



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Centralizuoto šilumos tinklo darbo analizė integruojant akumuliacinę talpą

Magistro baigiamasis projektas

Projektą parengė

Matas Leonas

Projektui vadovavo

Doc. dr. Egidijus Puida

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Centralizuoto šilumos tinklo darbo analizė integruojant akumuliacinę talpą

Magistro baigiamasis projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Projektą parengė

Matas Leonas

Projektui vadovavo

Doc. dr. Egidijus Puida

Projektą recenzavo

Doc. dr. Rolandas Jonynas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Matas Leonas

Centralizuoto šilumos tinklo darbo analizė integruojant akumuliacinę talpą

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas (-a) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis (-i) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. visi baigiamajame projekte pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena projekto dalis nėra plagijuota nuo spausdintinių ar elektroninių šaltinių, o visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. baigiamajame projekte tinkamai laikiausi asmens duomenų apsaugos reikalavimų, nenaudojau neskelbtinų ar konfidencialių duomenų be teisėto pagrindo, o jei juos naudoju, jie yra tinkamai nuasmeninti;
4. jei rengiant baigiamąjį projektą naudojausi dirbtinio intelekto (toliau – DI) ar kitais automatizuotais įrankiais, juos taikiau pagal Universitete nustatytą tvarką, nepažeisdamas (-a) akademinio sąžiningumo principų;
5. nesumokėjau ir nesu įsipareigojęs (-usi) mokėti jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis jokiam fiziniam ar juridiniam asmeniui;
6. suprantu, kad išaiškėjus akademinio nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikoma atsakomybė pagal Universitete nustatytą tvarką ir galiu būti pašalintas (-a) iš Universiteto; akademinio nesąžiningumo atvejis gali būti nagrinėjamas ir po studijų baigimo, inicijuojant kvalifikacinio laipsnio atšaukimo procedūrą.



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Matas Leonas

1. Projekto tema

Centralizuoto šilumos tinklo darbo analizė integruojant akumuliacinę talpą

(Lietuvių kalba)

Analysis of the Operation of a District Heating Network with the Integration of a Thermal Energy Storage Tank

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: išanalizuoti akumuliacinės talpos integravimo į Kauno CŠT sistemą galimybę, įvertinant sistemos techninius parametrus bei galimą eksploatacinį ir ekonominį efektą realaus tinklo kontekste.

Uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros ir praktinių pavyzdžių apžvalgą apie ŠAT taikymą CŠT sistemose, akcentuojant stratifikaciją, nuostolius ir valdymo strategijas.
2. Pateikti Kauno CŠT esamą situaciją, apibendrinti Petrašiūnų katilinės, CŠT tinklo pradinis duomenis bei ŠAT techninius parametrus.
3. Sukurti skaičiuojamąjį ŠAT darbo modelį CŠT tinkle (įkrovimo/iškrovimo logika, energijos balansas, nuostoliai) ir jį pritaikyti pagal praėjusių metų tinklo apkrovų bei aukcionų duomenis.
4. Įvertinti ŠAT eksploataciją pagal sukurtą modelį: piko apkrovų mažinimui, rezervinių (dujinių) įrenginių pakeitimui, šaltinių darbo stabilumui (įjungimų/išjungimų mažinimas) pagal pasirinktus scenarijus.
5. Atlikti ekonominį vertinimą iš skirtingų perspektyvų (šilumos gamintojas / vartotojas), atsižvelgiant į kainodarą ir sezoniškumą, bei atlikti jautrumo analizę kainų santykiui ir valdymo strategijai.
6. Suformuluoti išvadas ir rekomendacijas dėl ŠAT integravimo ir valdymo Kauno CŠT sistemoje.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Projektas turi atitikti KTU rašto darbų rengimo metodinių nurodymų reikalavimus ir MIDF baigiamųjų projektų rengimo ir gynimo metodinius reikalavimus.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Leonas, Matas. Centralizuoto šilumos tinklo darbo analizė integruojant akumuliacinę talpą. Magistro baigiamasis projektas / projektui vadovavo doc. Egidijus Puida; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir studijų kryptių grupė: energijos inžinerija, inžineriniai mokslai.

Reikšminiai žodžiai: šilumos akumuliacinė talpa; centralizuotas šilumos tiekimas; stratifikacija; šiluminės energijos kaupimas; šilumos nuostoliai tinkle, CŠT modernizacija, simuliacija.

Kaunas, 2026. 80 p.

Santrauka

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos yra svarbi miesto energetikos infrastruktūros dalis, todėl jų efektyvumas, lankstumas ir patikimumas tampa vis aktualesni. Didėjant energijos kainų svyravimams, siekiant mažinti iškastinio kuro naudojimą ir efektyviau išnaudoti biokuro šilumą, šilumos akumuliacinės talpos gali būti taikomos kaip praktinis sprendimas šilumos gamybos ir vartojimo netolygumams mažinti. Tokios talpos leidžia sukaupti perteklinę šilumą mažesnės apkrovos metu ir ją panaudoti tada, kai tinkle padidėja šilumos poreikis arba reikia sumažinti brangesnių piko šaltinių darbą.

Šiame magistro baigiamajame projekte analizuojamas šilumos akumuliacinės talpos integravimas į Kauno centralizuoto šilumos tiekimo sistemą. Darbo objektas – Petrašiūnų katilinės teritorijoje planuota statyti šilumos akumuliacinė talpa ir jos galimas darbas atkartotomis realiomis Kauno CŠT tinklo sąlygomis. Darbo tikslas – įvertinti šios talpos techninį, eksploatacinį ir ekonominį poveikį Kauno šilumos tiekimo sistemai, šilumos gamintojui ir vartotojui. Darbe apžvelgiamos šilumos akumuliacijos technologijos, jų veikimo principai, stratifikacijos reikšmė, šilumos nuostoliai ir valdymo strategijos. Skaičiuojamajame modelyje naudojami 2025 metų Kauno CŠT tinklo apkrovų ir šilumos gamintojų darbo duomenys. Modeliavime nagrinėjami trys scenarijai: gamtinių dujų gamybos pakeitimas biokuro šiluma, trumpalaikių galios kitimo greičio problemų kompensavimas ir abiejų funkcijų sujungimas į bendrą valdymo strategiją.

Gauti rezultatai parodė, kad akumuliacinė talpa gali pagerinti sistemos lankstumą ir sumažinti dujinių įrenginių poreikį, tačiau jos nauda tiesiogiai priklauso nuo pasirinktos valdymo logikos bei gamintojų darbo strategijos. A ir C scenarijuose per metus pakeičiama apie 5,9–6,4 % 2025 metais išmatuotos dujinės šilumos gamybos, o išvengiamas CO₂ kiekis siekia apie 152–155 tonas per metus. Didžiausias metinis iškrovimas gautas C scenarijuje, kai talpa pradinėje būsenoje buvo pilnai įkrauta – 864,3 MWh per metus. Šiuo atveju taip pat pasiektas didžiausias ekvivalentinių pilnų ciklų skaičius – 3,9 ciklo per metus.

Apibendrinant galima teigti, kad šilumos akumuliacinė talpa Kauno CŠT sistemoje turi techninį potencialą mažinti dujų naudojimą, kompensuoti apkrovų svyravimus ir didinti tinklo lankstumą. Vis dėlto ekonominis pagrįstumas priklauso nuo talpos išnaudojimo intensyvumo, rinkos kainų, įkrovimo galimybių ir valdymo strategijos, todėl talpa turėtų būti vertinama kaip aktyvus visos sistemos optimizavimo įrankis.

Leonas, Matas. Analysis of the Operation of a District Heating Network with the Integration of a Thermal Energy Storage Tank. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Egidijus Puida; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and study field group: Energy Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: thermal energy storage tank; district heating; stratification; thermal energy storage; heat losses in the network; district heating modernisation, simulation.

Kaunas, 2026. 80 p.

Summary

District heating systems are an important part of urban energy infrastructure, therefore their efficiency, flexibility and reliability are becoming increasingly more important. Due to energy price fluctuations, the need to reduce fossil fuel use and the aim to use biomass heat more efficiently, thermal energy storage tanks can be applied as a practical solution for reducing the mismatch between heat production and demand. Such a tank can store surplus heat during lower-load periods and supply it later when the network demand increases or when expensive peak-load production has to be reduced.

This Master's Final Degree Project analyses the integration of a thermal energy storage tank into the Kaunas district heating system. The object of the project is the planned thermal energy storage tank in the territory of Petrašiūnai boiler house and its possible operation under real conditions of the Kaunas district heating network. The aim of the project is to evaluate the technical, operational and economic effect of this tank on the Kaunas heat supply system. The project reviews thermal energy storage technologies, their operating principles, the importance of stratification, heat losses and control strategies. The computational model uses 2025 hourly data of the Kaunas district heating network load and heat producer operation. Three scenarios are analysed: replacement of natural gas heat production with biomass heat, compensation of short-term power ramping gaps, and the combination of both functions into one control strategy.

The results showed that the thermal energy storage tank can improve system flexibility and reduce the need for gas-fired units, but its benefit directly depends on the selected control logic. In scenarios A and C, approximately 5.9–6.4% of the measured natural gas heat production in 2025 is replaced. The avoided CO₂ emissions reach approximately 152–155 t per year. The highest annual discharge is obtained in scenario C with a fully charged initial state, reaching 864.3 MWh per year. The same case also gives the highest number of equivalent full cycles, 3.9 cycles per year.

In conclusion, the thermal energy storage tank has technical potential in the Kaunas district heating system. It can help reduce natural gas use, compensate load fluctuations and increase network flexibility. However, its economic feasibility depends on the intensity of tank utilisation, market prices, charging opportunities and the selected control strategy.

Therefore, the tank should be considered not only as a reaction to separate gas production events, but as an active optimisation tool for the whole district heating system.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Santrumpų ir terminų sąrašas	13
Įvadas.....	14
1. Literatūros apžvalga.....	15
1.1. Europos Sąjungos šilumos sektoriaus apžvalga	15
1.2. Išmaniųjų centralizuoto šilumos sistemų vystymas Europoje	15
1.3. Šilumos ir energijos akumuliacinio technologijų Europoje ir Lietuvoje apžvalga	16
1.4. Šilumos akumuliacinio talpų tipai ir veikimo principai	18
1.4.1. Pagrindinės šilumos akumuliacinio talpų kategorijos.....	18
1.4.2. Jutiminės šilumos kaupimo talpos	21
1.4.3. Stratifikacija ir srautų valdymas jutimines talpose.....	22
1.4.4. Fazės pokyčių medžiagų talpos.....	23
1.4.5. Hibridinės šilumos kaupimo talpos	23
1.4.6. Termocheminės šilumos kaupimo talpos.....	24
1.4.7. Technologinės inovacijos:.....	24
1.5. Tipinių ŠAT parametrų palyginimas.....	24
1.5.1. Šilumos kaupimo talpų apibendrinimas	25
1.6. Šiluminės energijos akumuliacinio medžiagos	26
1.6.1. Savitosios šilumos kaupimo technologijos talpų medžiagos.....	26
1.6.2. Izoliacinės medžiagos ir šilumos nuostolių kontrolė	26
1.6.3. Fazinio virsmo talpų medžiagos	27
1.6.4. Fazės keitimo medžiagų ciklinis stabilumas	27
1.6.5. Fazės keitimo medžiagų savybių palyginimas	28
1.6.6. Termocheminių talpų medžiagos.....	29
2. Teorija ir praktika: ŠAT technologijų taikymas Lietuvoje ir Europoje.....	30
3. Metodinė dalis.....	31
3.1. Kauno CŠT tinklas ir Petrašiūnų katilinė	31
3.2. Petrašiūnų akumuliacinio talpos originalaus projekto tikslas.....	31
3.3. Akumuliacinio talpos paskirtis tinkle	32
3.4. Akumuliacinio talpos valdymo strategija CŠT tinkle	33
3.5. Tikrosios situacijos ir modelio sąsaja	33
3.6. Šešiolikos gamintojų rinkinys	33
3.7. Reguliavimo aplinka — VERT, Šilumos ūkio įstatymas, Baltpool.....	34
3.8. Simuliacija, rinka ir strategija	36
3.9. Šilumos akumuliacinio technologija.....	37
3.10. Petrašiūnų talpos projektiniai parametrai	37
3.11. Simuliacijos metodika ir įgyvendinimas	38
3.11.1. Duomenų pagrindas ir paruošimo srautas.....	38
3.11.2. Talpos modelis, efektingas tūris ir šilumos praradimas aplinkai	39
3.11.3. Trys pradinės sąlygos.....	40
3.11.4. Operatoriaus funkcijos.....	40
3.11.5. Dujinių įrenginių dispečerizavimo taisyklė	41
3.11.6. A scenarijus – dujų pakeitimas	41

3.11.7.	B scenarijus – galios kitimo problemos užpildymas.....	41
3.11.8.	C scenarijus – sujungti A ir B scenarijai.....	43
3.11.9.	Numatytoji įkrovimo taisyklė	43
3.11.10.	Kainodara — kaupiamoji priimtos pozicijos taisyklė	43
3.11.11.	Ekonominė interpretacija — investiciniai rodikliai	43
3.11.12.	Programos kodo įgyvendinimas ir struktūra.....	44
4.	Simuliacijos rezultatai ir analizė	46
4.1.	Validavimo grafikai	46
4.2.	Šilumos gamintojų ir ŠAT tiekta šiluma tinklui	50
4.3.	Pikinė iškrovimo diena.....	53
4.4.	Akumuliavimo talpos pakrovimo procento konvergencija	55
4.5.	Dujinės kilmės šilumos pakeitimas biomasės šilumą	56
4.6.	Talpos įkrovos lygis per 2025 metus	57
4.7.	Ciklai per metus.....	60
4.8.	Išvengiamas anglies dvideginio kiekis.....	60
4.9.	ŠAT veikimo žemėlapiai ir laiko juostos	61
4.10.	Iškrovimas prie skirtingos lauko temperatūros	62
4.11.	Ekonominė rezultatų lentelė	65
4.12.	Investicinių rodiklių jautrumas pradiniam kapitalui.....	66
4.13.	Pajamų duomenys.....	67
4.14.	GDV jautrumas skirtingiems parametrams	68
4.15.	Šilumos gamintojo ir vartotojo ekonominė perspektyva.....	70
	Išvados	72
	Literatūros sąrašas	73
	Priedai	76
1	priedas	76

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Skirtingų ŠAT technologijų palyginimas pagal techninius parametrus	25
1.2 lentelė. Fazės keitimo medžiagų ciklinio stabilumo palyginimas.....	28
1.3 lentelė. Fazių virsmo medžiagų savybių palyginimas	28
4 lentelė. Kauno CŠT gamintojų sąrašas su fiziniais parametrais	33
5 lentelė. Petrašiūnų ŠAT projektiniai parametrai	37
6 lentelė. Metinis biomasės šiluma pakeistos dujų šilumos kiekis	57
7 lentelė. Ekonominių rezultatų lentelė	66

Paveikslų sąrašas

1 pav. ŠAT kategorijos pagal šilumos akumuliacinio būdus	18
2 pav. ŠAT kategorijos pagal kaupimo trukmę.....	19
3 pav. ŠAT klasifikacija pagal paskirtį	20
4 pav. ŠAT kategorijos pagal mobilumą.....	20
5 pav. Vandens akumuliacinės talpos principinė veikimo schema	21
6 pav. Stratifikuotos šilumos akumuliacinės talpos veikimo schema.....	22
7 pav. Šilumos kaupimo sistemų sąnaudų ir pajėgumų palyginimas	25
8 pav. BALTPOOL šilumos pirkimo 2025-01 Kauno miesto pagrindinio aukciono lentelė	36
9 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui A, pradinei būsenai 100 %.....	46
10 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui A, pradinei būsenai 50 %.....	47
11 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui A, pradinei būsenai 0 %.....	47
12 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui B, pradinei būsenai 100 %.....	48
13 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui B, pradinei būsenai 50 %.....	48
14 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui B, pradinei būsenai 0 %.....	49
15 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui C, pradinei būsenai 100 %.....	49
16 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui C, pradinei būsenai 50 %.....	50
17 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui C, pradinei būsenai 0 %.....	50
18 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją	51
19 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją scenarijus A, pradinei būsenai 100 %	51
20 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją scenarijus B, pradinei būsenai 100 %	52
21 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją scenarijus C, pradinei būsenai 100 %	52
22 pav. Pikinė iškrovimo diena A scenarijui, pradinė būsena 100 %	53
23 pav. Pikinė iškrovimo diena B scenarijui, pradinė būsena 100 %	54
24 pav. Pikinė iškrovimo diena C scenarijui, pradinė būsena 100 %	54
25 pav. ŠAT pakrovimo procento linijos konvergencija pagal pradinę būseną A or C	55
26 pav. ŠAT pakrovimo procento linijos konvergencija pagal pradinę būseną	56
27 pav. Tinklo dujų suvartojamas kiekis pagal mėnesius per 2025, pradinė būsena 0 %.	57
28 pav. ŠAT įkrovimo lygmuo per 2025 metus, pradinė būsena 0 %.....	58
29 pav. ŠAT įkrovimo lygmuo per 2025 metus, pradinė būsena 50 %.....	58
30 pav. ŠAT įkrovimo lygmuo per 2025 metus, pradinė būsena 100 %.....	59
31 pav. Metiniai ekvivalentūs pilni ciklai, pradinė būsena 0 %	60
32 pav. Metinis išvengto CO ₂ kiekis tonomis pagal scenariju	60
33 pav. ŠAT veikimo šilumos žemėlapis, pradinė padėtis 0 %	61
34 pav. ŠAT veikimo režimo laiko juosta, pradinė būsena 0 %.....	61
35 pav. Iškvėpimas pagal lauko oro temperatūrą, scenarijus A, pradinė būsena 0 %	63
36 pav. Iškvėpimas pagal lauko oro temperatūrą, scenarijus B, pradinė būsena 0 %	63
37 pav. Iškvėpimas pagal lauko oro temperatūrą, scenarijus C, pradinė būsena 0 %	64
38 pav. Supaprastintas atsipirkimas su išlyginamąją šilumos kaina	65
39 pav. Investavimo metrikos.....	65
40 pav. Ekonominiai rodikliai vizualizuoti, pradinė būsena 0 %	66
41 pav. Scenarijų A ir C ekonominiai rodikliai vizualizuoti, pradinė būsena 0 %.....	67

42 pav. Pajamų rezultatai.....	68
43 pav. GDV jautrumo analizė, scenarijus A.....	68
44 pav. GDV jautrumo analizė, scenarijus B.....	69
45 pav. GDV jautrumo analizė, scenarijus C	69
46 pav. Šilumos gamintojo ekonominė perspektyva	71
47 pav. Vartotojo ekonominė perspektyva	71

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CO₂ – anglies dioksidas;

CŠT – centralizuotas šilumos tiekimas;

NŠG – Nepriklausomas šilumos gamintojas;

ŠAT – Šilumos akumuliacinio talpa;

PE – Petrašiūnų katilinė;

KE – Kauno Energija.

Ivadas

Šiuolaikinė energetikos sistema sparčiai keičiasi, siekiant didesnio energijos vartojimo efektyvumo ir atsinaujinančių energijos šaltinių integracijos. Didėjanti priklausomybė nuo nepastovių energijos išteklių, tokių kaip saulės ir vėjo energija, lemia augantį sistemos disbalansą tarp gamybos ir vartojimo, todėl atsiranda reikiamybė taikyti pažangius energijos kaupimo sprendimus. Centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) sektoriuje viena veiksmingiausių technologijų, leidžiančių valdyti paros bei sezono apkrovų svyravimus, yra šilumos akumuliacinės talpos. Jos leidžia kaupti perteklinę šilumą tuomet, kai šilumos gamintojai dirba ekonomiškai naudingiausiu režimu, ir naudoti ją tada, kai tinklo apkrova yra didžiausia. Tokiu būdu mažinami šilumos gamybos kaštai, gerinama įrenginių eksploatacija ir didinamas visos sistemos patikimumas.

Lietuvos CŠT sektoriuje šilumos akumuliacinės talpos įgauna vis didesnę reikšmę. Klaipėdos mieste jau veikianti apie 3000 m³ talpa įrodė, kad akumuliacija leidžia sumažinti kuro sąnaudas ir išlyginti šilumos kainų svyravimus buitiniams vartotojams. Remiantis šiais rezultatais, analogiškas sprendimas pradėtas įgyvendinti Kaune, kur AB „Kauno energija“ kartu su Europos investicijų banko finansavimu pradėjo planuoti įsirengti akumuliacinę talpą Petrašiūnų katilinės teritorijoje. Kauno CŠT sistema pasižymi dideliu vartotojų skaičiumi, dideliais šilumos poreikio svyravimais tarp paros laikotarpių ir sezonų, taip pat priklausomybe nuo katilinių darbo režimų. Tai reiškia, kad akumuliacinės talpos čia gali atlikti ne tik gamybos optimizavimo, bet ir tinklo stabilizavimo bei avarinio rezervo funkcijas.

Augant sisteminei apkrovų dinamikai ir siekiant sumažinti šilumos gamintojų įjungimų bei išjungimų skaičių, svarbu įvertinti, kaip akumuliacinė talpa veiks realiomis tinklo sąlygomis, kokie bus jos šilumos nuostoliai, įkrovimo ir iškrovimo režimai bei kokį ekonominį efektą ji gali suteikti šilumos gamintojui ar vartotojui. Praktikoje naudojantis šilumos akumuliacinės talpos galimybėmis galima ženkliai sumažinti brangių piko šaltinių įsijungimų skaičių ir padėti stabilizuoti temperatūrinius tinklo režimus, tačiau tam reikalinga tinkama operacinio šilumos įrenginių valdymo strategija. Pagrindiniai strateginiai uždaviniai būtų išsiaiškinti kaip išnaudoti talpą kuo efektyviau bei užtikrinti stratifikaciją (vandens temperatūrinį sluoksniavimą) talpos viduje, kad tiekimas būtų priimtinas gamybos standartams realybėje.

Mokslinio darbo tikslas – išanalizuoti akumuliacinės talpos integravimo į Kauno CŠT sistemą galimybę, įvertinant sistemos techninius parametrus bei galimą eksploatacinį ir ekonominį efektą realaus tinklo kontekste.

Leonas, Matas. Centralizuoto šilumos tinklo darbo analizė, integruojant akumuliacinę talpą.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Europos Sąjungos šilumos sektoriaus apžvalga

Per pastaruosius keletą metų Europos Sąjungos ir jos narių energetikos sektoriaus plėtra ir energetinės nepriklausomybės klausimas įgavo žymiai didesnę svarbą. Energijos kainų šuoliai, geopolitiniai pokyčiai išryškino pavojus Europos ekonomikai ir konkurencingumui dėl nepakankamai išvystytos energetikos infrastruktūros. Tarptautinės asociacijos „Euroheat & Power“ 2023 metų duomenimis, Europoje yra apie 19 000 centralizuoto šilumos tiekimo tinklų, kuriais yra aprūpinami beveik 80 milijonų gyventojų. Nors naudojamo kuro rūšys ir suvartojimo apimtys kiekvienoje šalyje skiriasi, bendras iškastinio kuro centralizuotam šildymui panaudojimas sumažėjo 7,7 %, anglių vartojimas krito 12,3 %, o gamtinių dujų – 3,6 %. Šildymui naudojamo bioenergijos (visos energetikos rūšis gaunama iš biologinių šaltinių) dalis sudaro apie 34,7 % bendro suvartojimo, o šilumos siurblių ir elektrinių katilinių skaičius sparčiai auga kiekvienais metais. Papildomai Europoje sparčiai didėja šaldymo poreikis. Pagrindiniai ateities šaldymo technologijos vystymo planai žadami Šiaurės Europoje bei Prancūzijoje ir Austrijoje [1].

1.2. Išmaniųjų centralizuoto šilumos sistemų vystymas Europoje

Dekarbonizacija šildymo ir šaldymo sektoriuje yra vienas pagrindinių uždavinių Europos Sąjungos energetikos politikos prioritetų plane. Europos Komisijos mokslinės tarnybos (JRC) duomenimis šis sektorius sudaro beveik pusę visų Europos energijos sąnaudų. Todėl CŠT sistemų vystymas po truputį tampa ne tik paprastas būdas užtikrinti šilumos tiekimui mieste, bet ir svarbus uždavinys Europai siekiant žaliojo kurso. Pirmosios centralizuoto šilumos tiekimo sistemos dirbo naudodamos iškastinį kurą, kurį deginant buvo gaunamas iki 200 °C temperatūros garas. Tada iš šilumos gamintojų garas kaip šilumnešis buvo paskirstytas per vamzdynus vartotojams. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemoms modernėjant, šilumnešis buvo pakeistas į suslėgtą vandenį, o tiekiamo šilumnešio didžiausia temperatūra sumažėjo iki 100 °C ar mažiau. Mažesnė tiekiamo šilumnešio temperatūra reiškia, kad vandeniui tekant vamzdynu iki vartotojų, prarandama mažiau šilumos, o mažesni energijos nuostoliai padeda mažinti kuro sąnaudas. Tobulinant CŠT tinklus buvo atsižvelgiama ne tik į energijos naudojimo efektyvumą, bet ir į pažangias valdymo ir infrastruktūros strategijas. Vamzdynų atnaujinimai, tiekiamo šilumnešio temperatūros mažinimas, vartotojų pastatų terminės izoliacijos gerinimas, tai sprendimai, kurie padėjo efektyviau naudoti gaunamą šilumą. Plečiantis energetikos sektoriui ir atsirandant naujoms technologijoms, prie CŠT buvo pradėta prijungti atsinaujinančius energijos šaltinius, šilumos talpyklas, industrinius kompleksus, kurie gali tiekti atliekamą šilumą. Šiuolaikinės, vadinamos „išmaniaisiais centralizuoto šilumos tiekimo tinklais“ sistemos yra sudėtingos, turi daugybę šilumos tiekimo bei vartojimo taškų. Šioms sistemoms taikomos pažangiausios valdymo strategijos, naudojami išmanieji jutikliai bei skaitikliai, padedantys rinkti reikiamą informaciją [2].

Šilumos tiekimas miesto gyventojams yra neatsiejama modernios kasdienybės dalis, todėl šios sistemos turi tobulėti kartu su miestais ir sparčiai kintančiomis technologijomis. Technologijų pasirengimo lygių (angl. *TRL – Technology Readiness Levels*) skalė yra standartizuota 1–9 balų sistema. Ši sistema naudojama technologijų brandai nustatyti, kur

1 reiškia pradinę idėją, o 9 – visiškai išstobulintą produktą. Pagal JRC, pavieniai CŠT sistemų komponentai, tokie kaip jutikliai, šilumos gamybos ar išgavimo įrenginiai, artėja arba jau yra pasiekę galutinius technologijos pasirengimo ar inovacinius lygmenis. Vis dėlto, šių brandžių technologijų integravimas CŠT – išmaniųjų CŠT kūrimas – dar turi inovacijų potencialo. Ypatingas potencialas pažangai matomas integruojant dirbtinį intelektą į šilumos tiekimo ir vartojimo valdymo sistemas. Jutikliais ir dirbtiniu intelektu būtų galima dar labiau automatizuoti tinklo darbą ir padidinti jo efektyvumą.

Centralizuoto šilumos tiekimo tinklai yra technologiškai perspektyvūs ir labai svarbūs ne tik dekarbonizuojant aplinką, bet ir žmonių kasdienio gero gyvenimo lygiui palaikyti. Gyvenamų ir pramoninių patalpų temperatūros palaikymas yra ilgalaikė problema, kurią vienu ar kitu būdu reikia spręsti, tačiau šiuo metu, miestų mastu CŠT atrodo pranašiausias. Pagal Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) technologijų bendradarbiavimo programos „District Heating and Cooling“ duomenis, šilumos tinklai Europoje ir Kinijoje 2022 m. padėjo sumažinti anglies dioksido emisijas daugiau nei 69 mln. tonų, palyginti su šilumos gamyba dujiniais kondensaciniais katilais. Akivaizdu, kad šių sistemų autonomija, efektyvumas ir sudėtingumas tik didėja, o šios pažangos leidžia CŠT pritaikyti mūsų poreikiams daug tikslingiau ir plačiau. Tačiau praktinį diegimą riboja dideli infrastruktūros kaštai, esamų sistemų sudėtingumas bei tolygus naujovių integravimas prie senos infrastruktūros. Didelė problema, kad šilumos visada reikia ir ilgalaikis sistemos sustabdymas remontui ar atnaujinimui nėra išeitis. Dėl to šiluminių tinklų plėtra turi būti grindžiama ne tik technologiniu požiūriu, bet ir kompleksiniu ekonominiu bei instituciniu požiūriu [3].

1.3. Šilumos ir energijos akumuliacijos technologijų Europoje ir Lietuvoje apžvalga

Europos Sąjungai judant link ambicingo energetikos sektoriaus dekarbonizacijos tikslo, didėja bei sudėtingėja tiek CŠT tinklai, tiek elektros energijos sistemos. Diegiamos naujos bei skirtingos technologijos į senas infrastruktūras, taip jas tobulinant lygiagrečiai su palaikymu. Didelė tų technologijų dalis yra atsinaujinančios energijos sistemos, tokios kaip saulės elektrinės, vėjo jėgainės, hidroelektrinės, kurių generuojamas energijos kiekis kinta nevienodai. Debesuotą dieną gali trūkti saulės energijos, nevėjuotą dieną – vėjo energijos, tačiau šių kompleksinių sistemų tikslas yra visada patenkinti paklausą. Todėl problema kaip suvaldyti pasiūlos bei paklausos nepastovumą su kintančiais generuojamos energijos ištekliais miesto mastu tampa vis aktualesnė. Siekiant padėti išspręsti šią problemą Europos Komisijos mokslinė tarnyba išleido dokumentą, pavadinimu „Komisijos rekomendacijos dėl energijos kaupimo įgyvendinimo valstybėse narėse“ (angl. *Implementation of Commission Recommendation on Energy Storage in the Member States*) [4], kuriame siūloma pasitelkti energijos akumuliacijos talpas. Šiame 2026 m. dokumente komisija pabrėžia, kad būtent energijos tinklų lankstumas padės patenkinti svyruojančią pasiūlą bei paklausą. Padidėjęs lankstumas gali pasireikšti integruotais energijos kaupimo įrenginiais, kas ir būtų šios akumuliacinės sistemos, leidžiančios kaupti energiją iš skirtingų tipų gamintojų, saugoti bei panaudoti ją, kai paklausa išauga. Europos Komisijos mokslinė tarnyba taip pat siūlo valstybėms narėms išsikelti trumpalaikius, vidutinės trukmės ir ilgalaikius planus energijos lankstumo bei kaupimo reikmėms patenkinti. Papildomai ragina nustatyti energijos kaupimo technologijų finansavimo problemas bei pagerinti atsiperkamumo skaidrumą, siekiant pritraukti investuotojus energijos akumuliacijos talpoms įrengti.

Energijos kaupimas naudojant šilumos akumuliacinę talpą CŠT tinkle leistų minimalizuoti nesėkmingų atsitikimų padarytą žalą arba net užkirsti kelią tokioms problemoms kaip: momentinio energijos tiekimo nutrūkimo dėl blogų oro sąlygų, avarijos viename ar keliuose iš įrenginių, staiga sumažėjusio energijos paduodamo kiekio dėl kitų praktikoje pasitaikančių priežasčių. Energijos kaupimas padeda ne tik nepriteklius atvejais, bet ir esant pertekliui. Jeigu visi energijos gamintojai bendrai gamina daugiau energijos, nei tinklas reikalauja, vietoj vieno ar keletos iš jų tiekimo sustabdymų, būtų galima tęsti darbą, o perteklinę energiją išsaugoti ir kaupti bei panaudoti vėliau [5]. Be to, energijos gamyboje dažnai dirba dideli ir brangūs įrenginiai, kurie svarbu pabrėžti dažnai sustoja tik remontui. Atsižvelgiant į Europietiško ilgaamžiškumo požiūrį, būtų tinkama teigti, kad šie įrenginiai turėtų veikti kuo ilgiau dėl savo kainos, dydžio bei sudėtingumo. Dažna praktika, kuri taip pat atsižvelgia į Europietiško ilgaamžiškumo požiūrį, gamintojams sudaro ir pateikia nominalius parametrus gamybos prietaisams, prie kurių įrenginys yra pritaikytas dirbti ir dažniausiai išlaikys ilgiausiai. Energijos pertekliaus metu sistemoje atsiranda reikiamybė palaikyti veikimą prie žemesnių nei nominalių parametrų, ar dažniau išjunginėti ir įjunginėti įrenginį, jeigu paklausa yra mažesnė negu pasiūla, o tai gali trukdyti įrenginio ilgaamžiškumui. Todėl dažniausiai praktikoje norima dirbti kuo ilgiau prie nominalių parametrų, išlaikant stabilų energijos padavimą ir užtikrinant įrenginio ilgaamžiškumą. Nors šiose rekomendacijose rašoma specifiškai apie energijos talpas, kurias panaudoti planuojama elektros gamybos ūkyje, tačiau miesto mastu energijos kaupimas dažnai vykdomas didelėse šilumos talpose, o ne galvaninių elementų akumuliatoriuose. Taip yra todėl, nes ŠAT ilgiau galima išlaikyti tą patį energijos vienetą per tą patį laiką bei jas lengviau ir pigiau pastatyti dideles.

Ekspluatuojant didelio darbinio tūrio ŠAT dėl įrenginio dydžio ir sudėtingumo yra ypatingai svarbu planuoti panaudojimo būdus, sukurti tinkamą įrenginio veikimo strategiją ekonominiais ir energetiniais aspektais. Didelio masto šilumos energijos kaupimo sistemos jau dabar Europos Sąjungos didmiesčiuose yra svarbus vis tobulėjančios energetikos sistemos elementas, suteikiantis apsaugą energijos pasiūlos šuoliams, padedantis geopolitinių problemų ar netikėtų avarių, susijusių su energijos gamyba ar tiekimu, atvejais. Literatūroje papildomai išskiriami skirtingi ŠAT tipai pagal paskirtį ir panaudojimo tinkle galimybes [6].

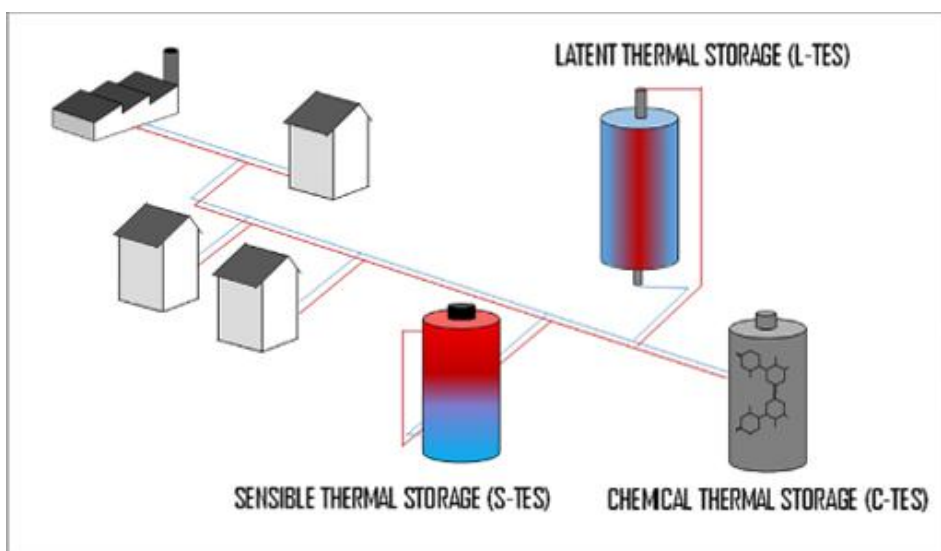
1.4. Šilumos akumulavimo talpų tipai ir veikimo principai

1.4.1. Pagrindinės šilumos akumulavimo talpų kategorijos

Šilumos akumulavimo talpos arba ŠAT skirstomos pagal naudojimo laikotarpį, šilumos akumulavimo būdą, paskirtį ir mobilumą. Toliau trumpai apžvelgiamos ŠAT kategorijos bei pateikiamos kategorijų vizualizacijos iš prieinamos mokslinės literatūros [7].

