



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Martynas Kriščiūnas
SAULĖS ELEMENTŲ DINAMINIAI TYRIMAI
DYNAMICAL RESEARCH OF SOLAR CELLS

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX055

Pramonės technologijų specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Martynas Kriščiūnas
SAULĖS ELEMENTŲ DINAMINIAI TYRIMAI
DYNAMICAL RESEARCH OF SOLAR CELLS

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX055

Pramonės technologijų specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2019

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Martynas Kriščiūnas, 20133124

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Pramonės inžinerija, PTfm-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. gegužės 22 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Saulės elementų dinaminiai tyrimai“ patvirtintas 2019 m. balandžio 10 d. dekanų potvarkiu Nr. 107me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: profesorius daktaras Mindaugas Jurevičius. Mano darbo vadovas profesorius daktaras Mindaugas Jurevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Martynas Kriščiūnas

(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas: 6211EX055

Pramonės technologijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2018-10-05Nr.

Vilnius

Studentui Martynui Kriščiūnui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: ..Saulės elementų dinaminiai tyrimai.....

.....
patvirtinta 2017 m. lapkričio 17 d. dekanų potvarkiu Nr. 328me.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės 17 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Išanalizuoti mokslinės literatūros šaltinius, kuriuose pateikta informacija apie saulės elementus ir gamtos įtaką saulės elementų efektyvumui.
2. Paruošti ir įsisavinti saulės elementų dinaminį tyrimų metodiką.
3. Atlikti eksperimentinius, bei teorinius saulės elementų dinaminį tyrimus.
4. Apibendrinti eksperimentinių bei teorinių tyrimų rezultatus, atlikti analizę ir suformuluoti darbo išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....
(Moksl. laipsnis/pedagoginis vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

.....M. Jurevičius.....
(Moksl. laipsnis/pedagoginis vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Pramonės inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Saulės elementų dinaminiai tyrimai**
Autorius **Martynas Kriščiūnas**
Vadovas **Mindaugas Jurevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos saulės elementų stipruminės savybės. Nagrinėjami saulės elementai, jų rūšys, klimato bei gamtos veiksniai, įtakojantys galimus saulės elementų pažeidimus. Atliekami dinaminiai tyrimai, imituojantys ledo krušą. Aprašyta eksperimentinių ir teorinių tyrimų metodika. Tyrimui atlikti suprojektuotas bei pagamintas krušos imitacijos stendas, jis suprojektuotas taip, kad būtų galima gauti chaotiškas gamtos sąlygas. Ištirta 10 saulės elementų veikiant juos skirtingomis sąlygomis. Nustatyta kritinė smūgio jėga ir atlikti saulės elemento galios kitimo matavimai.

Pateikti eksperimento ir tyrimo metu gauti rezultatai bei išvados.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, problemos formulavimas su darbo tikslais ir uždaviniais, teorinis tyrimas, eksperimentinis tyrimas, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis- 53 p. teksto be priedų, 34 iliustracijų, 12 lentelių, 27 biografiniai šaltiniai

Atskirai pridedami darbo priedai

Prasminiai žodžiai: Saulės elementai, ledo krušos imitacija, PV moduliai, kritulių įtaka eksploatacinėms savybėms.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Mechanical and Material Engineering

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

Master Degree Studies **Industrial Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4

Title	Dynamical Research of Solar Cells
-------	-----------------------------------

Author **Martynas Kriščiūnas**

Academic supervisor **Mindaugas Jurevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In this work the strength properties of solar cells is examined. Solar cells, their types, climatic and natural factors affecting possible solar cell damage are analyzed. Performing dynamic research and recreating ice hail. Methods of experimental and theoretical research are described. The hail simulation stand was designed and manufactured for the purpose of the study, designed to produce chaotic natural conditions. 10 solar cells were tested under different conditions. Critical impact force was determined and solar cell power coupling measurements were performed.

The results and conclusions of the experiment and study were presented.

Structure: introduction, literature review, problem formulation with work objectives and tasks, theoretical research, experimental research, conclusions, references.

Thesis consist of: 53 p. text without appendixes, 34 illustrations, 12 tables, 27 biographical sources

Supplements are included separately

Keywords: Solar panels, Ice hail imitation, PV module, impact of precipitation on performance

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	9
SANTRUMPOS.....	10
IVADAS.....	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1 Ledo krušos poveikio saulės elementams atlyktų tyrimų analizė.....	13
1.2 Saulės jėgainės.....	13
1.3 Saulės elementai, jų veikimo principai.....	15
1.4 Fotovoltinis elementas.....	16
1.5 Kristalinio silicio elementų modulių elektrinės savybės	18
1.6 Saulės elementų rūšys, jų privalumai ir trūkumai	20
1.7 Fotovoltinių saulės energijos sistemų tipai.....	24
1.8 Saulės jėgainių naudojimas įvairiose klimato zonose	25
1.9 Saulės šviesos energijos pasiskirstymas	26
1.10 Vyraujantys atmosferiniai veiksniai Lietuvoje	27
1.11 Saulės energijos ištekliai Lietuvoje	27
1.12 Stichiniai reiškiniai Lietuvoje	28
2. PROBLEMOS FORMULAVIMAS, DARBO TIKSLAI IR UŽDAVINAI	30
3. TIRIAMOJI DALIS	31
3.1 Tyrimo metodika	31
3.2 Parametrų aprašymas.....	31
3.3 Teorinio eksperimento aptarimas	38
4. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS.....	39
4.1 Eksperimentinio tyrimo metodika	39
4.2 Krušos imitacijos stendas ir dinaminių parametrų matavimo įranga	41
4.3 Tyrimų rezultatai ir aptarimas	42
4.4 Fotovoltinio modulio atsparumo tyrimas	43
4.5 Eksperimentinio tyrimo aptarimas.....	50
IŠVADOS.....	51
NAUODOTA LITERATŪRA	52
PRIEDAI	54

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1. pav. Ledo krušos imitacijos kamuoliukas	13
1.2. pav. Vokietijoje esantis didžiausias Europoje 166 MW saulės energijos parkas 2012 m. (Zimmer 2012)	14
1.3. pav. Saulės elementas su pirštų tipo kontaktais apšviestoje plokštelės pusėje. 1 – Saulės šviesa; 2 – viršutinis kontaktas; 3 – n– tipo sluoksnis; 4 – pn sandūra; 5 – p+ tipo sluoksnis; 6 – apatinis kontaktas (Comel 2010)	15
1.4. pav. Grynas silicis (kairėje) ir silicio plokštelės (dešinėje) (Lynn 2010).....	16
1.5. pav. Tipinė saulės elemento schema.....	17
1.6. pav. a) – celės sujungimas „takeliais“, b) – dviejų celių jungimas nuosekliai, c) – 36 nuosekliai sujungtų celių išdėstymas.....	17
1.7. pav. Tipinė celių matricos kapsulės struktūra.....	18
1.8. pav. Modulio įtampa lygi visų nuosekliai sujungtų celių įtampų sumai.....	19
1.9. pav. Monokristalinio silicio saulės elementas su atspindį mažinančiais tekstūruotais paviršiais ir paslėptais elektrodais (Nelson 2006)	21
1.10. pav. CIGS saulės elemento sandara ir energijos juostų diagrama (Nelson 2006).....	23
1.11. pav. Lankstusis saulės elementas (Lynn 2010)	23
1.12. pav. Fotovoltinių sistemų tipai	24
1.13. pav. Standartinė autonominės sistemos schema.	25
1.14. pav. Pasaulinis metinės saulės šviesos energijos kiekio į ploto vienetą lygio pasiskirstymas. (Rimkus 2011).....	26
1.15. pav. Metinis saulės švytėjimo laiko pasiskirstymas Lietuvos teritorijoje (h).....	27
1.16. pav. Tiesioginės ir netiesioginės saulės radiacijos metinis pasiskirstymas (kWh/m^2).	28
3.1. pav. saulės elemento pjūvis. Stiklo lokacija.....	31
3.2. pav. saulės elemento pjūvis. EVA (etilenvinilo acetatas) lokacija	32
3.3. pav. saulės elemento pjūvis. silicio kristalų lokacija	32
3.4. pav. saulės elemento pjūvis. PVF (polivinilfluoridas) lokacija	33
3.5. pav. saulės elemento pjūvis. PVC (polivinilchloridas) lokacija.....	33
3.6. pav. Kietųjų kūnų mechanika.....	34
3.7. pav. Modelis išskaidytas į baigtinių elementų Tinklėlį.....	35
3.8. pav. Laikas=0.09 ms Paviršius paveiktas įtempių (N/m^2). Įtempių grafikas 3D. Kamuoliuko susidūrimas su saulės elemento paviršiumi.....	35
3.9. pav. Laikas=0.09 ms paviršius paveiktas įtempių (N/m^2).....	35
3.10. pav. Grafiko stebėjimo linija.....	36
3.11. pav. Linijinis įtempių grafikas (N/m^2).....	36
4.1. pav. Fotovoltinių modulių bandymų stendo schema (a) ir bendras vaizdas (b).....	39
4.2. pav. Tyrimo stendo blokinė schema.....	40
4.3. pav. Jėgos pasiskirstymo grafikas	42
4.4 pav. Jėgų amplitudė: raudona – 1 bandymas; mėlyna – 2 bandymas; žalia – 3 bandymas; oranžinė – 4 bandymas; geltona – 5 bandymas; juoda – 6 bandymas.....	42
4.5. pav. Elektroluminescencinė nuotrauka ir voltamperinės kreivės prieš tyrimą (b) bei po 6 bandymo (c).....	43
4.6. pav. Ketvirtą bandymo elektroluminescencinė nuotrauka.....	44
4.7. pav. Šešto bandymo elektroluminescencinė nuotrauka	44

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1. Lentelė. Stichinių reiškinių skaičius Lietuvoje 1961 m. - 2016 m. (Lietuvos hidrometeorologinė tarnyba).....	28
3.1. lentelė .Elementų parametrai.....	31
3.2. lentelė. Stiklo parametrai	32
3.3. lentelė. EVA parametrai.....	32
3.4. lentelė. Silicio kristalų parametrai	33
3.5. lentelė. PVF parametrai	33
3.6. lentelė. PVC parametrai	33
3.7. lentelė. Tinklelio parinkimas.....	34
3.8. lentelė. Įtempių palyginimas keičiant elemento konstrukciją.	37
4.1. lentelė Fotovoltinio modulio atsparumo badymai.....	43
4.2. lentelė Palyginimo lentelė	44
4.3. lentelė. Eksperimentinio tyrimo rezultatai	45

SANTRUMPOS

EVA – etilenvinilo acetatas. Medžiaga naudojama saulės elementų gamybai

PV moduliai – fotovoltiniai moduliai (saulės elementai)

SE – Saulės elektrinės.

PVC – povinilchloridas, plačiai paplitus plastiko rūšis.

AEI – atsinaujinantys energijos šaltiniai.

STC (angl. *standart test conditions*) – Standartinės testų sąlygos.

EFG (angl. *edge fed growth*)- Paviršiaus auginimas maitinant.

IVADAS

XXI amžiaus pradžioje pradėjus kilti energijos kainoms, mažėja jos prieinamumas ir saugumas. b Spartėjantis globalinis atšilimas, verčia ieškoti alternatyvių energijos šaltinių. Elektros energija tapo neatsiejama šiuolaikinio pasaulio dalis dėl jos bei techninių laimėjimų žmonių butis buvo labai supaprastinta, taip pat ji užtikrina šalių ekonominę vystymąsi. Bet visam tam pasiekti visos pramonės šakos priklausomos nuo nenumaldomai augančio iškastinio kuro naudojimo. Šiuolaikiniai patogumai, augantis gyventojų skaičius, automatizuotas žemės ūkis, įmanomas naudojant tik iškastinį kurą, todėl nepertraukiamas energijos tiekimas bus visuomenės iššūkis ateityje. Dėl augančios populiacijos ir procesų automatizavimo, manoma, jog pasaulinis energijos poreikis per pusę amžiaus padvigubės, o iki dvidešimt pirmojo amžiaus pabaigos – patrigubės. Nors šiuo metu pasaulyje priskaičiuojama apie 7 milijardus gyventojų, tačiau iki dvidešimt pirmojo amžiaus vidurio, šis skaičius gali išaugti iki 10 milijardų, todėl ateityje susidaręs energijos poreikis gali būti patenkinamas tik atrandant naujus energijos gavimo būdus ir sistemingai didinant atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimą. Šiuo metu naudojamas energijos tiekimo tinklas, taps nepajėgus perduoti reikalingus energijos kiekius vartotojams, iškastinis kuras gali išsekti, taip pat gavybos padariniai gali smarkiai sumažinti jo panaudojimą. Taigi viena iš pagrindinių 21 amžiaus visuomenės problemų rasti tinkamą energijos šaltinį, bei jos gavimo būdus. Alternatyvioji energetika - Ateities energetika, tik iškyla klausimas, kiek laiko vyks pereinamasis laikotarpis, kokią žalą dar spėsime padaryti aplinkai, kol alternatyvioji energetika atpigs, bei bus pakankamai naši ir plačiai naudojama. Saulės energetika labai paprastai galima panaudoti net neišsivysčiusiose šalyse, kur žmonės neturi elektros energijos, kadangi saulės elementai neužima daug vietos, ir jiems nereikalingi kiti aplinkos reikalavimai. Žmonės gali juos statyti tiesiog ant savo namų stogų taip apsirūpindami elektros energija. Taip pat pramonės įmonės, nusėjusios savo pastatų stogus saulės elementais, galėtų tapti nepriklausomos nuo elektros tinklų, bei iškastinio kuro. Kol nėra išrasta geresnio energijos šaltinio, saulė yra pagrindinis mūsų energijos šaltinis. Galbūt ateities kartoms pavyks suvaldyti termobranduolines reakcijas ir galės džiąugtis dideliais energijos kiekiais iš mažų kuro sąnaudų. Bet tai dar tik tolimes ateitis šiuo metu saulės elementai yra mūsų pagrindinis realus ateities energijos šaltinis.

Taip atsirado biokuro, geoterminės, vėjo, bei saulės energetikos sritys, kadangi hidroenergija jau nebuvo naujiena, ji buvo paprasčiausiai išgaunama. Vėjo energijos panaudojimui reikėjo sukurti paprastą prietaisą kadangi jį sudarė tik dvi reikalingos dalys: sparnuotė ir generatorius. Saulės energijai reikėjo rasti šaltinį, kuris jį sugertų. Buvo surasta, jog silicio puslaidininkiai gali sukaupti elektros energiją. Ši konstrukcija yra labai paprasta, jai nereikia ypatingos techninės priežiūros bei aplinkos. Bet saulės elemento naudingumo koeficientas vis dar yra nedidelis, apie 13%, bei reikia

stengtis išsaugoti naudingumo koeficientą visą jo eksploatacinį laikotarpį. Kadangi saulės elementai stovi atviroje erdvėje ir jiems kenkia smūgiai. Pirminis tyrimas, kuris turėtų įtakoti elemento veikimą, yra krušos poveikio tyrimas, nes didžiausią smūgį iš gamtos elementas turėtų gauti nuo ledėkų.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas yra saulės elementas, eksperimentiškai bandomas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Mechanikos inžinerijos katedroje sukurtu, krušos poveikį imituojančiu stendu, skirtu nustatyti saulės elementų galios kritimą, veikiant jį ledo krušos imitacija.

Temos naujumas

Ledo krušos poveikis saulės elementui, anksčiau tirtas tik pneumatiniu pabūklų ledo kamuoliuką į saulės elementą šaunant vieną kartą. Šis tyrimas leis pažiūrėti, kaip ledo kruša įtakoja galios kritimą veikiant elementą smūgių kruša.

Temos aktualumas

Dėl vis kylančios pasaulinės metinės temperatūros vidurkio ir aplinkos taršos, ieškoma žaliosios energetikos šaltinių. Saulės elementai, viena iš pagrindinių ekologiškos energetikos šaltinių. Kadangi, dėl statinių veiksmų saulės elementų galia beveik nemažėja, siekiama rasti dėl kokių priežasčių ji krenta. Vienas iš dinaminį veiksmų, įtakančių saulės elementų darbą yra ledo kruša.

Tyrimų metodika

Tyrimų metodika, sudaryta iš teorinės ir eksperimentinės dalių. Teorinėje dalyje, atlikta saulės elementų bei gamtos veiksmų įtakančių jų darbą apžvalga, eksperimentinėje dalyje - nustatyta kritinė jėga, kuriai veikiant skyla silicio kristalai, įvertintas saulės elemento galios praradimas, paveikus jį ledo krušos imitaciniu stendu.

Darbe atlikti tyrimai pagrįsti teorinės mechanikos, matavimų teorijos principais, pritaikant analitinius, empirinius ir skaitinius tyrimo metodus, panaudojant programinę įrangą „Pulse“ ir „Origin“. Pagrindiniai statistiniai skaičiavimai buvo atlikti naudojant statistinius paketus „Microsoft Excel“ ir „Origin“.

Eksperimentinę medžiagą sudaro jėgos matavimo duomenys. Eksperimentai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Mechanikos inžinerijos katedroje. Krušos parametrams nustatyti buvo panaudotos Danijos firmos „Brüel & Kjær“ matavimo priemonės.

Darbo mokslinė vertė

Nustatyta kritinė smūgio jėga, kuria paveikus saulės elementą, skyla silicio kristalai. Įvertintas saulės elemento galios mažėjimas, paveikus jį krušos imitaciniu stendu.

Darbo aprobacija

Skaitytas pranešimas Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „MOKSLAS-LIETUVOS ATEITIS“ 2019 m. balandžio 26 d.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Ledo krušos poveikio saulės elementams atlyktų tyrimų analizė

Ankstesni ledo krušos įtakos saulės elementui tyrimai atlikti, ledo kamuoliuką (**1.1 pav.**) šaunant į saulės elementą, pneumatinio pabūklo pagalba. Krušos poveikis PV moduliams, atkurtas mažo greičio smūginiais bandymais, šaunant poliamido sferą iš pneumatinio pabūklo. Pasiekiamas ledo kamuoliuko greitis svyruoja nuo 7 m/s iki 12 m/s. Visais atvejais, saulės elemente gauti įtrūkiai įtakojantys salės elementų veikimą (Corrado 2016). Šūvio metu pasiekama, net iki 6.99 kN smūgio jėga. Tyrimais įrodyta, jog stiklas įtrūksta ties 1152 N jėga. Tyrimas atliktas naudojant $\varnothing$ 25 mm, 34 mm, 40 mm ir 48 mm diametro ledo kamuoliukus (Olsson 2017), bet rezultatai gaunami jau po stiklo dūžio, t.y. ar stiklas apsaugo saulės elementą nuo pažeidimo nėra aišku. Realiomis sąlygomis ledo kruša nepasiekia tokios didelės jėgos. Todėl šiuo tyrimu, norima kuo tiksliau atkartoti realias gamtos sąlygas.



1.1. pav. Ledo krušos imitacijos kamuoliukas

1.2 Saules jėgainės

Mintis naudoti puslaidininkinius prietaisus Saulės spinduliuojamos šviesos energijos vertimui į elektros energiją kilo atradus pn sandūrą. Pirmieji saulės elementai buvo pagaminti iš silicio 1954 m. (Chapin *et al.* 1954). Saulės elementai praktiniam naudojimui komplektuojami į modulius, moduliai – į plokštes, plokštės – į saulės elementų laukus (Kytra 2006), kitaip tariant, saulės jėgainės.

Saulės foto elektros sektorius susideda iš keleto pasižyminčių skirtingomis charakteristikomis dalių. Tai gali būti prie elektros tinklo prijungtos sistemos, gaminančios elektrą, bet netiekiančios į elektros tinklą autonominės sistemos bei vartojimo prekės (laikrodžius, skaičiuotuvus, žaislus ir kt.). Foto elektros įrenginio instaliavimo kaina priklauso nuo to, prie kur jungiama fotoelektros jėgainė, t.y. ar ji prijungta prie elektros tinklo, ar ji autonominė (Katinas 2005).

Pagal jungimo tipą saulės elektrinės gali būti skirstomos į autonomines ir integruotas į elektros energetikos sistemos tinklą. Autonominės saulės elektrinės energiją tiekia tiesiogiai vartotojui, arba, jei elektros energija vartotojui tuo metu nereikalinga, ji tiekama į energijos kaupiklį (akumuliatorių bateriją) (Adomavičius 2010). Norint efektyviai išnaudoti fotoelektrinius modulius autonominės elektrinės atveju, reikalinga baterija tinkamai jos eksploatuocijai (pavyzdžiui, apsaugos nuo perkrovos) reikalingas ir akumuliatorių įkroviklis. Inverteris (keitiklis) naudojamas tada, kai yra

reikalingas ne tik nuolatinės, bet ir kintamosios srovės elektros energijos šaltinis. Esant didesnei elektrinės galiai, naudojama įvadinė spinta, kurioje gali būti sumontuotos apsaugos priemonės, taip pat ten elektros energija skirstoma imtuvams. Galingesnės saulės elektrinės, jeigu vietovėje yra energetikos sistemos elektros tinklas, jungiamos į tinklą. Tuomet integruotajai į elektros tinklą saulės elektrinei nereikalingas energijos kaupiklis (baterija) ir akumuliatorių įkroviklis. Visą arba tam tikrą dalį pagaminamos elektros energijos saulės elektrinė tinklo inverterio pagalba tiekia tiesiai į elektros tinklą.

2012 m. Rytų Vokietijoje, saulės energijos parke, pastatyta nauja sekcija, dėl kurios parkas tapo didžiausiu Europoje (1.2 pav.). Ypač įdomu tai, kad papildoma parko dalis įkurta senoje mineralų kasykloje, kurioje žemė turėjo būti netinkama naudoti dar daugelį metų.

Pastačius naująją parko sekciją išaugo papildoma 78 MW elektrinė. Dar puikiau tai, kad ji pastatyta vos per 3 mėnesius (Zimmer 2012).



1.2. pav. Vokietijoje esantis didžiausias Europoje 166 MW saulės energijos parkas 2012 m. (Zimmer 2012)

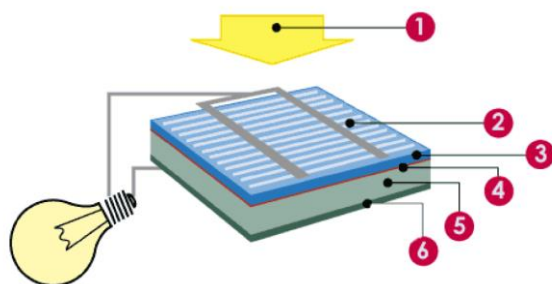
Naudoti žemę, netinkamą naudoti dėl įvairių priežasčių, yra puiki taktika didelių saulės energijos parkų kūrėjams. Ne tik dėl to, kad galima rekonstruoti į energetinę infrastruktūrą, kuri daug mažiau kenkia aplinkai, tačiau taip pat ir dingsta konkurencija dėl žemės naudojimo maisto gamybai ar kitiems svarbiems dalykams sukurti (miestų, gamyklų statyba, kelių tiesimas). Saulės energijos parkas yra Vokietijos netoli Senftenburgo, šiuo metu jo galia siekia 166 MW. Pasaulyje didžiausia saulės elektrinė siekia 250 MW galią, pastatyta Amerikoje Arizonos valstijoje (First Solar 2012).

