

# Solāro paneļu faktiskās efektivitātes izpēte

## Latvijas klimatā

Informācija sagatavota izmantojot Daniela Heinča bakalaura darba (vadītājs Andris Jakovičs) materiālus\*

### SATURS

IEVADS.....	2
1. LATVIJAS KLIMATS.....	4
1.1 Solārā starojuma intensitāte .....	4
1.2 Mākoņainība Latvijā .....	4
1.3 Temperatūra Latvijas klimatā .....	5
2. SOLĀRIE PANEĻI UN TO DARBĪBAS PRINCIPI.....	7
3. SOLĀRO PANEĻU SISTĒMA LU BOTĀNISKAJĀ DĀRZĀ.....	9
3.1 Solāro paneļu specifikācija.....	9
3.2 Solāro paneļu izvietojums .....	9
3.3 Datu ievākšana un analīze .....	11
4. REZULTĀTI .....	15
4.1 Solāro paneļu saražotā enerģija .....	16
4.2 Solāro paneļu efektivitāte atkarībā no paneļa tipa .....	19
4.3 Solāro paneļu efektivitāte atkarībā no telpiskās orientācijas .....	19
4.4 Solāro paneļu efektivitāte atkarībā no virsmas temperatūras.....	20
4.5 Solāro paneļu faktiskā efektivitāte .....	21
5. Secinājumi .....	23
Izmantotās literatūras un avotu saraksts.....	24

\* Darbs tika izstrādāts Eiropas Reģionālās attīstības fonda projekta Nr. 1.1.1.1./19/A/102 „Kompleksu risinājumu izstrāde un aprobācija starojuma kapilāro siltummaiņu optimālai iekļaušanai gandrīz nulles enerģijas ēku sistēmās un primārās enerģijas patēriņa apkurei un dzesēšanai samazināšanai”, ko realizē Latvijas Universitāte sadarbībā ar SIA “Hydrokapillar Tech”, ietvaros.

## IEVADS

Lai samazinātu siltumnīcas gāzu pieplūdumu atmosfērai, aizvien vairāk uzmanības tiek veltīts atjaunojamajiem enerģijas avotiem [1]. Viens no Latvijas apstākļos perspektīviem risinājumiem ir saistīts ar zemes, ūdens vai gaisa siltumsūkņu izmantošanu, kas uz 1 kWh patērētās elektroenerģijas atkarībā no sistēmas veida un citiem apstākļiem var saražot līdz pat 7 kWh siltumenerģijas. Maksimālā siltumsūkņu efektivitāte var tikt sasniegta darbinot tos režīmā ar mazāku patērētāja gala temperatūras līmeni. Tādēļ būtiski ir izmantot telpu apsildes sistēmas ar zemāku siltumnesēja temperatūru, t.i., tradicionālos sildķermeņus (piem., konvektorus, kuru darba temperatūra ir virs 50°C), aizvietot ar zemas temperatūras siltummaiņiem, (piem., kapilāro siltummaiņu sistēmu ar siltumnesēja temperatūru zem 30°C). Papildus ieguvums siltumnīcas gāzu emisijas samazināšanas aspektā var tikt sasniegts, ja šos siltumsūkņus pilnībā vai daļēji darbina ar elektrību, kas iegūta no atjaunojamiem resursiem – Saules, vēja vai ūdens.

Tādējādi viens no plaši izmantotajiem atjaunojamās enerģijas avotiem ir Saules starojums. Starp 2004. un 2019. gadu Eiropas savienībā tā daļa elektrības, kas tika ģenerēta no atjaunojamajiem resursiem palielinājās no 9.6% līdz gandrīz 19.7%. Šo pieaugumu galvenokārt veidoja intensīva vēja un Saules enerģijas izmantošana [2]. Kā papildus faktoru var pieminēt, to, ka solāro paneļu uzstādīšana un uzturēšana ir salīdzinoši vienkārša. Viens no lielākajiem solāro paneļu uzstādītājiem kā Baltijas valstīs tā arī Latvijā ir uzņēmums *Elekturm*. Līdz 2020. gada septembrim šis uzņēmums Latvijas teritorijā bija noslēdzis 214 līgumus par 3874 paneļu uzstādīšanu, kuru kopējā jauda sasniedz 1067 kW [3]. 2020. gadā Latvija spēra soli solāro paneļu izmantošanas veicināšanas virzienā, atceļot Elektroenerģijas obligātā iepirkuma komponentes (OIK) maksājumu enerģijai, kas ir iegūta no solārajiem paneļiem [3].

Šajā praktiski orientētajā pētījumā tiek apskatīti divu tipu solārie paneļi – monokristāliskie (MC) un polikristāliskie (PC). Monokristāliskie paneļi parasti uzrāda augstāku efektivitāti nekā citu tipu paneļi karstās un saulainās valstīs, kā, piemēram, Ēģiptē [4]. Prognozēt šo paneļu efektivitāti klimatā ar zemākām temperatūrām un augstu mākoņainību nav vienkārši un par to vēl tiek veikti pētījumi [5]. Paneļu efektivitāti ietekmē ne tikai klimats, bet arī tas pret kuru debespusi tie ir pagriezti un kādu leņķi tie veido ar horizontu. Visu šo faktoru ietekme tiek analizēta pētījumā.

Pētījuma mērķis ir noteikt kā polikristālisko un monokristālisko solāro paneļu ražotāju standarta testa apstākļos noteiktā efektivitāte atšķiras no efektivitātes konkrētos klimatiskos

apstākļos. Darbā tiek analizēta solāro paneļu faktiskā efektivitāte un tās atkarība no dažādiem parametriem - telpiskās orientācijas, paneļu tipa, sezonas, paneļu pārkarsuma u.c.

Efektivitāte ietekmē saražotās enerģijas daudzumu un tādēļ, ja ir zināma faktiskā efektivitāte konkrētajos klimatiskajos apstākļos, ir iespējams veikt precīzāku izvērtējumu tam, cik ilgā laikā ir iespējams atgūt solārajos paneļos veikto ieguldījumu.

#### **Pētījumu veicot, tika**

- izveidota automatizēta solāro paneļu ekspluatācijas un ražības datu lejupielādes programma;.
- izveidota bezvadu sistēma temperatūras mērīšanai uz solārajiem paneļiem;
- uzkrāti, apkopoti un izanalizēti solāro paneļu jaudas un temperatūras dati dažādos to ekspluatācijas apstākļos laika periodā no 2018 – 2021.g.;
- salīdzināta faktiski noteiktā solāro paneļu efektivitāte Rīgas apstākļos ar standartizēti noteikto;
- Izstrādātas rekomendācijas solāro paneļu uzstādīšanas un lietošanas interesentiem.

# 1. LATVIJAS KLIMATS

## 1.1 Solārā starojuma intensitāte

Kopējā solārā starojuma intensitāte (*Total Solar Irradiance*) apraksta to enerģijas daudzumu, ko saņem Zemes atmosfēras augšējā slāņa laukuma vienība perpendikulāri starojuma izplatīšanās virzienam no Saules [6]. Šo lielumu mēra vatos uz kvadrātmetru. Tas ir atkarīgs no uz Saules virsmas notiekošo kodolreakciju intensitātes. Laika gaitā uz Saules virsmas veidojas tumšāki apgabali, kuri izstaro starojumu visā spektrā ar mazāku intensitāti nekā vidēji. Šos apgabalus sauc par saules plankumiem [7]. To skaits variē Saules ciklu laikā. Vislabāk novērotais ciklu veids ir 11 gadu Saules aktivitātes cikls. Šī cikla ietvaros kopējās solārās intensitātes maksimālā vērtība mainās robežās  $\pm 0.1\%$  [7].

Vidējā gada solārā starojuma intensitāte ir  $1361 \text{ W/m}^2$ . Tomēr dēļ Zemes atmosfēras absorbcijas īpašībām un starojuma izkliedes, solārā enerģija, ko saņem horizontāla laukuma vienība uz Zemes virsmas ir mazāka. Šo lielumu sauc par kopējo solārā starojuma intensitāti uz horizontālas virsmas (*Global Horizontal Irradiance, GHI*) [8]. To ir iespējams aprēķināt, ja ir zināmi divi lielumi – tiešā normālā starojuma intensitāte (*Direct Normal Irradiance, DNI*) un horizontāli izkliedētā starojuma intensitāte (*Diffuse Horizontal Irradiance*). Tiešā normālā starojuma intensitāte apraksta to solārās enerģijas daļu, kas tiek saņemta no perpendikulāri krītošiem Saules stariem un laukuma vienību uz Zemes virsmas [8]. Horizontāli izkliedētā starojuma intensitāte apraksta visu atlikušo enerģiju, ko saņem laukuma vienība uz Zemes virsmas. Kopējo solārā starojuma intensitāti uz horizontālas virsmas nosaka formula

$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos(z) \quad (1)$$

kur mainīgais  $z$  apzīmē Saules zenīta leņķi (leņķi starp saules stariem un vertikāli)

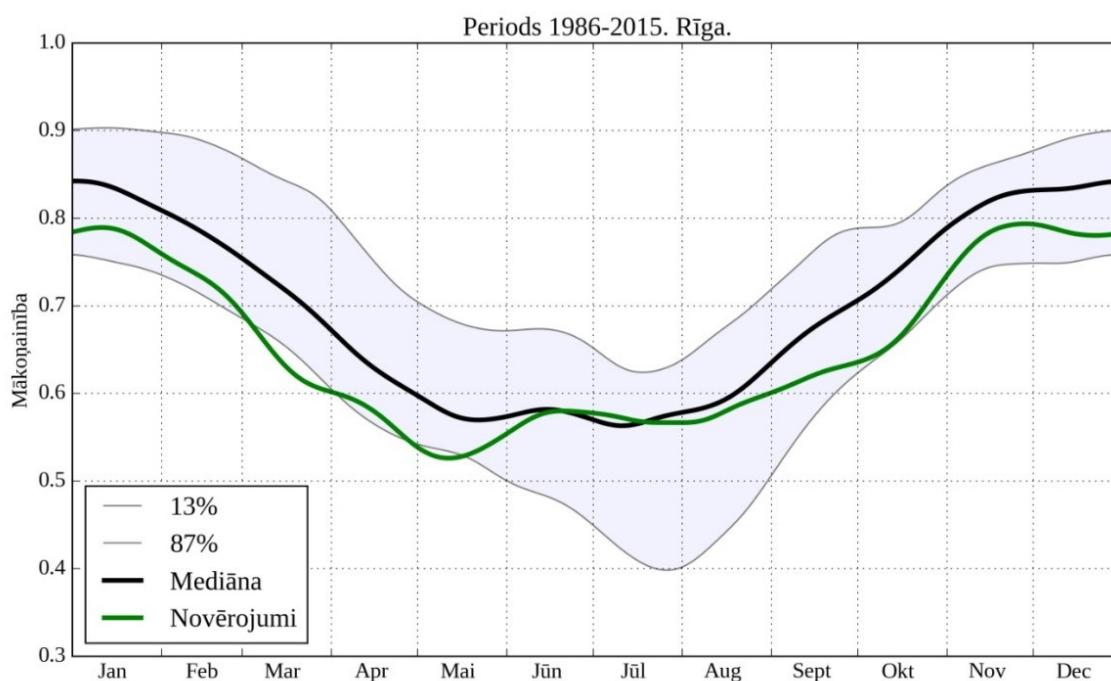
Apgabalos, kur kopējā solārā starojuma intensitāte uz horizontālas virsmas ir augstāka attiecīgi tiek saņemts lielāks daudzums Saules enerģijas. Šis lielums ir atšķirīgs dažādās pasaules daļās. Tuvāk ekvatoram ir novērojama augstāka solārā intensitāte, bet tālāk uz zemeslodes poliem tā ir zemāka [9].