Šilumos akumulavimo talpos pagal šilumos kaupimo būdą skirstomos į tris kategorijas:

- Jutiminės šilumos kaupimo talpos, kuriose šiluma kaupiama keičiant medžiagos temperatūrą, išlaikant pastovią būseną.
- Fazės pokių medžiagų (angl. *PCM – Phase-Change Material*) talpos, kuriose šiluma kaupiama per fazės pokyčius, pavyzdžiui, iš kieto į skystą. Šios ŠAT išsiskiria didele šiluminės energijos kaupimo talpa ir pastovia darbo temperatūra.
- Hibridinės talpos, nepavaizduotos nuotraukoje, sujungiančios jutiminių šilumos kaupimo talpų ir fazės pokių kaupimo pranašumus.
- Termocheminės šilumos talpos, tai naujausios šilumos talpos, kurios energiją kaupia per chemines grįžtamas reakcijas arba sorbcijos procesus. Šios talpos pasižymi itin dideliu energijos tankiu ir minimaliais šilumos nuostoliais, nes kaupimo metu medžiagos laikomos aplinkos temperatūroje. Nors termocheminės talpos turi didelį potencialą tiek trumpalaikiam, tiek ilgalaikiam energijos kaupimui, jų pritaikymą šiuo metu riboja sudėtinga technologija ir didelės įrengimo sąnaudos.

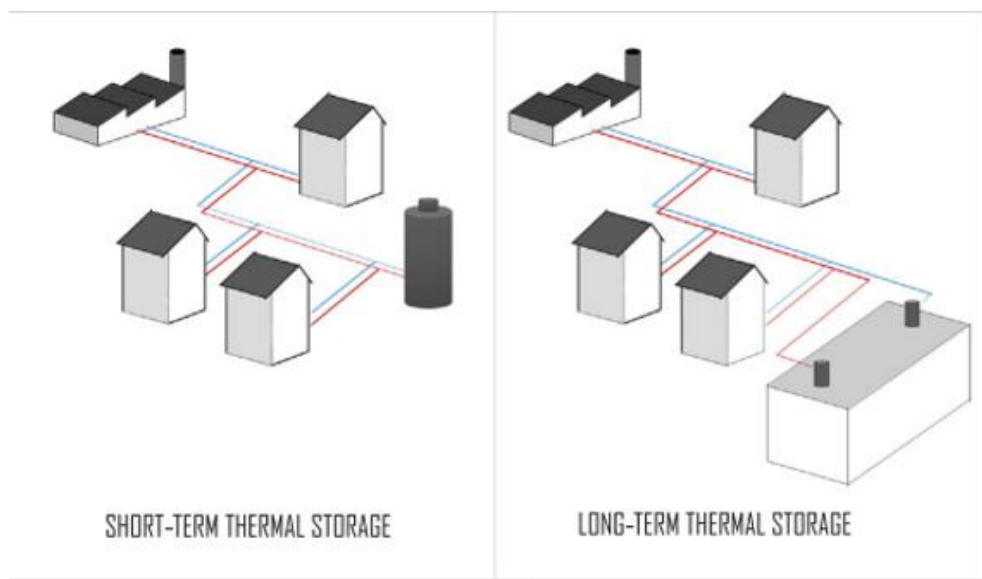


1 pav. ŠAT kategorijos pagal šilumos akumulavimo būdus

Šilumos kaupimo sistemos gali būti skirstomos į dvi pagrindines kategorijas pagal kaupimo trukmę: trumpalaikį ir ilgalaikį kaupimą.

- Trumpalaikis kaupimas: naudojamas kasdieniniams piko poreikiams patenkinti, o kaupimo trukmė paprastai svyruoja nuo kelių valandų iki vienos dienos.

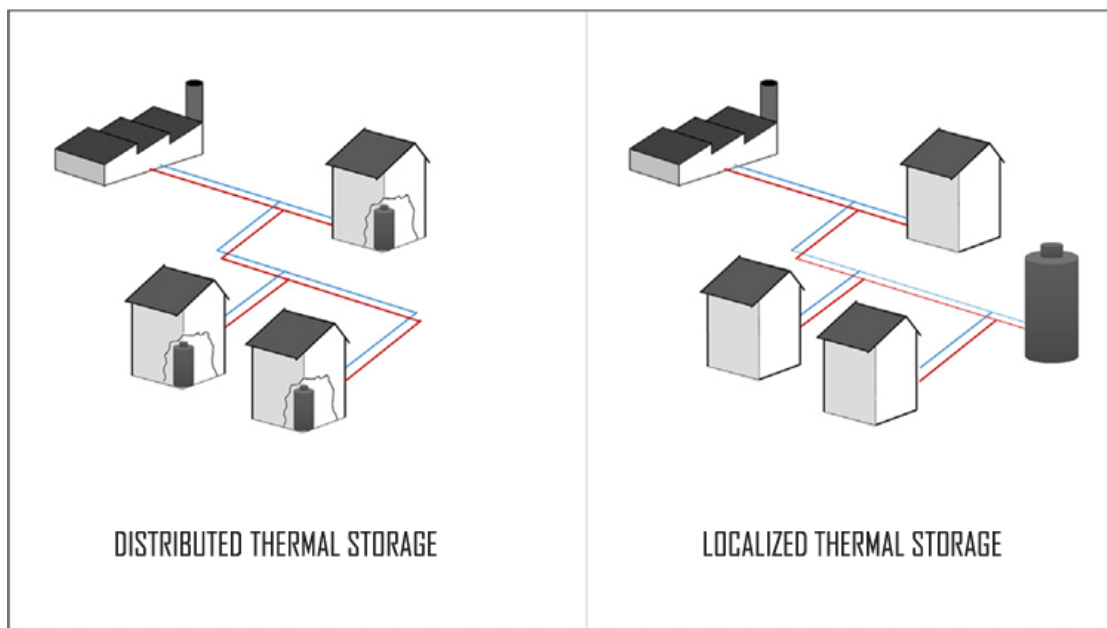
- Ilgalaikis kaupimas: leidžia energiją saugoti ilgesnį laiką, nuo kelių savaitių iki mėnesių. Dažniausiai naudojamas šilumos (ar šalčio) kaupimui vasarą (ar žiemą), kad ši energija būtų prieinama sezonu, kai poreikis yra didesnis.



2 pav. ŠAT kategorijos pagal kaupimo trukmę

Kita galima šilumos kaupimo sistemų klasifikacija yra pagal jų paskirtį: paskirstytos ir lokalizuotos sistemos.

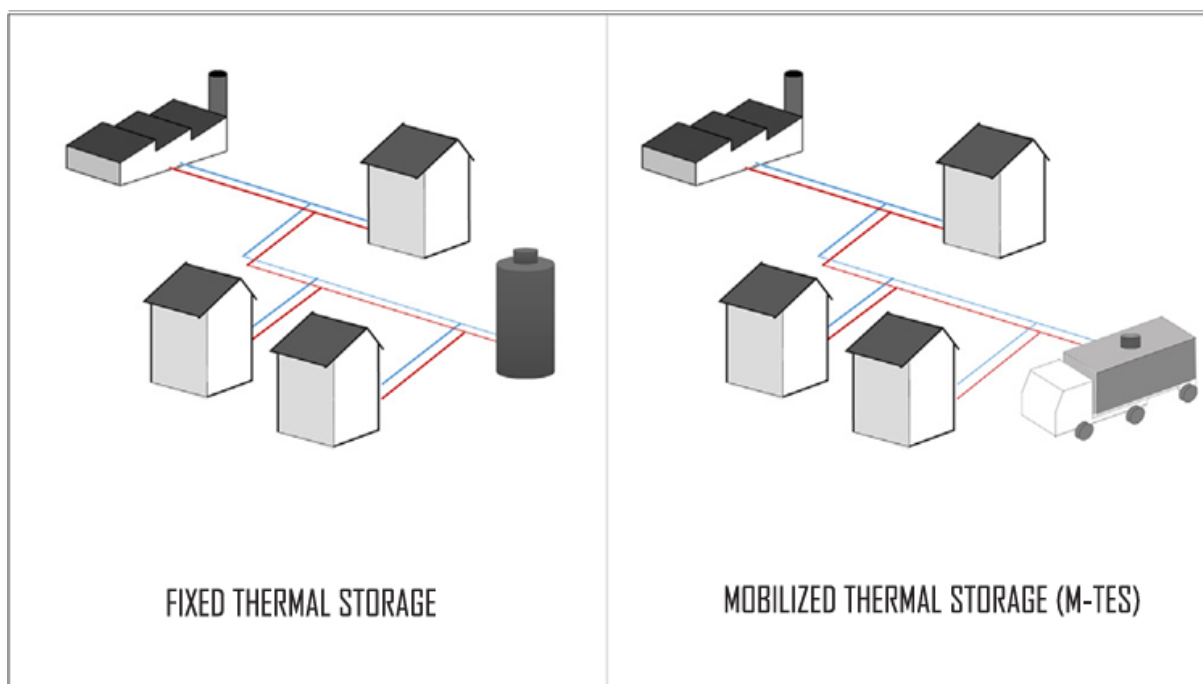
- Paskirstytos sistemos: sudarytos iš kelių mažų kaupimo sistemų (kelių kubinių metrų) ir įrengiamos pastatų lygiui patenkinti.
- Lokalizuotos sistemos: sudarytos iš kelių didelių kaupimo sistemų, kurių talpa gali siekti kelis tūkstančius kubinių metrų, įrengiamos strategiškai svarbiuose tinklo taškuose.



3 pav. ŠAT klasifikacija pagal paskirtį

Galiausiai, dar viena specifinė šilumos kaupimo sistemų rūšis pagal mobilumą yra mobilizuojamos šiluminės energijos kaupimo sistemos (M-ŠAT arba angl. *M-TES*) ir fiksuotos šilumos kaupimo sistemos.

- M-ŠAT sistemos: šios sistemos yra transportuojamos sunkvežimiais, tai leidžia šilumos šaltinį įrengti toli nuo tinklo.
- Fiksuotos sistemos: šios sistemos įprastai pastatomos vienoje vietoje, iš kurios jos nejuda, nebent tampa nebereikalingos.



4 pav. ŠAT kategorijos pagal mobilumą

Toliau plačiau apžvelgsime ŠAT kategorijas pagal šilumos akumuliacijos būdus, jų veikimo principus, trūkumus bei privalumus.

1.4.2. Jutiminės šilumos kaupimo talpos

Jutiminėje šilumos kaupimo technologijoje šiluma yra kaupiama keičiant medžiagos temperatūrą, tačiau išlaikant jos agregatinę būseną, - medžiaga išlieka kieta arba skysta. Pagrindinis veikimo principas: šilumos kiekis, kurį gali sukaupti talpa, priklauso nuo medžiagos specifinės šilumos, masės ir temperatūros skirtumo.

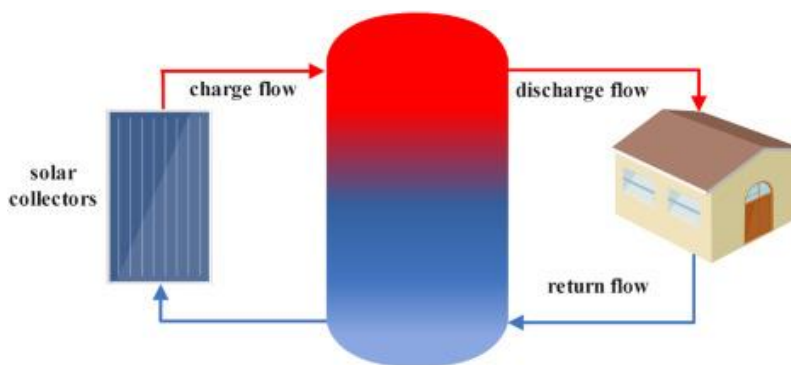
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

čia Q – sukaupta šiluma, m – masė, c – medžiagos specifinė šiluma, ΔT – temperatūrų skirtumas.

Tokiose sistemose naudojamos medžiagos gali būti:

- Vanduo dėl aukštos specifinės šilumos plačiai naudojamas kaip šilumos kaupimo terpė.
- Alyva ir akmenys dažnai taikomi aukštesnių temperatūrų kaupimo sistemose.
- Žemė ar smėlis naudojami geoterminėse arba sezoninėse šilumos kaupimo sistemose.

Sistemos privalumai – paprasta konstrukcija ir ilgaamžiškumas, palyginti žemos sąnaudos, ypač naudojant natūralias medžiagas, tokias kaip vandenį ar akmenis. Trūkumai – ribotas šilumos kaupimo tankis, nes jis priklauso tik nuo temperatūros skirtumo bei didelė energijos nuostolių rizika be tinkamos izoliacijos [8].



5 pav. Vandens akumuliacinės talpos principinė veikimo schema

Paveikslėlyje pateikta šilumos akumuliacinės talpos, naudojančios vandenį, principinė veikimo schema. Pakrovimo metu šaltas vanduo teka iš vandens talpyklos iki saulės spindulių kolektoriaus arba kitokio šildytuvo, tada pašyla ir keliauja į akumuliacinės talpos viršų. Talpyklos iškrovimo metu šiltas vanduo teka iš talpyklos viršaus ir panaudotas, atšalęs vanduo sugrįžta atgal į talpyklą per apačią [9]. Tokios vandens talpyklos gaminamos iš plieno, aliuminio, gelžbetonio ir stiklo pluošto. Jos turi būti izoliuojamos dažniausiai mineraline ar stiklo vata, poliuretano putomis. Akumuliacinės talpos izoliuojamos, kad būtų išvengta savaiminio išsikrovimo ar šilumos nuostolių dėl šilumos mainų su aplinka. Vanduo talpykloje gali būti laikomas statiškai, - nejudantis, arba dinamiškai - cirkuliuoti per talpyklą, siekiant iš jos išgauti reikiamą šilumos kiekį [10].

1.4.3. Stratifikacija ir srautų valdymas jutiminėse talpose

Efektyvus jutiminių talpų veikimas tiesiogiai priklauso nuo gebėjimo palaikyti stabilų temperatūrų sluoksniavimą, taip vadinama stratifikacija. Šio reiškinio veikimo principas grindžiamas skirtingo tankio vandens elgsena: karštesnis vanduo (mažesnio tankio) kyla į viršų, o vėsesnis (didesnio tankio) leidžiasi į apačią. Jeigu talpos viduje vyksta turbulencija, arba neteisingai suprojektuotas srauto įvadas/išvadas, šis stratifikacijos profilis suardomas, o šilumos akumuliacijos efektyvumas sumažėja iki 30%.

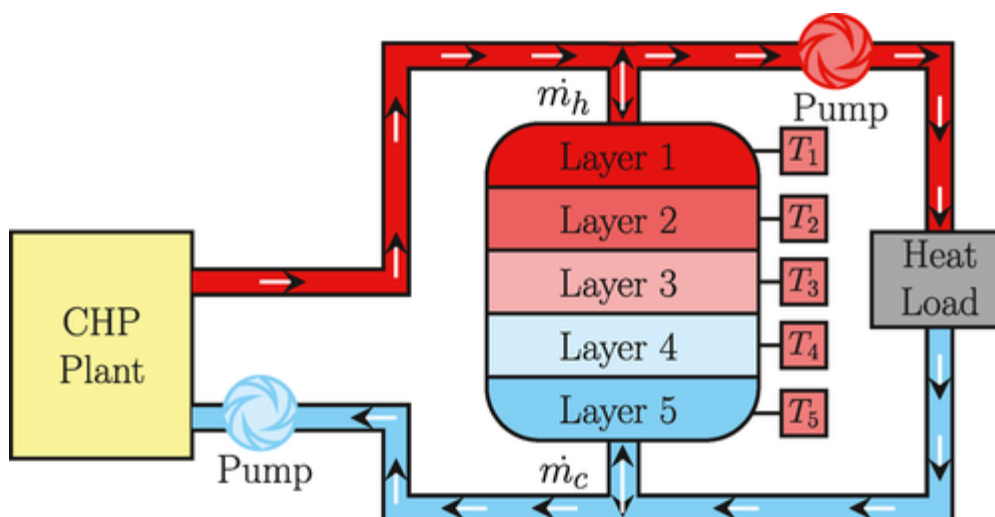
Stratifikacija svarbi ne tik norint išsaugoti energiją, bet ir viso tinklo hidrauliniams bei terminiam stabilumui. Visų pirma, užtikrinamas tikslesnis temperatūrinės kontrolės valdymas, nes automatizuotos sistemos gali efektyviau prognozuoti, kiek šilumos dar galima paimti. Be to, esant išlaikytam sluoksniavimui, galima pasirinktinai išgauti reikiamos temperatūros vandenį, nepažeidžiant visos talpos šiluminės struktūros.

Vis dėlto, jeigu stratifikacija pažeidžiama dėl per didelio srauto greičio ar neefektyvių difuzorių, tai karštas ir šaltas vanduo gali susimaišyti, temperatūra visame tūryje išsilygina, o naudingo šilumos kiekio tampa žymiai mažiau. Tai ne tik sumažina bendrą efektyvumą, bet ir priverčia sistemą dirbti su didesnėmis siurblių sąnaudomis, kompensuojant neoptimalų temperatūrinį režimą.

Norint išvengti nuostolių, įrengiami difuzoriai, viršutinis ir apatinis, kurie sulėtina srautą ir nukreipia jį tolygiai, taip mažindami turbulenciją ir saugodami šiluminius sluoksnius. Tinkamai suprojektuota sistema pasiekia stratifikacijos efektyvumą iki 90 – 95% [7].

$$\eta_{strat} = \frac{Q_{naudinga}}{Q_{teorinė}} \cdot 100\% \quad (2)$$

čia η_{strat} – stratifikacijos efektyvumas, $Q_{naudinga}$ – realiai panaudojama šiluma iš talpos, $Q_{teorinė}$ – teorinis maksimalus galimas šilumos kiekis. Formulė rasta iš literatūros šaltinio.



6 pav. Stratifikuotos šilumos akumuliacinės talpos veikimo schema

Paveikslėlyje matoma stratifikuotos šilumos akumuliacinės sistemos principinio veikimo schema. Pagrindiniai komponentai sudarantys schemą: kogeneracinis įrenginys (angl.

CHP), šilumos akumuliacinė talpa bei šilumos paskirstymo tinklas, siurbliai. Centrinėje dalyje – daugiasluoksnė talpa, kurioje kiekvienas sluoksnis (angl. *Layer*) turi savo temperatūrą. Šis temperatūrinis profilis iliustruoja stratifikaciją, kai viršuje išlieka karščiausias vanduo, o apačioje – vėsesnis. Tai leidžia efektyviai naudoti šilumą pagal poreikį, tiekiant vandenį pastovia aukšta temperatūra priklausomai nuo apkrovos [11].

1.4.4. Fazės pokyčių medžiagų talpos

Fazės pokyčių medžiagų talpose šiluma kaupiama ir išskiriama per medžiagos fazės pokytį, kai medžiaga pereina iš kietos būsenos į skystą ar atvirkščiai. Veikimo principas: energija kaupiama fazės pokyčio metu, kai medžiaga sugeria arba išskiria latentinės šilumos kiekius.

$$Q = m \cdot L \quad (3)$$

čia Q – sukaupta šiluma, m – masė, L – savitoji garavimo šiluma.

Tokiose sistemose naudojamos medžiagos gali būti:

- Organinės medžiagos: parafinai, riebalų rūgštys – dėl jų stabilumo ir plačių temperatūrų diapazonų.
- Neorganinės medžiagos: hidratuotos druskos – dėl jų didelio energijos tankio.
- Eutektinės medžiagos: mišiniai, pasižymintys pastoviu lydymosi tašku.

Sistemos privalumai – aukštas šilumos kaupimo tankis, nes fazės pokytis leidžia sukaupti daugiau šiluminės energijos vienam tūrio vienetui nei jutiminėse šilumos kaupimo sistemose. Be to, galimybė palaikyti pastovią temperatūrą šilumos kaupimo arba išskyrimo metu. Trūkumai – žemas šiluminis laidumas, dėl kurio šilumos kaupimas ir išskyrimas vyksta lėčiau, tokio tipo talpos gali būti brangesnės už tradicines jutimines šilumos kaupimo sistemas bei kapsuliavimo poreikis, siekiant išvengti nutekėjimo ar medžiagų degradacijos [8].

1.4.5. Hibridinės šilumos kaupimo talpos

Hibridinės šilumos kaupimo talpos sujungia jutiminių šilumos ir fazės pokyčių kaupimo technologijas, siekiant pasinaudoti abiejų pranašumais. Veikimo principas – šios akumuliacinės talpos gali veikti dviem režimais:

- Naudojant jutiminį šilumos kaupimą, kai keičiasi medžiagos temperatūra.
- Naudojant fazės pokyčio šilumos kaupimą, kai medžiaga keičia agregatinę būseną.

Hibridinės sistemos naudoja fazės keitimo medžiagas ir kitas aukštos šiluminės masės medžiagas, tokias kaip betonas, akmenys ar skystos terpės.

Sistemos privalumai - lankstumas kaupiant šilumą tiek jutiminės šilumos, tiek fazės pokyčio forma, bei efektyviai panaudojamas sistemos tūris ir sumažinami energijos nuostoliai. Trūkumai – sudėtingesnė konstrukcija ir didesnės pradinės investicijos, sudėtingesnis sistemos optimizavimas [8,12].

1.4.6. Termocheminės šilumos kaupimo talpos

Ši technologija veikia konvertuojant šilumą į cheminę potencialią energiją per grįžtamas reakcijas ir kaupiant arba išskiriant šilumą iš termocheminės medžiagos. Nepaisant laboratoriniu mastu pasiektos pažangos, termocheminis šilumos kaupimas dar nėra toks praktiškas, kaip kitos šilumos kaupimo technologijos. Šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$Q_T = n \cdot \Delta H_r \quad (4)$$

čia n – reakcijoje dalyvaujančių cheminių komponentų molių skaičius, H – reakcijos entalpija.

Cheminės šilumos kaupimo sistemos gali būti skirstomos į dvi pagrindines kategorijas pagal jų fenomenologiją:

Cheminės grįžtamos reakcijos: endoterminės reakcijos vyksta, kai yra perteklinė šiluma. Produktai laikomi aplinkos temperatūroje, o kai reikia šilumos, panaudojama atvirkštinė reakcija.

Absorbicija ir adsorbicija: procesai vyksta, kai dujos prisijungia prie kietos medžiagos paviršiaus. Absorbicijos metu sukuriama nauja medžiaga, o adsorbicijos metu naujų medžiagų nesukuriama.

Privalumai: vieno bandymo metu nustatytas didelis energijos tankis, apie 400 MJ/m³. Palyginimui, vanduo turi apie 200 MJ/m³ (esant 50 °C temperatūrų skirtumui). Didesnis energijos tankis leidžia sukaupti didesnę energijos kiekį tam pačiam tūrio vienetui. Be to, pastebėti maži šilumos nuostoliai, lengvesnis ilgalaikio laikymo procesas, efektyvesnis žemos temperatūros likutinės šilumos (mažiau nei 70 °C) ir atsinaujinančios energijos panaudojimas [12, 13].

1.4.7. Technologinės inovacijos:

Neseniai atliktas tyrimas pasiūlė visiškai pakeisti vandenį termocheminiais skysčiais centralizuotuose šildymo tinkluose. Pasiūlyta technologinė aplikacija rodo, kad termocheminiai skysčiai gali reikšmingai sumažinti pirminės energijos suvartojimą centralizuotuose tinkluose (teorinis potencialas iki 85 %). Tačiau ilgalaikėms sistemoms didžiausią iššūkį kelia medžiagų kaina dėl reikalingų didelių kiekių. Pavyzdžiui, zeolitai, kurie yra tinkami taikyti CŠT įrenginiuose, tampa netinkami ilgalaikiam šilumos kaupimui dėl didelių sąnaudų [12].

1.5. Tipinių ŠAT parametrų palyginimas

Skirtingos šilumos akumuliacinių talpų (ŠAT) technologijos pasižymi nevienodu efektyvumu, tūrio energijos tankiu bei temperatūriniu darbo režimu. Žemiau pateikta lentelė leidžia palyginti pagrindinius parametrus tarp jutiminio šilumos kaupimo, fazės keitimo medžiagų ir termocheminių technologijų. Lyginant šiuos duomenis inžinierius gali priimti sprendimus, remiantis ne tik kaupimo efektyvumu, bet ir eksploataciniais apribojimais bei galimybėmis integruoti į realias sistemas.

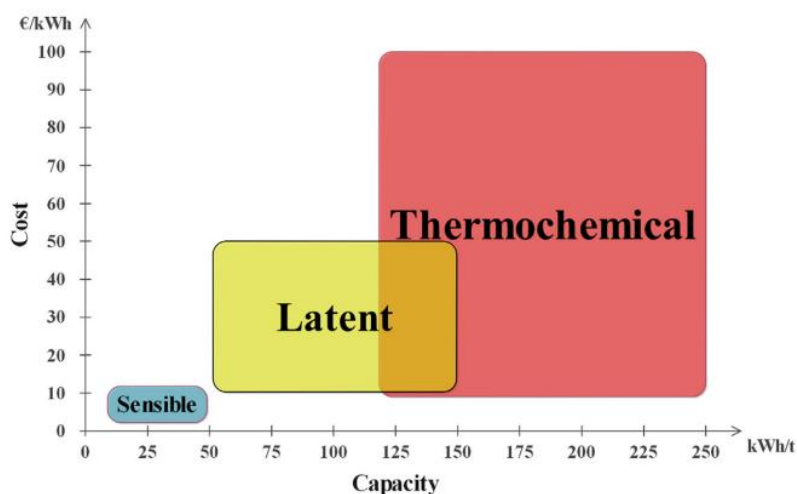
1.1 lentelė. Skirtingų ŠAT technologijų palyginimas pagal techninius parametrus

Parametras	Jutiminis kaupimas	Fazių pokyčio kaupimas	Termocheminis kaupimas
Energijos tankis (kWh/m ³)	30 – 60	80 – 150	120 – 250
Tipinė darbinė temperatūra (°C)	20 – 100	30 – 90	50 – 200
Tipinė kaupimo trukmė	Valandos – diena	Valandos – diena	Dienos – mėnesiai
Šilumos nuostoliai	Aukšti	Vidutiniai	Maži
Kaina (€/kWh)	Maža	Vidutinė	Didelė
Technologinis sudėtingumas	Mažas	Vidutinis	Aukštas

Analizuodami lentelės duomenis matome, kad jutiminės kaupimo technologijos yra ekonomiškiausios ir paprasčiausios integruoti, tačiau pasižymi ribotu tankiu ir dideliais nuostoliais be tinkamos izoliacijos. Fazės keitimo medžiagų sistemos siūlo aukštesnį tankį, tačiau reikalauja didesnio atsargumo dėl kapsuliuavimo, stratifikacijos kontrolės ir medžiagų senėjimo. Tuo tarpu termocheminės technologijos, nors ir brangios bei sudėtingos, siūlo neprilygstamą energijos tankį ir ilgiausią saugojimo laiką, o tai ypač naudinga sezoniniam kaupimui arba nutolusiose sistemose [7, 9, 14].

1.5.1. Šilumos kaupimo talpų apibendrinimas

Jutiminės šilumos kaupimo talpos yra tinkamos paprastoms ir pigioms sistemoms, fazės pokyčių sistemos užtikrina didelį šiluminės energijos tankį, o hibridinės sistemos suteikia didesnę efektyvumą ir lankstumą palyginus su aukščiau minėtomis, tačiau yra sudėtingesnės ir brangesnės. Termocheminės šilumos kaupimo talpos, nors ir pasižymi didžiausiu energijos tankiu bei minimaliomis šilumos nuostoliais, išlieka sudėtingiausia ir brangiausia technologija, kurios pritaikymas dar ribotas dėl lėtos reakcijos greičio ir aukštų kaštų. Todėl, projektuojant šilumos akumuliacijos talpą, reikėtų atsižvelgti į specifinius sistemos poreikius, kam ji bus naudojama bei ekonominę situaciją.



7 pav. Šilumos kaupimo sistemų sąnaudų ir pajėgumų palyginimas

Grafike matome, kad jutiminis šilumos kaupimas yra ekonomiškiausias, bet termocheminis kaupimas pasižymi didžiausiu energijos tankiu ir ilgalaikiu potencialu, nors dar reikalauja technologinio tobulinimo. Latentinis kaupimas yra tarpinis variantas, subalansuojantis sąnaudas ir energijos tankį, tačiau praktikoje populiariausias išlieka jutiminis [14].

1.6. Šiluminės energijos akumuliacijos medžiagos

Šiluminės energijos kaupimo technologijos pagrindas yra tinkamų medžiagų pasirinkimas, kurios leistų efektyviai kaupti ir išskirti šiluminę energiją. Akumuliacinės medžiagos parenkamos atsižvelgiant į jų šilumines, chemines ir mechanines savybes bei pritaikymo sritis. Pateikiami keletas svarbių aspektų į kuriuos reikėtų atsižvelgti renkantis ŠAT medžiagas.

1.6.1. Savitosios šilumos kaupimo technologijos talpų medžiagos

Savitosios šilumos kaupimo technologijos remiasi medžiagos temperatūros pokyčiu, nekintant jos agregatinei būsenai. Tokios medžiagos turi būti:

- Plačiai paplitusios ir nebrangios, nes jų reikia daug užpildyti talpai, todėl reikia stengtis rasti ekonomiškai patrauklesnį variantą.
- Nedegios, nenuodingos, nesprogios ir atitinkančios aplinkosaugos reikalavimus, kad šildymo sistemos būtų saugios.
- Su dideliu šilumos kaupimo tankiu, kuris padeda sukaupti daugiau energijos naudojant mažiau medžiagų, bei geru šilumos laidumu efektyvumui ir savitajai šilumai padidinti.

Todėl vanduo šio tipo sistemoms yra puikus variantas, turintis didelę savitąją šilumą, yra pigus, lengvai pasiekiamas, nenuodingas ir nesprogius, jį galima naudoti ir šildymo, ir šaldymo sistemose.

1.6.2. Izoliacinės medžiagos ir šilumos nuostolių kontrolė

Efektyvus šiluminės energijos kaupimas jutiminėse talpose tiesiogiai priklauso ne tik nuo kaupiančiosios terpės, bet ir nuo šilumos nuostolių kontrolės. Kadangi tokiose talpose paprastai naudojamas vanduo ar kita didelės šilumos talpos medžiaga, kurios šiluma perduodama per talpos paviršių, būtina užtikrinti tinkamą izoliaciją viso rezervuaro paviršiuje.

Šilumos nuostoliai atsiranda dėl temperatūrų skirtumo tarp talpoje esančio skysčio ir aplinkos. Norint sumažinti šilumos perdavimą, taikomos mažesnio šilumos laidumo (λ) medžiagos, tokios kaip mineralinė vata, stiklo pluoštas, poliuretano putos ar vakuuminės plokštės. Tipinės šių medžiagų šilumos laidumo vertės siekia 0,020 – 0,050 W/(m·K), ir jų pritaikymas izoliacijai leidžia gerokai sumažinti konvekcijos bei spinduliavimo nuostolius [7, 8].

Be šiluminio laidumo, svarbų vaidmenį šilumos nuostolių kontrolėje atlieka izoliacijos storis (d), kuris tiesiogiai susijęs su bendrąja šilumos varža. Šilumos varža (R) apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (5)$$

čia: R – šilumos varža, $m^2 \cdot K/W$; d – izoliacijos storis, m ; λ – medžiagos šilumos laidumo koeficientas, $W/(m \cdot K)$.

Kuo didesnė šilumos varža, tuo mažiau šilumos prarandama. Projektuojant izoliacinį sluoksnį svarbu atsižvelgti ne tik į technines medžiagos savybes, bet ir į montavimo galimybes, atsparumą drėgmei bei ilgalaikį stabilumą aukštoje temperatūroje [8].

Šios medžiagos nėra naudojamos kaip pačios akumuliacinės patalpos korpusas, jų paskirtis yra sumažinti šilumos nuostolius per talpos sienes. Pagrindinė konstrukcija paprastai gaminama iš anglinio plieno arba betono, o izoliacinė medžiaga yra montuojama iš išorės, taip suformuojant vientisą apsauginį sluoksnį, kuris sulaiko šilumą. Šiuolaikinėse sistemose plačiai taikomas daugiasluoksnis izoliavimas, kai kombinuojamos kelios izoliacinės medžiagos su skirtingomis savybėmis: vienos mažina laidumą, kitos difuziją ar UV spindulių poveikį. Tai padeda sumažinti bendruosius šilumos nuostolius net iki 30 – 40% lyginant su standartinėmis vienos medžiagos izoliacijos sistemomis [7, 15].

1.6.3. Fazinio virsmo talpų medžiagos

Fazinio virsmo medžiagos, tokios kaip parafinai, hidratuotos druskos ir eutektiniai mišiniai, yra ypatingai svarbios šiuolaikiniuose šilumos kaupimo sprendimuose. Medžiagos pasižymi dideliu šilumos kaupimo tankiu, galimybe išskirti didelius šiluminės energijos kiekius per fazės pokytį, pereidamos iš kietos būsenos į skystą, bei galimybe veikti pastovioje temperatūroje fazės pokyčio metu. Todėl jos ypač tinkamos stabiliai energijos saugojimo sistemai. Nors šios medžiagos suteikia daug privalumų, jos taip pat susiduria su praktinio panaudojimo iššūkiais, tokiais kaip žemas šiluminis laidumas, kuris riboja šilumos perdavimo greitį, būtinybė kapsuliuoti, kad būtų galima užtikrinti stabilumą ir išvengti nutekėjimo. Stabilumas yra svarbus aspektas, nes jis nurodo medžiagos gebėjimą išlaikyti savo savybes ir efektyvumą per daugelį kaupimo ir iškrovimo ciklų. Medžiagos, kurios suyra arba praranda savo savybes (pvz., fazės pokyčio temperatūrą ar šilumos laidumą), sumažina sistemos efektyvumą ir padidina priežiūros kaštus [16].

1.6.4. Fazės keitimo medžiagų ciklinis stabilumas

Fazių virsmo medžiagų taikymas akumuliacinėse sistemose grindžiamas ne tik jų gebėjimu sukaupti didelį latentinės šilumos kiekį, bet ir reikalingų savybių pastovumu ilgalaikės eksploatacijos metu. Ciklinis stabilumas apibrėžiamas kaip medžiagos gebėjimas neprarasti esminių savybių. Tarp svarbiausių fazės keitimo medžiagų charakteristikų yra lydymosi temperatūra, kuri lemia, kokiame intervale galima kaupti ir išgauti šilumą. Be to, svarbi ir latentinės šilumos talpa, kuri nurodo energijos kiekį, kaupiamą vieno fazės pokyčio metu. Galiausiai, struktūrinis vientisumas, kuris užtikrina, kad medžiaga ilgai neištekės, nesusisluoksniuos ar nesuirs. Jeigu bent viena iš šių savybių pakinta, pavyzdžiui, lydymosi temperatūra pasislenka ar sumažėja latentinis šilumos kiekis, tai sistemos efektyvumas sumažėja, o eksploatacinės sąnaudos padidėja.

