



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Vėjo įtaka lietaus vandens nuo vertikalių paviršių surinkimo sistemos efektyvumui**

Baigiamasis magistro studijų projektas

---

**Mantas Dobravalskis**

Projekto autorius

**Lekt. dr. Juozas Vaičiūnas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Vėjo įtaka lietaus vandens nuo vertikalių paviršių surinkimo sistemos efektyvumui**

Baigiamasis magistro studijų projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

---

**Mantas Dobravalskis**

Projekto autorius

**Lekt. dr. Juozas Vaičiūnas**

Vadovas

**Prof. dr. Tadas Ždankus**

Recenzentas / Recenzentė

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Mantas Dobravalskis

## **Vėjo įtaka lietaus vandens nuo vertikalių paviršių surinkimo sistemos efektyvumui**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Manto Dobravalskio, baigiamasis projektas tema „Vėjo įtaka lietaus vandens nuo vertikalių paviršių surinkimo sistemos efektyvumui“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

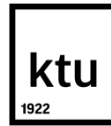
---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)





**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistrantūros studijų programa “Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai”**

T000M164 MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

<b>Temos pavadinimas (lietuvių k.)</b>
<b>Vėjo įtaka lietaus vandens nuo vertikalių paviršių surinkimo sistemos efektyvumui</b>
<b>Temos pavadinimas (anglų k.)</b>
Impact of Wind Speed on Efficiency of Vertical Rainwater Harvesting System

<b>Trumpas projekto aprašymas</b>
<p>Lietaus vanduo yra vienas švariausių vandens šaltinių. Lietuvoje ir daugelyje pasaulio regionų šis vanduo nėra pilnai išnaudojamas. Dažniausiai jis surenkamas tik nuo horizontalių paviršių. Norint padidinti iš lietaus vandens gaunamą naudą, reikia maksimaliai padidinti plotą iš kurio surenkamas lietaus vanduo.</p> <p>Todėl šiame magistro baigiamajame projekte iškeltas tikslas sukurti vertikalią lietaus vandens surinkimo sistemą, kurią būtų galima montuoti ant pastatų fasadų. Atlikti bandymus laboratorijoje bei realiomis sąlygomis. Taip pat sukaupti ir išanalizuoti meteorologinius duomenis. Visą turimą informaciją apdoroti ir nustatyti vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumą. Nustatyti kaip vėjas veikia tokią sistemą, kaip keičiasi jos efektyvumas kintant vėjo greičiui. Suprojektuoti ir remiantis CFD simuliacijomis apskaičiuoti realiaame objekte sumontuotos sistemos potencialiai nešamą naudą, atsiperkamumą.</p>
<b>Projekto pristatymo data:</b> <u>2019-01-16</u>

**Studentas**

<b>Vardas pavardė</b>	<b>Mantas Dobravalskis</b>
<b>Kontaktai</b>	<b>mantas.dobravalskis@ktu.lt</b>
<b>Parašas, data</b>	

**Magistro baigiamojo projekto vadovas**

<b>Mokl. laipsnis / pedag. vardas</b>	<b>Lekt. dr. Juozas Vaičiūnas</b>
<b>Vardas pavardė</b>	
<b>Fakultetas</b>	<b>Statybos ir architektūros fakultetas</b>
<b>Kontaktai</b>	<b>juozas.vaiciunas@ktu.lt</b>
<b>Parašas, data</b>	

**Statinių inžinerinių sistemų studijų krypties programų komiteto sprendimas**

- Patvirtinta
- Nepatvirtinta

SPK protokolo Nr. \_\_\_\_\_

**Statinių inžinerinių sistemų studijų krypties programų vadovas**

<b>Mokl. laipsnis / pedagog. vardas</b> <b>Vardas pavardė</b>	<b>lekt. dr. Laura Stasiulienė</b>
<b>Fakultetas</b>	<b>Statybos ir architektūros fakultetas</b>
<b>Kontaktai</b>	<b>laura.stasiulienė@ktu.lt</b>
<b>Parašas, data</b>	

Patvirtina \_\_\_\_\_ dekanı įsakymu

Dobravalskis, Mantas. Vėjo įtaka lietaus vandens nuo vertikalių paviršių surinkimo sistemos efektyvumui. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas Lekt. dr. Juozas Vaičiūnas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T).

Reikšminiai žodžiai: Lietaus vanduo, lietaus vandens surinkimas, vertikali lietaus vandens surinkimo sistema, vėjo įtaka lietaus vandeniui.

Kaunas, 2019. 64 p.

## Santrauka

Magistro baigiamojo darbo tikslas išnagrinėti vėjo įtaką vertikalioms lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumui. Taip pat tiriamas lietaus pasiskirstymas ant pastato fasadų bei lietaus vandens surinkimo sistemos nešama nauda.

Darbe atliekami laboratoriniai bandymai. Jų tikslas išmatuoti lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumą esant skirtingiems lietaus lašų kritimo kampams. Šie kampai imituoja skirtingas meteorologines sąlygas – vėjo greitį. Buvo bandomi 4 skirtingi kampai atitinkantys 0,3 m/s, 1,0 m/s, 2,2 m/s ir 5,8 m/s vėjo greičius. Rezultatai rodo, kad didėjant vėjo greičiui sistemos surenkamo lietaus procentas taip pat didėja. Esant mažiausiam tirtam vėjo greičiui sistemos efektyvumas siekia 41,82%, o pučiant maksimaliam 5,8m/s vėjo greičiui sistemos efektyvumas siekia 90,94%. Atlikus regresinę analizę išvesta koreliacijos tarp sistemos efektyvumo ir vėjo greičio logaritminė lygtis. Naudojant šią lygtį galimas sistemos efektyvumo prognozavimas.

Norint parinkti optimalią vertikalioms lietaus vandens surinkimo sistemos montavimo ant pastato fasado vietą atliekamas CFD modeliavimas. Jo metu sumodeliuojamas 10 m x 10 m x 30 m gabaritų pastatas. Modeliavimo rezultatai rodo, kad sistemą montuoti apsimoka tik viršutinėje pastato dalyje, ypač kampuose. Fasado vidurinėje dalyje bei apačioje lietaus beveik nenukrenta.

Remiantis CFD modeliavimo rezultatais, ant tariamo pastato, suprojektuojama lietaus vandens surinkimo sistema. Šios sistemos plotas 36 m<sup>2</sup>. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad per metus sistema vidutiniškai surinks 2,06 m<sup>3</sup> vandens. Iš 1 m<sup>2</sup> sistemos ploto per metus bus sukaupiami 57,19 litrai vandens. Atlikus preliminarinius ekonominius skaičiavimus padarytos išvados, kad sistemos nešama 3.22€ per metus nauda nėra žymi, todėl sistema ekonomiškai nėra efektyvi.

Dobravalskis, Mantas. Impact of Wind Speed on Efficiency of Vertical Rainwater Harvesting System. Master's Final Degree Project / supervisor Lekt. dr. Juozas Vaičiūnas; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): technological sciences, civil engineering (02T).

Keywords: Rainwater, rainwater harvesting, vertical rainwater harvesting system, rwh.

Kaunas, 2019. 64 pages.

### **Summary**

The goal of this master's thesis is to evaluate how wind speed affects vertical rainwater harvesting system and its efficiency. Furthermore, analysis of layout of deposition of wind driven rain's is carried out. Economics of such system is also evaluated.

Experiments with multiple rain inclination angles were carried out to measure the efficiency of vertical rainwater harvesting system. These angles replicated inclination angles that happen in nature when wind is acting upon rain droplets. 4 different angles were tested that simulated 0.3 m/s, 1.0 m/s, 2.2 m/s and 5.8 m/s wind speeds. Results show, that increase in wind speed increases the effectiveness of the system significantly. When minimum wind speed was simulated, percentage of all the water collected was only 41.82%. When the speed of wind was increased to the maximum value, effectiveness of the system reached 90.94%. After conducting all the tests, regression analysis was carried out. Wind's impact on the tested rainwater harvesting system can be described by logarithmic equation. This equation lets easy prediction of effectiveness of this system in various wind conditions.

In order to select the best position for the vertical rainwater harvesting system CFD simulation is also implemented in this projects scope. During this simulation a building with measurements of 10 m x 10 m x 30 m is modelled. After simulation was completed, result show that such systems should only be mounted on the top part of the building as the amount of rainfall on that areas is much greater than of those at the middle or base of the building.

According to the information gathered during CFD analysis and experiments, rainwater harvesting system was designed on similarly shaped building. Total systems area is 36 m<sup>2</sup>. Calculations show that on average system of that size would collect up to 2.06 m<sup>3</sup> of rainwater. Water amount collected from 1 m<sup>2</sup> of system equals to 57.19 liters. After making some basic economical calculations, conclusion that this system isn't economically viable were made.



## Turinys

<b>1. Literatūros apžvalga</b> .....	<b>15</b>
1.1. Lietaus vandens daroma žala fasadams .....	15
1.2. Vandens trūkumas pasaulyje .....	15
1.3. Lietaus lašų dinamika .....	16
1.4. Vėjo įtaka ir lietaus lašų pasiskirstymas ant fasadų .....	17
1.4.1. CFD modeliavimas ir jo patikimumas .....	20
1.5. Meteorologiniai duomenys .....	23
1.6. Estetinis vaizdas ir architektūrinės idėjos.....	24
1.7. Lietaus vandens panaudojimo galimybės .....	25
<b>2. Tyrimų metodologija</b> .....	<b>28</b>
2.1. Laboratorinių tyrimų įranga .....	28
2.1.1. Vertikali lietaus vandens surinkimo sistema.....	28
2.1.2. Valdymo blokas ir kita elektronika .....	31
2.2. Kita įranga naudojama tyrimams.....	32
2.3. Eksperimentų eiga .....	33
2.3.1. Tyrimai laboratorijoje .....	33
2.3.2. Bandymai realiomis sąlygomis .....	34
2.4. CFD modeliavimas .....	35
<b>3. Rezultatai</b> .....	<b>36</b>
3.1. Meteorologiniai duomenys .....	36
3.2. Laboratorinių tyrimų rezultatai.....	38
3.3. Realiomis sąlygomis surenkamo vandens kiekis .....	45
3.4. Lietaus vandens pasiskirstymo ant pastato fasado modeliavimas .....	46
3.4.1. Pastato geometrijos ir tinklelio apibrėžimas .....	46
3.4.2. Uždavinio sprendimas naudojant „windDrivenRainFoam“ sprendimų variklį .....	47
3.4.3. CFD modeliavimo rezultatai .....	48
3.5. Ekonominiai skaičiavimai .....	49
3.5.1. Skaičiavimai remiantis 2018 metų duomenimis .....	50
3.5.2. Skaičiavimai remiantis daugiamečiais duomenimis .....	52
3.5.3. Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos teikiama ekonominė nauda .....	53
<b>Išvados</b> .....	<b>54</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>55</b>
<b>Priedai</b> .....	<b>58</b>

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Galimi lašo atsimušimo į sieną variantai [1] .....	16
<b>2 pav.</b> Vandens tėkmė nelygiais paviršiais esant skirtingam vandens srautui [1].....	17
<b>3 pav.</b> Lietaus lašų priklausomybė nuo vėjo greičio esant skirtingam lietaus intensyvumui [5] .....	18
<b>4 pav.</b> Lietaus lašų(1mm) trajektorijos esant 10m/s vėjui. a-d - skirtingi pastatų dydžiai [6] .....	19
<b>5 pav.</b> Lietaus lašų pasiskirstymas ant skirtingų proporcijų pastatų fasadų atsuktų vėjo kryptimi. a-d - skirtingi pastatų dydžiai [6] .....	19
<b>6 pav.</b> Pastato modelis naudojamas tyrimams [7] .....	20
<b>7 pav.</b> Lietaus kiekio pasiskirstymas ant fasado ir stogo [7].....	20
<b>8 pav.</b> Palyginimas tarp a)eksperimentinio tyrimo ir b)CFD modeliavimo rezultatų. Kubų dydis 2m x 2m x 2m. Bandymai atlieka dviem skirtingiems kubams [8] .....	21
<b>9 pav.</b> (a) tiriamų pastatų geometrija. (b) pastatų nuotrauka. (c) Teritorijos planas [9].....	22
<b>10 pav.</b> Lietaus vandens kiekio ant fasado matavimo įrenginys: a)nuotrauka; b)schema; [9].....	22
<b>11 pav.</b> Palyginimas tarp (a) realiomis sąlygomis išmatuotų dydžių ir (b) CFD rezultatų [9].....	23
<b>12 pav.</b> Vidutinis metinis kritulių kiekis Lietuvoje, mm [10] .....	23
<b>13 pav.</b> Vidutinis kritulių kiekis Lietuvoje 1981–2010, 2016 ir 2017 m., mm [10] .....	24
<b>14 pav.</b> Architektės siūlomas fasado vizualinis sprendimas [12].....	25
<b>15 pav.</b> Pastatas dengtas kirstai temptu metalu – Kaunas [13].....	25
<b>16 pav.</b> Vidutinis vandens suvartojimo pagal paskirtis, litrais [18] .....	27
<b>17 pav.</b> a)Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos fragmentas; b)pagrindas su vandens talpomis ir svarstyklėmis; c)valdymo blokas; d)programinė įranga.....	28
<b>18 pav.</b> a)Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos fragmentas; b)pagrindas su vandens talpomis ir svarstyklėmis; c)vandens talpos ant svarstyklių.....	29
<b>19 pav.</b> Lietaus vandens surinkimo dėžės pjūvis ir lietaus lašų elgsena. Čia: $Q_{rain}$ – visas lietaus kiekis; $Q_{harv}$ – surinkto lietaus kiekis; $Q_{runoff}$ – lietaus kiekis nutekėjęs plokštės paviršiumi; $Q_{splash}$ – lietaus kiekis nutiškęs nuo plokštės.....	30
<b>20 pav.</b> Valdymo bloko principinė schema .....	31
<b>21 pav.</b> Bandymo įrangos išdėstymas laboratorijoje.....	33
<b>22 pav.</b> a) Imituojamo lietaus ant plokštės kontūrai; b) vandens lašų kritimo kampas $\alpha$ .....	34
<b>23 pav.</b> Supaprastintas trimatis pastato modelis ir gaunamų rezultatų pavyzdys [20].....	35
<b>24 pav.</b> Lietaus kiekio palyginimas: 2018 metai ir daugiametis vidurkis .....	37
<b>25 pav.</b> Vidutinio vėjo greičio palyginimas: 2018 metai ir daugiametis vidurkis.....	37
<b>26 pav.</b> Vėjo krypties pasikartojimų palyginimas .....	38
<b>27 pav.</b> Lietaus kritimo kampo priklausomybė nuo vėjo greičio [5] .....	41
<b>28 pav.</b> Sistemos efektyvumas esant skirtingam vėjo greičiui .....	42

<b>29 pav.</b> Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumo priklausomybė nuo vėjo greičio	43
<b>30 pav.</b> Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos nesurenkamo vandens priklausomybė nuo vėjo greičio .....	44
<b>31 pav.</b> "OpenFOAM" modeliuojamos situacijos geometrija ir tinklelis.....	47
<b>32 pav.</b> Vėjo greitis įvairiose modelio vietose .....	48
<b>33 pav.</b> Santykinio lietaus kiekio pasiskirstymas ant pastato fasado esančio priešais vėją .....	49
<b>34 pav.</b> Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos planas ir modulių išdėstymas .....	49
<b>35 pav.</b> Surenkamo vandens kiekis skirtingais metų mėnesiais (2018 metų sezono duomenys).....	51
<b>36 pav.</b> Surenkamo vandens kiekis skirtingais metų mėnesiais (Daugiamečiai duomenys).....	53

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė.</b> Fasadinės plokštės parametrai.....	30
<b>2.2 lentelė.</b> Svorio daviklių specifikacija.....	32
<b>3.1 lentelė.</b> Atliktų bandymų suvestinė.....	39
<b>3.2 lentelė.</b> Bandymu metu imituoto lietau intensyvumas.....	40
<b>3.3 lentelė.</b> Atliktų bandymų rezultatai.....	40
<b>3.4 lentelė.</b> Vidutinis sistemos efektyvumas esant skirtingam lietaus kritimo kampui.....	41
<b>3.5 lentelė.</b> Atliktų bandymų suvestinė.....	45
<b>3.6 lentelė.</b> Suprojektuotos vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos surenkamo vandens kiekis (2018 metų duomenys) .....	51
<b>3.7 lentelė.</b> Suprojektuotos vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos surenkamo vandens kiekis (Daugiamečiai vidutiniai duomenys) .....	52

## **Įvadas**

### ***Magistro baigiamojo projekto aktualumas***

Namų ūkiams geriamos kokybės vanduo tiekiamas iš centralizuotų vandentiekio tinklų nuolatos brangsta. To priežastys yra įvairios, tačiau didelę įtaką tam daro vandentiekio tinklų infrastruktūros plėtra bei naujų technologijų taikymas vandens kokybės užtikrinimui. Akivaizdu, kad kiekviename namų ūkyje didelę dalį sunaudojamo geriamos kokybės vandens galime pakeisti vandeniu, neatitinkančiu griežtų higienos reikalavimų, pavyzdžiui, lietaus vandeniu. Įprastai, toks vanduo namų ūkyje gali būti panaudojamas tualetų bakeliams, skalbimui, teritorijos laistymui ar automobilio plovimui.

Lietaus vandens surinkimas ir panaudojimas namų ūkyje gali ne tik sumažinti geriamojo vandens suvartojimo kiekį, bet ir sutaupyti pinigų, prisidėti prie darnaus vystymosi, dalyje pasaulio regionų išspręsti geriamojo vandens trūkumo problemas.

### ***Magistro baigiamojo projekto tikslas***

Nustatyti, kaip vėjas įtakoja vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumą bei lietaus pasiskirstymą ant pastato fasadų. Įvertinti tokios sistemos realiomis sąlygomis surenkamo vandens kiekį bei jo teikiamą naudą.

### ***Magistro baigiamojo projekto uždaviniai***

1. Literatūros baigiamojo projekto tematika paieška ir analizė
2. Bandomojo stendo projektavimas, gamyba bei testavimas
3. Tiriamoji dalis: eksperimentai laboratorijoje ir CFD simuliacijos
4. Rezultatų analizė ir vertinimas

### ***Magistro baigiamojo projekto tezės***

1. Vėjas turi didelę įtaką, lietaus vandens surinkimo nuo vertikalių paviršių, sistemos efektyvumui bei kritulių pasiskirstymui ant fasadų.
2. Sumontavus vertikalią lietaus vandens surinkimo sistemą, galima ženkliai sumažinti geriamojo vandens poreikį iš miesto tinklų.

### ***Magistro baigiamojo projekto mokslinis naujumas***

Atliekami tyrimai yra unikalūs ir tyrinėja naują vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumą įtakojantį kintamąjį - vėją. Šiuo metu nėra atlikta jokių eksperimentinių bandymų tiriančių, kaip vėjas įtakoja tokias sistemas. Bandymai atliekami unikaliu, specializuotu stendu.

Baigiamojo projekto metu, taip pat atliekamas CFD modeliavimas, leidžiantis parinkti tinkamiausią vietą tokiai sistemai sumontuoti.

### ***Magistro baigiamojo projekto praktinis pritaikomumas***

Darbe pateikti rezultatai bei išvados gali padėti tęsti tyrimus šioje srityje siekiant didinti potencialų sistemos efektyvumą, bei kitaip ją tobulinti. Darbe naudota tyrimų metodologija gali prisidėti prie tokios technologijos vystymo, rekomendacijų tokios sistemos projektavimui kūrimo. Sukurtas sistemos prototipas gali būti panaudotas, kaip pavyzdinis vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos modelis.

## **1. Literatūros apžvalga**

Šioje projekto dalyje, buvo rasti ir išanalizuoti įvairūs moksliniai straipsniai bei kiti šaltiniai, tiriantys įvairius veiksnius svarbius vertikaliuos lietaus vandens surinkimo sistemos veikimui, efektyvumui ir pritaikomumui realiose projektuose. Šaltiniuose rasta informacija svariai prisidėjo prie tyrimų metodikos sudarymo. Remiantis rasta informacija, taip pat sudaryti baigiamojo projekto uždaviniai bei tezės.

### **1.1. Lietaus vandens daroma žala fasadams**

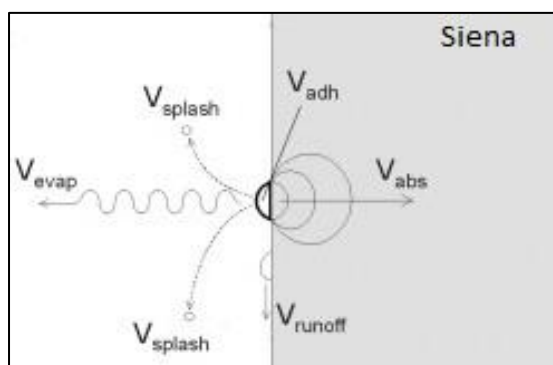
Lietaus vandens surinkimas nuo vertikalių paviršių visų pirma gali padėti sumažinti vandens daromą žalą fasadams. Ant pastatų fasadų dažnai galime pamatyti tam tikros žalos. Ji neretai būna sukelta vandens. Perteklinė drėgmė apdailinėse medžiagose gali sukelti: spalvos pokytį, pelėsį, puvimą, o esant staigiems temperatūrų pokyčiams medžiagas gali pažeisti mechanškai. Dėl šių priežasčių medžiagos praranda ne tik savo estetinį vaizdą, bet ir mechanines savybes, skatinamas medžiagų irimo procesas. Taip pat sutrumpėja medžiagų eksploatavimo laikas, išauga pastato eksploatavimo kaštai [1]. Atlikti tyrimai, taip pat rodo, kad pučiant vėjui vandens įsigėrimas į paviršinius sienos sluoksnius dar padidėja. Besikaupianti drėgmė trikdo sienos drėgmine pusiausvyra, ji gali pakenkti izoliacinėms medžiagoms [2]. Surinkdami vandenį nuo fasadų, padėtumėme pamažinti jiems daromą žalą, neleistume vandeniui prasiskverbti į gilesnius sluoksnius.

### **1.2. Vandens trūkumas pasaulyje**

Lietaus vandens surinkimas ir panaudojimas taip pat labai svarbus, dėl pasaulyje didėjančio jo stygiaus. Pasaulyje jau šiuo metu gyvena daugiau nei 1 milijardas žmonių, kurie kasdien susiduria su vandens trūkumu. Dar 1,6 milijardo žmonių negauna pakankamo vandens kiekio, dėl senos ar neišvystytos infrastruktūros, nepaisant to, kad regione vandens netrūksta [3]. Situaciją blogina ir tai, kad daug vandens šaltinių tampa per daug užterštais ir vanduo iš jų nebegali būti saugiai naudojamas. Prognozuojama, kad 2050 metais 4,8-5,7 milijardo žmonių bent vieną mėnesį per metus bus rizikos grupėje ir potencialiai neturės priėjimo prie pakankamo vandens kiekio savo poreikiams patenkinti. 69% šių žmonių yra iš Azijos [4]. Lietaus vanduo yra sąlyginai švarus, todėl potencialiai gali būti geriamojo vandens šaltinis. Nors dėl meteorologinių sąlygų nepastovumo tokios sistemos veikimas būtų nepastovus, teikiamo jo nauda galėtų padėti vandens stygių juntantiems žmonėms.