Gada laikā kopumā Latvijā saule spīd vidēji 1700 – 2000 stundas. Mēnesis, kurā saule spīd visvairāk tipiski ir jūlijs – tajā Saule spīd apmēram 300 stundas. Mēnesis, kurā saules gaismas daudzums ir vismazākais ir decembris – tajā saules spīdēšanas ilgums ir apmēram 25 stundas [1].

## 1.2 Mākoņainība Latvijā

Mākoņainība ietekmē tiešā normālā starojuma intensitāti un horizontāli izkliedētā starojuma intensitāti. To mēra skalā no 0 līdz 1, kur 0 apzīmē pilnīgi skaidru laiku un 1 apzīmē

pilnīgi apmākušos laiku. Vidējā mākoņainības vērtība Rīgā gada laika variē no 0.55 maijā līdz 0.90 decembrī (skat. 1.1 att.). Tas liecina, ka mākoņainība ir ļoti nozīmīgs faktors solāro paneļu faktiskās efektivitātes noteikšanai. Augsta mākoņainība nelabvēlīgi ietekmē enerģijas daudzumu, ko saražo solārie paneļi [10]. Tomēr pie vidēji zemas mākoņainības, piemēram, 0.30 tiešā normālā starojuma intensitātes samazinājums tiek kompensēts ar horizontāli izkliedētā starojuma intensitātes pieaugumu un ir iespējams pat kopējā solārā starojuma intensitātes uz horizontālas virsmas pieaugums [10]. Tas nozīmē, ka mākoņainības ietekme uz kopējo solārā starojuma intensitāti uz horizontālo virsmu nav triviāla.



1.1 att. Mākoņainības sadalījums pa mēnešiem, Rīga, 1986.-2015. gads [11].

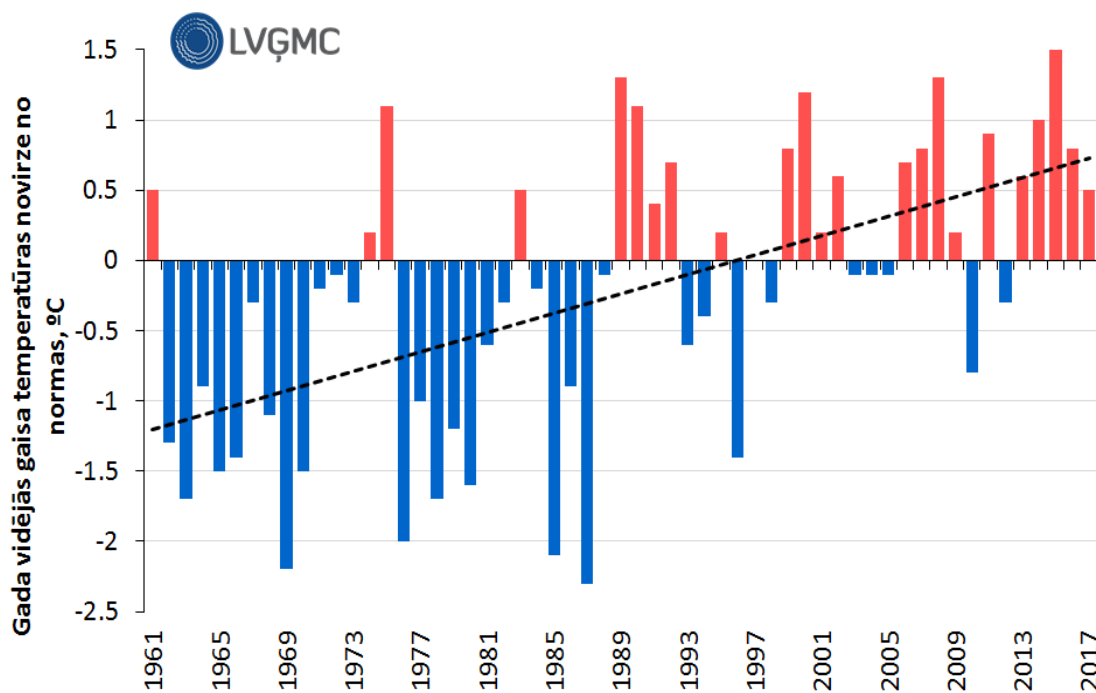
### 1.3 Temperatūra Latvijas klimatā

Ilgtermiņa temperatūras novērojumus parasti apraksta ar gada vidējās gaisa temperatūras klimatisko standarta normu, kas ir 30 gadu novērojumu vidējais rādītājs. Vidējā gaisa temperatūra gadā Latvijā pēc 1981.-2010. gada normas ir +6.4°C. Visaugstākā gada vidējā temperatūra +7.9°C Latvijā ir Rīgā. To izraisa pilsētas “siltumsalas” efekts [12].

Atsaucoties uz Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra publiski pieejamo informāciju: “Gada gaitā vissiltākais mēnesis ir jūlijs, tā vidējā gaisa temperatūra ir +17,4 °C, bet vidējā maksimālā +22,3 °C. Savukārt visaukstākais gada mēnesis ar vidējo gaisa temperatūru -3,7 °C un vidēji minimālo gaisa temperatūru -6,6 °C ir februāris.” [12].

Novērojumi norāda uz to, ka laika periodā no 1961. gada līdz 2016. gadam pastāv vienmērīga gaisa temperatūras paaugstināšanās tendence. Vidējā gaisa temperatūras klimatiskā

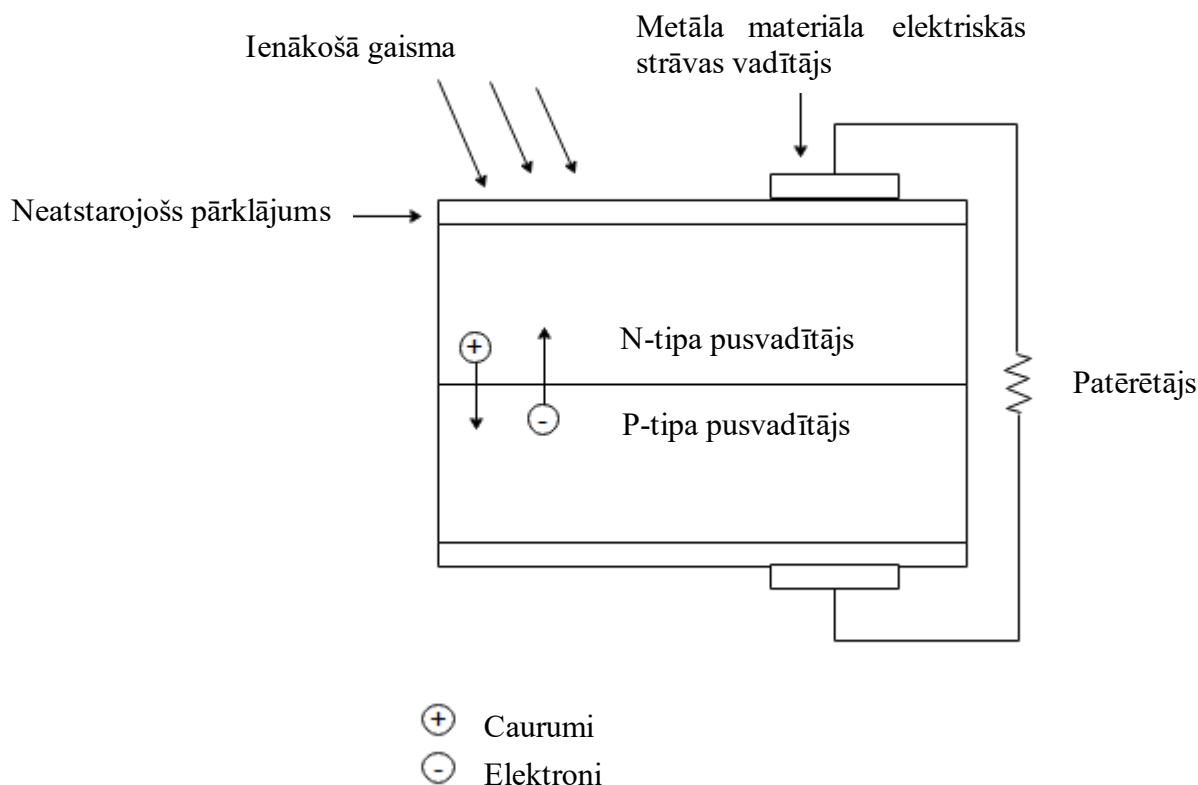
standarta norma (1981.-2010. gads) ir par 0.7 °C augstāka nekā klimatiskā referenču perioda (1961.-1990. gads) gada vidējā gaisa temperatūra [12]. Gaisa temperatūra ir būtiska solāro paneļu efektivitātes izpētei, jo paneļu maksimālā jauda ir atkarīga no to virsmas temperatūras, kas savukārt ir saistīta ar apkārtējās vides temperatūru. Ir svarīgi novērot arī temperatūras izmaiņas ilgtermiņa tendences, jo solāro paneļu dzīves cikls var ilgt līdz pat 20 gadiem.



1.2 att. Gada vidējās gaisa temperatūras novirze no klimatiskās standarta normas [12]

## 2. SOLĀRIE PANEĻI UN TO DARBĪBAS PRINCIPI

Solārie paneļi sastāv no fotoelementiem. Šie fotoelementi nodrošina to, ka enerģija, kas no Saules tiek saņemta fotonu plūsmas veidā, tiek pārvērsta par elektrisko enerģiju. Visbiežāk fotoelementi sastāv no divu tipu pusvadītāju apvienojuma jeb p-n pārejas, ko mēdz dēvēt arī par elektronu – caurumu pāreju [13] (skat. 2.1 att.). Šī pāreja strāvu vada tikai vienā virzienā. N-tipa pusvadītājā lādiņa nesēji ir elektroni kamēr p tipa pusvadītājā lādiņu pārvieto caurumi.