Parafino klasės fazės keitimo medžiagos dažnai pasirenkamos dėl cheminio inertiškumo ir aukšto stabilumo, išlaikant savybes net ir po 2000 iki 5000 ciklų. Tuo tarpu druskų hidratai,

nors ir pasižymi aukštu energijos tankiu, bet dažnai praranda reikiamas savybes, - jų struktūra kinta, atsiranda susisluoksniavimas ar drėgmės praradimas. Dėl to sumažėja latentinis šilumos kiekis iki 15 – 25% jau po 1000 ciklų. Eutektinės druskos laikomos tarpiniu variantu, tačiau jų taikymas reikalauja tiksliai valdomo temperatūrinio režimo.

Žemiau lentelėje pateikiamas skirtingų fazės keitimo medžiagų ciklinio stabilumo palyginimas.

1.2 lentelė. Fazės keitimo medžiagų ciklinio stabilumo palyginimas

Medžiagos tipas	Tipinis ciklų skaičius	Latentinės šilumos sumažėjimas	Charakteristika
Parafinas	2000 – 5000	~5 – 10 %	Labai stabilus, bet žemas šilumos laidumas
Druskų hidratai	500 – 1500	~15 – 25 %	Aukštas energijos tankis, jautrūs susisluoksniavimui
Eutektinės druskos	1500 – 3000	~10 – 15 %	Tarpinis pasirinkimas, reikalauja tikslaus valdymo
Biologinės fazės keit. medž.	<1000	>25 %	Ribotas ilgaamžiškumas, tinkami trumpalaikiams ciklams

Fazės keitimo medžiagų parinkimo klausimas tiesiogiai susijęs ne tik su sistemos efektyvumu, bet ir ekonominiu pagrįstumu. Priklausomai nuo planuojamo ciklų skaičiaus ir darbo režimo, reikia įvertinti ilgalaikio stabilumo pagrįstumą dar projektavimo stadijoje [7, 8, 9].

1.6.5. Fazės keitimo medžiagų savybių palyginimas

Renkantis konkrečią medžiagą būtina įvertinti tiek technologinį pritaikomumą, tiek šilumos saugojimo efektyvumą skirtingomis sąlygomis. Žemiau pateiktoje lentelėje pateiktas pagrindinių fazės keitimo medžiagų grupių – parafino, druskų hidratų, eutektinių druskų ir vandens savybių palyginimas pagal aktualiausius inžinerinius parametrus.

1.3 lentelė. Fazių virsmo medžiagų savybių palyginimas

Medžiaga	Lydymosi temperatūra (°C)	Latentinė šilumos talpa (kJ/kg)	Privalumai	Trūkumai
Parafinas	20 – 65	150 – 200	Cheminis stabilumas, netoksiškas, nebrangus	Žemas šilumos laidumas, didelis tūrio pokytis
Druskų hidratai	30 – 90	200 – 350	Aukštas energijos tankis, kompaktiškumas	Supervėsimas, susisluoksniavimas, korozija
Eutektinės druskos	100 – 300	150 – 250	Pastovi temperatūra, platus intervalas	Sudėtingas gamybinis procesas, brangūs komponentai
Vanduo	0 (ledo pavidalu)	334	Prieinama, netoksiška, didelė šilumos talpa	Tik viena fazės pokyčio temperatūra, didelė erdvė

Pagal lentelėje esančius duomenis galima spręsti, kad parafinai gali būti naudingi mažos galios sistemose, o druskų hidratų – kompaktiškuose sprendimuose, kur reikalingas didelis energijos tankis. Vis dėlto, medžiagos turi būti kruopščiai testuojamos prieš taikymą praktikoje, ypač atsižvelgiant į jų fazinį stabilumą, reakciją su talpos medžiagomis ir ciklinį patvarumą [7, 8, 9].

1.6.6. Termocheminių talpų medžiagos

Termocheminės šilumos kaupimo medžiagos pasižymi savybėmis leidžiančiomis efektyviai saugoti ir išlaisvinti šiluminę energiją per grįžtamas chemines reakcijas. Šios medžiagos turi didelį energijos tankį ir minimalias šilumos nuostolių savybes, todėl yra patrauklios ilgalaikiam šilumos saugojimui. Svarbūs aspektai renkantis termocheminių talpų medžiagas:

- Reakcijos entalpija: medžiagos su aukšta reakcijos entalpija gali sukaupti daugiau energijos vienam tūrio ar masės vienetui.
- Reakcijos temperatūra: svarbu, kad reakcijos temperatūra atitiktų numatytą taikymo sritį, pavyzdžiui pastatų šildymui ar vėsinimui.
- Cheminis stabilumas: medžiaga turi išlaikyti savo savybes per daugybę įkrovimo-iškrovimo ciklų, kad būtų užtikrintas ilgaamžiškumas.
- Kaina ir prieinamumas: ekonomiškai efektyvios ir lengvai prieinamos medžiagos yra labiau tinkamos komerciniam pritaikymui.

Nors šioje srityje naudojamos medžiagos turi didelį potencialą, jų praktinis pritaikymas susiduria su iššūkiais, tokiais kaip sudėtinga technologija, aukštos sąnaudos ir lėtas reakcijos greitis. Nepaisant to, intensyvūs moksliniai tyrimai siekia optimizuoti šias medžiagas naudojančias ŠAT sistemas, kad jos taptų efektyvesnės ir ekonomiškai patrauklesnės ateityje [13].

Pastaraisiais metais termocheminio šilumos kaupimo technologijos tyrimuose daugiausia dėmesio skiriama ne tik pačioms medžiagoms, bet ir jų praktiniam pritaikymui efektyvesnėse sistemose: plėtojami druskų hidratų, kompozitinių sorbentų ir nanostruktūrinių medžiagų sprendimai, kurie leidžia didinti ciklinį stabilumą, mažinti regeneracijos temperatūrą ir gerinti šiluminį efektyvumą. Be to, naujausios kryptys apima pažangesnes reaktorių konstrukcijas (fiksuoto slauksnio, plokštelių-briaunotų bei vamzdis-vamzdyje šilumokaičių sistemas), kuriomis siekiama pagerinti šilumos ir masės perdavimą [17].

2. Teorija ir praktika: ŠAT technologijų taikymas Lietuvoje ir Europoje

Šilumos akumuliacinių talpų (ŠAT) taikymas centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) sistemose vertinamas ne tik kaip priemonė didinti energetinį efektyvumą, bet ir kaip strateginis sprendimas sistemų patikimumui, lankstumui bei tvarumui užtikrinti. Apžvelgtoje literatūroje teigiama, kad tinkamai integruota ŠAT leidžia išskaidyti šilumos gamybą laike, sumažinti energijos nuostolius piko metu ir pagerinti įrenginių eksploatacines sąlygas [7].

Europiniu mastu vienas pažangiausių praktinių didelio masto šilumos kaupimo pavyzdžių – Kopenhagos „PTES“ (angl. *Pit Thermal Energy Storage*) sistema. Tai didelio tūrio (>70 000 m³) požeminė talpa, daugiausia naudojama trumpalaikiam tinklo balansavimui, kai šiluma kaupiama ir iškraunama kelių savaitių ciklais. Mokslinėje analizėje pabrėžiama, kad tokia strategija leidžia mažinti brangių pikinio šilumos gamybos šaltinių poreikį, kartu išlaikant gerą terminę stratifikaciją ir aukštą sistemos efektyvumą. Todėl šis projektas laikytinas svarbiu pavyzdžiu, kaip ŠAT gali būti taikoma ne tik sezoniniam žalios energijos šilumos kaupimui, bet ir lankstesniam miesto CŠT tinklo valdymui [18].

Kitas reikšmingas praktinis didelio masto šilumos kaupimo pavyzdys Europoje yra Dronninglund PTES sistema Danijoje, veikianti saulės centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje. Straipsnyje nurodoma, kad ši 60 000 m³ vandens duobinė šilumos saugykla, integruota kartu su 37 573 m² plokščiųjų saulės kolektorių lauku ir absorbciniu šilumos siurbliu, aptarnaujanti apie 1350 CŠT vartotojų, kurių metinis šilumos poreikis siekia apie 40 GWh. Pagrindinis teigiamas šios sistemos rezultatas yra tai, kad eksploatacijos metu saugykla pasiekė didesnę kaip 90 % kaupimo efektyvumą, todėl straipsnyje ji apibūdinama kaip viena iš pažangiausių didelio masto vandens duobinių šilumos saugyklų. Saugykla leidžia vasaros laikotarpiu sukaupti perteklinę saulės šilumą, o vėliau ją tiekti tiesiogiai į CŠT tinklą arba naudoti kaip žematemperatūrį šaltinį šilumos siurbliui žiemos metu [19]. Galiausiai, trumpai apžvelgsime dar vieną geros ŠAT praktikos pavyzdį, „Marstal“ miestelio saulės šilumos elektrinėje, Danijoje, įrengta 75 000 m³ sezoninę vandens duobinę šilumos saugyklą. Straipsnyje nurodoma, kad ši saugykla pradėta eksploatuoti 2012 m., jos šiluminė talpa siekia 6,96 GWh, o projektinė darbo temperatūrų sritis yra 10–90 °C. Pagrindinis teigiamas šios sistemos rezultatas yra tai, kad ji sudaro sąlygas padidinti saulės šilumos generuojamos energijos dalį centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje iki maždaug 55 %, taip mažinant priklausomybę nuo iškastinio kuro ir didinant CŠT sistemos lankstumą. Be to, tyrime parodyta, kad saugykloje išlaikoma aiški šiluminė stratifikacija, o įleidimo ir išleidimo angų konstrukcija įkrovimo metu sukuria tik ribotą maišymosi zoną, todėl saugoma šiluma gali būti efektyviai paskirstoma pagal temperatūrinius sluoksnius [20].

Tokių sistemų veiksmingumą patvirtina ir Lietuvos praktiniai pavyzdžiai. Klaipėdos mieste jau veikianti 3000 m³ akumuliacinė talpa leidžia sukaupti šilumą neintensyvaus vartojimo metu ir ją perduoti piko valandomis, taip sumažinant katilinių apkrovas bei šilumos gamybos kaštus. Pritaikius šią sistemą, sumažėjo kuro suvartojimas ir stabilizavosi šilumos kainų svyravimai buitiniams vartotojams [21].

3. Metodinė dalis

Analizei pasirinkta sukurti skaičiuojamąjį modelį, kuris galėtų simuliuoti Kauno CŠT tinklo darbą pagal realius dispečerinės duomenis per 2025 metus, integruojant akumuliacinę talpą į simuliacijos CŠT sistemą iš vieno AB „Kauno Energija“ neįgyvendintų projektų. Pagal sudarytus scenarijus talpos valdymo strategijai iš simuliacijos rezultatų bus galima pamatyti kaip talpa būtų veikusi 2025 metais Kauno CŠT tinkle, jeigu bendra šilumos paklausa nebūtų pasikeitusi, bei pastebėti pozityvaus panaudojimo galimybes realaus tinklo veikimo kontekste.

3.1. Kauno CŠT tinklas ir Petrašiūnų katilinė

Kauno CŠT tinklas Lietuvoje yra antras pagal dydį. Jis taip pat yra antras pagal metinį tiekiamos šilumos kiekį bei prijungtų gyvenamųjų patalpų plotą. Šiuo metu CŠT tinklas yra labai sunkiai atsiejama Kauno miesto infrastruktūros dalis, todėl ateities perspektyvoje tinklas tik plėsis ir modernės kartu su miestu. Tinklą valdo AB „Kauno Energija“ (KE) – akcinė bendrovė, kurios pagrindinis akcininkas yra Kauno miesto savivaldybė. Nors KE yra šilumos tiekėja, ji pati valdo kelias šilumos gamybos vietas, įskaitant Petrašiūnų, Nemuno, Inkaro, Šilko ir Pergalės katilines. Be to KE taip pat perka šilumą iš nepriklausomų šilumos gamintojų (sutrumpintai – NŠG) per BALTPOOL administruojamą aukciono sistemą.

Tinklo paklausa žiemos sezono metu (spalio vidurys – balandžio vidurys) viršija 200 MW, o šalčiausiomis dienomis pasiekia 300 MW. Ne šildymo sezono metu tinklas veikia tik karšto vandens ruošimui, o paklausa svyruoja 30 iki 60 MW ribose. Rytiniai ir vakariniai paklausos pikai keičia paklausos kreivę dešimtimis MW per valandą, tačiau daugumos gamintojų didžiausia galios reguliavimo sparta yra iki 3 MW per valandą. Šie staigūs paklausos šuoliai dažnai priverčia keletą gamintojų didinti spartą vienu metu, kas prieštarauja aukciono prioriteto tvarkai, tačiau tai yra būtinybė, nes šiluma turi pasiekti žmones.

Petrašiūnų katilinė yra biokuro šilumos gamintojas, įsikūręs rytiniame Kauno miesto pakraštyje. 2025 metais katilinė pateikė tinklui apie 101 128 MWh šilumos ir buvo vienas didžiausių atsinaujinančios šilumos tiekėjų tinkle. Pagrindiniai Petrašiūnų biokuro boilerio fiziniai parametrai yra: didžiausia galia 32,4 MW, mažiausia palaikoma galia 12 MW, didžiausias galios kitimo greitis 3 MW/h. Įrenginys priklauso AB „Kauno Energija“ ir teikia šilumą BALTPOOL aukcione tomis pačiomis taisyklėmis kaip ir bet kuris kitas gamintojas [22, 23, 24].

3.2. Petrašiūnų akumuliacinės talpos originalaus projekto tikslas

„Kauno energija“, kaip pagrindinis Kauno miesto šilumos tiekėjas, nuosekliai įgyvendina CŠT tinklo sistemos modernizacijos programą. Šios programos tikslas – didinti sistemos energetinį efektyvumą, patikimumą bei lankstumą, atsižvelgiant į augančius vartotojų poreikius, neseniai prijungtą Panemunės rajoną, tarptautinius reikalavimus dėl energijos vartojimo efektyvumo bei tvarumo gerinimo miestuose. Be hidraulinių bandymų ir tinklų atnaujinimo darbų vasarą taip pat vykdomi šilumos gamybos įrenginių priežiūros darbai ar net statomi nauji papildomi įrenginiai. Vienas tokių planuojamų projektų buvo akumuliacinės talpos įrengimas Petrašiūnų katilinės teritorijoje, tačiau jis liko neįgyvendintas dėl finansinių ar kitų vidinių priežasčių.

Akumuliacinės talpos integracija į Petrašiūnų katilinę buvo pasirinkta kaip atsakas į keletą esminių iššūkių, su kuriais susiduria CŠT sistema:

- paros ir savaitinio šilumos poreikio svyravimai;
- šilumos tiekimo priklausomybė nuo katilinių veikimo režimų;
- ribotas greitai reaguojančių rezervinio šaltinio prieinamumas įrenginių gedimo ar planinių remontų metu;
- dujų naudojimo sumažinimas;
- poreikis didinti šilumos tiekimo sistemos atsparumą klimato ir energetinių šuolių atžvilgiu.

Talpą įsirengti buvo planuojama su Europos Sąjungos parama, kurios siekis pagerinti CŠT tinklą ir papildyti rezervinius įrenginius, o ne gauti nesąžiningą pranašumą. Jeigu talpa būtų naudojama padėti įveikti visus šiuos iššūkius, ji būtų naudojama ne tik kaip rezervinis įrenginys, todėl suteiktų pranašumą šilumos aukcione dalyvaujantys KE.

Akumuliacinę talpą buvo pasirinkta įrengti Petrašiūnų katilinės teritorijoje, nes ši katilinė yra viena pagrindinių šilumos gamybos grandžių mieste ir vienas seniausių energetinės paskirties pastatų. Šis objektas turi strategiškai patogią padėtį šilumos tiekimo sistemoje, didelį laisvos žemės plotą bei turi techninius pajėgumus talpos integravimui.

Šį pasirinkimą papildomai pagrindžia kitų Lietuvos miestų praktika. Klaipėdoje akumuliacinė talpa, kurios tūris siekia 3000 m³, jau veikia kaip įrankis šilumos poreikio balansavimui, sumažinant kuro sąnaudas ir optimizuojant katilinės darbą žemomis apkrovomis. Sekant šiuo pavyzdžiu, Kauno projektas galėtų tapti natūraliu žingsniu nacionalinėje šilumos ūkio modernizacijos eigoje.

3.3. Akumuliacinės talpos paskirtis tinkle

Akumuliacinė talpa projekte apibrėžiama kaip rezervinis ir stabilizuojantis įrenginys, kurio paskirtis – mažinti dujų naudojimą, gamybos disbalansą tarp šilumos šaltinių ir tinklo apkrovos bei užtikrinti tiekimo tęstinumą ir patikimumą net avarijų ar ekstremalių oro sąlygų atveju. Projekto dokumentuose pažymima, kad talpa nebus naudojama kaip konkurencingas nepriklausomas šilumos šaltinis, nes tuo atveju jį reikėtų apmokestinti pagal VERT nurodytas taisykles ir dalyvauti aukcione. Talpa bus integruojama į pagrindinį šilumos tiekimo žiedą ir veiks realiu laiku, remiantis tinklo apkrovos stebėseną. Tai leistų darbuotojams optimizuoti katilinių darbą, gaminti šilumą nominalia galia naktį ar ne piko metu, o išleisti ją rytais ar vakarais, kai poreikis didžiausias.

Pagrindinės akumuliacinės talpos funkcijos:

- Avarinio rezervo paskirtis. Katilinės talpa projektuojama kaip rezervinis objektas, kuris avarijos ar šilumos šaltinio sustojimo metu gali tam tikrą laiką užtikrinti aprūpinimą šiluma. Tai itin svarbu žiemos metu, kai tiekimo sutrikimai kelia riziką vartotojų sveikatai, komfortui ir infrastruktūros saugumui.
- Piko apkrovos dengimas. Talpa bus naudojama tiekti iš biokuro pagamintą šilumą piko valandų paklausai padengti. Kai paklausa viršija didžiausią galimą

generuojamos šilumos kiekį iš biokuro šaltinių, reikia įjungti dujinius katilus. Kaupiant švariau pagaminamą šilumą iki to laiko ir ją galėti tiekti tuo metu, sudaroma galimybė išvengti dujinių įrenginių naudojimo ir papildomai užsidirbti, nes tos papildomos šilumos nebūtų išėję parduoti didžiausios paklausos metu.

3.4. Akumuliacinės talpos valdymo strategija CŠT tinkle

Integruojant akumuliacinę talpą į centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) tinklą, vienas iš svarbiausių inžinierių uždavinių yra tinkamas darbo režimų įkrovimo ir iškrovimo valdymas. Tinkamas šių režimų valdymas leidžia ne tik sumažinti šilumos tiekimo disbalansą, bet ir maksimaliai išnaudoti esamus šilumos šaltinius ar turimus resursus. Praktikoje tai galėtų reikšti, kad šiluma gali būti kaupiama tuomet, kai tinklo suvartojimas yra žemas (pvz., naktį, savaitgaliais, ne šildymo sezono metu), o iškrovimas vykdomas tada, kai šilumos poreikis išauga – rytais, vakarais arba žiemos metu. Įrengus talpą katilinė arba kogeneracinis šilumos šaltinis galėtų ilgiau ar net visada, priklausomai nuo talpos dydžio, veikti optimaliu režimu, tiekiant šilumą tiesiogiai į tinklą, o perteklių nukreipiant į talpą. Kai paklausos apkrova viršija šaltinių galią arba jų darbas yra apribotas (pvz., remonto metu), žalia šiluma, vietoj dujinės kilmės energijos, gali būti tiekiamas iš talpos. Taip pat svarbus talpos operatoriaus darbas yra temperatūrų sluoksniavimo (stratifikacijos) palaikymas. Šio reiškinio palaikymas leidžia patikimai tiekti šilumą, nesumaišant šaltą vandenį su šiltu. Įvykus terminio sluoksniškumo suirimui paduodamas vandens kiekis nepasikeis, tačiau paduodamo vandens temperatūra pasikeis ir bus žemesnė, o tai sudarys problemų tiekime. Pastovių gamintojų aukcionų rinkoje, kur kiekvienas sustabdymas ar metinis remontas yra laikas, kai gamintojas praranda pinigus, o neprognozuojamos oro sąlygos trukdo planuoti ne tik gamybą ar kuro pirkimus, bet ir strategiškai pagrįstą vietą aukcione, talpa, leidžianti akumuliuoti pagaminta šilumą bei galėti ją parduoti patogiu metu, yra puikus įrankis apsaugoti verslą nuo nelaimių ir padidinti pajamas.

3.5. Tikrosios situacijos ir modelio sąsaja

Šilumos akumuliacinė talpa bus sumodeliuota kaip ta pati projektinė talpa, kurią norėjo pasidaryti KE pagal techninių projektų duomenis. Pagal vidinius dokumentus bus pritaikomi matmenys, darbiniai parametrai. Simuliuojamos situacijos suteiks galimybę ŠAT dirbti Kauno CŠT tinkle pagal scenarijuje aprašytą įrenginio paskirtį pikinių ryto ir vakaro paklausos šuolių balansuotojo ar piko rezervo įrenginio.

3.6. Šešiolikos gamintojų rinkinys

Simuliacijos apimtyje naudojama šešiolika realių, pagrindinių Kauno šilumos tinklo gamintojų: trylika biokuro ar atliekinės šilumos gamintojų, dalyvaujančių BALTPPOOL šilumos aukcione, ir trys dujiniai įrenginiai (PE-2, Šilko-2, Pergale), kurie veikia kaip likutinis saugos vožtuvas, kai biokuro pasiūla negali patenkinti CŠT tinklo paklausos. Žemiau pateikiama lentelė su gamintojų sąrašu ir jų fiziniais parametrais.

4 lentelė. Kauno CŠT gamintojų sąrašas su fiziniais parametrais

Nr.	Savininkas	Gamintojo pavadinimas modelyje	Kuro tipas	Maksimali galia, MW	Minimali galia, MW	Galios reguliavimo

						sparta, MW/h
1	KE	PE-1 (ŠAT kandidatas)	biomasė	32,4	12	3
2	KE	PE-2	dujos	45	5	20
3	KE	Nemuno katilinė	biomasė	19,2	7	3
4	KE	Inkaro katilinė	biomasė	20	7	3
5	KE	Šilko-1	biomasė	21	10	3
6	KE	Šilko-2	dujos	40	3	10
7	KE	Pergale	dujos	60	3	20
8	I dex Taika	Taikos katilinė	biomasė	20	6	3
9	I dex Taikos el.	Taikos elektrinė	biomasė-KJ	20	10	3
10	I dex Biruliškių	Birul B1	biomasė	25,7	7	4
11	I dex Biruliškių	Birul B2	biomasė	25,7	7	4
12	Aldec General	A.G.	biomasė	20	5	3
13	Ekopartneris	Eko	biomasė	17,5	5,3	3
14	Foksita	Fox	biomasė	21,6	6	3
15	Lorizon Energy	Lorizon	biomasė	10	4	1
16	KKJ	KKJ_BENDRA	Atliekos-KJ	70	15	10

Realybėje lentelėje esantys trys dujiniai įrenginiai pagrindiniame šilumos aukcione nedalyvauja, todėl simuliacijos metu jų valandinė gamyba bus nuskaitoma tiesiogiai iš išmatuotų senų parodymų, nepridedant galios kitimo greičio ar mažiausios galios apribojimų. Trylika biokuro ar atliekinės šilumos gamintojų sudaro pagrindinę judančią simuliacijos dalį, kurioje operatorius perduoda nurodymus gamintojams pagal aukciono prioritetines pozicijas ir tinklo paklausą. [24, 25]

3.7. Reguliavimo aplinka — VERT, Šilumos ūkio įstatymas, Baltpool

Lietuvos šilumos sektorių reguliuoja Valstybinė energetikos reguliavimo taryba (VERT). Pagrindinis jos tikslas – užtikrinti, kad vartotojai gautų kokybiškas paslaugas už sąžiningą kainą, o rinkoje veikiančios įmonės konkuruotų skaidriai. VERT skelbia šilumos sektoriaus kapitalo gražos normą (WACC), nustato kainos „lubas“ reguliuojamiems šilumos tiekėjams ir parengia metodinius dokumentus, kurių privaloma laikytis. Darbo metu naudojami ekonominiai rodikliai bus naudojami iš VERT. Reguliavimo taryba prižiūri aukcionų sąžiningumą priversdama gamintojus apibrėžti savo gamyklinius parametrus ir taip padėti šilumos tiekėjui tikslingiau reguliuoti tinklą, o iš gamintojų reikalauti atsakomybės nenutraukiamam gyventojų šilumos paklausos padengimui.

Papildomai trys reguliavimo aktai tiesiogiai liečia šio darbo metodiką, todėl juos apžvelgsime. Pirma, Šilumos ūkio įstatymas, kuriame šilumos įrenginius apibrėžia kaip techninių priemonių kompleksus, kurie yra skirti šilumai gaminti, ruošti, vartoti, perduoti ar kaupti. Akumuliacijos įrenginiai patenka į šią kategoriją, jie nėra išskirti kaip elektros energetikos įstatyme energijos kaupimo įrenginys, nors jie gali atlikti tą pačią energijos kaupimo funkciją [25].

Antra, BALTPOOL šilumos aukcione dalyvauja šilumos gamintojai su savo gamybos įrenginiais, tačiau talpos pačios šilumos negamina. ŠAT būtų skaitomos kaip šilumos gamintojo katilinės technologinės schemos dalis, o jos suteikiami pranašumai ir parametrai turėtų būti nurodomi pagal aukciono dalyviams taikomas taisykles. Aukciono rezultatai taip pat apibrėžia simuliacijos priimtą poziciją kainodaros taisyklę, pagal kurią gamintojo valandos pajamos yra suma per pozicijas iš pagamintų MW šilumos padaugintos iš aukciono šilumos kainos per tą valandą.

Aukcionai nusako koks yra šilumos pirkimo prioritetą tinkle, kokį kiekį iš kurio gamintojo reikia pirkti ir už kokią kainą. Jeigu gamintojas negali tiekti šilumos pagal savo pažadėtą poziciją dėl savo kaltės, jam gali būti skirta finansinė nuobauda, sąskaitą susimokėti už kito gamintojo padengtą, vietoj jo, šilumą už brangesnę kainą. Aukcionai įvyksta keletą savaičių prieš gamybos pradžią, gamyba iki to laiko pasiruošia ir operatorius nuo pirmos naujo aukciono įsigaliojimo dienos keičia prioritetus ir reguliuoja tinklą pagal naują tvarką. Sistemoje išskiriami du pagrindiniai gamybos įrenginiai: eksploataciniai įrenginiai, tiekiantys šilumą nuolat ir pagal iš anksto nustatytą kainodarą, bei rezerviniai įrenginiai, kurie įsijungia tik tada, kai dėl apkrovos svyravimų arba gamybos trūkumo nepakanka pigesnių aukciono metu išpirktų galios šaltinių. Dujiniai katilai daugumoje miestų yra laikomi būtent tokiais rezerviniais šaltiniais – jų įjungimas leidžiamas tik esant momentiniam žalios energijos sukurtos galios deficitui.

Vienam mėnesiui sudaromas vienas pagrindinis aukcionas, bei papildomai jeigu to reikia kiekvienai savaitei sudaroma po vieną balansavimo aukcioną. Balansavimo aukcionai naudojami tuo atveju, kada pagrindinio aukciono šilumos pajėgumų patenkinti miesto šilto vandens poreikiui nepakanka. Priežastys dėl ko gali neužtekti suplanuotos šilumos kiekio pagrindiniame aukcione gali būti tokios paprastos kaip netikėtai suprastėjusios oro sąlygos, netikėtų gamintojų avarių ar gedimų. Nepriklausomų šilumos gamintojų ir šilumos tiekėjų tokių kaip KE inžinieriai stebi oro prognozes, jas lygina su savais duomenimis bei atitinkamai planuoja kokią kainą pasiūlys aukcione, kuriuos įrenginius naudos, kada juos stabdys apžiūrai. Dalyvio pasiūlymą papildomai gali įtakoti ir konkurentų siūlomos kainos, pajėgumai, planuojami CŠT darbai. Kadangi, šilumos pardavimas vykdomas aukciono tvarka, skirtingų bendrovių atstovai stipriai kovoja dėl vietos šilumos pardavimo prioriteto sąrašo viršūnėje santykiu parduotos šilumos atsiperkamumu. Šiuo atveju valstybinės įmonės KE tikslas yra vartotojo gerovė bei išlaikyti kuo daugiau ekonomiškai prasmingai veikiančių įrenginių. Žemiau pateikiamas vieno iš aukciono rezultatų pavyzdys, kurį naudosome simuliacijoje.

Aukciono Nr. AUC001669																																			
Duomenys Ileksporuoti 2026-05-11 13:41:49																																			
Įmonės pavadinimas: Paskelbti prognozuojami supirkti šilumos kiekiai																																			
Įmonės pavadinimas: Kauno energija AB																																			
Šilumos tiekimo sistema: Kauno m. šilumos tiekimo sistema																																			
Tiekimo mėnuo: 2025-01																																			
Palyginamosios šilumos gamybos sąnaudos: 4.15 ct/kWh																																			
Numatamos šilumos poreikis: 198073 MWh																																			
Perkamas kiekis padiniui, MWh																																			
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31																																			
5280 5616 5400 5832 5904 6912 6864 6504 6576 6576 6696 6480 5833 6168 6744 7152 7440 7296 7008 6720 6264 6408 6528 6336 6072 6264 6120 6264 6168 6384 6360																																			
Pasiūlytas kiekis padiniui, MWh																																			
Prioritet o Nr.	Pasiūlyto teikėjas, šilumos gamybos įrenginys	Superkamas kiekis, MWh	Pasiūlyta kaina, ct/kWh	Pasiūlytas kiekis, MWh	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	Kauno kogeneracinė įėgainė UAB, Kauno kogeneracinė įėgainė	14136	3.58	14136	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	
2	Kauno kogeneracinė įėgainė UAB, Kauno kogeneracinė įėgainė	22320	3.86	22320	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	
3	UAB "Ekopartners", Ekopartners vandens šildymo katilai	4650	4.01	4650	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
4	Iđex Taikos elektrinė UAB, Iđex Taikos elektrinė UAB	10416	4.05	10416	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	
5	UAB "Foksita", UAB Foksita biokuro elektrinė	11233.66	4.07	11233.66	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	
6	UAB "Aldec General", Aldec General VŠ katilai	10416	4.08	10416	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	
7	UAB "Ekopartners", Ekopartners vandens šildymo katilai	4644	4.08	4644	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	
8	AB "Kauno energija", Petrasilių elektrinės biokuro katilai	18873.92	4.09	18873.92	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	544	
9	AB "Kauno energija", Inkaro katilinės katilai Nr. 1	10416	4.1	10416	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	
10	UAB "Lorizon Energy", biokuro katilai	5208	4.1	5208	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	168	
11	AB "Kauno energija", Nemuno katilinės katilai Nr. 1	9999.35	4.11	9999.35	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	
12	AB "Kauno energija", Šilko katilinės biokuro katilai	10936.8	4.12	10936.8	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	353	
13	Iđex Biruliškių UAB, Iđex Biruliškių UAB, 1 gamybos blokas	13370.83	4.15	13384.55	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	
14	Iđex Biruliškių UAB, Iđex Biruliškių UAB, 2 gamybos blokas	13191.1	4.15	13384.55	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	
15	Iđex Taika UAB, Iđex Taika UAB	10162.4	4.15	10416	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	

8 pav. BALTPOOL šilumos pirkimo 2025-01 Kauno miesto pagrindinio aukciono lentelė

Aukciono rezultatų lentelėje matome šilumos gamintojų pavadinimus, jų prioriteto eilės numerį, pasiūlytą kainą bei šilumos kiekį MWh. Šiame aukcione pirminis prioriteto hierarchijos viršūnės rodiklis yra pigesnė kaina. Šilumos gamintojai gali pasiūlyti keletą kiekių pasiūlymų su skirtingomis kainomis [26].

3.8. Simuliacija, rinka ir strategija

Aukciono tvarkos buvimas šio darbo analizės kontekste reiškia, jog net simuliuojant idealiomis fizinėmis sąlygomis negalime teigti, jog rezultatai būtų buvę būtent tokie, nes nepriklausomų šilumos gamintojų ir KE siūloma perkamos šilumos kaina bei šilumos kiekis priklauso nuo to, kokius sprendimus atliko žmonės dirbdami šioje sferoje, tuo metu ir toje situacijoje. Taip pat reikia pabrėžti, kad akumuliacinės talpos turėjimas būtų vienas pagrindinių šilumos gamybos ir pardavimo strategijos pamatų, o planavimas tinkamam pakrovimui prieš žinomus pikus yra neatsiejama geros strategijos dalis. Ši strateginio valdymo stoka simuliuojant šilumos akumuliacinio talpą 2025 metų aukciono ir gamybos aplinkoje gali atsispindėti kaip mažesnis atsiperkamumas. Kadangi simuliacijos rezultatai ir aukciono pasiūlymai galėtų kisti dėl atsiradusių naujų pranašumų, negalime sakyti kad realybėje būtų būtent taip pat, kaip ir simuliacijoje, nes nustatyti simuliacijos metu ką bandytų nuspėti kiti žmonės dalyvaujantys ir prognozuojantys aukcioną, yra labai sunku arba praktiškai neįmanoma. Analizuodami savą padėtį šilumos aukciono rinkoje žmonės turi priimti sprendimą naudojantis senesniais tinklo ir strategijos duomenimis bei nežinomųjų duomenų spėjimu, - kokią kainą ir strategiją naudos varžovas su savo pajėgumais. Talpa yra pranašumas, todėl jos buvimas nurodo, kad aukciono dalyvių veiksmai būtų skirtingi, negu praeityje ir simuliacija nėra 100 procentų tikrovė.

Vis dėlto, teisingai interpretuodami simuliacijos rezultatus remiantis inžinerinėmis žiniomis bei praktiniais duomenimis, galime simuliuoti kas būtų, jeigu praeityje būtume dirbę su akumuliacine talpa už tas pačias šilumos kainas varžovams nežinant ir pamatyti talpos veikimo galimybes realaus tinklo veikimo kontekste. Simuliacija neduoda 100 procentų tikslių ekonominių rodiklių bei atsiperkamumo projekto finansuotojui, tačiau tai yra puikus įrankis pamatyti, kaip galėtų antras didžiausias centralizuoto šilumos tiekimo tinklas Lietuvoje dirbti integruojant akumuliacinę talpą viename iš savo gamintojų. Šilumos ūkio darbuotojams ši informacija galėtų leisti geriau prognozuoti, kokie galėtų būti tokio įrenginio privalumai tinklui ir šilumos gamybos įrenginių darbui, padaryti išvadas, kiek galima būtų sutaupyti, jeigu

Įrenginys yra eksploatuojamas įvertinus visus jo privalumus sąveikaujančiai technikai bei tinklui, ir galbūt rasti būdą pritaikyti ŠAT savo sistemose.