Tokia sparti fotoelektros plėtra įmanoma tik dėl to, kad daugiau kaip 60 pasaulio valstybių ji yra remiama ir skatinama įvairiais būdais, dažniausiai saulės elektrinėse (SE) pagamintos energijos supirkimo tarifu pagalba. Fotoelektra remiama todėl, kad šio elektros gamybos būdo perspektyvumu neabejojama. Tai kuro nereikalaujantis ir aplinkos neteršiantis elektros energijos gamybos būdas. Fotoelektros modulių kainos kasmet po truputį mažėja, jų naudingumo koeficientas didėja. Prognozuojama, kad fotoelektros sistemų kainos per ateinančius metus kasmet mažės vidutiniškai po 5 % (Adomavičius 2010). Europos Sąjungos Atsinaujinančiosios energijos taryba prognozuoja, kad

iki 2040 metų fotoelektros gamyba pasaulyje sudarys 27,4 % nuo visos sunaudotos elektros energijos. Tuomet SE pagal energijos gamybos apimtį bus pirmoje vietoje, o antroje – vėjo elektrinės. Iš viso iš atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) 2040 m. planuojama pagaminti 82 % nuo visos sunaudotos elektros energijos (RES 2004).

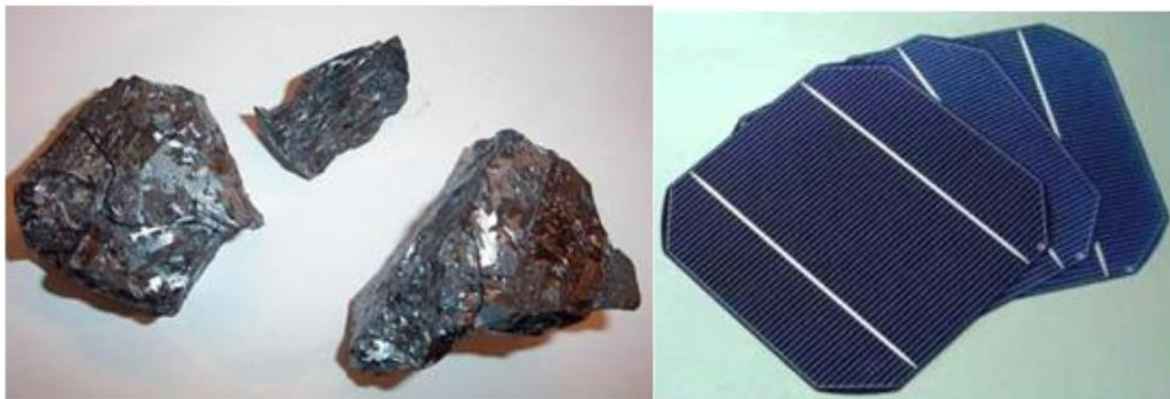
1.3 Saulės elementai, jų veikimo principai

Tipišką saulės elementą sudaro sekli pn sandūra, ji sudaroma prie vieno puslaidininkio plokštelės paviršiaus pritvirtinus kitą, naudojant difuzijos ar epitaksijos procesus. Sandūros plokštelės pusėje yra sudaromas krūvininkus surenkančių siaurų kontaktų tinklas, ji yra papildomai dengiama skaidrinančiu ir šviesos atspindį sumažinančiu dielektriniu sluoksniu. Priešingoje plokštelės pusėje kontaktas paprastai yra ištisinis; siekiant sumažinti krūvininkų rekombinaciją prie šio kontakto papildomai legiruojant (p+) yra sukuriama vidinis elektrinis laukas, atstumiantis skyles toliau nuo paviršiaus (Krotkus 2008). Saulės elemento schema pavaizduota 1.3 paveiksle. Saulės elementų pagrindas - silicis (lot. silicium). Tai yra periodinės elementų lentelės cheminis elementas, žymimas Si. Silicio atominis skaičius – 14. Plonos plokštelės, išpjautos iš silicio monokristalų, naudojamos šiuolaikinėje technikoje, o mūsų atveju, saulės elementuose, paverčiančiuose Saulės spindulių energiją elektros energija. Gali būti naudojami įvairių tipų saulės elementai: monokristalinio silicio, polikristalinio silicio, amorfinio silicio (plonaplėviai), iš kitų įvairių medžiagų (ne silicio) pagaminti plonaplėviai daugiasandūriniai (multijunction) elementai. Kol kas dažniausiai (daugiau nei 90 %), naudojami kristalinio silicio elementai kurių efektyvumas siekia 16–17 %. Tačiau palaipsniui auga plonaplėvių daugiasandūrių saulės elementų gamyba ir naudojimas. Laboratorijoje jau gautas daugiasandūrio elemento efektyvumas siekia 55 % (Adomavičius 2010). Teoriškai galima pasiekti ir didesnę efektyvumą. Saulėtą be debesų dieną į plokštumą, statmeną saulės spinduliams, krentantis saulės spinduliuotės intensyvumas (apšvieta) siekia apie 1 kW/m^2 . Dėl to esant tokiomis sąlygoms ir dabartiniam efektyvumui fotoelektros modulis, sudarytas iš kristalinio silicio elementų, gali tiekti iki 170 W elektrinę galią iš 1 m^2 . Padidėjus fotoelektros modulių efektyvumui ši galia sieks apie 500 W ir daugiau (Adomavičius 2010).



1.3. pav. Saulės elementas su pirštų tipo kontaktais apšviestoje plokštelės pusėje. 1 – Saulės šviesa; 2 – viršutinis kontaktas; 3 – n– tipo sluoksnis; 4 – pn sandūra; 5 – p+ tipo sluoksnis; 6 – apatinis kontaktas (Comel 2010)

Puslaidininkis sugeria tik tą šviesą, kurios kvanto energija yra didesnė už draustinių energijų tarpą. Fotogeneruoti krūvininkai ne tik naudoja savo energiją elektros kūrimui, bet ją ir išsklaido termalizuodamiesi. Todėl, atsižvelgus į Saulės spektrą, buvo nustatyta, kad optimalus puslaidininkio draustinių energijų tarpas turi būti apie 1,4 eV. Saulės elementų našumą mažina ir kiti faktoriai: krintančios šviesos atspindžiai, ne visi sugerti kvantai generuoja krūvininkų poras; fotogeneruotų krūvininkų rekombinacija tūryje, bei paviršiuje (Juška, Tamulaitis 2008).



1.4. pav. Grynas silicis (kairėje) ir silicio plokštelės (dešinėje) (Lynn 2010)

1.4 Fotovoltinis elementas

Puslaidininkiniai saulės elementai yra ganėtinai paprastas prietaisas. Puslaidininkiai turi savybę sugerti šviesą ir sugertos šviesos fotono energiją perduoti krūvio nešėjams – elektronui ir „skylėi“. Saulės elementas yra paprasčiausias puslaidininkinis diodas, kuris sukurtas šviesos energijai efektyviai sugerti ir paversti į elektros energiją. Tipinė saulės elemento konstrukcija pateikta 1.5. paveiksle. Saulės šviesa krinta į saulės elemento priekinę dalį. Metaliniai laidumo „takeliai“ esantys ant celės priekinio paviršiaus yra elektriniai kontaktai, pro tarpus tarp jų saulės šviesa sklinda į puslaidininkio tūrį. Šviesos atspindėjimą nuo paviršiaus mažinanti danga padidina šviesos kiekį patenkantį į puslaidininkį. Toks puslaidininkinis diodas gaunamas sudarant p-n tipo sandūrą, kuri gaunama difuzijos, implantacijos arba nusodinimo būdu. Kitas diodo elektrinis kontaktas yra suformuojamas ant galinės elemento dalies.

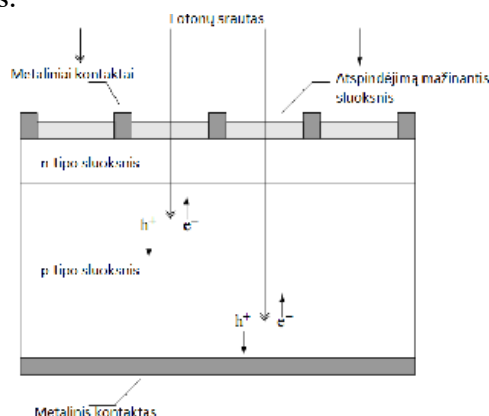
Visa elektromagnetinė spinduliuotė yra sudaryta iš dalelių - fotonų, kurie turi tam tikrą energijos kiekį, nusakomą pagal šaltinio spektrines ypatybes. Fotono energija apskaičiuojama pagal formulę:

$$E_{\lambda} = (h \cdot c) / \lambda \quad (2)$$

čia, h – Planko konstanta, c – šviesos greitis, λ – fotono bangos ilgis.

Tik pakankamai energijos turintys fotonai gali sukurti elektrono-„skylės“ porą. Fotonai, turintys daugiau energijos nei puslaidininkio draustinės juostos plotis, gali dalyvauti energijos virsmų procese. Dėl šios priežasties saulės šviesos spektrinė sudėtis yra svarbus faktorius lemiantis efektyvaus saulės elemento konstrukcines medžiagas.

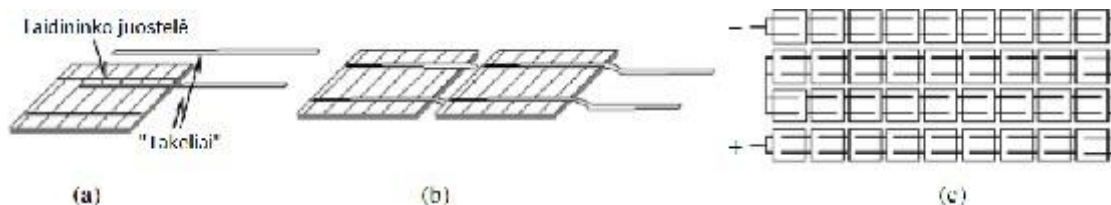
Fotovoltinė celė priekinėje ir galinėje dalyje turi elektrinius kontaktus (4.6 paveikslas). Prie celės prijungus apkrovą elektronai iš n tipo puslaidininkio teka per apkrovą ir grįžta į p tipo puslaidininkį ir rekombinuoja su skylėmis.



1.5. pav. Tipinė saulės elemento schema

Vienos celės generuojama galia yra maža, keletas tokių celių turi būti jungiamos į grupes tam, kad būtų sukurtas pakankamos galios ir tinkamas praktiniam pritaikymui modulis - FV elektros šaltinis.

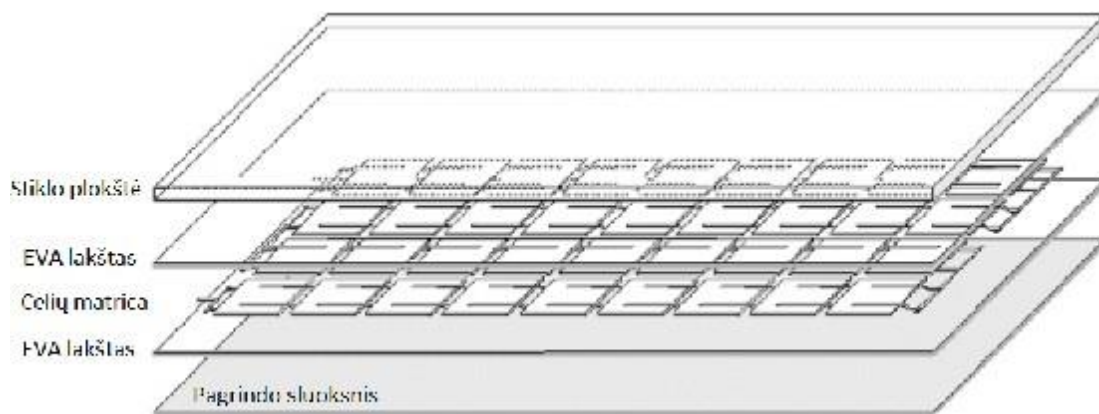
Modulyje celės paprastai yra jungiamos nuosekliai. Baigus sujungimą alavuoti variniai „takeliai“ yra prilituojami prie celės priekinėje dalyje einančių laidininkų juostelių (1.6 paveikslas).



1.6. pav. a) – celės sujungimas „takeliais“, b) – dviejų celių jungimas nuosekliai, c) – 36 nuosekliai sujungtų celių išdėstymas.

Du „takeliai“ leidžia elektros srovei per celę tekėti nepertraukiamai, net ir įvykus gedimui (pvz. nutrūkus vienam „takeliui“). Taip pat, efektyvus ant celės esančio tinklelio „pirštų“ nuotolis yra viena ketvirtoji celės kraštinės ilgio dalis, taip sumažinama celės varža. Laidumo „takeliai“ tarp celių yra nestandūs, todėl puikiai funkcionuoja terminio plėtimosi atveju. Kitas procesas – „takelių“ prilitavimas prie kitos celės galinės dalies (1.6 pav. (b)).

Celių matrica turi būti tinkamai apsaugota 20 metų darbui, lauko sąlygomis. Paketas apsaugo celes nuo mechaninių apkrovų, oro sąlygų, drėgmės ir smūgių, taip pat turi atlikti elektrinės izoliacijos funkciją. Tipinė modulio struktūra pateikta 1.7 paveiksle.

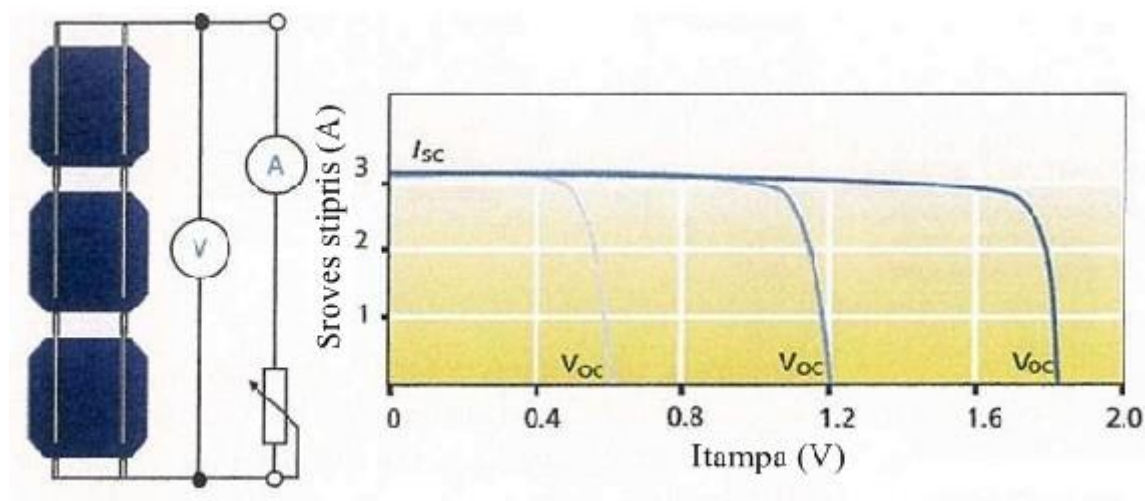


1.7. pav..Tipinė celių matricos kapsulės struktūra

Stiklo plokštei naudojamas storas natrio karbonato kalkių silikato stiklas, kuris suteikia moduliui mechaninį tvirtumą ir apsaugą, gerai praleidžia saulės šviesą. Šis stiklas privalo turėti mažai geležies priemaišų, kitaip gali suprastėti pralaidumas šviesai. Ultravioletinės spinduliuotės sulaikymui ir patikimumui didinimui šiuolaikiniai stiklai naudojami su cerio priemaiša. Norint stiprinti atsparumą smūgiams naudojamas grūdintas stiklas. Celių matrica dedama tarp dviejų sluoksnių apgaubiamosios medžiagos. Pati populiariausia medžiaga, naudojama celių matricos apgaubimui, yra polimeras - etileno vinilo acetatas (EVA). Galinei modulio daliai naudojamas kompozitinis plastikas, kuris apsaugo nuo drėgmės ir korozijos. Tvirtumui didinti kai kurie gamintojai galiniam paviršiui naudoja stiklo plokštę.

1.5 Kristalinio silicio elementų modulių elektrinės savybės

Vienos fotovoltinės celės generuojama įtampa yra mažesnė nei 1V (kristalinio silicio celė ~ 0.6V). Norint pasiekt reikiamą įtampą fotovoltinės celės yra jungiamos nuosekliai. Dauguma rinkoje esančių FV modulių turi nuo 36 iki 72 nuosekliai sujungtų celių. Nuosekliai sujungtos 36 celės generuoja pakankamai įtampos 12V baterijos krovimui, atitinkamai – 72 celių modulis generuoja tinkamą įtampą 24V baterijos įkrovimui. Celes jungiant nuosekliai, generuojamas srovės stipris nekinta ir yra lygus vienos celės generuojamam srovės stipriui (modulio įtampa lygi visų nuosekliai sujungtų celių įtampų sumai) (1.8 paveikslas).



1.8. pav. Modulio įtampa lygi visų nuosekliai sujungtų celių įtampų sumai.

Nesvarbu kokia yra jungimo schema, modulio generuojama galia yra lygi visų modulyje sujungtų celių generuojamų galių sumai. Masiškai gaminamų modulių galių diapazonas svyruoja nuo 50 W iki 200W. Srovės stipris svyruoja nuo 3A iki 8A, o įtampa apie 20 – 40 V. Didesnės ir mažesnės parametrų vertės užtikrina galimą įvairių taikymą specialioms įtaisams.

Gamintojai dažniausiai pateikia modulio voltamperinės charakteristikos parametrus (maksimali galia, trumpo jungimo srovė, atviros grandinės įtampa ir pan.) gautus atliekant matavimus standartinėmis testavimo sąlygomis (STC, angl. standart test conditions). Maksimali gauta galia, matuojant standartinėmis matavimo sąlygomis, yra vadinama maksimalia galia, matuojama vatais (Wp).

Realiomis darbinėmis sąlygomis, dėl kitokių aplinkos parametrų nei standartiniai, celės elektriiniai parametrai gali būti stipriai įtakoti, to pasekoje atsiranda galios nuostolių. Nuostolius lemiantys faktoriai gali būti suskirstyti į keturias pagrindines kategorijas:

Kampinis saulės šviesos pasiskirstymas. Dėl saulės judėjimo dangaus skliaute ir difuzinės apšvietimo dedamosios šviesa į modulio paviršių krenta ne statmenai.

Spektrinės saulės šviesos sudėtis. Dėl saulės judėjimo, oro užterštumo, oro sąlygų ir pan. saulės šviesos spektras nuolat kinta. Taip pagaminamas energijos kiekis taip pat nuolat kinta.

Apšvietos lygis. Celės darbinei temperatūrai nekintant, modulio efektyvumas mažėja kintant apšvietos lygiui. Apšvietos lygiui pasiekus 1000 kW/m² („1 saulė“), galios sumažėjimas atsiranda dėl logaritminės atviros grandinės įtampos priklausomybės - fotosrovės. Artėjant prie itin mažo apšvietos lygio galios mažėjimas yra greitesnis ir mažiau prognozuojamas.

Celės temperatūra, dėl aplinkos temperatūros pokyčio ir šviesos intensyvumo, celės modulyje, kaista. Aukštesnė temperatūra reiškia sumažėjusį efektyvumą. Tai dažniausiai didžiausia dedamoji lemianti galios nuostolius.

Šių parametrų svyravimų įtaką celei galima apskaičiuoti. Darbinė celės temperatūra gali būti apskaičiuota pagal:

$$T_{celės} = T_{aplinkos} + G \times \frac{NOCT - 20^{\circ}C}{0.8 \frac{kW}{m^2}}, \quad (1)$$

čia, $T_{celės}$ – celės temperatūra; $T_{aplinkos}$ – aplinkos temperatūra; G – saulės spinduliuotės intensyvumo lygis.

Trumpojo jungimo modulio srovės stipris yra proporcingas apšvietos lygiui ir nežymiai didėja kartu su celės temperatūra (taip yra dėl draustinės juostos sumažėjimo ir nepagrindinių krūvio nešėjų gyvavimo laiko pailgėjimo). Srovės stiprio pokytį nusako α koeficientas (%/oC). Kombinuojant abi prielaidas, trumpojo jungimo srovė priklauso nuo apšvietos ir celės temperatūros ir gali būti apskaičiuojama pagal:

$$I_{SC}(T_{cell}, G) = I_{SC}(STC) \times \frac{1 kW \cdot m^{-2}}{1 kW \cdot m^{-2}} \times [1 + \alpha(T_{cell} - 25^{\circ})], \quad (2)$$

Atviros grandinės įtampa labai priklauso nuo temperatūros. Įtampa tiesiškai mažėja kartu su temperatūra. Šį kitimą nusako koeficientas β (%/oC). Priklausomybę galime aprašyti tokia lygtimi:

$$V_{OC}(T_{cell}, G) = V_{OC}(STC) - \beta(T_{cell} - 25^{\circ}C), \quad (3)$$

Modulio nuostoliai priklauso ne vien nuo aplinkos sąlygų. Dėl skirtingų kiekvienos celės voltamperinių charakteristikų, modulyje atsiranda nuostolių, susijusių su celių parametrų nesutapimu. Šie skirtumai atsiranda dėl neišvengiamos parametrų sklaidos gamybos metu arba dėl netolygaus apšvietimo bei temperatūros pasiskirstymo modulyje. Sumažinti nesutapimo nuostolius, pagamintų celių parametrai yra išmatuojami ir jos pagal tai surūšiuojamos. Jungiant nuosekliai svarbiausias parametras yra srovės stiprio reikšmė ties maksimalios galios reikšmė. Praktikoje dažnai pasitaikantis rūšiavimo metodas – prieš laminuojant celes jos yra patikrinamos matuojant srovės stiprį ties nustatyta įtampos reikšmė. Pagal tai surūšiuojami elementai, kuriuos sujungus į elektrinę grandinę gaunamas parametrų neatitikimo nuostolių dydis yra žemesnis už nustatytą leistiną.

1.6 Saulės elementų rūšys, jų privalumai ir trūkumai

Monokristalinio silicio saulės elementai iki pastarojo laiko sudarė apie trečdalį visų gaminamų saulės elementų. Žinoma daug silicio monokristalų auginimo metodų. Populiariausias – Čochralskio (Czochralski) metodas – kai monokristalas lėtai traukiamas iš išlydyto silicio. Traukimo greitis apie 1 mm/min (1,5 kg·h⁻¹). Dažniausiai kristalas silpnai legiruojamas boru (1016 cm⁻³), siekiant didelio elektronų difuzijos nuotolio p tipo silicyje (Nelson 2006).