2.1 att. Fotoelementa shēma [14]

Lai izveidotu šādus pusvadītājus visbiežāk tiek izmantota dopēšanas metode jeb specifisku piejaukumu pievienošana konkrētajiem materiāliem. N-tipa pusvadītāju iegūst silīcija kristālam pievienojot nelielās koncentrācijās V grupas ķīmiskos elementus. Silīcija kristāls spēj veidot četras kovalentās saites, vienu ar katru blakus esošo silīcija atomu [13]. Pievienojot tam V grupas elementu, piemēram, arsēnu, rodas situācija, kurā ir elektrons, kurš neveido kovalento saiti, tātad, lai tas pārvietotos tam ir nepieciešams mazāk enerģijas nekā tiem elektroniem, kuri piedalās kovalentās saites veidošanā [13].

Lai iegūtu p-tipa pusvadītāju, ir jāiegūst situācija, kurā starp atomiem pastāv nenoslēgta kovalentā saite. To var panākt silīcijam piemaisot III grupas ķīmisko elementu, piemēram, alumīnija atomus. Alumīnijs spēj veidot tikai trīs kovalentās saites, tādēļ, kad tas atradīsies starp silīcija atomiem, pastāvēs viena nepabeigta kovalentā saite, jeb būs viena elektrona iztrūkums, ko sauc par caurumu.

Savienojot n-tipa un p-tipa pusvadītājus iegūstam n-p pāreju. Fotoefekta dēļ, elektroni n-tipa pusvadītājā pamet valences zonu un nonāk vadītspējas zonā. Pateicoties pusvadītāju struktūrai elektroni nonāk p-tipa pusvadītājā un tiek iegūta elektronu plūsma.

Solārie paneļi pārvērš enerģijā tikai daļu no saņemtās solārās enerģijas. Tikai elektromagnētiskajiem viļņiem ar garumu 380-750 nm (redzamajai gaismai) piemīt atbilstošā enerģija, lai ierosinātu fotoefektu, ko var izmantot n-p tipa pārejā [15]. Šī spektra daļa sastāda 47% no kopējā solārā starojuma spektra. Pārejā enerģija tiek absorbēta kā siltums. Pašlaik notiek pētījumi par jauna tipa solārajām šūnām, kuras sastāv no indija, gallija, slāpekļa pusvadītājiem. Šāda tipa solārās šūnas fotoefekta ierosināšanai spēj izmantot gandrīz visu solāro spektru [16].

Pētījuma empīriskajā daļā tiek salīdzināti divi solāro paneļu tipi – monokristāliskie (MC) un polikristāliskie (PC). Šie paneļu tipi tika izvēlēti, jo 90% no visiem pašlaik izmantotajiem solārajiem paneļiem ir monokristāliskie vai polikristāliskie paneļi [17].

Polikristāliskajos paneļos solārā šūna sastāv no vairākiem silīcija kristāliem, kamēr monokristāliskajos paneļos – no viendabīga silīcija kristāla [18]. Tas ir iemesls kādēļ parasti monokristāliskajiem solārajiem paneļiem ir augstāka efektivitāte nekā polikristāliskiem, tomēr tas ir atkarīgs no silīciju kristālu kvalitātes un tīrības pakāpes [18].

Monokristāliskās solārās šūnas tiek iegūtas sadalot viendabīgu silīcija kristālu 0.75 mm plānās kārtiņās un tad tās apgriežot, lai iegūtu nepieciešamo formu [19]. Lai iegūtu viendabīgu silīcija kristālu, visbiežāk tiek izmantota Čohraļska metode (*Czochralski method*) [20]. Augstākā monokristālisko solāro silīcija šūnu efektivitāte ir 26.7%, kamēr polikristāliskajām silīcija solārajām šūnām tā ir 23.3% [21]. Teorētiskā maksimālās efektivitātes robeža silīcija kristālu solārajām šūnām ir 29% [22]. Polikristāliskajiem solārajiem paneļiem ir zemāka efektivitāte, jo silīcija kristāli nav tik labi izvietoti kā monokristāliskajās silīcija solārajās šūnās un tas noved pie izteiktākiem iekšgraudu defektiem un papildus efektivitātes zudumiem graudu robežu defektu dēļ [23].

### 3. SOLĀRO PANEĻU SISTĒMA LU BOTĀNISKAJĀ DĀRZĀ

#### 3.1 Solāro paneļu specifikācija

Rīgā, Latvijas universitātes Botāniskajā dārzā ēku energoefektivitātes testēšanas poligonā ([www.eem.lv](http://www.eem.lv)) 2018. gada nogalē tika uzstādīta 10 solāro paneļu sistēma, ko veido divu tipu paneļi - JAP60-275/4BB (PC) [24] un LG365Q1C-A5 (MC) [25]. Paneļu tehniskie pamatdati sniegti tabulā 3.1. Tur norādītie efektivitātes koeficienti ir iegūti no ražotāju sagatavotajām tehniskajām specifikācijām un ir noteikti standartizētos testēšanas apstākļos (*standart test conditions*): pie 25°C apkārtējās vides temperatūras un ar nemainīgu solārā starojuma intensitāti 1000 W/m<sup>2</sup>.

3.1 tabula

**Paneļu tipu salīdzinājums [17] [18]**

Abreviatūra	JA	LG
Modelis	JAP60-275/4BB	LG365Q1C-A5
Paneļa tips	Polikristālisks	Monokristālisks
Virsmas laukums, m <sup>2</sup>	1.64	1.72
Efektivitāte, %	16	20
Temp. koef. P <sub>max</sub> , %/°C	-0.41	-0.30
Maksimālā jauda, W	200	275

Atsaucoties uz ražotāju norādītajām tehniskajām specifikācijām ir sagaidāms, ka LG tipa paneļi uzrādīs augstākus rādītājus dienās ar augstu solārā starojuma intensitāti, kamēr JA labāki rādītāji iespējami dienās ar zemāku solārā starojuma intensitāti jeb daļēji mākoņainās dienās [24],[25].

#### 3.2 Solāro paneļu izvietojums

Solāros paneļus, kuri uzstādīti Latvijas Universitātes Botāniskajā dārzā, pēc to telpiskās orientācijas var iedalīt divās grupās – 13° leņķī pret horizontu un dienvidu virzienā dažādos leņķos orientētie. Turpmāk tekstā paneļi tiks aprakstīti izmantojot pierakstu AB, kur A apzīmē debess pušu virzienu, kurā ir vērsts panelis, bet B apzīmē paneļa leņķi pret horizontu:

- 13° leņķī – A13, R13, D13
- Vērsti virzienā uz dienvidiem – D13, D40, D90



### 3.2.1 att. Saules paneļu novietojums Latvijas Universitātes Botāniskajā dārzā

Šādi paneļu izvietojumi tika izvēlēti ņemot vērā optimālos leņķus saules paneļiem Latvijas ģeogrāfiskajā atrašanās vietā dažādos gadalaikos. Teorētiski optimālo orientāciju, lai saņemtu maksimāli daudz solarās enerģijas, iegūst tos vēršot virzienā uz dienvidiem ar atšķirīgu leņķi pret horizontu dažādos gadalaikos - ziemā tie ir  $80^\circ$ , pavasarī un rudenī  $57^\circ$  un vasarā  $34^\circ$  [26]. Optimālais leņķis fiksētas orientācijas gadījumā Rīgas platuma grādos, ņemot vērā solārā starojuma izmaiņas dažādos gadalaikos, ir  $46.42^\circ$  pret horizontu. Tas noteikts pēc sekojošās formulas [27].

$$\beta = 0.7 \cdot \varphi + 3.1 \quad (2)$$

kur  $\beta$  apzīmē optimālo paneļa leņķi pret horizontu visa gada laikā,  $\varphi$  apzīmē paneļa uzstādīšanas vietas ģeogrāfisko platumu grādos.

Šī formula ir balstīta uz empīrisku novērojumu datiem un ņem vērā atmosfēras izkliedes ietekmi uz solāro starojuma intensitāti dienas laikā. Tomēr formula sniedz tikai aptuvenu priekšstatu par optimālo solāro paneļu leņķi pret horizontu, jo paneļu saražotās enerģijas

daudzums nav atkarīgs tikai no tiešā saņemtā solārā starojuma daudzuma, bet arī no apkartējās vides temperatūras un citiem parametriem. Kā vienu no citiem parametriem var pieminēt sniegu. Uz paneļiem, kuru leņķis pret horizontu ir neliels, konkrētās sistēmas gadījumā  $13^\circ$ , var novērot vienmērīgas sniega segas uzkrāšanos ziemas mēnešos, bet gadījumos, kad leņķis ir  $40^\circ$ , var novērot daļēju sniega segas uzkrāšanos, kas samazina solārā starojuma intensitātes daļu, kas nonāk līdz saules paneļiem (skat. att. 3.2.2).



3.2.2 att. Daļēja sniega sega uz D40 saules paneļiem

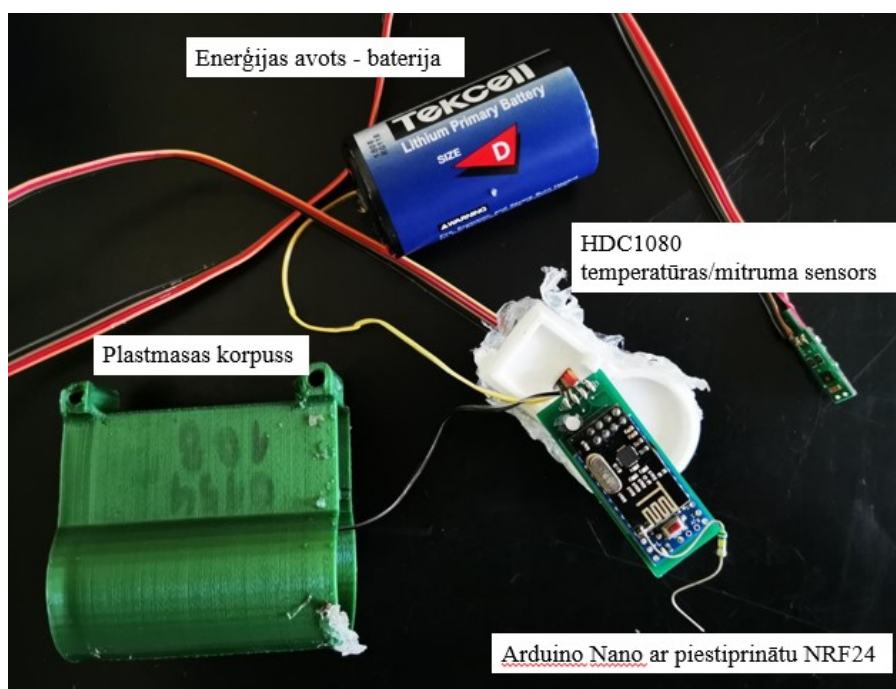
### 3.3 Datu ievākšana un analīze

Dati no katra saules paneļa reālā laikā tiek uzkrāti un attēloti *Victron* attālinātās pārvaldības vietnē (*Victron Remote Management Portal*). Šajā pētījumā tika izstrādāta datorprogramma programmēšanas valodā *Python*, kas katras dienas beigās automātiski veic CSV tipa faila lejupielādi no *Victron* attālinātās pārvaldības vietnes. *Victron* attālinātās

pārvaldības vietnē nav iespējams veikt automātiskas datu lejupielādes pieprasījumu, tādēļ izveidotā datorprogramma simulē lietotāja rīcību - tā manuāli autentificējas portālā, ievadot atbilstošo lietotājvārdu un paroli, pāriet uz pareizo lapas sekciju un veic datu lejupielādi. Kad dati ir lejupielādēti uz lokālās iekārtas, tie tiek augšupielādēti uz Latvijas Universitātes Skaitliskās modelēšanas institūta servera. Papildus tika izstrādāta datorprogramma datu atdalīšanas nolūkam. Datu fails, kurš katru nakti tiek lejupielādēts no *Victron* attālinātās pārvaldības vietnes, sevī satur 268 mainīgos parametrus. Lai optimizētu datu analīzi, datorprogramma atlasa 11 mainīgos parametrus, kuri ir aktuāli šī darba ietvaros – katra paneļa jaudas rādītāju un laiku, kurā tas ir piefiksēts, bet nevajadzīgie parametri tiek izdzēsti. Lejuplāde nepieciešama arī tādēļ, ka dati *Victron* vietnē tiek uzglabāti tikai 6 mēnešus.