### 1.3. Lietaus lašų dinamika

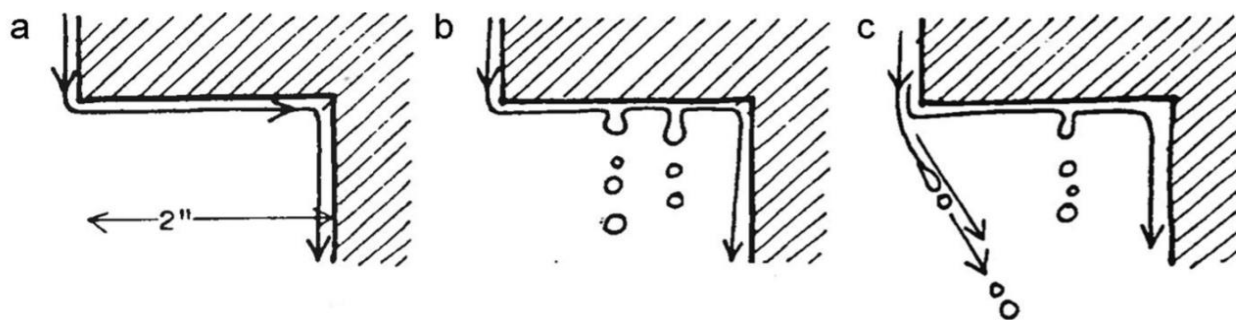
Norint sukurti optimalią lietaus vandens surinkimo sistemą pirmiausia reikia suprasti lietaus lašų atsimušimo į sieną dinamiką. Lašas atsitrenkęs į sieną gali išsiskirstyti į kelias dalis, kurios elgiasi labai skirtingai (1 pav.). Priklausomai nuo lašo dydžio, vėjo krypties, greičio, lietaus lašo trajektorijos bei kitų faktorių tam tikra lašo dalis gali nutikėti nuo paviršiaus ( $V_{\text{splash}}$ ), dėl paviršiaus įtempio prilipti prie sienos paviršiaus ir ten užsilaikyti ( $V_{\text{adh}}$ ), nutekėti žemyn fasadu ( $V_{\text{runoff}}$ ), išgaruoti ( $V_{\text{evap}}$ ) arba įsigerti į apdailinę medžiagą ( $V_{\text{abs}}$ ) [1]. Kuriant vertikalią lietaus vandens surinkimo sistemą, reikia įvertinti visus galimus variantus ir stengtis surinkti maksimalų šių dedamųjų kiekį. Šio tyrimo metu kelios lietaus elgsenos dedamosios bus minimalios, dėl parinktos sistemos konstrukcijos ir nebus vertinamos. Pagrindinės, didžiausią įtaką darančios dedamosios bus: nutiškęs vanduo ( $V_{\text{splash}}$ ) bei vanduo nutekėjęs plokštės paviršiumi ( $V_{\text{runoff}}$ ).



1 pav. Galimi lašo atsimušimo į sieną variantai [1]

Dar vienas svarbus vandens elgsenos aspektas yra paviršiaus įtempis. Dėl šios savybės, vanduo tekėdamas nelygiu paviršiumi gali elgtis, kiek neprognuotai. Kadangi vertikaloje lietaus vandens surinkimo sistemoje numatyta naudoti kirstai tempto metalo plokštes, kurių paviršius nėra lygus, svarbu įvertinti, kaip ir kodėl ant jos paviršiaus elgiasi nutekantis vanduo ( $V_{\text{runoff}}$ ). Antrame paveikslėlyje pateikti galimi vandens tekėjimo laiptuotu paviršiumi variantai [1]. A atveju, esant mažam vandens srautui, susidariusi vandens tėkmė nesugeba įveikti paviršiaus įtempio ir lieka prigludusi prie paviršiaus, nepaisant kintančio jo kampo. B atveju pateikiamas didesnio tėkmės srauto pavyzdys, kuomet tekantis vanduo dar nesugeba įveikti paviršiaus įtempio jėgų ties kampu, bet dėl didesnio vandens kiekio ant horizontalios paviršiaus dalies susiformuoja lašai, kurie atitrūksta nuo paviršiaus. C atveju, esant dideliame srautui, vandens inercija yra pakankamai didelė, kad įveiktų paviršiaus įtempį ir atitrūktų nuo paviršiaus ties kampu. Tik maža vandens dalis, dėl prarastos energijos lieka prilipusi prie paviršiaus. Šiuos atvejus galime prilyginti silpnam, vidutiniam ir stipriam lietaui.



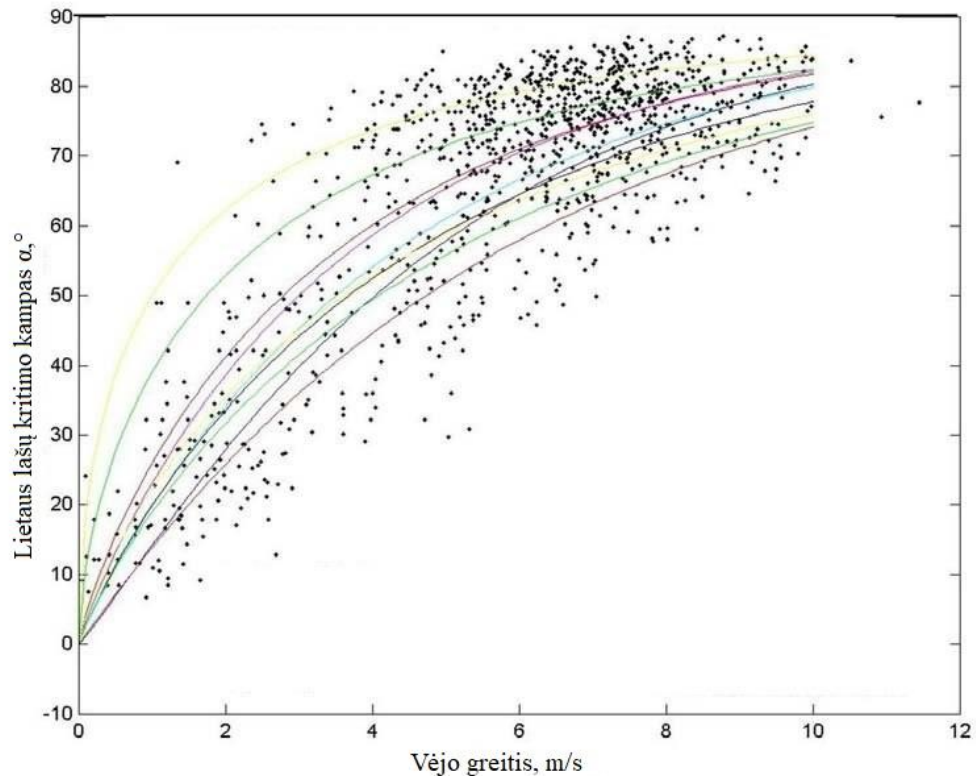


2 pav. Vandens tėkmė nelygiais paviršiais esant skirtingam vandens srautui [1]

#### 1.4. Vėjo įtaka ir lietaus lašų pasiskirstymas ant fasadų

Vėjas yra vienas svarbiausių lietų įtakojančių veiksnių. Jis įtakoja lietaus kryptį, kritimo kampą, greitį, trajektoriją bei kitus aspektus. Galime daryti prielaidą, kad tai stipriai įtakos vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos veikimo efektyvumą.

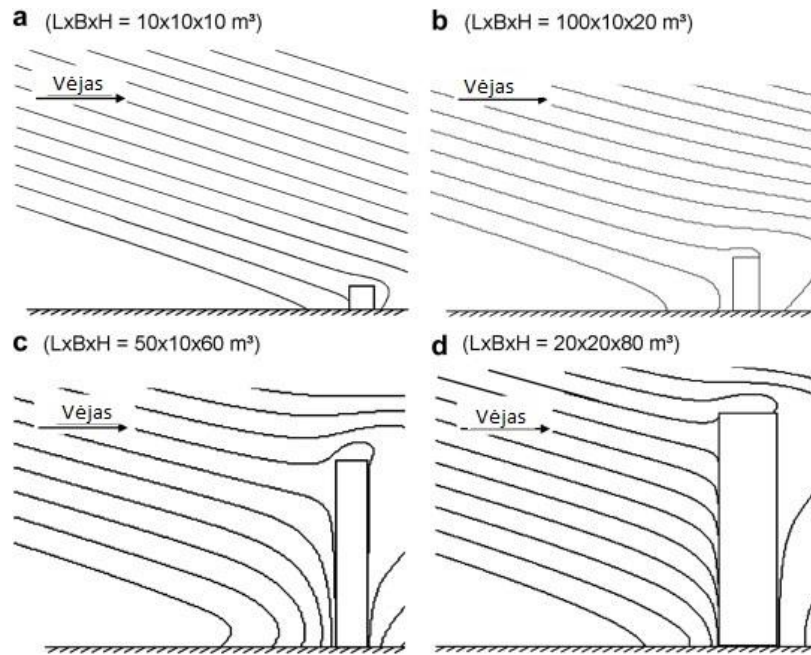
Lietaus lašai niekada nekrinta visiškai vertikaliai. Dėl aplinkos poveikio jie visada krenta tam tikru kampu. Būtent dėl to, lietaus lašai ir atsitrenkia į pastatų fasadus ir kitus vertikalius paviršius. Pagrindinis veiksnys lemiantis šį kritimo kampą yra vėjas, tačiau lietaus lašų dydis bei lietaus intensyvumas taip pat turi įtakos. Viename Pietų Amerikoje atliktame tyrime nustatyta, kaip vėjo greitis įtakoja lietaus kritimo kampą, kokia priklausomybė tarp šių dviejų dydžių [5]. Šio tyrimo priklausomybės grafikas pateiktas 3 paveikslėlyje. Šiame grafike spalvotos linijos žymi skirtingas regresijos linijas, skirtas tam tikriems lietaus intensyvumams. Šis intensyvumas svyruoja nuo 0.3mm/h iki 4mm/h. Straipsnyje, taip pat pateikti visų priklausomybių determinacijos koeficientai. Iš jų galima pastebėti, kad lyjant silpnam lietaui, lietaus lašų kritimo kampas nėra toks pastovus ir nuspėjamas lyginant su tais atvejais, kai lietus yra stiprus. Esant labai silpnam lietaui determinacijos koeficientas svyruoja nuo 0,309 iki 0,473, o tai rodo silpną priklausomybę. Tuo tarpu, kai lyja stipresnis lietus šis rodiklis siekia 0,892 ir rodo stiprią priklausomybę.



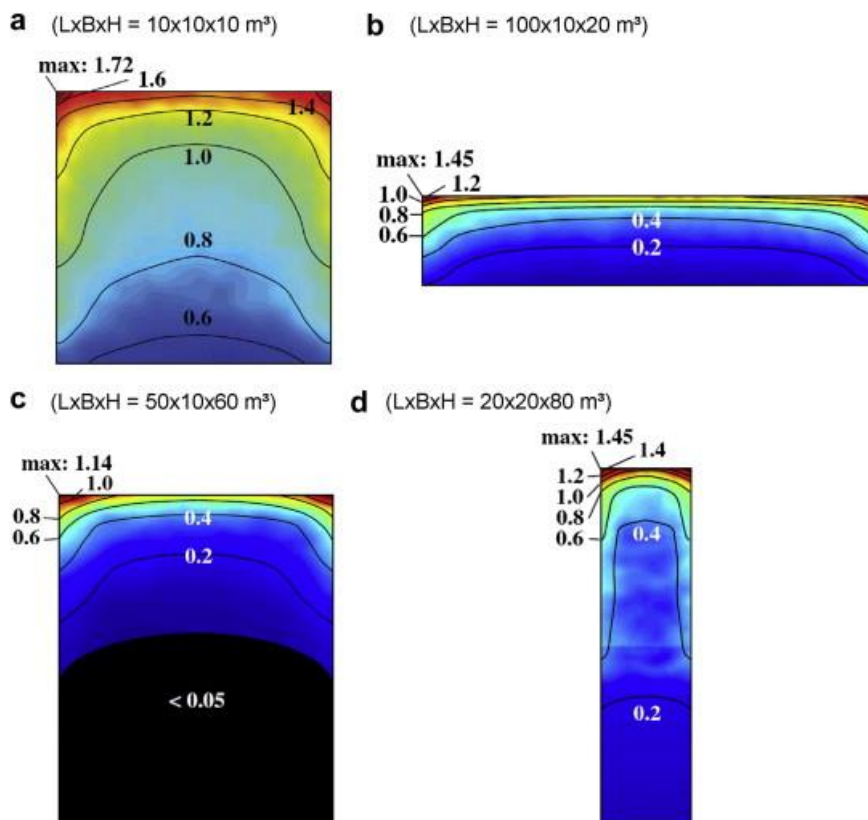
**3 pav.** Lietaus lašų priklausomybė nuo vėjo greičio esant skirtingam lietaus intensyvumui [5]

Dar vienas vėjo įtakojamas aspektas yra lietaus kryptis. Dėl vėjo lietus gali lyti iš bet kokios krypties: Šiaurės, Rytų, Vakarų ar Pietų. To pasekoje ant skirtingai orientuotų fasadų gali nukristi labai skirtingas lietaus kiekis. Galime daryti prielaidą, kad vyraujančio vėjo kryptimi atsuktas fasadas surinks žymiai daugiau vandens, nei fasadas atsuktas ta kryptimi iš kurios pučiant vėjui lyja rečiausiai.

Svarbus ir lietaus lašų dydis. Kuo jie mažesni, tuo jie labiau pasiduoda nešami vėjo srautų. Jei lašai yra pakankamai maži jų trajektorijos įprastai susilygina su vėjo trajektorija. Maži lašai ( $\varnothing \sim 1$  mm) gali būti labai stipriai paveikti turbulencijos susidarančios aplink pastatus ir ant jo nukristi sudėtingomis ir sunkiai prognozuojamomis trajektorijomis. Šiuos aspektus 2006 metais ištyrinėjo Olandų mokslininkai [6]. Jie pateikia 1mm skersmens lietaus lašų kritimo trajektorijas, kai vėjo greitis – 10 m/s. Tyrimo metu buvo keičiama pastato forma. Taip gaunami rezultatai puikiai tinka prognozuoti lietaus lašų elgseną aplink įvairios formos pastatus. Gauti rezultatai pateikiami 4 paveikslėlyje. Taip pat pateikiamas ir grafikas, kuriame galime matyti ant kurių pastatų dalių nukrenta daugiausiai lašų esant anksčiau aprašytoms sąlygoms – 5 paveikslėlis. Šie rezultatai gauti naudojant CFD modeliavimą.



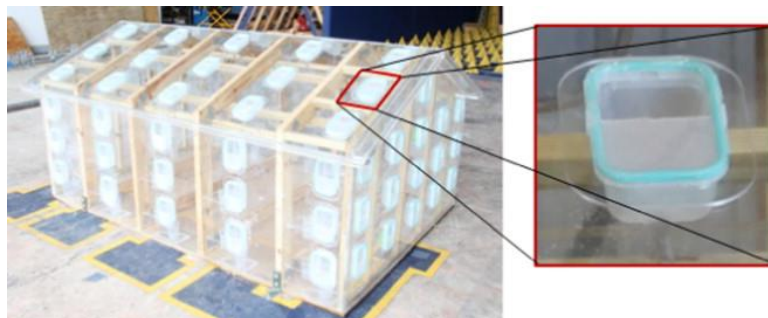
**4 pav.** Lietaus lašų(1mm) trajektorijos esant 10m/s vėjui. a-d - skirtingi pastatų dydžiai [6]



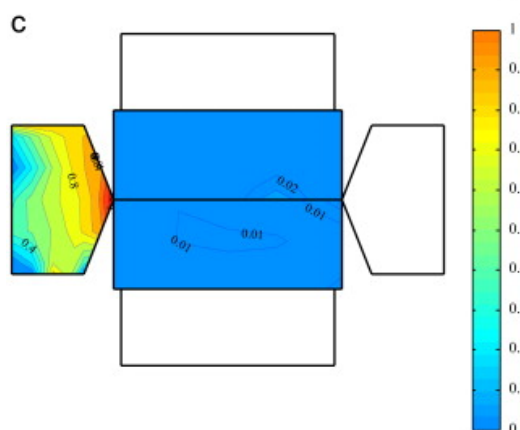
**5 pav.** Lietaus lašų pasiskirstymas ant skirtingų proporcijų pastatų fasadų atsuktų vėjo kryptimi. a-d - skirtingi pastatų dydžiai [6]

Lietaus lašų pasiskirstymo ant fasado tyrimus atliko ir kiti mokslininkai [7]. Šiuo atveju naudojamas ne CFD modeliavimas, bet vėjo tunelis. Bandymai buvo atliekami naudojant sumažintą pastato modelį pavaizduotą 6 paveikslėlyje. Šis modelis patalpintas vėjo tunelyje, o ant modelio

sumontuotos specialios talpos vandeniui surinkti. Namo forma priešingai nei ankstesniuose bandymuose atitinka individualų gyvenamąjį namą, o ne daugiabutį ar kitą didelių gabaritų pastatą. Namas vėjo tunelyje sumontuotas išilgai tunelio ašiai. Tyrimo rezultatai pateikti 7 paveikslėlyje. Iš iliustracijos matoma, kad daugiausiai lietaus nukrinta ant vėjo kryptimi atsukto pastato fasado. Nepaisant pastato formos skirtumų, rezultatai tarp šio ir anksčiau analizuoto šaltinio panašūs. Daugiausiai lietaus nukrenta, ties aukščiausiomis pastato dalimis, ypač kampais.



6 pav. Pastato modelis naudojamas tyrimams [7]

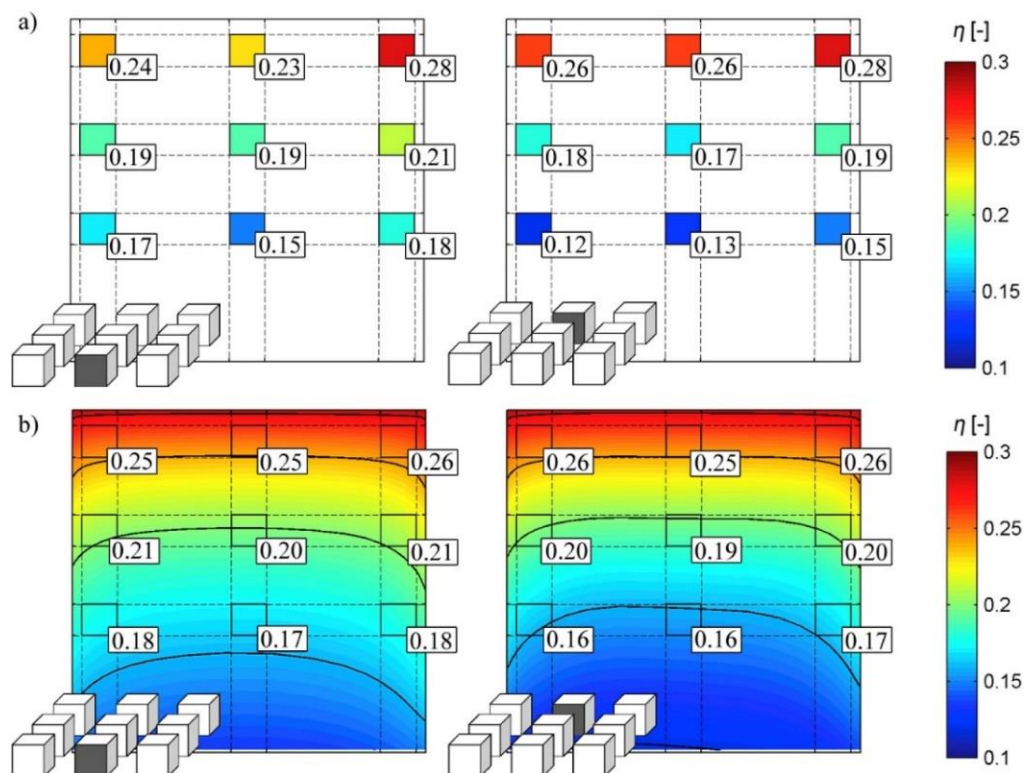


7 pav. Lietaus kiekio pasiskirstymas ant fasado ir stogo [7]

#### 1.4.1. CFD modeliavimas ir jo patikimumas

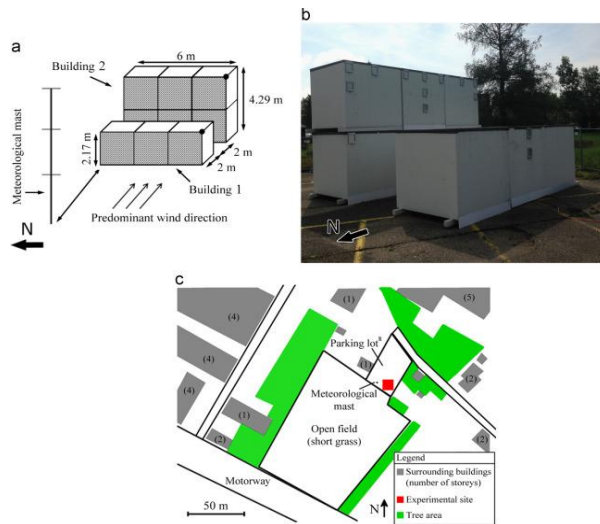
Anksčiau išanalizuoti tyrimai įrodo, kad vėjas yra vienas esminių veiksnių lemiančių lietaus pasiskirstymą ant fasadų. Dėl jo lietus ant vertikalinių paviršių pasiskirsto labai netolygiai, o skirtumas tarp didžiausių ir mažiausių lietaus kiekį gaunančių fasado dalių gali būti net keliolika kartų. Jis taip pat lemia: greitį, trajektoriją, lašų formą ir t.t. Vėjo įtaką lietaus gali būti iširti naudojantis CFD modeliavimo programomis. Italijos mokslininkai bandė įvertinti tokias galimybes [8]. Šių modelių tikslumas buvo vertinamas pagal tai, kaip jų rezultatai sutapo su tais, kurie buvo gauti realiomis sąlygomis. Rezultatų palyginimas pateiktas 8 paveikslėlyje. Paveikslėlyje matoma, kad abu rezultatai labai panašūs ir paklaida dažniausiai svyruoja 5%-10% ribose. Šio modeliavimo pagalba, galima prognozuoti ne tik kur nukris daugiausia lietaus, bet ir kokie vėjo greičiai susidaro

aplink pastatą, kaip lietus elgiasi esant skirtingam vėjo greičiui. Turint tokio modeliavimo rezultatus būtų galima parinkti optimaliausią vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos montavimo vietą. Tačiau pagrindinė šio tyrimo užduotis buvo nepatikrinti tokio modelio patikimumą, bet iškelti 10 klausimų, į kuriuos reikia atsižvelgti planuojant atlikti panašų modeliavimą. Svarbiausi klausimai yra apie pastatą supančius kitus statinius, reljefą, pastato formą, vėjo turbulentiškumą, paviršių glotnumą ir t.t. Norint sukurti tinkamą modelį, jį reikia gerai apgalvoti ir laikytis rekomendacijų.



