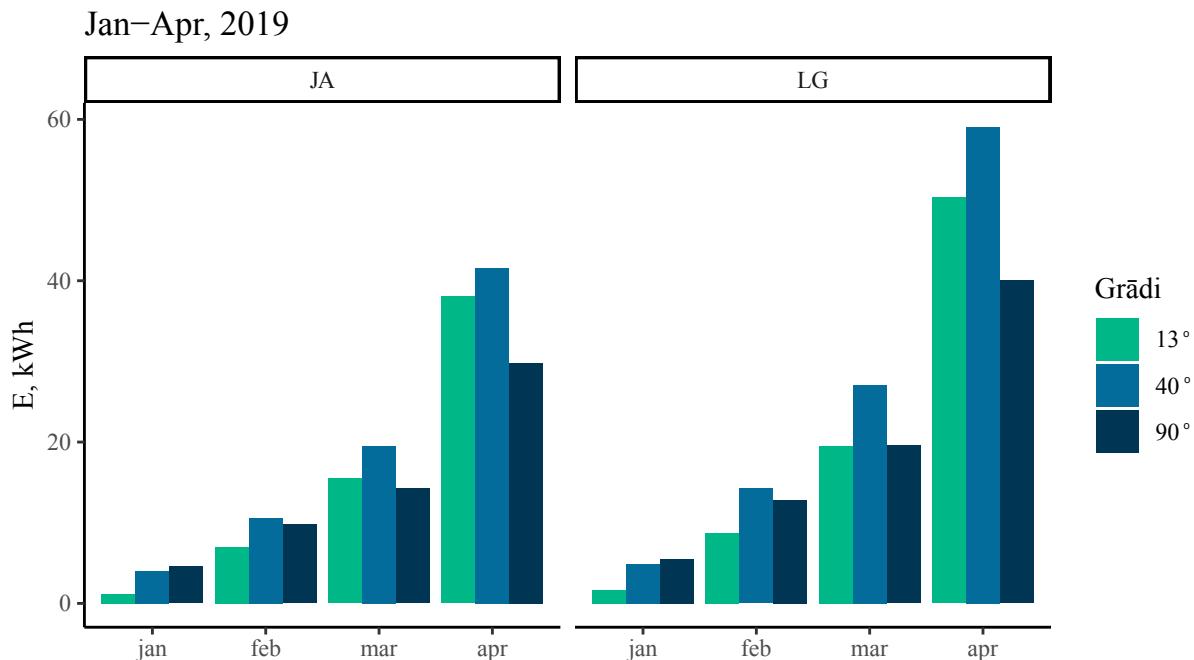
4.2.3. Saules paneļa virziena

Visražīgākais virziens ir D, tad A, tad R (skat. 4.5. att.). To paskaidro 4.2.4. nod. redzamie paneļu saražotās enerģijas dienas sadalījumi.

4.2. tabula

LG tipa paneļu saražotā enerģija uz kvadrātmētru salīdzināta ar enerģijas plūsmas blūvumu uz horizontālu virsmu

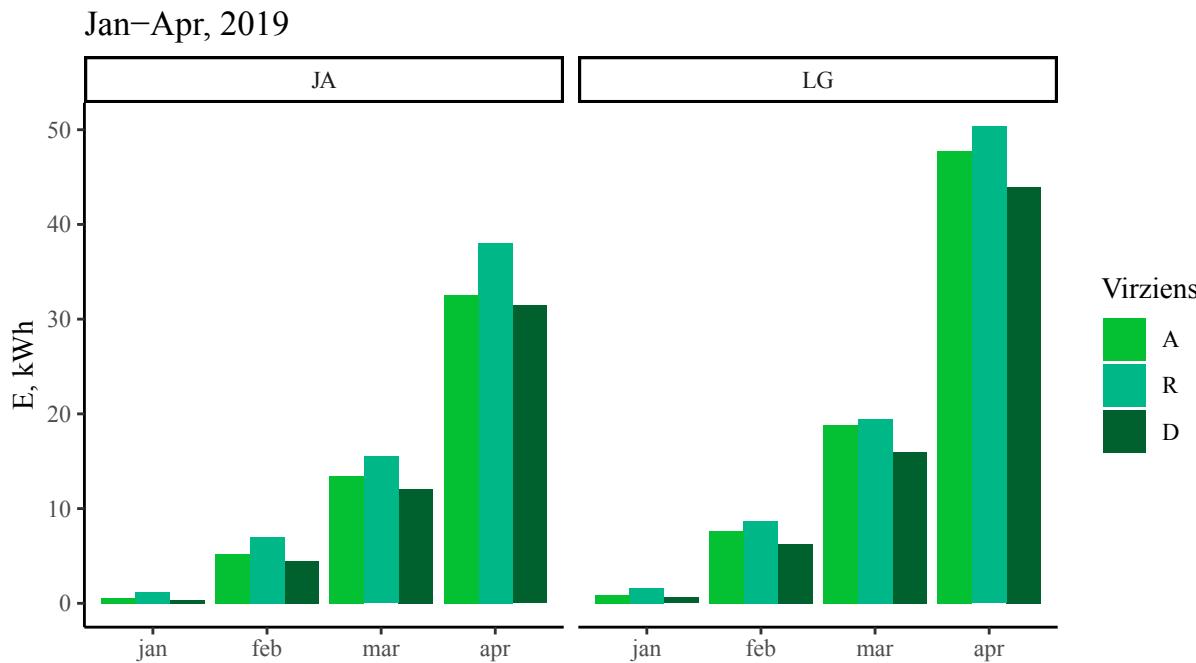
E, kWhm^{-2}	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	piranometrs
jan	0.5	0.35	0.95	2.82	3.22	12.14
feb	4.43	3.63	5.05	8.25	7.41	25.14
mar	10.92	9.27	11.27	15.69	11.34	61.76
apr	27.63	25.46	29.14	34.21	23.18	141.41
$E_{sum}, \text{kWhm}^{-2}$	43.48	38.7	46.41	60.98	45.14	240.46