Ievāktu datu analīzes procesā tika konstatēts, ka datu punkti nav ar vienmērīgiem laika intervāliem starp tiem, tādēļ tika veikta datu vidējošana pa minūtēm. Datos tika piefiksēti arī vairākas minūtes ilgi pārtraukumi, kuru laikā paneļu jauda tika uzrādīta vienāda ar 0. Šie jaudas kritumi, bija ļoti strauji, kas liecina, ka tos radīja kāda tehniska kļūme sistēmā nevis mākoņainība. Šis faktors ietekmēja rezultātu precizitāti un radīja nepieciešamību veikt koriģējošas darbības.

Lai fiksētu saules paneļu virsmas temperatūru 2020. gada augusta beigās uz paneļiem tika uzstādīti bezvadu temperatūras sensori. Katrs uzstādītais sensors sastāv no baterijas, ar 3D printeri drukāta korpusa, *Arduino Nano* [28], NRF24 [29] moduļa un HDC1080 temperatūras/mitruma sensora [30] (skat. att. 3.3.1). Katrs sensors tika atbilstoši sagatavots, programmēts un uzstādīts ilgtermiņa monitoringa nodrošināšanai.



3.3.1 att. Temperatūras sensors ar elektronikas plati, barošanas avotu un korpusu.

Pie katra solārā paneļa virsmas, no apakšas tika piestiprināts un hermetizēts HDC1080 temperatūras/mitruma sensors. Šis sensors ir savienots ar cietā korpusā ievietotu *Arduino Nano*, NRF24 moduli un bateriju (skat. att. 3.3.2). *Arduino Nano* ir ieprogrammēts ik pēc 60 sekundēm, izmantojot NRF24 moduli, nosūtīt datus eksperimentālā stenda iekšējā esošajam, signāla atkārtotājam, kas datus tālāk pārsūta uz galveno mikrodatoru. Tas apkopo datus par visu diennakti un beigās tos vienā failā nosūta uz Skaitliskās modelēšanas institūta serveri.



### 3.3.2 att. Temperatūras sensori uz 13° orientācijas paneliņiem

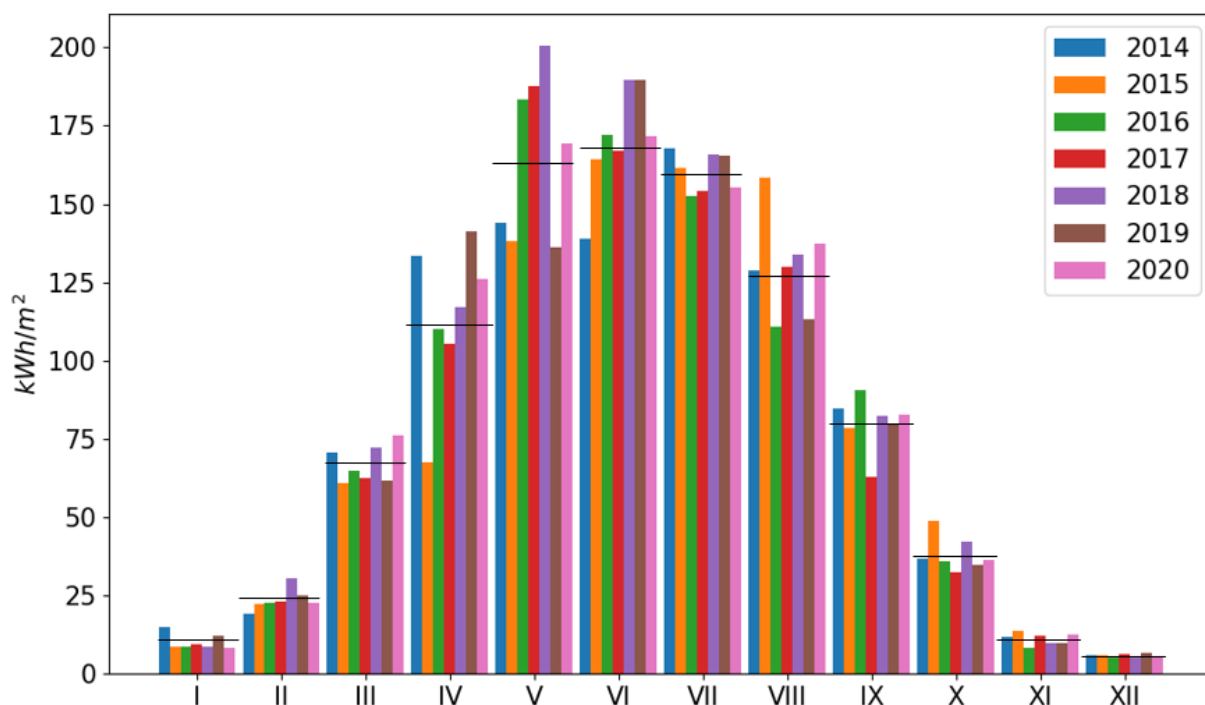
Sensoru sagatavošanas procesā radās vairākas problēmas, kas tika sekmīgi atrisinātas. NRF24 modulim, kas atbild par datu pārsūtīšanu uz signāla atkārtotāju, aptuvenais darbības rādiuss ir 10 metri, bet reālās ekspluatācijas apstākļos sensori var atrasties vairāk nekā 10 metru attālumā no signāla atkārtotāja. Lai atrisinātu šo problēmu, NRF24 moduļi tika modificēti, tos papildinot ar kondensatoru, kas samazina elektrisko trokšņu ietekmi, un rezistoru, kas strādā kā antenas pastiprinātājs. Tika fiksētas arī situācijas, kad neilgi pēc sensoru uzstādīšanas tie pārtrauca darboties. Tā cēlonis bija nepietiekama sensora hermetizācija. Lai to uzlabotu tika izmantots speciāls hermetizējošais materiāls, kuru mēdz izmantot celtniecībā vai arī, lai hermetizētu akvārijus. Ziemas laikā pie zemas ārgaisa temperatūrās daži sensori pārtrauca darboties - tā iemesls bija gan bateriju sprieguma samazināšanās temperatūras ietekmē, gan intensīvas snigšanas apstākļos bojāts hermetizējošais slānis. Lai novērstu datu iztrūkumus,

bojātie sensori tika operatīvi nomainīti, tomēr ne visos mēnešos ir paejami pilnvērtīgi dati par visu paneļu virsmas temperatūru. Vairāk par izveidoto bezvadu sensoru sistēmu var lasīt [31].

Lai novērtētu solāro paneļu faktisko efektivitāti, Latvijas Universitātes Botāniskajā dārzā pie solāro paneļu sistēmas ar piranometru (puslodes formas sensors) tika mērīts arī saules apstarojums jeb kopējā solārā starojuma intensitāte, ko saņem mērierīce uz horizontam paralēlas plaknes virsmas. Šo mērījumu precizitāte ir  $\pm 1\%$  [32]. Arī šī mērierīce datu nosūtīšanai izmantoja iepriekš aprakstīto signāla atkārtotāja un datu apkopotāja mikrodatora algoritmu.

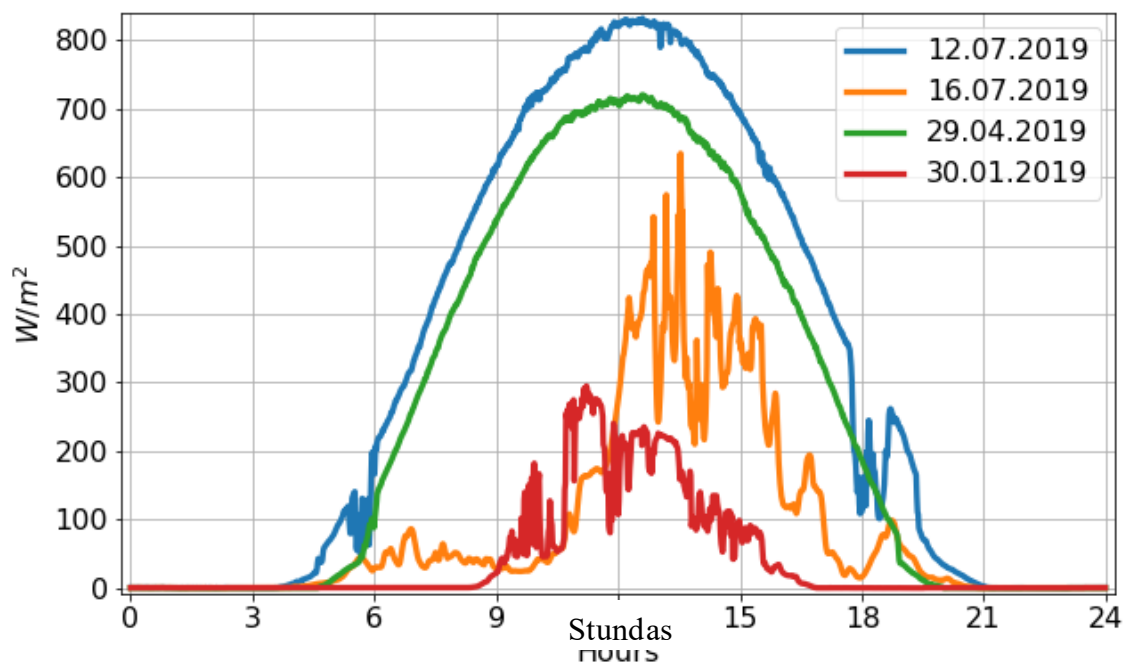
## 4. REZULTĀTI

LU Botāniskajā dārzā kopš 2013.g. veiktie ilgtermiņa solārā starojuma intensitātes novērojumi, ļauj izvērtēt vai kāds mēnesis ir bijis ar anormāli augstu vai zemu solārā starojuma intensitāti, kā piemēram, 2015. gada aprīlis ar ļoti zemu faktisko starojuma intensitāti (skat. att. 4.1). Jāatgādina, ka šie dati atspoguļo arī mākoņainības ietekmi. Vasarā mēneša kopējais solārais starojums uz horizontālas virsmas tipiski pārsniedz 150 kWh/m<sup>2</sup> un var tuvuoties pat 200 kWh/m<sup>2</sup>, kamēr novembrī, decembrī un janvārī šī lieluma maksimālā vērtība ir vairāk kā 10 reizes mazāka un nepārsniedz 15 kWh/m<sup>2</sup>. Šie rādītāji ļoti uzskatāmi parāda to maksimāli iespējamo enerģijas daudzumu, ko varam iegūt no Saules starojuma Latvijā dažādos gada laikos no gada enerģijas ieguves viedokļa ziemas mēneši tāpat ir maznozīmīgi.