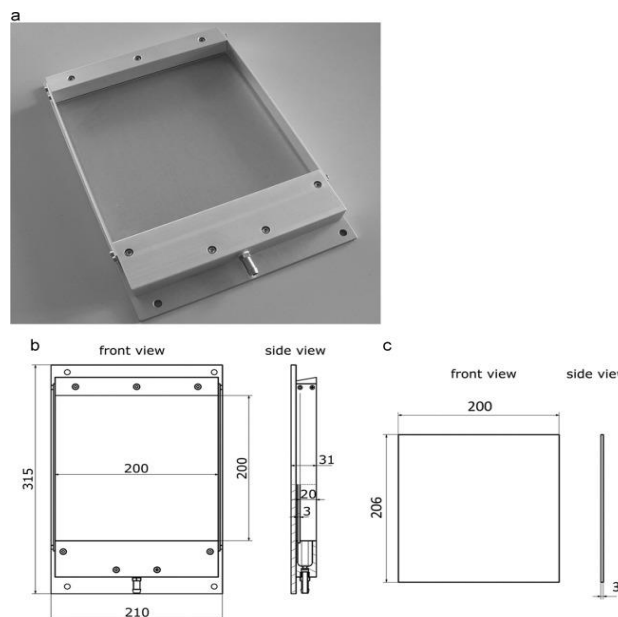
**8 pav.** Palyginimas tarp a)eksperimentinio tyrimo ir b)CFD modeliavimo rezultatų. Kubų dydis 2m x 2m x 2m. Bandymai atlieka dviem skirtingiems kubams [8]

Labai panašia tematika tyrimai buvo atlikti Šveicarijoje, 2015 metais [9]. Šių tyrimų tikslas patikrinti skaitinių metodų tikslumą. Modeliavimo metu gauti rezultatai lyginami su realiomis sąlygomis gautais duomenimis. Pastatų matmenys, bei teritorijos planas pateiktas 9 pav. Naudojami du greta esantys laikinai pastatyti pastatai su skirtingais aukščiais. Šio bandymo metu buvo matuojamas vėjo greitis, kryptis, oro temperatūra, kritulių kiekis.



9 pav. (a) tiriamų pastatų geometrija. (b) pastatų nuotrauka. (c) Teritorijos planas [9]

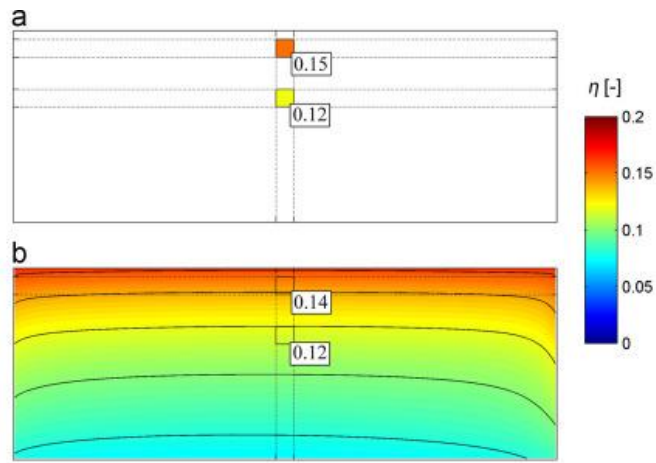
Ant fasadų montuojami specialūs vandenį surenkantys įrenginiai. Efektyvusis jų plotas 0,2 m x 0,2 m. Šių įrenginių nuotraukos pateiktos 10 paveikslėlyje. Įrenginiai išdėstomi ant tam tikrų fasado vietų, o vanduo nuvedamas į talpas kuriose matuojamas vandens lygis. Duomenys išsaugomi. Siekiant maksimalaus tikslumo buvo matuojami tik tie atvejai, kai lietaus intensyvumas viršijo 2mm/h.



10 pav. Lietaus vandens kiekio ant fasado matavimo įrenginys: a) nuotrauka; b) schema; [9]

Analogiškai realių duomenų kaupimui, buvo vykdomas CFD modeliavimas. Pastatai buvo sumodeliuoti CFD programinės įrangos aplinkoje. Atitinkamai suvesti reikiami parametrai. Skaičiavimai atliekami atviro kodo programa „OpenFOAM“. Gauti rezultatai sulyginami su realiai gautais vandens kiekiais (11 pav.). Bandymai atlikti dviem skirtingoms liūtims. Vidutinė paklaida: 6.9%.



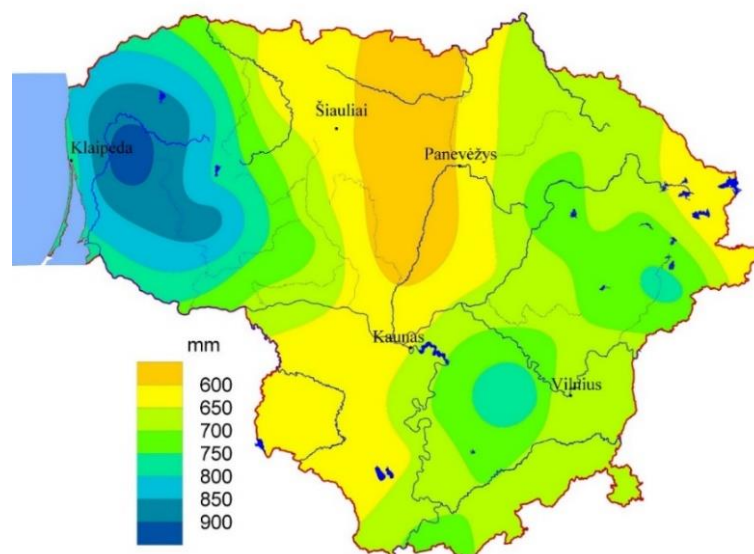


**11 pav.** Palyginimas tarp (a) realiomis sąlygomis išmatuotų dydžių ir (b) CFD rezultatų [9]

Taigi daugeliu atveju CFD analizė yra puikus būdas prognozuoti vėjo įtaką lietui, jo pasiskirstymui ant fasadų, bei surenkamam jo kiekiui. Tačiau, norint pasiekti patikimų rezultatų, reikia naudoti patikrintą modeliavimo metodiką.

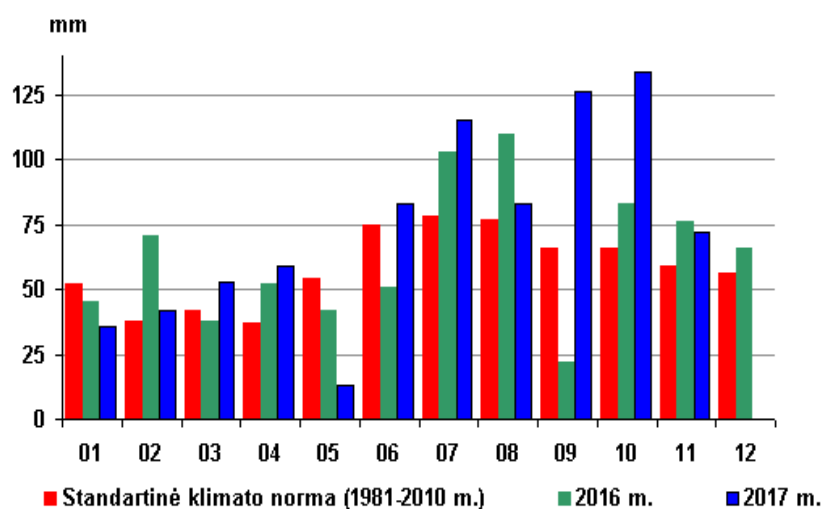
### 1.5. Meteorologiniai duomenys

Atliekant vėjo įtakos tyrimus, svarbu išanalizuoti ir meteorologinius duomenis. Remiantis Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenis pirmiausia atliekama kritulių analizė. 12 paveikslėlyje pateikiamas vidutinis metinis kritulių kiekis milimetrais Lietuvoje [10]. Galima pastebėti, kad Kaunas patenka į vidutinę zoną, kur iškrenta apie 650 mm lietaus kiekvienais metais. Klaipėdos regione per metus gali iškristi net apie 900 mm lietaus. Tačiau yra regionų, kuriuose lietaus kiekis nesiekia net 600 mm. Tolimesniuose tyrimuose priimta, kad tiriamas pastatas stovi Kaune, vidutinio lietingumo regione.



**12 pav.** Vidutinis metinis kritulių kiekis Lietuvoje, mm [10]

13 pav. pateiktoje diagramoje matoma, kad Lietuvoje kritulių kiekis yra mažiausias žiemos ir pavasario mėnesiais, o vasarą ir rudenį iškrenta daugiausiai kritulių. Šiame darbe buvo vertinama tik balandžio – spalio mėnesių duomenys, nes šis laikotarpis yra laikomas drėgnuoju, likusį metų laiką lietu dažnai pakeičia sniegas. Įprastai daugiausia kritulių iškrenta vasaros mėnesiais arba ankstyvą rudenį. Taip yra, dėl gausaus trumpalaikio lietaus, vyraujančių škvalų, audrų. Kritulių kiekis šiais mėnesiais gali viršyti net 100 mm.



13 pav. Vidutinis kritulių kiekis Lietuvoje 1981–2010, 2016 ir 2017 m., mm [10]

Tyrimuose taip pat buvo naudojami ir ilgamečiai meteorologiniai duomenys. Juos galima rasti leidinyje „Statybinė klimatologija“ [11]. Nors šis leidinys senas, jame pateikti duomenys buvo sukaupti per labai ilgą laikotarpį, todėl tai puikus šaltinis norint gauti ilgametes vidutines reikšmes. Iš šio leidinio naudojamos vidutinės vėjo greičio ir kritulių kiekio reikšmės. Taip pat atsižvelgiama į vyraujančias vėjo kryptis.

## 1.6. Estetinis vaizdas ir architektūrinės idėjos

Kadangi vertikali vandens surinkimo sistema būtų montuojama ant pastato fasadų labai svarbu ir architektūrinė jo idėja, kuriama estetika. Architektė Victoria Angelina Juliana Hammel [12], bandė išspręsti šią problemą. Ji pasirinko žaismingą atvirų vandens rinktuvų formą. Šie rinktuvai pagaminti iš skaidrių medžiagų, kad tekėdamas vanduo sukurtų kuo didesnę įspūdį aplinkiniams žmonėms ir aiškiai pavaizduotų tokio fasado pobūdį ir praktinę reikšmę. 14 paveiksle pateikiama minėtų vandens rinktuvų vizualizacija. Tokio fasado tikslas, ne tik surinkti lietaus vandenį, bet ir priversti žmones susimastyti apie jų vandens vartojimo įpročius. Tačiau tokia sistema turi tam tikrų techninių trūkumų, todėl, realus projektas naudojantis tokį fasadą iki šiol nėra sukurtas.





**14 pav.** Architektės siūlomas fasado vizualinis sprendimas [12]

Šiame darbe atliekamiems tyrimams buvo nuspręsta naudoti jau dabar plačiai naudojamas architektūrinės plokštės pagamintas iš metalo, o ne kurti naują produktą. Šios, kirstai tempto metalo, plokštės labai populiarios modernaus, minimalistinio stiliaus pastatuose. Plačiai naudojamos, kaip fasado akcentai arba, kaip pagrindinė apdailos medžiaga. Vienas pavyzdžių yra komercinės paskirties pastatas esantis adresu Karaliaus Mindaugo pr. 18, Kaunas [13]. Visi šio pastato fasadai padengti kirstai temptu antracito spalvos tinklu (15 pav.). Būtent ši medžiaga ir buvo naudojama atliekant tolimesnius tyrimus. Tokios plokštės naudojimą, taip pat lemia ir tai, jog anksčiau atlikti plokščių vandens pralaidumo bandymai rodo, kad tokio tipo plokštė yra pati efektyviausia [14].



**15 pav.** Pastatas dengtas kirstai temptu metalu – Kaunas [13]

## 1.7. Lietaus vandens panaudojimo galimybės

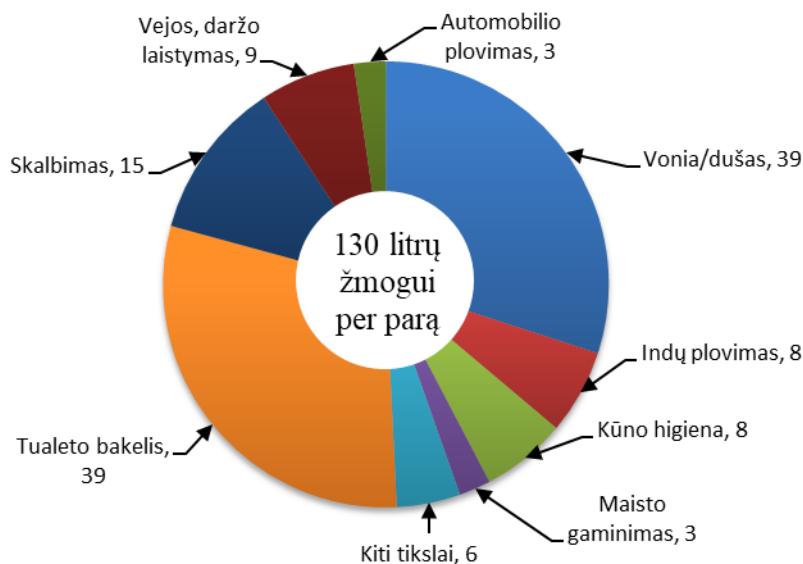
Vertikalaus tipo lietaus vandens surinkimo sistema neturėtų prasmės, jei nežinotume surenkamo vandens kokybės ir jo panaudojimo galimybių. Viena, Ispanijos mokslininkų grupė, ištyrė ne tik lietaus vandens miestuose kiekį, bet ir jo kokybę [15]. Tai labai svarbus aspektas, nes

neįvertinus vandens kokybės nebus galima jo racionaliai panaudoti, o esant reikalui nežinosime, kaip jį išvalyti. Šio tyrimo tikslas, ištirti, kaip įvairūs, urbanizuotose teritorijose dažnai sutinkami paviršiai, įtakoja lietaus vandens kokybę. Tyrimų rezultatai rodo, kad geriausią kokybę turi vanduo nutekėjęs per betoninius paviršius arba kitus lygius ir mažą įgeriamumą turinčius paviršius, pvz: metalas. Kadangi šis tyrimas, atliktas ant horizontalių paviršių, kur nusėda daug dulkių ir nešvarumų, gauto vandens kokybė nebuvo tinkama žmonių vartojimui. Tačiau svarbu pabrėžti, kad lyginant jo kokybę su miesto nuotekų tinklu tekančiu lietaus vandeniu, jis yra kelis kartus švaresnis, todėl jo išvalymas yra paprastesnis ir pigesnis. Galima daryti prielaidą, kad vertikalūs paviršiai yra švaresnis, o sąlyčio su jais laikas trumpesnis, todėl gaunama vandens kokybė turėtų būti dar geresnė.

Kiti atlikti tyrimai aiškina tinkamiausius surinkto lietaus vandens panaudojimo būdus bei mikrobu keliamas grėsmes [16]. Tyrimai atlikti Australijoje, Kvinslande. Čia net 32% gyventojų surinkinėja lietaus vandenį, tai daro stogo lietaus vandens latakus nukreipdami į specialius vandens rezervuarus. 13.6% šių gyventojų surinktą vandenį naudoja net kaip geriamojo vandens šaltinį. Šis vanduo naudojamas ir daugeliui kitų tikslų: maisto gamybai, skalbimui, prausimuisi, baseinams, laistymui, automobilio plovimui, tualetams ir t.t. Nepaisant tokio plataus vandens naudojimo, tyrėjai nustatė, kad daugeliu atvejų vandenyje galima rasti įvairių patogenų ar kitų kenksmingų medžiagų. Todėl, padarytos išvados, kad lietaus vandens nerekomenduojama gerti, ypač vaikams ir gyventojams su silpnu imunitetu. Sodo laistymas ir rūbų skalbimui šis vanduo, taip pat nėra visiškai tinkamas. Tinkamiausias ir saugiausias būdas efektyviai panaudoti šį vandenį yra tualetų nuleidimas arba kiti panaudojimo būdai, kai lietaus vanduo neturi sąlyčio su žmonėmis.

Dar vienas tyrimas, atliktas Vietnamo mokslininkų, bandė išsiaiškinti lietaus vandens panaudojimo geriamajam vandeniui galimybes [17]. Tyrimai atlikti vienoje atokioje mokykloje, kurioje vanduo, surenkamas nuo stogo padengto lankstyto metalo danga. Surinkus lietaus vandenį buvo vertinama jo kokybė. Atlikus tyrimus nustatyta, kad vanduo atitinka visus vietinius reikalavimus keliamus geriamajam vandeniui išskyrus mikrobu kiekio vandenyje normą. Tačiau lyginant su kitais vandens šaltiniais, kaip šuliniai ar kiti savarankiškai žmonių įsirengti vandens šaltiniai, lietaus vanduo pasižymėjo geresne kokybe. Nors tirtame vandenyje buvo aptikta E.coli bakterijų, jų pašalinimas iš vandens yra paprastas ir pigus procesas. Būtinai, tik UV filtro įrengimas prieš vandens čiaupus, jeigu norima vandenį naudoti, kaip geriamą. Taigi turint švarią lietaus vandens surinkimo dangą, tinkamą vandens laikymui talpą, bei naudojant kitus įrenginius skirtus geriamajam vandeniui, nesunku užtikrinti pakankamą vandens kokybę. Šie pavyzdžiai parodo, kad lietaus vanduo, gali būti panaudojamas labai plačiai, tačiau kiekvienu atveju būtina atlikti vandens tyrimus, įrengti reikiamus filtrus ir naudoti kitas priemones norint lietaus vandenį panaudoti konkrečiam tikslui. Tačiau daliai tikslų, lietaus vanduo gali būti naudojamas be papildomo

filtravimo, pavyzdžiui tualetų neleidimui. Svarbu pabrėžti ir tai, kad nors lietaus vanduo ir neatitinka šiuolaikinių higienos normų, jo kokybė dažnai yra pakankamai gera, kad tikimybė nuo jo susirgti yra labai maža. Netinkamas vandens sandėliavimas ar į vandenį po surinkimo patekę teršalai paprastai kelia didesnę grėsmę.



**16 pav.** Vidutinis vandens suvartojimo pagal paskirtis, litrais [18]

Europoje yra atlikti skaičiavimai apytiksliai nusakantys, kiek ir kokiam tikslui vidutinis Europoje gyvenantis žmogus sunaudoja vandens [18] (16 pav.). Vienas gyventojas per dieną vidutiniškai sunaudoja 130 litrų vandens. Jis naudojamas įvairiems tikslams. Maždaug pusę šio vandens, būtų galima pakeisti vandeniu, kurio kokybė yra prastesnė nei geriamojo vandens, kuris yra tiekiamas iš miesto tinklų. Būtent šiems tikslams būtų galima išnaudoti lietaus vandenį. Remiantis šiuo šaltiniu [18] lietaus vanduo gali būti naudojamas: tualetų bakeliuose, automobilio plovimui, laistymui ar skalbimui. Atliekant šias funkcijas vanduo neturi galimybės ilgą laiką būti sąlytyje su žmogumi ir jam padaryti žalą.

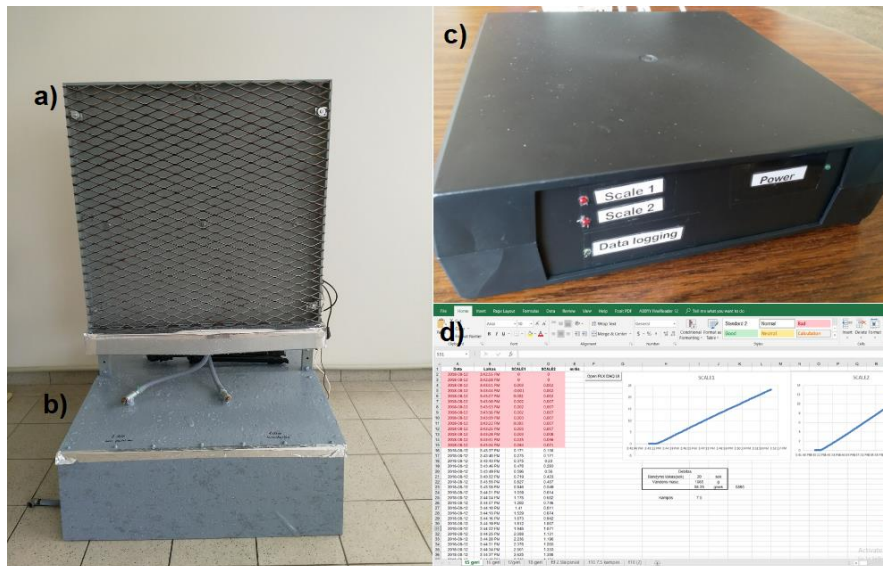
## 2. Tyrimų metodologija

Lietaus vandens nuo vertikalių paviršių (laidžių fasadų) kiekiui nustatyti buvo taikomi laboratoriniai bei CFD modeliavimo tyrimai. Gauti tyrimų duomenys buvo panaudoti realaus pastato fasadinės lietaus vandens susirinkimo sistemos teikiamos naudos efektyvumo skaičiavimams.

### 2.1. Laboratorinių tyrimų įranga

Laboratoriniams tyrimams atlikti buvo reikalingas specializuotas bandomasis stendas. Jis buvo suprojektuotas ir pagamintas atsižvelgiant į tyrimų pobūdį ir keliamus tikslus. Stendas turi visas reikiamas funkcijas leidžiančias lengvai kaupti ir analizuoti gautus surenkamo vandens kiekio rezultatus. Su juo tyrimus galima atlikti tiek laboratorijoje, tiek realiomis sąlygomis. Nesunkiai galima keisti reikiamus parametrus ar stendo konstrukciją, jo funkcionalumą.

Laboratorinių bandymų stendas susideda iš dviejų pagrindinių dalių: vertikalios vandens surinkimo sistemos bei automatizuoto valdymo bloko (pav. 17). Vandens išpurškimui naudojamas standartinis, apvalaus purškimo ploto, laistymo antgalis. Jo pozicija keičiama tarp bandymų serijų. Taip pat naudojama speciali programinė įranga.

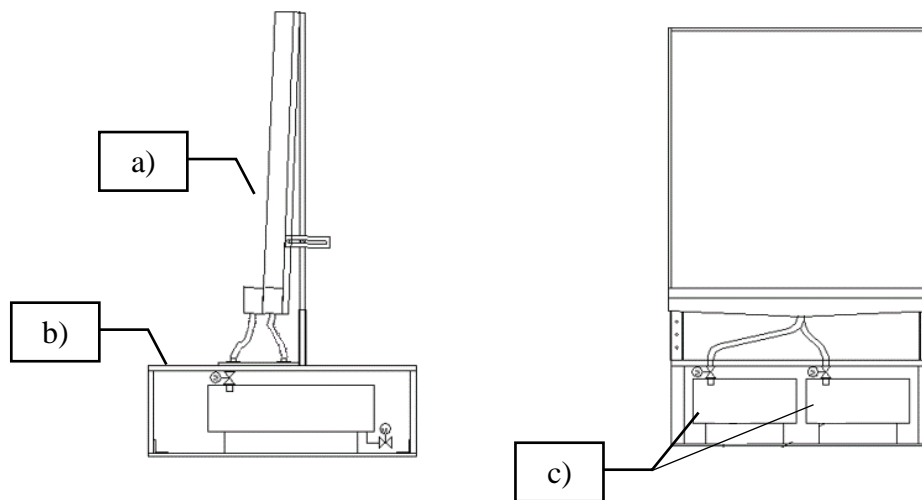


17 pav. a) Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos fragmentas; b) pagrindas su vandens talpomis ir svarstyklėmis; c) valdymo blokas; d) programinė įranga

#### 2.1.1. Vertikali lietaus vandens surinkimo sistema

Bandomojo stendo rėmas pagaminta iš 40 mm x 20 mm stačiakampių vamzdžių ir susideda iš dviejų dalių: vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos fragmento ir pagrindo.