4.4. att. D virzienā vērsto saules paneļu saražotā enerģija atkarībā no leņķa un saules paneļu tipa

4.2.4. Saules paneļa leņķa un virziena kombinācijas

Saules paneļu saņemtā apstarojuma dienas sadalījuma tendenci drīkst salīdzināt ar attiecīgo paneļu saražotās enerģijas tendenci, jo pēdējā ir atkarīga no paneļa virsmas saņemtā Saules apstarojuma, kas savukārt ir funkcija no $\cos(\theta)$, tātad proporcionāla tam. Salīdzinot 1.4.(c) ar 4.6,



4.5. att. 13 grādu lenķī vērsto saules paneļu atkarība no virziena un saules paneļu tipa

tieki secināts, ka eksperimentālie rezultāti sakrīt ar teoriju.

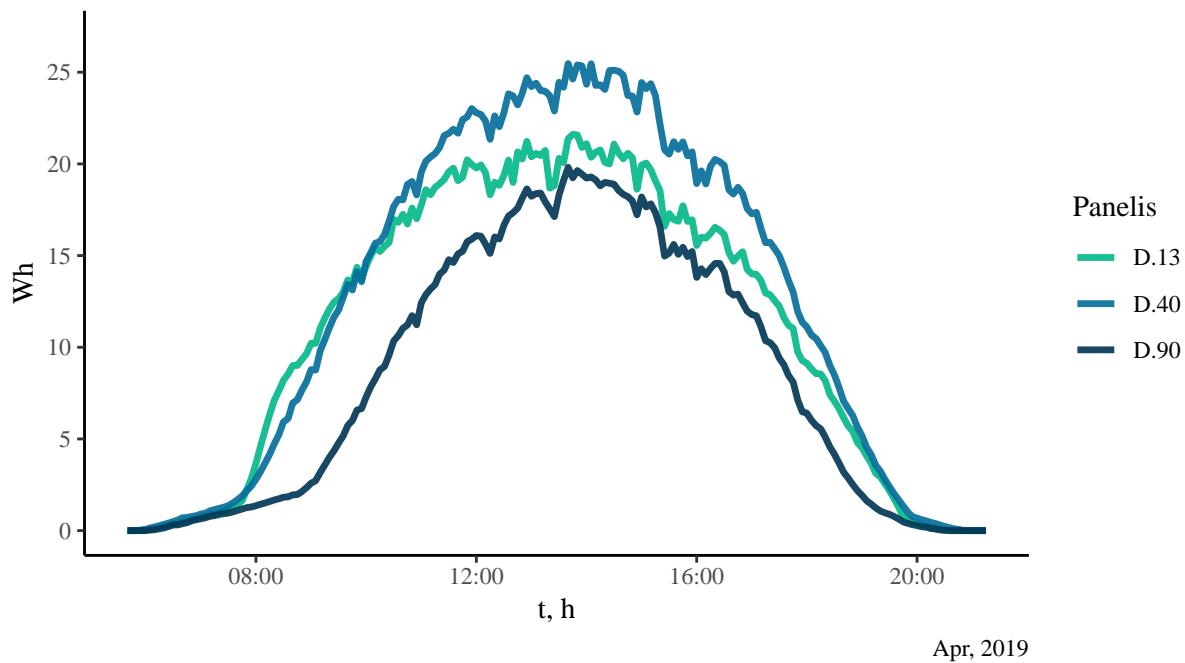
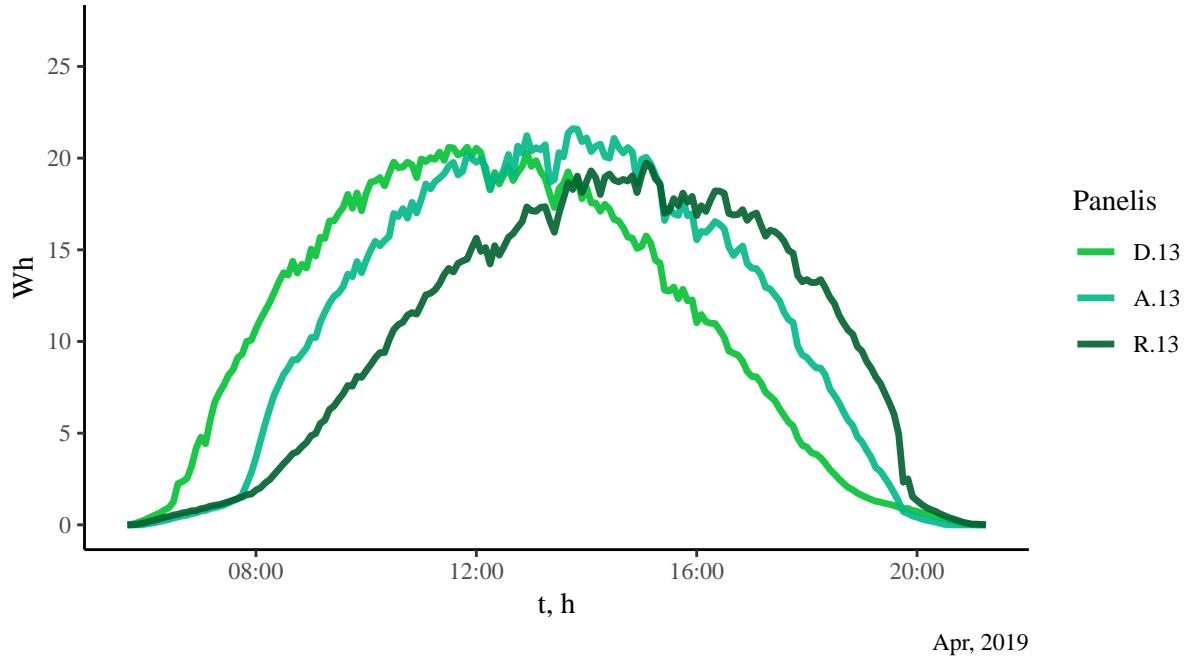
Turpmāk apskatīts Saules apstarojuma dienas sadalījums mēnešos. Kā redzams 4.7, 4.8. att., eksperimentāli noteiktais saules paneļu saražotās enerģijas dienas sadalījums sakrīt ar teorētiski prognozēto 1.4. att. kā arī labi novērojamas tā diennakts svārstības 30 dienu laikā.