4.1 att. Kopējais solārais starojums uz horizontālas virsmas, mēneša summārā vērtība, Rīga, 2014.-2020. gads

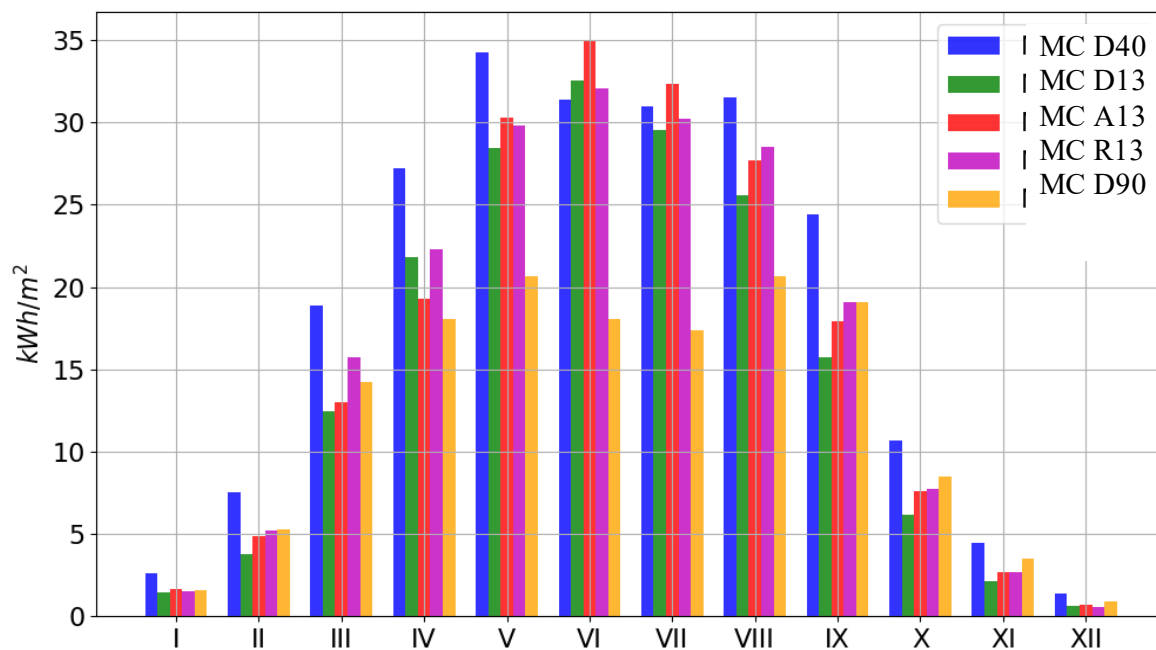
Solāro paneļu iespēja ražot elektrību un to efektivitāte ir atkarīga arī no saņemtās solārā starojuma intensitātes. Kā jau iepriekš norādīts, šī intensitāte dažādos gadalaikos ir izteikti atšķirīga: ja ideāli saulainā jūnija dienā maksimālā solārā starojuma intensitāte var pārsniegt 800 W/m<sup>2</sup>, tad saulainā dienā janvāra beigās tā ir tikai 300 W/m<sup>2</sup> (skat att. 4.2).



4.2 att. Solārais starojums uz horizontālas virsmas, dažādos gadalaikos, dienās ar atšķirīgu mākoņainību

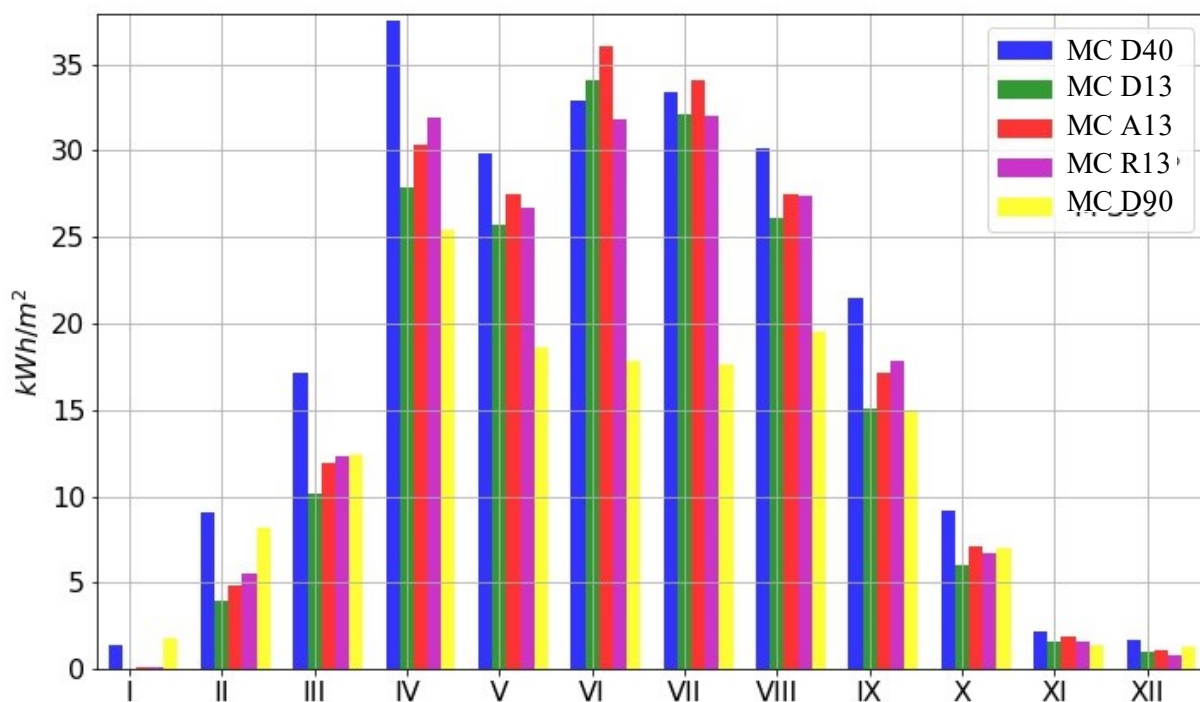
#### 4.1 Solāro paneļu saražotā enerģija

Kā parādīts attēlos 4.1, 4.2 solārā starojuma intensitāte nozīmīgi variē dažādos gadalaikos un attiecīgi variē arī solāro paneļu saražotās enerģijas daudzums. Maksimālās mēneša laikā solārā paneļa saražotās enerģijas vērtības tiek sasniegtas vasaras periodā no maija līdz jūlijam, kad ir maksimālā solārā starojuma intensitāte - viens monokristāliskais solārais panelis spēj saražot līdz 35 kWh/m<sup>2</sup> (skat. att. 4.1.1, 4.1.2).



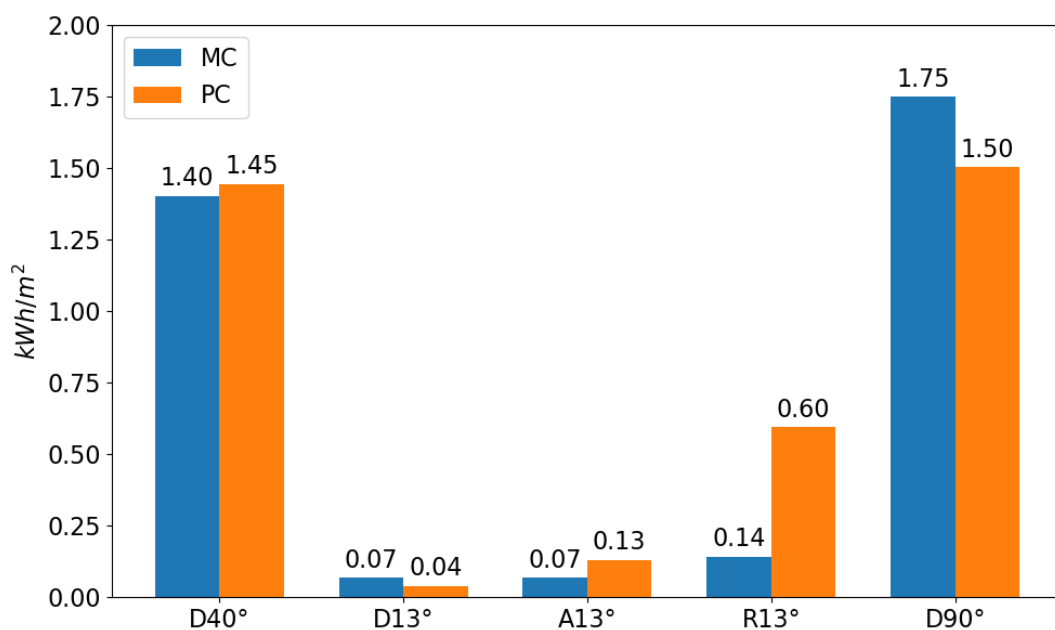
4.1.1 att. MC paneļu mēnesī saražotā enerģija uz to platības m<sup>2</sup> 2020. gadā

Jānorāda, ka šos attēlojumos nav ņemti vērā papildus zudumi sistēmā, t. sk. tie, kas saistīti ar invertoru darbību, kas tipiski var veidot 5 – 10% no saražotās enerģijas. Ļoti uzskatāmi arī redzams, ka gados, kad pavasara mēnešos bijusi maza mākoņainība (piem., 2019.g.), saražotās enerģijas daudzums var būtiski pārsniegt vidējās vērtības un būt pat lielāks nekā vasaras vidū. Kā tālāk būs parādīts, to sekmē arī zemāka āra gaisa temperatūra un labāki paneļu dzesēšanas apstākļi nekā vasaras mēnešos (skat. att. 4.1.2).