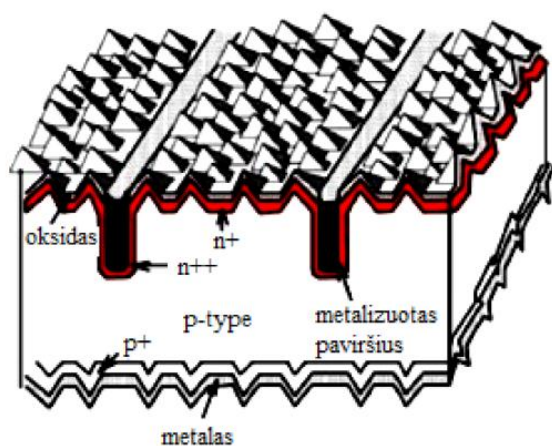
Monokristalo skersmuo 15–30 cm. Vėliau jis pjaustomas 0,3–0,5 mm storio ir keturkampėmis 100 cm² plokštelėmis. Nušlifuotas paviršius difuzijos ar joninės implantacijos būdu legiruojamas fosforu (1019 cm³), siekiant sudaryti laidų n tipo emiterį ir sumažinti paviršiaus varžą. Optimalus sandūros gylis apie 0,3–1 μm. Tipiškas tokio elemento efektyvumas siekia 15 %. Tai gana brangus ir

daug energijos reikalaujantis gamybos būdas. Jo trūkumai – lieka gana daug deguonies priemaišų, pakankamai lėtas silicio kristalo augimo greitis – $1,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

Privalumai: išvengiama kenksmingų aplinkai ir žmogaus sveikatai cheminių procesų, galima auginti pakankamai didelio skersmens (iki 15 cm) silicio monokristalų luitus, atidirbta gamybos technologija (Nelson 2006).

Kitas būdas – zoninis lydymas, kai aukštesnės už lydymosi temperatūros ruožas lėtai (3 mm/min) slenka per polikristalinį silicį. Šis procesas kartojamas keletą kartų silicio išgryninimui, zoninio valymo būdu. Tai leido pasiekti elemento efektyvumą iki 20 %, bet tai dar brangesnis gamybos būdas. Šios gamybos technologijos trūkumai: gana didelis užauginto kristalo defektų kiekis; reikalingas daugkartinis zoninis valymas, tinkamam silicio grynumo lygiui pasiekti; brangi technologija; sudėtinga gauti didelio diametro strypą.

Tačiau išvengiama kenksmingų aplinkai ir žmogaus sveikatai cheminių procesų. Gaunamas labai švarus Si monokristalas su minimalia O_2 koncentracija.



1.9. pav. Monokristalinio silicio saulės elementas su atspindį mažinančiais tekstūruotais paviršiais ir paslėptais elektrodais (Nelson 2006)

Siekiant sumažinti šviesos atspindį paviršius tekstūruojamas ir padengiamas atspindį mažinančiu tantalio oksidu, titano oksidu, arba silicio nitridu. Siekiant sumažinti paviršinių, uždengiančių šviesą, elektrodų plotą, jie yra „laidojami“ (1.9 pav.). Prieš užnešant elektrodą ant laidojimo duobutės paruoštas silicio kristalas papildomai legiruojamas n^{++} . Tai sumažina nuoseklią varžą bei paviršinę rekombinaciją. Siekiant sumažinti paviršinę rekombinaciją ties apatiniu elektrodu, prieš jį užnešant, paviršius papildomai legiruojamas, sudarant p^{+} - p sandūrą. Visų optimizavimų rezultate pavyko priartėti prie teorinio efektyvumo ribos – 26 % (Nelson 2006).

Polikristalinio silicio saulės elementai, tai polikristalinė medžiaga yra sudaryta iš daugelio įvairaus dydžio ir formos kristalitų, chaotiškai orientuotų vienas kito atžvilgiu. Polikristalinio silicio sluoksniai yra gaminami tik saulės elementams. Gaminant tiesioginės kristalizacijos būdu, iš skystos fazės, gaunamas kristalo dydis yra nuo 1 mm iki 10 cm. dydžio. Toks silicis kartais vadinamas

multikristaliniu - mc-Si. Multikristalinio silicio saulės elementų gamyba yra pigesnė nei monokristalinio. Silicis yra lydomas ir pilamas į kvadratinį SiO/SiN padengtą grafitinį tiglą. Galima pagaminti kvadratinės, stačiakampės ir kt. formų medžiagą. Proceso metu reikia kontroliuoti, kad silicio lydalas būtų paviršiuje. Užauginti silicio luitai pjaustomi į 0,5 mm storio plokštes, vėliau šlifuojami. Kitas tiesioginės kristalizacijos būdas, nereikalaujantis pjaustymo – EFG (edge fed growth), kristalo auginimas, ištraukiant jį iš skystos fazės tarp dviejų plokštelių (Lynn 2010). Gaminant polikristalinį silicį iš garų fazės kristalitų, dydis apsiriboja mikrometro – milimetro ribose.

Iš p-Si plokštelių saulės elementai gaminami analogiškai monokristaliniais, siekiant prie paviršiaus sudaryti pn sandūrą, užnešamas junginys turintis fosforo (PCl₃), pakaitinamas (~ 1100 °C), ėsdinamas, siekiant gauti gofruotą paviršių, bei padengiamas mažinančiu atspindį sluoksniu. Tačiau polikristalinis silicis turi daugiau priemonių, tai lemia mažesnę krūvininkų gyvavimo trukmę, taigi mažesnę efektyvumą nei monokristalinio silicio saulės elementai. Tačiau šiuo metu tai patys populiariausi saulės elementai – jie sudaro apie pusę iš visų rūšių saulės elementų (Nelson 2006).

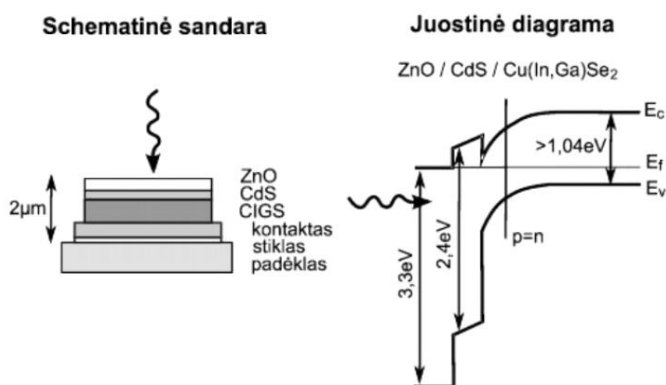
Pramoninių polikristalinių saulės elementų efektyvumas yra 16,6% ir 12,8% . Darant prielaidą, kad saulės elementų priekiniuose ir galiniuose paviršiuose yra identiškos mikrostruktūros, mažesnis galinio paviršiaus energijos konversijos efektyvumas, palyginti su priekiniu paviršiumi, gali būti dėl skirtingų priekinių ir galinių optinių paviršių atsako. Dėl didelio atviro galinio paviršiaus polikristalinis saulės elementas sugeria mažiau infraraudonųjų saulės spindulių, todėl veikia žemesnėje temperatūroje, taip didėja elektros energijos gamybos efektyvumas. Polikristalinis PV modulis generuoja iki 90% daugiau elektros energijos, nei įprasti monokristaliniai moduliai. Polikristaliniai moduliai gali generuoti iki 30% daugiau energijos nei monokristaliniai moduliai, dėl labiau atspindinčio paviršiaus, taip pat polikristalinis PVT kolektorius su aliuminio reflektoriumi sukuria 40% papildomos elektros ir šilumos energijos (Sopian 2017)

Amorfinio hidrogenizuoto silicio (a-Si:H) saulės elementai, tai silicio ir vandenilio mišinys, kur H₂, priklauso nuo gamybos sąlygų, sudaro apie 2–20 %. Šiam tipui būdinga ženkliai pigesnė, paprastesnė gamybos technologija bei galimybė gaminti didelio ploto elementus, tai rodo jų perspektyvumą. Netikėta, kad ši medžiaga, priešingai nei amorfinis silicis, yra jautri priemonių legiravimui, pasižymi dideliu fotojautriu ir artimu vienetui kvantiniu našumu. Amorfiniame silicyje priklauso nuo gamybos sąlygų yra tūkstančiai neįsotintų ryšių, kurie sąlygoja didelį lokalių būsenų tankį, draustinių energijų tarpo viduryje, pririšančių Fermio lygmenį. Todėl laidumą sąlygoja elektronai ties Fermio lygmeniu ir medžiagos savybės analogiškos metalui: itin maža krūvininkų gyvavimo trukmė, nestebimas fotolaidumas, fotoluminescencija, laidumo keitimas legiruojant. Hidrogenizuotame silicyje vandenilis prisijungia prie neįsotintų ryšių tuo išvalydamas draustinių energijų tarpą nuo lokalių būsenų, o tai ir sąlygoja puslaidininkines savybes. Atsitiktinis potencinis laukas išskiria fotogeneruotas poras ir elektronai ir skylės pernešamos skirtingais keliais. Tai sąlygoja

artimą vienetui kvantinį našumą bei daug silpnesnę už Lanževeno rekombinaciją, būdingą netvariems dariniams (Nelson 2006). a-Si:H saules elementų privalumai lyginant su kristaliniais silicio elementais: optinė sugertis a-Si:H didesnė nei kristalinio. Krūvininkų a-Si:H judrumas mažas (elektronų apie $1 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$, skylių – $\sim 10\text{--}2 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$), todėl nėra paviršinės rekombinacijos nuostolių dėl atgalinės difuzijos. a-Si:H elementai yra labai ploni ($< 1 \mu\text{m}$), tai sąlygoja, kad kontaktinis laukas įsiskverbia per visą sluoksnio storį ir krūvininkų pernašą sąlygoja jų dreifas. a-Si:H saulės elementus nesudėtinga gaminti didelio ploto ant lankstaus ar skaidraus padėklo;– paprastesnė ir daug pigesnė technologija.

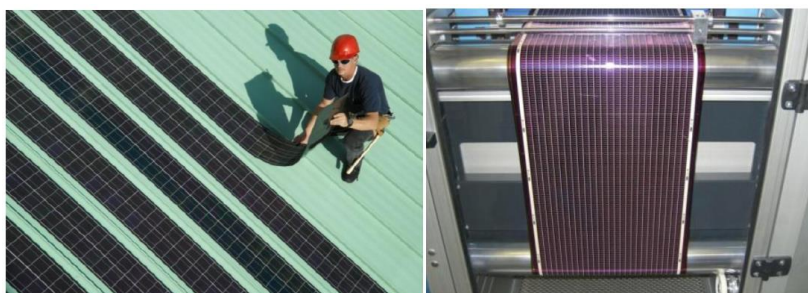
Amorfinio silicio saules elementų trūkumai: a-Si:H saules elementų efektyvumas ($\sim 6\text{--}8 \%$) mažesnis negu c-Si. Laikui bėgant jie degraduoja, nes ilgai šviečiant susidaro nauji neįsotinti ryšiai. Tai Stablerio-Vronskio reiškinys. Tačiau pakaitinus sluoksnį apie 200°C temperatūroje jo savybės pilnai atsistato (Lynn 2010).

CIS, CIGS saules elementai. CIS – tai kristalinių CuInSe_2 ar CuInS_2 ir CdS plonų sluoksnių heterosandūra. Pažymėtina, kad šių medžiagų gardelės konstantos ir giminingumai artimi, taigi turime idealią heterosandūrą



1.10. pav CIGS saules elemento sandara ir energijos juostų diagrama (Nelson 2006)

CIGS saules elemento pagrindas yra vario-indžio-galio-disulfoselenidas ($\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{SSe})_2$). Šio mišinio storis yra $\sim 1 \mu\text{m}$, sugerties koeficientas $\alpha > 10^5 \text{ cm}^{-1}$ plačioje spektro dalyje. Draustinės juostos tarpas gali svyruoti nuo 1,02 eV CIS (grynas CuInSe_2) iki 1,68 eV (grynas CuGaSe_2). Didelis saules elemento naudingumo koeficientas 19,5 %, modulio – 13 % (Nelson 2006).

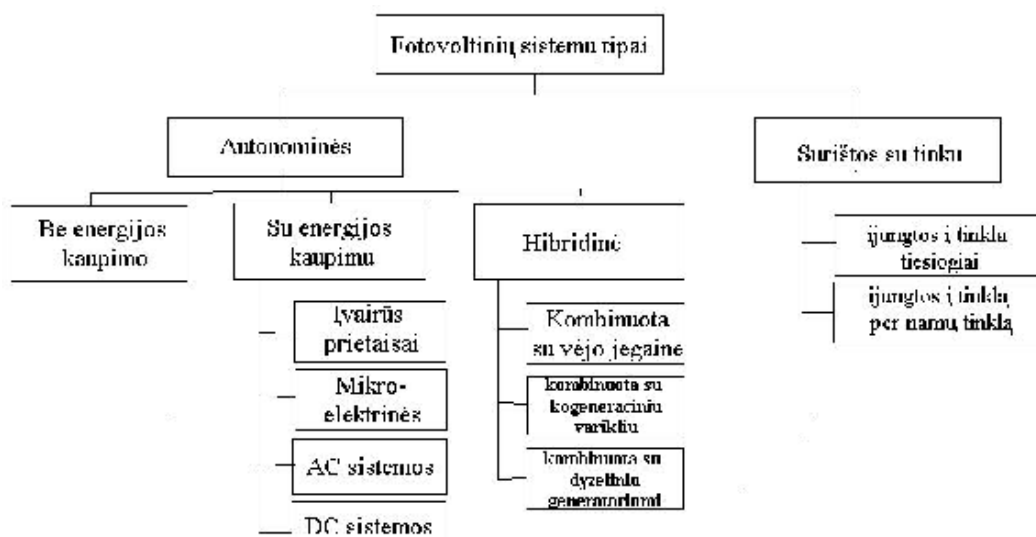


1.11. pav. Lankstusis saules elementas (Lynn 2010)

CIS ir CIGS tipo elementų privalumai: galima gaminti ant lanksčių padėklų, ilgalaikis stabilumas, santykinai pigi gamyba. Trūkumai: riboti indžio ištekliai, CdS toksiškumas. Gamybos technologija – Se garinimas vakuume ant užgarintų In, Ga ir Cu metalų sluoksnių, esant padėklo temperatūrai $\sim 500^{\circ}\text{C}$ (Nelson 2006).

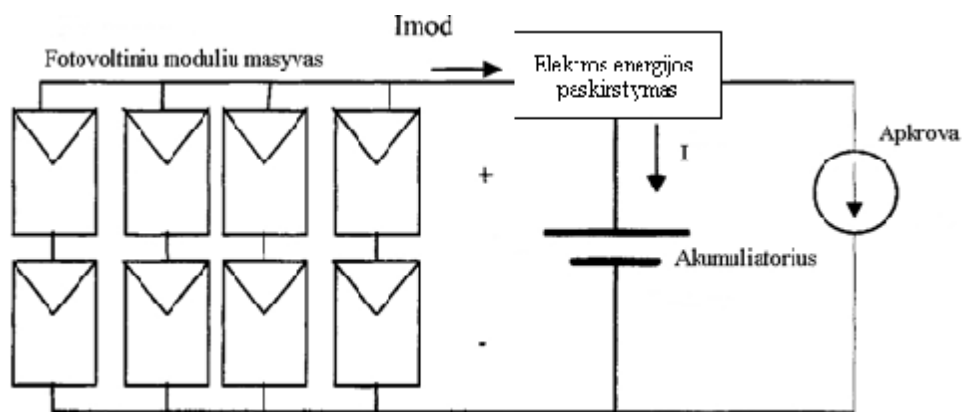
1.7 Fotovoltinių saulės energijos sistemų tipai

Fotovoltinės sistemos gali būti suskirstytos autonomines ir su tinklu surištas sistemas. Autonominėse sistemose priklausomai nuo elektros energijos poreikio parenkamas fotovoltinio generatoriaus dydis. Tačiau dažniausiai energijos poreikio ir energijos pasiūlos laikai nesutampa, tokiu atveju reikalingas energijos kaupimas. Jei fotovoltinė sistema veikia kombinuotai su papildomu energijos šaltiniu (vėjo jėgainė ar dyzelinis elektros generatorius), tokia sistema vadinama hibridine sistema. Hibridinės sistemos tinklu surištos su vietiniu elektros tinklu, jį naudoja kaip energijos kaupimo priemonę. Tarkim, Vokietijoje dauguma fotovoltinių sistemų yra prijungtos prie elektros tinklo, dėl taikomų subsidijų elektros energijai supirkti. Pastaruoju metu vis daugiau ir daugiau statomų fotovoltinių sistemų Europoje ir Šiaurės Amerikoje yra jungiamos į tinklą. Besivystančiose šalyse labiau paplitusios autonominės sistemos. Prognozuojama, kad netolimoje ateityje šis skaičius turėtų sparčiai augti. Fotovoltinių sistemų tipai pateikti 1.12 paveiksle.



1.12 pav. Fotovoltinių sistemų tipai

Autonominės fotovoltinės sistemos yra labiausiai paplitusios pasaulyje sistemos. Autonominė sistema turi tiekti elektros energiją nepertraukiamai, visus metus. Standartinė sistemos schema pateikiama 1.13 paveiksle.



1.13. pav. Standartinė autonominės sistemos schema.

Fotovoltinis generatorius (modulių masyvas) yra sujungtas su akumuliatoriumi, per galios paskirstymo įrenginį, ir apkrovą. Ypatingais atvejais fotovoltinis generatorius gali būti sujungiamas tiesiogiai su apkrova (vandens perpumpavimo sistemose). Jei sistemoje yra naudojami prietaisai, kurie naudoja kintamą elektros srovę, tuomet sistema papildoma dar vienu komponentu inverteriu. Naudojant šiuolaikinę elektroniką nuolatinės srovės virsmas į kintamą atliekamas su nedideliais nuostoliais.

Autonominės sistemos statomos, jei prisijungti prie bendro elektros tinklo yra labai brangu arba neįmanoma. Autonominės sistemos turi didelį potencialą įsitvirtinti besivystančiose šalyse, kur nėra elektros tinklų infrastruktūros. Tačiau technologijų raida ir gamybos procesų pigimas kuria autonominių sistemų potencialą būti panaudotoms išsivysčiusiose šalyse.

1.8 Saulės jėgainių naudojimas įvairiose klimato zonose

Mažėjant naftos atsargoms ir gresiant klimato atšilimui, vis labiau didėja dėmesys saulės fotovoltiniams įrenginiams kaip atsinaujinančios ir nežalingos aplinkai energetikos alternatyva. Vykstančios naujų medžiagų paieškos vis labiau didina komercinių fotovoltinių modulių efektyvumą. Šių sistemų montavimas, siekiant geriausio pelningumo, pirmiausia priklauso nuo jų geografinės padėties (platuma ir gaunama saulės spinduliuotė) ir įrenginio konstrukcijos (posvyrio kampas, orientavimas į Saulę) panaudojant didžiausią Saules energijos potencialą (Mani et al. 2010).

Vis dėlto, norint tinkamai įvykdyti šiuos reikalavimus yra kitų reikšmingų veiksnių, kurie sąlygoja sistemos veikimą (efektyvumą ir našumą) – tai atmosferiniai veiksniai. Lyginant saulės jėgainių eksploatavimo sąlygas pasauliniu mastu, matomas didelis skirtumas, kurį lemia geografinė platuma, klimato juostos su charakteringais klimato reiškiniais. Jau vien Saulės radiacijos srautas žemės paviršiuje pasiskirsto labai netolygiai. Vidutinis srauto tankis yra 210–250 W/m² subtropinėse klimato juostose ir dykumose, 130–210 W/m² vidutinėse platumose ir 80–130 W/m² šiaurėje. Taigi, dėl tokių klimatinių skirtumų atliekami įvairūs tyrimai, kurie padeda nustatyti vietovės tinkamumą fotovoltiniams įrenginiams. Pavyzdys galėtų būti Omano valstybės, esančios pietvakarinėje Azijos dalyje, tinkamumo saulės jėgainėms analizė. Vietovė pasirinkta neatsitiktinai. Didelis Saulės

intensyvumo potencialas, tačiau yra kelios problemos - dulkėtumas, aukšta temperatūra, gėlo vandens išteklių trūkumas. Gauti rezultatai parodė, kad tik 9 % Omano teritorijos tinkama jėgainėms eksploatuoti (Charabi, Gastli 2013). Buvo išnagrinėtos įvairios fotovoltinės technologijos, tokios kaip kristalinio, amorfinio silicio, kadmio telūrido, CIGS bei saulės koncentradoriai. Tyrimas parodė, kad didžiausią potencialą šiame regione turi saulės spindulius koncentruojančios sistemos. Jei tokiomis jėgainėmis būtų užstatytas visas tinkamas žemės plotas, būtų išgaunama net 73% metinio valstybės energijos poreikio (Charabi, Gastli 2013).

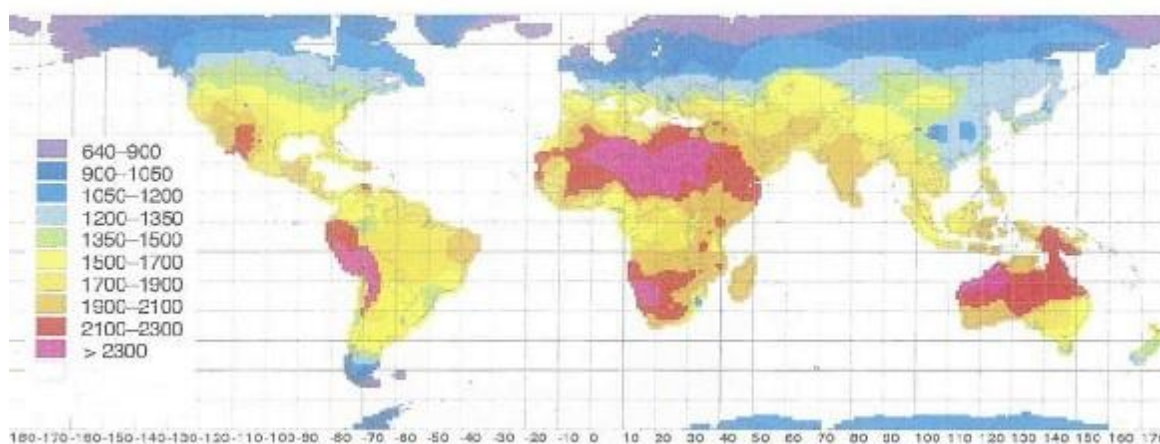
1.9 Saulės šviesos energijos pasiskirstymas

Saulės radiacijos lygis atvira kosmose priklauso nuo atstumo iki saulės. Žemė metų laikotarpyje arčiausiai saulės priartėja iki $1.47 \cdot 10^8$ km, toliausiai atitolsta – $1.52 \cdot 10^8$ km. Nuotolio iki saulės kitimas lemia saulės radiacijos pokyčius nuo 1325 W/m^2 iki 1412 W/m^2 . Vidurkinė saulės spinduliuotės intensyvumo lygio vertė yra laikoma saulės spinduliuotės intensyvumo konstanta (vakuume):

$$E_Q = 1367 \text{ W/m}^2, \quad (4)$$

Šis saulės spinduliuotės intensyvumo lygis Žemės paviršiaus nepasiekia, nes tankus atmosferos sluoksnis sumažina saulės spinduliuotės lygį, dalį šviesos atspindėdamas ir sugerdamas (ozono sluoksnis, vandens garai, deguonis, anglies dvideginis), ir išsklaidydamas (oro molekulės, dulkių dalelės ir oro tarša). Esant geroms oro sąlygoms saulės apšvietos lygis Žemės paviršiuje gali pasiekti iki 1000 W/m^2 ir ši vertė nedaug priklauso nuo vietovės. Jeigu saulės radiacijos kiekis per metus būtų susumuotas gautume suminį metinį saulės radiacijos kiekį kWh/m^2 . Šis suminės radiacijos kiekis labai priklauso nuo Žemės rutulio regiono, kuriame yra matuojama.