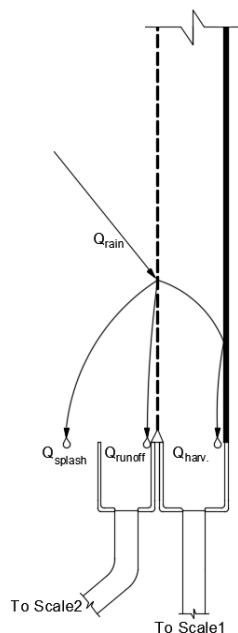
Pagrindinis apatinės stendo dalies tikslas – užtikrinti vertikalią, 1 m<sup>2</sup> paviršiaus plotą turinčios, vandens surinkimo dėžės stabilumą net esant stipriam vėjui. Pagrindė, taip pat sumontuota visa stendo elektronika, vandens kiekio sekimo sistema (18 pav.). Dėl to pagrindo dėžė hermetiška. Tai, ne tik apsaugo elektroniką, bet ir užtikrina, kad į vandens talpas nepatektų papildomas vanduo nesurinktas šios sistemos. Pagrindo dėžės išmatavimai 1000 mm x 970 mm x 300 mm. Dėžė padengta medžio drožlių plokštėmis, o apačia – cemento drožlių plokšte, visa apatinė stendo dalis, taip pat buvo padengta vandeniui atspariais dažais. Viršutinėje stovo dalyje sumontuoti du lizdai, skirti fasadinio elemento montavimui.



**18 pav.** a) Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos fragmentas; b) pagrindas su vandens talpomis ir svarstyklėmis; c) vandens talpos ant svarstyklių

Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos fragmentas imituoja tikrą pastato fasadą skirta lietaus vandens surinkimui. Ši stendo dalis susideda iš sandarios cemento drožlių dėžės, kurios priekinis paviršius uždengtas kirstai tempto metalo plokšte. Visa vandens surinkimo dėžė sumontuota, naudojant lankstus leidžiančius keisti paviršiaus kampą nuo 0° iki 7,5°. Dėžės gylis 60 mm. Dalis vandens, dėl plokštėje esančių skylučių patenka tiesiai į vandens surinkimo dėžę. Šis vanduo yra surenkamas vidiniu latakais ir žarna nuvedamas į stendo pagrindą kur yra kaupiamas talpoje nr.1, o jo svoris nuolat sekamas. Kita lietaus dalis atsitrenkia į uždaras plokštės vietas ir nurieda žemyn. Šis vanduo, surenkamas išoriniu latakais, kuris vandenį nukreipia į talpą nr.2. Bandomojo stendo vandens surinkimo dėžės pjūvis ir vandens lašų elgsena, pavaizduota 19 paveikslėlyje. Kadangi bandymai buvo atliekami tik su metaline architektūrine plokšte, o dėžės vidus neturi jokio vandens įgėrimo, tyrimuose nebuvo vertinamas įgeriamo vandens kiekis ( $V_{abs}$ ). Šis dydis svarbus tik daug vandens įgeriančioms, atvirų porų medžiagoms. Dėl ant paviršiaus esančių ertmių, vandens kiekis užsilaikantis ant jo ( $V_{adh}$ ), taip pat nebuvo vertinamas. Ant plokštės greitai ir dideliu intensyvumu patenkantis vanduo ją greitai atvėsina, to pasekoje daroma prielaida,


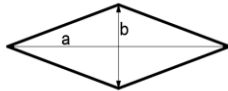
kad vandens nuostoliai dėl išgaravimo ( $V_{\text{evap}}$ ) buvo minimalūs. Dvi pagrindinės lietaus dedamosios, svarbios šiems tyrimams buvo nutiškęs lietaus vandens kiekis ( $V_{\text{splash}}$ ) ir vandens kiekis nutekėjęs plokštės paviršiumi ( $V_{\text{runoff}}$ ).



**19 pav.** Lietaus vandens surinkimo dėžės pjūvis ir lietaus lašų elgsena. Čia:  $Q_{\text{rain}}$  – visas lietaus kiekis;  $Q_{\text{harv}}$  – surinkto lietaus kiekis;  $Q_{\text{runoff}}$  – lietaus kiekis nutekėjęs plokštės paviršiumi;  $Q_{\text{splash}}$  – lietaus kiekis nutiškęs nuo plokštės

Dėl plokštės populiarumo architektūroje, bei ankstesnių tyrimų rezultatų [14] visi tyrimai, buvo atliekami su kirstai tempto metalo plokšte. Tokios plokštės naudojimas įrodo, kad vertikali lietaus vandens surinkimo sistema gali būti plačiai naudojama įvairaus tipo ir stiliaus pastatuose. Visi plokštės parametrai pateikiami 2.1 lent.

**2.1 lentelė.** Fasadinės, kirstai tempto metalo plokštės parametrai

Nuotrauka	
Plokštės tipas	Kirstai temptas plienas
Skylučių schema	
Skylučių parametrai	$a = 100\text{mm}$ ; $b = 34\text{mm}$
Bendras plokštės plotas, $\text{m}^2$	1,0
Skylučių plotas, $\text{m}^2$	0,659
Skylučių procentas, nuo viso plokštės ploto, %	65,9

Vanduo laboratorinių tyrimų metu ant stendo buvo purškiamas per vietoje įtvirtintą laistymo antgalį. Antgalis buvo sumontuotas ant reguliuojamo trikojo, tai leido lengvai keisti lietaus kritimo

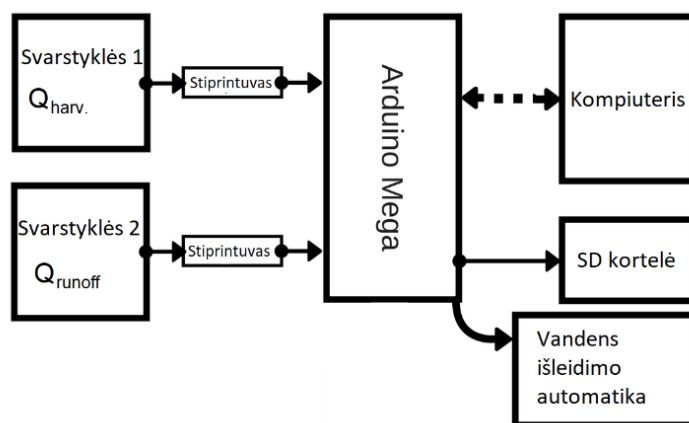


kampą, kryptį ir pasiskirstymą. Vandens purškimo antgalis buvo prijungtas prie miesto tinklų. Antgalio reguliavimo sklendė kiekvienos eksperimentų serijos metu, buvo paliekama toje pačioje padėtyje. Bandymų metu vandens srautas ir jo išjungimas buvo valdomas tik pagrindiniu čiaupu. Taip buvo užtikrinamas stabilus vandens debitas.

Kaip vandens talpos, panaudotos dvi plastikinės, 25 litrų talpos, dėžės. Apatinėje jų dalyje sumontuotos specialios jungtys leidžiančios iš jų išleisti vandenį. Taip pat, sumontuota vandens išleidimo automatika. Viršutinėje dalyje sumontuotos vandens persipylimo angos.

### 2.1.2. Valdymo blokas ir kita elektronika

Valdymo blokas, kaip ir likusi stendo dalis buvo suprojektuota ir pagaminta būtent šiems tyrimams. Jam naudojami plačiai prieinami komponentai: „Arduino“ valdiklis, įvairūs jutikliai, praplėtimo plokštės, bei kiti elektronikos komponentai. Principinė valdymo bloko schema pateikta 20 paveikslėlyje. Sistema naudoja 2 nepriklausomas svarstyklės, kurios nuolat seka surinkto vandens kiekį. Ant svarstyklių nr.1 sumontuota pirma talpa, kaupianti surinktą lietaus vandenį. Antros svarstyklės seka talpos nr.2 masę, tai yra vandens nutekėjusio fasado paviršiumi kiekį.



20 pav. Valdymo bloko principinė schema

Abi svarstyklės buvo pagamintos iš tokių pat komponentų. Kaip pagrindas jų konstrukcijai panaudotos modulinės, metalinės plokštelės sutvirtintos varžtais. Masę matuoja apkrovos davikliai. Kiekvienas svorio daviklis, gali matuoti masę iki 10 kg ribos, dėl to svarstyklėse nr.1 sumontuoti keturi tokie davikliai, antrose – trys. Dėl atsirandančių deformacijų, kinta daviklio varža, matuodami šį pokytį, galime nustatyti, kokią apkrovą patiria daviklis. Tačiau šie pokyčiai yra labai minimalūs, dėl to naudojami specialūs signalo stiprintuvai padidinantys signalo stiprumą iki tokio, kurį gali išmatuoti naudojamas valdiklis. Arduino valdiklis varžos reikšmes konvertuoja į masę ir šiuos duomenis kaupia, bei perduoda kompiuteriui. Svorio daviklių techninės specifikacijos pateikiamos 2.2 lent.

**2.2 lentelė.** Svorio daviklių specifikacija

<b>Parametras</b>	<b>Reikšmė ir matavimo dydis</b>
Leistina maksimali apkrova	10 kg
Saugi apkrova	12 kg
Apkrova paliekanti negrižtamą žalą	15 kg
Visuminė paklaida	±0,05% (Esant maksimaliai apkrovai)
Nelinijškumas	±0,05% (Esant maksimaliai apkrovai)
Kartotinumų paklaida	±0,03% (Esant maksimaliai apkrovai)
Paklaida, dėl ilgalaikių apkrovų	±0,05% (Esant maksimaliai apkrovai)

Visi svorio davikliai yra identiški, bet dėl labai mažų skirtumų atsirandančių gamybos proceso metu, visus daviklius reikia sukalibruoti. Tai padaroma naudojant specialų programinės įrangos kodą. Po kalibravimo, buvo atlikti testai su žinomos masės svoriais. Svarstyklių paklaida siekė iki 2 %.

Visas duomenų apdorojimas ir kaupimas buvo vykdomas naudojant Arduino Mega mikrovaldiklį. Tai atvirojo kodo valdiklis, leidžiantis naudoti didelę gama įvairių jutiklių, bei kitų komponentų, juos sujungti į visumą ir užprogramuoti taip, kad jie atliktų norimus veiksmus.

Laboratorinių bandymų metu, visi gaunami duomenys, turėjo būti perduoti tiesiai į kompiuterį. Dėl to per „Serial-port“ jungtį prie kompiuterio buvo prijungtas valdymo blokas, naudojama „Arduino Ide“ programinė įranga. Norint greitai ir patikimai išsaugoti duomenis, o ne tik juos stebėti buvo panaudota papildoma programinė įranga „PLX-DAQ“, kuri realiu laiku duomenis perkeldavo tiesiai į „MS Excel“ programą, kur duomenys buvo sekami ir apdorjami. Buvo sekamas abiejų vandens talpų svorio kitimas laike. Valdymo bloke, taip pat sumontuota SD kortelės praplėtimo plokštė, leidžianti duomenis kaupti pačiame valdymo bloke, be papildomai prijungto kompiuterio. Ši funkcija, buvo naudojama, kaip atsarginė duomenų kopija eksperimentų laboratorijoje metu. Taip pat, daliai eksperimentų sumontuota automatinė vandens išleidimo sistema, kuri priklausomai nuo vandens kiekio talpose atidaro ir uždaro vandens išleidimo sklendes. Norint užtikrinti duomenų patikimumą, taip pat naudojamas realaus laiko laikrodis(RTC). Jo paskirtis sekti laiką. RTC pasižymi tuo, kad dėl jame sumontuotos papildomos baterijos, ši plokštė net praradus pagrindinį elektros tiekimą, laiką seka toliau.

## **2.2. Kita įranga naudojama tyrimams**

Atliekant bandymus laboratorijoje, sistemos efektyvumo nustatymui reikia žinoti imituojamo lietaus vandens intensyvumą. Tai šių bandymų metu, buvo daroma dviem būdais: a) Dalies eksperimentų metu lietaus vandens intensyvumas, buvo nustatomas tiksliai žinant vandens debitą bei užtikrinant, kad visas išpurškiamas vanduo patenka ant bandomojo stendo; b) Likusiuose eksperimentuose lietaus intensyvumas matuojamas tiesiogiai.



Prie stendo montuojama profesionali meteorologinė stotelė „Davis Vantage Pro 2“. Svarbiausi jos sekami dydžiai yra lietaus intensyvumas bei bendras eksperimento metu išpurškštas vandens kiekis. Visi šie duomenys kaupiami ir tada naudojami nustatant sistemos efektyvumą. Iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos naudojami lietaus intensyvumo (mm/10min), vėjo krypties bei greičio duomenys. Analizuojami tik 2018 metų drėgnojo laikotarpio (Balandis-Lapkritis) duomenys.

## 2.3. Eksperimentų eiga

### 2.3.1. Tyrimai laboratorijoje

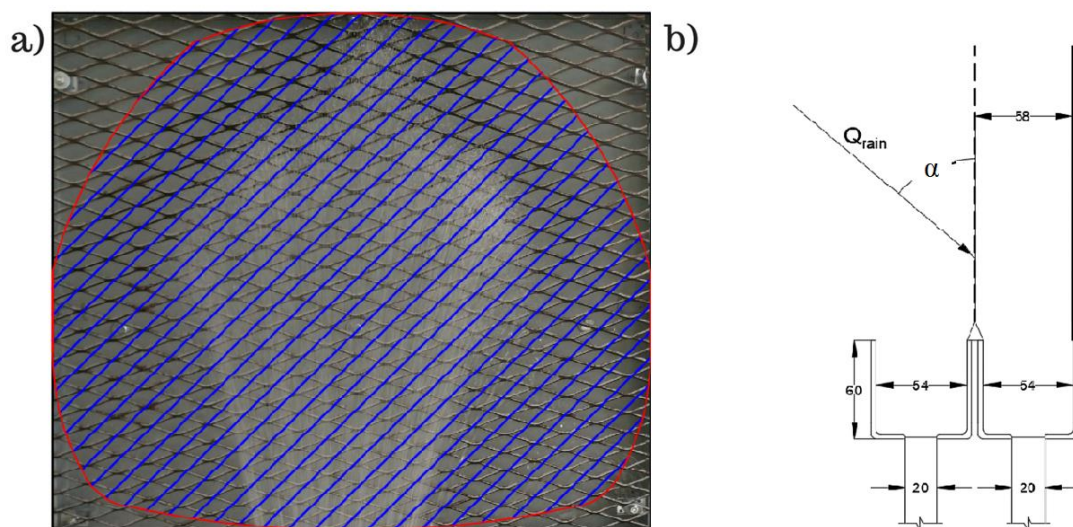


21 pav. Bandymo įrangos išdėstymas laboratorijoje

Bandymai laboratorijoje, buvo atlikti kontroliuojamomis sąlygomis, kur lengvai galima keisti reikiamus kintamuosius: vandens išpurškimo intensyvumo, bei jo kritimo kampą (21 pav.). Atliktos keturios bandymų serijos simuliuojančios keturis skirtingus vėjo greičius.

Kiekviena serija bandymų atliekama su pastoviu lietaus intensyvumu. Vandens purškimo antgalis kiekvieno eksperimento metu, buvo pastatytas taip, kad lietaus lašų kritimo kampas atitiktų reikiamą kampą. Tarp eksperimentų, buvo keičiama antgalio vieta, jo pakrypimo kampas. Lietaus lašų kritimo kampas nustatytas naudojant sulėtintus vaizdo įrašus, bei nuotraukas. Tyrimo metu bandomi keturi skirtingi lietaus lašų kritimo kampai  $\alpha$ . Kiekvieno kampu atveju, dėl vandens purškimo antgalio konstrukcijos, nevysi lašai krito tolygiai, todėl, išvestas apytikslis kampo  $\alpha$  vidurkis. Bandymo metu lietaus kontūras ant stendo pateiktas 22 paveikslėlyje. Plokštės plotas ant kurio lijo lietus:  $S_w = 0.76 \text{ m}^2$ . Purškiamo vandens intensyvumas ant plokštės paviršiaus buvo panašus visame plote, pastebėti tik minimalūs skirtumai.  $S_D = 0.24 \text{ m}^2$  – plotas ant kurio lietaus

lašai nekrito. Į tai atsižvelgiama atliekant skaičiavimus. Toks vandens pasiskirstymas, buvo tik pirmos ir antros eksperimentų serijos metu. Likusių eksperimentų metu, lietaus lašai tolygiai apėmė visą stendo paviršių.



22 pav. a) Imituojamo lietaus ant plokštės kontūrai; b) vandens lašų kritimo kampas  $\alpha$

Visi bandymai atlikti su visiškai vertikalia fasadine plokšte. Buvo atlikta 13 bandymų. Po kiekvieno eksperimento vandens talpos, buvo ištuštinamos, įranga perkraunama ir paruošiama naujam bandymui. Vandens kiekis talpose, buvo sekamas kas 1-5 sekundes. Visi duomenys kaupiami kompiuteryje, o tada analizuojami norint nustatyti sistemos efektyvumą.

Bandomasis stendas matavo 2 lietaus dedamąsias: surinktą lietaus vandenį ( $Q_{\text{harv.}}$ ) ir vandenį nutekėjusį plokštės paviršiumi ( $Q_{\text{runoff}}$ ) (pav.19). Trečioji dedamoji – nutiškęs lietaus vanduo ( $Q_{\text{splash}}$ ), buvo apskaičiuojamas. Visas išpurkšto vandens kiekis dalyje eksperimentų, buvo apskaičiuotas atliekant papildomą bandymą. Nustatytą laiko tarpą vanduo, buvo purškiamas tiesiai į vandens talpą, tada jis pasveriamas ir nustatomas debitas. Tiksliai žinant eksperimento trukmę, nustatomas visas ant stendo išpurkšto vandens kiekis. Likusių eksperimentų metu, ant stendo nukritusio lietaus kiekis apskaičiuojamas, naudojant meteorologinės stotelės duomenis. Žinant visą ant stendo iškritusio lietaus kiekį, į dėžės vidų patekusio lietaus kiekį ir vandens nutekėjusio paviršiumi kiekį, galima nustatyti sistemos efektyvumą ir kitus svarbius sistemos parametrus.

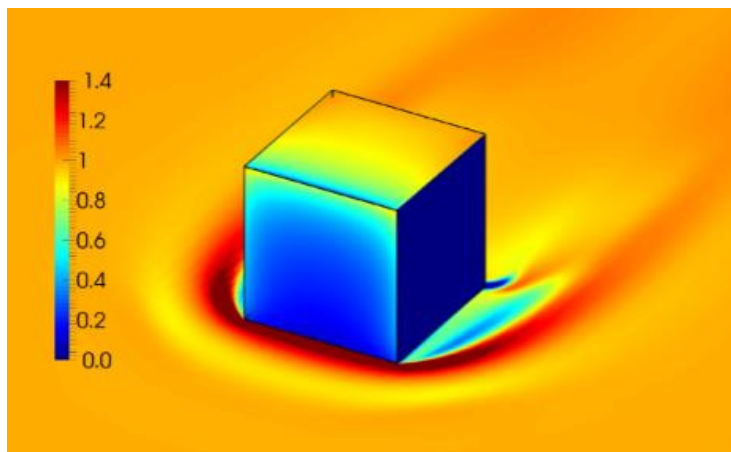
### 2.3.2. Bandymai realiomis sąlygomis

Realiomis sąlygomis stendas buvo sumontuotas ant pastato, esančio adresu Studentų g.54, Kaunas, stogo. Stende sumontuota meteorologinė stotelė, bei automatinė vandens išleidimo sistema. Stendo vandens surinkimo paviršius nukreiptas vyraujančio vėjo kryptimi. Šių tyrimų tikslas buvo patikrinti laboratorijoje gautus rezultatus su gautais realiomis sąlygomis. Tačiau, dėl

nepalankių oro sąlygų, mažo kritulių kiekio ir techninių nesklandumų nebuvo surinktas pakankamas duomenų kiekis, todėl jie šiame darbe toliau neanalizuojami.

## 2.4. CFD modeliavimas

Dar viena svarbi tyrimo dalis: CFD modeliavimas. Šios dalies tikslas išanalizuoti pastatų aerodinamiką, bei nustatyti, kaip lietus pasiskirsto ant pastato fasadų. Šiam tikslui, sukuriamas supaprastintas tiriamo pastato trimatis modelis. Sumodeliuojami kiti svarbūs objektai.



23 pav. Supaprastintas trimatis pastato modelis ir gaunamų rezultatų pavyzdys [20]

Modeliavimas atliekamas remiantis [6, 8, 9, 19] metodika. Tam naudojamas specialus vėjo veikiamo lietaus modeliavimui skirtas sprendimų variklis „windDrivenRainFOAM“ [20], jis buvo naudojamas ir minėtų straipsnių tyrimų metu. Rezultatai peržiūrėti ir grafiškai pateikiami „Paraview“ programine įranga. Pavyzdinis modeliavimo rezultatų grafikas pateiktas 23 paveikslėlyje.

Šio modeliavimo metu gaunamas ne konkretus lietaus kiekis nukrentantis ant tam tikro pastato paviršiaus, bet santykinis dydis  $\eta$  parodantis kokia viso lietaus dalis nukris ant tam tikros fasado dalies. Šis dydis leidžia lyginti skirtingas fasado vietas ir išrinkti tas ant kurių nukrenta daugiausia lietaus lašų.

$$\eta = \frac{Q_{fas}}{Q_{visas}}; \quad (2.1)$$

čia  $Q_{visas}$  - visas ant žemės nukritęs lietaus kiekis, mm;

$Q_{fas}$  - kritulių kiekis nukritęs ant tam tikros fasado dalies, mm.