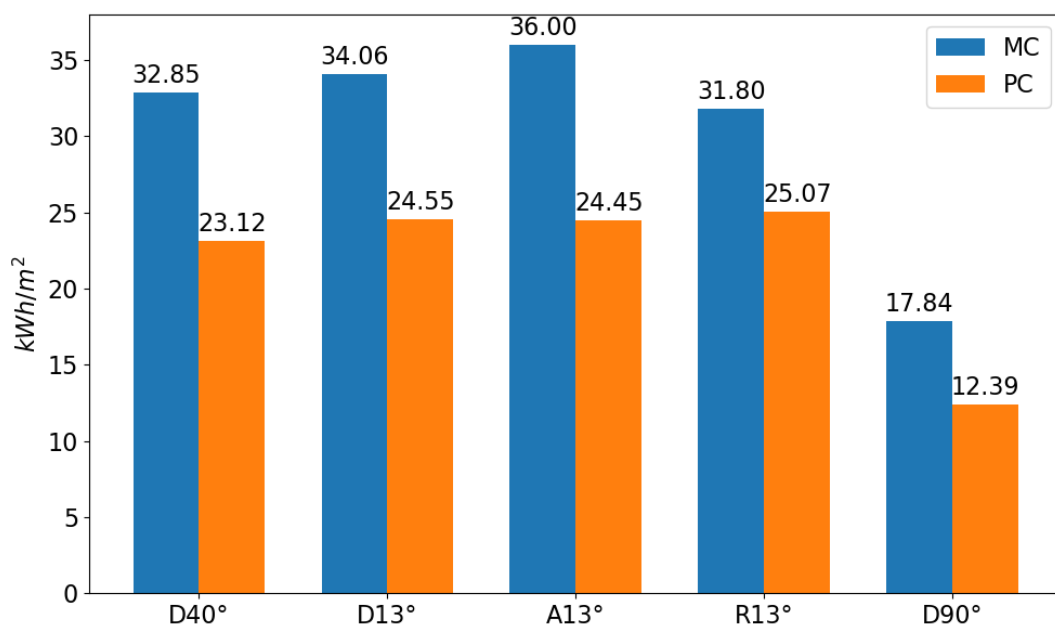


#### 4.1.2 att. MC paneļu mēnesī saražotā enerģija uz to platības m<sup>2</sup> 2019. gadā

Ļoti izteiktas atšķirības ir vērojamas tajā, cik enerģijas tiek saražots vasaras uz ziemas mēnešos. Vienādas orientācijas paneļu saražotās enerģijas daudzums var atšķirties decembrī/janvārī un jūnijā pat vairāk nekā 30 reizes. Janvārī ir novērojams ievērojams saražotās enerģijas kritums tieši paneļiem, kuri ir 13° leņķī pret horizontu, ko var skaidrot ar to, ka no šiem paneļiem nenoslīd sniega sega un tā samazina solārā starojuma daudzumu, kas nonāk līdz fotoelementiem (skat att. 4.1.3). Ziemas mēnešos, kad Saule dominējoši atrodas zemu pie horizonta, lielāku daļu no solārā starojuma saņem D90 paneļi un to saražotās enerģijas daudzums ir līdzvērtīgs ar citu orientāciju paneļu saražoto. Tomēr, kā redzams attēlā 4.1.2, D90 paneļu saražotās enerģijas daudzums ir pielīdzināms citu orientāciju saražotajam tikai laika periodā janvāris-marts un septembris-decembris. Tādēļ šādas orientācijas paneļu izmantošana varētu būt interesanta tikai tad, ja tie ir integrēti kā ārējās norobežojošās konstrukcijas daļa, var mazināt telpas pārkaršanu vasarā vai arī tiem ir arī dekoratīva funkcija.

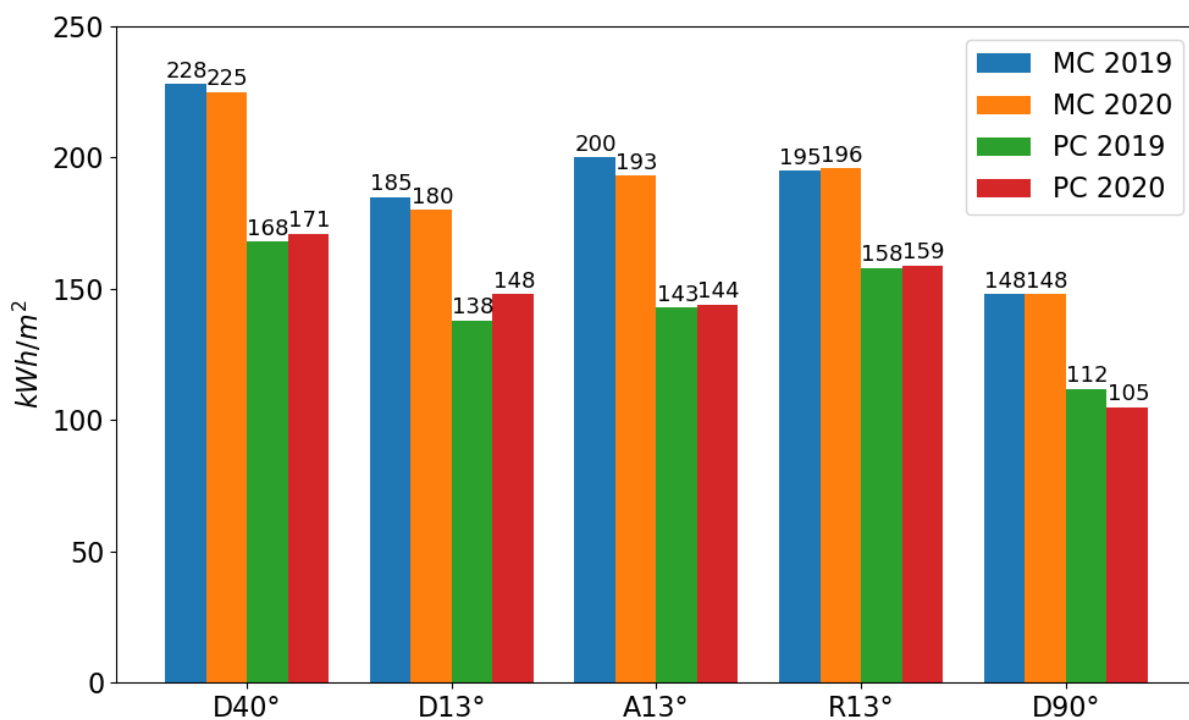


4.1.3 att. Dažādas telpiskās orientācijas solāro paneļu saražotā enerģija 2019. gada janvārī



4.1.4 att. Dažādas telpiskās orientācijas solāro paneļu saražotā enerģija 2019. gada jūnijā

Analizējot datus par kopējo enerģiju, kas saražota gada laikā, visās orientācijās monokristāliskie paneļi saražo vidēji par 25% vairāk enerģijas nekā polikristāliskie paneļi. Kaut arī gada griezumā visvairāk enerģijas saražo D40 orientētie paneļi, jūnijā un jūlijā visvairāk enerģijas saražo A13 solārie paneļi (skat. att. 4.1.1, 4.1.2, 4.1.5). To ir iespējams skaidrot ar solāro elementu efektivitātes samazināšanos siltā laikā, ko izraisa paneļu virsmas temperatūras pieaugums. A13 paneļi saņem lielāku daļu solārā starojuma tieši no rītiem, kad gaisa un tādējādi arī paneļu virsmas temperatūra ir viszemākā. Tādējādi to saražotās enerģijas daudzums dienas laikā ir mazāk atkarīgs no temperatūras nekā citu orientāciju paneļiem.



4.1.5 att. Poli- un monokristālisko solāro paneļu saražotā enerģija uz to virsmas laukuma vienību (m<sup>2</sup>) 2019. un 2020. gadā

#### 4.2 Solāro paneļu efektivitāte atkarībā no paneļa tipa

No iegūtajiem datiem iespējams izdarīt secinājumu, ka monokristāliskie paneļi arī Latvijas klimata apstākļos viennozīmīgi ir efektīvāki nekā polikristāliskie paneļi. Savstarpēji salīdzinot saražoto enerģijas daudzumu vienas orientācijas ietvaros MC paneļi uzrāda konsekventi augstākus saražotās enerģijas rādītājus (skat. att. 4.1.5). Vidēji MC paneļi saražo par 25% - 35% vairāk enerģijas gada laikā nekā tādas pašas orientācijas PC paneļi.

#### 4.3 Solāro paneļu efektivitāte atkarībā no telpiskās orientācijas

Kā parādīts grafikā 4.1.5 telpiskā orientācija ar vislielāko saražotās enerģijas daudzumu un attiecīgi ar visaugstāko efektivitāti gada griezumā gan MC paneļiem, gan PC paneļiem ir D40. Tas saprotams, jo aptuveni 90% no gada laikā saražotās solārās enerģijas tiek saražota laika periodos marts-septembris un no marta – maijam un augustā, septembrī D40 orientācija uzrāda vislielāko saražotās enerģijas daudzumu (skat. att. 4.1.1, 4.1.2). MC D40 paneļi gada laikā vidēji saražo par 15,5% vairāk enerģijas nekā MC 13° paneļi un PC D40 saražo vidēji par 13% vairāk enerģijas nekā PC 13° paneļi.

Paneļu telpiskā orientācija īpaši ietekmē efektivitāti ziemas mēnešos. Kā minēts iepriekš, 2019. gada janvārī tika novērots, ka paneļi ar 13° leņķi pret horizontu bija noklāti ar sniegu, kas to saražotās enerģijas daudzumu un efektivitāti samazināja gandrīz līdz nullei (skat. att. 4.1.2).

Savukārt vertikāli novietotie D90 paneļi ziemas laikā ir visefektīvākie tādēļ, ka Saule debesīs atrodas tuvu horizontam, kā arī tie ir pilnībā pasargāti no riska tikt noklātiem ar sniega segu.