Kai kurie regionai pusiaujo srityse gali per metus gauti iki 2300 kWh/m^2 , pietinėje Europoje šis dydis gali siekti iki 1700 kWh/m^2 per metus, šiauriau esančiuose regionuose, pavyzdžiui Vokietijoje – iki 1040 kWh/m^2 . Europoje vyrauja ryškus sezoniškumas ir tai ypač pastebima vertinat saulės spinduliuotės intensyvumo lygius vasaros ir žiemos sezonais (E. Rimkus 2011).



1.14. pav. Pasaulinis metinės saulės šviesos energijos kiekio į ploto vienetą lygio pasiskirstymas. (Rimkus 2011)

1.10 Vyraujantys atmosferiniai veiksniai Lietuvoje

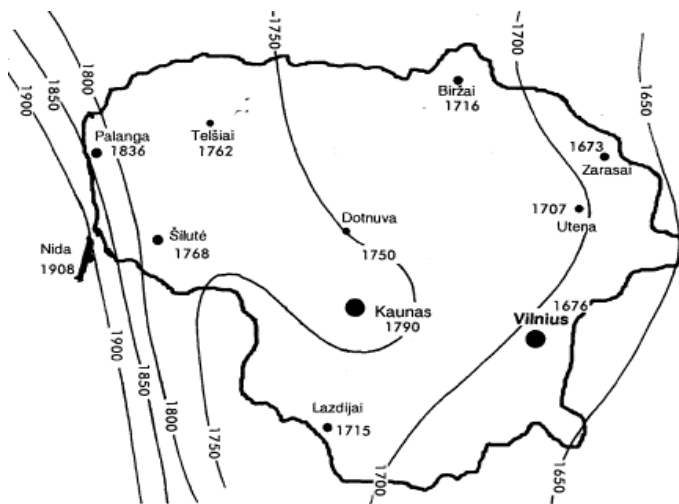
Svarbiausios Lietuvos klimato savybės priklauso nuo teritorijos geografinės padėties. Lietuva yra vidutinio klimato juostos šiaurinėje dalyje. Teritorijos nuotolis nuo pusiaujo (6100 km) ir šiaurės ašigalio (3900 km) lemia bendrosios saulės spinduliuotės dydį per metus, Lietuva jos gauna vidutiniškai 3600 MJ/m^2 (pusiaujo sritys – $6000\text{--}8000 \text{ MJ/m}^2$).

Antras globalinis veiksnys – vidutinėse platumose vyraujanti vakarų oro masių pernaša, apimanti visą troposferą ir dalį stratosferos. Lietuvos klimato bruožai dar priklauso ir nuo žemynų, vandenynų ir jūrų išsidėstymo, nuo reljefo absoliučiojo aukščio, dirvožemio savybių ir augalinės dangos. Į vakarus nuo Lietuvos plyti Baltijos jūros bei Atlanto vandenyno akvatorijos ir tik nedideli sausumos plotai – Skandinavijos ir Jutlandijos pusiasaliai su salomis. Į rytus kelis tūkstančius kilometrų tęsiasi Eurazijos žemynas. Todėl Lietuvos teritorijoje, nors tai ir pajūrio kraštas, klimatas nėra tipiškas jūrinis. (Kabys 2004)

1.11 Saulės energijos ištekliai Lietuvoje

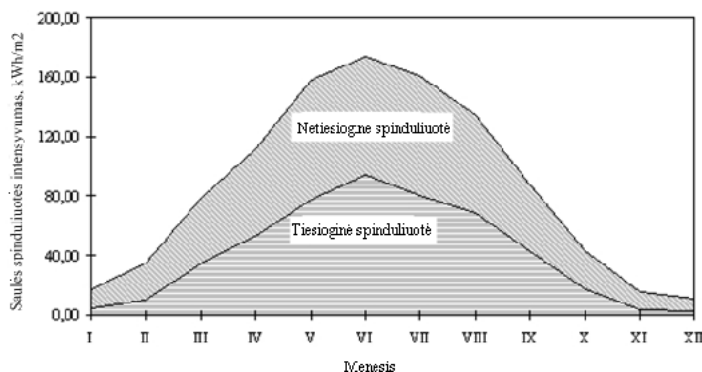
Lietuva turi pakankamai saulės, vėjo, hidro, biomasės ir geoterminių išteklių. Lietuva – valstybė esanti $55\text{--}56^\circ$ o šiaurės platumoje, tai yra tokioje pat platumoje kaip ir Jungtinė Karalystė, pietų Danija, pietų Švedija. Lietuvoje saulės apšviestumo lygis yra matuojamas dviejuose miestuose, tai Kaune (54.54°Š) ir Šilutėje (55.21°Š), nutolę atitinkamai 200km ir 40km nuo vakarinės pakrantės.

Dienos ilgumas, matuojamas 11 meteorologinių stočių, išsidėsčiusių per visą Lietuvos teritoriją, priklauso nuo atstumo iki jūros (1.15 paveikslas) (didžiausias atstumas nuo pakrantės iki rytinės valstybės sienos yra apie 350 km). Kasmetinis saulės spinduliuotės intensyvumo lygis į horizontalų paviršių Šilutėje yra 968 kWh/m^2 , o Kaune – 1025 kWh/m^2 . Matavimai atliekami jau nuo 1955 metų.



1.15. pav. Metinis saulės švytėjimo laiko pasiskirstymas Lietuvos teritorijoje (h).

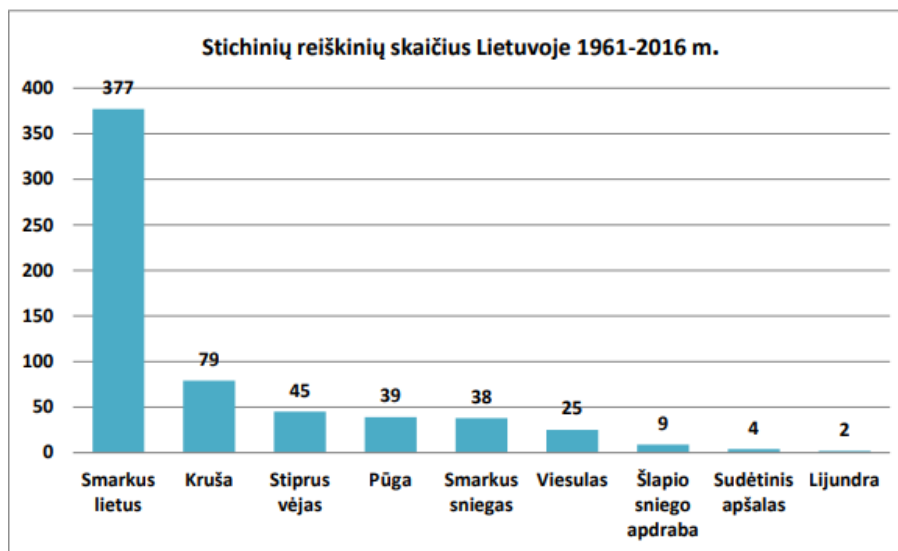
Spindėjimo trukmė ir saulės radiacijos lygiai Lietuvoje yra panašūs į Čekijos (1720 h/metus, 1030 kWh/m²) ar Švedijos (820-1050 kWh/m²). Didžiausia saulės energijos dalis per metus yra gaunama nuo Kovo iki Rugsėjo mėnesio (1.16 paveikslas).



1.16. pav. Tiesioginės ir netiesioginės saulės radiacijos metinis pasiskirstymas (kWh/m²).

1.12 Stichiniai reiškiniai Lietuvoje

1.1. Lentelė. Stichinių reiškinių skaičius Lietuvoje 1961 m. - 2016 m. (Lietuvos hidrometeorologinė tarnyba).



Krituliai - tai vanduo skystame arba kietajame pavidale iškrintantis iš debesų, arba nusėdantys ant žemės paviršiaus ir daiktų. Jie pradeda kristi tada, kai lašai esantys debesyse pasidaro per stambūs ir sunkūs ir nebegali išsilaikyti pakibę ore. Krituliai yra klasifikuojami pagal įvairius požymius. Pagal genetinį principą krituliai yra skirstomi į ištisinius, liūtinius ir dulksnų. Ištisiniai krituliai – tai ilgai trunkantys (dešimtys valandų), vidutinio intensyvumo krituliai, pasiskirstę didelėje teritorijoje. Liūtiniai krituliai yra ištisinių kritulių priešingybė: jie iškrinta nedidelėje teritorijoje, trumpalaikiai, pasižymi staigumu ir dideliu intensyvumu, taip pat neretai lydimi žaibų ir perkūnijų, o lietaus lašai ar sniego dribsniai būna stambūs. Dulksna pasižymi ilgalaikiais tačiau neintensyviais krituliais, kurie 18 iškrinta virš didelių teritorijų. Šie krituliai sudaryti iš labai smulkių dalelių (vandens lašelių iki 0,5 mm arba ledo kristalų (sniego grūdų) esant neigiamai temperatūrai). Pagal agregatinę būseną krituliai skirstomi į skystuosius, kietuosius ir mišriuosius. Skystieji krituliai gali būti dvejopi: 1) Lietus – tai

0,5 – 6 mm. dydžio vandens lašeliai; 2) Dulksna – tai 0,05 – 0,5 mm dydžio vandens lašeliai, kurie labai lėtai krenta. Kietieji krituliai yra septyneriopi: 1.) Sniegas – įvairaus dydžio ir formos ledo kristalai arba snaigės. Dažniausiai pasitaikanti snaigių forma yra žvaigždės su šešiais spinduliais; 2.) Sniego kruopos – sudaryti iš didesnių nei 1 mm sniego gabalėlių, kurios būna minkštos, baltos arba matinės bei sferiškos; 3) Sniego grūdėliai – tai kietieji krituliai, sudaryti iš mažesnių nei 1 mm sniego gabalėlių; 4) Ledo kruopos – kietos 2 – 5 mm dydžio skersmens dalelės; 5) Kruša – tai krituliai, kurie sudaryti iš didesnių nei keli milimetrai, netaisyklingos formos ledo gabaliukų. Pasitaiko atvejų, kai ledo gabaliukų svoris yra didesnis nei 300g; 6) Ledinis lietus – smulkios, visiškai skaidrios, 1 – 3 mm dydžio dalelės; 7) Ledo adatos ir kristalai – šešiakampės prizmės formos kristalai, kybantys ore. Mišrieji krituliai – tai tirpstančio sniego formos krituliai, kurie krenta, kai oro temperatūra artima 0°C. Šie krituliai dažniausiai vadinami šlapdriba. Pagal kilmę krituliai skirstomi į dvi grupes. Pirmąją grupę sudaro krituliai, iškrintantys iš atmosferos) Skystieji - lietus, dulksna, liūtis (liūtinis lietus), ledinis lietus; 2) Kietieji - sniegas, sniego kruopos, kruša, snygis (liūtinis sniegas), sniego grūdai, ledo kruopos, ledo adatos; 3) Mišrieji - šlapdriba, liūtinė šlapdriba. Antrąją grupę sudaro krituliai, nusėdantys ant žemės paviršiaus, kurie suskirstyti taip: 1) Skystieji - Rasa, skysta apnaša; 2) Kietieji - šarma, kieta apnaša, lijundra, grūdėtasis šerkšnas, kristalinis šerkšnas, plikledis. (Rimkus 2011) Lietuvoje dažniausiai pasitaikantys krituliai yra lietus, sniegas. Pavojingiausi krituliai saulės elementams yra kruša, jų Lietuvoje per 55 metus užfiksuoti 79 atvejai, t.y. per metus Lietuvoje kruša pasitaiko 1,43 karto.

2. PROBLEMOS FORMULAVIMAS, DARBO TIKSLAI IR UŽDAVINAI

Šiuo metu pasaulyje, saulės elementai yra labai plačiai naudojami elektros energijos gavybai, kadangi, tai draugiškas aplinkai, didelių investicijų bei specifinės priežiūros nereikalaujantis energijos šaltinis. Norint išlaikyti saulės elementų naudingumo koeficientą, visą jo eksploatacinį laikotarpį, reikia kuo geriau užtikrinti atsparumą įvairiems gamtos veiksniams. Vienas iš veiksnių, galinčių įtakoti saulės elementų darbą yra ledo kruša. Po šio tipo kritulių, saulės jėgainėse aptinkami apsauginio stiklo įtrūkiai. Saulės elementuose, susiformavusiems įtrūkiams nustatyti naudojama elektroliumensencinė kamera.

Ištirti ledo krušos poveikį saulės elementams yra sunku, kadangi juos laikant natūralioje gamtoje kiti veiksniai taip pat įtakoja jų darbą, bei paveikia galią. Be to montavimo, demontavimo darbai yra brangūs. Taip pat silicio celių įtrūkius galima pamatuoti tik laboratorinėmis sąlygomis.

Svarbiausias saulės elementų kriterijus - galia. Šio darbo tikslas - atlikti ledo krušos įtakos saulės elementų tyrimus, galios kritimo, bei susidariusių įtrūkių analizę. Tam atlikti reikia:

1. Remiantis mokslinė, techninė literatūra susisteminti šios srities žinias
2. Sudaryti eksperimentinių tyrimų metodiką.
3. Nustatyti kritinės jėgos, kuria paveikus saulės elementą susidaro silicio kristalų įtrūkiai, vertę.
4. Nustatyti, kokią įtaką saulės elementui daro krušos imitacija paveikus jį 1 smūgiu, bei veikiant jį smūgių kruša tam tikrą laiko tarpą (t).
5. Ieškoti techninių sprendimų tobulinimo.
6. Gautus rezultatus išanalizuoti, palyginti su teoriškai gautais rezultatais, bei buvusiais tyrimais.

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1 Tyrimo metodika

Saulės elementui tirti, atlikta teorinė kompiuterinė simuliacija, naudojant programos „Comsol“ mikroelektroninių elementų skaičiavimo modulį. Simuliacijai atlikti, suprojektuotas dvimatis modelis, kuris išskaidytas į baigtinius elementus. Ledo krušos įtakai nustatyti imituotas ledo krušos smūgio momentas, kurio metu stebėti įtempiai susidarę saulės elemente. Tyrimo tikslumui užtikrinti naudoti tie patys tiriamųjų objektų parametrai, kaip ir eksperimentiniuose tyrimuose. Rengiant tyrimo metodiką aprašomi parametrai:

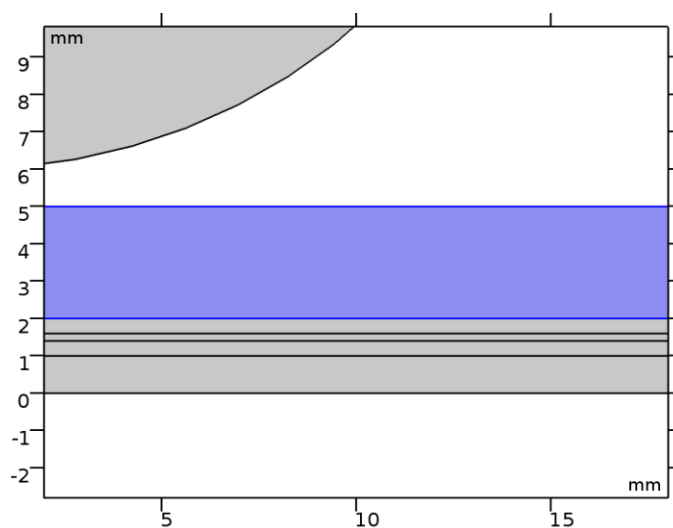
3.2 Parametrų aprašymas

3.1. lentelė .Elementų parametrai

Elemento žymuo	Parametras	Apibūdinimas
L1	0.02 m	modulio plotas
H1	0.015 m	kamuoliko diametras
H2	0.003 m	modulio stiklo storis
H3	4E-4 m	Eva (etilenovinilio acetato) storis
H4	2E-4 m	Silicio kristalų storis
H5	0.005 m	modulio storis
dis	0.006 m	kamuoliuko atstumas

Taip pat reikėjo aprašyti medžiagas:

stiklo parametrai

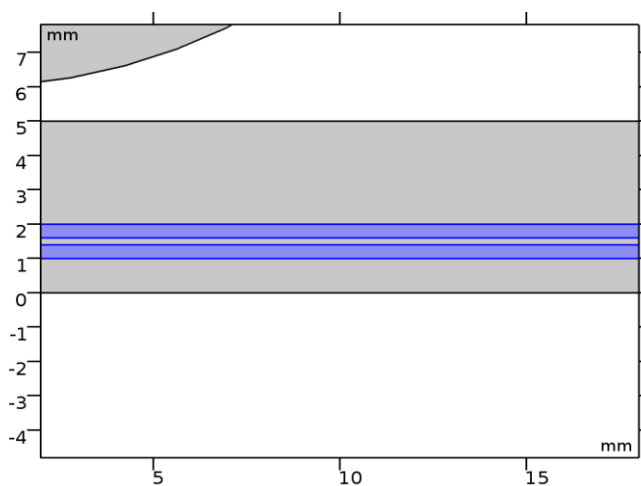


3.1. pav. saulės elemento pjūvis. Stiklo lokacija

3.2. lentelė. Stiklo parametrai

Pavadinimas	Reikšmė	Matavimo vienetas
Tankis	2450[kg/m ³]	kg/m ³
Jungo modulis	70e9[Pa]	Pa
Puasono koeficientas	0.22	1

EVA parametrai

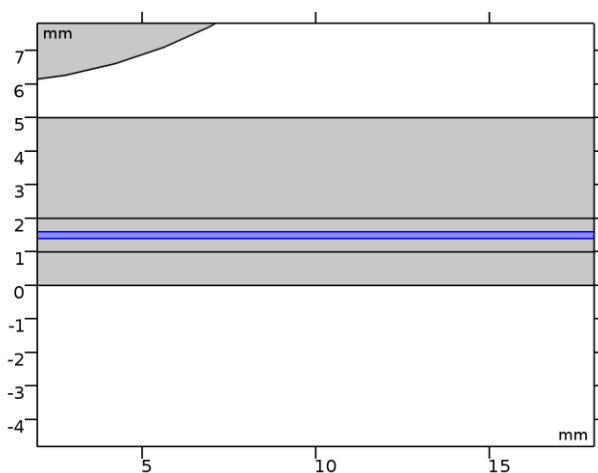


3.2. pav. saulės elemento pjūvis. EVA (etilenvinilo acetatas) lokacija

3.3. lentelė. EVA parametrai

Pavadinimas	Reikšmė	Matavimo vienetas
Tankis	950[kg/m ³]	kg/m ³
Jungo modulis	7800000000	Pa
Puasono koeficientas	0.3	1

Silicio kristalų parametrai

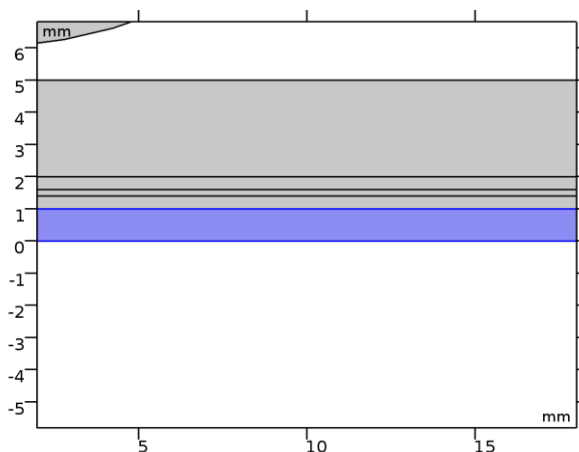


3.3. pav. saulės elemento pjūvis. silicio kristalų lokacija

3.4. lentelė. Silicio kristalų parametrai

Pavadinimas	Reikšmė	Matavimo vienetas
Tankis	2330[kg/m ³]	kg/m ³
Jungo modulis	150e9[Pa]	Pa
Puasono koeficientas	0.17	1

PVF parametrai

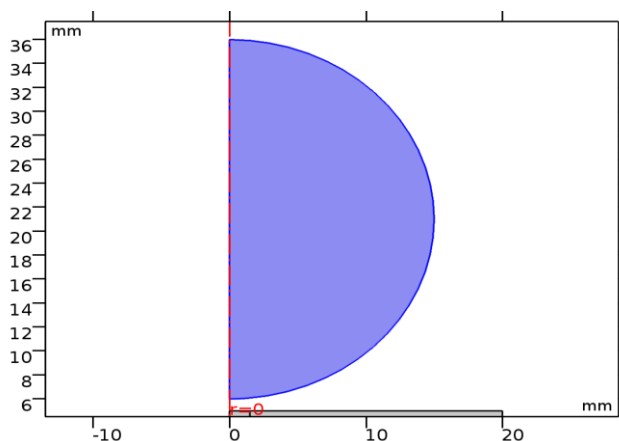


3.4. pav. saulės elemento pjūvis. PVF (polivinilfluoridas) lokacija

3.5. lentelė. PVF parametrai

Pavadinimas	Reikšmė	Matavimo vienetas
Tankis	1340	kg/m ³
Jungo modulis	1.4[GPa]	Pa
Puasono koeficientas	0.4	1

Kamuoliuko parametrai

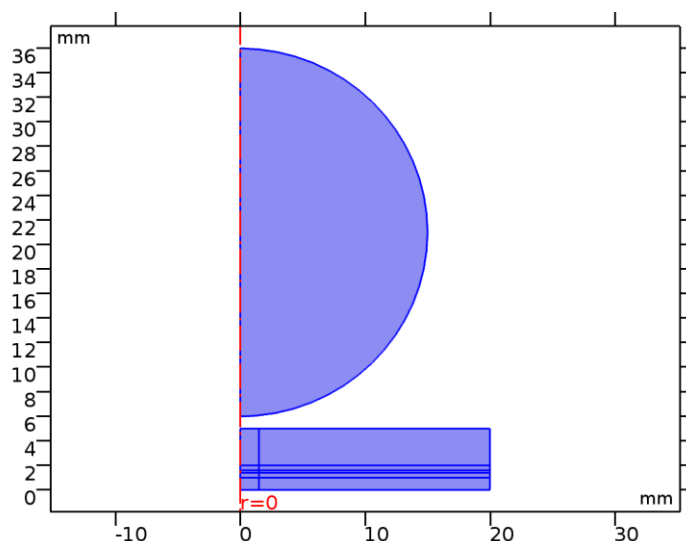


3.5. pav. saulės elemento pjūvis. PVC (polivinilchloridas) lokacija

3.6. lentelė. PVC parametrai

Pavadinimas	Reikšmė	Matavimo vienetas
Tankis	1760[kg/m ³]	kg/m ³
Jungo modulis	2.9e9[Pa]	Pa
Puasono koeficientas	0.4	1

Tuomet pasirenkamas skaičiavimo modulis bei peržiūros pagrindinės naudojamos formulės, sudaromas baigtinių elementų tinklelis:



3.6. pav. Kietųjų kūnų mechanika

Pagrindinės formulės

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot (\mathbf{F} \mathbf{S})^T + \mathbf{F}_V, \quad \mathbf{F} = \mathbf{I} + \nabla \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_{ad} + \int_i \mathbf{F}_{inel}^T (\mathbf{C} : \boldsymbol{\epsilon}_{el}) \mathbf{F}_{inel}^{-1}, \quad \boldsymbol{\epsilon}_{el} = \frac{1}{2} (\mathbf{F}_{el}^T \mathbf{F}_{el} - \mathbf{I}), \quad \mathbf{F}_{el} = \mathbf{F} \mathbf{F}_{inel}^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_{ad} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_{ext} + \mathbf{S}_q \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \nabla \mathbf{u}] \quad (8)$$

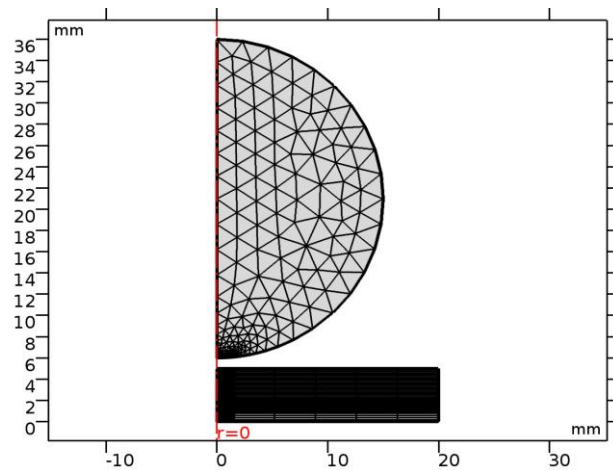
$$\mathbf{C} = \mathbf{C}(\mathbf{E}, \nu) \quad (9)$$

Čia: ρ - tankis; $\mathbf{u}$ - poslinkis; t - laikas; $\boldsymbol{\epsilon}$ - deformacijos; $\mathbf{F}$ - jėga; $\mathbf{E}$ - Jungo modulis, ν - Puasono koeficientas $\mathbf{S}$ - paviršiaus plotas.