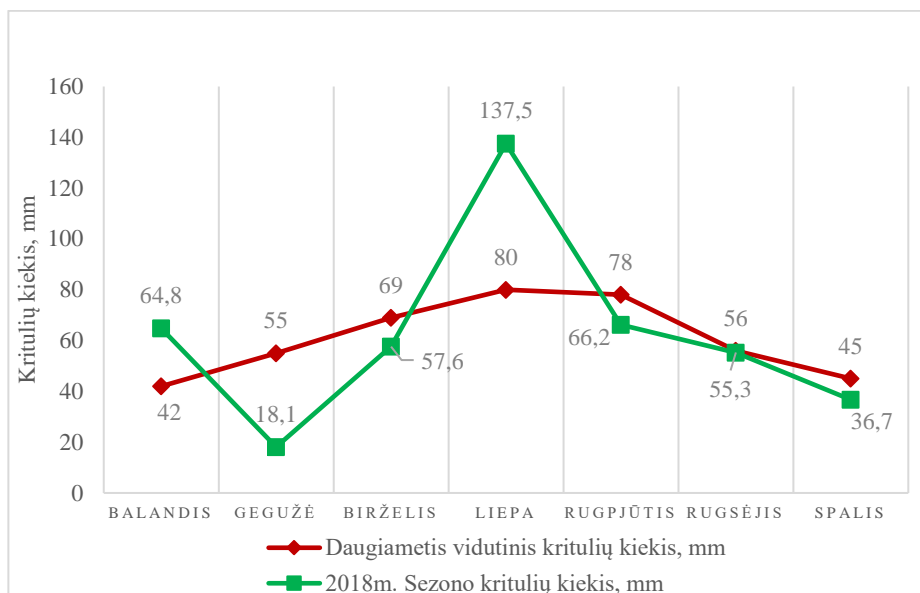
### 3. Rezultatai

Laboratorinių tyrimų metu buvo atliktos 4 serijos bandymų. Kiekvienos bandymų serijos metu buvo keičiamas lietaus kritimo kampas. Kadangi imituoti vėją laboratorijoje yra sudėtinga, nuspręsta vėjo įtaką tirti keičiant lietaus lašų kritimo kampą. Bendra, visų analizuojamų, bandymų trukmė 45 minutės. Visų bandymų rezultatai analizuojami, sulyginami, daroma regresinė analizė, tiriama koreliacija tarp sistemos efektyvumo ir vėjo greičio. Taip pat atliekamas CFD modeliavimas nustatantis, kaip vėjo veikiamas lietus pasiskirsto ant pastato fasado. Remiantis šiais rezultatais, bei meteorologiniais duomenimis skaičiuojamas potencialus sistemos surenkamo vandens kiekis, jos efektyvumas, kai sistema sumontuota ant pastato.

#### 3.1. Meteorologiniai duomenys

Kadangi darbo tikslas išanalizuoti vėjo daromą įtaką lietaus vandens surinkimo sistemai, didelis dėmesys turi būti skirtas meteorologinių duomenų analizei, jų apdorojimui ir įvertinimui. Norint įvertinti vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumą realiomis sąlygomis, buvo naudojami naujausi Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos surinkti duomenys. Šie duomenys, sukaupti Kauno meteorologijos stotyje esančioje adresu Rapsų g. 5, Noreikiškių kaime. Priimama, kad ši stotis nuo tiriamo pastato su modeliuojama lietaus vandens surinkimo sistema nėra toli, todėl daroma prielaida, kad meteorologinės sąlygos šiose dvejuose vietose sutampa. Analizuojami duomenys surinkti 2018 metų drėgnuoju metu laikotarpiu: nuo Balandžio 1d. iki Spalio 31d. Gauta ši informacija: iškritusio lietaus kiekis milimetrais kas 10 minučių bei vėjo kryptis ir vėjo greitis kas 1 valandą. Šie duomenys apdorojami ir suprastinami taip, kad liktų tik tie duomenys, kurie buvo reikalingi sistemos skaičiavimams. Tačiau skaičiavimų remiantis, tik šiais duomenimis nepakanka. Norint užtikrinti jų tikslumą, būtina įvertinti ir ilgalaikių stebėjimų metu surinktus duomenis [11]. Šie duomenys apskaičiuoti, pagal 1961-1990 m. stebėjimų laikotarpio vidutines reikšmes. Iš leidinio „Statybinė klimatologija“ [11] buvo naudojami šie duomenys: vidutinis kritulių kiekis, vėjo greitis, vėjo krypties pasikartojimo dažnis. Šie duomenys analizuojami tiems patiems metų mėnesiams, kaip ir 2018 metų informacijos.

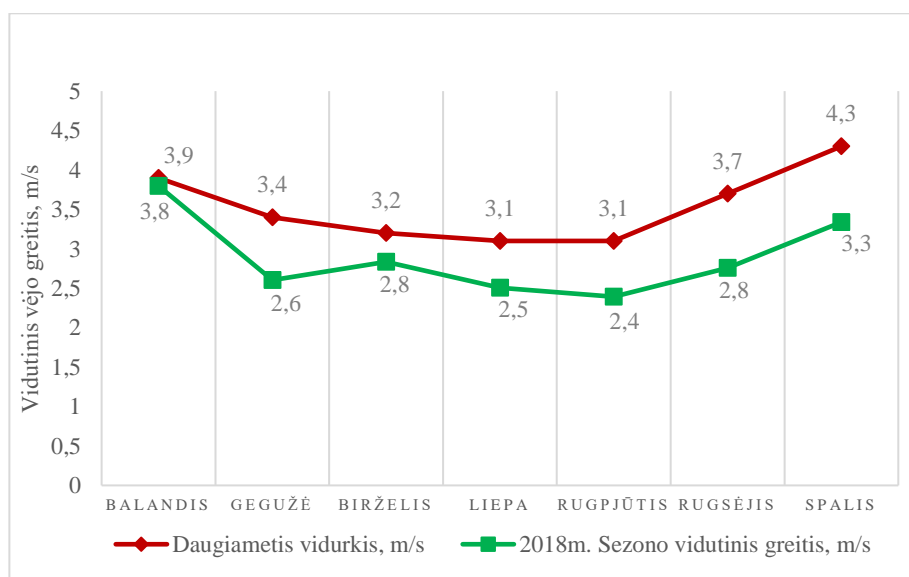
Lyginant 2018 metų duomenis su vidutinėmis vertėmis, galime pastebėti tam tikrų skirtumų. Per 2018m. drėgnąjį laikotarpį iškrito 436mm lietaus, tuo tarpu vidutinis daugiametis rodiklis siekia 425mm lietaus. Detalesnis šių duomenų palyginimas pateiktas 24 paveikslėlyje.



24 pav. Lietaus kiekio palyginimas: 2018 metai ir daugiamečio vidurkis

Kaip matome, nors bendras sezono metu iškritęs kritulių kiekis 2018m. didesni, tačiau per mėnesį iškretančio lietaus kiekis beveik visais mėnesiais išskyrus Balandį ir Liepą yra didesnis vidutinio daugiamečio vidurkio atveju. Tačiau, galime daryti prielaidą, kad metų bėgyje iškritus panašiam lietaus kiekiui turėtume surinkti panašų vandens kiekį, bet jo pasiskirstymas tarp mėnesių gali keistis, vienais mėnesiais jo gali būti labai daug, o kitais jo beveik išvis nebūti.

Tyrimams, taip pat labai svarbus vėjo greitis, nes tai pagrindinis veiksnys nulemiantis lietaus kritimo kampą  $\alpha$ . 25 pav. 2018 metų vidutinis vėjo greitis palygintas su vidutiniu daugiamečiu vidurkiu. Kaip matome, 2018 metais vidutinis vėjo greitis visų 7 mėnesių metu, buvo mažesnis. Galime daryti prielaidą, kad mažesnis vėjo greitis turėtų sąlygoti, žemesnį sistemos efektyvumą ir surinkto vandens kiekį.

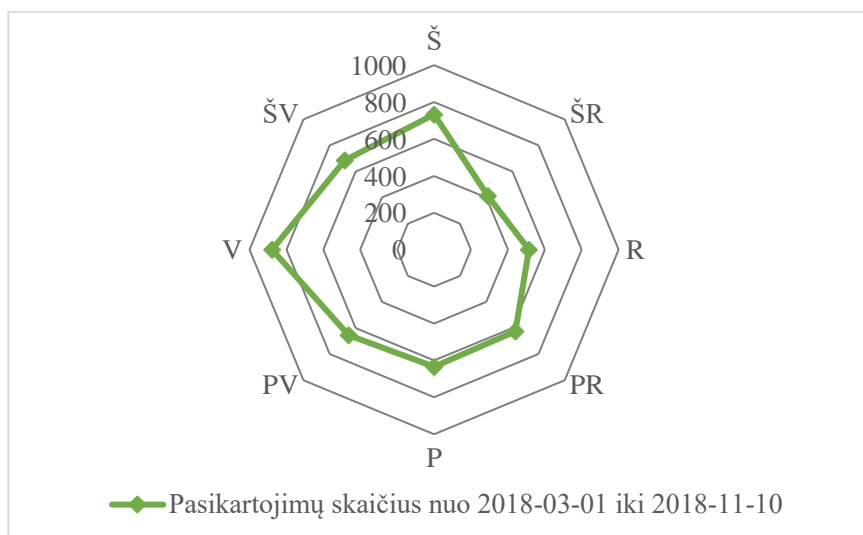


25 pav. Vidutinio vėjo greičio palyginimas: 2018 metai ir daugiamečio vidurkis

Taip pat, svarbu, nustatyti vyraujančią vėjo kryptį, nes būtent tas fasadas, kuris atsuktas vyraujančio vėjo kryptimi, surinks daugiausia lietaus vandens. Kadangi gauti meteorologiniai duomenys buvo pateikti su vėjo greičiu kas valandą, bei jo kryptimi laipsniais, šiuos duomenis reikia susisteminti ir suskirstyti į 8 pagrindines kryptis(rumbus):

- Šiaurės: 338° - 22°
- Šiaurės rytų: 23° - 67°
- Rytų: 68° - 112°
- Pietryčių: 113° - 157°
- Pietų: 158° – 202°
- Pietvakarių: 203°- 247°
- Vakarų: 248° - 292°
- Šiaurės vakarų: 293° - 337°

Vėjo krypties pasikartojimų grafikas pateiktas 26 paveikslėlyje.



26 pav. Vėjo krypties pasikartojimų palyginimas

Remiantis „Statybine klimatologija“ [11] galime patvirtinti, kad vyraujanti vėjo kryptis parinkta gerai, nes vyraujančio vėjo kryptys sutampa tarp šių dviejų šaltinių. Remiantis daugiamečiais duomenimis yra 20% tikimybė, kad vėjas pūs iš Vakarų.

### 3.2. Laboratorinių tyrimų rezultatai

Per laboratorinius bandymus iš viso atlikta 13 bandymų. Jie suskirstyti į 4 eksperimentų serijas. Esminis skirtumas tarp bandymų - lietaus lašų kritimo kampas. Šis kampas, realiomis sąlygomis susidaro, dėl pučiančio vėjo, todėl jį keičiant laboratorijoje galime imituoti skirtingas meteorologines sąlygas – vėjo greitį. Visų atliktų eksperimentų suvestinė pateikta 3.1 lent.

3.1 lentelė. Atliktų bandymų suvestinė

Eksperimento Serija	Eksperimento nr.	Lietaus kampas $\alpha$ , °	Eksperimento trukmė, s	Lietaus intensyvumas, mm/h
1	1	60	193	336
	2		113	
	3		212	
	4		167	
2	5	12	230	265
	6		221	
	7		235	
3	9	6	379	220
	9		376	
	10		355	
4	11	35	140	300
	12		116	
	13		111	

Duomenys bandymų metu buvo kaupiami nuo to momento, kai buvo atidaroma vandens sklendė iki tol, kol ji pilnai uždaroma. Dėl šios priežasties eksperimentų pradžioje ir pabaigoje galima matyti duomenų nestabilumą. Šie duomenys nevertinami ir atliekant skaičiavimus nenaudojami.

Imituojamo lietaus intensyvumas, apskaičiuojamas dviem būdais. Eksperimento serijose nr.1 ir nr.2 naudojamas lietaus intensyvumo nustatymas žinant vandens debitą ir užtikrinant, kad visas vanduo patenka ant bandomojo stendo paviršiaus. Likusių eksperimentų metu, naudojama meteorologinė stotelė, kurios dėka iškart galima matyti lietaus intensyvumą, bei viso iškritusio lietaus kiekį.

Pirmos bandymų serijos metu, norint išmatuoti lietaus intensyvumą, vanduo po eksperimento pabaigos nekeičiant debito, buvo nukreipiamas į talpą ir purškiamas 7,68 sekundes, per šį laiką sukaupia 870g vandens. Iš šių duomenų nustatytas vandens debitas: 0,113 l/s. Toks debitas atitinka 5,1 mm/min (306 mm/h) lietaus intensyvumą. Antros serijos metu, lietaus intensyvumas matuotas ta pačia metodika. Vanduo purškiamas 20 sekundžių. Per šį laiko tarpą, sukaupia 1965 g vandens. Vandens debitas išpurškiamas ant stendo lygus 0,098 l/s, o imituojamo lietaus intensyvumas 4,42 mm/min (265 mm/h). Likusių eksperimentų metu, gauti tiesioginiai parodymai nurodantys lietaus intensyvumą. Trečios serijos metu, vidutinis lietaus intensyvumas lygus 220 mm/h, o ketvirtos serijos metu intensyvumo vidurkis siekė 300 mm/h. Visais atvejais imituojamas labai stiprus lietus. Tokio intensyvumo lietus realiomis sąlygomis susidaro retai ir tik trumpiems laiko tarpams. Maksimalus Kaune užfiksuotas lietaus intensyvumas trukęs ilgiau nei vieną minutę buvo 5,5 mm/min [11]. Lietaus intensyvumo suvestinė pateikta 3.2 lent.

3.2 lentelė. Bandymu metu imituoto lietau intensyvumas

Eksperimento Serija	Debitas, l/s	Lietaus intensyvumas, mm/h	Lietaus intensyvumas, mm/min
1	0,113	306	5,1
2	0,098	265	4,42
3	-	220	3,67
4	-	300	5

Norint apskaičiuoti, kokia efektyvi yra lietaus vandens surinkimo sistema atliekami paprasti matematiniai veiksmi: skaičiuojamo koks procentas viso, ant fasadinės plokštės nukritusio vandens, patenka į stendo vidų ( $Q_{\text{harv.}}$ ) ir nurieda plokštės paviršiumi ( $Q_{\text{runoff}}$ ). Šių dviejų dydžių suma parodo, koks iš viso vandens kiekis gali būti surenkamas projektuojama sistema. Kadangi žinome visą ant plokštės nukritusio imituojamo lietaus kiekį, galime nesunkiai apskaičiuoti ir nesurinkto vandens dalį ( $Q_{\text{splash}}$ ). Tai lietus, kuris atsitrenkęs į fasadinę plokštę nutikšta ir negali būti surinktas šiame darbe tiriamais metodais. Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumas skaičiuojamas visiems eksperimentams atskirai. Visų eksperimentų rezultatai pateikti 3. 3 lent.

3.3 lentelė. Atliktų bandymų rezultatai

Eksperimentų Serija	Eksperimento nr.	Lietaus kampas $\alpha, ^\circ$	Surinkto vandens kiekis $Q_{\text{harv.}}, \%$	Nutekėjusio vandens kiekis $Q_{\text{runoff}}, \%$	Sistemos efektyvumas, %	Nesurenkamo vandens kiekis $Q_{\text{splash}}, \%$
1	1	60	69,18	21,82	91,00	9,00
	2		67,91	21,47	89,38	10,62
	3		65,12	25,50	90,62	9,38
	4		68,41	24,36	92,77	7,23
2	5	15	33,75	23,60	57,36	42,64
	6		31,22	23,77	54,99	45,01
	7		34,97	24,76	59,73	40,27
3	8	6	25,32	17,52	42,84	57,16
	9		24,92	18,92	43,85	56,15
	10		23,16	15,60	38,76	61,24
4	11	35	58,18	18,75	76,93	23,07
	12		64,17	16,96	81,13	18,87
	13		72,92	18,19	91,11	8,89

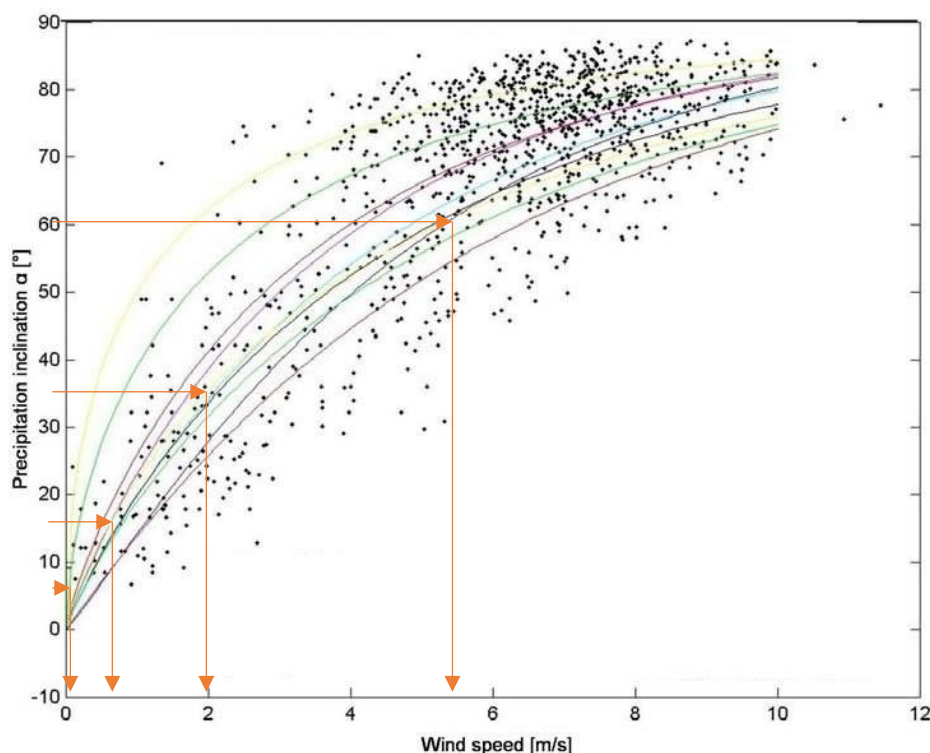
Tolimesniam sistemos efektyvumo vertinimui, suskaičiuojami kiekvienos serijos rezultatų vidurkiai. Šie duomenys buvo naudojami išvedant vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumo priklausomybę nuo vėjo greičio. Rezultatai pateikiami didėjimo tvarka, pagal lietaus lašų kritimo kampą 3.4 lent.



3.4 lentelė. Vidutinis sistemos efektyvumas esant skirtingam lietaus kritimo kampui

Eksperimento Serija	Lietaus kampas, °	Surinkto vandens kiekis, %	Nutekėjusio vandens kiekis, %	Maksimalus galimo surinkti vandens kiekis, %
3	6	24,47	17,35	41,82
2	15	33,75	23,60	57,36
4	35	65,09	17,97	83,06
1	60	67,65	23,29	90,94

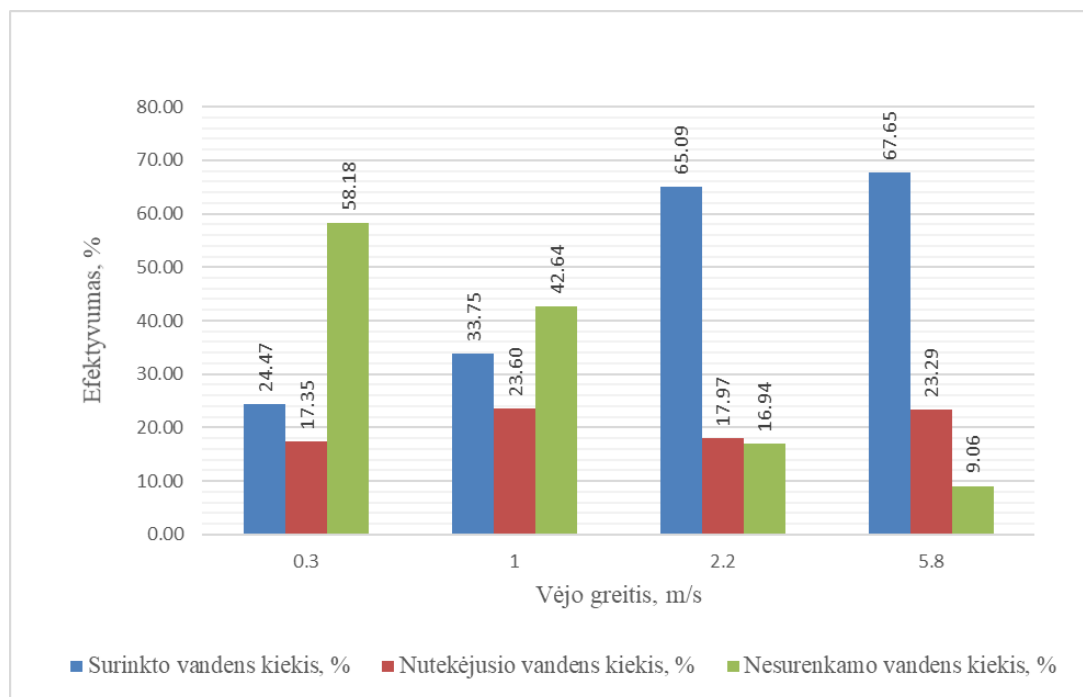
Eksperimentų metu sudaromi 4 skirtingi lietaus lašų kritimo trajektorijos kampai: 6 °; 15 °; 35 ° ir 60°. Remiantis literatūros šaltiniais [5] šis lietaus lašų kritimo kampas konvertuojamas į apytikslius vėjo greičius prie, kurių natūraliomis sąlygomis susiformuoja toks kampas. Šiam tikslui naudojamas sudarytas lietaus lašų priklausomybės nuo vėjo greičio grafikas (27 pav.). Jame pasirenkama linija žyminti didžiausią lietaus intensyvumą, kuris yra artimiausias, tam kuris buvo gautas laboratorinių tyrimų metu. Imituoti lietaus lašų kritimo kampai atitinka: 0,3 m/s; 1,0 m/s; 2,2 m/s ir 5,8 m/s vėjo greitį. Visi šie greičiai dažnai pasitaiko Lietuvos meteorologinėmis sąlygomis.



27 pav. Lietaus kritimo kampo priklausomybė nuo vėjo greičio [5]

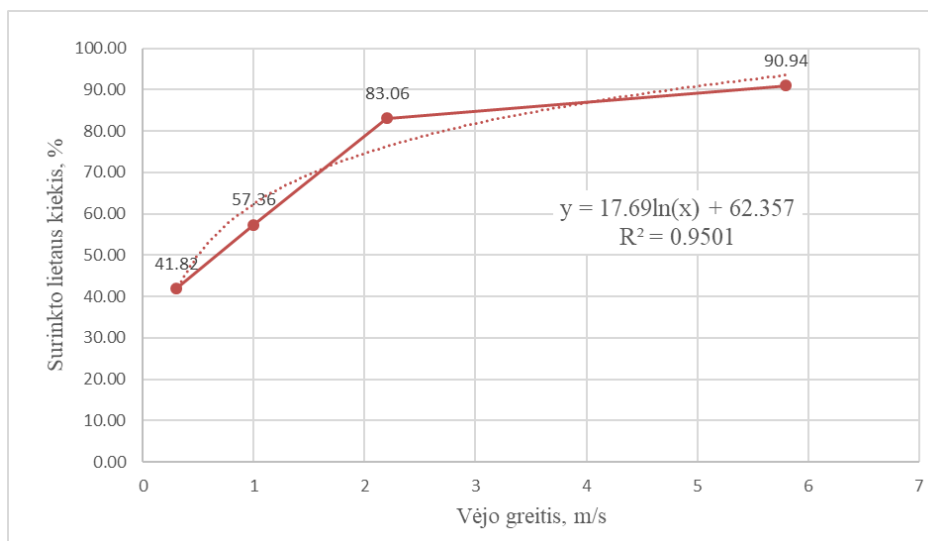
Sistemos efektyvumas esant skirtingam vėjo greičiui pateikiamas 28 paveikslėlyje. Šiame grafike aiškiai matomas pastebimas sistemos efektyvumo augimas stiprėjant vėjui. Nesurenkamo

lietaus kiekis krenta didėjant vėjo greičiui. Galime daryti prielaidą, kad vėjas turi stiprią įtaką sistemos efektyvumui ir tarp šių dviejų dydžių yra stipri koreliacija.