4.2.5. Gada mēneša

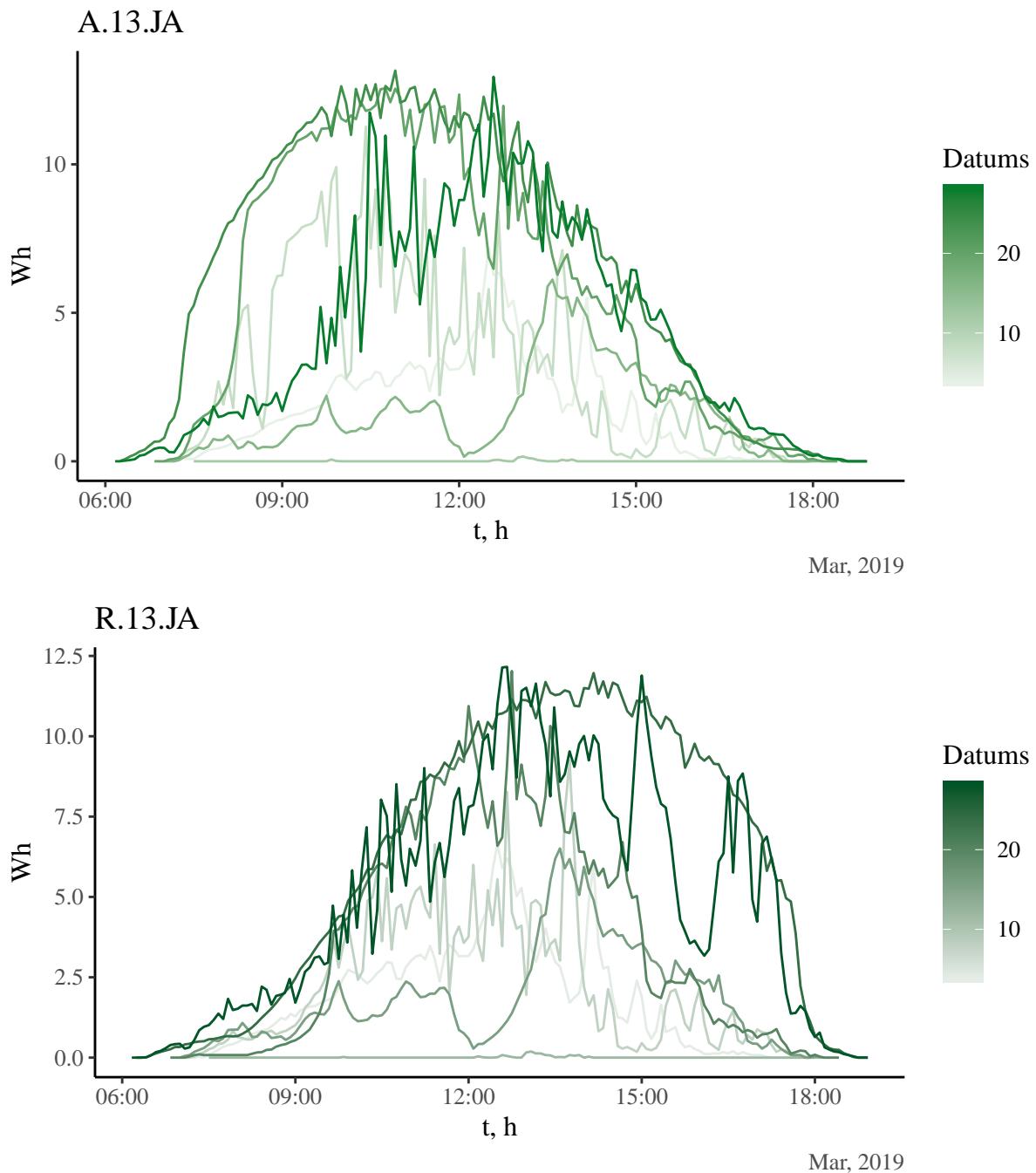
Pēc 4.9, 4.10, 4.11, 4.12. att., tiek izdarīti secinājumi par saules paneļu ražīguma atkarību no gada mēneša. Janvārī visefektīvākais panelis ir D.90, kas atbilst janvārim raksturīgajam Saules pārvietojumam – zemu pie horizonta. 4.10. att. redzams, ka februārī D.40 kļūst ražīgāks nekā D.90, tāpat redzams, ka mazāku lenķu paneli – R.13 un A.13 – proporcionāli vairāk Saules apstarojuma ir pārvērtuši enerģijā. Šī tendence novērojama arī turpmākajos mēnešos. Savukārt jau aprīlī visefektīvākā orientācija ir D.40. Visu telpisko orientāciju paneli ir pakļauti Saules diennakts pārvietojuma izmaiņas izraisītajiem efektiem uz saražotās enerģijas apjomu, kas teorētiski aprēķināti 1.2. nod.