3.9. Šilumos akumuliacijos technologija

Šilumos akumuliacija apima plačią technologijų šeimą: jutiminės šilumos akumuliaciją vandenyje, akmenyse ar žemėje, latentinės šilumos akumuliaciją per fazinio kitimo medžiagas, termocheminę akumuliaciją per grįžtamasias chemines reakcijas. Petrašiūnų talpa priklauso jutiminės šilumos karšto vandens talpos kategorijai.

Talpoje laikomas vanduo fiksuoto slėgio ribose, kad vanduo nepavirstų į garą darbinėje temperatūroje. Vidinė terpė yra stratifikuota: karštas vanduo viršuje, šaltas grįžtamosios linijos vanduo apačioje, tarp jų yra santykinai plonas tarpinės temperatūros termoklino sluoksnis. Įkrovimo metu karštas vanduo įpurškiamas iš viršaus, o šaltas išstumiamas iš apačios. Iškrovimo metu vyksta atvirkščias procesas. Sukaupta energija lygi karšto sluoksnio tūriui, padaugintam iš vandens tankio, savitojo šiluminio talpumo ir karšto tiekiamo sluoksnio bei grįžtamosios linijos temperatūros skirtumo.

3.10. Petrašiūnų talpos projektiniai parametrai

Talpos projektinius parametrus dokumentuoja AB „Kauno Energija“ inžinerinis archyvas. Pagrindiniai šaltiniai – Techninė specifikacija (TS), Autorizavimo ataskaita (AR), Projektinė specifikacija (DS-001.1), „Mechartes“ skaitmeninės skysčių dinamikos (CFD) ataskaita talpai ir PID schema T1. Pagrindinės fizinės konstantos pateikiamos žemiau esančioje lentelėje.

5 lentelė. Petrašiūnų ŠAT projektiniai parametrai

Parametras	Vertė	Šaltinis
Tikrasis tūris	5 000 m ³	DS-001.1
Efektinis akumuliacijos tūris V _{eff}	4 250 m ³	DS-001.1
Viršutinė temperatūros riba T _{top_max}	95 °C	TS §4.5
Apatinė temperatūra T _{return}	~50 °C	DEMAND_2025
Įkrovimo galios riba P _{charge_max}	20 MW	TS §4.5
Iškrovimo galios riba P _{discharge_max}	34 MW	PID schema T1
Tėkmės riba G _{max}	1 237 m ³ /h	PID schema T1
Kanoninė energijos talpykla	222 MWh	AR §1.5
Apvalkalo plotas A _{surface}	1 650 m ²	AR p. 13
Izoliacijos U-vertė	0,20 W/(m ² ·K)	AR p. 13
Šilumos nuostolio koeficientas k	2,2 (kalibruotas)	Sukalibruotas pagal AR
FOM įkrovimui	0,77	Mechartes CFD
FOM iškrovimui	0,86	Mechartes CFD
Vandens tankis × savitasis šiluminis talpis	4,10 MJ/(m ³ ·K)	IAPWS-IF97

4250 m³ vertė yra efektyvusis akumuliacinės talpyklos tūris. Geometrinis talpyklos tūris sudaro apie 5000 m³, tačiau maždaug 15 % šio tūrio rezervuojama apatiniam šaltajam sluoksniui, viršutiniam kupolui ir termoklino storiui, kurio talpykla negali visiškai panaudoti šiluminei energijai kaupti. Jeigu ji bus visiškai sunaudota, termoklina susiardys ir vandens

temperatūros susisluoksniavimas išnyks, kas trukdys gamybai, nes tiekiamas vanduo nebus pastovios temperatūros, o gamintojas negalės užtikrinti tikslaus tiekiamos šilumos kiekio. Efektyvusis tūris atitinka apie 222 MWh sukauptos šilumos, kai taikomas standartinis 95 °C ir 50 °C temperatūrų intervalas.

Talpyklos veikimą riboja ne tik jos energinė talpa, bet ir dar du papildomi apribojimai. Įkrovimo galios riba nustatoma pagal katilinės pusės įrangą ir viršutinio difuzoriaus srautą. Petrašiūnų katilinės atveju nurodoma vertė yra 20 MW. Pagal PID schemą T1 talpyklos iškrovimo galia, esant didžiausiam 1237 m³/h srautui, siekia 34 MW. Šios dvi galios ribos yra asimetriškos, tai reiškia, kad pagal projektinį sprendinį talpykla iškraunama greičiau, negu įkraunama. Taip yra todėl, kad iškrovimo režimas reikalingas šilumos poreikio pikų, aukščiausios paklausos, metu. Tuo tarpu įkrovimas vykdomas mažesnės apkrovos valandomis, kai skubaus galios poreikio nėra, todėl įkrovimo galia mažesnė.

Papildomai rasti dar du vidiniai apribojimai nustatyti remiantis „Mechartes“ atliktu skaitinės skysčių dinamikos modeliavimu projektui:

- Įkrovimo naudingumo rodiklis – 0,77. Talpykla per vieną nepertraukiamą įkrovimo ciklą negali priimti daugiau kaip 77 % savo standartinės 222 MWh talpos, nes po šios ribos grįžtantis šaltojo sluoksnio srautas pradeda bloginti viršutinio difuzoriaus įtekėjimo temperatūrą.
- Iškrovimo naudingumo rodiklis – 0,86. Talpykla per vieną iškrovimo ciklą negali atiduoti daugiau kaip 86 % savo standartinės talpos, nes viršijus šią ribą ištekancio srauto temperatūra nukrinta žemiau šilumos tinklo tiekimo temperatūros reikalavimo.

Šie du naudingumo rodikliai simuliacijoje riboja per vieną ciklą perkeliama energijos kiekį, tačiau neribuoja bendro metinio ciklų skaičiaus. Simuliuojant akumuliacinės talpos darbą yra atsižvelgiama į šiuos rodiklius [23, 27].

3.11. Simuliacijos metodika ir įgyvendinimas

3.11.1. Duomenų pagrindas ir paruošimo srautas

Simuliacija remiasi trimis pagrindiniais empirinių duomenų šaltiniais: KE tinklo operatoriaus valandiniu 2025 metų veiklos darbalapiu (PAKLAUSA_2025.xlsx), 2025 metų BALTPPOOL aukciono archyvu ir surinktais gamintojų parametrais pateiktais 5-oje lentelėje. Darbalapis turi po vieną lakštą kiekvienam gamintojui (šešiolika iš viso esančių gamintojų), kiekvienam pateikiant 8 760 valandinių duomenų eilučių su laiku, oro temperatūra, tiekimo ir grįžtamosios linijos temperatūromis, slėgiais bei trimis šilumos atidavimo kolonomis: „QDEK“ (deklaruota gamyba), „QUZD“ (operatoriaus nurodyta gamyba) ir „QREAL“ (reali gamyba). Šilumos atidavimo stulpeliai sudaryti iš realios ir operatoriaus nurodytos gamybos, nes operatorius užduoda galimą paduodamą į tinklą galios kiekį kiekvienam gamintojui atskirai pagal aukciono nustatytas eiles ir kiekius. Tačiau tikrovėje dažnai tikrasis kiekis dėl nenumatomų priežasčių ar nepastebėtų praradimų sistemoje yra mažesnis negu prašomas operatoriaus. Tuo atveju skirtumas būna fiksuojamas kaip neparduotas kiekis. Simuliacijos atžvilgiu, tai yra labai teigiamas dalykas, nes mes žinoma tikrąjį paduodamos šilumos kiekį, o skaitiklių nesuveikimo atveju, kurie praktikoje dažnai pasitaiko, galime naudoti

operatoriaus nurodytą kiekį, kuris minimaliai skiriasi. Kad simuliacijos metu sukurtas programinis operatorius galėtų susigaudyti tarp teisingų ir klaidingų parodymų, mes užduodame jam taisykles.

Pagal Excel duomenų lentelę darbalapio kokybės problemos sprendžiamos keturių etapų paruošimo srautu (src/data/loaders.py):

- 1 etapas. „QUZD“ sutrikimo pakeitimas: kai „QREAL“ yra nerodomas arba lygus nuliui, o QUZD > 0, vertė pakeičiama linijine laiko interpoliacija arba QUZD verte kaip atsarginiu variantu. Per 2025 metus taip sutvarkyti 902 sutrikę langeliai.
- 2 etapas. Tuštumų pakeitimas tikrais išjungimais: likę nuliniai įrašai pakeičiami aiškiais nuliais ir pažymimi išjungto šaltinio žymekliu. Tikrovėje vykę planiniai išjungimai atkartojami identiška.
- 3 etapas. Ženklo apvertimo valymas: neigiamoms „QREAL“ vertėms, taikoma „abs()“ funkcija, nes neigiamos energijos CŠT tinkle netiekia, tai skaitiklio gedimas.
- 4 etapas. Jutiklio spyglių valymas: vertės virš dvigubo 99-tojo procentilio pakeičiamos tuo pačiu interpoliacijos būdu. Taip išvengiami nerealistiški, trikdžių apskaitoje sukurti šuoliai, jeigu galios reikšmė yra didesnė negu 99 % kitų esančių reikšmių naudojama praėjusios valandos vertė.

Po keturių etapų simuliacija nuskaityto švarią, be tarpų valandinę visų gamintojų gamybos matricą 8 760 valandoms.

3.11.2. Talpos modelis, efektinis tūris ir šilumos praradimas aplinkai

Petrašiūnų talpa modeliuojama kaip dviejų zonų plokščio srauto vertikalus cilindras su fiksuotu efektiu tūriu $V_{eff} = 4\ 250\ m^3$. Modelio kintamieji yra karšto sluoksnio tūris „V_hot(t)“ ir karšto sluoksnio temperatūra „T_top(t)“. Bendra sukaupta energija valandai „E“:

$$E = V_{hot}(t) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_T - T_G)(t) \quad (6)$$

čia: V_{hot} – karšto sluoksnio tūris, m^3 ; ρ – vandens tankis, kg/m^3 ; c_p – savitoji šiluminė talpa $J/(kg \cdot K)$, T_T – tiekiamo vandens temperatūra, $^{\circ}C$; T_G – grįžtamo vandens temperatūra, $^{\circ}C$.

Kur $\rho \cdot c_p \approx 4,10\ MJ/(m^3 \cdot K)$ esant darbinei temperatūrai. Talpos veikimo režimas kiekvieną valandą yra viena iš trijų abipusiškai išskirtinių būsenų: įkrovimas, iškrovimas arba prastovos (XOR apribojimas). Srautai apriboti pagal nurodytus parametrus: įkrovimo riba „P_charge_max“ = 20 MW, iškrovimo riba „P_discharge_max“ = 34 MW iš duomenų lentelės.

Termoklino dinamiką užfiksuoja du veikimo gerumo rodikliai: įkrovimo = 0,77 (didžiausia dalis talpyklos, kuri gali būti pripildyta per vieną įkrovimo ciklą) ir taip pat iškrovimo = 0,86.

Šilumos nuostoliai iš ŠAT aplinkai modeliuojami pagal šią formulę, kintamieji nurodyti 5 lentelėje:

$$Q_{praradimas} = k \cdot U \cdot A_{paviršiaus} \cdot (T_{vid} - T_{amb}) \cdot \Delta t \quad (7)$$

čia: $k = 2,2$ sukalibruotas taip, kad formulė atkartotų projektinių duomenų autorizavimo ataskaitos pateikiamą metinį šilumos praradimo rodiklį 442,9 MWh.

3.11.3. Trys pradinės sąlygos

Kiekvienas iš trijų scenarijų vykdomas tris kartus prieš tris skirtingas pradines talpos būsenas: šaltas startas, kai pradinis įkrovimas – 0 % („V_hot“ = 0, sukaupta energija 0 MWh), pusiau pilna, kai pradinis įkrovimas – 50 % („V_hot“ = 2 125 m³, „T_top“ = 95 °C, energija ≈ 111 MWh) ir pilna, kai pradinis įkrovimas – 100 % („V_hot“ = 4 250 m³, „T_top“ = 95 °C, energija ≈ 222 MWh). Iš viso atliekama devynių derinių, 3 scenarijų × 3 pradinių sąlygų, analizė.

3.11.4. Operatoriaus funkcijos

Simuliacija vykdoma valanda po valandos per 8 760 valandų. Kiekvieną valandą operatoriaus numatytas elgesys yra nuskaityti teisingą išmatuotą „QREAL“ parametą kiekvienam gamintojui iš darbalapio ir naudoti tas vertes jų nekeičiant. Tik scenarijaus akumuliacijos strategija gali priversti operatorių nukrypti ir pakeisti gamybos parametrus, pavyzdžiui: kai talpa įkraunama arba iškraunama, operatorius pakoreguoja mažiausią būtiną kitų gamintojų kiekį, kad bendra paduodamos šilumos tinklui suma būtų lygi išmatuotai, tačiau viskas viduje tinklo jau pasikeitę ir tada operatorius turi suvaldyti jį pats. Tam kad jis jį suvaldytu tinkamai, be planinių priverstinių užsidarymų taisyklės, mes jam suteikiame dar dvi pagrindines taisykles.

Pirmoji, yra pagrindinis simuliacijos nekintantis pamatas, tai yra prisirišimas prie 2025 išmatuotų reikšmių, kur simuliacijos metu gautos šilumos tinklui suma turi būti lygi 2025 metais išmatuotam kiekiui:

$$\Sigma \text{simuliuotų } QREAL = \Sigma \text{išmatuotų } QREAL \text{ kiekvienai valandai } t \text{ per 2025 metus} \quad (7)$$

Tinklui pateikta bendra MW vertė kiekvieną valandą yra išlaikoma identiška pradinei 2025 metų išmatuotai bendrai sumai; pasikeičia tik vidinis gamintojų mišinys. Tikrovėje operatoriai nuspėja ateities šilumos šuolius pagal sutelktą patirtį ir tinklo slėginius bei kitus parametrus. Tačiau ir tikrovėje, ir simuliacijoje gali būti, kad operatorius nesugebės idealiai suvaldyti tinklo, ir tokiais išskirtiniais atvejais operatoriui tenka įjungti dujinius įrenginius, jeigu biokuro katilai dėl savo limituoto galios kitimo greičio nespėtų prisitaikyti naujiems nurodymams. Simuliacijos metu tokiu klaidingu būdu panaudotų dujų kiekis bus sekamas ir turėtų likti tik labai maža bendros produkcijos kiekio dalis, kad simuliacija būtų tinkama užsibrėžtiems standartams. Šios situacijos galima būtų neapsibrėžti, tačiau ištikus tokiam atvejui, kai operatorius neturi kaip ir iš kur paimti biokuro tipo šilumos, simuliacija sustotų ir negalėtų būti užbaigta pagal užsibrėžtus kokybės standartus.

Antroji, yra ta, kad operatorius gali duoti pakeitimų įsakymus gamintojams tik pagal aukciono rezultatus ir tuometinę situaciją. Taip išvengsime nelegalių žingsnių, seksime aukciono tvarką, kainas ir kiekius pagal įstatymą. Papildomai pasinaudojus validacijos grafikais, tikrinančiais pirmos taisyklės įvykdymo procentą biomasės šilumai ir dujų šilumai, įsitikiname, kad buvo sekama pirmosios taisyklės užsibrėžtose ribose.

Taisyklių hierarchija yra svarbi, nes realybėje kaip ir simuliacijoje ne visada išeina patenkinti momentinį paklausos šuolį ir nors su visu aukcione pasiūlytu vieno šilumos gamintojo

pozicijos kiekiu galėtų užpildyti atsiradusį trūkumą, tačiau gamintojas nespėja per valandą padidinti savo paduodamos šilumos kiekio iki to lygio. Tuo atveju reikia prašyti kelių gamintojų padidinti paduodamą šilumos kiekį, kas prieštarauja aukciono taisyklėms, tačiau pirmoji taisyklė visada turi būti įgyvendinta. Taip pat vyksta ir realybėje, pirmiausia svarbu užtikrinti pasiūlą paklausai, o vėliau paklausai sumažėjus, operatorius pagal aukciono rezultatų prioritetą nukrauna brangesnius įrenginius ir užkrauna pigesnius, taip gražindamas aukciono tvarką tinklui.

3.11.5. Dujinių įrenginių dispečerizavimo taisyklė

Trys dujiniai įrenginiai (PE-2, Šilko-2, Pergale) aukcione nedalyvauja, todėl simuliacija neturi aukcione paremto pagrindo nuspręsti, kurį iš jų pasileisti tam tikrai valandai. Pasirinkimas vykdomas pasitelkiant patį 2025 metų išmatuotą duomenų įrašą kaip signalą, kurį galima sekti. Valandai t , po biokuro dispečerizavimo ir bet kokio talpos iškrovimo apskaičiavimo, likutinis dujų šiluminės galios poreikis G apskaičiuojamas pagal formulę:

$$G_{sim}(t) = išmatuota_paklausa(t) - \Sigma biomassės_pasiūla(t) - \check{S}AT_iškrovimas_sim(t) \quad (8)$$

Iš išmatuotos paklausos atimame visą galimą biomasės energijos pasiūlą tuo metu ir galimą šilumos akumuliacijos talpos iškrovimą pagal ŠAT įkrovimo būseną ir scenarijų. Jei likutinis dujų šiluminės galios poreikis „ $G_{sim}(t) > 0$ “, taikoma viena iš dviejų taisyklių: A scenarijaus atvejis, kai realusis operatorius taip pat įjungė dujinius katilus tą valandą, tada simuliacijos dujų poreikis paskirstomas tarp trijų įrenginių tomis pačiomis proporcijomis kaip ir išmatuotame įrašė. Arba B atvejis, kai realusis operatorius dujomis tomis valandos nešildė, tuo atveju taikoma statinė eiliškumo tvarka pagal 2025 metų metinę išmatuotą gamybą nuo didžiausios iki mažiausios ir išrenkamas daugiausiai dirbęs įrenginys, kuris veiks iki jam leistinų limitų. Jeigu paklausai užpildyti jo neužteks, operatorius užkuria sekantį pagal eilę ir taip iki kol paklausa užpildoma.

3.11.6. A scenarijus – dujų pakeitimas

A scenarijus iškrauna talpą tik tada, kai 2025 metų išmatuotas įrašas rodo dujų įrenginių veikimą. Tai yra tikroji talpos originaliame projekte paskirtis, pikinio rezervo įrenginys išvengti dujų naudojimo:

$$iškrovimas_aktyvuojasi(t) = (bendra_dujų_išmatuota_galia(t) > 0) \quad (9)$$

Iškrovimo galia apribota trimis vienu metu veikiančiomis kliūtimis: didžiausio galimo iškrovimo kiekio – „ $P_discharge(t) = 34$ MW, sukauptos energijos kiekiu talpoje tuo metu, išmatuotas dujų kiekis tą valandą, kurį galima padengti. Trečioji riba užtikrina uždarmo pagrindo išlaikymą, nes talpa keičia tik mišinį, ne bendrą tinklo paklausos sumą.

3.11.7. B scenarijus – galios kitimo problemos užpildymas

B scenarijus iškrauna talpą tuo metu, kai „PE-1“ galėtų tiekti daugiau, tačiau katilo galios kitimo greitis yra per mažas patenkinti visą galimą paklausos dalį. Minėtoje operatoriaus 2-osios taisyklės nesilaikymo problemoje, dauguma šilumos gamintojų praranda daug pinigų dėl šios išimties iš aukciono tvarkos, o didieji gamintojai su galimybe sparčiau keisti savo

atiduodamos šilumos dydį gauna pasipelnyti, nes paklausa turi būti užpildyta momentaliai. B scenarijus leidžia įsivaizduoti kas būtų, jeigu vietoj specialių atnaujinimų katilinėje, norint padidinti paduodamos galios kitimo spartą, būtų įrengta ŠAT ir panauda šiai paskirčiai. Talpą būtų naudojama neviršijant Petrašiūnų biokuro katilo maksimalios gaminamos galios ribos, bet keičiant maksimalią galios reguliavimo spartą. Piko metu, kai paklausa leidžia tiekti šilumos daugiau nei katilinė suspėtų, galime panaudoti talpoje esančią šilumą ir ją tiekti į tinklą už Petrašiūnų katilinę (PE-1), lygiagrečiai su dirbančiu biokuro katilu ir palaipsniui kelti katilo paduodama galią bei mažinti talpos atiduodamą šilumą iki kol katilas pasivys reikiamą padavimo lygį pagal tuometinę aukciono tvarką. Galios kitimo greičio problemos vertė valandai apibrėžiama pagal formulę:

$$galios_kitimo_spragaMW(t) = \max(0, dispečerio_didžiausias_galimas_uždavimas_PE_1(t) - (PE_1_boiler(t - 1) + 3)) \quad (10)$$

čia: $galios_kitimo_spragaMW(t)$ – galios kiekis vienai valandai, kurį talpa galėtų papildyti dėl galios kitimo greičio stokos. Formulė „max“ iš dviejų skaitinių reikšmių skliausteliuose gražina didžiausią reikšmę. Taigi, jeigu dispečerio didžiausias galimas uždavimas Petrašiūnų katilinei yra 16 MW pagal aukciono tvarką, o katilinė prieš valandą dirbo 10 MW galia ir šią valandą pakils tik 3 MW, kitą 3 MW dalį, jeigu įmanoma fiziškai, padengia talpoje sukaupta energija. Jeigu iš formulės gautas antrinis skaičius yra neigiamas, funkcija pasirenka 0 ir joks galios kitimo problemos sprendimas nepriimamas, nes tam nėra sąlygų.

Iškrovimui analogiškai naudojama minimalaus skaičiaus atrinkimo funkcija. Programa renkasi iš 34 MW, maksimalaus galimo atidavimo per valandą, sukauptos šilumos energijos kiekio, galimo tiekti galios kiekio dėl greičio kitimo problemos tuo laiko momentu:

$$P_iškrovimas(t) = \min(34\text{ MW}, sukaupta\text{ energija} / \Delta t, s\ galios_kitimo_spragaMW(t)) \quad (11)$$

Apsaugant tinklą ir jo stabilumą nuo staigaus talpos pasibaigimo, jeigu ŠAT staiga baigtusi energija ir Petrašiūnų biomasės boileriai nespėtų pasivyti, taikoma „glotnaus mažėjimo“ taisyklė. Kitu atveju tinkle atsirastų nestabilumo laikotarpiai, kuriuos reikėtų padengti kitiems gamintojams ir tai sukeltų papildomų problemų. Iškrovimas negali nukristi daugiau kaip 3 MW iš valandos į valandą. Šios taisyklės energetinio biudžeto apskaičiavimas taikomas kiek pamodifikavus aritmetinės mažėjančios progresijos formulę pagal mūsų situaciją:

$$mažėjanti_energija(D) = [D/3] \cdot D - (3 \cdot [D/3] \cdot ([D/3] - 1)) / 2 \quad (12)$$

Prieš pradėdant iškrovimą iš talpos B scenarijaus programinis operatorius klausia, ar talpykloje esanti mažėjanti energija spėtų nusikrauti po 3 MW į valandą, ir jeigu tai yra teigiamas atsakymas, iš talpos pradėdama tiekti šiluma. Tačiau, jeigu atsakymas yra neigiamas, tada planinis iškrovimas yra sumažinamas vienu 3 MW žingsniu ir tikrinama ar ŠAT galėtų tiekti kiek mažesnę kiekį. B scenarijaus iškrovimas, kaip ir A scenarijaus, vyksta pagal aukciono taisykles, o tiekiama šilumos kaina nustatoma pagal kaupiamąją priimtos tuometinės Petrašiūnų pozicijos aukcione taisyklę.

3.11.8. C scenarijus – sujungti A ir B scenarijai

C scenarijus paleidžia A ir B scenarijus kartu su griežtu A prioritetu prieš B. Per žiemos mėnesius (gruodį, sausį, vasarį) leidžiamas tik A, o talpa rezervuojama dujų energijos pakeitimui. Likusiu metų laiku abu scenarijai aktyvūs, tačiau A laimi bet kokį konfliktą, nes dujas pakeisti yra pagrindinis šilumos akumuliacijos talpos uždavinys ir vienas pagrindinių prioritetų. C scenarijus naudoja abu apskaitos rėmus kiekvienai valandai.

3.11.9. Numatytoji įkrovimo taisyklė

Visuose trijuose scenarijuose taikoma vienoda numatytoji įkrovimo taisyklė: kai „PE-1“ katilas dirba ir tiekia šilumą tinklui, bet turi galimybę dirbti didesne galia, tačiau operatorius to neprašo, katilo tiekiamą galią padidinama ir perteklius nukreipiamas į talpą. Operatorius pokyčio nemato, tinklas gauna tą patį kiekį, tačiau talpa pasipildo. Petrašiūnų reali katilo galia skirsis nuo paduodamos į tinklą, todėl reikės sekti abi, kad talpai užsipildžius ar paklausai padidėjus krovimas galėtų nustoti ir biomasės katilas spėtų susiderinti su tinklo darbu neišmesdamas šilumos į orą. Analogiškai kaip scenarijuje B naudota minimalaus skaičiaus grąžinimo funkcija, padarytos trys ribos:

- katilo bendra gamyba \leq minimali reikšmė tarp „PE-1“ katilo bendra galia (tiekta į tinklą ir skirtą talpyklai įkrauti) praeitą valandą + 3 MW arba „P_max“ = 32,4 MW),
- tinklo paklausa „D(t)“ yra užtikrinta
- įkrovimo srautas neviršija 20 MW

Trys įspėjimai įkrovimo metu galintys sustabdyti procesą: perpildymo rizika (jei talpa beveik pilna), iškrovimo konfliktas (XOR taisyklė), nes talpa gali atlikti tik vieną veiksmą vienu metu ir išmatuotas „PE-1“ sustabdymas. Sustabdymo metu, kas apibrėžta kaip ≥ 2 paeilui valandos su „QREAL“ = 0 ir „QUZD“ = 0, sustoja ne tik tiekiamas į tinklą srautas, bet ir katilo bendra gamyba priverstinai sumažinama iki nulio, o fiziškai sustabdytas katilas negali įkrauti talpos. Taisyklė suderinta su 2025 metų duomenimis, kad planuoti sustabdymai būtų atkurti ir neatsirastų netikrų papildomų stabdymų dėl neteisingų operatoriaus veiksmų ar pradinių duomenų.

3.11.10. Kainodara — kaupiamoji priimtos pozicijos taisyklė

Simuliacija taiko vieną kainodaros taisyklę du kartus: vieną kartą išmatuotai 2025 metų galiai „QREAL“ pagal tikrus duomenis, kad gautų atskaitos žurnalą scenarijaus rezultatams, ir antrą – simuliuotai galiai „QREAL“, kad gautų scenarijaus rezultatų žurnalą. Kiekvienai valandai kiekvieno gamintojo gamyba paskirstoma per jo priimtas pozicijas pagal aukcione siūlytą kainą, kiekį bei prioritetinę eilę (pagrindinio aukciono pozicijos pirma, balansavimo pozicijos antra). Talpos įkrovimo simuliacijos metu pinigai nekeičia rankų, todėl nėra skaičiuojami. Dujų atsisakymas yra laimėjimas dėl Europos Sąjungos prioritetų, todėl dujų kainos neskaičiuojamos [26].

3.11.11. Ekonominė interpretacija — investiciniai rodikliai

Simuliacijos valandinis pinigų srautas sumuojamas pagal scenarijų ir paverčiamas keturiais investiciniais rodikliais 9 langelių lentelėje (3 scenarijai \times 3 pradinės sąlygos). Naudojamos

investicijos konstantos: kapitalo išlaidos = 1 500 000 €, tarnavimo trukmė $N = 25$ metai (Danijos energetikos agentūra), eksploataavimo išlaidos = 22 500 €/m. kas yra 1,5 % kapitalo išlaidos, vidutinė svartinė kapitalo kaina (WACC, r) = 3,15 % (pagal surasta VERT skelbiama šilumos sektoriaus norma) [28, 29, 30].

Keturių rodiklių formulės:

$$\text{Paprastas atsipirkimo laikas} = \text{Kapitalo išlaidos} / \text{metinės pajamos} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{Išlyginamoji šilumos kaina} = & (\text{Kapitalo išlaidos} \cdot \text{kapitalo atgavimo koeficientas} + \\ & \text{eksploataavimo išlaidos}) / \\ & \text{metinis atiduodamos energijos kiekis, } \check{\text{S}}\text{AT_MWh, kur kapitalo atgavimo koeficientas} = \\ & r(1+r)^N / ((1+r)^N - 1) \quad (14) \end{aligned}$$

$$\text{Grynoji dabartinė vertė} = -\text{Kapitalo išlaidos} + \sum (\text{metinės pajamos} - \text{eksploataavimo išlaidos}) / (1+r)^t \quad (15)$$

$$0 = -\text{Kapitalo išlaidos} + \sum (\text{metinės pajamos} - \text{eksploataavimo išlaidos}) / (1 + \text{vidinė gražos norma})^t \quad (16)$$

3.11.12. Programos kodo įgyvendinimas ir struktūra

Visas kodas saugomas aplanke „src/“, suskirstytame į penkis poaplankius pagal funkciją: pati simuliacijos logika „src/sim/“, kuriame egzistuoja ekonominis modelis „src/sim/economics.py“ (1 priedas), talpyklos termodinaminis modelis („src/physics/“), bendro pobūdžio gamintojų rikiavimo infrastruktūra („src/dispatch/“), konfigūracijos konstantos („src/config/“) ir įvesties duomenų skaitymas iš Excel rinkmenų („src/data/“). Visa simuliacija paleidžiama viena komanda – „python scripts/run_simulation.py“, kuri suformuoja devynių langelių (3 scenarijai × 3 pradinės sąlygos) valandinius rezultatus. Atskira komanda – „python scripts/render_results.py“ iš tų pačių rezultatų per kelias dešimtis sekundžių sugeneruoja grafikų paketą, nepaleidžiant pačios simuliacijos iš naujo.

Simuliacijos rezultatų patikimumas patikrintas trimis nepriklausomais būdais:

- Energijos balanso uždarumas. Kiekvieną valandą tikrinama, ar į tinklą patiekta šiluma lygi paklausai (jokia šiluma nepradingsta ir neatsiranda iš nieko). Didžiausias užregistruotas balanso pažeidimas per visus 78 840 valandinių patikrų (8 760 valandų × 9 langeliai) yra 0,000000 MWh, todėl galime teigti, kad energetiniai balansai uždaryti iki tinkamos skaitinio tikslumo ribos.
- Validavimas pagal 2025 m. faktinę gamybą. Kiekvienam langeliui palygintos biokuro gamintojų valandinės gamybos vertės su išmatuotomis 2025 m. vertėmis. Bendro nuokrypio rodiklis – simuliacijos rezultatų panašumas su biokuro pagamintu šilumos kiekiu realybėje 2025 metais ≥ 99,93 %. Nash–Sutcliffe efektyvumo koeficientas NSE = 0,9998, kuris nurodo, jog simuliacija valandiniu lygmeniu paaiškina 99,98 % išmatuoto signalo kintamumo nuo realybės; pagal Moriasi et al. (2007) klasifikaciją, tai patenka į aukščiausią „labai gerai veikiančio modelio“ kategoriją (NSE > 0,75).
- Dujų dispečerizavimo atvejų pasiskirstymas. Kiekvieną valandą, kai simuliacija reikalauja deginti dujas, taikomas vienas iš dviejų papildomų taisyklės atvejų. A

atvejis suveikia tada, kai realus operatorius tą valandą iš tikrųjų degino dujas – simuliacijos dujų poreikis paskirstomas tarp trijų realiai dirbusių dujinių įrenginių (PE-2, Silk-2, Pergalės) tomis pačiomis proporcijomis kaip ir realybėje. B atvejis suveiktų tada, kai realus operatorius tą valandą dujų nedegino, bet simuliacija vis tiek turi paleisti dujinius įrenginius pagal statinę eiliškumo tvarką. Per visus 9 langelius A atvejis suveikė nuo 504 iki 605 valandų (priklausomai nuo langelio), o B atvejis – 0 valandų visuose 9 langeliuose. Ši nulinė reikšmė yra esminė metodologinė garantija: ji parodo, kad simuliacijos operatorius niekada nesukuria savo dujų deginimo veiksmų, kurių realybėje tą valandą nebuvo, o visa dujų gamyba simuliacijoje yra tik tos pačios valandos faktinės gamybos perskirstymas tarp trijų realiai jau veikusių dujinių įrenginių.

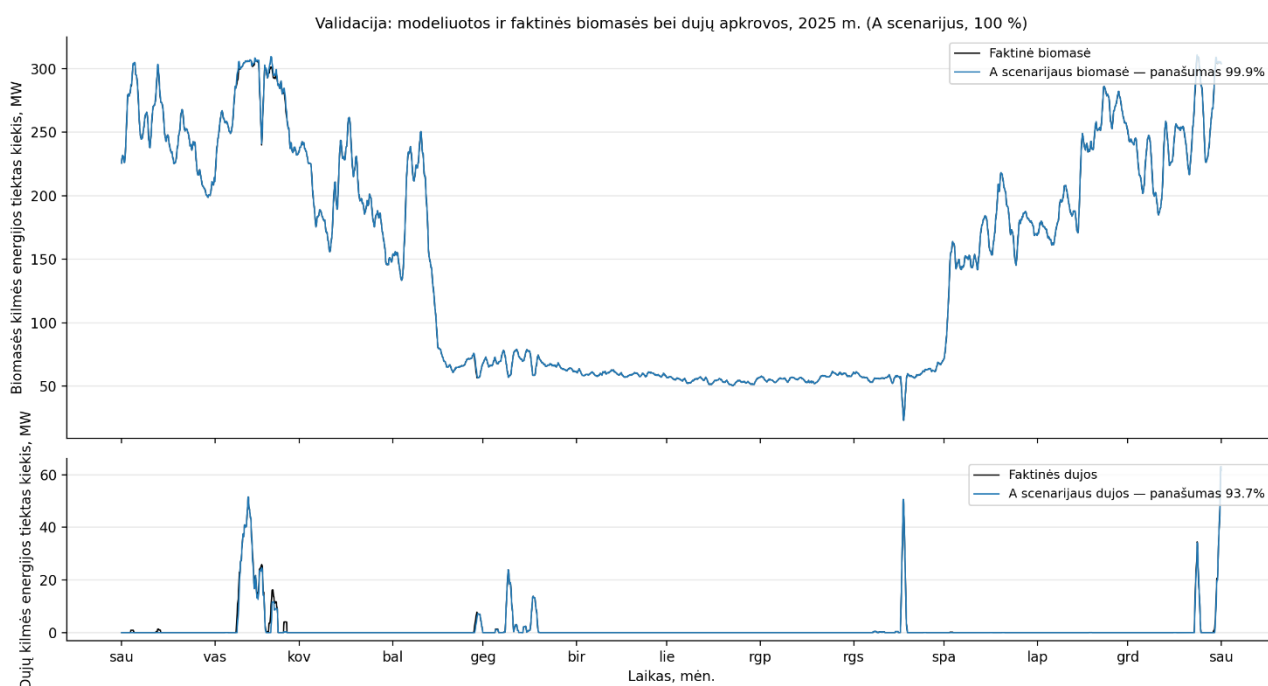
Šio magistro baigiamojo projekto programinio kodo realizacijai buvo pasitelktas „Anthropic“ sukurtas didysis kalbos modelis „Claude Opus 4.7“. Darbo autorius suformulavo modeliavimo metodologiją (findings/system_logic.md), algoritmų logiką bei programinės sistemos architektūrą, o minėtas dirbtinio intelekto įrankis, vadovaudamasis autoriaus pateiktomis instrukcijomis, šiuos sprendimus pavertė vykdomu Python kodu, lygiagrečiai testuojant naujo kodo darbo logiką kodo implementavimo metu. Visi metodiniai, modeliavimo ir gautų rezultatų interpretaciniai sprendimai priklauso darbo autoriui, dirbtinio intelekto įrankis atliko išimtinai techninio kodavimo asistento vaidmenį.