**28 pav.** Sistemos efektyvumas esant skirtingam vėjo greičiui

Norint tiksliai prognozuoti projektuojamos vertikalios kritulių surinkimo sistemos efektyvumą, atliekama regresinė analizė. Tai statistinis metodas, tiriantis kintamojo  $Y$  funkcinę priklausomybę nuo vieno ar kelių kintamųjų  $X_i$ . Kitaip tariant, regresinę analizę galima laikyti specifine koreliacinės analizės atmaina. Regresinė analizė įvertina anksčiau minėtą priklausomybės formą, o koreliacinė analizė parodo šio ryšio stiprumą. Sudaroma regresijos lygtis, kuri modeliuoja funkcinį ryšį tarp nepriklausomojo ir priklausomojo kintamojo. Atlikus statistinių duomenų analizę parenkamas regresinis modelis. Šiems duomenims geriausiai tinka logaritminis modelis. Priklausomasis kintamasis yra norimas prognozuoti dydis – sistemos efektyvumas. O kintamasis pagal kurį norima prognozuoti kintamojo reikšmę, vadinamas nepriklausomuoju, tai šiuo atveju vėjo greitis. Lygtis gaunama naudojant „MS Excel“ programinę įrangą. Sistemos efektyvumo priklausomybė nuo vėjo bei modelio regresijos linija pateikta 29 paveikslėlyje.



**29 pav.** Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumo priklausomybė nuo vėjo greičio

Šios lygties determinacijos koeficiento  $R^2$  vertė 0,95, o tai rodo stiprią priklausomybę. Kuo šis skaičius artimesnis vienetui, tuo priklausomybė patikimesnė. Naudodami šią lygtį galime prognozuoti ir nustatyti vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumą esant įvairiam vėjo greičiui.

Sistemos efektyvumo priklausomybės nuo vėjo greičio lygtis:

$$y = 17,68 \ln(x) + 62,357; \quad (3.1)$$

čia  $y$  – vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumas, %;

$x$  – vėjo greitis, m/s.

Koreliacijos koeficiento patikimumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$t = \frac{r}{m}; \quad (3.2)$$

čia  $r$  – koreliacijos koeficientas;

$n$  – bandymų skaičius.

$$m = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}; \quad (3.3)$$

Atliekami skaičiavimai pagal formules (3.3) ir (3.2):

$$m = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}} = \frac{\sqrt{1-0,975}}{\sqrt{13-2}} = 0,0479$$

$$t = \frac{r}{m} = \frac{0,975}{0,0479} = 20,34$$

Rezultatų patikimumas tikrinamas pagal (3.4) formulę:

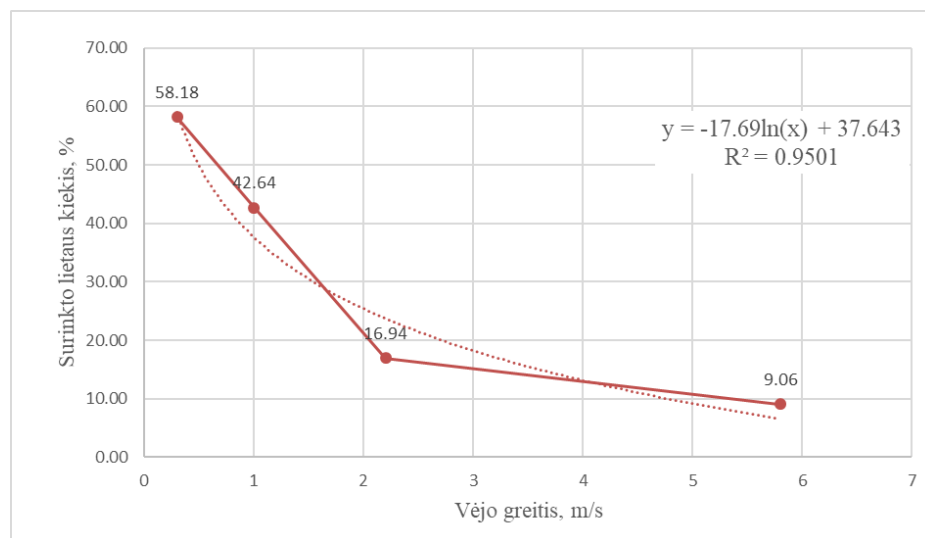
$$t < t_p \quad (3.4)$$

$$20,3 < 2,2$$

čia  $t_p$  – pagal duomenų skaičių ir 95% patikimumą parinktas dydis iš 1 priedo, 1 lentelės.

Šie skaičiavimų rezultatai rodo, kad šis modelis yra patikimas ir jį galima naudoti tolimesniuose skaičiavimuose.

Tuo tarpu nesurenkamo, tai yra nuo fasado atšokusio vandens kiekis didėjant vėjo greičiui, mažėja. Šiuo atveju, taip pat naudojamas logaritminis modelis. Ši priklausomybė bei grafikas pateiktas 30 paveikslėlyje. Regresinės lygties determinacijos koeficientas  $R^2$  lygus 0,95, tai rodo stiprią priklausomybę.



**30 pav.** Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos nesurenkamo vandens priklausomybė nuo vėjo greičio

Nesurenkamo vandens kiekio priklausomybės nuo vėjo greičio lygtis:

$$y = -17,69 \ln(x) + 37,643 ; \quad (3.5)$$

čia  $y$  – nesurenkamo lietaus kiekis, %;

$x$  – vėjo greitis, m/s;

Atliekami skaičiavimai naudojant (3.2), (3.3) ir (3.4) formules:

$$m = \frac{\sqrt{1 - r^2}}{\sqrt{n - 2}} = \frac{\sqrt{1 - 0,975}}{\sqrt{13 - 2}} = 0,0479$$

$$t = \frac{r}{m} = \frac{0,975}{0,0479} = 20,34$$

$$20,3 < 2,2$$

Šie skaičiavimų rezultatai, taip pat rodo, kad šis modelis yra patikimas ir jį galima naudoti tolimesniuose skaičiavimuose.

Naudojant šias lygtis sudaryta lentelė, kurioje prognozuojamos sistemos efektyvumo reikšmės esant dažniausiai pasitaikantiems vėjo greičiams. Šie duomenys pateikti 3.5 lent. Remiantis šia lentele, bei meteorologiniais duomenimis galime preliminariai nustatyti apytikslį sistemos efektyvumą esant tam tikriems liūtis parametrams be sudėtingų skaičiavimų.

**3.5 lentelė.** Atliktų bandymų suvestinė

Vėjo greitis, m/s	Sistemos efektyvumas, %	Nesurenkamo vandens kiekis, %
0,1	21,62	78,38
0,3	41,06	58,94
0,5	50,10	49,90
1	62,36	37,64
1,5	69,53	30,47
2	74,62	25,38
2,5	78,57	21,43
3	81,79	18,21
4	86,88	13,12
5	90,83	9,17

### 3.3. Realiomis sąlygomis surenkamo vandens kiekis

Žinant priklausomybės lygtis, bei tikslius meteorologinius duomenis galime apskaičiuoti vertikaliuos lietaus vandens surinkimo sistemos surenkamą vandens kiekį realiomis sąlygomis. Naudojami tikslesni, 2018 metų meteorologiniai duomenys. Atsižvelgiant į 26 paveikslėlyje parinkta ta vėjo kryptis kuri turi maksimalų pasikartojimų skaičių. Šiuo atveju vyrauja vakarų krypties vėjas. Todėl buvo skaičiuojamas lietaus kiekis, kurį gali surinkti ant vakarinio pastato fasado sumontuotas 1m<sup>2</sup> sistemos. Meteorologiniai duomenys iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos pateikti skirtinguose failuose bei turi papildomos nereikalingos informacijos. Duomenys išfiltruojami, taip, kad liktų tik lietaus kai vėjas pučia iš Vakarų pusės duomenys. Taip gaunamas pilnas reikiamų duomenų sąrašas: data, laikas, lietaus kiekis bei vėjo greitis.

Žinant šiuos duomenis, naudojant regresinės analizės metu gautą lygtį galėsime rasti bendrą metinį sistemos surinktą vandens kiekį iš 1 m<sup>2</sup>. Visų pirma į logaritminę priklausomybės lygtį įstatomas vėjo greitis, taip randamas sistemos efektyvumas būtent tai liūčiai. Tada šis efektyvumas dauginamas iš per tą laikotarpį išritusio lietaus kiekio. Skaičiavimai atliekami su kiekviena duomenų eilute, o gauti rezultatai susumuojami norint gauti bendrą 1 m<sup>2</sup> ploto sistemos surenkamą vandens kiekį. Meteorologiniai duomenys, bei pilni skaičiavimo rezultatai pateikti 2 priede.

Skaičiavimai rodo, kad 1 m<sup>2</sup> ploto sistema per sezoną potencialiai gali surinkti: 68,67 litrus vandens. Tokią sistemą sumontavus ant kitą orientaciją turinčio fasado, šis kiekis mažės.

### **3.4. Lietaus vandens pasiskirstymo ant pastato fasado modeliavimas**

Dėl pastato aerodinaminių savybių ne visoms fasado dalims tenka vienodas lietaus kiekis. Net tuo atveju, kai fasadas atsuktas tiesiai vėjo kryptimi, oro srautų, sūkurių bei turbulencijos dėka lietus ant jo pasiskirsto netolygiai.

Norint tinkamai parinkti vertikaliuos lietaus vandens surinkimo sistemos išdėstymą ant fasado būtina atsižvelgti į tai, kaip dėl vėjo srautų ir turbulencijos lietaus lašai pasiskirsto ant fasado. Tai labai dinamiškas ir sunkiai prognozuojamas procesas. Dėl to norint nustatyti sistemos montavimo vietą naudojamas CFD modeliavimas. Jo dėka galime imituoti realias sąlygas, bei pastato formą ir gauti lietaus pasiskirstymo ant fasadų grafikus. Remiantis šiais rezultatais, galime sistemas projektuoti tik tuose fasado dalyse kur nukrenta pakankamas lietaus kiekis.

CFD modeliavimui atlikti buvo naudojama atvirojo kodo programa „OpenFOAM“. Ši programa susideda iš daugelio atskirų komponentų, kurių paskirtis įvairi. Dėl savo plataus panaudojimo galimybių ši programa vis labiau populiarėja mokslininkų tarpe. Internete galima rasti ne tik bazinę programos versiją, bet ir įvairių mokslininkų sukurtų sprendimo variklių skirtų įvairiems specifiniams uždaviniams skaičiuoti. Šiuo atveju naudojamas sprendimų variklis pavadinimu „windDrivenRainFoam“ [20]. Šio sprendimų variklio paskirtis yra įvertinti vėjo veikiamo lietaus pasiskirstymą ant pastato fasadų. Šis variklis yra sukurtas mokslininko B. Blocken ir jo pačio patikrintas literatūros analizėje minėtų tyrimų metu [9, 19]. Dėl šios priežasties, šio skaičiavimų variklio kodas yra patikimas, o nustatyti parametrai bei diferencialinės lygtys patikrintos. Šie pagrindiniai parametrai nekeičiami.

Dėl programos apribojimų bei suderinamumo su įvairiais įrankiais ir senų sprendimų varikliu naudojama „OpenFOAM 2.3.0“ programinės įrangos versija. Rezultatų peržiūrai ir apdorojimui dar vadinamu „post-processing“ naudojama „Paraview 4.1.0“ programos versija. „OpenFOAM“ veikia tik „Linux“ aplinkoje todėl kompiuteryje taip pat įdiegta „Ubuntu 14.04“ operacinė sistema.

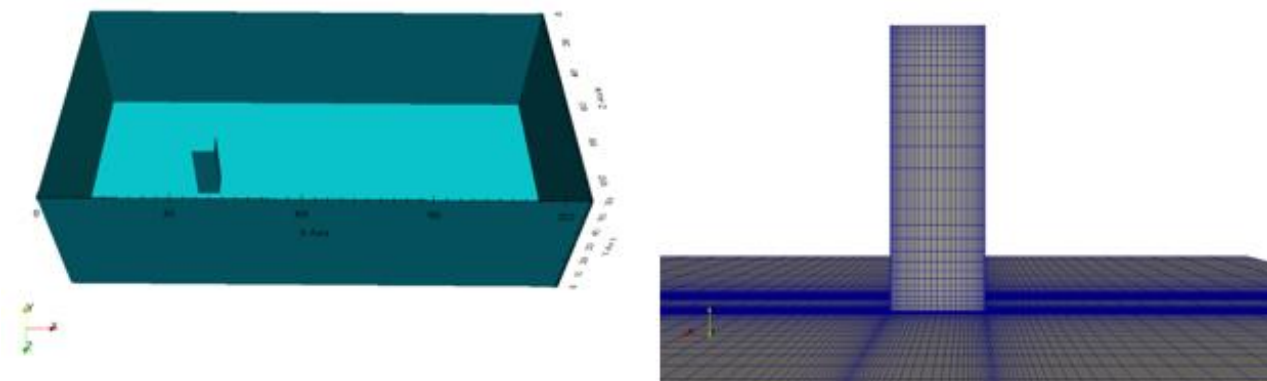
#### **3.4.1. Pastato geometrijos ir tinklelio apibrėžimas**

Siekiant sumodeliuoti mūsų tiriamą situaciją pirmiausia reikia sukurti tiriamo objekto formą ir tinklelį. „OpenFOAM“ suteikia galimybę pastatą bei kitus objektus sukurti naudojant įvairias komandas ir failus, tačiau šiame darbe buvo naudojamas „blockMesh“ modulis. Jo dėka paprastas C++ failas su atitinkamais parametrais ir instrukcijomis konvertuojamas į 3D geometriją. Šiame darbe tiriamos situacijos geometrija bei tinklelis pateiktas 31 paveikslėlyje.

„blckMesh“ modulio sukurtos geometrijos ir tinklelio duomenys:

Taškai: 535421

Celės: 1561200



31 pav. "OpenFOAM" modeliuojamos situacijos geometrija ir tinklelis

Programoje sumodeliuojamas 30 metrų aukščio pastatas kurio ilgis 10 m, o plotis 10 m. Tai labai primityvios formos pastatas kurio formą galima laikyti artima daugeliui 10 aukštų pastatų. Todėl gautus rezultatus galima pritaikyti dideliame kiekiu skirtingų pastatų, norint optimaliai išdėstyti lietaus vandens surinkimo sistemos elementus.

Geometrijos kūrimo metu taip pat nurodomi vėjo ir lietaus šaltiniai bei kitos modeliavimą apribojančios sritys: sienos, žemės paviršius, išėjimas(angl. outlet) ir įėjimas(angl. inlet). Bendras modeliuojamos erdvės dydis: 110 m x 210 m x 70 m. Papildomos kliūtys ar gretima esantys pastatai nemodeliuojami. Daroma prielaida, kad pastatas stovi lygioje vietoje, o aplink jį nėra kitų aukštų pastatų.

Turint pilną pastato ir ribojančių paviršių geometriją, reikia sukurti tinklelį. Jo pagalba vėliau buvo ieškoma užduoto skaitinio uždavinio rezultatų. Norint gauti reikšmingus rezultatus, tinklelis ties pastato kampais sutankinamas. Lygiose fasado vietose šis tinklelis retesnis.

### 3.4.2. Uždavinio sprendimas naudojant „windDrivenRainFoam“ sprendimų variklį

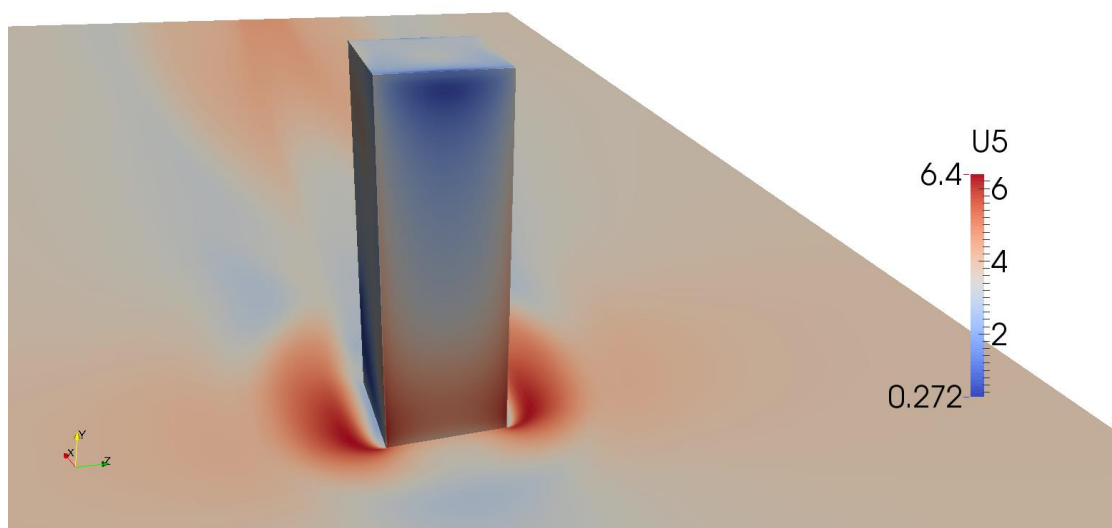
Turint sėkmingai sugeneruotą tinklelį bei teisingai nustatytus visus parametrus galima pradėti sprendimo procesą. Skaičiavimai vykdomi remiantis L. Oilerio „Multiphase“ modeliu.

Visų pirma apskaičiuojamas vėjo pasiskirstymas aplink sumodeliuotą pastatą. Skaičiavimai atliekami su 10 skirtingų vėjo greičių. Greitis svyruoja nuo 1m/s iki 15m/s. Keičiama ir vėjo kryptis, skaičiavimuose tiriamos 12 vėjo krypčių. Šie skaičiavimai atliekami su „simpleFoam“ moduliu. Žinant vėjo srautus, jo greičius erdvėje, apskaičiuojamos įvairaus dydžio lašų trajektorijos.

Naudojami 0,3mm-6mm diametro lašai. Šie duomenys gali būti naudojami, kaip tarpiniai rezultatai, norint išanalizuoti, kaip vieno ar kito dydžio lašai elgiasi vėjuje. Iš viso modeliavimo metu apskaičiuojama 1800 skirtingų kombinacijų tarp vėjo greičio, krypties ir lašų dydžio. Naudojant šiuos duomenis atliekami paskutiniai skaičiavimai apskaičiuojantys bendrą vidutinį lašų pasiskirstymą ant fasado. Tai visų rezultatų vidurkis puikiai tinkamas naudoti prognozuojant lietaus kiekį nukrentantį ant fasado labai įvairiomis meteorologinėmis sąlygomis. Skaičiavimų pabaigoje tikrinama ar liekamoji paklaida yra pakankamai maža. Šiuo atveju ši paklaida svyruoja tarp  $1.06e-06$  ir  $9.555e-10$ . Tokia maža paklaida patvirtina modelio patikimumą ir rezultatų stabilumą.

### 3.4.3. CFD modeliavimo rezultatai

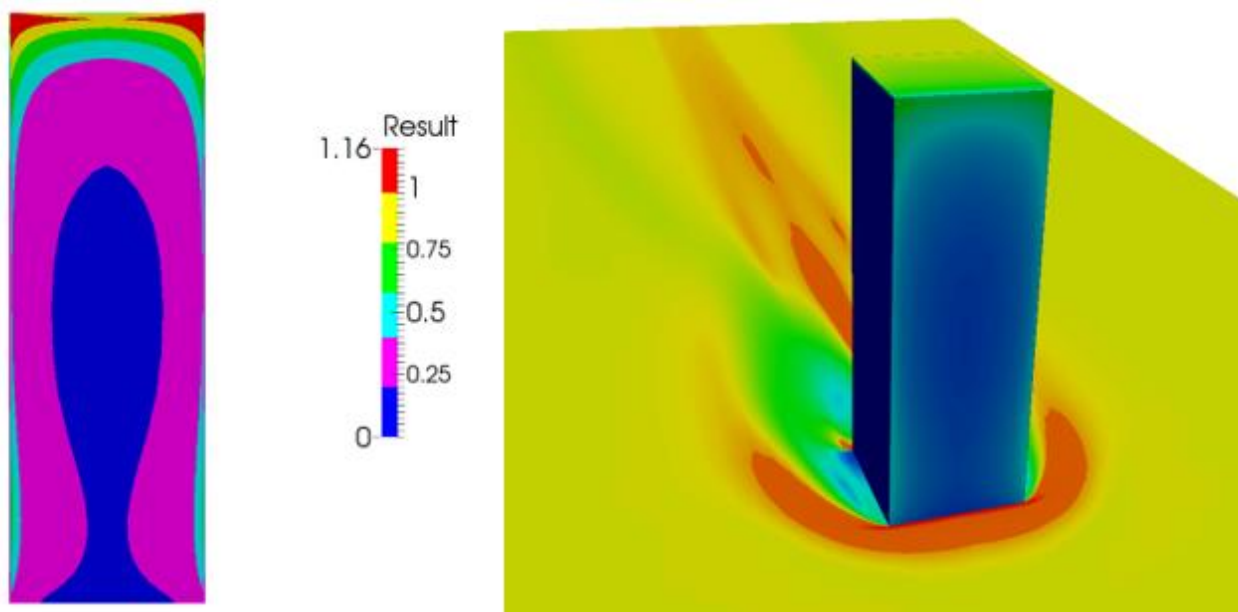
Visų pirma analizuojami vėjo greičių pasiskirstymo grafikai. Jie labai stipriai nulemia ir lietaus pasiskirstymo ant fasado rezultatus. Kaip matome iš 32 paveikslėlio vėjo greitis ant pastato fasado ir aplink jį stipriai skiriasi. Dalyje fasado susidariusios didelio greičio zonos, o kitur vėjo greitis minimalus. Taip atsitinka dėl skirtingų žemo ir aukšto slėgio zonų, oro turbulentiškumo.



32 pav. Vėjo greitis įvairiose modelio vietose

Pagrindinis modeliavimo rezultatas – santykinio lietaus kiekio  $\eta$  grafikas. Jis pateiktas 33 paveikslėlyje. Grafike aiškiai matoma, kad daugiausia lietaus tenka viršutinei pastato daliai. Ypatingai didelis lietaus kiekis tenka kampams, ten santykinis lietaus kiekio rodiklis siekia net 1,16. Tai rodo, kad šiose dalyse nukris kiek didesnis lietaus kiekis, nei tai padarytų ant tokio pat ploto žemės paviršiaus. Tuo tarpu fasado centrinėje dalyje ir apačioje lietaus kiekis kelis kartus mažesnis. Remiantis šiais rezultatais galima parinkti optimalią sistemos montavimo vietą.