Tinklelis parinktas pagal dvejetainį baigtinių elementų modelį. Saulės elementas buvo padalintas į kvadratus, nes tai paprastas kūnas, imitacinis ledo krušos kamuoliukas padalintas į trikampių elementus, nes tai sferinis kūnas.

3.7. lentelė. Tinklelio parinkimas

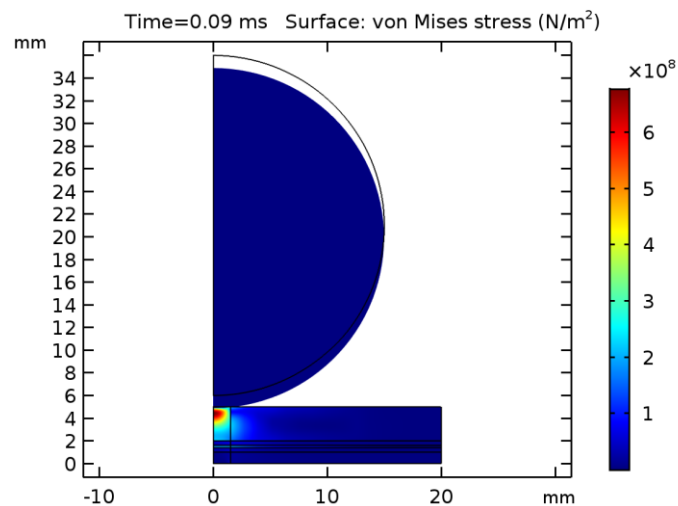
Apibūdinimas	Reikšmė
Minimalus elementų dydis	0.03602
Vidutinis elementų dydis	0.7704
Trikampių	387
Kvadratu	950
Erdvinių elementų	325
Išorinių elementų	23



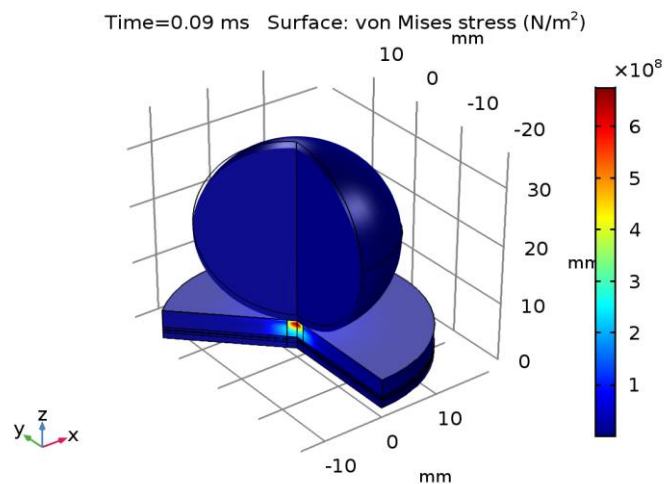
3.7. pav. Modelis išskaidytas į baigtinių elementų Tinklelį

Sumodeliuotas įtempių grafikas saulės elemente, smūgio taške, kontakto metu. Gauti 3 D grafiniai , bei linijiniai grafiniai rezultatai:

Įtempių grafikas



3.8. pav. Laikas=0.09 ms Paviršius paveiktas įtempių (N/m^2). Įtempių grafikas 3D. Kamuoliuko susidūrimas su saulės elemento paviršiumi.

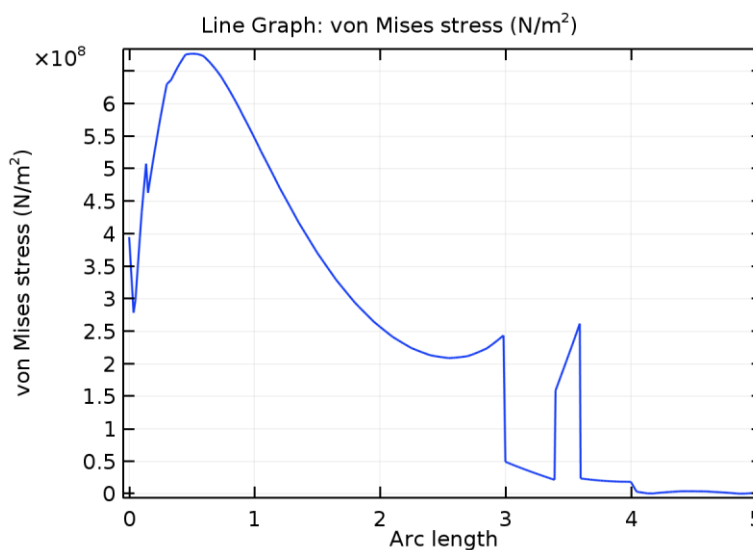


3.9. pav. Laikas=0.09 ms paviršius paveiktas įtempių (N/m^2)

Peržiūrėjus modelį, kontakto vietoje, matyti jog kamuoliuko smūgio jėga perduodama ir į kitus saulės elemento sluoksnius, tam smūgio taške sudarytas grafikas, kad būtų galima matyti įtempius visuose elemento sluoksniuose smūgio metu:



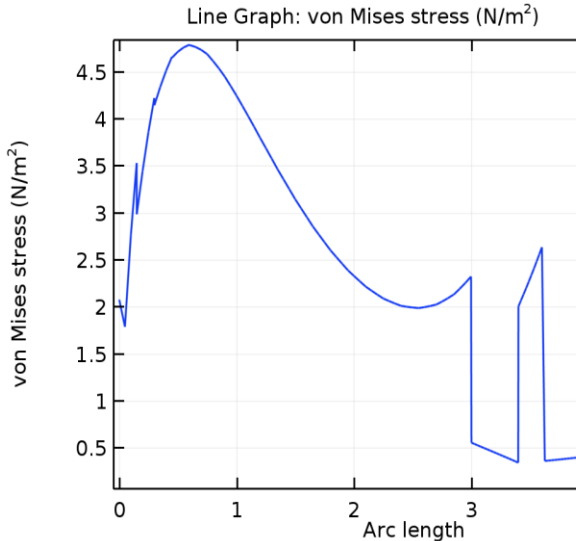
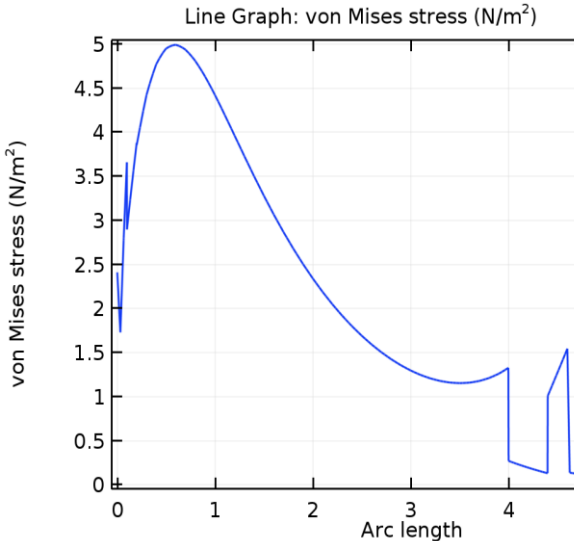
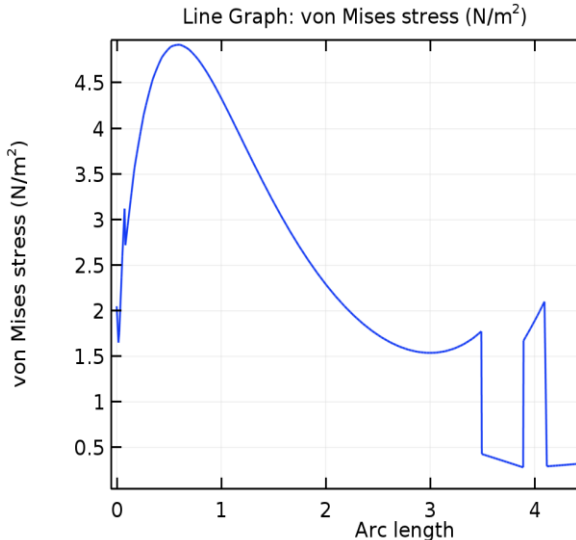
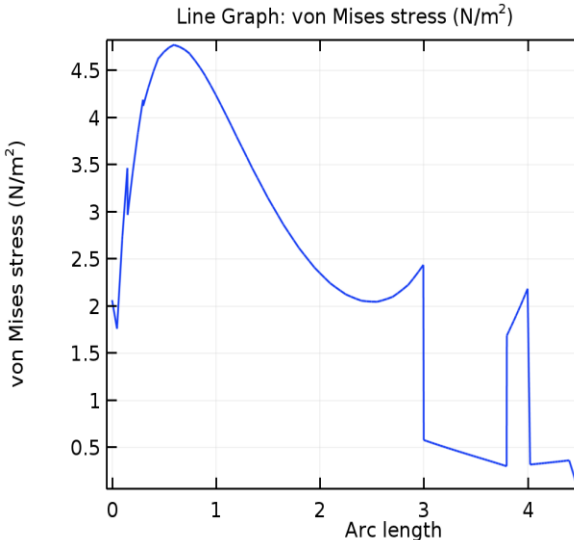
3.10. pav. Grafiko stebėjimo linija

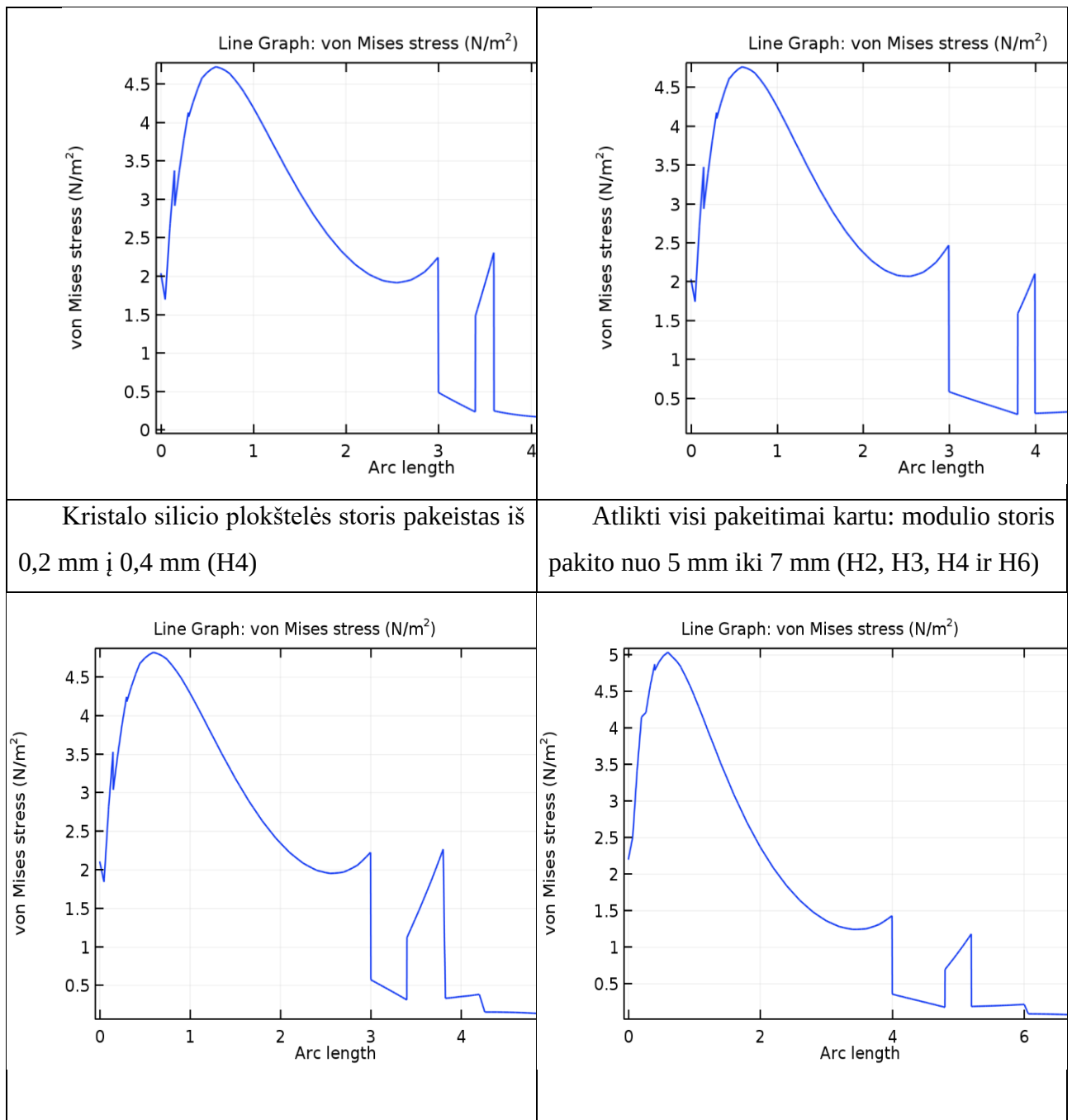


3.11. pav. Linijinis įtempių grafikas (N/m²)

Remiantis įtempių grafiku, bei vaizdinio įtempių pasiskirstymo 3D grafiku, galime daryti išvadą, jog apsauginiam sluoksniui, t.y. stiklo vientisumui dar nepasiekus kritinio taško, t.y. dūžio, smūgio energija persiduoda ir į kitus saulės elemento sluoksnius. Taip pat EVA plėvelė smūgio beveik nesugeria, todėl į silicio kristalas absorbuoja 2,6 N/m² jėgą. Silicio kristalas yra trapus, dėl to padidėja skilimo rizika. Remiantis tyrimo išvadomis, nuspręstą pakartoti tyrimą keičiant stiklo storį.

3.8. lentelė. Įtempių palyginimas keičiant elemento konstrukciją.

Paprasta konstrukcija	Stiklo storis pakeistas iš 3 mm į 4 mm (H2)
	
Stiklo storis pakeistas iš 3 mm į 3,5 mm (H2)	Viršutinės plėvelės storis pakeistas iš 0,4 mm į 0,8 mm (H3)
	
Apatinės plėvelės storis pakeistas iš 0,4 mm į 0,8 mm (H6)	Abiejų plėvelių storiai pakeisti iš 0,4 mm į 0,8 mm (H3 ir H6)



3.3 Teorinio eksperimento aptarimas

Išanalizavus rezultatus, stiklo storio pakitimas turėjo įtakos smūgio jėgos perdavimui silicio kristalams. Atliekant simuliaciją, naudojamas 4 mm storio stiklas, vietoj paprasto- 3 mm storio stiklo, jis smūgį sugėrė geriau. Taip pat jėgos perdavimas sumažėja padidinus EVA plėvelės storį. Remiantis tyrimo rezultatais, nuspręsta sudaryti pakeisto modelio įtempių grafiką. Pasiektas rezultatas: jėgos perdavimas bei galutiniai įtempiai sumažėjo nuo $2,6 \text{ N/m}^2$ iki $1,2 \text{ N/m}^2$.

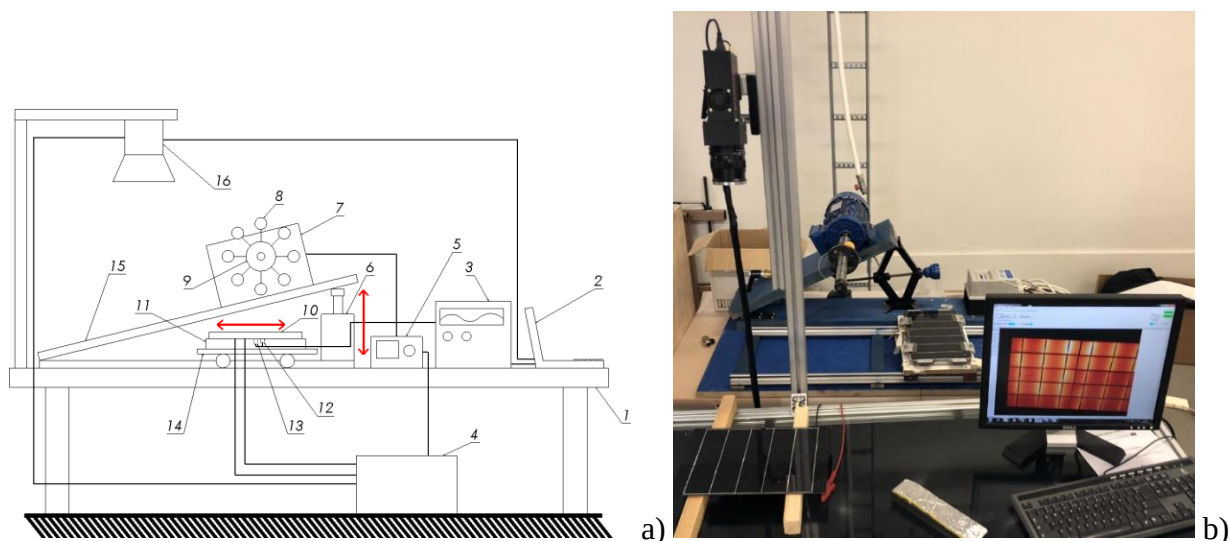
4. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

4.1 Eksperimentinio tyrimo metodika

Eksperimentinių tyrimų seka. Pirmame etape siekiama nustatyti kokios jėgos, gaunamos imitaciniame krušos stende kontakto vietoje, kamuoliukas-PV modulis kontakto vietoje, reikšmės sukelia įtrūkių grėsmę PV modulyje. Taip pat atliekamas smūginis bandymas, kurio metu matuojamos pagreičio reikšmės. Šio bandymo tikslas - nustatyti dažnines PV modulio charakteristikas (4.3 pav.). Jėgos matavimai atliekami naudojant skirtingus variklio (7 pozicija 4.1 a) pav.) sukčius, taip gauti jėgos matavimo rezultatai pateikti 4.3 lentelėje.

Fotovoltinis modulis veikiamas krušos stendu, sukant vieną kamuoliuką, bei bandant paveikti 1 – 3 smūgiais. Tyrimas vyko šešiais bandymais, didinant krušos stendo sukimosi greitį, keičiant stendo variklio apsisukimų dažnį 10 – 12 Hz ir matuojant kamuoliuko smūgio jėgą (4.1 pav.). Po kiekvieno bandymo fotovoltinis modulis nufotografuojamas elektroluminescenciniu stendu ir lyginamas su ankstesne bandymo nuotrauka

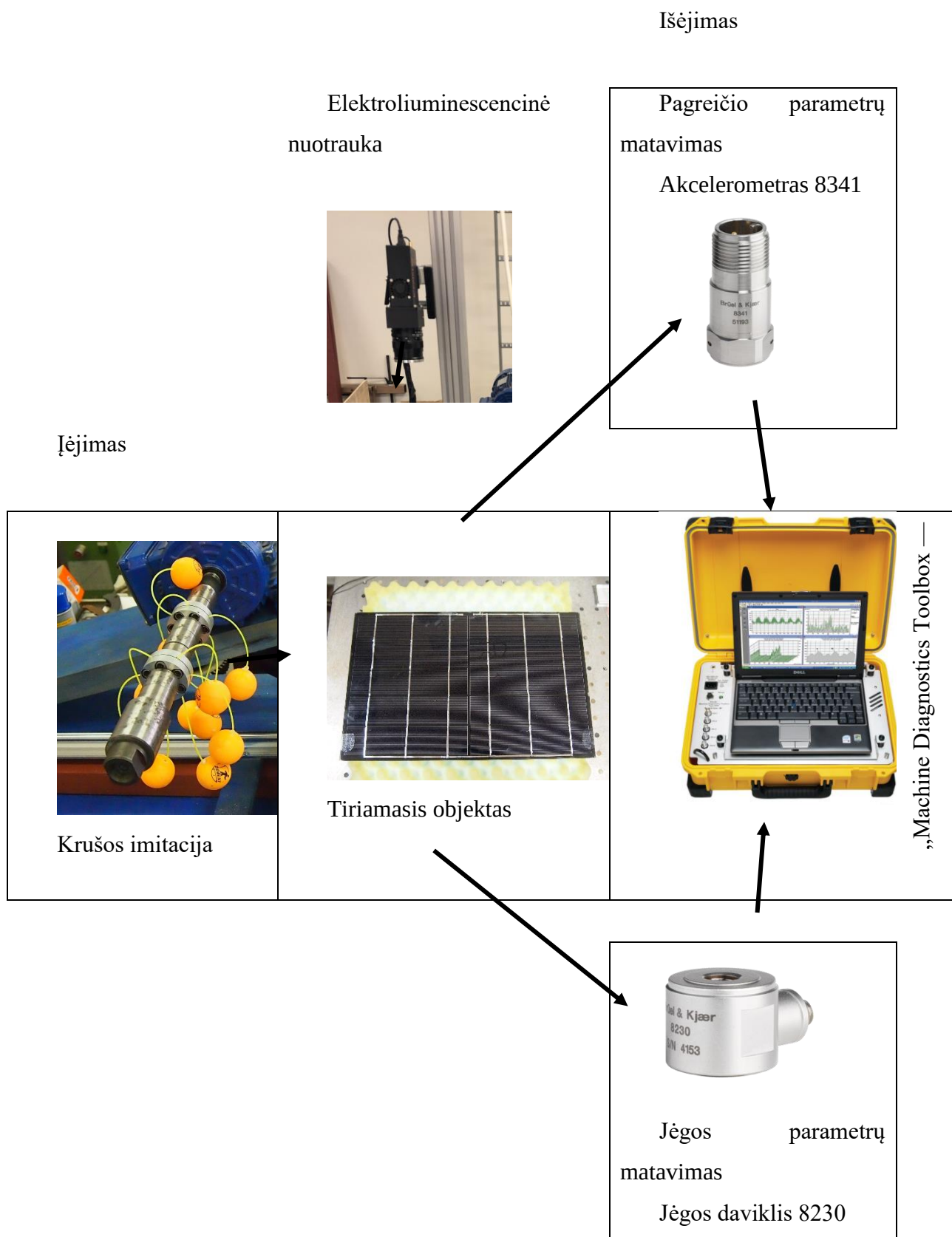
tikrinti, nes spinduliavimo intensyvumas yra proporcingas srovės tankiui ir neįkaitina fotovoltinio modulio. Padarytos nuotraukos padeda aptikti pažeidimus fotovoltiniuose moduluose.