Arī Ulbrokas saules paneļu spēkstacijas darbības analīze gada griezumā (skat. 2.3. att.) uzrāda ļoti būtisku saules paneļu saražotās enerģijas variabilitāti gada mēnešos. Maksimālais ener-

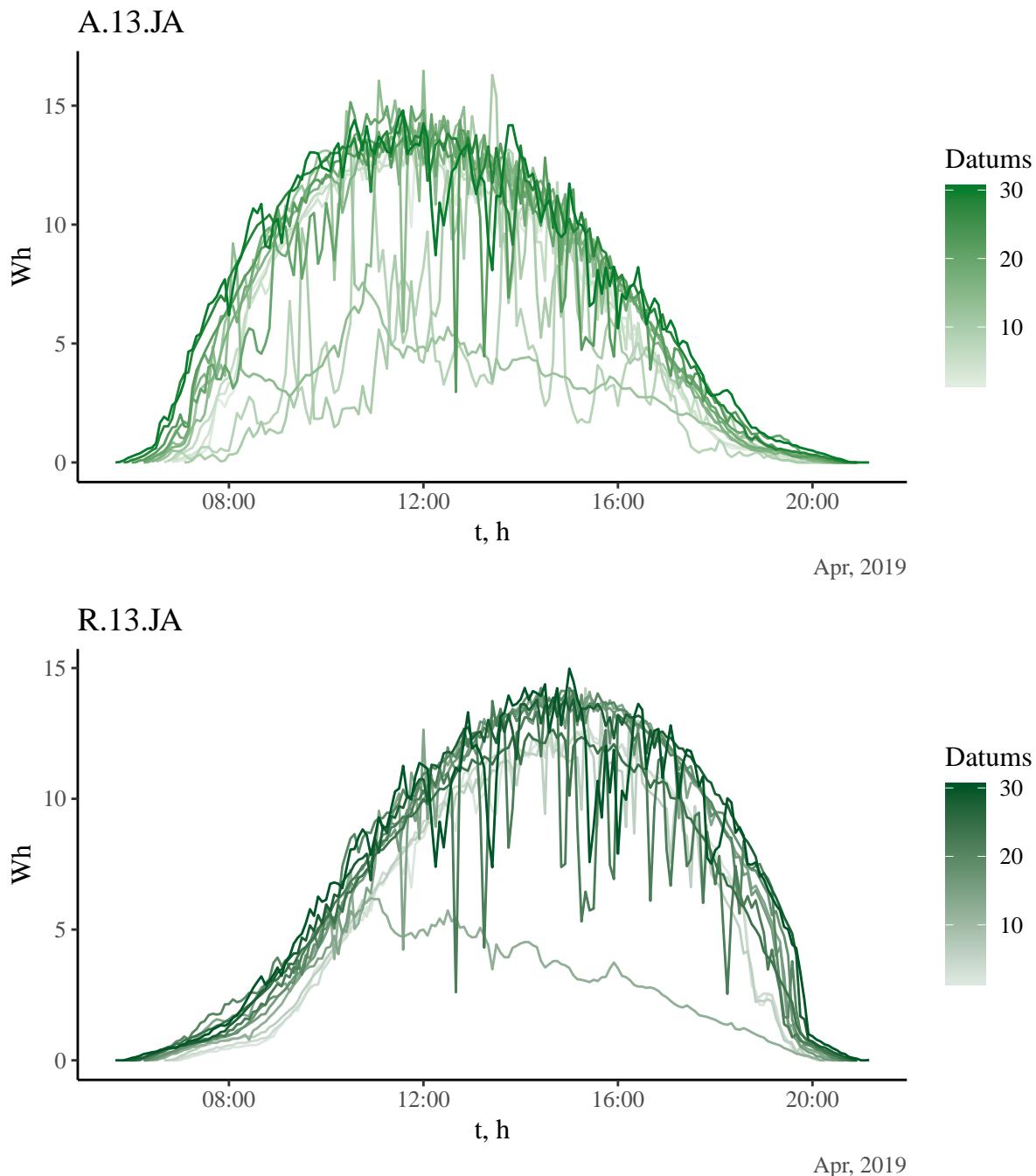
ģijas daudzums tiek saražots maijā, nedaudz mazāk citos vasaras mēnešos, bet janvārī, februārī, novembrī un decembrī saražotās enerģijas daudzums ir ļoti mazs. Šis apsvērums ir īpaši svarīgs industrializētos pielietojumos, jo ziemas mēnešos jādomā par alternatīvu enerģijas avotu.



4.6. att. Saules paneļu saražotās enerģijas dienas sadalījuma likne vidējotiem 27-30. aprīļa datiem