4. Simuliacijos rezultatai ir analizė

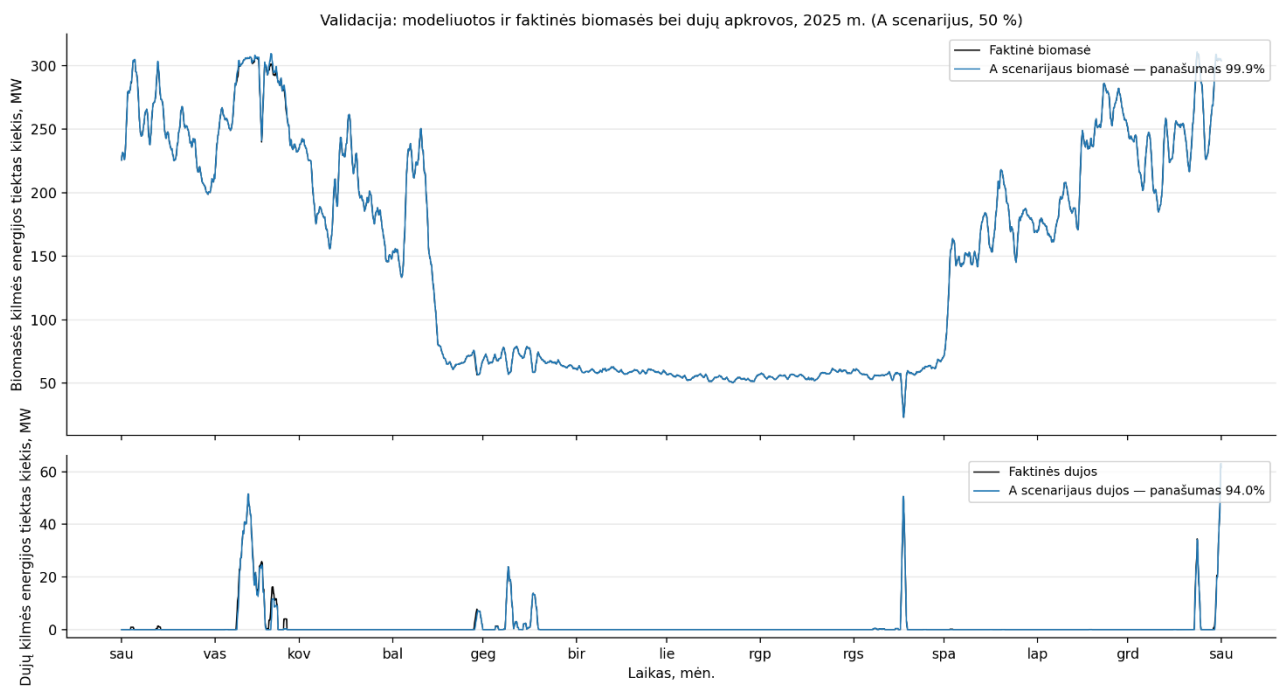
Šiame skyriuje pateikiama simuliacijos rezultatai ir vizualizacijos grafikai. Simuliacijos rezultatai buvo sudaryti 2025 metų periodui, kiekvienam scenarijui (A, B, C) bei kiekvienai pradinei ŠAT stadijai (0 %, 50 %, 100 %).

4.1. Validavimo grafikai

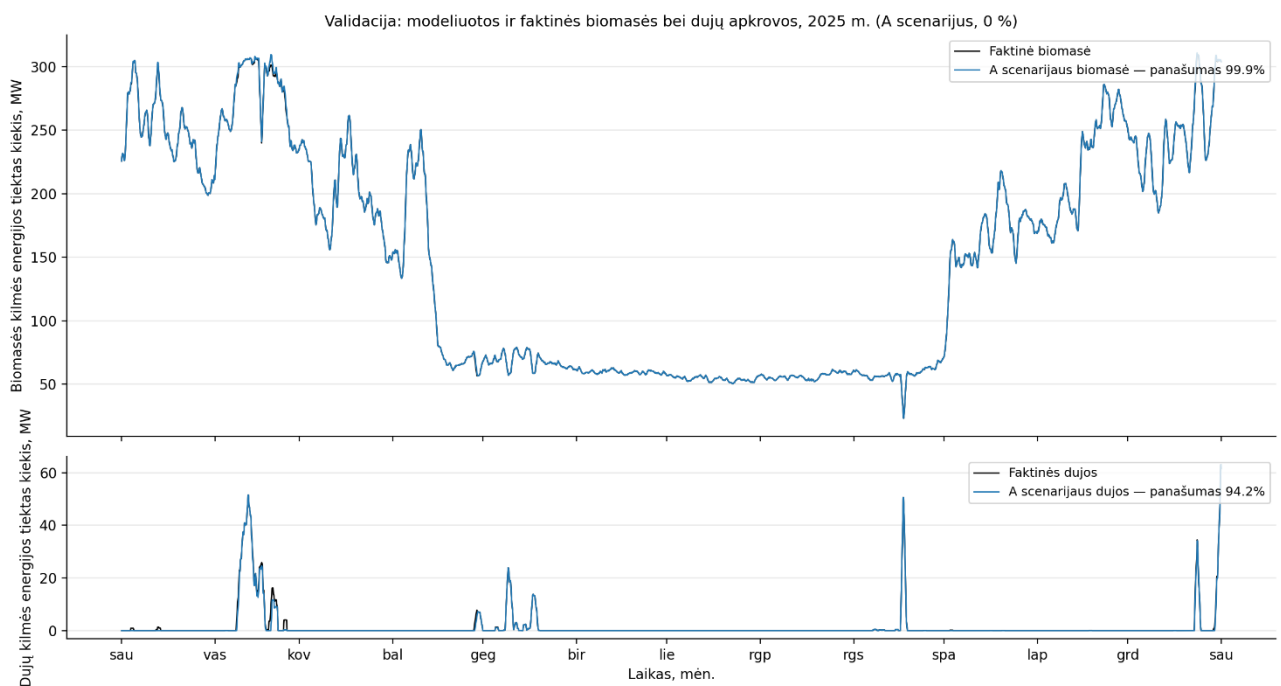
Validavimo grafikų grupė lygina simuliacijos biokuro ir dujų bendras gamybas su išmatuotu 2025 metų įrašu. Tikslas, kad bendra biokuro paklausa praktiškai atitiktų, o dujų sumažėtų arba nepakistų priklausomai nuo scenarijaus. Per visus devynis langelius mažiausias biokuro panašumas yra $\geq 99,93\%$, biokuro Našo–Sutklifo efektyvumo koeficientas lygus 0,9998, šis koeficientas skirtas įvertinti, kiek tiksliai simuliuotas (sumodeliuotas) laiko sekos procesas atitinka realius (stebimus) duomenis, kas pagal vertinimo kriterijus patvirtina, jog sudarytas tinkamai veikiantis modelis. Dujų sunaudojimo panašumas A ir C scenarijuose yra nuo 93,55 iki 94,20 %, vadinasi talpa padėjo sutaupyti apie 6 % metinių dujų, B scenarijuje talpos sukaupta energija nepakeičia dujų energijos, todėl panašumas yra 100 %.



9 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui A, pradinei būsenai 100 %

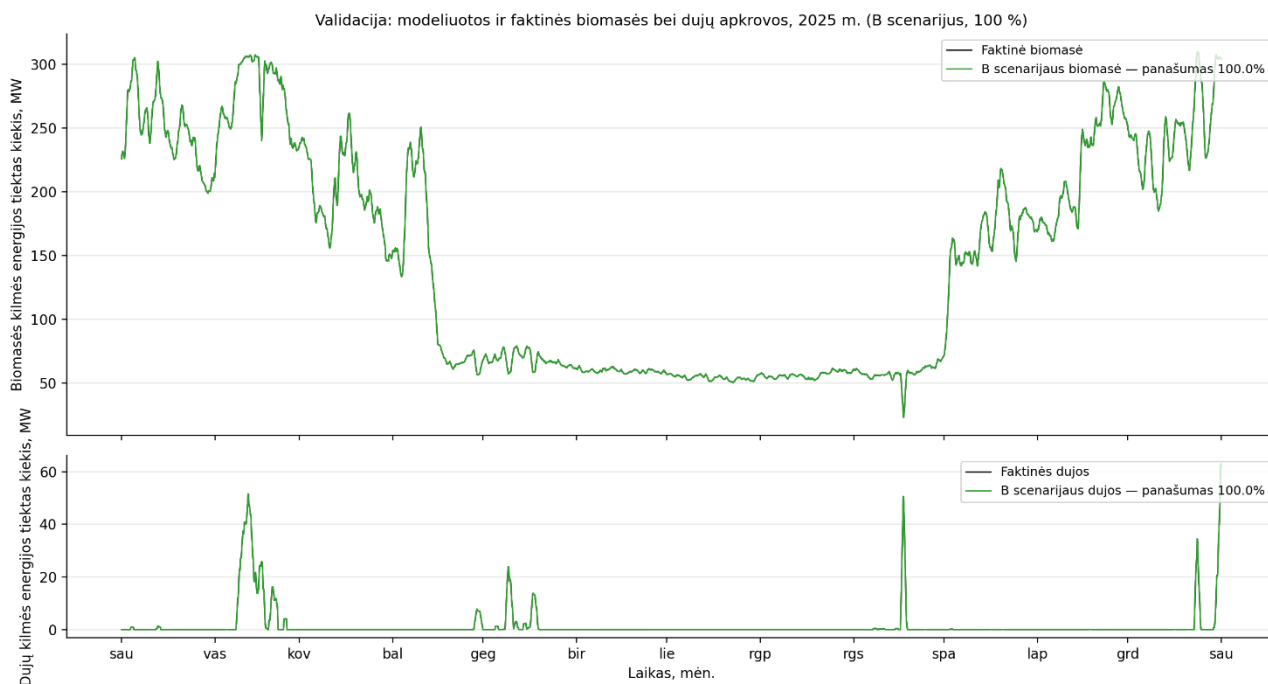


10 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui A, pradinei būsenai 50 %

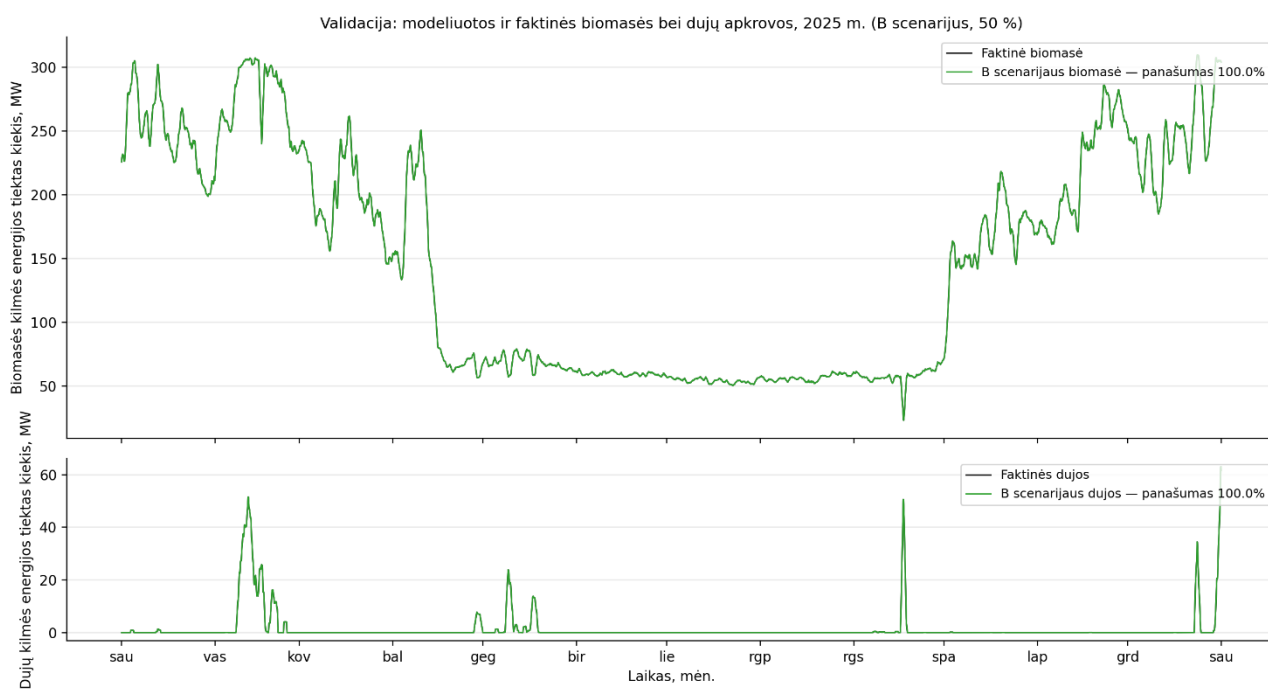


11 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui A, pradinei būsenai 0 %

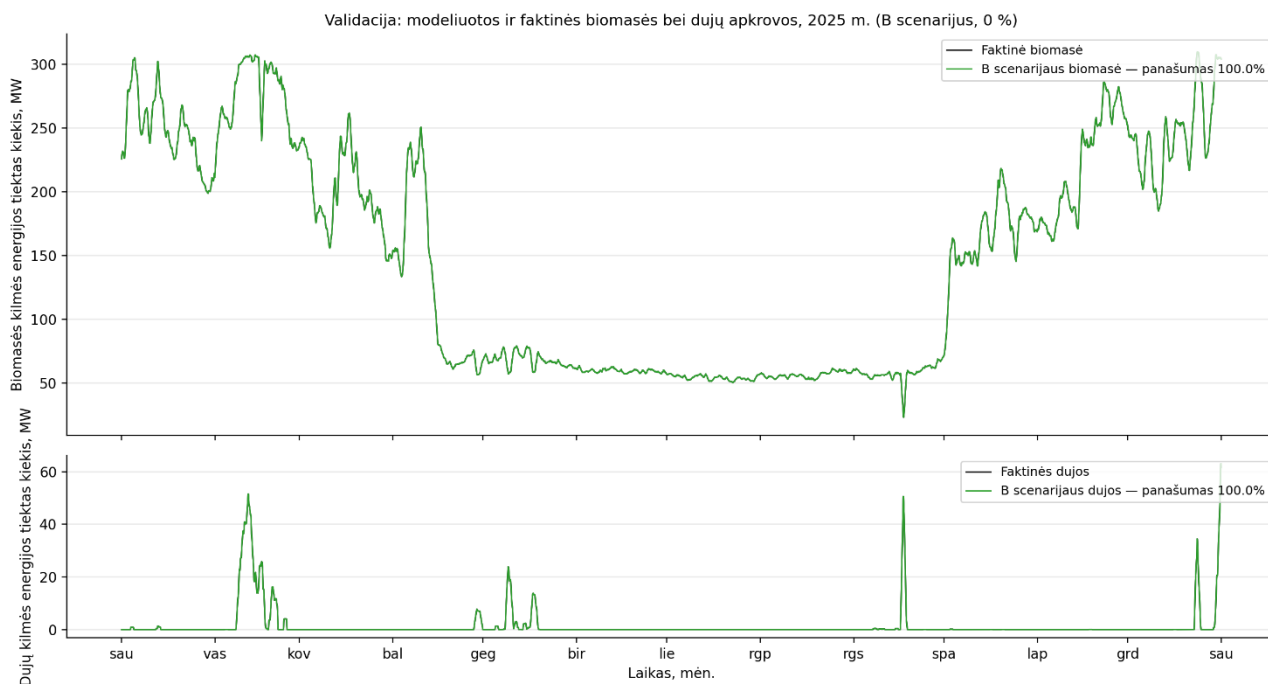
Iš rezultatų matome, kad scenarijus A biomasės energijos atžvilgiu yra 99,99 % atitinka praėjusių metų rezultatus, vadinas jais galime pasikliauti pagal mūsų teoriją. Dujų pakeitimo biomasės energijos atžvilgiu per metus vidutiniškai suvartojama apie 6 % mažiau dujų.



12 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui B, pradinei būsenai 100 %

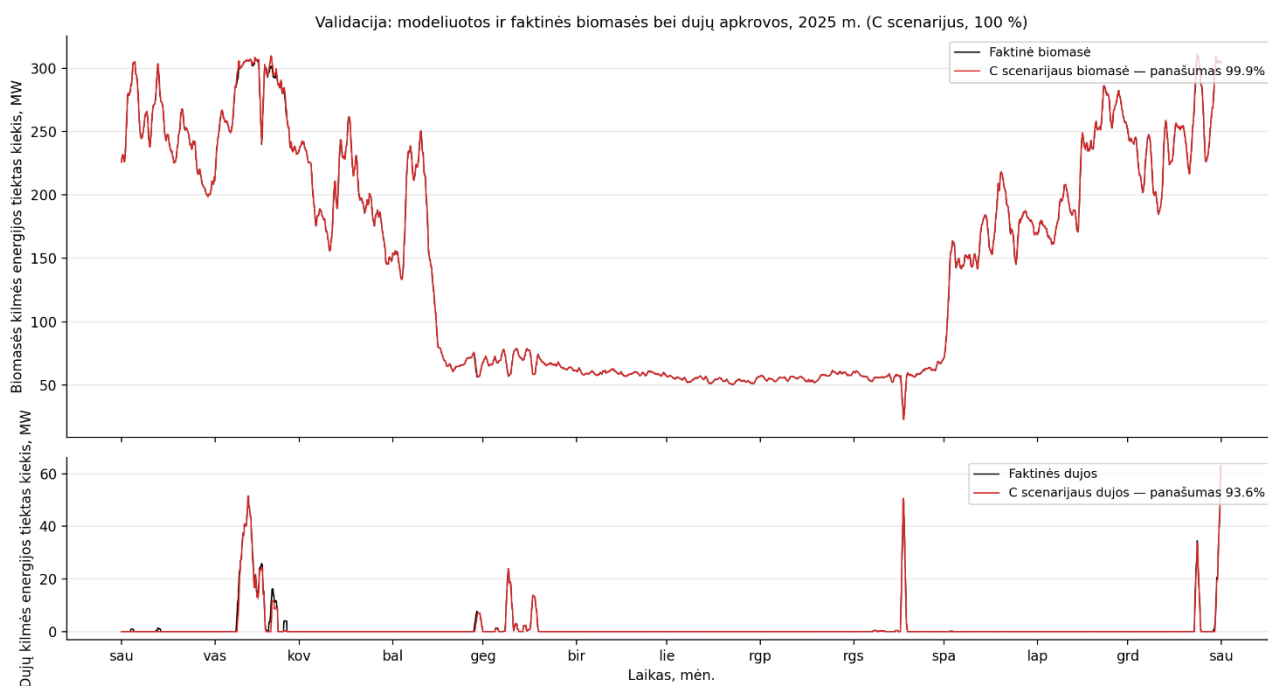


13 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui B, pradinei būsenai 50 %

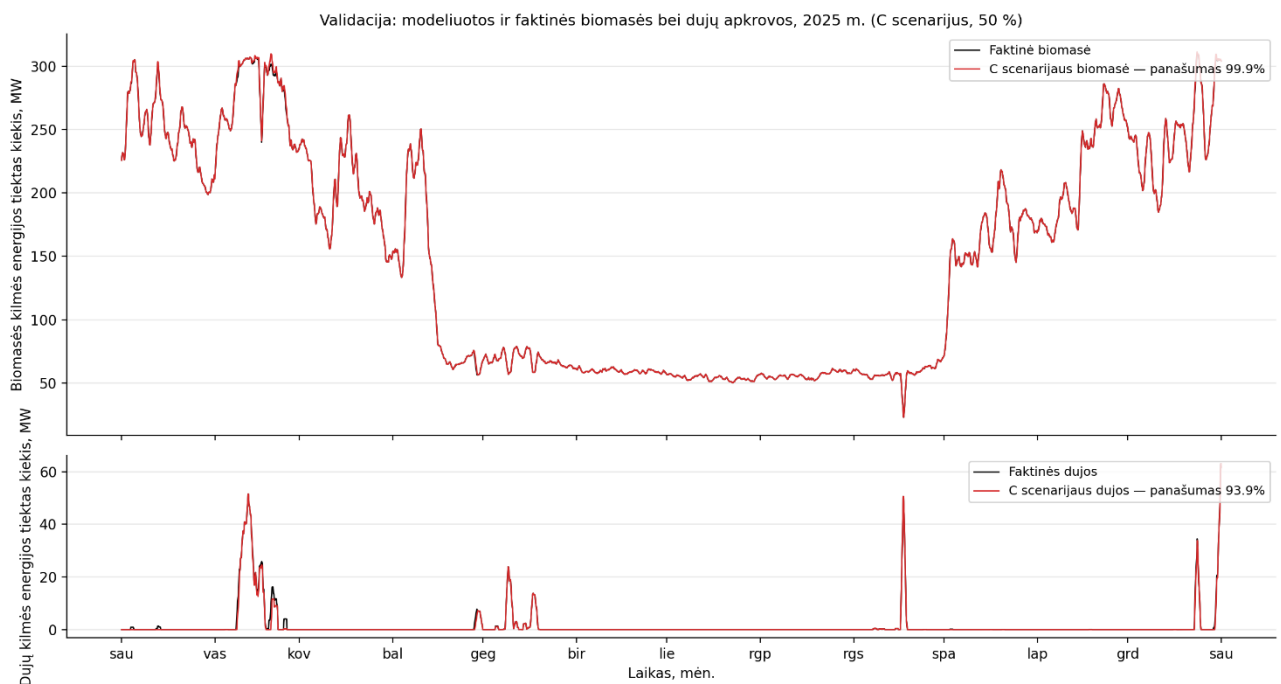


14 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui B, pradinei būsenai 0 %

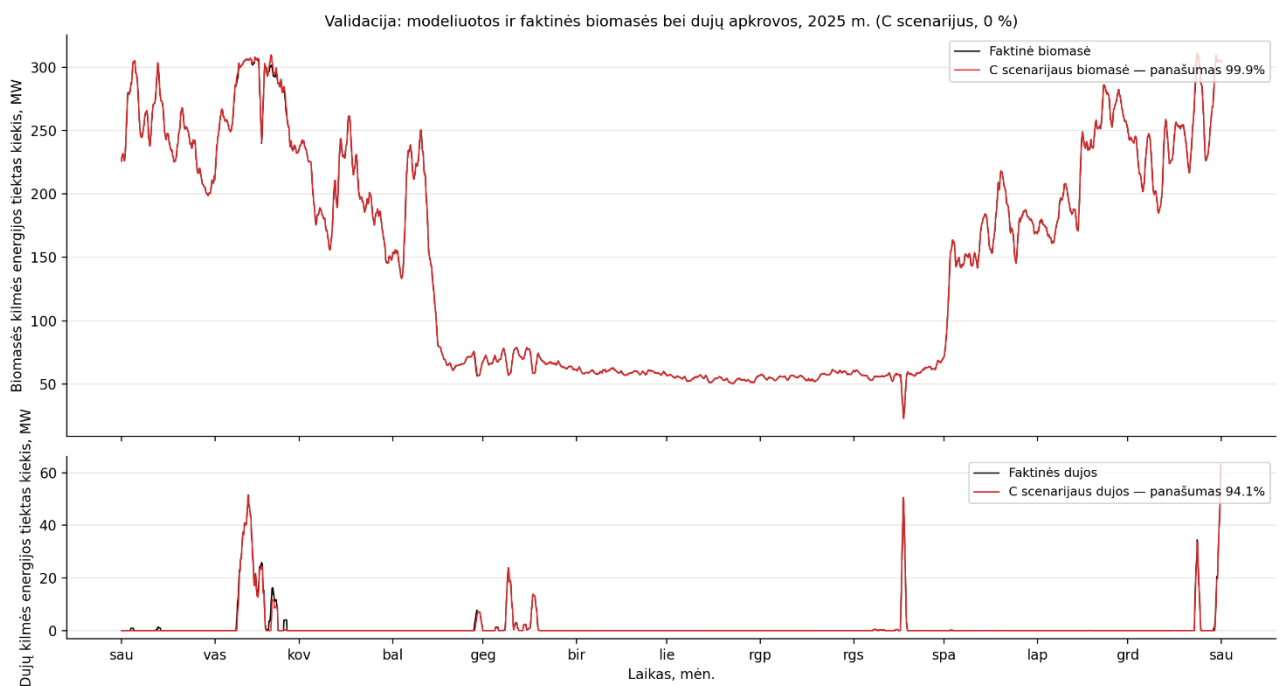
Iš B scenarijaus rezultatų matome, biomasės energijos nuokrypio praktiškai nėra, pastebimas 100 % atitikimas su praėjusių metų rezultatus, vadinasi jais galime pasikliauti pagal mūsų teoriją. Dujų pakeitimo biomasės energijos rezultatus priimame teigiamai, nes šio scenarijaus atveju jokio pakitimo neturėjo įvykti, ŠAT dujinių įrenginių nekeičia.



15 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui C, pradinei būsenai 100 %



16 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui C, pradinei būsenai 50 %



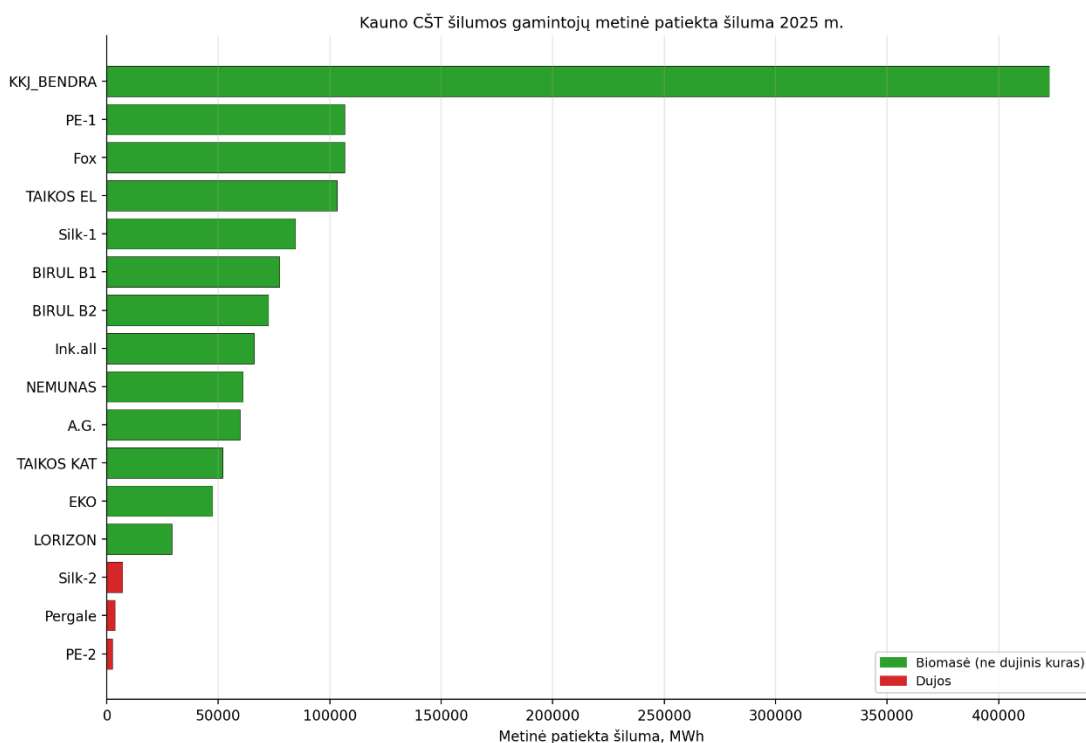
17 pav. Rezultatų validavimo grafikas scenarijui C, pradinei būsenai 0 %

Galutiniai scenarijaus C rezultatai parodė, biomasės energijos atžvilgiu sutapimas 99,99 %, rezultatas atitinka praėjusių metų rezultatus pagal mūsų teorijos standartus. Dujų pakeitimo biomasės energijos atžvilgiu per metus vidutiniškai suvartojama virš 6 % mažiau dujų, šis rezultatas yra geresnis nei scenarijaus A.

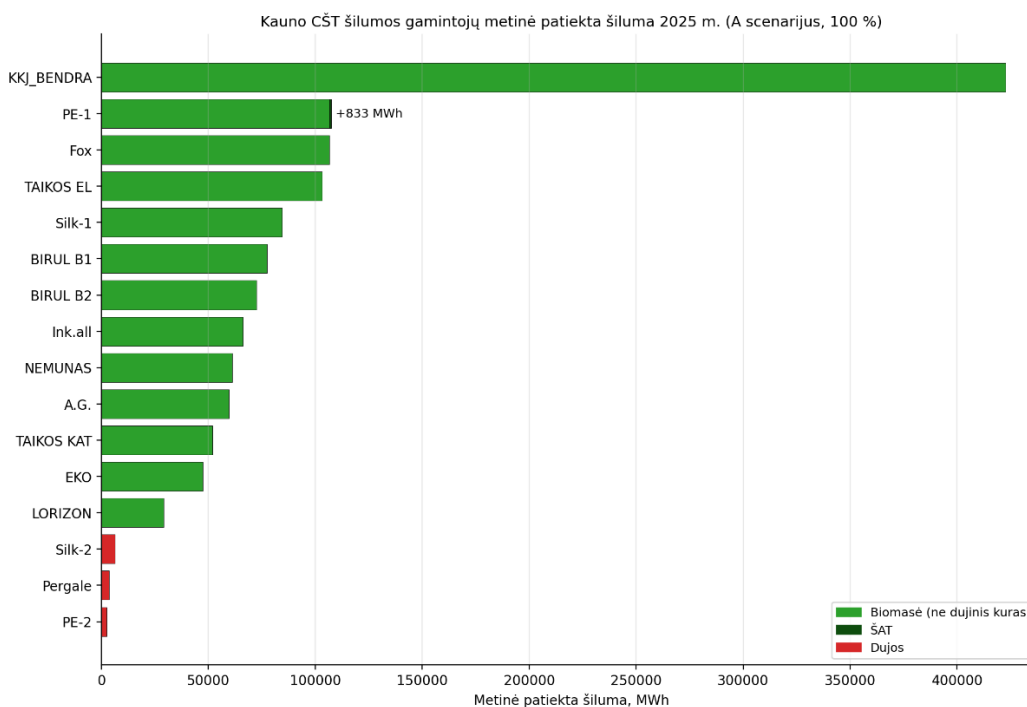
4.2. Šilumos gamintojų ir ŠAT tiekta šiluma tinklui

Šilumos gamintojų ir ŠAT tiekta šiluma tinklui grafikų grupė vizualizuoja, kaip ta pati metinė Kauno šilumos paklausa, apytiksliai 1 286 007 MWh, išsiskirstė tarp šešiolikos gamintojų

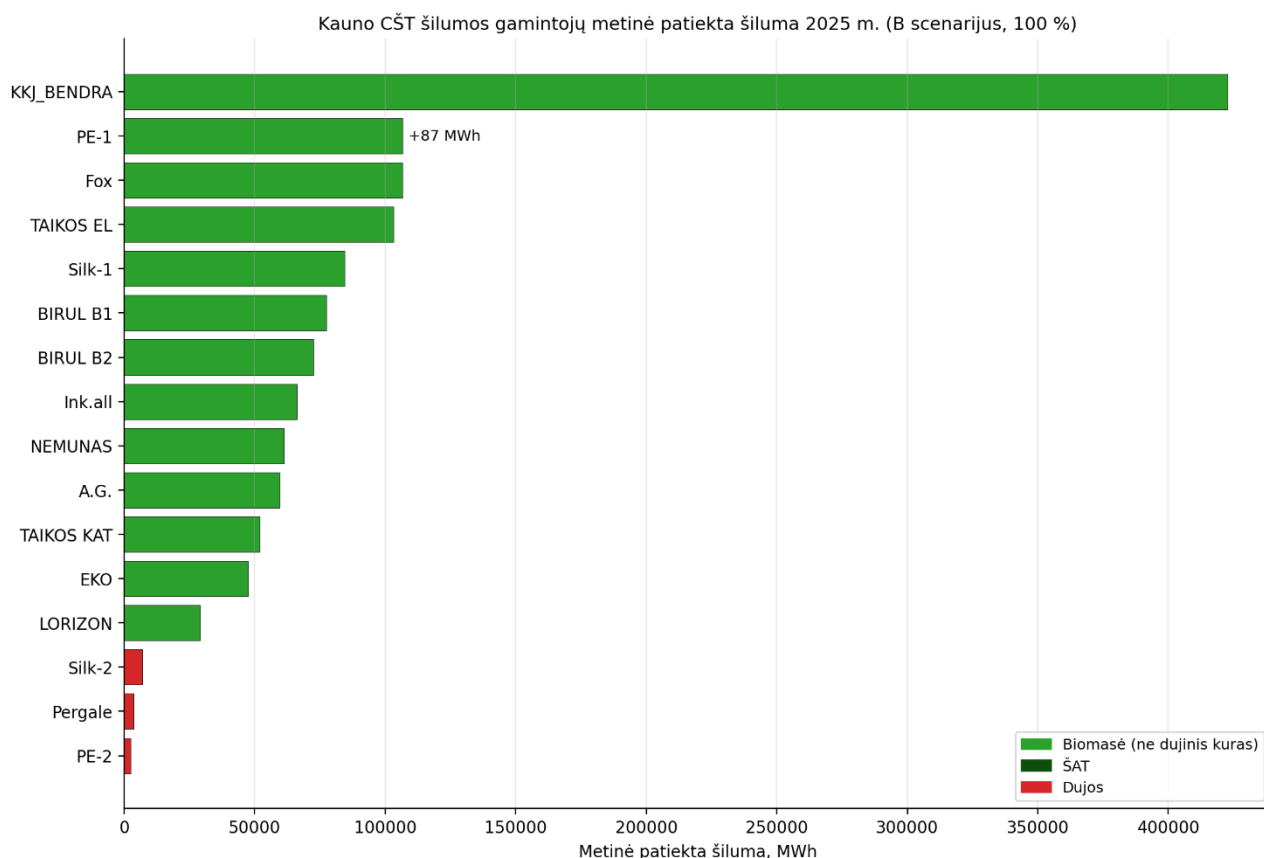
išmatuotu 2025 atveju bei simuliacijų rezultatų atveju. Petrašiūnai simuliacijoje pavadinti pagal biokuro bloko pavadinimą PE-1. Petrašiūnų katilinės stulpelis padalintas į du segmentus: katilo iškrova ir talpos iškrova. Žemiau pateikiami originalių 2025 metų ir visų scenarijų rezultatai su 100 % pradine sąlyga.