4.1. pav. Fotovoltinių modulių bandymų stendo schema (a) ir bendras vaizdas (b)

4.1 paveiksle pateiktas bandymų stendas yra sudarytas iš: 1 – stalas, 2 – kompiuteris, 3 – duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga, 4 – generatorius, 5 – valdymo blokas, 6 – kelioji įranga, 7 – variklis, 8 – kamuoliukai, 9 – įvorė, 10 – fotovoltinis modulis, 11 – rėmas, 12 – jėgos daviklis, 13 – akcelerometras, 14 – kariatėlė, 15 – kilnojamas pagrindas, 16 – elektroluminescencinis stendas.

Tyrimo stendo blokinė schema pateikta 4.2 pav.



4.2. pav. Tyrimo stendo blokinė schema

4.2 Krušos imitacijos stendas ir dinaminių parametrų matavimo įranga

Tiriamas objektas yra krušos imitacijos naujai sukurtas stendas (5.1 pav.). Stendą sudaro trys dalys: krušos imitacijos dalis; pagreičio ir jėgos parametrų matavimo dalis; saulės elementų defektų nustatymo dalis (electroluminescence). Krušos imitacijos dalį sudaro: variklis su dažnio keitikliu, krušos imitacijos komponentai ir ant kreipiančiųjų judantis saulės modulis. Atitinkamai pagreičio ir jėgos parametrų matavimo dalį sudaro: jėgos ir pagreičio davikliai, bei matavimo rezultatų apdorojimo ir kaupimo įranga. Saulės elementų defektų nustatymo dalį sudaro: kamera ir gautų rezultatų apdorojimo ir kaupimo įranga. Tyrimams buvo pasirinktas Photovoltaic (polycrystalline) module (Cell size 37x156 mm; Number of cells 10; Front side glass 3,2 mm hardened solar glass; Dimensions (L x W) 322 x 204 mm; weight 625 g).

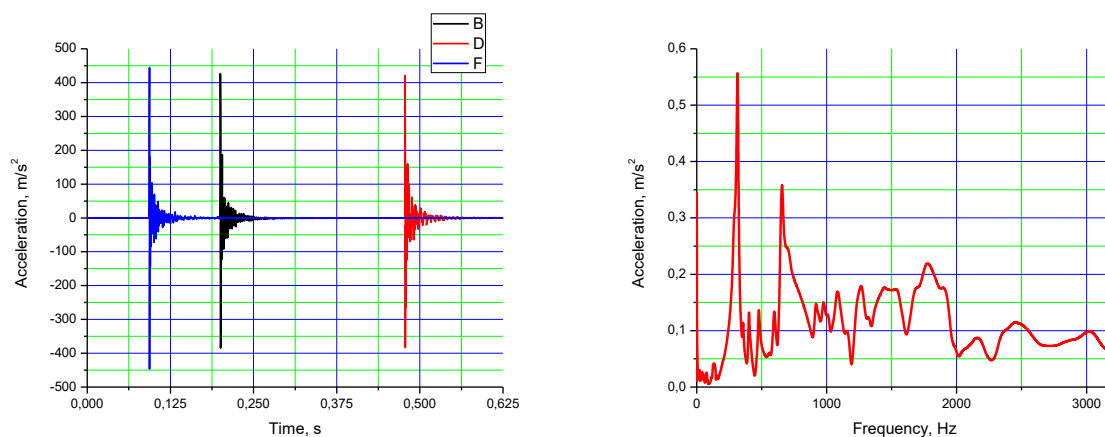
Atliekant tyrimus buvo siekiama išsiaiškinti naujai sukurto stendo galimybes ir atlikti krušos imitacijos bandymus, bei nustatyti dinaminių poveikių įtaką fotovoltinių modulių konstrukcijai ir darbingumui. Eksperimento metu apsisukimų dažniai buvo keičiami, kad imituoti dinamines mechanines apkrovas, kurios atitinka skirtingus ledo gabalėlio krušos metu greičius. Pateiktas bandymų stendas yra sudarytas iš: 1 – stalas, 2 – kompiuteris, 3 – duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga, 4 – generatorius, 5 – valdymo blokas, 6 – keliamoji įranga, 7 – variklis, 8 – kamuoliukai, 9 – įvorė, 10 – fotovoltinis modulis, 11 – rėmas, 12 – jėgos daviklis, 13 – akcelerometras, 14 – kariatėlė, 15 – kilnojamas pagrindas, 16 – elektroluminescencinis stendas.

Virpesių ir jėgos parametrų matavimui buvo panaudotos „Brüel & Kjær“ matavimo priemonės (4.2 pav.): 1. Kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo, kaupimo ir valdymo įranga „Machine Diagnostics Toolbox — Type 9727“; 2. Vienaašis akselerometras 8341; 3. Jėgos daviklis 8230.

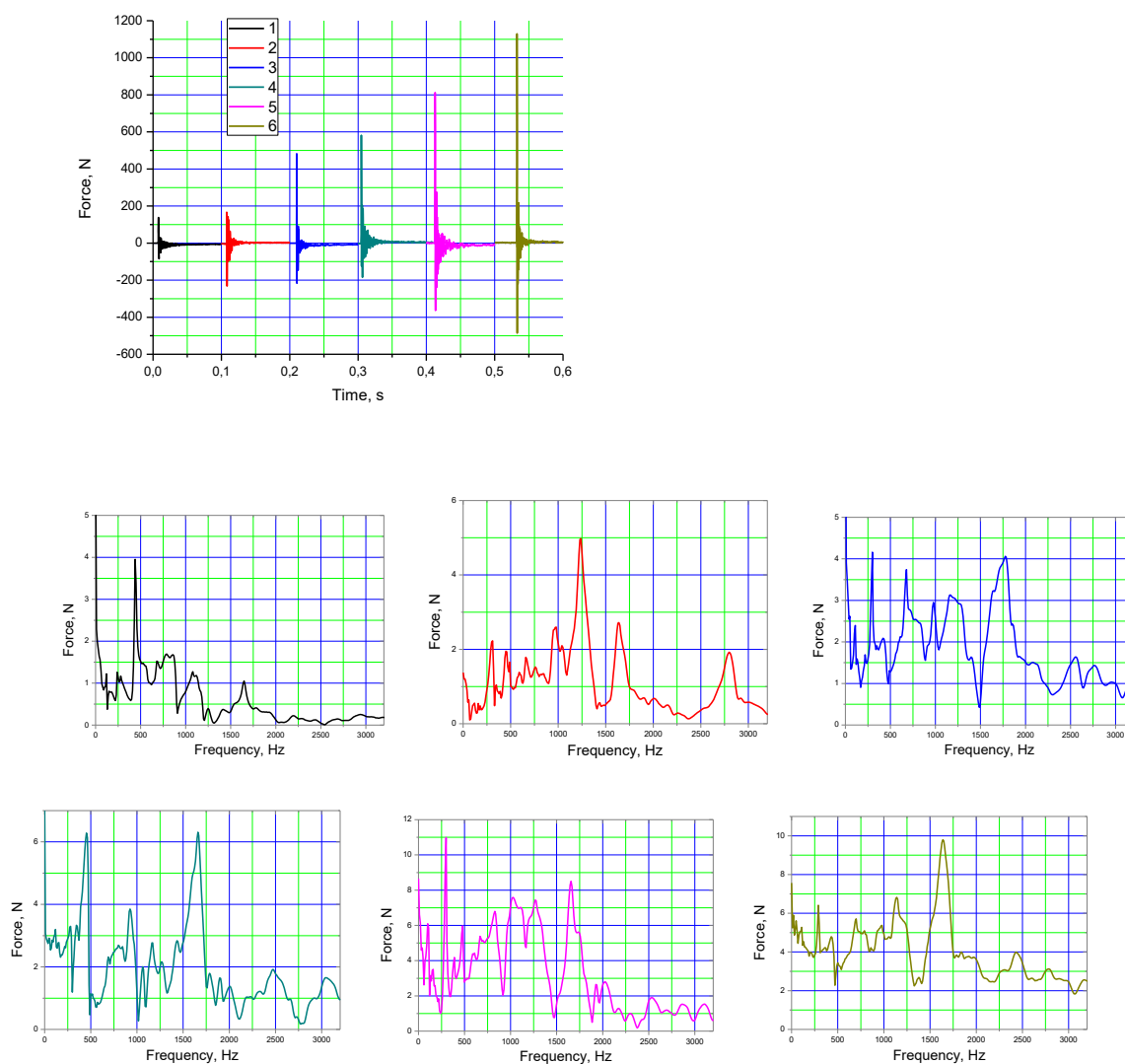
PV modulis standžiai tvirtinamas ant kariatėlės, kuri juda ant bėgiu. Variklis su kamuoliukais žadina PV modulius. Variklis yra prijungtas prie valdymo bloko, kuris kontroliuoja dažnius (5 iki 60 Hz ruože) ir apsukas. Akselerometras tvirtinamas ant fotovoltinio modulio viduryje iš apačios, kad išmatuoti įeinančio signalo (pagreičio ir poslinkio) reikšmės ir pobūdį. Šalia akselerometro tvirtinamas jėgos daviklis, kuris skirtas išmatuoti kamuoliukų smūgius. Akselerometras ir jėgos daviklis prijungti prie duomenų kaupimo ir apdorojimo įrangos. Duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga prijungta prie kompiuterio, kuris grafiškai pavaizduoja rezultatus. Po ir prieš krušos imitacijos PV moduliai fotografuojami elektroluminescenciniame stende, kuriame paduodama elektros srovė (srovė priklauso nuo saulės elemento didžio, ji gali siekti iki 4 – 5A) į PV modulius ir jie fotografuojami. Elektroluminescencinis atvaizdavimas yra dažniausiai naudojamas sutrikimams

4.3 Tyrimų rezultatai ir aptarimas

smūginis žadinimas Z kryptis



4.3. pav. Jėgos pasiskirstymo grafikas



4.4 pav. Jėgų amplitudė: raudona – 1 bandymas; mėlyna – 2 bandymas; žalia – 3 bandymas; ranžinė – 4 bandymas; geltona – 5 bandymas; juoda – 6 bandymas

4.1 lentelėje parodytos visų šešių bandymų gautos jėgos ir nurodyti krušos imitavimo stendo dažniai.

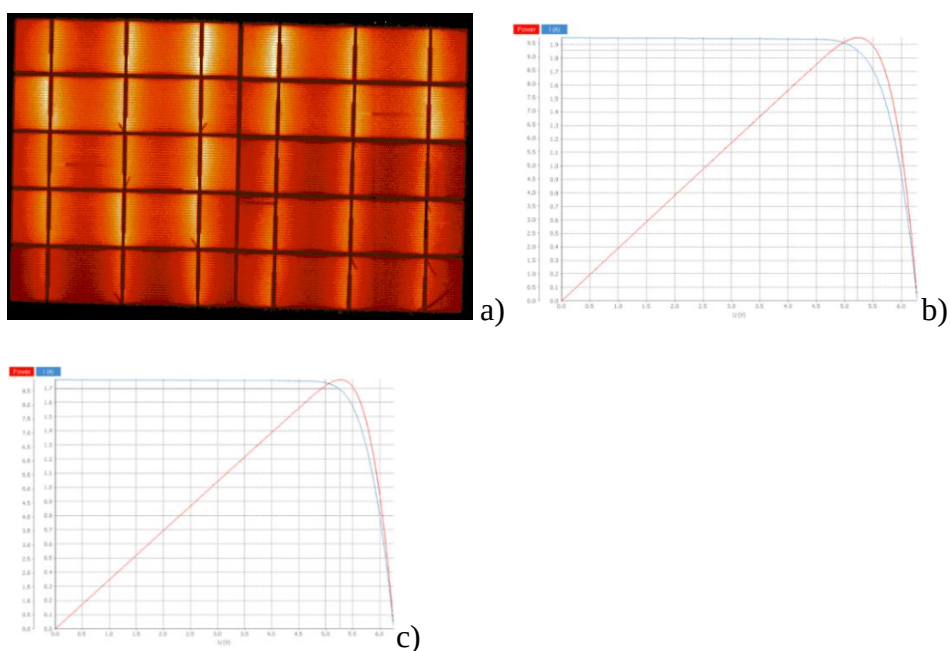
4.1. lentelė Fotovoltinio modulio atsparumo badymai

Badymas	Dažnis (Hz)	Jėga (N)
1	10	137.92
2	12	166.07
3	14	480.81
4	16	582.06
5	18	825.49
6	20	1129

4.4 Fotovoltinio modulio atsparumo tyrimas

Šio tyrimo tikslas- surasti ir nustatyti optimalią krušos įtakos jėgos ribą, kuri gali įskelti fotovoltinių modelių stiklą ir pažeisti vidinę konstrukciją. Šiame tyrime buvo naudojamas krušos įtakos fotovoltiniams modeliams stendas ir tyrimo objektas (fotovoltinis modulis), kurio parametrai yra šie: ilgis ir plotis – 32.2 x 20.4 cm, svoris – 625 g, stiklo storis – 3.2 mm. Patį modelį sudaro 10 celių jų matmenys: 3.7 x 15.6 cm. Tyrimo objekto matavimams naudoti jėgos davikliai su įranga, elektroliuminescencinis stendas ir I-V matavimų kreivių stendas.

Norint palyginti pagrindinius fotovoltinio modulio parametrus, kai imitacinis krušos stendas veikia saulės elementą, tyrimo pradžioje modulis buvo apšvietas elektroliuminescenciniu stendu (4.5 pav.) bei jo galia nustatyta voltamperinių charakteristikų stendu (4.1 pav.).



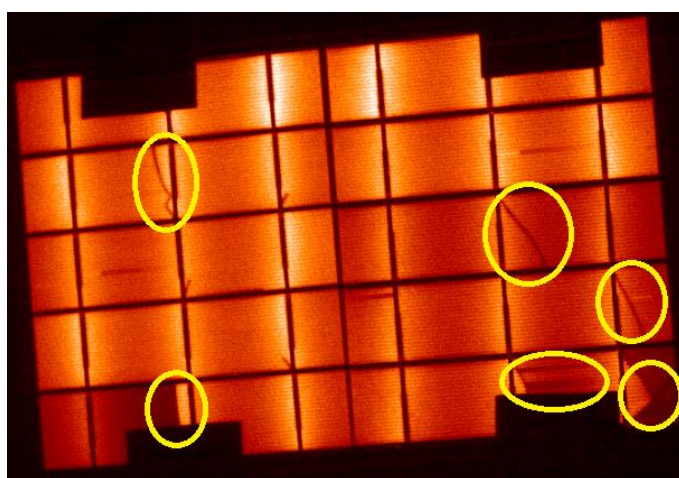
4.5. pav. Elektroliuminescencinė nuotrauka ir voltamperinės kreivės prieš tyrimą (b) bei po 6 bandymo (c)

Naudojant gautas voltamperinių charakteristikų kreives (prieš bandant ir po šešto bandymo) sudaryta 4.2 lentelė, kurioje palyginti trys pagrindiniai parametrai: generuojama galia (W), didžiausia įtampa (V) ir didžiausia varža (A).

4.2. lentelė Palyginimo lentelė

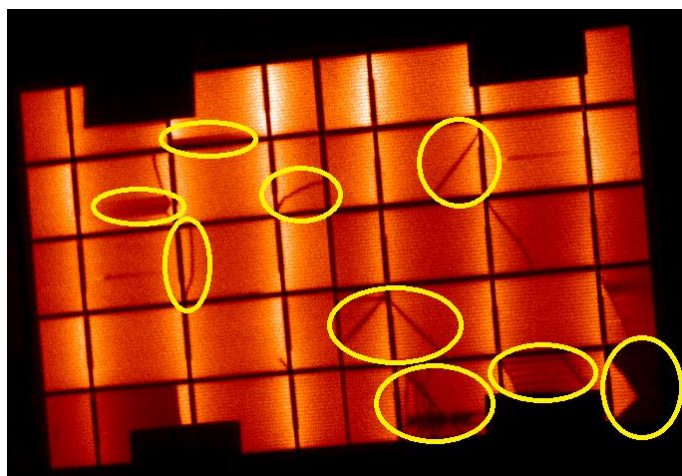
	Prieš	Po	%
Galia (W)	9,720	8,914	8,29
Įtampa (V)	5,227	5,257	0,57
Varža (A)	1,860	1,695	8,87

Po ketvirto bandymo, kur didžiausias kamuoliuko smūgis – 582.06 N, buvo pastebėti pirmi pažeidimai (4.6 pav.), kurie yra apvedžioti geltona spalva.



4.6. pav. Ketvirto bandymo elektroliuminescencinė nuotrauka

Paskutinis bandymas - pavojingiausias, didžiausias kamuoliuko smūgis – 1129 N, stipriausias smūgis iš visu kitų bandymų. Šiame bandyme pastebėta daugiausia pažeidimų (4.7 pav.), kurie yra pažymėti geltona spalva.

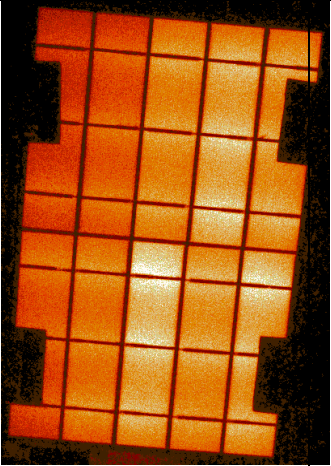
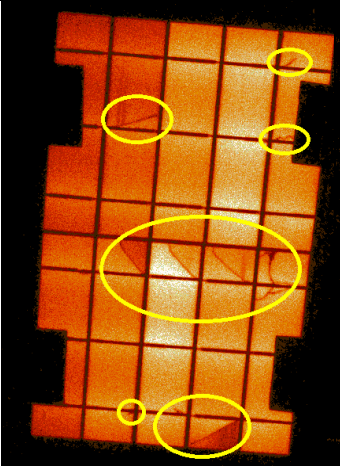
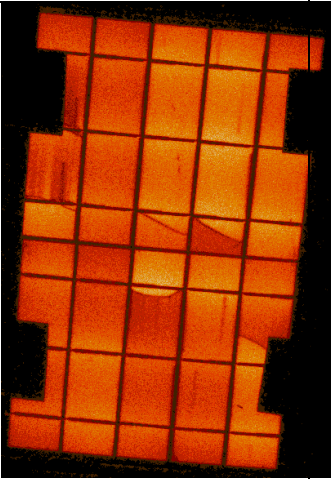
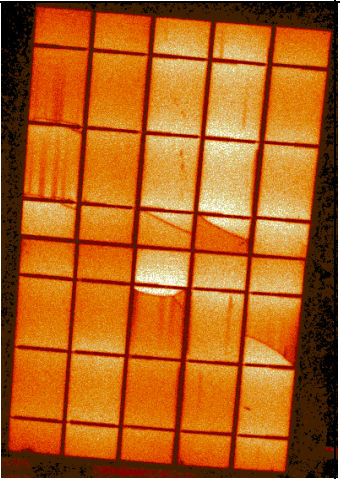


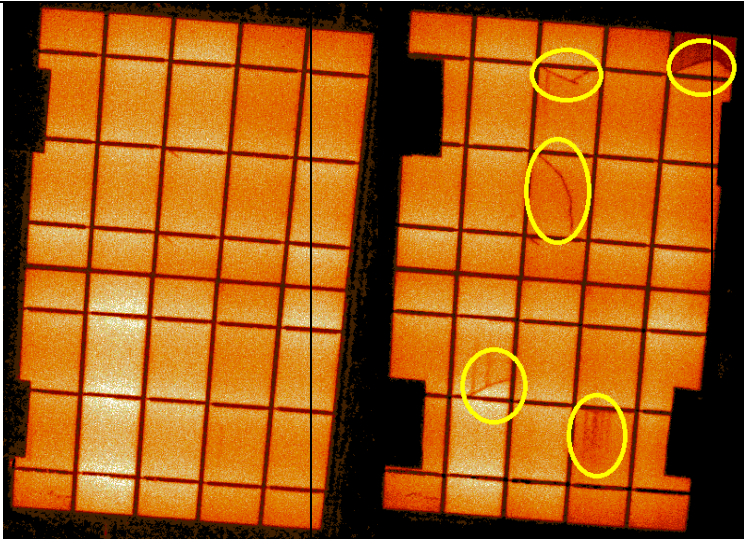
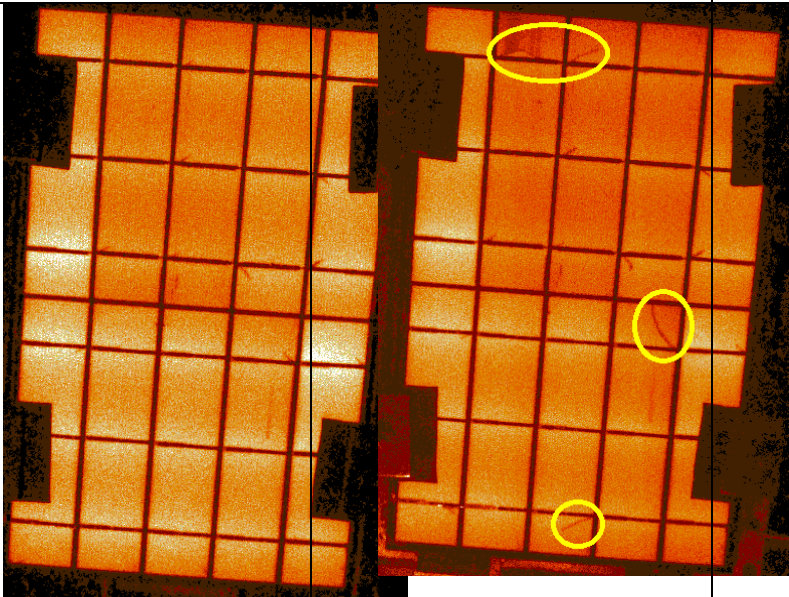
4.7. pav. Šešto bandymo elektroliuminescencinė nuotrauka

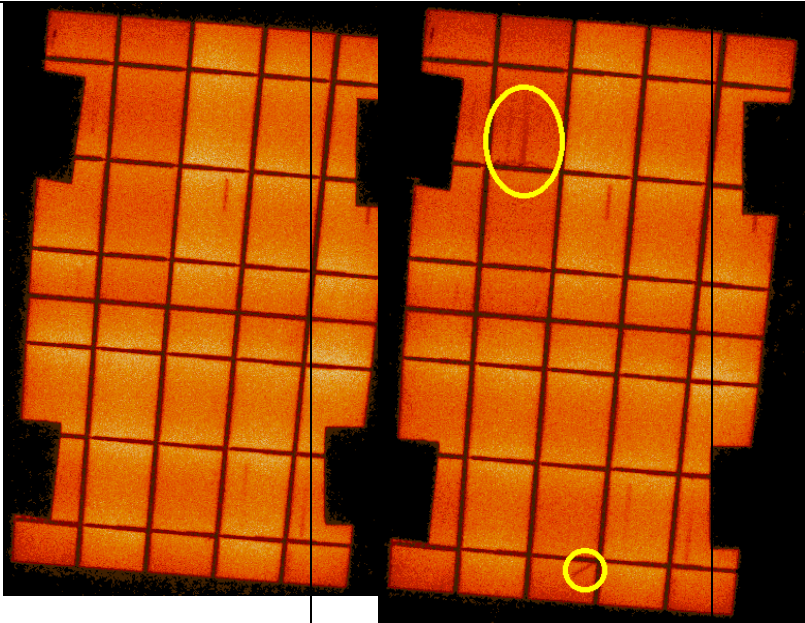
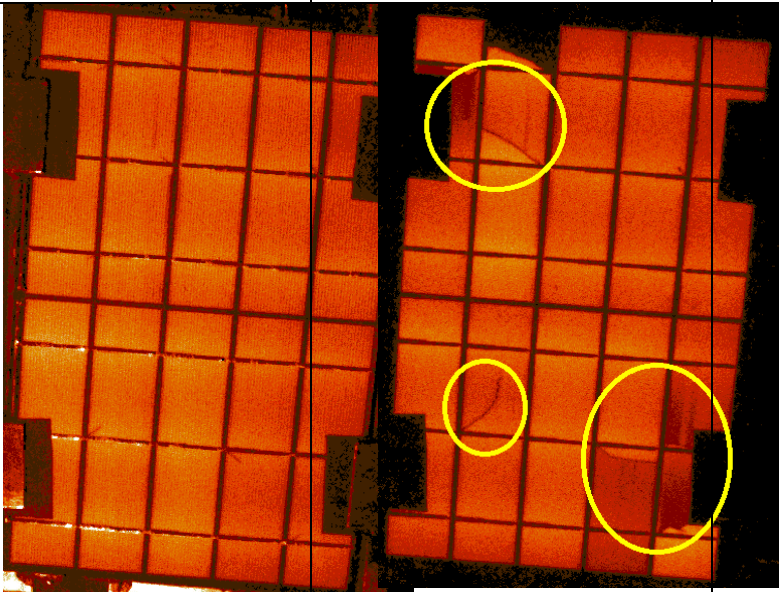
Po šešto bandymo fotovoltinis modulis išimtas iš krušos imitacijos stendo ir išmatuotas I-V matavimų kreivių stendu.