#### 4.4 Solāro paneļu efektivitāte atkarībā no virsmas temperatūras

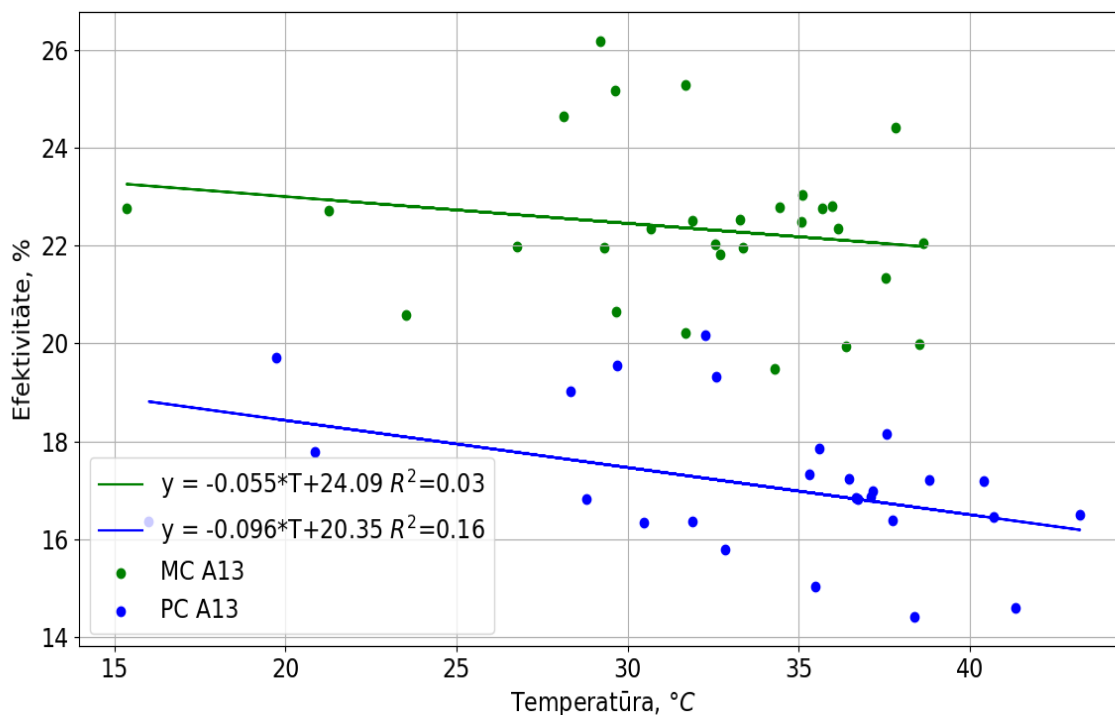
Tehniskajās specifikācijās norādīts, ka PC paneļi zaudē 0,41% no maksimālās jaudas ar katru grādu, kad to virsmas temperatūra pārsniedz 25°C. MC paneļiem šī vērtība ir 0,30%/C°:

$$P_{MC} = P_{\max} \cdot (1 - \Delta t \cdot 0.003) , \quad (3)$$

$$P_{PC} = P_{\max} \cdot (1 - \Delta t \cdot 0.0041) , \quad (4)$$

kur  $P_{\max}$  ir attiecīgi MC un PC paneļu maksimālā jauda,  $\Delta t$  apzīmē temperatūru virs 25°C.

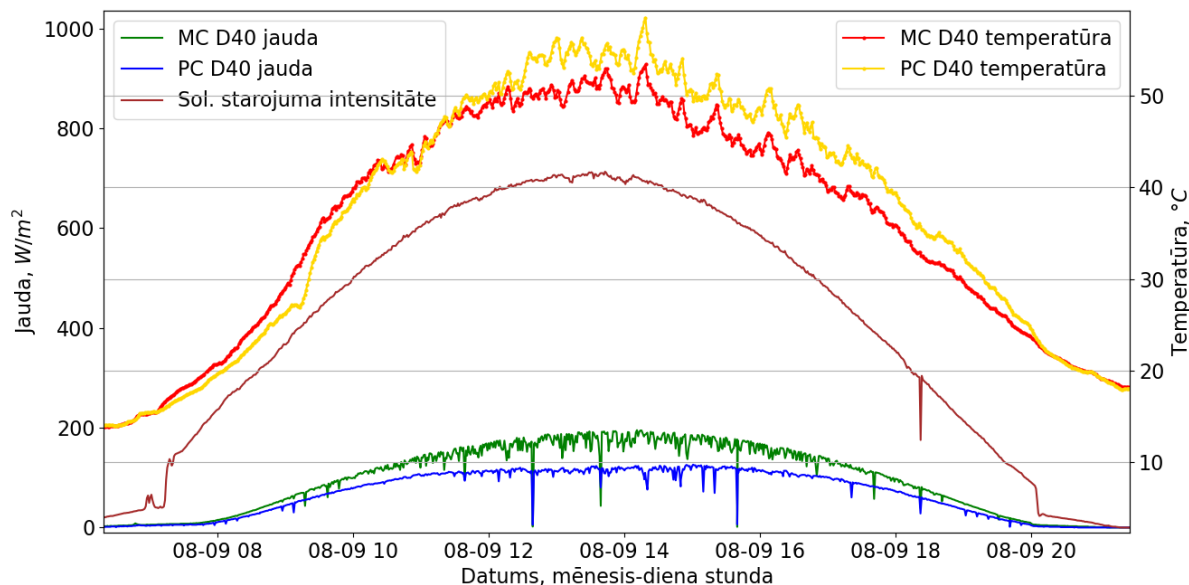
Attiecīgi PC paneļi zaudēs 6.15% no maksimālās jaudas un MC paneļi zaudēs 4.5% no maksimālās jaudas tiem uzkarstot līdz 40°C. Monitorings bez tam parāda, ka MC paneļi uzkarst mazāk nekā PC paneļi un to efektivitātes samazinājums nav tik izteikts kā PC paneļiem (skat. att. 4.4.1).



##### 4.4.1 att. A13 orientētu solāro paneļu efektivitāte atkarībā no paneļa virsmas temperatūras 2020. gada septembrī

Perfekti saulainā augusta dienā paneļu virsmas temperatūra pārsniedz 50°C un ir novērojams, ka paneļu saražotā enerģija nepieaug tikpat vienmērīgi attiecībā pret kopējo solārā starojuma intensitāti, kā tas notiek pie zemākām temperatūrām, piemēram, no rīta vai vakara pusē. To nosaka iepriekš minētā paneļa jaudas samazināšanās to pārkaršanas dēļ. Tas uzskatāmi redzams attēlā 4.4.2, kur pie vienādas orientācijas un solārā starojuma intensitātes MC paneļi

uzkarst maksimāli par 5 grādiem vairāk un to jaudai dienas vidū veidojas izteikts “plato”, kad augot solārā starojuma intensitātei, saražotās enerģijas daudzums praktiski neaug.



4.4.2 att. D40 orientētu solāro paneļu virsmas temperatūra, jauda un solārā starojuma intensitāte 2020. gada 9. augustā

Visaugstākās maksimālās paneļu virsmas temperatūras 2020. gada augustā bija D40 orientācijas paneļiem. PC D40 virsmas temperatūra sasniedza 58.5 C°, un MC D40 sasniedza 53.4 C°. No 13° paneļu orientācijām visaugstākā virsmas temperatūra tika fiksēta PC D13 panelim - tā bija 57.2 C°.

#### 4.5 Solāro paneļu faktiskā efektivitāte

Paneļu faktiskā efektivitāte esošajos apstākļos pētījumā tiek noteikta normējot paneļa izejas jaudu uz tā laukuma vienību (m<sup>2</sup>) un dalot to ar kopējo solārā starojuma intensitāti (W/m<sup>2</sup>), ko attiecīgajā laika momentā ir fiksējis piranometrs:

$$E_{\%} = \frac{P_{out}}{S \cdot P_{sol}} \cdot 100, \quad (5)$$

kur  $P_{out}$  apzīmē paneļa izejas jaudu,  $S$  ir konkrētā paneļa tipa virsmas laukums,  $P_{sol}$  ir solārā starojuma intensitāte.

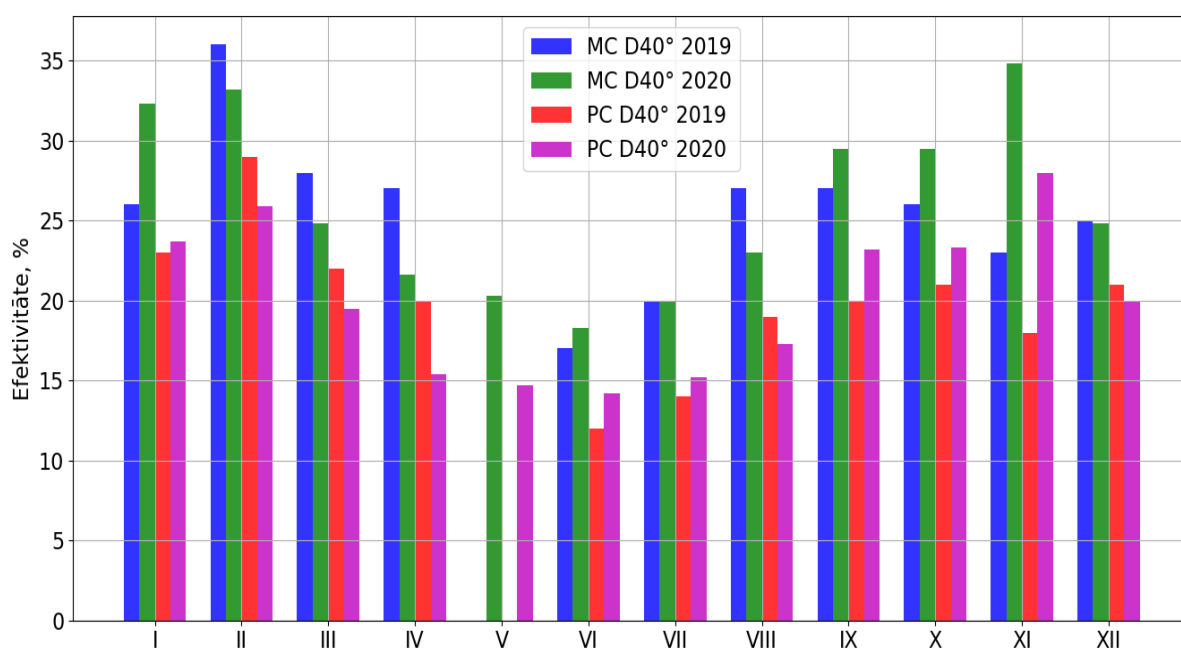
Faktiskā efektivitāte ir lielums, kas ir atkarīgs no Latvijas klimata apstākļiem, raksturīgās mākoņainības, kura ir atšķirīga dažādos gadalaikos, no temperatūras izmaiņām utt. Faktiskā efektivitāte tādējādi atšķiras arī mēnešos ar augstu un zemu solārā starojuma intensitāti.

Salīdzinot divu gadu laikā iegūtos datus, D40 paneļu faktiskā efektivitāte samazinās vasaras mēnešos (skat. att. 4.5.1). To galvenokārt nosaka paneļu pārkaršana. Vidējā MC D40 paneļu faktiskā efektivitāte divu gadu greizumā ir 22.5% kamēr PC D40 efektivitāte ir 17%. Paneļi uzrāda augstu faktisko efektivitāti tieši ziemas mēnešos. Ekstremāli lielas MC paneļu

faktiskās efektivitātes vērtības (aptuveni 35%) tiek sasniegtas februārī un novembrī, bet šajos mēnešos, protams, kopējā solārā starojuma intensitāte nav tuva maksimālajai (skat. att. 4.1), tādēļ arī saražotais enerģijas daudzums nav dominējošs gada bilancē. Savukārt karstākajos vasaras mēnešos PC paneļu faktiskā efektivitāte samazinās pat līdz 12%, MC paneļiem attiecīgi līdz 17% (att. 4.5.1), kas, ņemot vērā intensīvo solāro radiāciju, ļoti būtiski negatīvi ietekmē gada laikā saražotās enerģijas daudzumu. Tādējādi solāro paneļu efektīvas dzesēšanas apstākļu nodrošināšana ir ļoti svarīga, lai palielinātu to gada laikā saražotās enerģijas daudzumu.