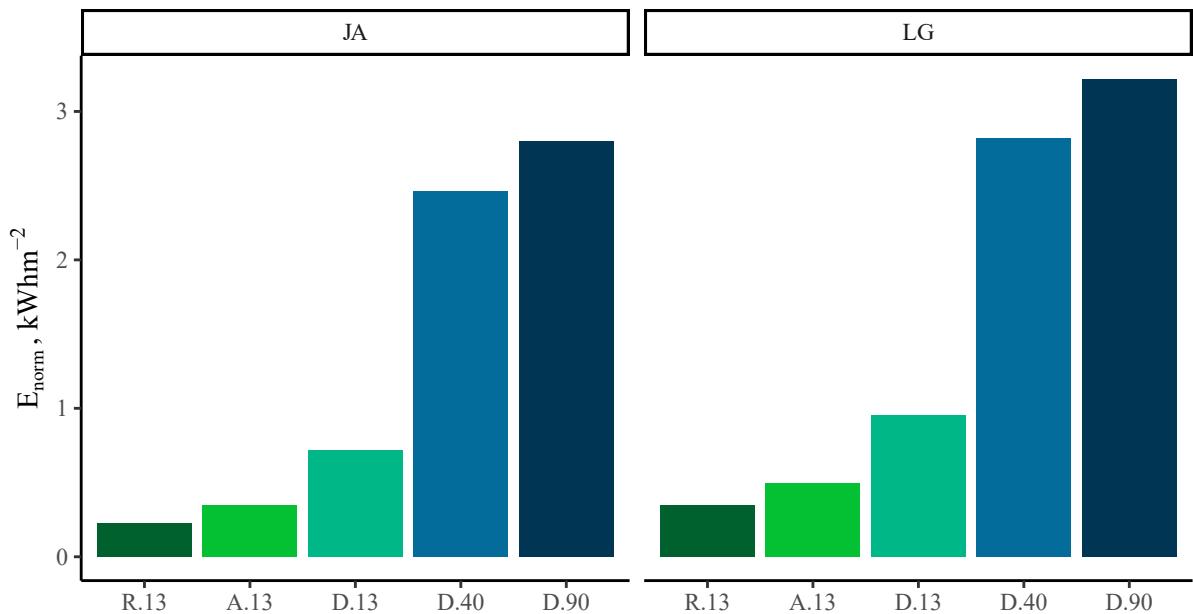


4.7. att. A un R virzienu saules paneļu 5 min intervālos integrētu jaudu dienas sadalījumi martā



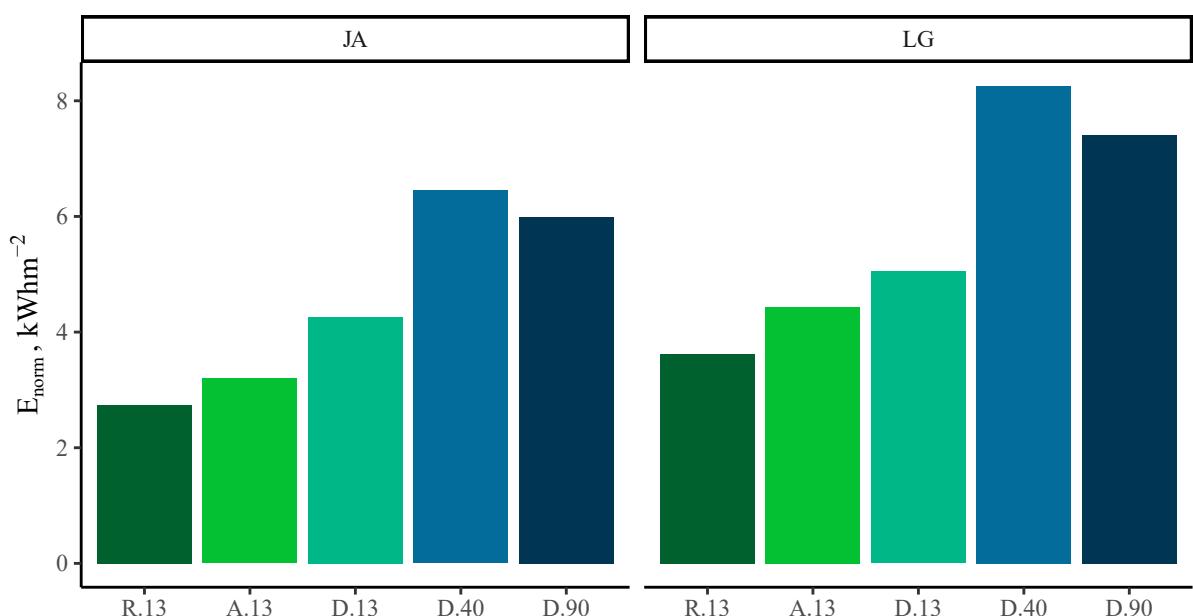
4.8. att. A un R virzieni saules paneļu 5 minūtēs vidējotu Wh dienas sadalījumi aprīlī

Jan, 2019



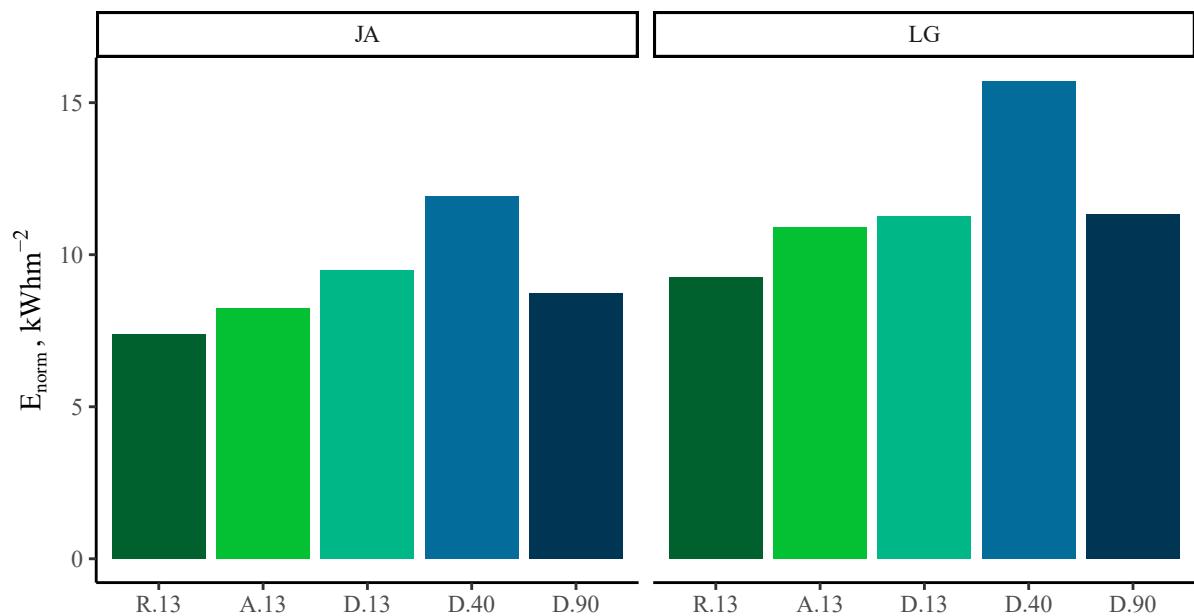
4.9. att. Saules panelētu saražotā enerģija janvārī