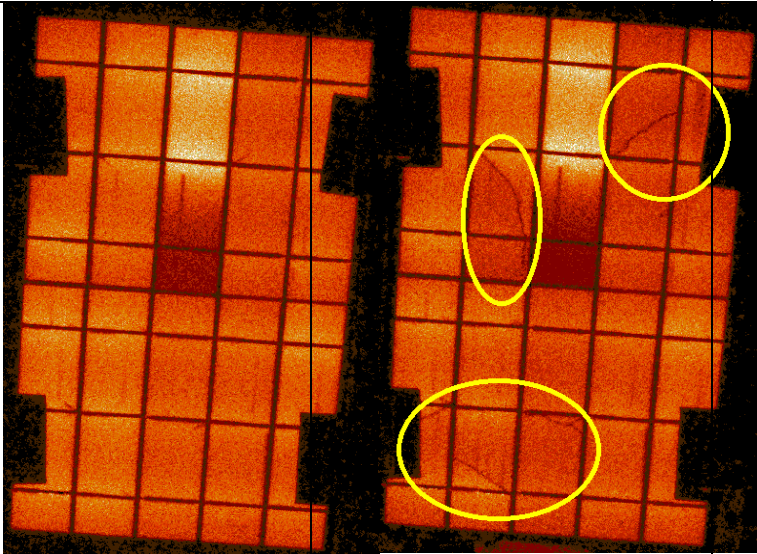
Po tyrimų galima nustatyti, kad pavojingiausias kamuoliuko smūgis bandomiems fotovoltiniams moduliams yra apie 500 N jėga. Po tokio smūgio jėgos fotovoltinių modulių konstrukcijoje atsiranda mikro-įtrūkimų, kuriuos toliau veikiant ir su mažesne jėga, minėti pažeidimai toliau plečiasi.

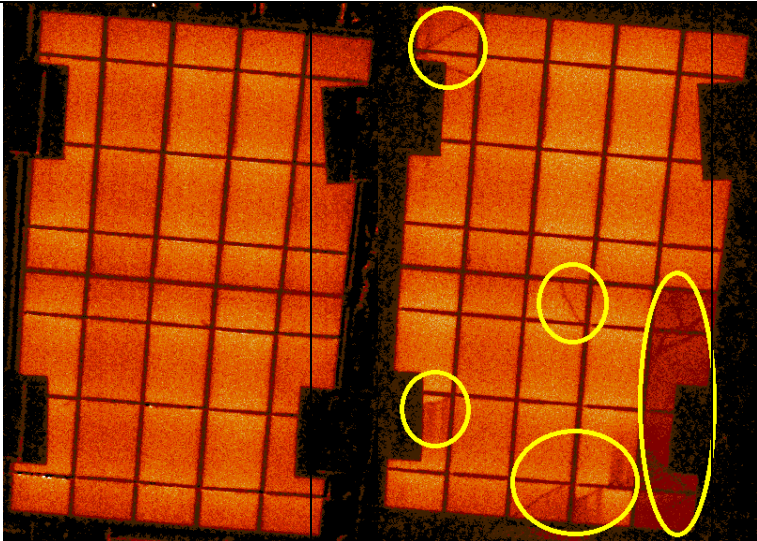
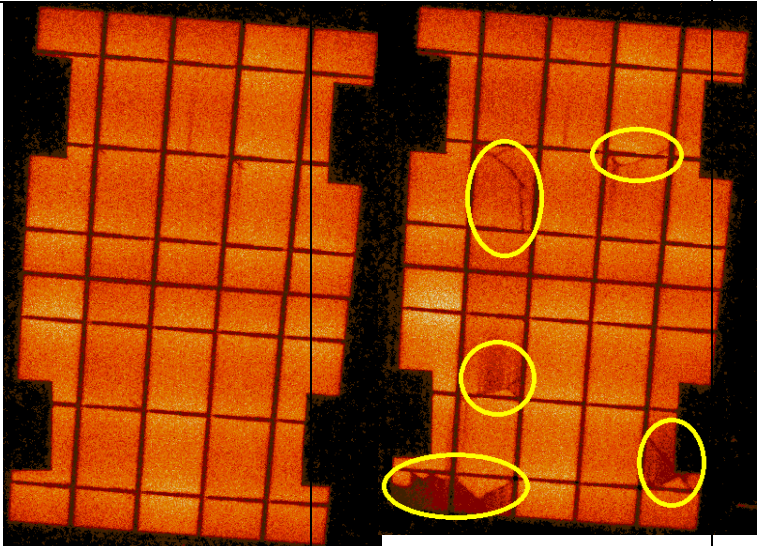
4.3. lentelė. Eksperimentinio tyrimo rezultatai

Trumpai laikant 18 Hz			
A10			
Didžiausia galia	9,315	8,987	3,52 %
Didžiausia įtampa	5,013	4,952	1,22 %
Didžiausia srovė	1,858	1,815	2,31 %
A11			
Didžiausia galia	9,262	8,900	3,91 %
Didžiausia įtampa	5,050	4,914	2,69 %
Didžiausia srovė	1,834	1,811	1,25 %

A13			
Didžiausia galia	9,457	9,237	2,33 %
Didžiausia įtampa	5,080	5,009	1,40 %
Didžiausia srovė	1,861	1,844	0,91 %
30 sek. 18 Hz			
A12			
Didžiausia galia	9,461	9,125	3,55 %
Didžiausia įtampa	5,064	4,966	1,94 %
Didžiausia srovė	1,868	1,837	1,66 %

A14			
Didžiausia galia	9,413	9,089	3,44 %
Didžiausia įtampa	5,070	4,958	2,21 %
Didžiausia srovė	1,857	1,833	1,29 %
A15			
Didžiausia galia	9,345	8,894	4,83 %
Didžiausia įtampa	5,012	4,893	2,37 %
Didžiausia srovė	1,865	1,818	2,52 %

30 sek. 22 Hz			
A16			
Didžiausia galia	9,413	8,956	4,85 %
Didžiausia įtampa	5,030	4,887	2,84 %
Didžiausia srovė	1,871	1,833	2,03 %
A17			
Didžiausia galia	9,516	8,604	9,58 %
Didžiausia įtampa	5,067	4,827	4,74 %
Didžiausia srovė	1,878	1,783	5,06 %

A18			
Didžiausia galia	9,344	8,897	4,78 %
Didžiausia įtampa	5,076	4,917	3,13 %
Didžiausia srovė	1,841	1,809	1,74 %
25 Hz			
A19			
Didžiausia galia	9,380	9,027	3,76 %
Didžiausia įtampa	5,059	4,939	2,37 %
Didžiausia srovė	1,854	1,828	1,40 %

4.5 Eksperimentinio tyrimo aptarimas.

Eksperimentinis tyrimas, atliktas dvejais variantais: imituojant vieną smūgį, bei veikiant elementą krušos imitacija 30 sekundžių. Kadangi, eksperimentinio tyrimo metu pastebėta, jog kritiniai pažeidimai matomi pasiekus 500 N jėga, padaryta išvada, jog tyrimą reikia atlikti didesnei 500 N jėgai. Tyrimas atliktas 18 Hz variklio sūkių dažniu ir pasiekta 825,49 N jėga, bei dar kartą pakartotas 22 Hz variklio sūkių dažniu, bei 1300 N jėga. Tyrimo metu nustatyta, jog paveikiant saulės elementą 825,49 N jėga saulės elemento galia krenta vidutiniškai iki 3,25 %, o paveikus jį 1300 N jėga jis krenta dar daugiau 3,76%, o paveikiant saulės elementą krušos imitacija 30 sekundžių poveikis yra dar didesnis 18 Hz variklio dažniu- 3,94%. Elementus paveikus krušos imitacija 22 Hz variklio sūkių dažniu, galios kritimas toliau didėja - vidutiniškai jis siekia net iki 6,4%. Dėl to padaryta išvada, jog reikia stiprinti konstrukciją, bei mažinti smūgio jėgos perdavimą silicio kristalams.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros apžvalgą, pastebėta, jog nėra nustatyta, kokios kontaktinio smūgio jėgos, reikia standartinio saulės elemento darbui sutrikdyti.
2. Literatūros apžvalgoje, pateiktas kritulių skaičius Lietuvoje per paskutiniuosius 55 metus, nustatyta, jog per metus kruša šalyje iškrenta 1,44 karto.
3. Sukurta krušos įtakos saulės elementams teorinio bei eksperimentinio tyrimų metodikos.
4. Atlikti eksperimentiniai tyrimai, nustatyta kritinė jėga, dėl kurios skyla silicio kristalai- 500 N. Gauti rezultatai, jog vieno smūgio kontakto metu, paveikus saulės elementą 825 N jėga, jo galia vidutiniškai krenta 3,25 %, o didinant jėgą iki 1129 N, galia vidutiniškai krenta iki 3,76 %. Tyrimas pakartotas veikiant saulės elementą smūgių kruša 30 s, ties 825 N jėga saulės elementų galia vidutiniškai krenta iki 3,94 %, taip pat paveikus juos 1129 N jėga, ji krenta iki 6,4 %.
5. Atlikus teorinius tyrimus, nustatyta jog kontaktinio smūgio metu, paveikus saulės elementą 5 N/m^2 jėga, silicio kristalas absorbuoja $2,6 \text{ N/m}^2$ perduotos jėgos, stiklas sugeria tik pusę, t.y. 52 % visos smūgio jėgos. Remiantis rezultatais, nuspręsta teorinę simuliaciją pakartoti, sutvirtinus konstrukciją, padidinus jos storį nuo 5 mm iki 7 mm. T.y. siklo storį padidinus nuo 3 mm - 4 mm. Viršutinės, bei apatinės EVA plėvelės storį padidinus nuo 0,4 mm iki 0,8 mm, jėgą perduodamą silicio kristalams galima sumažinti iki $1,2 \text{ N/m}^2$, t.y. 24 %.

NAUODOTA LITERATŪRA

1. LYNN P. A.(2010.) *Electricity from Sunligh: An Introduction to Photovoltaics*. John Wiley & Sons Inc.
2. Corrado M., Infuso A., Paggi M.(2016) *Simulated hail impacts on flexible photovoltaic laminates: testing and modelling*.
3. Ooshaksaraei P., Sopian K., Zaidi S. H., Zulkifli R.(2017) *Performance of four air-based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells*.
4. Ramanauskas V.(2015), *alternatyvių energijos šaltinių taikymo autonominiuose Orlaiviuose apžvalga*.
5. Katinas, V. (2007) Energijos gamybos apimčių iš atsinaujinančių energijos išteklių 2008–2025 m. studijos parengimas. Atsinaujinančių energijos šaltinių laboratorija, Lietuvos energetikos institutas, S/10-943.7.7-G-V:01.
6. KERN & SOHN. (2012) <<http://www.kern-sohn.com/lshop/showdetail,13662039682321,de,1366203969-2321,,AES-N/AEJ-NM%7C-%7C-%7C3,,,htm>>.
7. RES scenario to 2040. (2004) <http://www.erec.org/fileadmin/erec_docs/Documents/Publications/EREC_Scenario_2040.pdf>.
8. Kytra, S. (2006) *Atsinaujinantys energijos šaltiniai*. Kaunas: „Technologija“. 299 p.
9. Nelson, J. (2006) *The physics of solar cells*. London Imperial College Press.
10. Adomavičius, V. (2010) Atsinaujinančiųjų energijos išteklių naudojimo galimybės daugiabučiuose namuose. Lietuvos taikomųjų mokslų akademijos mokslo darbai: tarptautinis inovacinis taikomųjų mokslo darbų žurnalas *Official Journal of Lithuanian Applied Sciences Academy*, Klaipėdos universitetas.
11. Lynn, P., A. (2010) *Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics*. A John Wiley & Sons, Ltd, Publication.
12. Comel Solar energy and construction. (2010). Prieiga per internetą: <http://www.comel.gr/en/solar_basics.html>.
13. Mani, M.; Pillai, R. (2010) Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
14. Vekteris, V.; Jurevičius, M.; Daktariūnas, A. (1999) Kompiuterinė diagnostinių matavimų sistema, *Matavimai*.
15. Chapin, D. M.; Fuller, C. S.; Pearson, G. L. (1954) A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*.
16. Charabi, Y.; Gastli, A. (2013) Integration of temperature and dust effects in siting

- large PV power plant in hot arid area. Renewable Energy.
17. Krotkus, A. (2008) *Puslaidininkų optoelektronikos sistemos ir prietaisai*. Vilnius: UAB „Progretus“.
 18. Juška, G.; Tamulaitis, G. (2008) *Energiją taupančios puslaidininkinės technologijos*. Vilnius: Progretus. 126 p. ISBN 978-9955-781-13-4
 19. Zimmer, L. (2012) Abandoned German Open-Pit Mine Turned Into World's Largest Solar Park.
 20. GEOS (2012) The Impact Snow Has on Solar Energy Production: A case study of the Morley photovoltaic array and the necessity for the removal or prevention of accumulated snow in the future.
 21. GEOS (2010) Experimental and modelling study of hail impact on composite plates
 22. SMA solar technology. (2012). Prieiga per internetą: <http://www.sma-america.com/en_US/products/monitoring-systems/sunny-sensorbox.html>.
 23. J. Kabys, D. Valiukas, E. Rimkus (2004) Meteorologinių sąlygų nulemta potencialaus avaringumo Lietuvos keliuose įvertinimas
 24. E. Mačerinskas (2012) Meteorologinių elementų parametrų kiekybinis įvertinimas ir poveikis orlaivių kilimo ir tūpimo charakteristikoms
 25. E. Rimkus (2011) *Meteorologijos įvadas*. Vilnius. Vilniaus Universitetas
 26. Lietuvos hidrometeorologinė tarnyba (2018) Prieiga per internetą < http://old.meteo.lt/skaitmenine_prog_lt_zem.php>
 27. First Solar. (2012) Prieiga per internetą: <<http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=706034>>

PRIEDAI

Fotoelektrinių (PV) modulių krušos imitacijos tyrimai naudojant naujai sukurtą stendą

Martynas KRIŠČIŪNAS¹, Mindaugas JUREVIČIUS², Vytautas MAKARSKAS³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

2019-04-20

Anotacija. Krušos ledo gabalėlių smūginis poveikis kompozicinėms konstrukcijoms (tokioms kaip saulės elementai) sukelia realius defektus. Krušos poveikiui įvertinti reikia atlikti eksperimentinius, skaitinius ir analitinius tyrimus. Straipsnyje atlikti bandymai, kuriuose saulės elementų plokštės buvo paveiktos krušos imitacijos stendo rutuliukais, leido įvertinti: smūgio energiją, kuri sukelia pagrindinius saulės elementų defektus; atsiradusių saulės elementų konstrukcijos mikro įtrūkimus, dėl kurių atsiranda saulės elemento generuojamos galios praradimas; saulės elemento parametrus, reikalingus atlikti modeliavimą. Taip pat straipsnyje atlikta krušos imitacijos skaitmeninė analizė. Iš skaitmeninės analizės gauta informacija bus naudojama optimizuojant saulės elementų konstrukciją, jos atsparumo didinimui.

Reikšminiai žodžiai: Saulės elementas, PV modulis, Krušos poveikio tyrimas, galios netekimas.

IVADAS

Fotoelektriniai (PV) moduliai yra kompozitai arba laminatai, sudaryti iš skirtingų sluoksnių turinčių labai skirtingas mechanines savybes ir funkcijas. Vieni fotoelektriniai modulių sluoksniai skirti gaminti elektros energiją kiti apsaugo modulius nuo aplinkos poveikio. Dažniausiai yra naudojami dviejų tipų fotoelektriniai moduliai [1]: 1) standžios plokštės su išorėje stiklo sluoksnių, kad būtų užtikrintas modulių standumas ir apsauga nuo mechaninių apkrovų; 2) pusiau lanksčios plokštės, kurios turi būti pritvirtintos prie plokščių arba išlenktų paviršių, su apsauga užtikrinančiu polimeriniu sluoksniu, kuris leidžia PV moduliui turėti tam tikrą lankstumą. Kadangi PV moduliai yra įrengti lauke, termo-higrometriniai ciklai, vėjo gūsiai, sniegas ir krušos poveikis yra pagrindiniai pažeidimų ir degradacijos šaltiniai per numatomą 25 metų eksploataavimo laikotarpį. Vieni iš daugiausiai įtakos PV modulių konstrukcijos patikimumui ir standumui turi mechaniniai poveikiai [2], [3], kurių įtaka PV modulių ilgaamžiškumui ir elektriniam veikimui apžvelgiami [4]–[12]. Iš mechaninio poveikio rūšių krušos poveikis yra reikšmingas PV moduliams, nes gali atsirasti silicio skilimas, kuris gali sukelti didelius elektros energijos nuostolius. Krušos bandymai dažniausiai atliekami naudojant pneumatinius įrenginius (ledo gabaliuko skersmuo yra 25 mm, o greitis smūgio metu - 23 m/s) ir analizuojant elektros srovės nuostolius iš srovės įtampos (I-V) kreives bei elektroliuminescencines (electroluminescence) nuotraukas, kurios leidžia aiškiai nustatyti mikro įtrūkimus ir jų poveikį elektriniam atsakui.

Papildant eksperimentinius tyrimus aktualu atlikti ir teorinius nagrinėjamos problemos tyrimus. Poveikio ir kontaktinės mechanikos problema dinamikoje yra plačiai ištirta eksperimentiškai ir teoriškai, tačiau dauguma tyrimų nagrinėja aviacijos ir gynybos srityse kylančias problemas (aerospace and defence fields) [13], [14]. Minėtuose tyrimuose kaip tyrimo objektas dominuoja kompozitinės korinės konstrukcijos plokštės [15]–[18].

Straipsnyje analizuojamos naujai sukurtos eksperimentinio stendo, kuris skirtas krušos imitacijai, galimybės ir bandymai. Sukurtas stendas leidžia pasiekti analogiškuose tyrimuose naudojamus parametrus (kamuoliuko greitį ir smūgio jėgą). Straipsnyje vertinami eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizuojami teoriniai tyrimai, kurių metu analizuojamos kontaktinės mechanikos problemos dinamikoje.

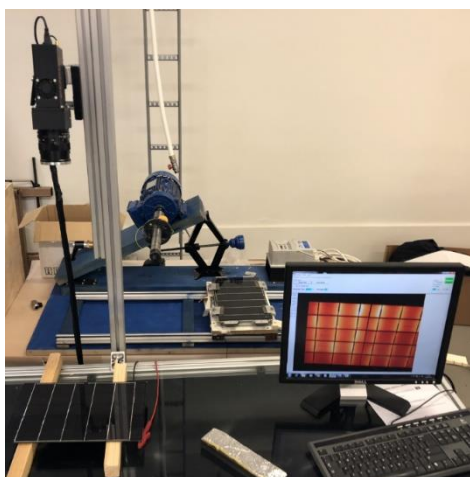
Krušos imitacijos stendas ir dinaminį parametrų matavimo įrangą

Tiriamas objektas yra krušos imitacijos naujai sukurtas stendas (1 pav.). Stendą sudaro trys dalys: krušos imitacijos dalis; pagreičio ir jėgos parametrų matavimo dalis; saulės elementų defektų nustatymo dalis (electroluminescence). Krušos imitacijos dalį sudaro: variklis su dažnio keitikliu, krušos imitacijos komponentai ir ant kreipiančiųjų judantis saulės modulis. Atitinkamai pagreičio ir jėgos parametrų matavimo dalį sudaro: jėgos ir pagreičio davikliai, bei matavimo rezultatų apdorojimo ir kaupimo įranga. Saulės elementų defektų nustatymo dalį sudaro: kamera ir gautų rezultatų apdorojimo ir kaupimo įranga. Tyrimams buvo pasirinktas Fotovoltinis (polikristalinis) modulis (kamos dydis 37x156 mm; Kamerų kiekis 10; Išorinio stiklo storis 3,2 mm grūdintas stiklas; Matmenys (L x W) 322 x 204 mm; svoris 625 g).

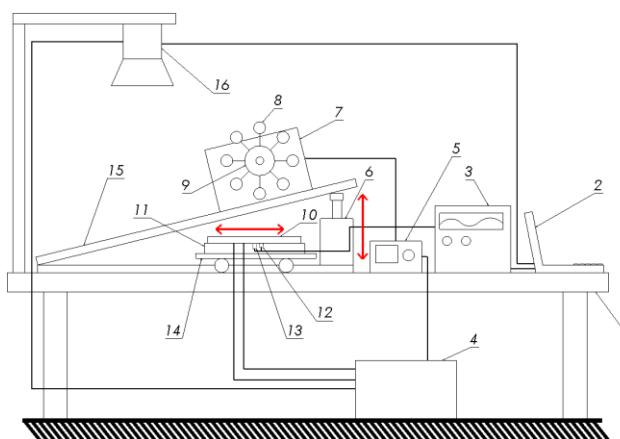
Atliekant tyrimus buvo siekiama išsiaiškinti naujai sukurtos stendo galimybes ir atlikti krušos imitacijos bandymus, bei nustatyti dinaminį poveikį įtaką fotovoltinių modulių konstrukcijai ir darbingumui. Eksperimento metu apsisukimų dažniai buvo keičiami, kad imituoti dinamines mechanines apkrovas, kurios atitinka skirtingus ledo gabalėlio krušos metu greičius. 1 pav. pateiktas bandymų stendas yra sudarytas iš: 1 – stalas, 2 – kompiuteris, 3 – duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga, 4 – generatorius, 5 – valdymo blokas, 6 – keliamoji įranga, 7 – variklis, 8 – kamuoliukai, 9 – įvorė, 10 – fotovoltinis modulis, 11 – rėmas, 12 – jėgos daviklis, 13 – akcelerometras, 14 – krietėlė, 15 – kilnojamas pagrindas, 16 – elektroliuminescencinis stendas.