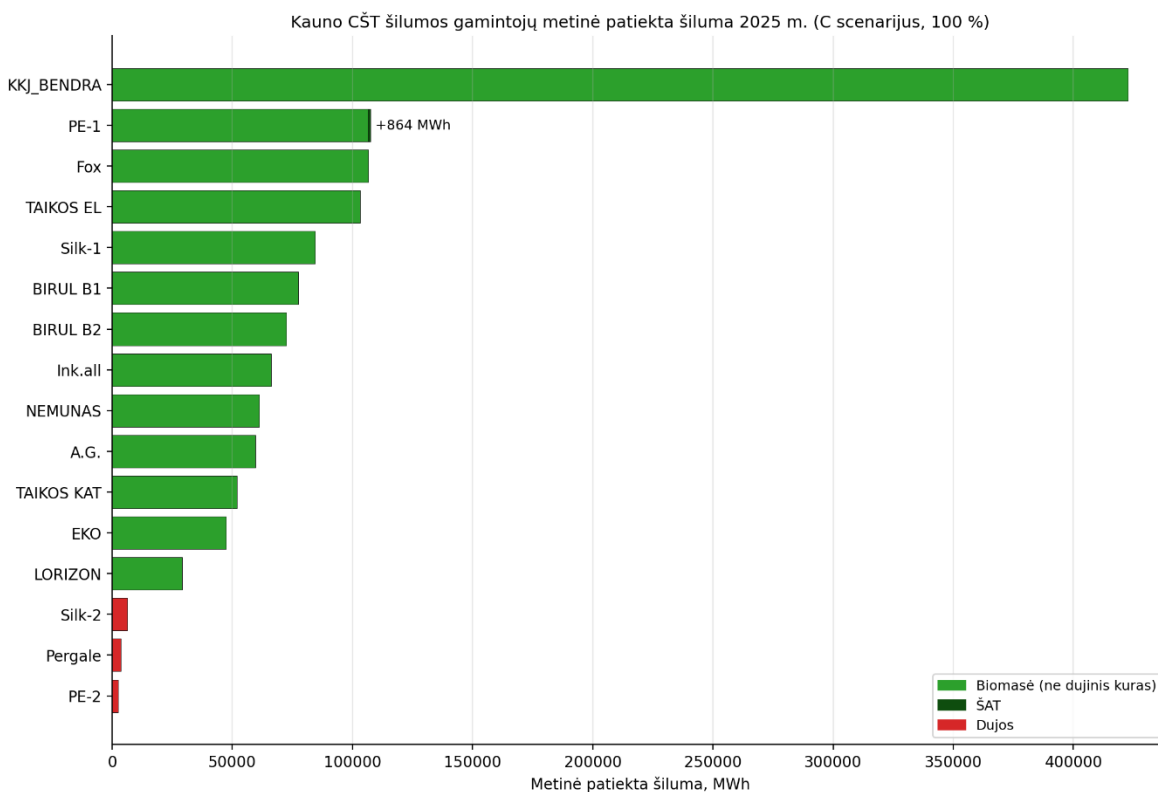
18 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją



19 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją scenarijus A, pradinei būsenai 100 %



20 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją scenarijus B, pradinei būsenai 100 %



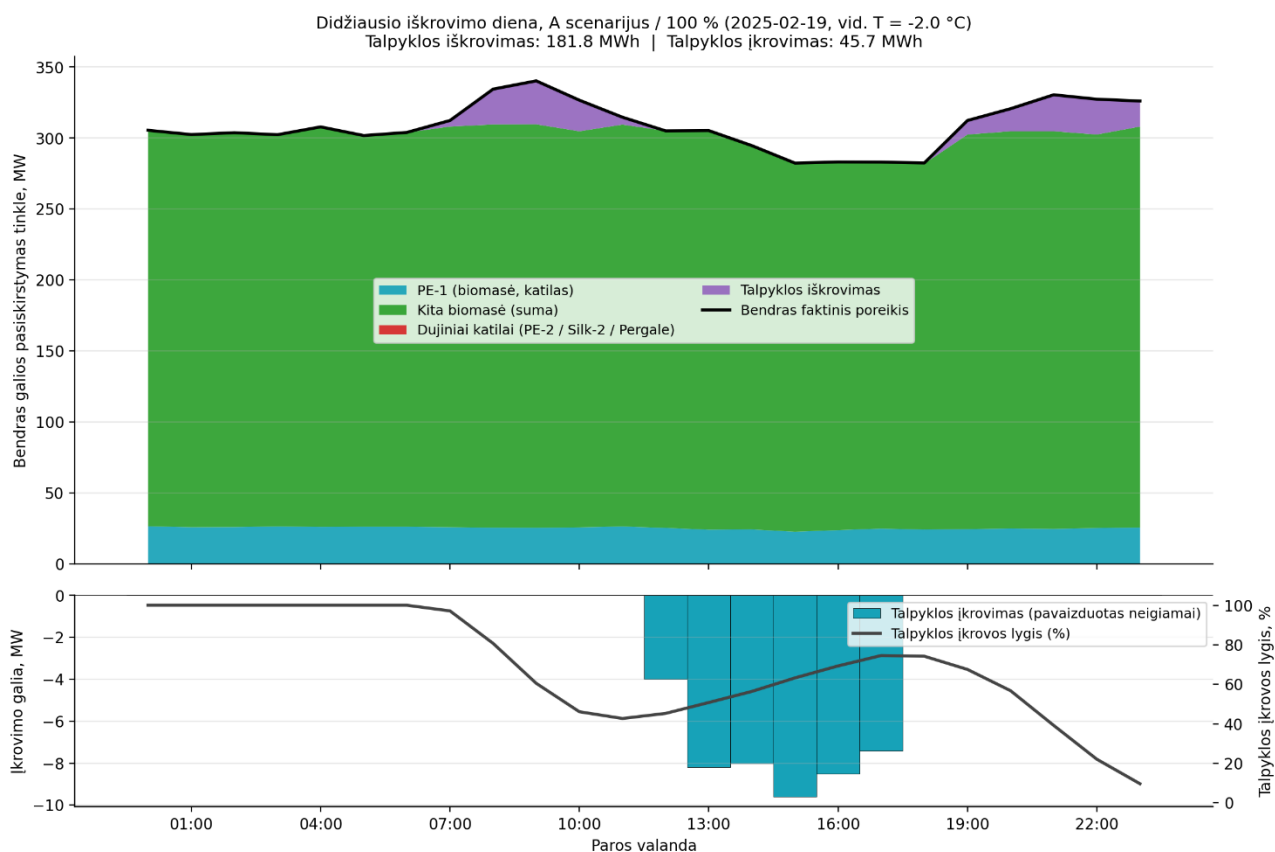
21 pav. Visa Kauno šilumos tinklui atiduota šiluma per 2025 pagal gamintoją scenarijus C, pradinei būsenai 100 %

Iš rezultatų matome, kad bendras pokytis nepakeičia gamintojų pozicijų rikiuojant pagal didžiausius gamybos kiekius, tačiau apylygėje kovoje su Foksita, galėtų padėti išsiveržti į garbingą antrą vietą. Papildomai sugeneruota šiluma scenarijams A – 833 MWh, B – 87 MWh, C – 864 MWh.

4.3. Pikinė iškrovimo diena

Ši rezultatų grupė rodo gamintojų mišinį valanda po valandos pikinę iškrovimo dieną bei ŠAT krovimo ir iškrovimo lygmens duomenis. Visos pradinės sąlygos nerodomos, nes pikinės iškrovimo dienos kartojasi. Šie rezultatai leidžia tiksliai pamatyti kaip dirbo ŠAT vieną iš dienų bei patikrinti ar viskas veikė pagal sukurtus scenarijus.

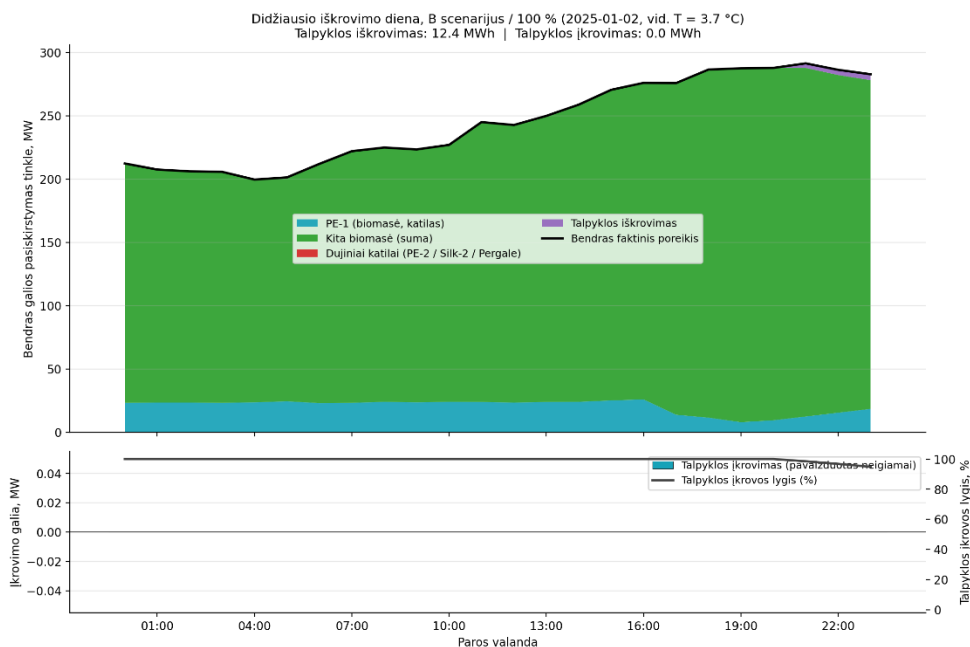
Analizuodami scenarijaus A vieną labiausiai darbinių dienų matome, kad ŠAT veikia pagal paskirtį. Dujų energijos reikiamybės atsiradimo metu ŠAT pradeda atidavinėti biomasės energiją vietoj dujinių katilinių ir pasibaigus reikiamybei dujoms, sumažėjus paklausai, teko sumažinti galią net ir Petrašiūnų katilams jau tą pačią dieną. Tuo metu ŠAT talpa kuo puikiausiai sugėrė nenaudojamą šilumą, pasikrovė ir iškart buvo pasiruošusi kitam kartui, kai vėl reikėjo įjungti dujinius įrenginius. Šis rezultatas rodo kaip puikiai talpa galėtų veikti, ir pokytis yra akivaizdžiai matomas grafike:



22 pav. Pikinė iškrovimo diena A scenarijui, pradinė būseną 100 %

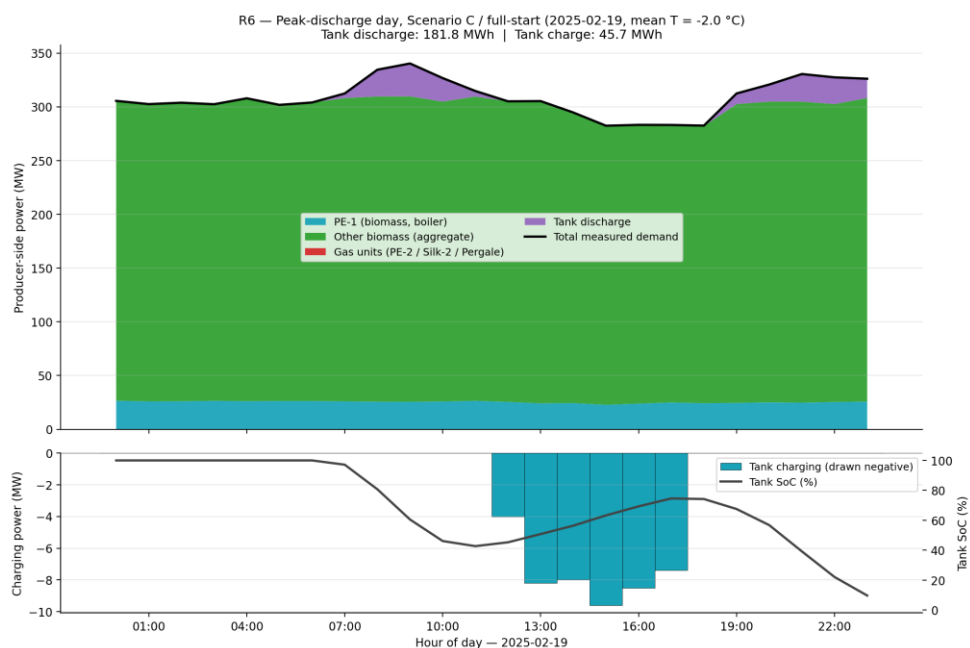
Sekantis atvejis yra B scenarijaus, tos pačios pradinės būsenos, tačiau kitokio veikimo principo. Iš žemiau pateikto paveikslėlio rezultato matome ne tokį žymų pokytį kaip scenarijaus A pavyzdyje, bet aiškų judėjimą ir jo veikimo principą. Talpos pradinė būseną yra 100 % pakrovimo ir Petrašiūnų katilinės paduodamos šilumos kiekiui nusėdus dėl

operatoriaus įsakymo ar vidinio gedimo buvo leista iš karto didinti galią. Tačiau Petrašiūnų biomasės katilai negalėjo padidinti paduodamos šilumos kiekio daugiau negu 3 MW per valandą, todėl matome tuo pačiu metu, kai biokuro katilo galia pradėjo kilti, iš ŠAT buvo pradėta tiekti šilumą, kuri užpildė tai, ko biomasės katilai negalėjo pagaminti. Tai dar vienas aiškus veikimo pavyzdys. Visa tai pateikta žemiau esančiame paveikslėlyje:



23 pav. Pikinė iškrovimo diena B scenarijui, pradinė būsena 100 %

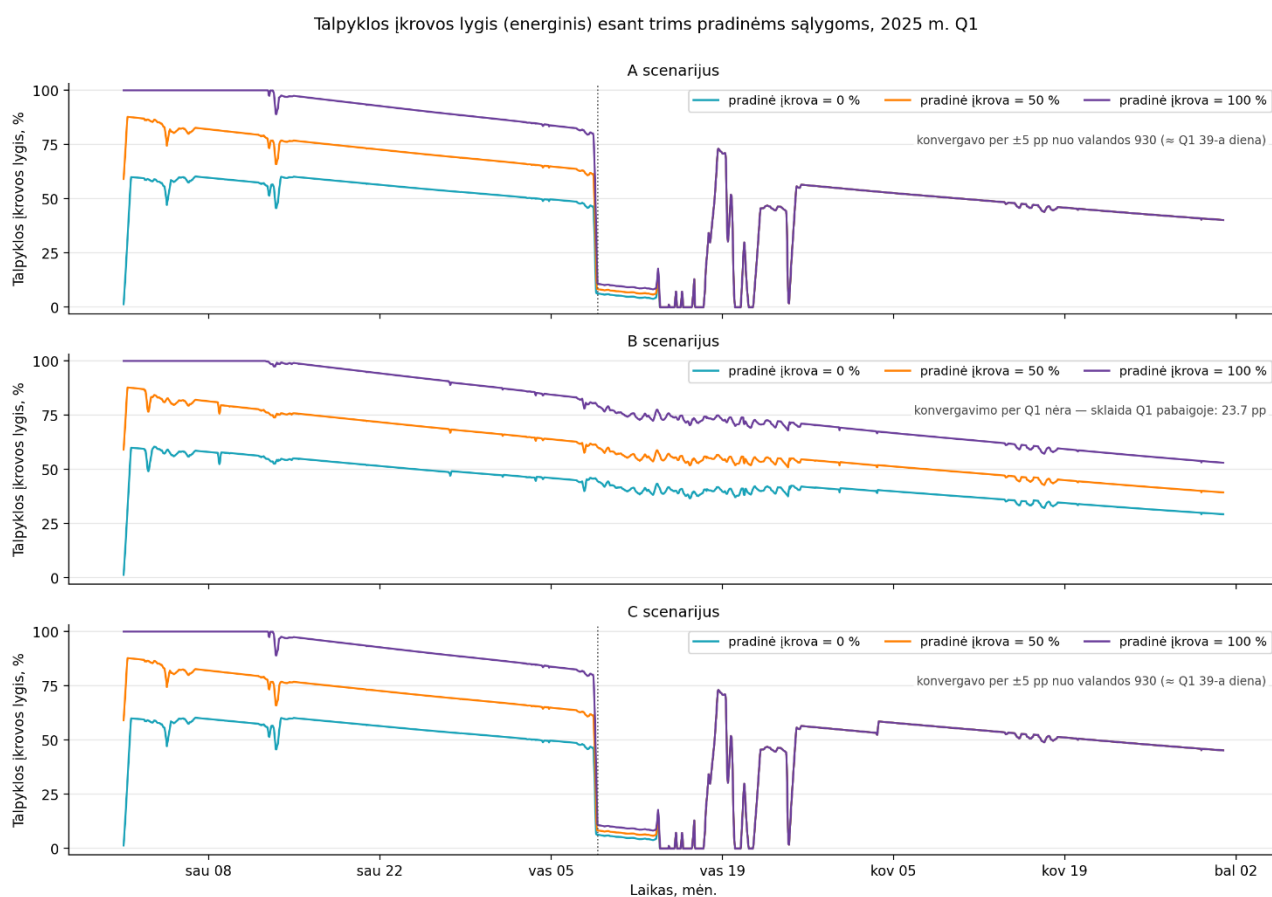
Scenarijui C, matoma analogiška situacija kaip ir A, tai įvyksta todėl, kad ŠAT talpos kreivės prie skirtingų pradinių būsenų konverguoja ir nusistovi iki šio laiko. Apie tai papildomai bus rašoma tolimesniame skyriuje. C scenarijaus rezultatas pateiktas žemiau:



24 pav. Pikinė iškrovimo diena C scenarijui, pradinė būsena 100 %

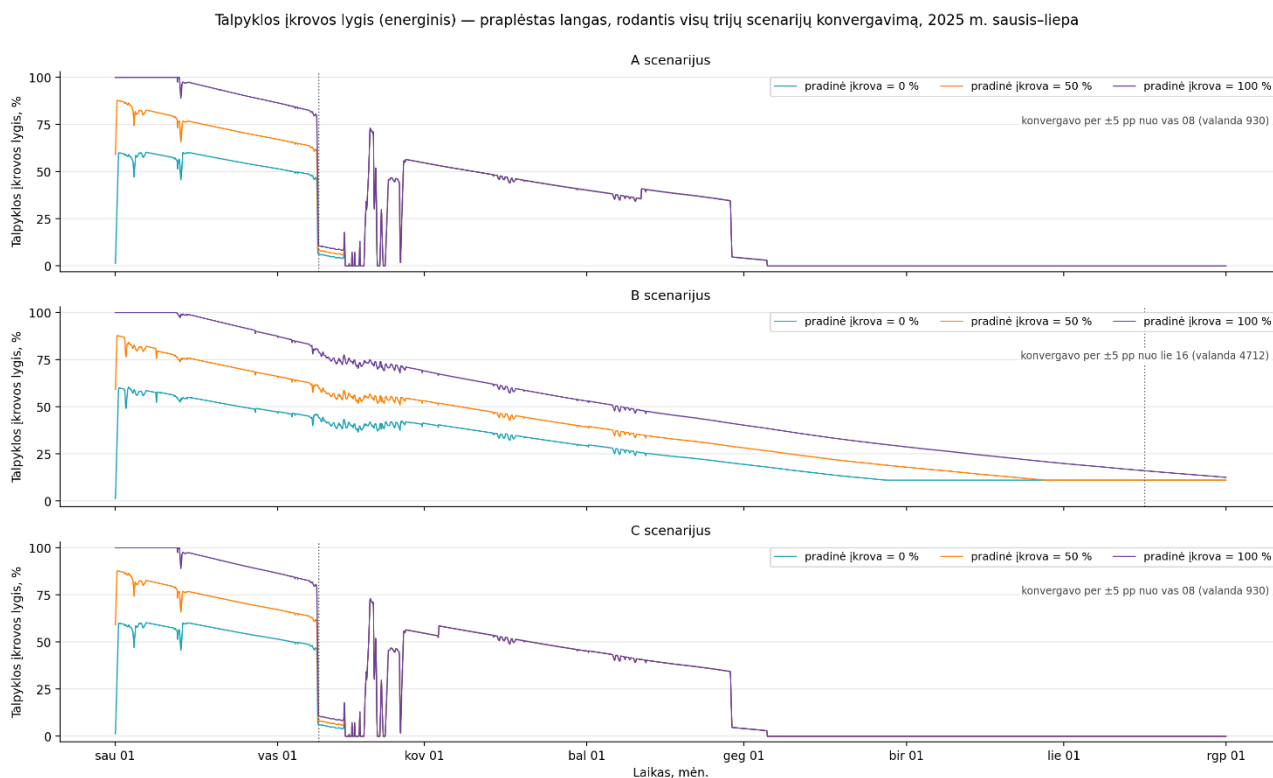
4.4. Akumulavimo talpos pakrovimo procento konvergencija

Šių grafikų grupė rodo, kaip greitai trys pradinės sąlygos susivienodina ir pradeda dirbti tuo pačių ritmu. Grafike matome kaip juda ŠAT įkrovimo lygio išreikšto procentais reikšmės prie skirtingų pradinių būsenų. Esminis rezultato rodiklis šių linijų sutapimo (konvergencijos) vieta, kuri atsiranda per pirmąjį 2025 metų ketvirtį A ir C scenarijuose. Konvergencija įvyksta, kai trys linijos suartėja iki 5 % skirtumo ir daugiau neišsiskiria iki 5 % ribos. A ir C scenarijuose skirtingų pradinių būsenų įkrovos vienodai konverguoja per 930 valandų (vasario pradžią), o B scenarijuje – per 4712 dienų (vasario vidurys).



25 pav. ŠAT pakrovimo procento linijos konvergencija pagal pradinę būseną A or C

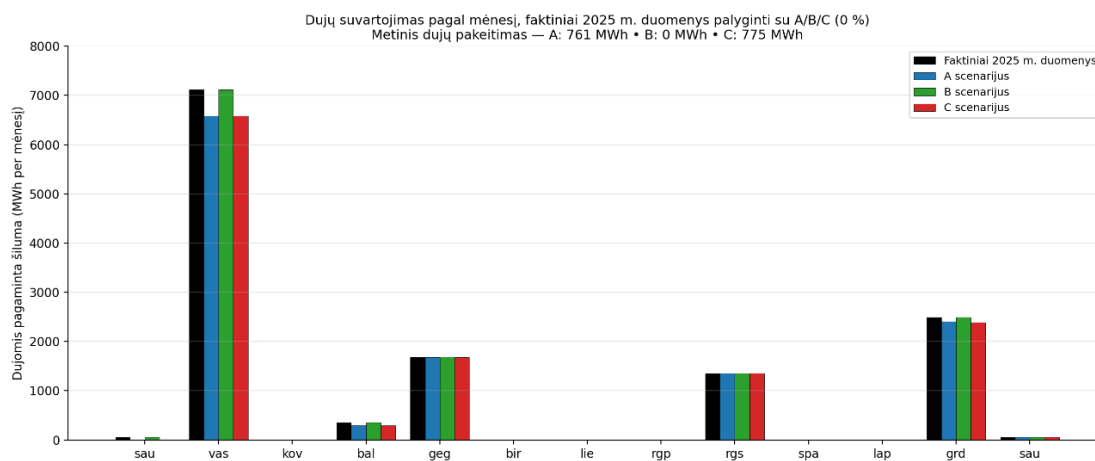
Toliau pateikiamas ilgesnis grafikas parodantis B scenarijaus įkrovos lygio linijos konvergencija tolimesniame laiko etape. Matome, kad B scenarijaus pakrovimo linijos elgsena visiškai kitokia, negu A ir C, tačiau puikiai atitinka mūsų norimą formą. Mažos trumpos vibracijos B ir C scenarijuose rodo mažus greičio pastiprinimus, o A ir C scenarijų dideli šuoliai – staigias reakcijas į šilumos trūkumo problemą, žalia energija pakeičiant dujinės kilmės šilumą.



26 pav. ŠAT pakrovimo procento linijos konvergencija pagal pradinę būseną

4.5. Dujinės kilmės šilumos pakeitimas biomasės šilumą

Žemiau pateikiamas grafikas vizualizuoja, kiek dujų kiekvienas scenarijus pakeičia 2025 metų bėgyje švaria energija mėnesį po mėnesio. Dujų sunaudojimas išmatuotu 2025 atveju daugiausia koncentruojasi žiemos mėnesiais: vasarį ir gruodį. Pagal A ir C scenarijų rezultatus atitinkamai matoma, kad dujų sunaudojimas sumažėjo. B scenarijus dujų nepakeičia.



27 pav. Tinklo dujų suvartojamas kiekis pagal mėnesius per 2025, pradinė būseną 0 %

Kadangi grafikai panašūs, visų pradinė sąlygų nerodome, bet duomenis pateikiame žemiau esančioje lentelėje. Matome, kad pradinis įkrovimo lygis sąveikauja su metiniu švaria energija pakeistos dujinės kilmės energijos kiekiu. Kuo žemesniu įkrovos lygiu talpa pradeda dirbti, tuo mažiau dujinės kilmės šilumos pakeičiama. Iš rezultatų galime spręsti, kad pradėti dirbti su žema įkrova sausį yra nestrategiška ir neprotinga, nes šaltas metas reikalauja būti pasiruošus, kadangi tai yra pagrindinis laiko etapas metuose kada galima atiduoti šilumą, o ne gaminti. C scenarijus sėkmingiausias dujų pakeitimo atveju bei veikia kaip papildomas galios kitimo greičio didintojas. Bendri rezultatai matomi žemiau pateiktoje lentelėje.

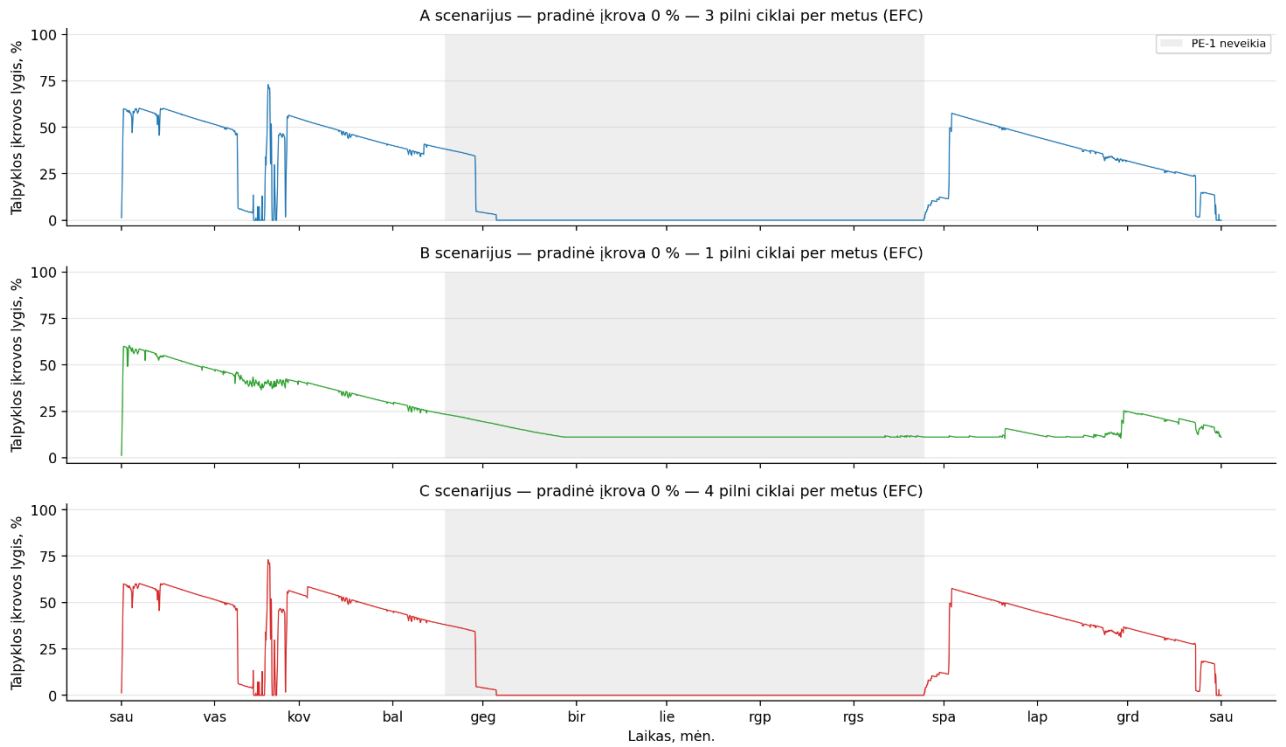
6 lentelė. Metinis biomasės šiluma pakeistos dujų šilumos kiekis

Scenarijus/Pradinė pozicija	Metinis dujų pakeitimas, MWh
A / 0 %	761,4
A / 50 %	793,4
A / 100 %	832,8
B / visi	0,0
C / 0 %	775,3
C / 50 %	807,3
C / 100 %	846,6

4.6. Talpos įkrovos lygis per 2025 metus

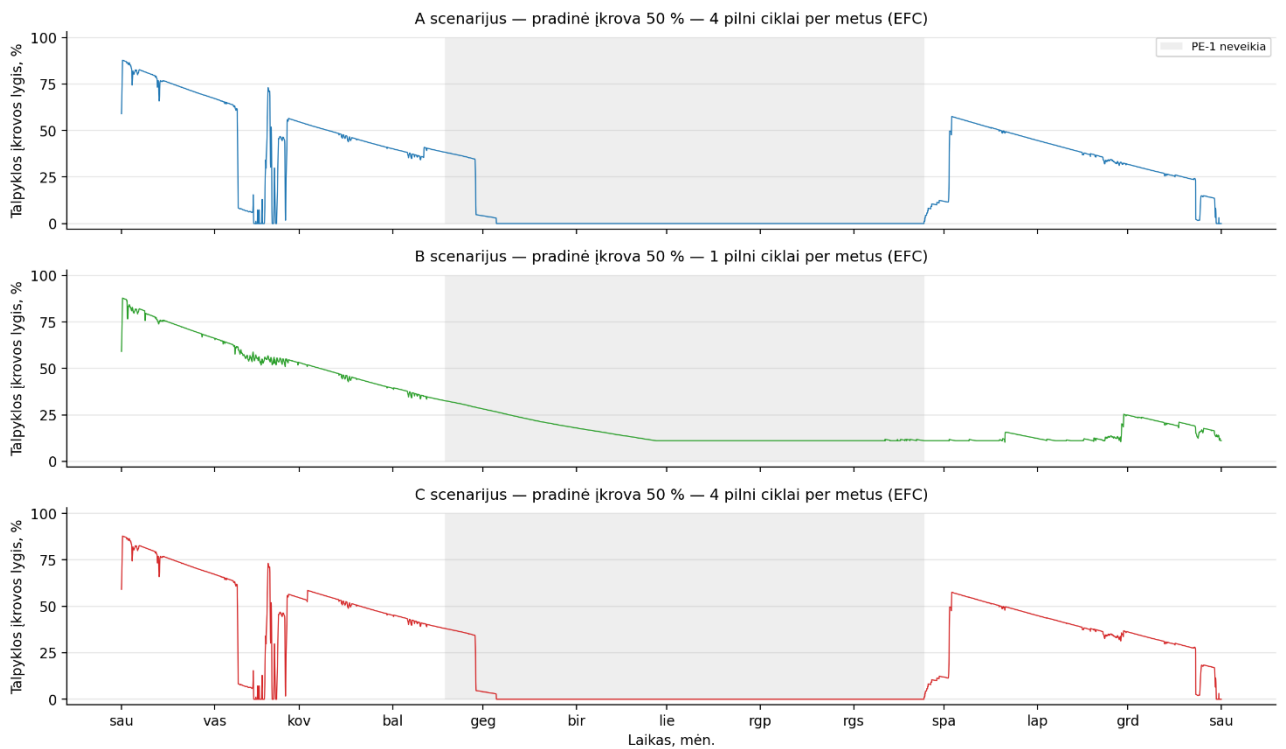
Ši rezultatų grupė rodo talpos energijos įkrovos lygį valanda po valandos per 8 760 valandų per 2025 metus. A ir C scenarijai rodo stipriai svyruojantį pėdsaką dujų vartojimo metu vasarį, kai talpa dirbo daugiausiai. Tačiau, kiek vėliau Petrašiūnų katilinė pradeda savo 4 mėnesių pauzę šiltam metų periodui. Kadangi katilinė nedirba, talpa negali krauti ir paskutinės energijos santaupos išsenka per nestandartinį dujų panaudojimo atvejį šiltu metų laiku, kam ši talpa ir buvo skirta. Po to, vėl prasideda gamyba, talpa pasikrauna ir vėl sulaukia progos išsikrauti dujų naudojimo atveju. Papildomai B ir C scenarijuose matome vibracijas, kurios atitinka greičio silpnybės balansavimą pagal aukciono ir tinklo situaciją.

Talpyklos įkrovos lygis 2025 m. — trys scenarijai (pradinė įkrova 0 %)

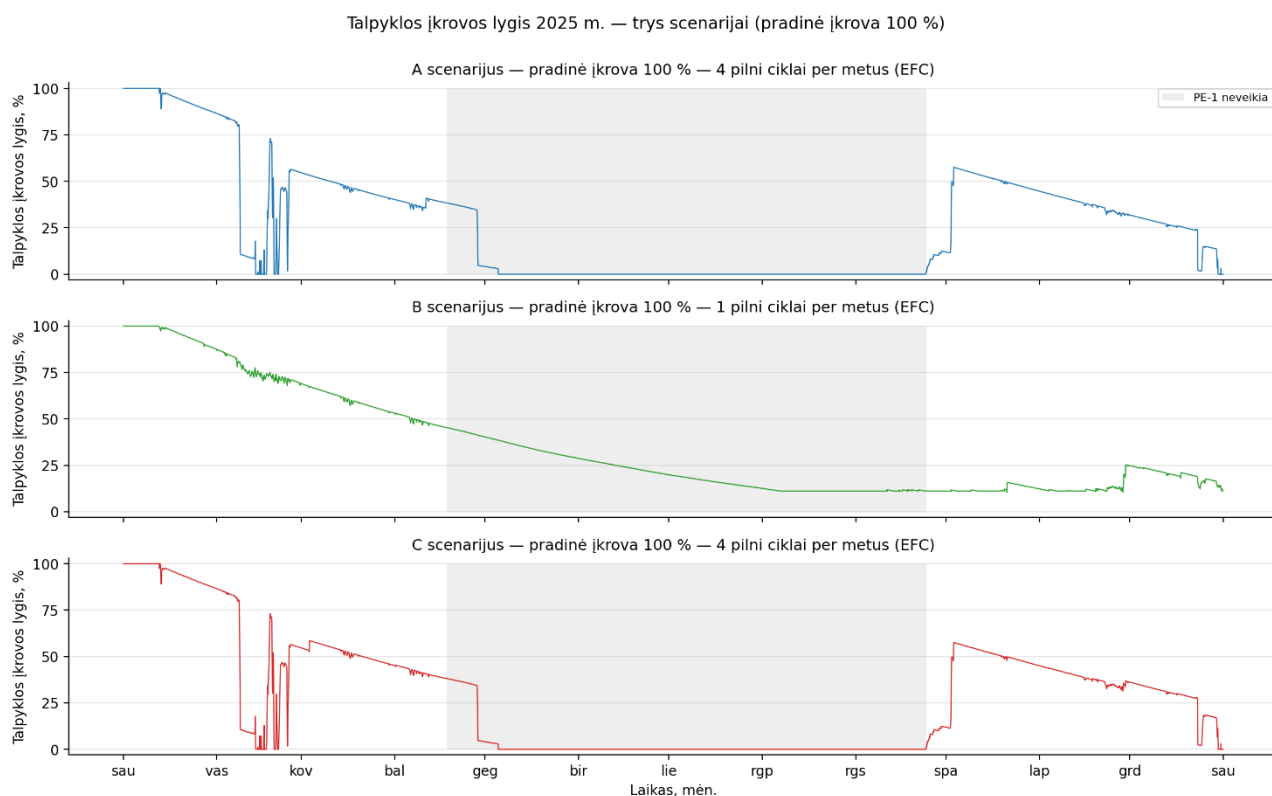


28 pav. ŠAT įkrovimo lygmuo per 2025 metus, pradinė būseną 0 %

Talpyklos įkrovos lygis 2025 m. — trys scenarijai (pradinė įkrova 50 %)



29 pav. ŠAT įkrovimo lygmuo per 2025 metus, pradinė būseną 50 %

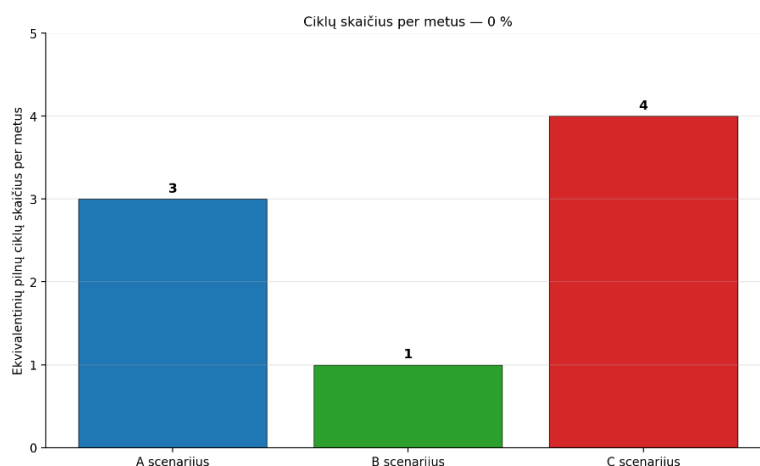


30 pav. ŠAT įkrovimo lygmuo per 2025 metus, pradinė būseną 100 %

Analizuodami talpos įkrovimą ir iškrovimą matome kiek ŠAT buvo galima dirbti ir kaip ji buvo naudojama. Akivaizdu, kad Petrašiūnų katilinės vadovų strategija nedirbti šiltuoju metų periodu, trukdo tinkamai ŠAT eksploatacijai. Talpa nėra pilnai pakraunama iki šaltojo periodo, kas yra būtinas ir protingas žingsnis. Be to, B ir C scenarijų atvejais per mažo generuojamos galios kitimo greičio problema negali būti sprendžiama pusę metų, nes Petrašiūnų biomasės katilas tuo metu tiesiog nedirba. Papildomai, iš aukciono rezultatų ir tinklo duomenų matoma, kad Petrašiūnų katilinė pagal strategiją buvo taikoma dirbti pastoviu režimu, o ne konkuruoti rytiniuose ir vakariniuose pikuose. Šie du sprendimai KE vadovų strategijoje neleidžia pamatyti geresnių rezultatų šio mokslinio darbo sudarytiems scenarijams. Tačiau, darbo tikslas yra parodyti kaip ŠAT veiktų prie tikrųjų duomenų, o ne prie idealaus scenarijaus.