Feb, 2019



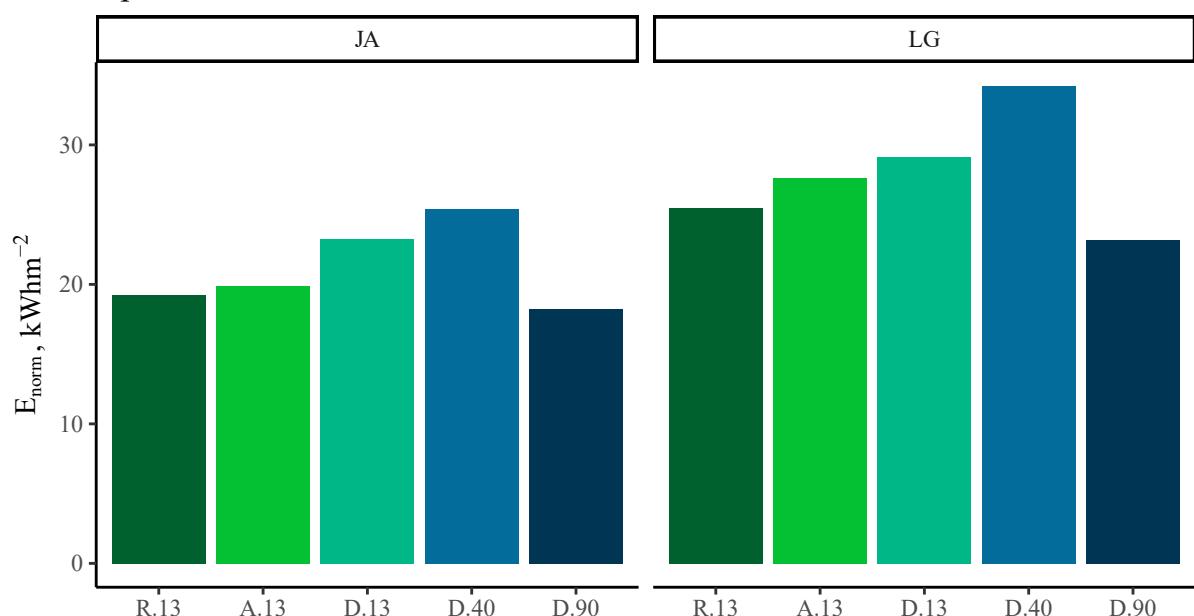
4.10. att. Saules panelētu saražotā enerģija februārī

Mar, 2019



4.11. att. Saules paneļu saražotā energija martā

Apr, 2019



4.12. att. Saules paneļu saražotā energija aprīlī

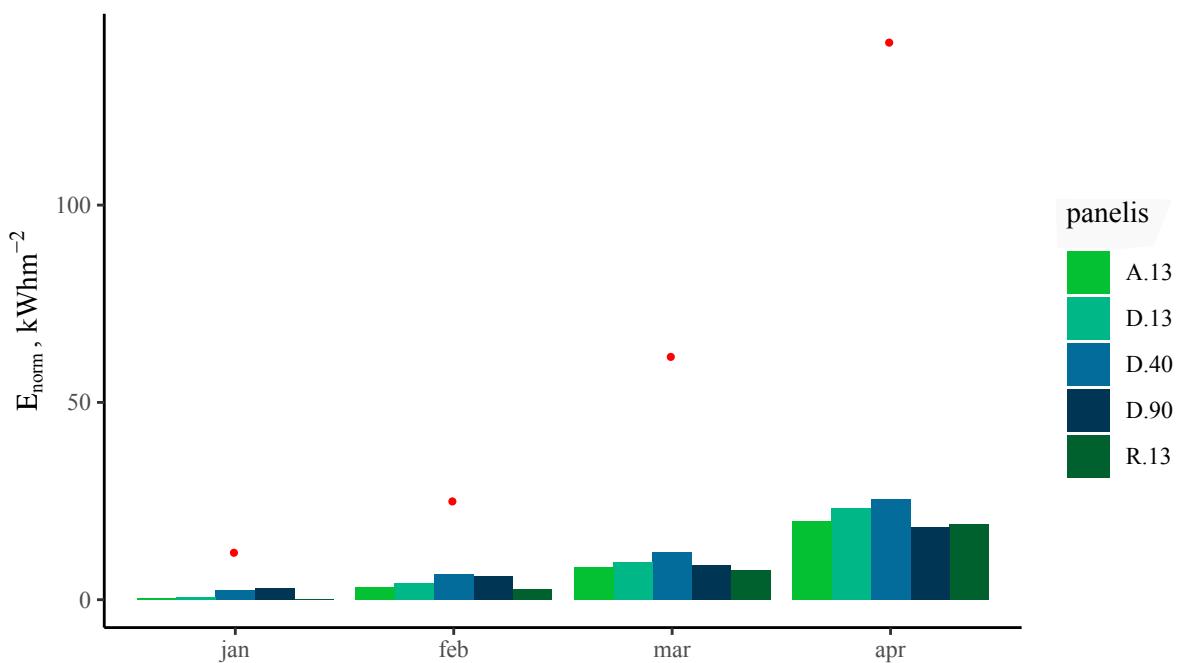
4.3. Salīdzinošā analīze

Eksperimentāli noteiktā paneļu efektivitāte (skat. 4.3. tab.) nav pretrunā ne ar ražotāju tehniskajā dokumentācijā doto, nedz teorētiski iespējamo pēc S-Q modeļa. Atšķirības tiek skaidrotas ar efektivitātes mērišanas veidu – standarta testi tiek veikti pie konstanta izstarojuma (1000 W/m^2 un 800 W/m^2) perpendikulāri saules panelim, tomēr reālā poligona apstākļos novērojama starojuma avota kustība pa debesjumu gan diennakts, gan gada ietvaros.