Zinātniskās literatūras avotos neizdevās atrast apliecinājumu, ka solāro paneļu efektivitāte pie zemas apkārtējās vides temperatūras palielinās, lai arī šādi apgalvojumi ir izteikti populārzinātniskos avotos.

2020. gada janvārī PC D40 faktiskā efektivitāte bija augstāka nekā MC D40 faktiskā efektivitāte (skat. att. 4.5.1). Šo novērojumu var izskaidrot atsaucoties uz 3.2.2 attēlu. Lai arī abu paneļu orientācijas ir identiskas, jumta slīpuma dēļ MC D40 atrodas tuvāk jumta virsmai nekā PC D40. Jumta virsma neļāva no MC D40 noslidēt visai sniega segai, tādēļ šis panelis saņēma mazāku daudzumu solārā starojuma. Attiecīgi arī tā faktiskā efektivitāte bija zemāka.



4.5.1 att. D40 orientētu solāro paneļu faktiskās efektivitātes rādītāji 2019.-2020. gada mēnešos.

## 5. Secinājumi

Sekmīgi izveidotā programmatūra automātiskai datu lejupielādei no paneļu ražotāja mājas lapas, kur dati tiek uzglabāti tikai pusgadu, kā arī instalētā bezvadu sensoru sistēma paneļu ilgtermiņa temperatūras monitoringam, ļauj veikt padziļinātu solāro paneļu saražotās enerģijas analīzi Latvijas klimatiskajos apstākļos. .

Iegūtās solāro paneļu gada faktiskās efektivitātes vērtības (MC – 22,5%, PC – 17%) konkrētajos klimatiskajos apstākļos nedaudz pārsniedz ražotāju norādītās, standartizēti noteiktās efektivitātes vērtības. Tādējādi standartizētās efektivitātes vērtības (tab. 3.1) ir pietiekami labs orientieris no “drošās puses”, lai vērtētu paneļu instalācijas lietderību.

Ņemot vērā paneļu efektivitātes samazināšanos to virsmas temperatūrai palielinoties virs 25°, ir ļoti svarīgi paneļus uzstādot nodrošināt to pēc iespējas labāku dzesēšanu ar vēja gaisa plūsmu un novēršot to papildus uzsilšanu ar garo viļņu infrasarkanā starojumu no tuvumā esošām virsmām.

Gada griezumā visvairāk enerģijas saražo MC D40 panelis, tātad visoptimālākā fiksētā solāro paneļu konfigurācija Latvijas klimata apstākļos ir :

- virzienā uz dienvidiem;
- 40° leņķī pret horizontu;
- paneļa tips – monokristālisks.

Ja nepieciešams saražot enerģiju vasarā, tad optimālākā fiksētā konfigurācija ir:

- virzienā uz dienvidiem vai austrumiem;
- 40° vai 13° leņķī pret horizontu;
- Paneļa tips – monokristālisks.

Ja nepieciešams saražot enerģiju ziemā, tad optimālākā fiksētā konfigurācija ir:

- virzienā uz dienvidiem;
- 90° leņķī pret horizontu;
- Paneļa tips – monokristālisks.

Visražīgākajai solārā paneļa konfigurācijai MC D40 gada laikā sagaidāmais saražotās enerģijas apjoms, neskaitot invertora zudumus, normēts uz paneļa nominālās jaudas vienību ir 0,83 kWh/W. Sagaidāmais saražotās enerģijas daudzums gadā normēts uz paneļa nominālās jaudas vienību ņemot vērā tikai efektivitātes koeficientu, kas norādīts paneļa tehniskajā specifikācijā un vidējo kopējo solārā starojuma intensitāti uz horizontālas virsmas Rīgā, ir 0.74 kWh/W. Tas jāņem vērā praksē projektējot solārās enerģijas ražošanas sistēmu – praktiķu rekomendētā vērtība atmaksāšanās novērtējumam 1 kWh/W tādējādi Latvijas apstākļos ir pārlietu optimistiska.

Monitorings tiek turpināts, lai noteiktu paneļu faktisko efektivitāti ilgākā laika periodā, kur, iespējams sāks izpausties arī paneļu novecošanās efekti. Bez tam uz tas ļaus veikt detalizētāku paneļu temperatūras ietekmes analīzi, kā arī pētīt mākoņu veida un gaisa mitruma ietekmi.

### Izmantotās literatūras un avotu saraksts

- [1] Telicko, Jevgenijs, Daniels Heincis, and Andris Jakovics. "A study of solar panel efficiency in Latvian climate conditions." *E3S Web of Conferences*. Vol. 172. EDP Sciences, 2020.
- [2] Eurostat "Shedding light on energy in the EU — A guided tour of energy statistics — 2020 edition", 2020.
- [3] AS Latvenergo "Latvijā un Baltijas valstīs aug pieprasījums pēc saules paneļiem" Skatīts: 24-05-2021. AS Latvenergo URL: <https://latvenergo.lv/lv/jaunumi/preses-relizes/relize/latvija-un-baltijas-valstis-aug-pieprasijums-pec-saules-paneļiem>
- [4] C. F. Gabra, A. Hossam-Eldin, and P. D. E. Ali Ahmed Hamza H., A "Comparative Analysis Between the Performances of Monocrystalline, Polycrystalline and Amorphous Thin Film in Different Temperatures at Different Locations in Egypt", 2014.
- [5] Xia, Shuang, et al. "Characterizing variability of solar irradiance in San Antonio, Texas using satellite observations of cloudiness." *Remote Sensing*, 2018.
- [6] Stickler, Greg. "Educational Brief - Solar Radiation and the Earth System". Skatīts: 23-05-2021. National Aeronautics and Space Administration URL: <https://web.archive.org/web/20160425164312/http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/July61999siteupdate/inv99Project.Site/Pages/science-briefs/ed-stickler/ed-irradiance.html>
- [7] Willson, Richard C.; H.S. Hudson (1991). "The Sun's luminosity over a complete solar cycle". *Nature*. 351 (6321): 42–4.
- [8] Solar Resource Glossary Skatīts: 15-05-2021. URL: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>
- [9] Global Solar Atlas, Skatīts: 23-05-2021. World Bank URL: <https://globalsolaratlas.info>
- [10] Chrobak, Pavel, Jan Skovajsa, and Martin Zalesak. "Effect of cloudiness on the production of electricity by photovoltaic panels." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 76. EDP Sciences, 2016.

- [11] U. Bethers et.al. Mākoņainība Latvijā. Skatīts: 15-05-2021. Latvijas Universitātes Skaitliskās modelēšanas Institūts. URL:  
<http://www.modlab.lv/klimats/Parametri/cloud/Cloud.html>
- [12] Latvijas klimats. Skatīts: 19-05-2021. Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs URL: <https://videscentrs.lv/gmc.lv/lapas/latvijas-klimats>
- [13] Luque, Antonio, and Stain Hegedus. *Photovoltaic science and engineering*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [14] Abass, Aimi. *Light absorption enhancement and electronic properties of thin-film solar cells*. Diss. Ghent University, 2014., D. Heinča modifikācija, 2021.
- [15] El Char, L., and N. El Zein. "Review of photovoltaic technologies." *Renewable and sustainable energy reviews* 15.5 (2011): 2165-2175.
- [16] Da, Yun, Yimin Xuan, and Qiang Li. "From light trapping to solar energy utilization: A novel photovoltaic–thermoelectric hybrid system to fully utilize solar spectrum." *Energy* 95 (2016): 200-210.
- [17] Battaglia, Corsin, Andres Cuevas, and Stefaan De Wolf. "High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives." *Energy & Environmental Science* 9.5 (2016): 1552-1576.
- [18] Teplin, Charles W., et al. "Comparison of thin epitaxial film silicon photovoltaics fabricated on monocrystalline and polycrystalline seed layers on glass." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 23.7 (2015): 909-917.
- [19] Wang, C.; Zhang, H.; Wang, T. H.; Cizek, T. F. (2003). "A continuous Czochralski silicon crystal growth system". *Journal of Crystal Growth*. 250 (1–2): 209–214
- [20] Abrosimov, N. V., et al. "Czochralski growth of Si-and Ge-rich SiGe single crystals." *Journal of Crystal Growth* 174.1-4 (1997): 182-186.
- [21] Research-Cell Efficiency Chart, Skatīts: 11-05-2021. NREL URL:  
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [22] Ehrler, Bruno, et al. "Photovoltaics reaching for the Shockley–Queisser limit." (2020): 3029-3033.
- [23] Polman, Albert, et al. "Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges." *Science* 352.6283 (2016).
- [24] JA Solar solar module JAP60-275/4BB data sheet. Skatīts: 06-05-2021. JA Solar. 2016. g. apr. URL: <https://www.zonnepanelen-groothandel.com/uploads/documents/0b2218adfe6914c23838b87c95e7d0aa.pdf>

- [25] LG NeON R solar module LG365Q1C-A5 data sheet. Skatīts: 06-05-2021. LG Electronics. 2019. g. febr. URL [https://www.lg.com/us/business/download/resources/BT00002151/LGS040219\\_DS\\_LG350-365Q1C-A5.pdf](https://www.lg.com/us/business/download/resources/BT00002151/LGS040219_DS_LG350-365Q1C-A5.pdf)
- [26] M. Boxwell, Solar Electricity Handbook Edition 2019, (2019)
- [27] Optimum Tilt of Solar Panels, Skatīts: 23-05-2021. Charles R. Landau URL: <http://www.solarpaneltilt.com/>
- [28] Nano, Arduino, Skatīts: 24-05-2011 Arduino Nano URL: <http://www.mantech.co.za/datasheets/products/a000005-6s.pdf>
- [29] Nordic Semiconductors nRF24L01+ Single Chip 2.4 GHz Transceiver: Product Specification, Feb 2019, Skatīts: 19-05-2021. URL: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P>.
- [30] HDC 1080 Skatīts: 24-05-2021 Texas Instruments URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1621791391859&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1621791391859&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [31] Telicko, Jevgenijs, Andris Jakovics, and Ivars Drirkis. "A low-cost wireless sensor network for long term monitoring of energy performance and sustainability of buildings." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 282. EDP Sciences, 2019.
- [32] User manual: LP02 Second class pyranometer. v1606. Skatīts: 20-05-2021. Hukseflux Thermal Sensors. 2016. URL: [https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/LP02\\_manual\\_v1606.pdf](https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/LP02_manual_v1606.pdf).