4.7. Ciklai per metus

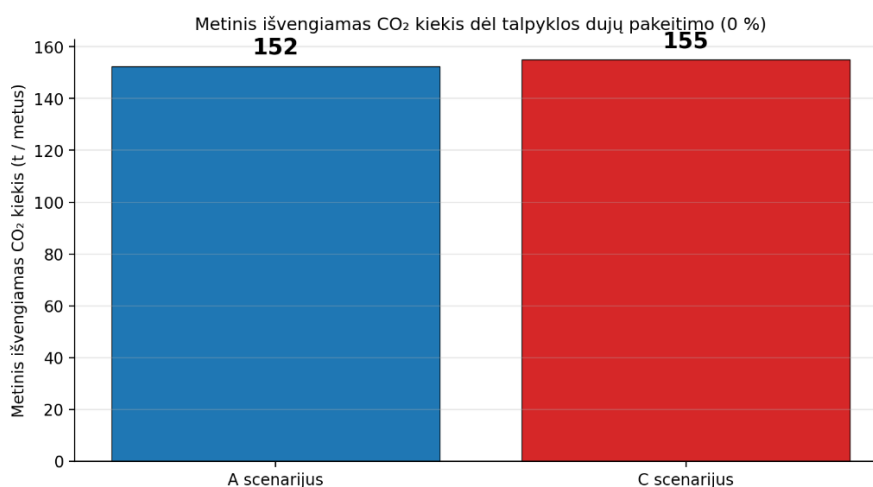
Šiuose rezultatuose pateikiamas kiekvieno scenarijaus metinis ekvivalentinis pilnų ciklų (angl. – *EFC*) skaičius per metus. Visų scenarijų langeliai yra stebėtinai mažoki, didžiausias stebimas ciklų skaičius yra 3,9. Šis rezultatas parodo, kad ŠAT strategija buvo nepritaikyta dažnam naudojimui. Viena priežastis dėl šio rezultato yra ilgas pauzės laikas vasaros metu, kai Petrašiūnų katilinėje vyko remontas. Ko pasekoje, nebuvo galima pakankamai išnaudoti ŠAT B ir C scenarijuose. Be to, talpos darbas organizuojamas pagal jau esančius rezultatus ir buvusią strategiją, kai realybėje reikėtų optimizuoti šilumos padavimą ir strategiją su ŠAT plano centre, kaip vieno pagrindinių įrenginių.



31 pav. Metiniai ekvivalentūs pilni ciklai, pradinė būsena 0 %

4.8. Išvengiamas anglies dvideginio kiekis

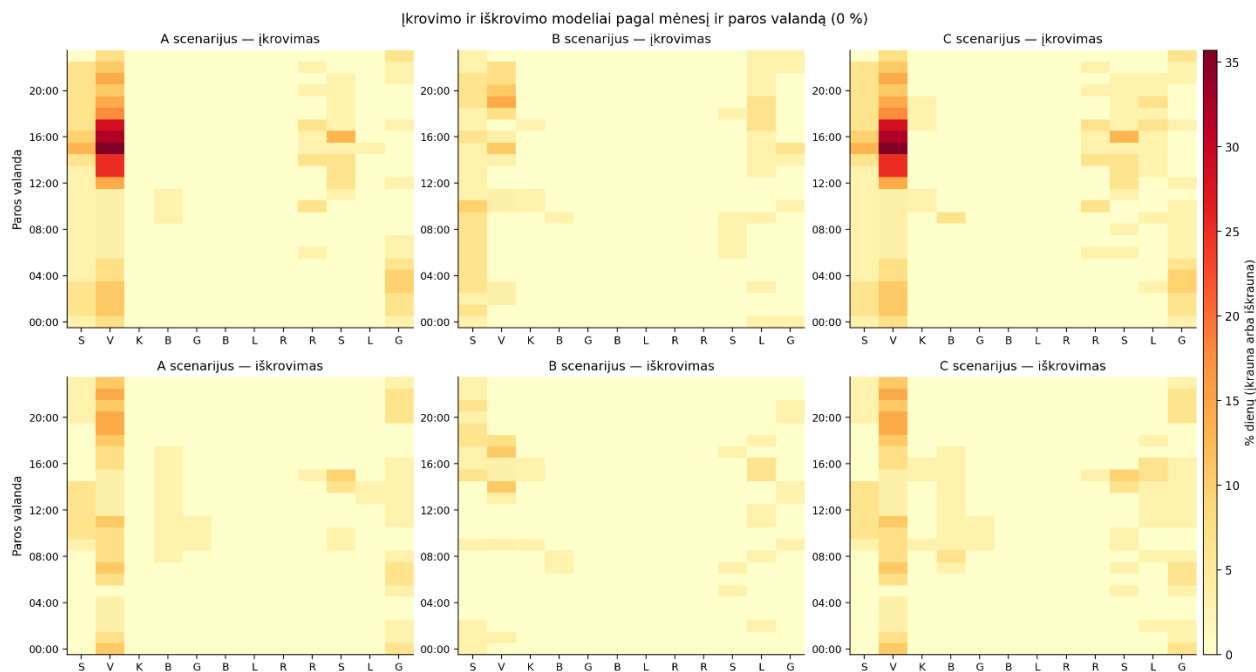
Šis rezultatų grafikas vizualizuoja metinį dėl ŠAT išvengiamą CO₂ kiekį pagal IPCC numatytą emisijos koeficientą – 200 kg CO₂/MWh šilumos gamtinių dujų deginimui. A scenarijus išvengia maždaug 152 tonų CO₂ emisijų į metus, o scenarijus C – 155 tonas CO₂ į metus. B scenarijus dujų nepakeičia, todėl jis grafike nepateikiamas.



32 pav. Metinis išvengto CO₂ kiekis tonomis pagal scenariju

4.9. ŠAT veikimo žemėlapiai ir laiko juostos

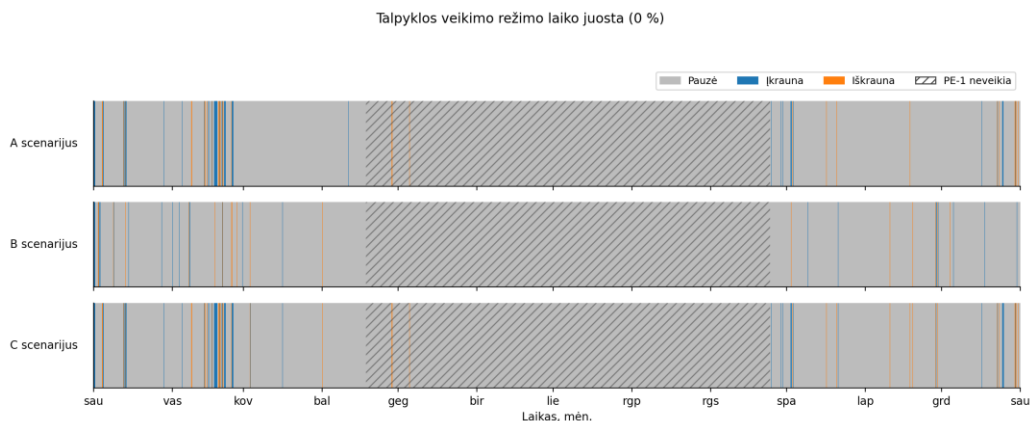
Veikimo žemėlapių grafikų grupėje matome talpos veiksmų (įkrovimo ir iškrovimo) intensyvumo žemėlapius. Šilumos žemėlapiu forma yra kalendorinių mėnesių dalis x ašyje ir dienos valanda y ašyje. Grafike matoma kiek procentaliai laiko ŠAT dirbo pagal pasirinktą valandą ir mėnesį. Didžiausias rezultatas tesiekia 35 %, vadinasi geriausiu atveju talpa galėjo dirbti tam tikrą valandą apie 35 % tą mėnesį. Rezultate matomas didelis tarpas, nes ŠAT neturėjo galimybės dirbti, tai vėl strategijos problema.



33 pav. ŠAT veikimo šilumos žemėlapis, pradinė padėtis 0 %

Pradinės įkrovos 0 % atveju aktyviausias periodas A ir C scenarijuose koncentruojasi nuo 12 iki 20 valandos. B ir C scenarijų atvejais matome didesnę darbingumą rytinių (8 – 9 val.) ir vakarinių pikų (20 – 22 val.) laikais.

Sekanti grafikų grupė pateikia talpos veikimo režimus horizontaliu juostiniu formatu per visus metus, tai geriausiai leidžia mums pamatyti kur prasidėjo ir baigėsi ŠAT krovimai, iškrovimai ar Petrašiūnų katilinės darbai.



34 pav. ŠAT veikimo režimo laiko juosta, pradinė būseną 0 %

Žemiau pateikiama lentelė su visų pradinių būsenų darbo valandų pasiskirstymu. Daugiausiai prastovų turėjo scenarijus B, daugiausiai iškrovimo ir įkrovimo valandų scenarijus C. Iš rezultatų galime teigti, kad prastovos procentaliai sudaro labai didelę dalį viso metų laiko. Efektyvesnei strategijai tinkamas sprendimas galėtų būti didesnė talpa, jeigu dirbama tik limituotu dujų atidavimo laiku, taip būtų galima sukaupti daugiau energijos ir padengti didesnę dalį dujinės kilmės šilumos atsiradus galimybei. Kitu atveju protinga strategija būtų pripažinti, kad ŠAT turi dirbti daugiau per metus, o jos dydis yra tinkamas.

3.3 lentelė. Veikimo režimo valandų pasiskirstymas per 2025 metus

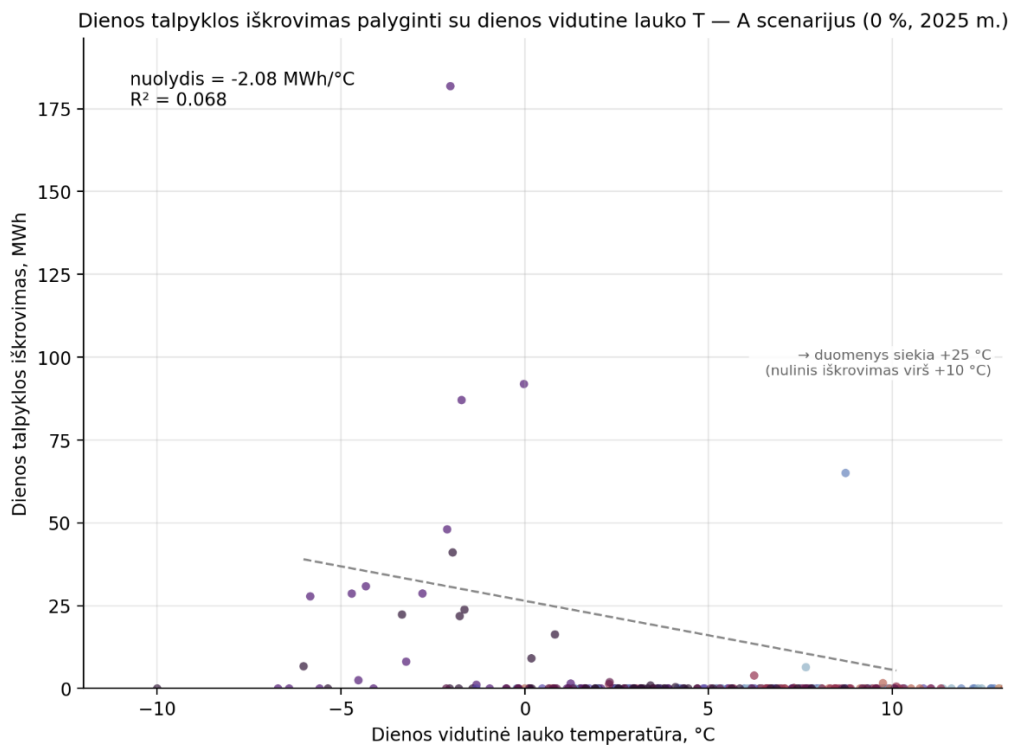
Langelis	Iškrovimo val.	Įkrovimo val.	Prastovų val.
A / 0 %	112	178	8 470
A / 50 %	113	166	8 481
A / 100 %	115	154	8 491
B / 0 %	52	93	8 615
B / 50 %	52	79	8 629
B / 100 %	52	65	8 643
C / 0 %	128	199	8 433
C / 50 %	129	187	8 444
C / 100 %	131	175	8 454

4.10. Iškrovimas prie skirtingos lauko temperatūros

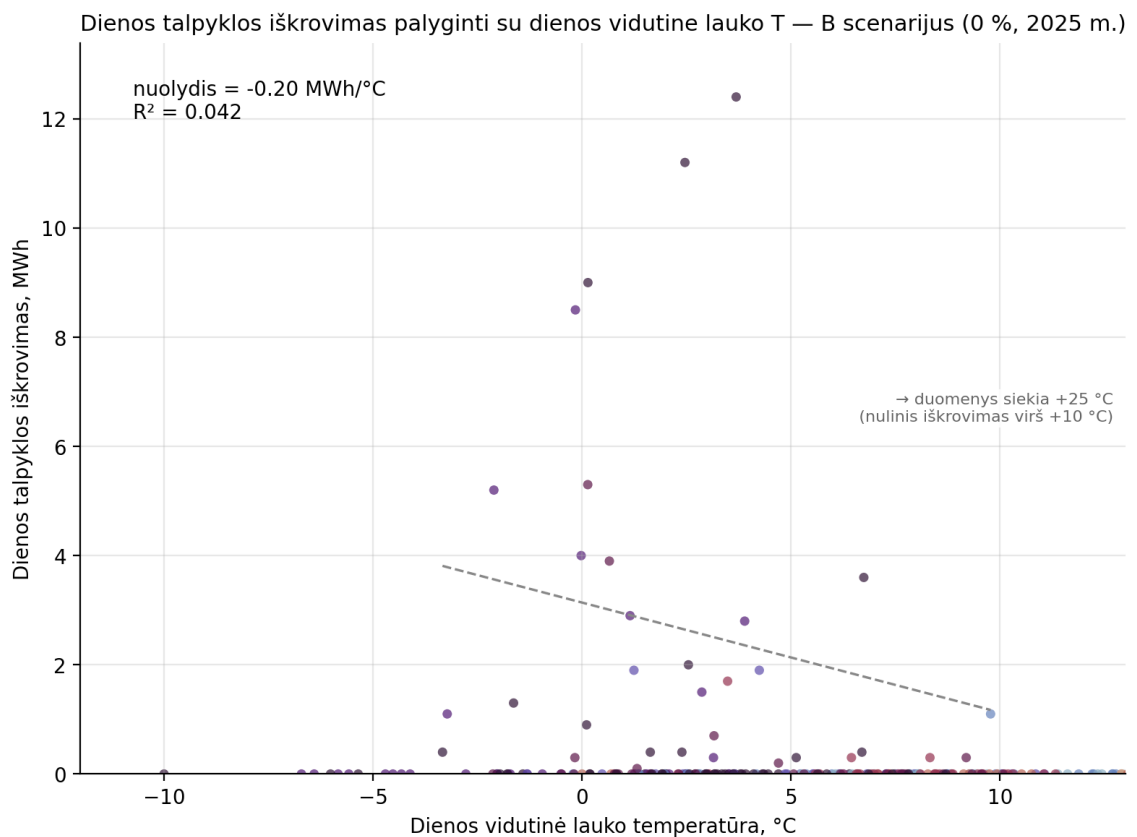
Šiuose rezultatų grafikuose kiekvienas taškas yra viena 2025 m. diena. Per dienų taškus mažiausių kvadratų metodu ištiesinama linija, o dvi šios linijos charakteristikos apibendrina ryšį tarp lauko temperatūros ir dienos talpyklos iškrovimo.

Pirmoji, nuolydis (MWh/°C) vizualizuota statesnė nei horizontali linija. Ši charakteristika atsako į klausimą: „Jei lauko temperatūra nukrenta 1 °C, kiek vidutiniškai daugiau MWh talpykla iškrauna tą dieną?“ Neigiamas nuolydis reiškia, kad šaltesnėmis dienomis iškrovimas didesnis, tai tikėtinas ir įprastas šilumos įrenginio elgesys. Dydis nusako atsako stiprumą pavyzdžiui, nuolydis = -2 MWh/°C reiškia, kad kiekviena 1 °C šaltesnė diena prideda apie 2 MWh talpyklos iškrovimo.

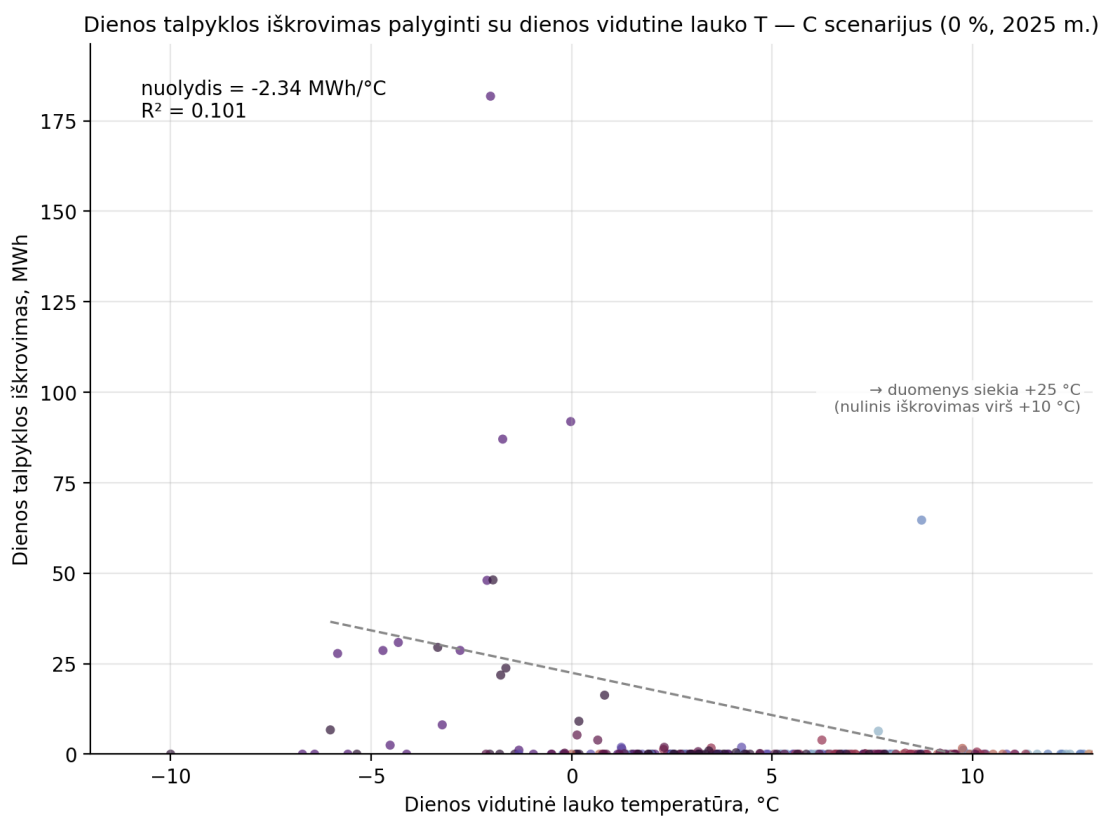
Antroji, charakteristika yra R^2 (determinacijos koeficientas), kuris atsako į klausimą „Kokią dienos iškrovimo svyravimo dalį vien lauko temperatūra paaiškina?“ Jeigu šis koeficientas lygus 1, tada galėtume teigti, kad temperatūra pilnai nuspėja iškrovimą, o jeigu $R^2 = 0,5$, vadinasi temperatūra paaiškina 50 % svyravimo, o likusią dalį lemia kiti veiksniai.



35 pav. Išskrovimas pagal lauko oro temperatūrą, scenarijus A, pradinė būsena 0 %



36 pav. Išskrovimas pagal lauko oro temperatūrą, scenarijus B, pradinė būsena 0 %



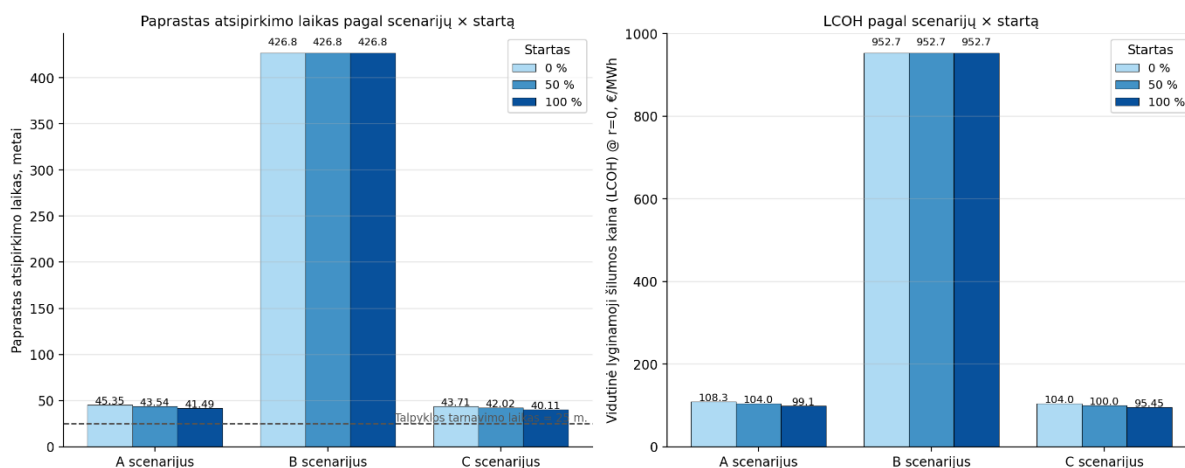
37 pav. Išskrovimas pagal lauko oro temperatūrą, scenarijus C, pradinė būsena 0 %

Analizuodami žemiau esančius grafikus galime teigti, kad visi trys scenarijai turi $R^2 \leq 0,11$, o tai ir yra pagrindinė šios diagramos išvada: talpyklos dienos veikimą valdo kiti įvykiai, o ne tiesiogiai lauko temperatūra, kas padeda paaiškinti mažą ciklų skaičių ir patvirtiną veikimo žemėlapiu rezultatų sudarytas išvadas, kad talpa daugiau dirba pagal nustatytas sąlygas, o ne oro temperatūrą. Taip pat pastebime, kad vienu momentu išskrovimas buvo labai didelis virš 175 MWh, o kitais momentais – daug mažesnis, tai ženklas, jog ŠAT buvo nepakankamai aktyviai kraunama ir galėjo atiduoti daugiau. Joks scenarijus talpos neiškrauna esant dienos vidutinei lauko temperatūrai virš +10 °C ir daugiau.

4.11. Ekonominė rezultatų lentelė

Ekonominiai rezultatai parodė, kad atsipirkimas egzistuoja, tačiau dėl didelių aptarnavimo kaštų ir prastos strategijos, atsipirkimas nėra pakankamas, kad projektas būtų pelningas per priimtina laikotarpį. Rezultatai skaičiuojami pagal praktikoje naudojamus ir VERT pateikiamus ekonominius rodiklius, kur: atskaitinis laikotarpis – 25 metai, eksploataavimo išlaidos – 22 500 eurų per metus, pradinis kapitalas – 1,5 mln. eurų, svertinė vidutinė kapitalo kaina (WACC) – 3,15 %. Pagrindinis 9 langelių investicinių rodiklių rezultatas pateikiamas žemiau esančioje lentelėje ir vizualizuojamas stulpelinuose grafikuose.

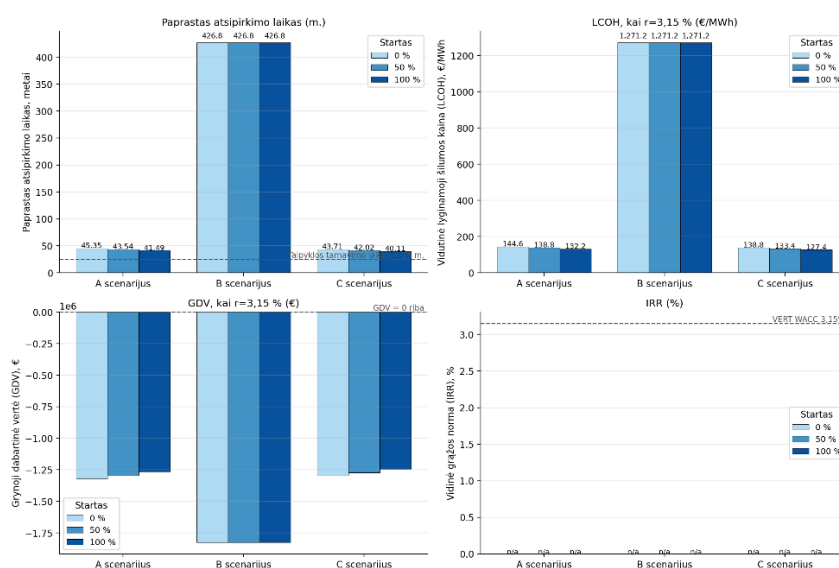
Atsipirkimo laikas ir vidutinė lyginamoji šilumos kaina (LCOH) pagal scenarijų x pradinę sąlygą



38 pav. Supaprastintas atsipirkimas su išlyginamąją šilumos kaina

Palyginimui vidutinė kaina sausio mėnesį BALTPPOOL aukciono biržoje už parduodamą šilumą yra apie 4 ct/kWh, čia pavaizduota, kad projektas atsipirktų per 25 metus, šilumą reiktų parduoti už 9,5 ct/kWh konvertavus iš eurų į MWh. Kainų santykis virš 1:2, kas būtų labai sunku įgyvendinti praktikoje.

Investicinės metrikos – atsipirkimo laikas, vidutinė lyginamoji šilumos kaina (LCOH), grynoji dabartinė vertė (GDV), vidinė grąžos norma (IRR) – pagal scenarijų x pradinę sąlygą



39 pav. Investavimo metrikos

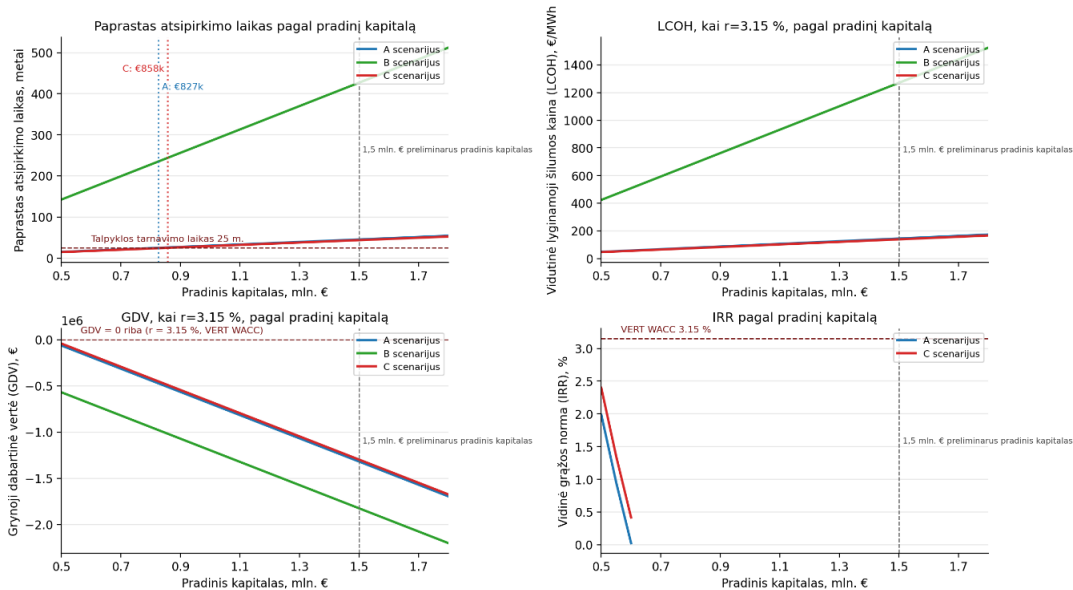
7 lentelė. Ekonominių rezultatų lentelė

Scenarijus / Pradinė būsena	Pajamos, €/m	Iškrovimas, MWh	Ciklai	Atsipirkimas, metai	Vidutinė lyginamoji šilumos kaina, kai r=0, €/MWh	Vidutinė lyginamoji šilumos kaina, kai r=3,15 %, €/MWh	GDV, po 25 metų, €
A / 0 %	33 074	761,4	3,4	45,4	108,35	144,58	-1 318 916
A / 50 %	34 454	793,4	3,6	43,5	103,99	138,76	-1 295 282
A / 100 %	36 155	832,8	3,8	41,5	99,07	132,20	-1 266 146
B / 0 %	3 514	86,6	0,4	426,8	952,66	1 271,22	-1 825 144
B / 50 %	3 514	86,6	0,4	426,8	952,66	1 271,22	-1 825 144
B / 100 %	3 514	86,6	0,4	426,8	952,66	1 271,22	-1 825 144
C / 0 %	34 320	793,0	3,6	43,7	104,03	138,82	-1 297 566
C / 50 %	35 700	825,0	3,7	42,0	100,01	133,45	-1 273 933
C / 100 %	37 402	864,3	3,9	40,1	95,45	127,37	-1 244 797

Grynosios dabartinės vertės rodiklis yra neigiamas, todėl vidinė gražos norma nerodoma nei lentelėje, nei grafike. Geriausia vidutinė kaina, už kurią reikia parduoti šilumą, kad projektas atsipirktų, yra 127,37 €/MWh, kas būtų lygu 12,74 ct/kWh naudojant VERT investicinius rodiklius. Tai yra dar tikslesni skaičiavimai, kurie parodo, kad kaina būtų beveik triguba natūraliai realybėje parduodamos šilumos kaina. Didžiausias bendras iškrovimas siekia 864 MWh per metus, geriausias atsipirkimas per 40,1 metų. Geriausios metinės pajamos 37 402 eurų, kas atėmus 1,5 % operacines išlaidas, lygias 22 500 eurų, lieka 14 902 eurai pelno per metus.

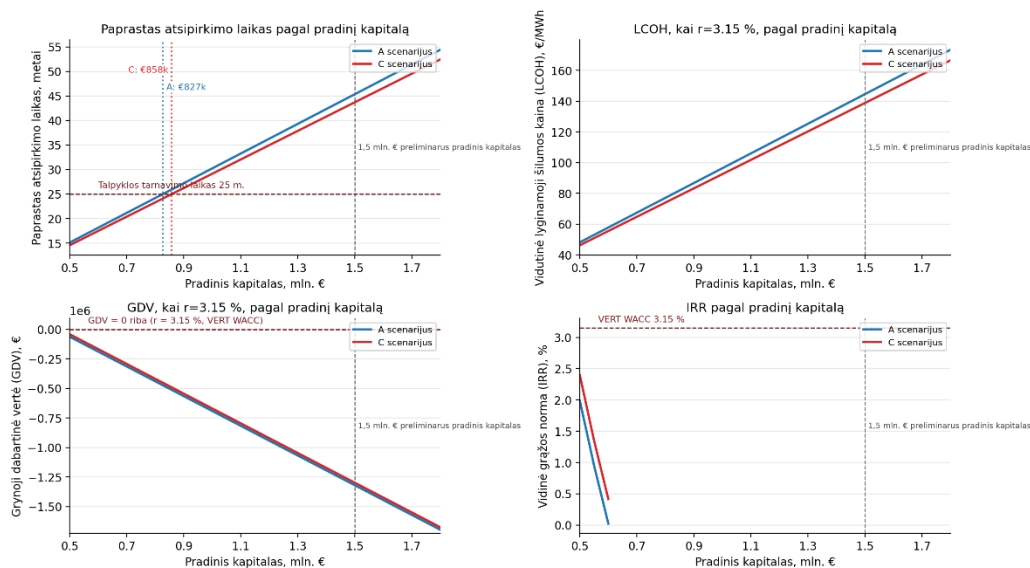
4.12. Investicinių rodiklių jautrumas pradiniam kapitalui

Šie rezultatai vizualizuoja, kaip atsipirkamumo rodikliai keičiasi, kai pradinio kapitalo vertė kinta nuo 0,5 mln. – 1,7 mln. € intervale. Paprastas atsipirkimas ir vidutinė lyginamoji šilumos kaina nuo pradinio kapitalo priklauso tiesiškai.



40 pav. Ekonominiai rodikliai vizualizuoti, pradinė būsena 0 %

Žemiau pateikiami priartinti scenarijaus A ir C rezultatai. Kadangi, scenarijaus C atsipirkimas yra žymiai blogesnis ir tuo pačių hipotetiškai galėtų atsipirkti daug vėliau, neskačiuojant infliacijos ir daikto amžiaus, todėl sekančią vizualizaciją priartinsime prie norimų, geresnių rezultatų ir pamatysime aiškesnius rodmenis sėkmės atveju.