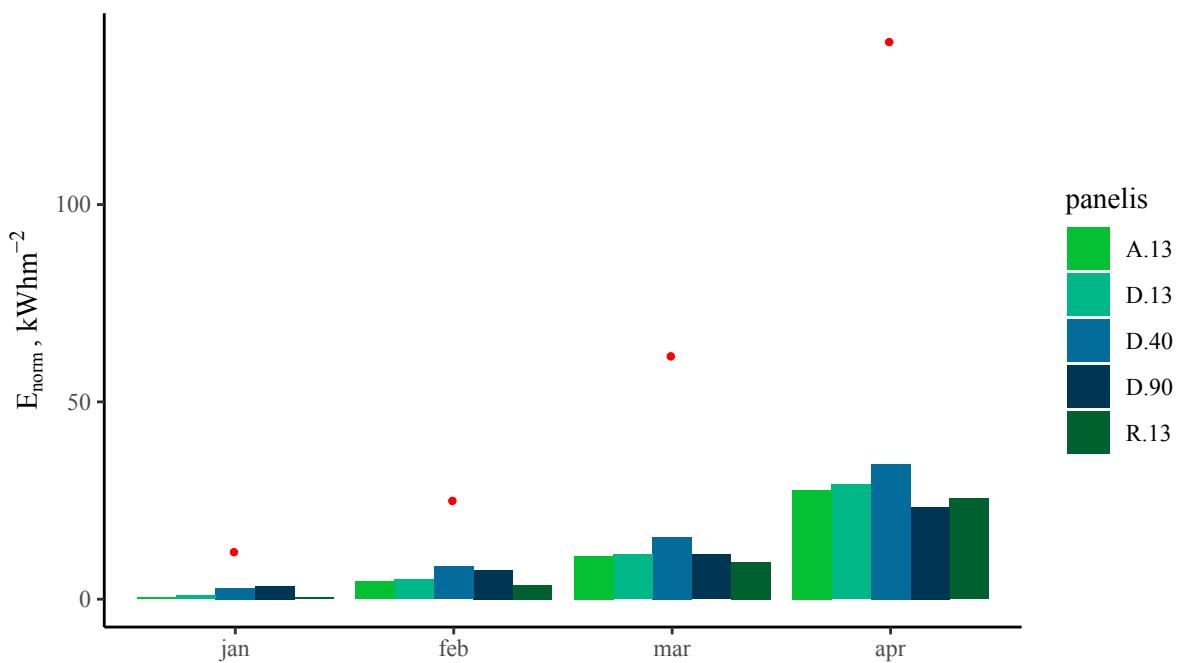
4.3. tabula

Katra paneļa eksperimentāli noteiktās efektivitātes vidējā vērtība 4 mēnešu laikā

Panelis	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90
$E_{JA}, \%$	0.11	0.10	0.14	0.21	0.18
$E_{LG}, \%$	0.15	0.13	0.17	0.26	0.23



4.13. att. JA tipa paneļu saražotais mēnesī salīdzinājumā ar eksperimentālā poligona meteostacijas saules apstarojuma datiem uz horizontālu virsmu (sarkanā krāsā)



4.14. att. LG tipa paneļu saražotais mēnesī salīdzinājumā ar eksperimentālā poligona meteostacijas saules apstarojuma datiem uz horizontālu virsmu (sarkanā krāsā)

4.4. Salīdzinājums ar citas saules paneļu spēkstacijas mērījumu rezultātiem

Tabulās 4.4. un 4.5 salīdzināta Botānisko dārzu saules paneļu saražotā enerģija 2019. gada janvārī – aprīlī ar 2017. gada Ulbrokas spēkstacijas viena paneļa saražoto enerģiju janvāra – aprīla periodā. Jāpiebilst, ka spēkstacijām atšķiras lokācijas, turklāt, spriežot pēc, 4.1. att., 2019. gadā attiecīgajos mēnešos bija krietni lielāks Saules apstarojums, kas izskaidro Ulbrokas paneļu šķietamo neefektivitāti, taču dod ieskatu sistēmas prognozējamā darbībā.

4.4. tabula

**JA tipa paneļu saražotās enerģijas salīdzinājums ar Ulbrokas spēkstacijā saražoto 2017.
gadā**

E, kWh	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	Ulbroka
jan	0.57	0.37	1.17	4.02	4.58	0.84
feb	5.23	4.48	6.98	10.54	9.79	5.62
mar	13.44	12.1	15.49	19.52	14.26	15.59
apr	32.52	31.44	38.05	41.57	29.84	25.56
E_{sum} , kWh	51.76	48.4	61.68	75.66	58.47	47.61

4.5. tabula

**LG tipa paneļu saražotās enerģijas salīdzinājums ar Ulbrokas spēkstacijā saražoto 2017.
gadā**

E, kWh	A.13	R.13	D.13	D.40	D.90	Ulbroka
jan	0.86	0.60	1.64	4.87	5.55	0.84
feb	7.65	6.26	8.72	14.26	12.80	5.62
mar	18.86	16.01	19.47	27.11	19.58	15.59
apr	47.73	43.97	50.32	59.09	40.03	25.56
E_{sum} , kWh	75.09	66.85	80.15	105.32	77.97	47.61

SECINĀJUMI

Darba laikā tika izveidota programmatūra, ar kuras palīdzību tika atlasīts, analizēts un apkopots liels datu apjoms par 10 saules panelu 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 panelu efektivitātes citu faktoru ietekmes izpratne prasa turpmākus pētījumus, it īpaši nolietojuma, putekļu, vēja, nokrišņu un citu apstākļu ietekmes izvērtēšanai. Lai iegūtu datus un veiktu analīzi pilna gada periodam, šo montiroingu ir paredzēts turpināt vismaz trīs gadus.