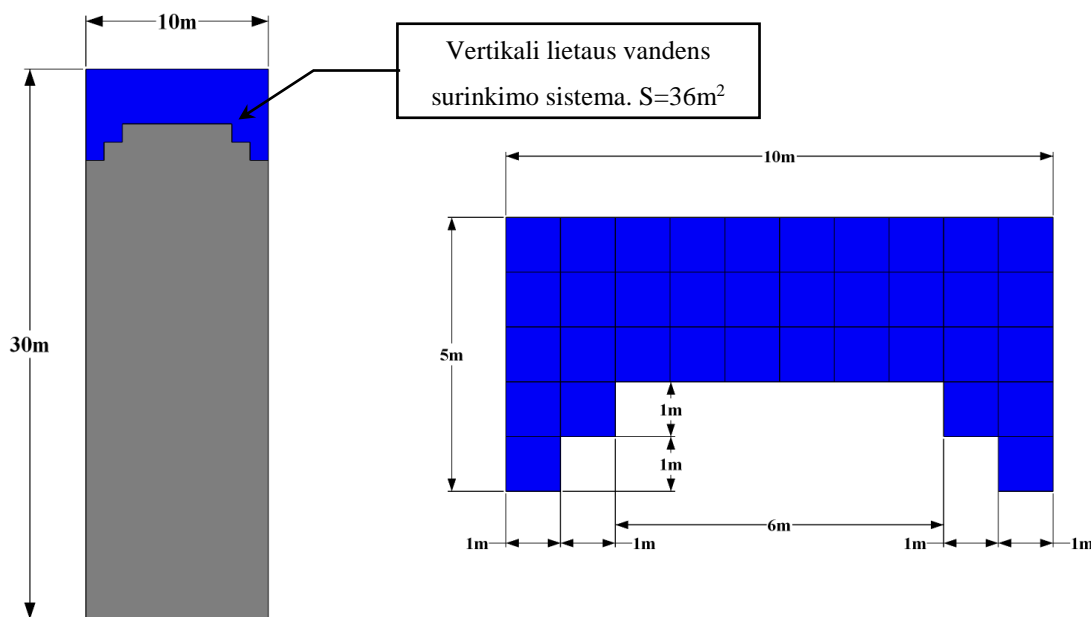




33 pav. Santykinio lietaus kiekio pasiskirstymas ant pastato fasado esančio priešais vėją

### 3.5. Ekonominiai skaičiavimai

Ekonominiams skaičiavimams atlikti pasirenkamas tariamas pastatas, kurio matmenys atitinka simuliacijoje naudoto pastato formą. Šio pastato matmenys: 10 m x 10 m x 30 m. Tai 10 aukštų gyvenamosios paskirties pastatas. Sąlyginai aukštas pastatas pasirinktas, dėl to, kad jo stogo plotas lyginant su fasadų plotu yra labai mažas, todėl lietaus vandens surinkimo nuo vertikalių paviršių sistemos tokiam pastatui galimai galėtų atnešti didesnę naudą.



34 pav. Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos planas ir modulių išdėstymas

Remiantis CFD modeliavimo rezultatais suplanuojama preliminari sistemos montavimo vieta. Ji pavaizduota 34 paveikslėlyje. Sistema montuojama ten kur santykinis lietaus kiekis viršija  $\eta=0,5$ . Vidutinis  $\eta$  dydis šiame plote: 0,8. Tai yra ant sistema uždengtos fasado dalies mažiausiai nukrenta bent 50% viso lietaus kuris nukristų ant žemės paviršiaus, o vidutinė reikšmė 80%. Fasadas nukreiptas tiesiai į vakarų pusę.

Projektuojamą sistemą sudaro 36 moduliai, kiekvieno jų plotas  $1\text{m}^2$ , bendras sistemos plotas  $S_{\text{sis}}=36\text{m}^2$ . Tai yra sistema dengia tik 12% viso vakarinio pastato fasado ploto. Vertikali kritulių surinkimo sistema identiška naudotai laboratorinių tyrimų metu. Naudojamos to pačio tipo, kirstai tempto metalo, apdailinės plokštės. Todėl, skaičiavimams galime naudoti, priklausomybės lygtis gautas ankstesniame skyriuje. Plokštės montuojamos visiškai vertikaliai, vanduo surenkamas apačioje esančiais latakais iš kurių vanduo nukreipiamas į rezervuarą. Iš šios talpos vanduo vamzdžiais teka į tualetų bakelius ir yra naudojamas tik vandens nuleidimui tualete. Norint jį panaudoti kitiems tikslams, gali būti reikalingi papildomi filtrai, specialios laikymo sąlygos, o tai didina sistemos įdiegimo ir eksploatavimo kaštus, daro sistemą sudėtingesne.

Sistemos surenkamas vandens kiekis buvo skaičiuojamas dviem atvejais: remiantis 2018 m. meteorologiniais duomenimis ir remiantis daugiamečiais duomenimis iš „Statybinės klimatologijos“ [11].

Kadangi 2018 metų duomenys turi lietaus intensyvumo bei vėjo greičio duomenis 10 min tikslumu - skaičiavimo rezultatai buvo tikslesni naudojant šiuos duomenis. Atliekant skaičiavimus su daugiamečiais vidurkiais, buvo naudojami vidutiniais mėnesiniais kritulių kiekiai bei vidutiniai vėjo greičiai. Atsižvelgiant į CFD modeliavimo grafikus apskaičiuota, kad vidutinis sistemai tenkantis santykinis lietaus kiekis:  $\eta=0,8$ . Vykdam tolimesnius skaičiavimus sistemos surenkamo lietaus kiekis sumažinamas 20%, nes ant suprojektuotos sistemos vidutiniškai nukris 20% mažiau lietaus nei rodo meteorologiniai duomenys.

### 3.5.1. Skaičiavimai remiantis 2018 metų duomenimis

Sistemos surenkamas vandens kiekis skaičiuojamas atsižvelgiant į vėjo greitį, ir jo kryptį. Žinodami, kiek lietaus iškrito pučiant vakariniam vėjui ir koks buvo vėjo greitis galime nesunkiai rasti sistemos surenkamo vandens kiekį. Skaičiavimuose vertinamas ir santykinis lietaus kiekis ant fasado, kurio vidurkis šioje sistemoje siekia 0,8.

Surenkamas lietaus vandens kiekis skaičiuojamas pagal (3.6) formulę:

$$Q_{\text{sis1}} = (K * 1 * 1) * y * \eta * S_{\text{sis}}; \quad (3.6)$$

čia  $K$  – kritulių kiekis vėjui pučiant iš vakarų, m;  
 $y$  – sistemos efektyvumas apskaičiuotas pagal (3.1) formulę, atsižvelgiant į vėjo greitį;  
 $\eta$  – santykinis lietaus kiekis;  
 $S_{\text{sis}}$  – vertikali lietaus vandens surinkimo sistemos plotas, m<sup>2</sup>.

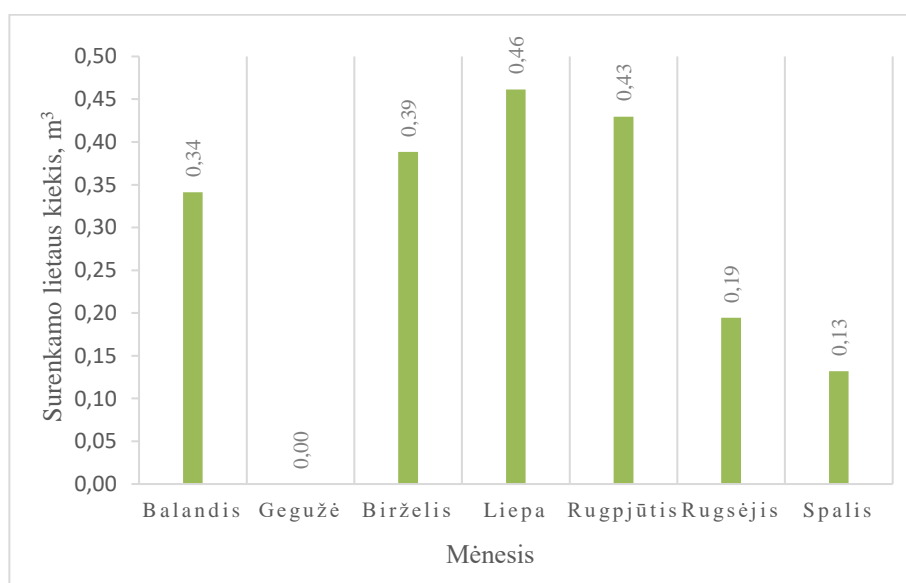
Visų mėnesių metu surenkamo lietaus kiekiai ir bendras per vieną sezoną sistemos surenkamas lietaus vandens kiekis pateikiamas 3.6 lent.

**3.6 lentelė.** Suprojektuotos vertikali lietaus vandens surinkimo sistemos surenkamo vandens kiekis (2018 metų duomenys)

Mėnesis	Kritulių kiekis, mm	Vidutinis vėjo greitis, m/s	Vidutinis sistemos efektyvumas, %	Santykinis lietaus kiekis, $\eta$	Surenkamas lietaus kiekis, l
Balandis	14,2	3,30	83,46	0,8	0,34
Gegužė	0	-	-		-
Birželis	16,7	2,83	80,74		0,39
Liepa	18,9	3,55	84,79		0,46
Rugpjūtis	17,3	3,86	86,23		0,43
Rugsėjis	7,1	6,34	95,03		0,19
Spalis	5,1	4,72	89,79		0,13
<b>Iš viso</b>					<b>1,95</b>

Įvertinus 2018 metų meteorologinius duomenis, apskaičiuota, kad per 7 drėgnojo sezono mėnesius projektuojama sistema surinktų 1,95 m<sup>3</sup> lietaus vandens. Vidutinis 1 m<sup>2</sup> vertikali lietaus sistemos surenkamo vandens kiekis: 54,08 litrai.

Remiantis gautais rezultatais, sudaromas grafikas, rodantis kiek kiekvieno mėnesio metu surenkama vandens.



**35 pav.** Surenkamo vandens kiekis skirtingais metų mėnesiais (2018 metų sezono duomenys)

Skaičiavimų metu taip pat sudarytas grafikas, rodantis, kaip surenkamas lietaus kiekis pasiskirsto sezono metu (35 pav.). Kaip matome gegužės mėnesį nebuvo nei vieno lietaus pučiant vakariniam vėjui, todėl, surinkto vandens kiekis lygus 0. Tai įrodo tokios sistemos nepastovumą. Likusią metų dalį surinkto lietaus kiekis pasiskirstęs panašiai, kaip iškritusių kritulių kiekis, bet tam tikrais atvejais tokia sistema gali neteikti visiškai jokios naudos kelias savaites.

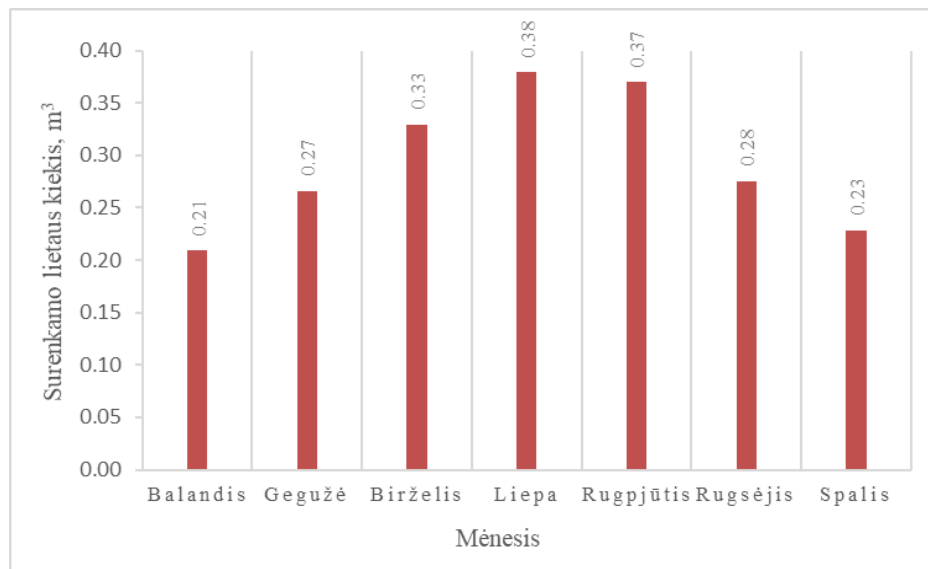
### 3.5.2. Skaičiavimai remiantis daugiamečiais duomenimis

Atliekant sistemos skaičiavimus remiantis daugiamečiais vidurkiais daromos kelios prielaidos. Visų pirma, žinome tik mėnesinį lietaus kiekį, tačiau nežinome, koks procentas kiekvieno mėnesio lietaus lyja esant Vakariniam vėjui. Dėl šios priežasties, norėdami apskaičiuoti šį skaičių naudojame pateiktą vėjo krypties pasikartojimo procentą. Vėjo iš vakarinės pusės tikimybė: 20%. Visi per mėnesį iškritusio lietaus kiekiai dauginami iš 20%, taip gaunamas lietaus kiekis naudojamas tolimesniuose skaičiavimuose. Tolesnė skaičiavimų metodika analogiškai naudotai su 2018 metų duomenimis. Skaičiavimų rezultatai pateikti 3.7 lent.

**3.7 lentelė.** Suprojektuotos vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos surenkamo vandens kiekis (Daugiamečiai vidutiniai duomenys)

Mėnesis	Kritulių kiekis, mm	Kritulių kiekis esant vakariniam vėjui, mm	Vėjo greitis, m/s	Vidutinis sistemos efektyvumas, %	Santykinis lietaus kiekis, $\eta$	Surenkamas lietaus kiekis, m <sup>3</sup>
Balandis	42	8,4	3,9	86,43	0,8	0,21
Gegužė	55	11	3,4	84,01		0,27
Birželis	69	13,8	3,2	82,93		0,33
Liepa	80	16	3,1	82,37		0,38
Rugpjūtis	78	15,6	3,1	82,37		0,37
Rugsėjis	56	11,2	3,7	85,50		0,28
Spalis	45	9	4,3	88,16		0,23
					<b>Iš viso</b>	<b>2,06</b>

Vertinant daugiamečius meteorologinius duomenis per 7 drėgnojo sezono mėnesius projektuojama sistema surinktų 2,06 m<sup>3</sup> lietaus vandens. Vidutiniškai 1 m<sup>2</sup> vertikalios lietaus sistemos surenkamo vandens kiekis: 57,19 litrai.



**36 pav.** Surenkamo vandens kiekis skirtingais metų mėnesiais (Daugiamečiai duomenys)

Atlikus skaičiavimus su daugiametėmis meteorologinių duomenų reikšmėmis, galime pastebėti, kad sistemos veikime nėra didelių nuosmukių ar pakilimų. Sistemos veikimas atrodo daug stabilesnis, tačiau prasčiau atspindi realią situaciją, dėl tik kas kelis metu atsitinkančių sausrų ar neįprastai didelio lietaus kiekio kuris nežymiai pakeičia vidutinę reikšmę.

### 3.5.3. Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos teikiama ekonominė nauda

Geriamojo vandens tiekiamo iš centrinių miesto tinklų kaina su PVM: 1,56 €/m<sup>3</sup> [21].

Ekonominiam sistemos vertinimui naudojamas sistemos surenkamo lietaus kiekis apskaičiuotas 3.5.2 skyriuje. Sistemos surenkamo vandens kiekis per metus:  $Q_{1m} = 2,06 \text{ m}^3$ .

Daroma prielaida, kad sistema bus eksploatuojama 25 metus.

Per metus dėl surinkto lietaus vandens sutaupoma:  $1,56 \text{ €/m}^3 * 2,06 \text{ m}^3 = 3,22\text{€}$ .

Per visą gyvavimo laikotarpį sistema sutaupys:  $3,22\text{€} * 25 \text{ metai} = 80,34\text{€}$ .

Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos per visą eksploatacijos laikotarpį atnešama nauda yra 80,34€. Sistemos įrengimas pastato sunaudojamo geriamojo vandens kiekio iš miesto tinklų ženkliai nesumažins. Tačiau, toliau išliekant vandens kainų didėjimo tendencijai, tokia sistema gali tapti kiek patrauklesnė. Remiantis gautais duomenimis neprognozuojama, kad tokia sistema ateityje turėtų trumpą atsiperkamumo laikotarpį.

Nepaisant to yra keletas priežasčių, kodėl ši sistema galėtų būti diegiama realiuose projektuose. Ji sumažina miesto tinklų apkrovą lietaus metu, fasadas apsaugomas nuo vandens daromos žalos. Taip pat tausojama aplinka, propaguojamos darnaus vystymosi idėjos. Tokia sistema gali būti panaudojama geriamojo vandens tiekimui atokiose vietose užtikrinti, kur juntamas vandens stygius, nėra infrastruktūros.

## Išvados

1. Vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo vėjo greičio. Didėjant vėjo greičiui, didėja ir sistemos efektyvumas.
2. Pučiant 0,3 m/s vėjo greičiui surenkamo lietaus vandens kiekis gali siekti apie 42% vertinant bendrą iškrentančio lietaus vandens kiekį. Pučiant 1 m/s greičio vėjui, lietaus vandens surinkimo efektyvumas siekia 57 %. Vėjo greičiui pasiekus 2,2 m/s efektyvumas išauga iki 83%, o pučiant 5,8 m/s vėjui bendras sistemos efektyvumas siekia net 91%.
3. Atliktais tyrimais nustatyta, kad Lietuvos meteorologinėmis sąlygomis nuo 1 m<sup>2</sup> vertikalios lietaus vandens surinkimo sistemos paviršiaus ploto, vidutiniškai per metus galima surinkti iki 57 litrų vandens.
4. Atliktais CFD modeliavimo tyrimais nustatyta, kad priklausomai nuo pastato aukštingumo, formos, vėjo greičio bei krypties priklauso ir lietaus pasiskirstymas ant vertikalių paviršių.
5. Tiriamuoju atveju, kai pastato matmenys 10 m x 10 m x 30 m, nustatyta, kad nuo 300 m<sup>2</sup> pastato fasado, atsukto vyraujančio vėjo kryptimi, efektyviai lietaus vandenį galime surinkti tik nuo 12 % fasado ploto.

## Literatūros sąrašas

1. BLOCKEN. B., D. DEROME ir J. CARMELIET. *Rainwater runoff from building facades: A review*. Building and Environment, 2013, vol 60, pp. 339-361. ISSN 0360-1323.
2. PAUKŠTYS. V., V. STANKEVIČIUS ir R. BLIŪDŽIUS. *Lietaus ir vėjo poveikis pastatų sienų drėgminei būsenai*. Kaunas: Technologija, 2002. ISBN 9955-09-176-2.
3. *Coping with water scarcity - Challenge of the twenty-first century* [interaktyvus]. Food and Agriculture Organization, 2007 [žiūrėta 2018-11-22]. Prieiga per: <http://www.fao.org/3/a-aq444e.pdf>
4. BUREK. P., Y. SATOH., G. FISCHER., MT. KAHIL., A. SCHERZER., S. TRAMBEREND., LF. NAVA ir Y. Wada, et al. *Water Futures and Solution - Fast Track Initiative: Final Report*. IIASA Working Paper, 2016.
5. BRUIJNZEEL. L. A., R. BURKARD., A. CARVAJAL., A. FRUMAU., L. KÖHLER., M. MULLIGAN., J. SCHELLEKENS., S. SCHMID ir C. TOBON. *Hydrological impacts of converting tropical montane cloud forest to pasture, with initial reference to northern Costa Rica*. Project Memorandum Form, Project, 2002.
6. BLOCKEN. B ir J. CARMELIET. The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, vol 94, 2, pp. 101-127. ISSN 0167-6105 2006.
7. BAHERU. T., A. CHOWDHURY., J. PINELLI ir G. BITSUAMLAK. Distribution of wind-driven rain deposition on low-rise buildings: Direct impinging raindrops versus surface runoff. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, vol 133, pp. 27-38 [žiūrėta 2018-09-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.06.023>.
8. DEROME. D., A. KUBILAY., T. DEFRAEYE., B. BLOCKEN ir J. CARMELIET. Ten questions concerning modeling of wind-driven rain in the built environment. *Building and Environment*, 2017, vol 114, pp. 495-506 [žiūrėta 2018-11-25]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.026>.
9. KUBILAY. A., D. DEROME., B. BLOCKEN ir J. CARMELIET. Wind-driven rain on two parallel wide buildings: Field measurements and CFD simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, vol 146, pp. 11-28 [žiūrėta 2018-11-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.006>.

10. LIETUVOS HIDROMETEOROLOGIJOS TARNYBA PRIE APLINKOS MINISTERIJOS. *Krituliai* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-06-19]. Prieiga per: <http://www.meteo.lt/lt/krituliai>
11. RSN 156-94. *Statybinė klimatologija: respublikinės statybos normos*. Vilnius: Lietuvos Respublikos statybos ir urbanistikos ministerija, 1994. ISBN 9986-576-02-4.
12. HAMMEL, Victoria. *Rain Facade* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-04-21]. Prieiga per: <http://www.victoria-hammel.com/rain-facade>
13. LIETUVOS ARCHITEKTŲ SAJUNGA. *McDonalds restoranas Kauno senamiestyje* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-10-12]. Prieiga per: [http://www.lietuvosarchitektura.lt/index.php?lang=lt&pid=3&obj\\_id=36](http://www.lietuvosarchitektura.lt/index.php?lang=lt&pid=3&obj_id=36)
14. ŠINKŪNAITĖ, G. *Pastatui tiekiamo vandens poreikių mažinimo galimybės pritaikant lietaus vandenį: baigiamasis magistro projektas*. Kauno technologijų universitetas. Kaunas, 2017.
15. ANGRILL, S., A. PETIT-BOIX., T. MORALES-PINZÓN., A. JOSA., J. RIERADEVALL ir X. GABARRELL. Urban rainwater runoff quantity and quality – A potential endogenous resource in cities? [interaktyvus] *Journal of Environmental Management*, 2017, vol 189, pp.14-21. [žiūrėta 2018-12-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.027>.
16. HAMILTON, K ir A. HAMILTON. *Human health risks for Legionella pneumophila and Mycobacterium avium complex (MAC) from potable and non-potable uses of roof-harvested rainwater*. Water Research, 2017.
17. MINJU, L., K. MIKYEONG., K. YONGHWAN ir H. MOOYOUNG. Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes: A case study in rural Vietnam [interaktyvus]. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol 200, pp. 400-406. [žiūrėta 2018-11-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.072>.
18. *Rainy's sodui ir namams* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-12]. Prieiga per: [https://eneka.lt/lietaus\\_vandens\\_naudojimas/rainys-sodui-ir-namams](https://eneka.lt/lietaus_vandens_naudojimas/rainys-sodui-ir-namams)
19. KUBILAY, A., D. DEROME., B. BLOCKEN ir J. CARMELIET. CFD simulation and validation of wind-driven rain on a building facade with an Eulerian multiphase model [interaktyvus]. *Building and Environment*, 2013, vol 61, pp. 69-81. [žiūrėta 2018-11-10] Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.005>.



20. *Wind-driven rain solver for OpenFOAM 2.4.x* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-09-02]. Prieiga per: <http://www.carmeliet.ethz.ch/research/downloads/winddrivenrainfoam.html>
21. UAB KAUNO VANDENYS. *Tarifai* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-12]. Prieiga per: <https://www.kaunovandenys.lt/paslaugos/SitePages/Tarifai.aspx>
22. *Mokslinių tyrimų metodologija: metodinė medžiaga*. Kauno technologijų universitetas, 2017.