Virpesių ir jėgos parametrų matavimui buvo panaudotos „Brüel & Kjær“ matavimo priemonės (2 pav.): 1. Kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo, kaupimo ir valdymo įranga „Machine Diagnostics Toolbox — Type 9727“; 2. Vienašis akcelerometras 8341; 3. Jėgos daviklis 8230.

PV modulis standžiai tvirtinamas ant kariatėlės, kuri juda ant bėgiu. Variklis su kamuoliukais žadina PV modulius. Variklis yra prijungtas prie valdymo bloko, kuris kontroliuoja dažnius (5 iki 60 Hz ruože) ir apsukas. Akcelerometras tvirtinamas ant fotovoltinio modulinio viduryje iš apačios, kad išmatuoti įeinančio signalo (pagreičio ir poslinkio) reikšmes ir pobūdį. Šalia akcelerometro tvirtinamas jėgos daviklis, kuris skirtas išmatuoti kamuoliukų smūgius. Akcelerometras ir jėgos daviklis prijungti prie duomenų kaupimo ir apdorojimo įrangos. Duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga prijungta prie kompiuterio, kuris grafiškai pavaizduoja rezultatus. Po ir prieš krušos imitacijos PV moduliai fotografuojami elektroluminescenciniame stende, kuriame paduodama elektros srovė (srovė priklauso nuo saulės elemento didžio, ji gali siekti iki 4 – 5A) į PV modulius ir jie fotografuojami. Elektroluminescencinis atvaizdavimas yra dažniausiai naudojamas sutrikimams tikrinti, nes spinduliavimo intensyvumas yra proporcingas srovės tankiui ir neįkaitina fotovoltinio modulinio. Padarytos nuotraukos padeda aptikti pažeidimus fotovoltiniuose moduluose.



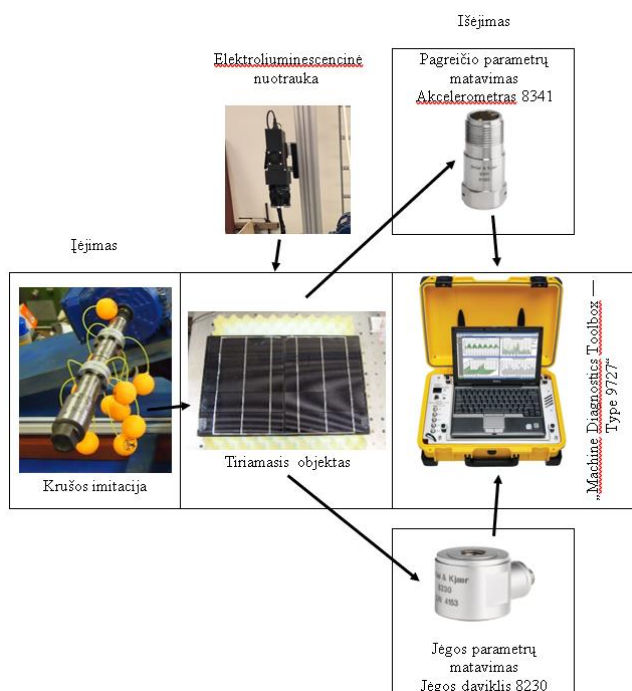
1 pav. Fotovoltinių modulių bandymų stendo



schema

(a) ir bendras vaizdas (b)

Tyrimo stendo blokinė schema pateikta 2 pav.



2 pav. Tyrimo stendo blokinė schema

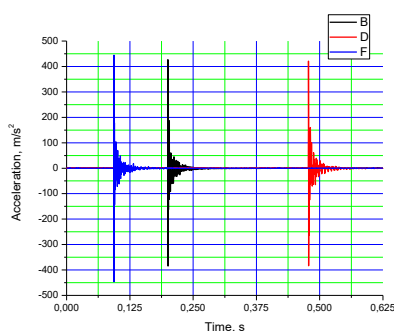
EKSPERIMENTINIAI IR TEORINIAI TYRIMAI

Eksperimentinių tyrimų seka. Pirmame etape buvo siekiama nustatyti kokios jėgos, kuri gaunama imitaciniame krušos stende kontakto vietoje kamuoliukas-PV modulis, reikšmės sukelia PV modulyje įtrukimų atsiradimą. Taip pat buvo atliekamas smūginis bandymas, kurio metu matuojamos pagreičio reikšmės ir šio bandymo tikslas nustatyti dažnines PV modulio charakteristikas (3 pav.). Jėgos matavimai buvo atliekami prie skirtingų variklio (7 pozicija 1a pav.) apsisukimu ir gauti jėgos matavimo rezultatai pateikti 4 pav.

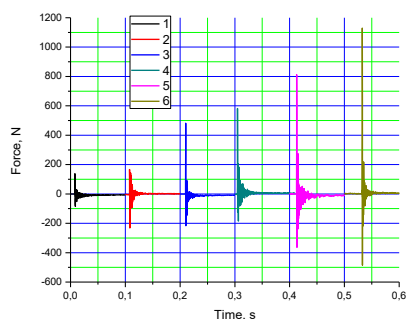
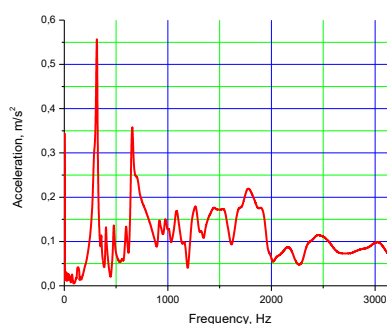
Fotovoltinis modulis buvo veikiamas krušos stendu su vienu kamuoliuku, stengiantis paveikti 1 – 3 smūgiais. Tyrimas vyko šešiais bandymais, didinant krušos stendo sukimosi greitį, keičiant stendo variklio dažnį 10 – 12 Hz ir matuojant kamuoliuko smūgio jėgą (3 pav.). Po kiekvieno bandymo fotovoltinis modulis nufotografuojamas elektroluminescenciniu stendu ir palyginamas su ankstesne bandymo nuotrauka.

TYRIMŲ REZULTATAI IR APTARIMAS

smuginis zadinimas Z kryptis



3 pav.



4 pav. jėgų amplitudė, kur: raudona – 1 bandymas; mėlyna – 2 bandymas; žalia – 3 bandymas; oranžinė – 4 bandymas; geltona – 5 bandymas; juoda – 6 bandymas

1 lentelėje parodyta visų šešių bandymų gautos jėgos ir nurodyti krušos imitavimo stendo dažniai.

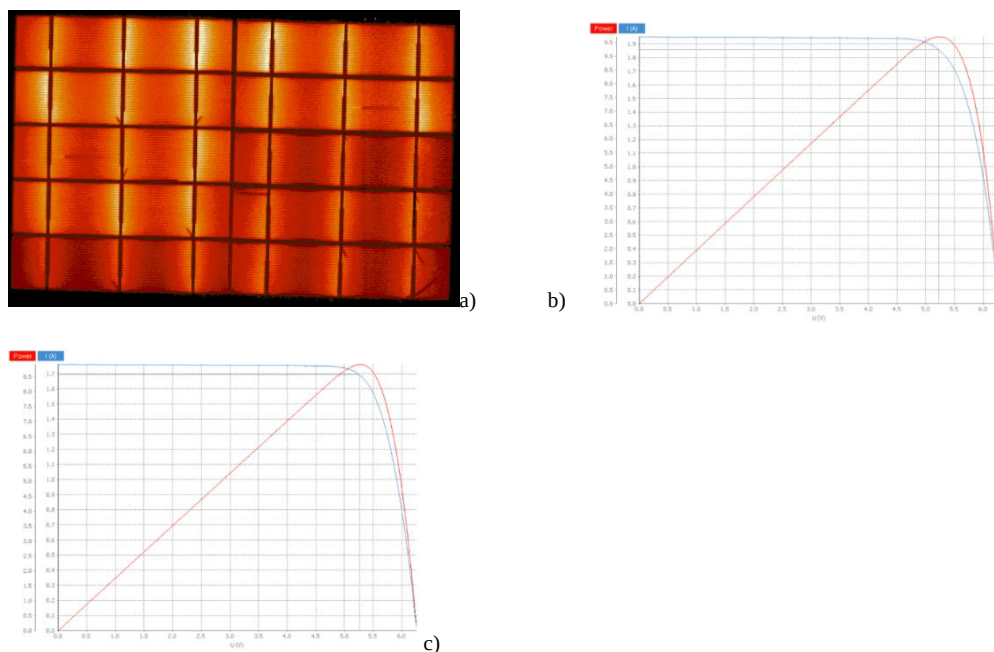
1 lentelė. Fotovoltinio modulio atsparumo badymai

Badymas	Dažnis (Hz)	Jėga (N)
1	10	137.92
2	12	166.07
3	14	480.81
4	16	582.06
5	18	345.49
6	20	1129

FOTOVOLTINIO MODULIO ATSPARUMO TYRIMAS

Šio tyrimo tikslas buvo surasti ir nustatyti optimalią krušos įtakos jėgos ribą, kuri gali įskelti fotovoltinių modelių stiklą ir pakeisti vidinę konstrukciją. Šiame tyrime buvo naudojamas krušos įtakos fotovoltiniams modeliams stendas ir tyrimo objektas (fotovoltinis modulis), kurio parametrai yra: ilgis ir plotis – 32.2 x 20.4 cm, svoris – 625 g, stiklo storis – 3.2 mm, patį modelį sudaro 10 celių su matmenimis 3.7 x 15.6 cm. Tyrimo objekto matavimams buvo naudoti jėgos davikliai su įranga, elektroliuminescencinis stendas ir I-V matavimų kreivių stendas.

Kad palyginti pagrindinius fotovoltinio modulio parametrus po krušos stendo poveikio, tyrimo pradžioje fotovoltinis modulis buvo nufotografuotas elektroliuminescenciniu stendu (5 pav.) ir išmatuotas voltaamperinių charakteristikų stendu (5 pav.).

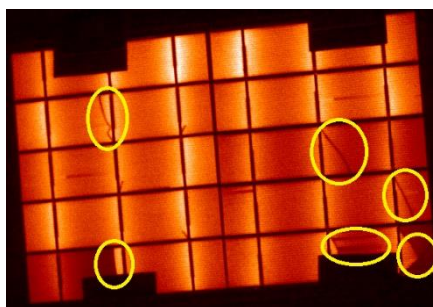


5 pav. Elektroliuminescencinė nuotrauka ir voltaamperinės kreivės prieš tyrimą (b) bei po 6 bandymo (c)

2 lentelė. Paliginimo lentelė

	Prieš	Po	%
Galia (W)	9,720	8,914	8,29
Įtampa (V)	5,227	5,257	0,57
Varža (A)	1,860	1,695	8,87

Po ketvirto bandymo, kur didžiausias kamuoliuko smūgis – 582.06 N, buvo pastebėti pirmi pažeidimai (6 pav.), kurie yra apvedžioti geltonai.



6 pav. Ketvirto bandymo elektroliuminescencinė nuotrauka

Paskutinis bandymas buvo pavojingiausias, didžiausias kamuoliuko smūgis – 1129 N, stipriausias smūgis iš visu kitų bandymo. Šiame bandyme atsirado daugiausia pažeidimų (7 pav.), kurie yra apvedžioti geltonai.

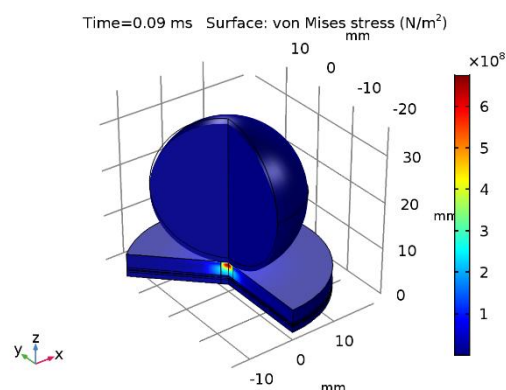
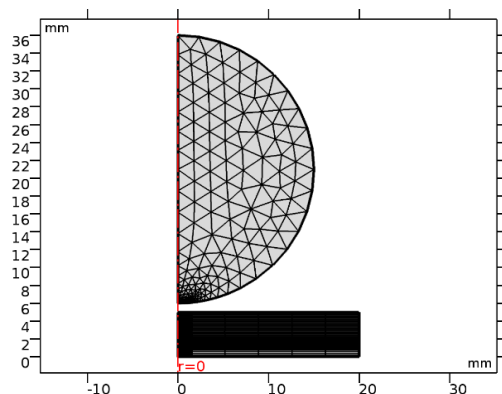
Po šešto bandymo fotovoltinis modulis buvo išimtas iš krušos imitavimo stendo ir išmatuotas I-V matavimų kreivių stendu.

Po tyrimų galima nustatyti, kad pavojingiausias kamuoliuko smūgis bandomiems fotovoltiniams moduliams yra apie 500 N jėga. Nes po tokio smūgio fotovoltinių modulių konstrukcijoje atsiranda mikro-įtrūkimų, kuriuos toliau veikiant ir su mažesne jėga, šitie pažeidimai toliau plečiasi. Pakartojus tyrimą tokiu dažniu daug kartų nustatyta kad vidutinis fotovoltinių element galios kritimas yra apie 6%.

Tyrimo metodika

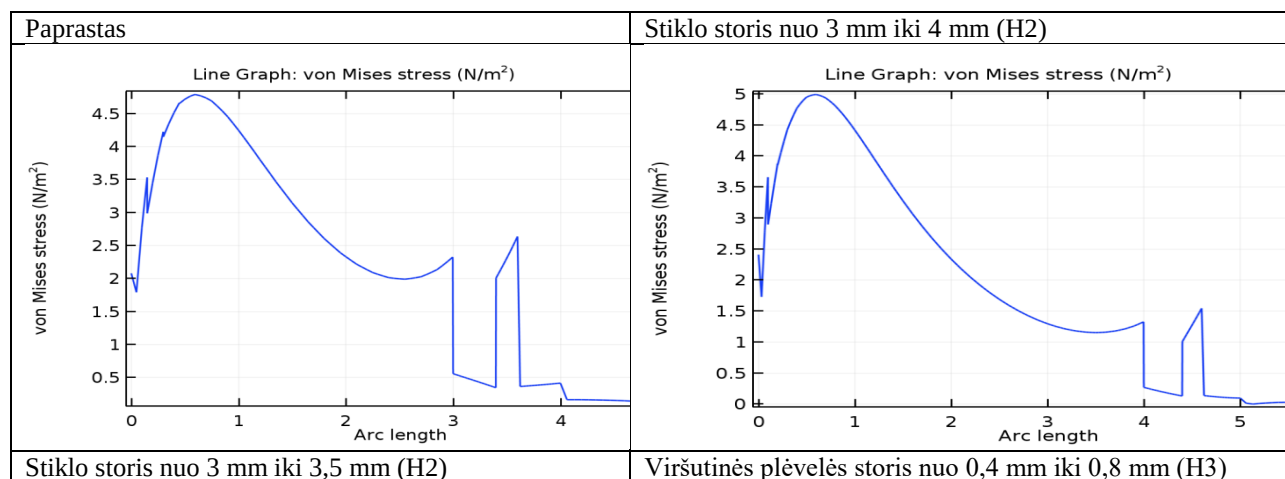
Tyrimo metu buvo taikomos šios prielaidos. daugiasluoksnio Fotovoltinio elemento sandara standartinė. Buvo imtuojamas

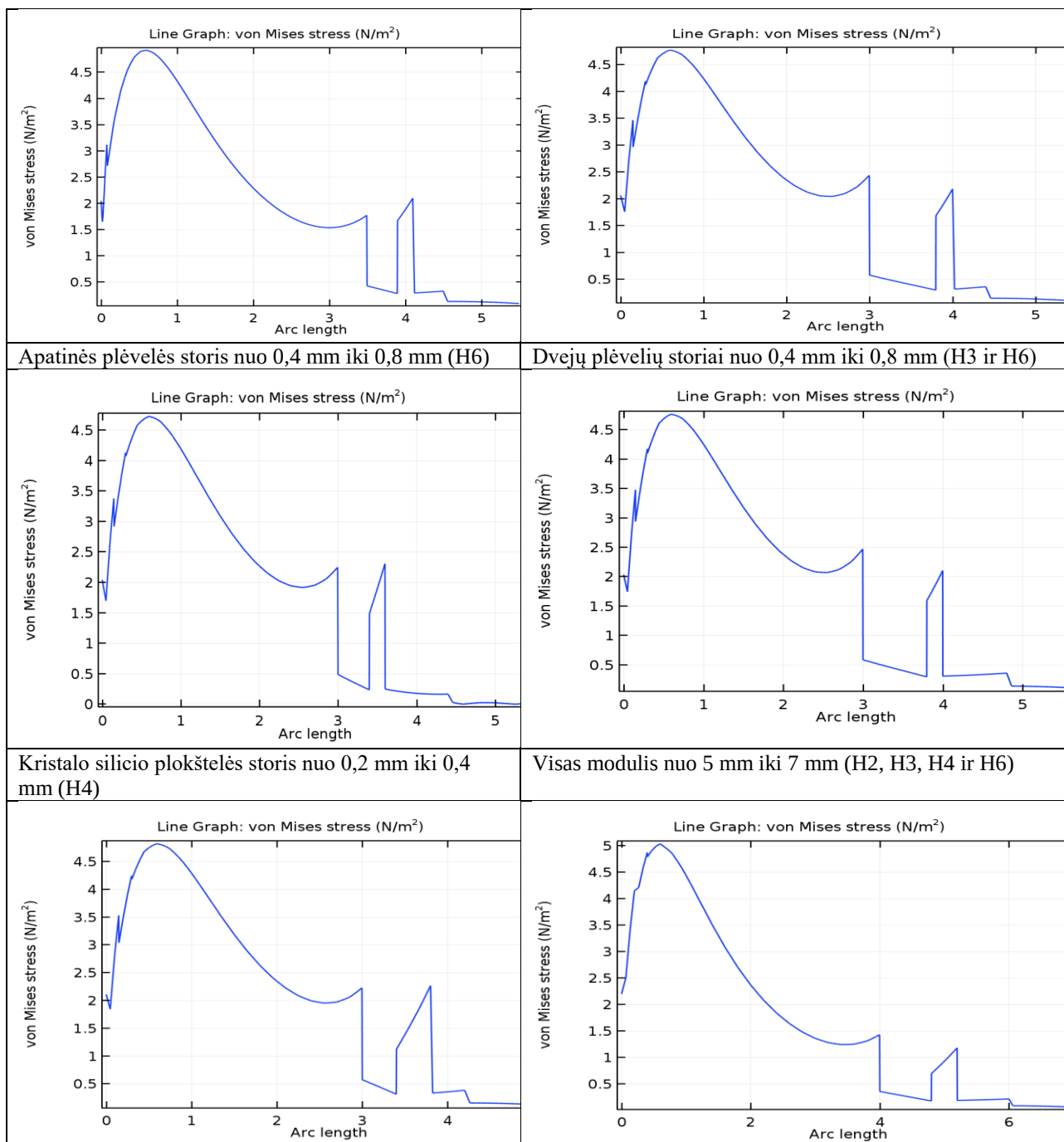
smūgis iš ledo kristalo į fotovoltinį elementą. (7 pav.)



7 pav. Teorinis modelis. Kairėje pusėje matomas tyrimų objektas išskaidytas į baigtinių elementų tinklą. Dešinėje matome įtempų pasiskirstymo grafiką smūgio metu.

Tyrimas buvo kartojamas didinant stiklo storį, bei analizuojamos gautos išvados.





Rezultatai parodė, kad padidinus stiklo storį silicio zala silicio kristalams gali sumažėti 40%.

Išvados

Altikus tyrimą paveikiant fotovoltinius elementus vidutinio stiprumo krušos imitacija t.y. 500 N jėga. Juose atsirandą mikro įtrūkiai, dėl kurių elementų galia vidutiniškai sumažėja 6%. Sumodeliavus teorinę simuliaciją su programa COMSOL buvo nustatyta, jog šią riziką galima sumažinti keičiant apsauginio stiklo storį, jo kietumą, bei didinant tarpelį tarp apsauginio stiklo bei silicio kristalų.

Summary

An underground study of photovoltaic cells by simulating medium-strength hail, that is 500 N force. Micro cracks appear in them, resulting an average 6% reduction of the power of the elements. By modeling the theoretical simulation with COMSOL, it was found that this risk can be reduced by changing the thickness of the safety glass, its hardness, and by increasing the gap between the safety glass and the silicon crystal.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. [1] M. Corrado, A. Infuso, and M. Paggi, "Simulated hail impacts on flexible photovoltaic laminates: testing and modelling," *Meccanica*, vol. 52, no. 6, pp. 1425–1439, Apr. 2017.
2. [2] A. Kilikevičius, A. Čereška, and K. Kilikevičienė, "Analysis of external dynamic loads influence to photovoltaic module structural performance," *Engineering Failure Analysis*, vol. 66, pp. 445–454, Aug. 2016.
3. [3] N. Višniakov, A. Kilikevičius, J. Novickij, A. Grainys, and V. Novickij, "Low-cost experimental facility for evaluation of the effect of dynamic mechanical loads on photovoltaic modules," *Eksplotacija i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, vol. 17, no. 3, pp. 334–337, Jun. 2015.
4. [4] S. Kichou, S. Silvestre, G. Nofuentes, M. Torres-Ramírez, A. Chouder, and D. Guasch, "Characterization of degradation and evaluation of model parameters of amorphous silicon photovoltaic modules under outdoor long term exposure," *Energy*, vol. 96, pp. 231–241, Feb. 2016.
5. [5] A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, A. Charki, P. A. Ndiaye, V. Sambou, and A. Kobi, "Degradation evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in a tropical environment," *Solar Energy*, vol. 103, pp. 70–77, May 2014.
6. [6] A. Bouraiou *et al.*, "Analysis and evaluation of the impact of climatic conditions on the photovoltaic modules performance in the desert environment," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp. 1345–1355, Dec. 2015.
7. [7] M. Paggi, M. Corrado, and M. A. Rodriguez, "A multi-physics and multi-scale numerical approach to microcracking and power-loss in photovoltaic modules," *Composite Structures*, vol. 95, pp. 630–638, Jan. 2013.
8. [8] J. Eisenträger, K. Naumenko, H. Altenbach, and J. Meenen, "A user-defined finite element for laminated glass panels and photovoltaic modules based on a layer-wise theory," *Composite Structures*, vol. 133, pp. 265–277, Dec. 2015.
9. [9] J. Eisenträger, K. Naumenko, H. Altenbach, and H. Köppe, "Application of the first-order shear deformation theory to the analysis of laminated glasses and photovoltaic panels," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 96–97, pp. 163–171, Jun. 2015.