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] P.I. Cooper. „The absorption of radiation in solar stills”. *Solar Energy* 12.3 (1969), lpp. 333—346. ISSN: 0038-092X. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X69900474>.

- [8] U. Bethers et.al. *Mākoņainība 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>.
- [9] 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).
- [10] 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>.
- [11] 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>.
- [12] *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*. WMO-No. 407. Skatīts: 2019-05-31. World Meteorological Organization (WMO). 2017. URL: <https://cloudatlas.wmo.int/definitions-of-clouds.html>.
- [13] 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>.
- [14] 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>.

- [15] 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>.
- [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] C. Wani; K. K. 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] A. Sani; E. Warman; A. Pranata; S. Depari et.al. „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.
- [21] A. Polman. „Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges”. *Science* 352.6283 (2016). ISSN: 0036-8075. doi: 10.1126/science.aad4424. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/352/6283/aad4424.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/352/6283/aad4424>.
- [22] *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.
- [23] *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>.

- [24] *Victron Energy Product Datasheets*. Skatīts: 2019-06-01. Victron Energy B.V. 2019. URL: <https://www.victronenergy.com/support-and-downloads/datasheets>.
- [25] *User manual: LP02 Second class pyranometer*. v1606. Skatīts: 2019-06-01. Hukseflux Thermal Sensors. 2016. URL: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/LP02_manual_v1606.pdf.

PIELIKUMS

Autora rezultātu dalība konferencēs

- Zinātniski praktisks seminārs ”Ceļā uz gandrīz nulles enerģijas ēkām (gNEE) Latvijā”. *LU eksperimentālā poligona monitoringa jaunumi: energoefektivitāte un solārā enerģija.* 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).

Izveidotās datu apstrāde sistēmas darbības principu paraugs

```
1 library(lubridate)
2
3 pltMonth = function(solName){
4     colIndex = which( colnames(datSol)==solName )
5     return(data.frame(timestamp, datSol[, datSol$timestamp]))
6 }
7
8 trapezoidArea = function(x, y, t = 0, s = 0){
9     for (i in 1:(length(x)-1)){
10         yvid = (y[i] + y[i+1])/2
11         s[i] = yvid * as.numeric(difftime(x[i+1], + x[i], unit
12             ="secs"))
13         t = t+s[i]
14     }
15     return(t)
16 }
17 findIndex = function(x, lower, delta_t, upper = lower + delta_t
18 ){
```

```

18     strtIndex = which(date(x) == date(lower) & hour(x) == hour(
19         lower) & minute(x) == minute(lower))[1]
20     endIndex = which(date(x) == date(upper) & hour(x) == hour(
21         upper) & minute(x) == minute(upper))[1]
22
23     if (is.na(strtIndex)){
24         strtIndex = which(date(x) == date(lower + minutes(1)) &
25             hour(x) == hour(lower + minutes(1)) & minute(x) ==
26                 minute(lower + minutes(1)))[1]
27     }
28
29     if (is.na(endIndex)){
30         endIndex = which(date(x) == date(upper + minutes(1)) &
31             hour(x) == hour(upper + minutes(1)) & minute(x) ==
32                 minute(upper + minutes(1)))[1]
33     }
34
35     return(c(strtIndex, endIndex))
36
37 }
38
39 integrateInterval = function(x, y, delta_t, solname, from = min(
40     x, na.rm=TRUE), to = max(x, na.rm=TRUE)){
41
42     lowerLimit = from
43
44     upperLimit = lowerLimit + delta_t
45
46     itrTimes = floor(as.numeric(to - from) / as.numeric(
47         upperLimit - lowerLimit))
48
49     xres <- as_datetime(itrTimes)
50
51     yres <- numeric(itrTimes)
52
53     count = 0
54
55     while (interval(lowerLimit, upperLimit) %within% interval(
56         from, to)) {
57
58         indices = findIndex(x, lowerLimit, delta_t)

```

```

40     datInt = datTemp[indices[1]:indices[2],]
41     count = count + trapezoidArea(datInt$timestamp, datInt$  

42             solVar)/3600
43     xres[i] <- floor_date(x[indices[1]], unit = "5 mins")
44     yres[i] <- round(wh, digits=2)
45
46     lowerLimit = upperLimit
47     upperLimit = upperLimit + delta_t
48     i = i + 1
49 }
50 sumInt = data.frame("timestamp" = xres, "solVar" = yres)
51 colnames(sumInt)[2] <- toString(paste0(solname["dir"],  

52                                     solname["degree"], solname["type"]))
53
54 return(sumInt)
55 }
56
57
58
59 solNames = c("solD40", "solD13", "solA13", "solR13", "solD90")
60 types = c('JA', 'LG')
61 devices = '_PV_'
62 units = c('V', 'A', 'W')
63
64 for (solName in solNames){
65   for (type in types){
66     for (unit in units){
67       solname = paste0(solName, type, device, unit)
68       solName = interpretSolPanel(solname)
69       if (solName["unit"] == "W"){
70         datTemp = pltMonth(solname)
71         sumMin = integrateInterval(datTemp$timestamp,

```

```
    datTemp$solVar, dminutes(5), "min", solname)
67 }
68 }
69 }
70 }
```

Bakalaura darbs „**Saules panelu 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 nodalā .

Dekāna pilnvarotā persona: _____

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

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

Komisijas sekretārs: _____