## Priedai

1 priedas

### Stjudento koeficiento reikšmės ir koreliacijos koeficiento reikšmių skalė

**1 lentelė.** Stjudento koeficientų  $t_n$  vertės [22]

$n \backslash p$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	0,16	0,33	0,51	0,73	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,14	0,29	0,45	0,62	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,14	0,28	0,42	0,58	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,13	0,27	0,41	0,57	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,13	0,27	0,41	0,56	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,13	0,27	0,40	0,55	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,13	0,26	0,40	0,55	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,13	0,26	0,40	0,54	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,2	4,6
12	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,2	4,5
13	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
14	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,2
15	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
16	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	2,9	4,0
17	0,13	0,26	0,39	0,54	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
18	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
19	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9
20	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
21	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
22	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
23	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
24	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
25	0,13	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
26	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
27	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
28	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
29	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
30	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
40	0,13	0,26	0,39	0,53	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,6
60	0,13	0,25	0,39	0,53	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,5
120	0,13	0,25	0,39	0,53	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,6	3,4

**2 lentelė.** Koreliacijos koeficiento reikšmių skalė [22]

Labai stipri	Stipri	Vidutinė	Silpna	Labai silpna	Nėra ryšio	Labai silpna	Silpna	Vidutinė	Stipri	Labai stipri
-1	nuo -1 iki -0,7	nuo -0,7 iki 0,5	nuo -0,5 iki 0,2	nuo -0,2 iki 0	0	nuo 0 iki 0,2	nuo 0,2 iki 0,5	nuo 0,5 iki 0,7	nuo 0,7 iki 1	+1

## Sistemos surenkamo lietaus kiekio skaičiavimo rezultatai

1 lentelė. 2018 metų meteorologiniai duomenys ir skaičiavimų rezultatai

Stebėjimo laiko pradžia		Stebėjimo laiko pabaiga	Kritulių suma, mm	Vėjo greitis, m/s	Sistemos efektyvumas, %	Į 1m <sup>2</sup> iškritęs lietaus kiekis, m <sup>3</sup>	1m <sup>2</sup> surinktas vandens kiekis, m <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
2018-03-09	16:00:09	16:10:09	0.2	4.2	87.74	0.0002	0.00018
2018-03-09	16:10:09	16:20:09	0.2	4.2	87.74	0.0002	0.00018
2018-03-09	16:20:09	16:30:09	0.1	4.2	87.74	0.0001	0.00009
2018-03-30	13:30:09	13:40:09	0.8	5.8	93.45	0.0008	0.00075
2018-03-30	13:40:09	13:50:09	0.3	5.8	93.45	0.0003	0.00028
2018-03-30	13:50:09	14:00:09	0.2	5.8	93.45	0.0002	0.00019
2018-03-30	14:00:09	14:10:09	0.1	5.8	93.45	0.0001	0.00009
2018-03-30	14:20:09	14:30:09	0.1	5.8	93.45	0.0001	0.00009
2018-04-02	06:00:09	06:10:09	0.2	4.2	87.74	0.0002	0.00018
2018-04-02	06:10:09	06:20:09	0.3	4.2	87.74	0.0003	0.00026
2018-04-02	06:20:09	06:30:09	0.1	4.2	87.74	0.0001	0.00009
2018-04-02	07:50:09	08:00:09	0.3	5.7	93.15	0.0003	0.00028
2018-04-02	08:00:09	08:10:09	0.1	5.7	93.15	0.0001	0.00009
2018-04-02	08:10:09	08:20:09	0.1	5.7	93.15	0.0001	0.00009
2018-04-02	08:30:09	08:40:09	0.1	5.7	93.15	0.0001	0.00009
2018-04-02	08:40:09	08:50:09	0.1	5.7	93.15	0.0001	0.00009
2018-04-02	08:50:09	09:00:09	0.1	6.4	95.19	0.0001	0.00010
2018-04-02	09:50:09	10:00:09	0.2	7.5	98.00	0.0002	0.00020
2018-04-06	04:50:09	05:00:09	0.5	5.1	91.18	0.0005	0.00046
2018-04-06	05:00:09	05:10:09	0.3	5.1	91.18	0.0003	0.00027
2018-04-06	05:10:09	05:20:09	0.1	5.1	91.18	0.0001	0.00009
2018-04-09	17:10:08	17:20:08	5.1	4	86.88	0.0051	0.00443
2018-04-09	17:20:08	17:30:08	0.5	4	86.88	0.0005	0.00043
2018-04-09	18:20:08	18:30:08	0.1	4	86.88	0.0001	0.00009
2018-04-09	18:30:08	18:40:08	0.2	4	86.88	0.0002	0.00017
2018-04-17	04:00:09	04:10:09	0.2	0.8	58.41	0.0002	0.00012
2018-04-17	05:00:09	05:10:09	0.2	0.3	41.06	0.0002	0.00008
2018-04-17	05:10:09	05:20:09	0.2	0.3	41.06	0.0002	0.00008
2018-04-17	05:20:09	05:30:09	0.2	0.3	41.06	0.0002	0.00008
2018-04-17	05:30:09	05:40:09	0.2	0.3	41.06	0.0002	0.00008
2018-04-17	05:40:09	05:50:09	0.1	0.3	41.06	0.0001	0.00004
2018-04-17	05:50:09	06:00:09	0.1	0.3	41.06	0.0001	0.00004
2018-04-17	08:00:08	08:10:08	0.3	1	62.36	0.0003	0.00019
2018-04-17	08:10:08	08:20:08	0.4	1	62.36	0.0004	0.00025
2018-04-17	08:20:08	08:30:08	0.3	1	62.36	0.0003	0.00019
2018-04-17	08:30:08	08:40:08	0.2	1	62.36	0.0002	0.00012
2018-04-17	08:40:08	08:50:08	0.1	1	62.36	0.0001	0.00006

1 lent. tęsinys

1	2	3	4	5	6	7	8
2018-04-24	22:40:09	22:50:09	0.2	3.9	86.43	0.0002	0.00017
2018-04-26	15:00:09	15:10:09	1.1	3	81.79	0.0011	0.00090
2018-04-26	15:10:09	15:20:09	1.2	3	81.79	0.0012	0.00098
2018-04-26	15:20:09	15:30:09	0.1	3	81.79	0.0001	0.00008
2018-04-27	09:50:08	10:00:08	0.7	5.3	91.86	0.0007	0.00064
2018-06-02	07:00:08	07:10:08	5.4	3.8	85.97	0.0054	0.00464
2018-06-02	07:10:08	07:20:08	0.2	3.8	85.97	0.0002	0.00017
2018-06-02	07:20:08	07:30:08	0.9	3.8	85.97	0.0009	0.00077
2018-06-02	07:30:08	07:40:08	0.9	3.8	85.97	0.0009	0.00077
2018-06-02	07:40:08	07:50:08	0.8	3.8	85.97	0.0008	0.00069
2018-06-02	07:50:08	08:00:08	1.4	3.8	85.97	0.0014	0.00120
2018-06-02	17:30:08	17:40:08	0.1	4.2	87.74	0.0001	0.00009
2018-06-02	17:40:08	17:50:08	0.2	4.2	87.74	0.0002	0.00018
2018-06-19	13:50:08	14:00:08	1	6.6	95.74	0.001	0.00096
2018-06-19	14:00:08	14:10:08	0.1	6.6	95.74	0.0001	0.00010
2018-06-23	23:20:08	23:30:08	0.4	1.9	73.71	0.0004	0.00029
2018-06-23	23:30:08	23:40:08	0.4	1.9	73.71	0.0004	0.00029
2018-06-23	23:40:08	23:50:08	0.5	1.9	73.71	0.0005	0.00037
2018-06-23	23:50:08	00:00:08	0.1	1.9	73.71	0.0001	0.00007
2018-06-24	09:50:08	10:00:08	0.5	3.1	82.37	0.0005	0.00041
2018-06-24	12:00:09	12:10:09	0.1	4	86.88	0.0001	0.00009
2018-06-24	12:10:09	12:20:09	0.3	4	86.88	0.0003	0.00026
2018-06-24	12:20:09	12:30:09	0.8	4	86.88	0.0008	0.00070
2018-06-24	12:30:09	12:40:09	0.3	4	86.88	0.0003	0.00026
2018-06-24	12:40:09	12:50:09	0.2	4	86.88	0.0002	0.00017
2018-06-24	12:50:09	13:00:09	0.2	4	86.88	0.0002	0.00017
2018-06-24	20:30:08	20:40:08	0.3	0.3	41.06	0.0003	0.00012
2018-06-24	20:40:08	20:50:08	0.2	0.3	41.06	0.0002	0.00008
2018-06-24	20:50:08	21:00:08	0.5	0.3	41.06	0.0005	0.00021
2018-06-24	21:00:08	21:10:08	0.3	0.4	46.15	0.0003	0.00014
2018-06-24	21:10:08	21:20:08	0.2	0.4	46.15	0.0002	0.00009
2018-06-25	03:50:09	04:00:09	0.1	1	62.36	0.0001	0.00006
2018-06-25	04:00:09	04:10:09	0.1	1	62.36	0.0001	0.00006
2018-06-25	04:10:09	04:20:09	0.1	1	62.36	0.0001	0.00006
2018-06-25	04:30:09	04:40:09	0.1	1	62.36	0.0001	0.00006
2018-07-02	20:40:09	20:50:09	0.6	1.4	68.31	0.0006	0.00041
2018-07-02	20:50:09	21:00:09	0.4	1.4	68.31	0.0004	0.00027
2018-07-02	23:00:08	23:10:08	0.1	2.9	81.19	0.0001	0.00008
2018-07-02	23:10:08	23:20:08	0.1	2.9	81.19	0.0001	0.00008
2018-07-02	23:20:08	23:30:08	0.2	2.9	81.19	0.0002	0.00016
2018-07-02	23:30:08	23:40:08	0.1	2.9	81.19	0.0001	0.00008
2018-07-02	23:40:08	23:50:08	0.1	2.9	81.19	0.0001	0.00008
2018-07-03	07:10:09	07:20:09	0.2	2.7	79.93	0.0002	0.00016
2018-07-03	07:50:09	08:00:09	0.1	2.7	79.93	0.0001	0.00008

1	2	3	4	5	6	7	8
2018-07-03	08:00:09	08:10:09	0.1	3.2	82.93	0.0001	0.00008
2018-07-03	08:30:09	08:40:09	0.1	3.2	82.93	0.0001	0.00008
2018-07-03	09:20:08	09:30:08	0.5	4	86.88	0.0005	0.00043
2018-07-03	09:30:08	09:40:08	0.2	4	86.88	0.0002	0.00017
2018-07-03	16:40:09	16:50:09	0.5	6.1	94.35	0.0005	0.00047
2018-07-03	16:50:09	17:00:09	0.6	6.1	94.35	0.0006	0.00057
2018-07-03	17:10:09	17:20:09	0.5	4.5	88.96	0.0005	0.00044
2018-07-03	17:20:09	17:30:09	0.2	4.5	88.96	0.0002	0.00018
2018-07-03	17:30:09	17:40:09	0.2	4.5	88.96	0.0002	0.00018
2018-07-03	17:40:09	17:50:09	0.1	4.5	88.96	0.0001	0.00009
2018-07-03	17:50:09	18:00:09	0.1	4.5	88.96	0.0001	0.00009
2018-07-03	18:00:09	18:10:09	0.2	4.2	87.74	0.0002	0.00018
2018-07-03	18:10:09	18:20:09	0.1	4.2	87.74	0.0001	0.00009
2018-07-03	18:20:09	18:30:09	0.1	4.2	87.74	0.0001	0.00009
2018-07-03	18:30:09	18:40:09	0.1	4.2	87.74	0.0001	0.00009
2018-07-03	18:50:09	19:00:09	0.4	4.2	87.74	0.0004	0.00035
2018-07-03	19:00:09	19:10:09	0.3	4.3	88.16	0.0003	0.00026
2018-07-03	19:10:09	19:20:09	0.3	4.3	88.16	0.0003	0.00026
2018-07-03	19:20:09	19:30:09	0.6	4.3	88.16	0.0006	0.00053
2018-07-03	19:30:09	19:40:09	0.3	4.3	88.16	0.0003	0.00026
2018-07-03	19:40:09	19:50:09	0.3	4.3	88.16	0.0003	0.00026
2018-07-03	19:50:09	20:00:09	0.2	4.3	88.16	0.0002	0.00018
2018-07-03	20:00:09	20:10:09	0.3	3.6	85.02	0.0003	0.00026
2018-07-03	20:10:09	20:20:09	0.2	3.6	85.02	0.0002	0.00017
2018-07-03	20:20:09	20:30:09	0.2	3.6	85.02	0.0002	0.00017
2018-07-03	20:30:09	20:40:09	0.2	3.6	85.02	0.0002	0.00017
2018-07-03	20:40:09	20:50:09	0.5	3.6	85.02	0.0005	0.00043
2018-07-03	21:00:08	21:10:08	0.4	3.1	82.37	0.0004	0.00033
2018-07-03	21:10:08	21:20:08	0.1	3.1	82.37	0.0001	0.00008
2018-07-03	21:20:08	21:30:08	0.2	3.1	82.37	0.0002	0.00016
2018-07-03	21:30:08	21:40:08	0.1	3.1	82.37	0.0001	0.00008
2018-07-03	21:50:08	22:00:08	0.1	3.1	82.37	0.0001	0.00008
2018-07-03	22:00:08	22:10:08	0.1	3.3	83.48	0.0001	0.00008
2018-07-03	22:10:08	22:20:08	0.5	3.3	83.48	0.0005	0.00042
2018-07-03	22:20:08	22:30:08	0.2	3.3	83.48	0.0002	0.00017
2018-07-03	22:30:08	22:40:08	0.2	3.3	83.48	0.0002	0.00017
2018-07-03	22:40:08	22:50:08	0.1	3.3	83.48	0.0001	0.00008
2018-07-03	22:50:08	23:00:08	0.2	3.3	83.48	0.0002	0.00017
2018-07-04	02:00:09	02:10:09	0.1	4.1	87.32	0.0001	0.00009
2018-07-04	02:10:09	02:20:09	0.3	4.1	87.32	0.0003	0.00026
2018-07-04	02:20:09	02:30:09	0.1	4.1	87.32	0.0001	0.00009
2018-07-04	02:30:09	02:40:09	0.1	4.1	87.32	0.0001	0.00009
2018-07-15	02:10:08	02:20:08	3.1	1.8	72.75	0.0031	0.00226
2018-07-15	02:20:08	02:30:08	1.7	1.8	72.75	0.0017	0.00124
2018-07-15	02:30:08	02:40:08	1.9	1.8	72.75	0.0019	0.00138

1	2	3	4	5	6	7	8
2018-07-15	02:50:08	03:00:08	0.1	1.8	72.75	0.0001	0.00007
2018-08-05	10:00:09	10:10:09	0.6	5.5	92.51	0.0006	0.00056
2018-08-05	10:10:09	10:20:09	4	5.5	92.51	0.004	0.00370
2018-08-05	10:20:09	10:30:09	0.3	5.5	92.51	0.0003	0.00028
2018-08-05	10:30:09	10:40:09	0.2	5.5	92.51	0.0002	0.00019
2018-08-05	10:50:09	11:00:09	0.2	4.9	90.47	0.0002	0.00018
2018-08-05	11:00:08	11:10:08	0.1	4.9	90.47	0.0001	0.00009
2018-08-10	19:40:08	19:50:08	0.4	5.5	92.51	0.0004	0.00037
2018-08-10	19:50:08	20:00:08	0.2	5.5	92.51	0.0002	0.00019
2018-08-14	15:00:08	15:10:08	3.4	11.6	105.72	0.0034	0.00359
2018-08-14	15:10:08	15:20:08	0.4	11.6	105.72	0.0004	0.00042
2018-08-14	15:20:08	15:30:08	0.3	11.6	105.72	0.0003	0.00032
2018-08-14	15:30:08	15:40:08	0.1	11.6	105.72	0.0001	0.00011
2018-08-24	18:00:08	18:10:08	0.1	3.6	85.02	0.0001	0.00009
2018-08-24	18:10:08	18:20:08	0.1	3.6	85.02	0.0001	0.00009
2018-08-24	18:20:08	18:30:08	0.3	3.6	85.02	0.0003	0.00026
2018-08-24	18:30:08	18:40:08	0.2	3.6	85.02	0.0002	0.00017
2018-08-24	18:40:08	18:50:08	0.1	3.6	85.02	0.0001	0.00009
2018-08-24	18:50:08	19:00:08	0.2	3.6	85.02	0.0002	0.00017
2018-08-25	04:00:08	04:10:08	0.9	0.6	53.32	0.0009	0.00048
2018-08-25	04:10:08	04:20:08	0.1	0.6	53.32	0.0001	0.00005
2018-08-25	04:20:08	04:30:08	0.7	0.6	53.32	0.0007	0.00037
2018-08-25	04:30:08	04:40:08	0.1	0.6	53.32	0.0001	0.00005
2018-08-26	11:40:08	11:50:08	0.4	2.4	77.84	0.0004	0.00031
2018-08-26	12:00:08	12:10:08	0.1	1.5	69.53	0.0001	0.00007
2018-08-26	12:10:08	12:20:08	0.1	1.5	69.53	0.0001	0.00007
2018-08-26	12:20:08	12:30:08	0.1	1.5	69.53	0.0001	0.00007
2018-08-26	12:30:08	12:40:08	0.4	1.5	69.53	0.0004	0.00028
2018-08-26	12:40:08	12:50:08	0.4	1.5	69.53	0.0004	0.00028
2018-08-26	12:50:08	13:00:08	0.4	1.5	69.53	0.0004	0.00028
2018-08-26	13:00:08	13:10:08	0.3	4.8	90.11	0.0003	0.00027
2018-08-26	13:20:08	13:30:08	0.4	4.8	90.11	0.0004	0.00036
2018-08-26	13:30:08	13:40:08	0.3	4.8	90.11	0.0003	0.00027
2018-08-26	13:40:08	13:50:08	0.3	4.8	90.11	0.0003	0.00027
2018-08-26	13:50:08	14:00:08	0.2	4.8	90.11	0.0002	0.00018
2018-08-26	15:00:08	15:10:08	0.2	1.5	69.53	0.0002	0.00014
2018-08-26	15:10:08	15:20:08	0.1	1.5	69.53	0.0001	0.00007
2018-08-26	15:30:08	15:40:08	0.1	1.5	69.53	0.0001	0.00007
2018-08-26	15:50:08	16:00:08	0.1	1.5	69.53	0.0001	0.00007
2018-08-26	16:00:08	16:10:08	0.1	1.2	65.58	0.0001	0.00007
2018-08-26	16:10:08	16:20:08	0.1	1.2	65.58	0.0001	0.00007
2018-08-26	17:30:09	17:40:09	0.2	1.1	64.04	0.0002	0.00013
2018-09-22	04:00:09	04:10:09	0.3	5.2	91.52	0.0003	0.00027
2018-09-22	04:10:09	04:20:09	0.1	5.2	91.52	0.0001	0.00009
2018-09-22	04:20:09	04:30:09	0.2	5.2	91.52	0.0002	0.00018

1 lent. tęsinys

1	2	3	4	5	6	7	8
2018-09-22	04:30:09	04:40:09	0.5	5.2	91.52	0.0005	0.00046
2018-09-22	05:20:09	05:30:09	0.1	4	86.88	0.0001	0.00009
2018-09-23	16:00:09	16:10:09	0.7	2.7	79.93	0.0007	0.00056
2018-09-26	14:10:08	14:20:08	0.4	7.8	98.69	0.0004	0.00039
2018-09-26	14:20:08	14:30:08	0.2	7.8	98.69	0.0002	0.00020
2018-09-26	14:30:08	14:40:08	0.1	7.8	98.69	0.0001	0.00010
2018-09-26	14:50:08	15:00:08	0.1	7.8	98.69	0.0001	0.00010
2018-09-26	22:20:09	22:30:09	0.2	7.6	98.23	0.0002	0.00020
2018-09-26	23:50:09	00:00:09	0.3	7.4	97.76	0.0003	0.00029
2018-09-27	00:10:09	00:20:09	0.1	6.9	96.53	0.0001	0.00010
2018-09-27	00:20:09	00:30:09	0.1	6.9	96.53	0.0001	0.00010
2018-09-27	00:30:09	00:40:09	0.2	6.9	96.53	0.0002	0.00019
2018-09-27	00:40:09	00:50:09	0.1	6.9	96.53	0.0001	0.00010
2018-09-27	01:00:08	01:10:08	0.1	6.3	94.92	0.0001	0.00009
2018-09-27	04:10:08	04:20:08	0.2	4.1	87.32	0.0002	0.00017
2018-09-28	04:30:08	04:40:08	0.6	6.7	96.01	0.0006	0.00058
2018-09-28	04:40:08	04:50:08	0.2	6.7	96.01	0.0002	0.00019
2018-09-28	04:50:08	05:00:08	0.1	6.7	96.01	0.0001	0.00010
2018-09-28	05:00:08	05:10:08	0.2	6.2	94.63	0.0002	0.00019
2018-09-28	05:10:08	05:20:08	0.1	6.2	94.63	0.0001	0.00009
2018-09-28	11:00:09	11:10:09	1.4	6.9	96.53	0.0014	0.00135
2018-09-28	11:10:09	11:20:09	0.4	6.9	96.53	0.0004	0.00039
2018-09-28	11:20:09	11:30:09	0.1	6.9	96.53	0.0001	0.00010
2018-10-02	13:10:09	13:20:09	0.1	5.6	92.83	0.0001	0.00009
2018-10-02	13:20:09	13:30:09	0.7	5.6	92.83	0.0007	0.00065
2018-10-03	15:40:09	15:50:09	0.4	5.6	92.83	0.0004	0.00037
2018-10-07	15:00:08	15:10:08	0.3	6.1	94.35	0.0003	0.00028
2018-10-23	18:00:08	18:10:08	0.2	3.8	85.97	0.0002	0.00017
2018-10-23	18:40:08	18:50:08	0.4	3.8	85.97	0.0004	0.00034
2018-10-23	18:50:08	19:00:08	0.1	3.8	85.97	0.0001	0.00009
2018-10-25	08:00:09	08:10:09	0.3	2.8	80.57	0.0003	0.00024
2018-10-26	02:00:08	02:10:08	0.4	0.1	21.62	0.0004	0.00009
2018-10-26	02:20:08	02:30:08	0.1	0.1	21.62	0.0001	0.00002
2018-10-27	13:00:08	13:10:08	0.6	8	99.14	0.0006	0.00059
2018-10-27	13:10:08	13:20:08	0.8	8	99.14	0.0008	0.00079
2018-10-27	13:20:08	13:30:08	0.7	8	99.14	0.0007	0.00069
<b>Iš viso:</b>						0.0817	0.06867

### **„OpenFOAM“ Programinis kodas ir rezultatai**

Pilnas „OpenFOAM“ aplinkoje naudojamas programinis kodas, rezultatų bylos bei kita informacija pateikta prisegtame kompaktiniame diske.