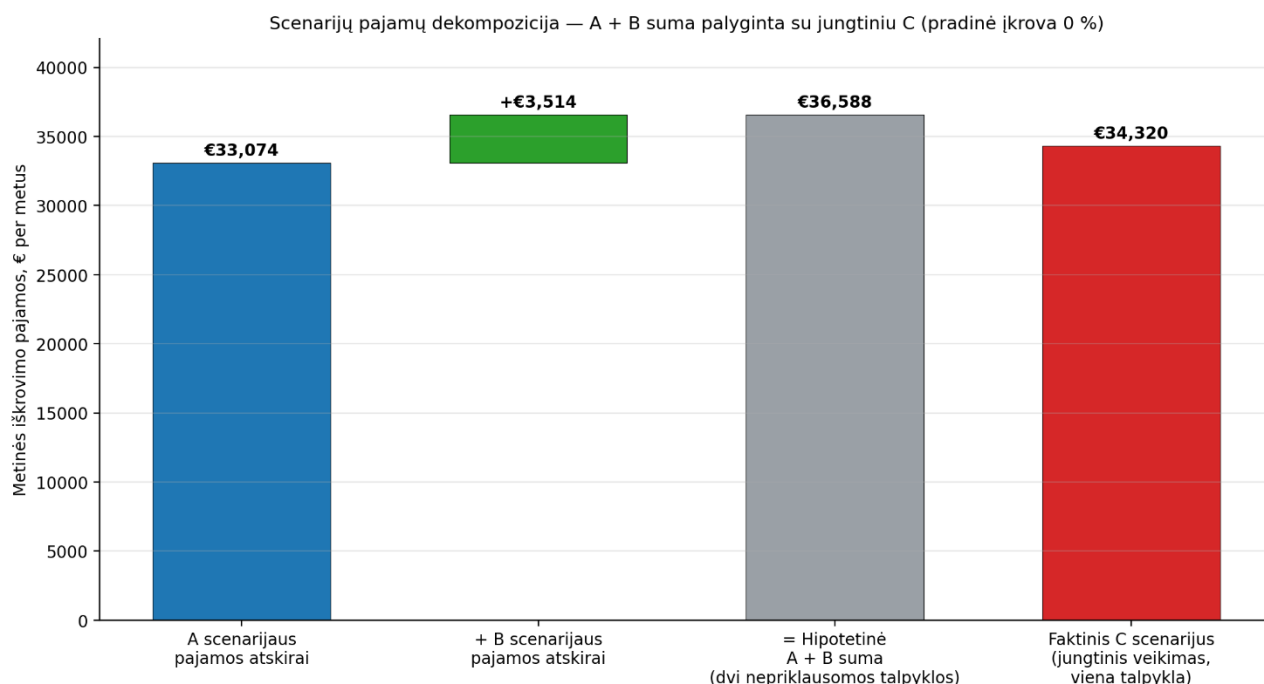


41 pav. Scenarijų A ir C ekonominiai rodikliai vizualizuoti, pradinė būsena 0 %

Matome, kad jeigu pradinis kapitalas būtų kiek mažesnis, apie 900 tūkst. eurų, projektas A ir C scenarijų atveju galėtų atsipirkti per 25 metus, tačiau tai yra paprasto atsipirkimo skaičiavimas. Mokslinio darbo metu nebuvo nurodyta ar gauta tikslios projektinės ŠAT kainos, tačiau ši pradinio kapitalo reikšmė nėra nerealistiška. Tokiu atveju vidutinė lyginamoji šilumos kaina galėtų būti apie 80 eurų už MWh arba 8 ct/kWh. Šis santykis su pradine kaina yra geresnis nei 9,5 ct/kWh praėjusiu atveju, tačiau nėra pakankamas gerai investicijai.

4.13. Pajamų duomenys

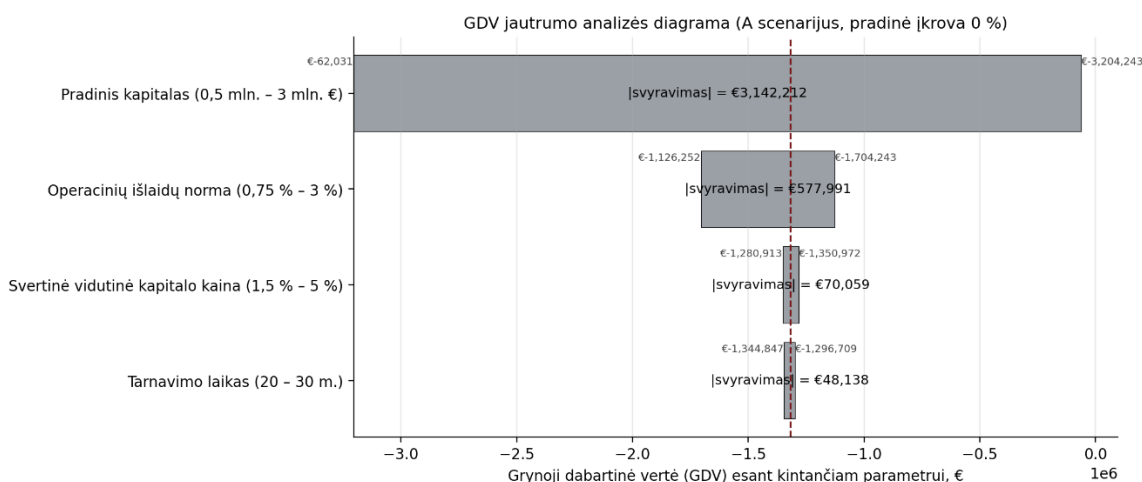
Palygindami pajamų rezultatus galime sudaryti keletą paprastų išvadų. Matome, kad hipotetiškai sujungus dviejų scenarijų strategijas, potencialios pajamos sumažėja nei gautos simuliuojamoje tikrovėje. Taip yra todėl, nes naudojame vieną ŠAT, kuri negali atlikti dviejų funkcijų vienu metu. Todėl natūralu, kad scenarijus C mažesnis, nes ŠAT panaudojimas yra limituotas. Tačiau palyginus visus rezultatus matome, kad skirtumas, nuo hipotetinės vertės, nėra didelis. Iš lentelės matome, kad pradinei būsenai būnant 0 % pajamų kiekis pagal scenarijus pasiskirstė: A atskirai = 33 074 €/m, B atskirai = 3 514 €/m, hipotetinė A + B suma = 36 588 €/m, C faktinė = 34 320 €/m, sinergijos nesutapimas = -2 268 €/m.



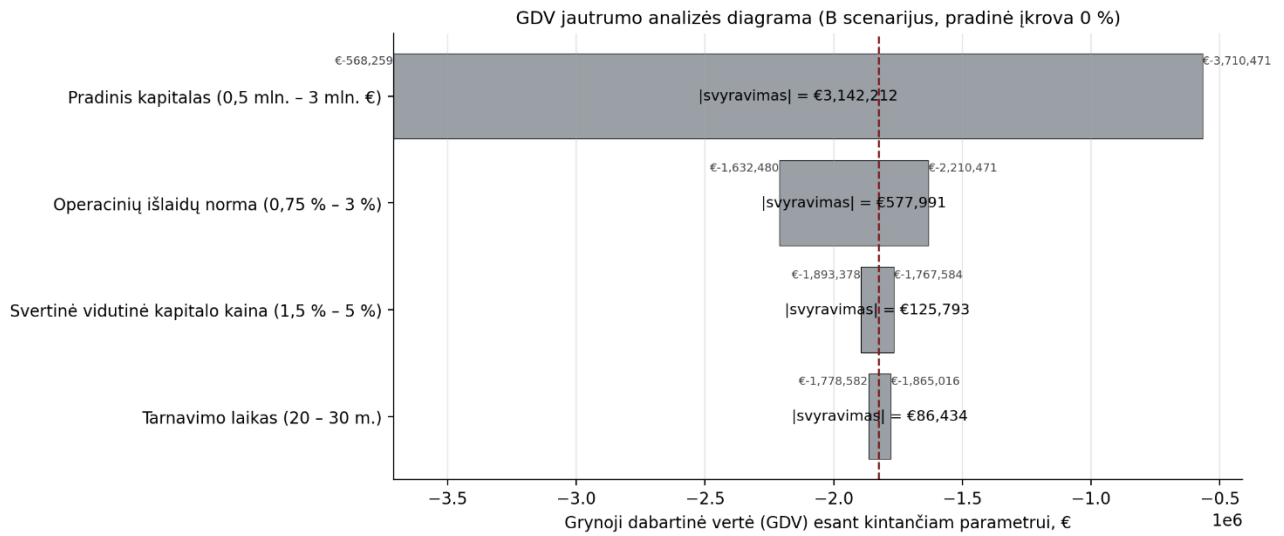
42 pav. Pajamų rezultatai

4.14. GDV jautrumas skirtingiems parametrams

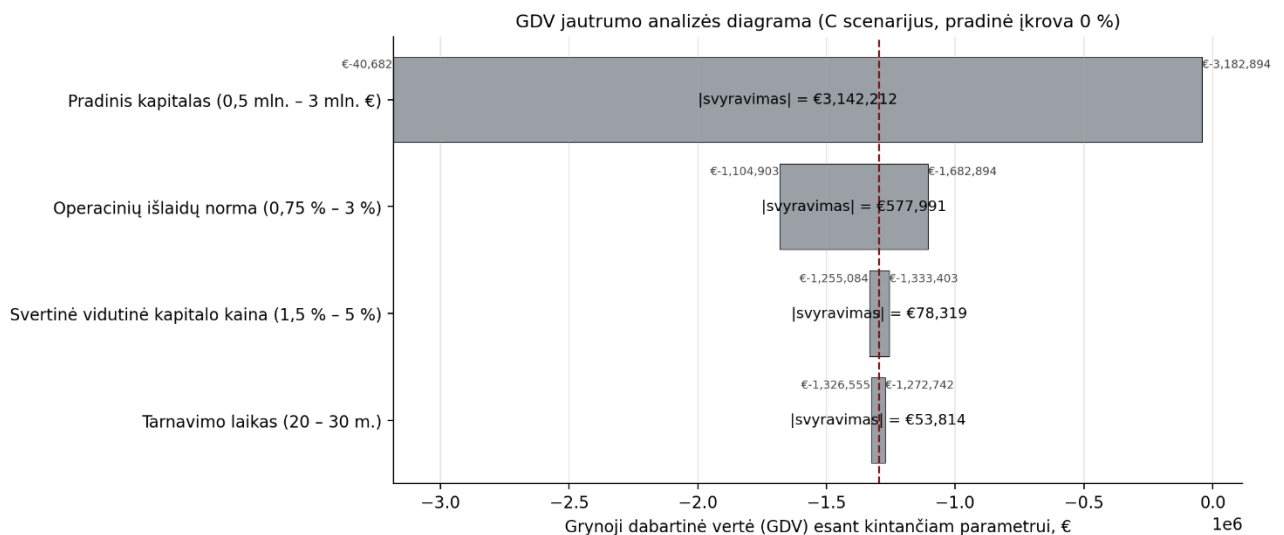
Paskutinė rezultatų grafikų grupė vizualizuoja grynosios dabartinės vertės (GDV) jautrumą per keturis modelio įvesties parametrus: pradinį kapitalą (0,5 – 3 mln. €), operacinių išlaidų normą (0,75 – 3 % nuo pradinio kapitalo), svertinę vidutinę kapitalo kainą (WACC, 1,5 – 5 %) ir tarnavimo trukmę (20 – 30 m.), visais atvejais esant $\pm 50\%$ nukrypimui. Per visus tris scenarijus pradinis kapitalas yra dominuojantis jautrumo skalėje, svyravimas $\approx 3,1$ mln. €, t. y. apie 1,57 mln. € nuo bazinės reikšmės. Nuo jo gerokai atsilieka operacinių išlaidų norma, tik apie 0,29 mln. €, o svertinės vidutinės kapitalo kainos ir tarnavimo trukmės įtaka GDV yra praktiškai minimali (po dešimtys tūkstančių eurų). Visi keturi stulpeliai per visus tris scenarijus yra neigiamoje GDV pusėje, projektas neperžengia GDV = 0 ribos jokiam nagrinėjamame parametru intervalų derinyje.



43 pav. GDV jautrumo analizė, scenarijus A



44 pav. GDV jautrumo analizė, scenarijus B



45 pav. GDV jautrumo analizė, scenarijus C

Analizuojant visų trijų scenarijų jautrumo diagramas, galima daryti išvadas, kad GDV neigiamumą labiausiai lemia pradinio kapitalo dydis, o ne kiti ekonominiai parametrai. Net geriausiu parametru derinyje (mažiausias pradinis kapitalas, mažiausia operacinių išlaidų norma, mažiausia svertinė vidutinė kapitalo kaina, ilgiausia tarnavimo trukmė) joks scenarijus nepasiekia GDV = 0 ribos. Tai patvirtina, kad projekto ekonominę neperspektyvumą lemia struktūrinis ribotas talpyklos panaudojimas, tinkamos strategijos ir jos įvykdymo stoka, o ne neapibrėžtumai, susiję su pradinėmis preliminariomis ekonominio modelio reikšmėmis.

4.15. Šilumos gamintojo ir vartotojo ekonominė perspektyva

Atliktoji ekonominė analizė rėmėsi šilumos gamintojo AB „Kauno Energija“ perspektyva. Pagal darbo metodiką visa talpyklos sukurta vertė (dujomis gaminamos šilumos pakeitimas biomasės šiluma per laiko poslinkį) atitenka gamintojui kaip pajamos, o galutinio šilumos vartotojo tarifui poveikio iš esmės nelieka.

Vartotojo perspektyvai įvertinti pasitelkiama sistemos sąnaudų skirtumo loginė schema. Logikos pagrindas: kai talpykla išsikrauna, ji pakeičia įrenginį, kuris kitu atveju būtų naudojamas didesnėmis sąnaudomis – A scenarijuje tai dujomis gaminama šiluma (šiuo atveju kainai nustatyti naudosime aukciono eilės paskutinę biomasės įrenginio vietą), B scenarijuje – pasirinksime žemiau prioriteto eilėje esančius, brangesnius biomasės gamintojus, kurie padengtų paklausą vietoj Petrašiūnų katilinės. Tinklas vartotojams perskaičiuoja sutaupytą pinigų kiekį, kuris lygus pakeistų įrenginių šilumos kainos ir Petrašiūnų katilinės šilumos ribinės kainos skirtumui, padaugintam iš talpyklos iškrovimo MWh.

Kauno CŠT tinklo bendra 2025 m. patiekta šiluma – apie 1,3 mln. MWh Papildomai pritaikomos pakeisto įrenginio kainos prielaidos:

- Dujomis gaminama šiluma – 49,1 €/MWh;
- Kauno Energijos 2025 m. dujų vidutinė svartinė kaina 45,18 €/MWh padalinta Petrašiūnų katilo efektyvumo $\eta \approx 0,92$);
- Žemesnio prioriteto biomasės kaina – apie 55 €/MWh (didesnio kitimo greičio padengimo segmento konservatyvi reikšmė).

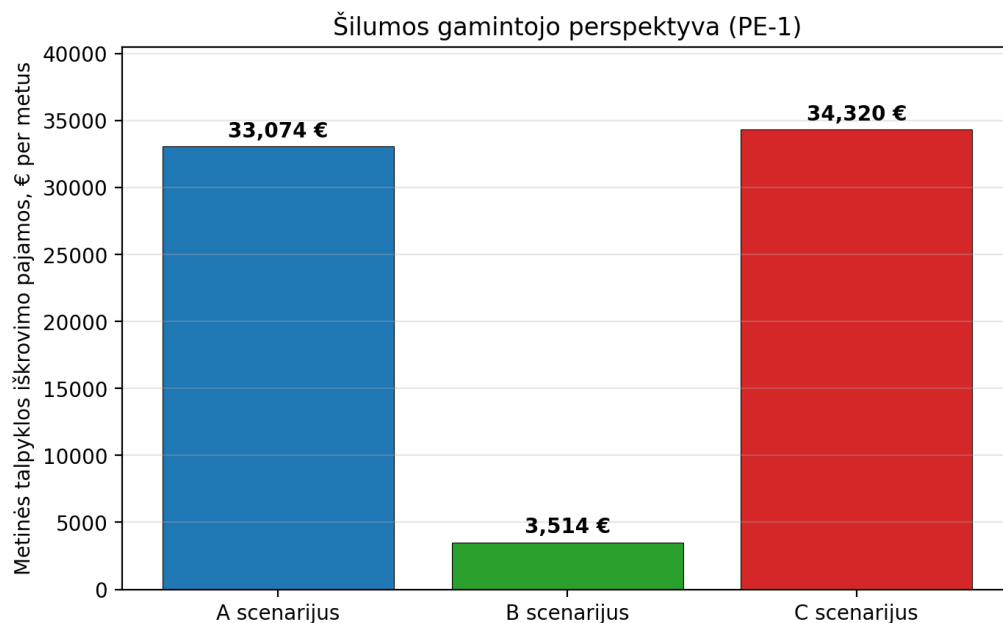
Skaitiniai sutaupymai pagal scenarijų (šaltos pradinės įkrovos atveju):

A – talpyklos iškrovimas 761,4 MWh, vidutinė ribinė kaina 43,44 €/MWh, pakeisto įrenginio kaina 49,11 €/MWh, bendras sutaupymas gyventojams 4,319 €/metus;

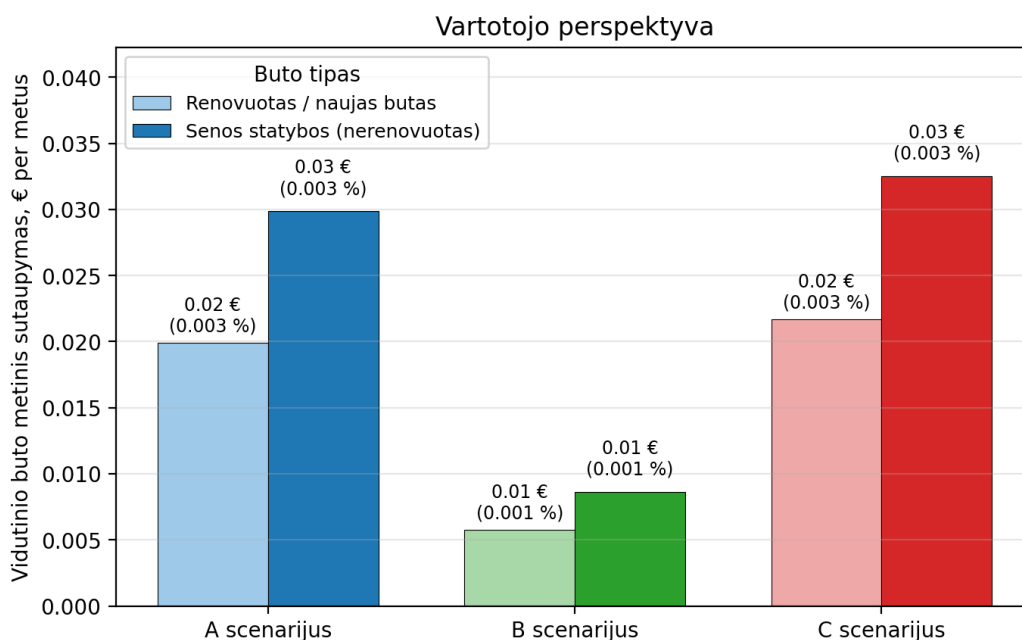
B – iškrovimas 86,6 MWh, ribinė kaina 40,58 €/MWh, pakeistos biomasės kaina 55 €/MWh, bendras sutaupymas gyventojams 1,249 €/metus;

C – iškrovimas 793,0 MWh (~98 % A režimu, likę B režimu), svartinis pakeisto įrenginio kainos vidurkis 49,21 €/MWh, ribinė 43,28 €/MWh, bendras sutaupymas gyventojams 4,703 €/metus.

Konkretus poveikis buto sąskaitai priklauso nuo pastato tipo. Renovuoto ar naujo buto atveju taikomos 6 MWh per metus šilumos sąnaudos, o šilumos sąskaita apie 660 € per metus, C scenarijus suteikia beveik nejaučiamą 0,022 € per metus sutaupymą, t. y. 0,0033 % nuo metinės sąskaitos. Senos statybos nerenovuoto buto atveju taikomos 9 MWh per metus šilumos sąnaudos, sąskaita apie 990 € per metus 0,033 €/metus arba 0,0033 % nuo sąskaitos. A scenarijuje atitinkamai 0,020 € per metus (renovuotas) ir 0,030 € per metus (nerenovuotas); B scenarijuje – 0,006 € per metus ir 0,009 € per metus.



46 pav. Šilumos gamintojo ekonominė perspektyva



47 pav. Vartotojo ekonominė perspektyva

46 ir 47 paveikslėlių rezultatų palyginimas atskleidžia struktūrinę dvigubą perspektyvą: gamintojui talpyklos pajamos sudaro 34,320 € per metus (C scenarijus), o tiems patiems vartotojams sutaupymas per tarifą yra vos 4,703 € per metus, arba apie 13,7 % nuo gamintojo pajamų. Toks skirtumas atsiranda todėl, kad didžioji talpyklos pajamų dalis tiesiog pakeičia tai, ką vartotojai būtų vis tiek mokėję kitam gamintojui už šilumą piko metu. Vartotojui realiai tenka tik kainos skirtumo dalelytė.

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė parodė, kad centralizuoto šilumos tiekimo sistemos yra svarbi, kompleksiška miestų infrastruktūros dalis, kurioje šilumos akumuliacijos talpos dažnai pateisinamos ekonominiu ir energetiniu aspektais.
2. Išanalizuota Kauno centralizuoto šilumos tiekimo tinklo esama situacija, sistemos pagrindiniai biomasės energijos ir dujinės kilmės energijos gamintojai bei pats tinklo veikimo principas, aukcionų tvarka. Pateikti aukcionų, tinklo operatoriaus pavyzdiniai duomenys bei visų biomasės energijos gamintojų parametrai.
3. Sukurtas skaičiuojamasis modelis akumuliacinės talpos įkrovimui ir iškrovimui, klaidingų duomenų atpažinimas ir kiti operatoriaus loginiai sprendimai valdant tinklą. Paskaičiuotas efektyvusis talpos tūris 4250 m³, apibrėžti talpos parametrai, pagrindiniai iš jų: didžiausias momentinis iškrovimas – 34 MW, įkrovimas – 20 MW. Užtikrinant stabilią terminę stratifikaciją (temperatūrinį sluoksniavimąsi), panaudojamas talpos energijos kiekis – 222 MWh.
4. Sukurto skaičiavimo modelio pagalba rezultatai pateikti 3 scenarijų forma, kiekvienam scenarijui po 3 pradinės įkrovimo sąlygas (0 %, 50 %, 100 %). Scenarijus A talpą naudoja kaip rezervinį įrenginį dujų katilų įjungimo metu, žaliai energijai tiekti į tinklą. Scenarijus B talpą išnaudoja, tiekiant šilumą momentiniams poreikiams patenkinti ir C scenarijus sujungiantis abudu, bet skiriantis prioritetą scenarijaus A logikai.
5. Atliktas šilumos gamintojo perspektyvos ekonominis vertinimas pagal praktikoje naudojamus VERT investicinius rodiklius parodė, jog geriausias metinių talpyklos iškrovimo pajamų rezultatas buvo 37 402 eurai per metus, gautas C scenarijuje esant pradinei įkrovai 100 %, geriausias paprastas atsipirkimas – 40,1 metų, geriausia vidutinė lyginamoji šilumos kaina, kuriai esant projektas atsipirktų – 127,37 €/MWh, kas daugiau nei tris kartus viršija realaus BALTPPOOL aukciono biomasės šilumos kainą (apie 4 ct/kWh sausio mėnesį).
6. Pradinio kapitalo jautrumo analizė parodė, kad esant maždaug 900 tūkst. eurų pradiniam kapitalui, paprasto atsipirkimo atveju, A ir C scenarijai gebėtų atsipirkti per 25 metus. Atitinkamai ekonominį neperspektyvumą lemia ne ekonominio modelio prielaidos, o ribotas talpyklos panaudojimas ir aukciono kainų santykis.
7. Atlikta papildoma šilumos vartotojo perspektyvos analizė, įvertinant sutaupymą per reguliuojamą tarifą pagal sistemos sąnaudų skirtumo schemą parodė, kad šilumos akumuliacijos talpa, esant dabartinei reguliavimo sistemai ir analizuotoms valdymo strategijoms, pirmiausia veikia kaip šilumos gamintojo pajamų šaltinis ir galutinio šilumos vartotojo šiluminės energijos kainai turi labai nedidelę įtaką.
8. Apibendrinant, centralizuoto šilumos tiekimo sistemos numatomoje ateityje plėsis ir tobulės kartu su miestais, o gebėjimas kaupti energiją integravus šilumos kaupimo įrenginius, galėtų būti centrinė šilumos tiekėjų gamybos strategijos dalis, taip stengiantis išnaudoti jos teigiamas savybes kartu su gamybos šaltiniais, kad talpa taptų pranašumas, o ne nuostolis.

Literatūros sąrašas

1. MOTHERWAY, B. *DHC Market Outlook 2025*. Prieiga per internetą: <https://www.euroheat.org/data-insights/outlooks/dhc-market-outlook-2025>
2. TOLEIKYTE Agne; VOLT Jonathan; MOUNTRAKI Aikaterini; LETOUT Simon; WEGENER Moritz ir kt. *Smart Thermal Networks in the European Union*. Prieiga per internetą: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC144163>
3. *Thermal_Networks_The_Smart_Way_to_Net_Zero.Pdf*. Prieiga per internetą: https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/IEA_TNCG/Thermal_Networks_The_Smart_Way_to_Net_Zero.pdf
4. CONTINI Stefania; CHONDROGIANNIS Stamatios; MONTERO CABRERA Marius; TARANTOLA Stefano; KOPUSTINSKAS Vytis ir kt. *Implementation of Commission Recommendation on Energy Storage in the Member States*. Prieiga per internetą: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC144586>
5. ECES, I. *Final Report Annex 30 "Applications of Thermal Energy Storage"*. Prieiga per internetą: <https://iea-es.org/publications/annex-30-final-report/>
6. ECES, I. *Final Report Task 39 "Large Thermal Energy Storage for District Heating"*. Prieiga per internetą: <https://iea-es.org/publications/final-report-task-39-large-thermal-energy-storage-for-district-heating/>
7. GUELPA, Elisa ir VERDA, Vittorio. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. *Applied Energy*, vol. 252 (2019), pp. 113474. ISSN 0306-2619. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919311481>
8. ARÉVALO, Paul; OCHOA-CORREA, Danny ir VILLA-ÁVILA, Edison. Advances in Thermal Energy Storage Systems for Renewable Energy: A Review of Recent Developments. *Processes*, vol. 12 (2024), nr. 9.
9. KALAISELVAM, S. ir PARAMESHWARAN, R. . Chapter 7 - Seasonal Thermal Energy Storage *In: Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, pp. 145–162S. Kalaiselvam ir R. Parameshwaran. Boston: Academic Press, 2014. ISBN 9780124172913. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124172913000074>
10. KALAISELVAM, S. ir PARAMESHWARAN, R. . Chapter 4 - Sensible Thermal Energy Storage *In: Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, pp. 65–81S. Kalaiselvam ir R. Parameshwaran. Boston: Academic Press, 2014. ISBN 9780124172913. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/monograph/pii/B9780124172913000049>
11. MORALES SANDOVAL, Daniel A., et al. *Design and Verification of an Effective State-of-charge Estimator for Thermal Energy Storage*. Institution of Engineering and Technology (IET), 2021. ISBN 2515-2947. Prieiga per internetą: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/stg2.12024>

12. DING, Z.; WU, W. ir LEUNG, M. Advanced/hybrid thermal energy storage technology: material, cycle, system and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 145 (2021), p. 111088. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121003762>
13. ALIYARI, N.; FERNANDES, M. S. ir GASPAR, A. R. Solid-gas thermochemical energy storage systems: A critical review. *Journal of Energy Storage*, t. 155 (2026), p. 121166. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X26008303>
14. POURAHMADIYAN, Ali; SADI, Meisam ir ARABKOOHSAR, Ahmad. . 6 - Seasonal thermal energy storage *In: Future Grid-Scale Energy Storage Solutions*, pp. 215–267 Ahmad Arabkoohsar. Academic Press, 2023. ISBN 9780323907866. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323907866000133>
15. VILLASMIL, W.; FISCHER, L. J. ir WORLITSCHKEK, J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 103 (2019), p. 71–84. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308347>
16. ZHAI, X.; XU, Z.; ZHANG, W.; ZHANG, Q.; YANG, X. ir kt. Phase change thermal energy storage: Materials and heat transfer enhancement methods. *Journal of Energy Storage*, t. 123 (2025), p. 116778. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X25014914>
17. ZHANG, Y.; AYDIN, D.; JARIMI, H.; KUTLU, C. Review of recent developments in thermochemical energy storage materials and systems. *Research and Reviews in Sustainability*, t. 2, nr. 1 (2026), p. 103–124. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.65582/rrs.2026.008>
18. SIFNAIOS, I.; JENSEN, A. R. Performance analysis of the Høje Taastrup water pit thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, t. 131 (2025), p. 117504. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117504>
19. SIFNAIOS, I.; GAUTHIER, G.; TRIER, D.; FAN, J.; JENSEN, A. R. Dronninglund water pit thermal energy storage dataset. *Solar Energy*, t. 251 (2023), p. 68–76. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.046>
20. FAN, J.; HUANG, J.; CHATZIDIAKOS, A.; FURBO, S. Experimental and theoretic investigations of thermal behavior of a seasonal water pit heat storage. *ISES Solar World Congress 2017 / IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, 2017. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.18086/swc.2017.13.03>
21. AB "Klaipėdos energija" projektas: akumuliacinės talpos integracija. Prieiga: <https://www.klenergija.lt/silumos-tiekejai-aplanke-klaipedos-silumos-gamybos-objektus-pasidalino-investiciniu-projektu-patirtimi-ir-planais/>
22. AB "Kauno energija" projektas su Europos investicijų banko finansavimu. Prieiga: <https://www.kaunoenergija.lt/naujienos/modernesniam-ir-zalesniam-kauno-sildymui-eib-skiria-35-mln-euru-parama>
23. AB „Kauno Energija“ inžinerinis archyvas. Techninė specifikacija (TS) §4.5, Autorizavimo ataskaita (AR), Projektinė specifikacija (DS-001.1), Mechartės skaitmeninės skysčių dinamikos ataskaita, PID schema T1. 2018.

24. AB „Kauno Energija“. DEMAND_2025.xlsx — 2025 metų valandinis tinklo veiklos darbalapis. Vidinis dokumentas.
25. Lietuvos Respublikos Šilumos ūkio įstatymas (suvestinė redakcija). Vilnius, 2024.
26. BALTPPOOL UAB. Aukcionų rezultatai 2025 m. Pagrindiniai ir balansavimo aukcionų archyvas.
27. Computational Fluid Dynamics (CFD) Report – Diffuser Design for Hot Water TES Tank in Lithuania. Inžinerinis projektinis dokumentas. CFD Simulation Lithuania, 2023.
28. Valstybinė energetikos reguliavimo taryba (VERT). Investicijų grąžos norma (WACC) — Šilumos sektorius. Vilnius, 2022 m. birželis.
29. Valstybinė energetikos reguliavimo taryba (VERT). Šilumos kainos metodika ir Priedas Nr. 3 (O3-96 / O3E-349). Vilnius, 2024.
30. Danish Energy Agency, Energinet. *Technology Data Catalogue for Energy Storage*. Version 7. Copenhagen: Danish Energy Agency, 2020. Prieiga per internetą: <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-energy-storage>

Priedai

1 priedas

Reads the 9 scenario × init outputs from `findings/sim_2025/scenario_*.csv` and computes the four investor metrics:

- Simple payback (yr): `CAPEX / annual_revenue` (undiscounted, gross of opex)
- LCOH @ r = 0 (€/MWh): `(CAPEX/N + OPEX) / annual_discharge_MWh`
- LCOH @ r = 3.15 % (€/MWh): `(CAPEX·CRF + OPEX) / annual_discharge_MWh`,
`CRF = r(1+r)^N / ((1+r)^N - 1)`
- NPV @ r = 3.15 % (€): `-CAPEX + Σ_{t=1..N} (annual_revenue - OPEX) / (1+r)^t`
- IRR (%): root of `NPV(r) = 0`, solved numerically via `scipy.optimize.brentq`.

Annual revenue is ****tank discharge revenue only**** (Topic 14's load-bearing boundary). The charging-bump revenue from the old (locked) methodology is NOT included — under the Klaipėdos precedent (Topic 13) charging is non-revenue, so the conservative discharge-only definition is the entire revenue line PE-1's investor sees.

Constants are Topic 14's placeholders + VERT-published WACC:

- CAPEX = €1,500,000 (Topsectorenergie / ASME midpoint placeholder)
- N = 25 years (Danish Energy Agency TTES factsheet)
- OPEX = 1.5 % × CAPEX (Danish Energy Agency, bundled placeholder)
- r = 3.15 % (VERT heating sector WACC, June 2022 update —
4.325 % cost of equity + 1.972 % cost of debt at
50/50 capital structure)

Writes:

- `findings/sim_2025/economics_2025.csv` — 9 rows × 8 metric columns.
- `findings/sim_2025/economics_2025.md` — narrative + 9-cell table.

"""

```
from __future__ import annotations
```

```
from pathlib import Path
```

```
import pandas as pd
```

```
from scipy.optimize import brentq
```

```
PROJECT_ROOT: Path = Path(__file__).resolve().parents[2]
```

```
SIM_DIR: Path = PROJECT_ROOT / "findings" / "sim_2025"
```

```
# Topic 14 constants.
```

```

CAPEX_EUR: float = 1_500_000.0
LIFETIME_YEARS: int = 25
OPEX_RATE: float = 0.015
OPEX_EUR_PER_YR: float = OPEX_RATE * CAPEX_EUR # €22,500/yr at placeholder.
VERT_WACC: float = 0.0315 # 3.15 % nominal pre-tax, VERT heating sector.

```

```

# Q_nom for EFC computation (Topic 6 canonical capacity).
Q_NOM_MWH: float = 222.0

```

```

INIT_NAMES: tuple[str, ...] = ("cold_start", "half_full", "full")
SCENARIOS: tuple[str, ...] = ("a", "b", "c")

```

```

def _crf(r: float, n: int) -> float:
    """Capital recovery factor  $r(1+r)^N / ((1+r)^N - 1)$ .  $r=0 \rightarrow 1/N$ ."""
    if r == 0.0:
        return 1.0 / n
    return r * (1.0 + r) ** n / ((1.0 + r) ** n - 1.0)

```

```

def _npv(r: float, annual_revenue: float, n: int = LIFETIME_YEARS) -> float:
    """NPV at discount rate `r` over `n` years."""
    annual_net = annual_revenue - OPEX_EUR_PER_YR
    if r == 0.0:
        return -CAPEX_EUR + annual_net * n
    pv = sum(annual_net / (1.0 + r) ** t for t in range(1, n + 1))
    return -CAPEX_EUR + pv

```

```

def _irr(annual_revenue: float, n: int = LIFETIME_YEARS) -> float | None:
    """Solve  $NPV(r) = 0$  for  $r \in [0, 1]$ . Returns None if no root in range
    (project never breaks even, even at  $r = 0$ )."""
    f0 = _npv(0.0, annual_revenue, n)
    f1 = _npv(1.0, annual_revenue, n)
    if f0 <= 0.0:
        # Even at  $r=0$  the project is NPV-negative — no IRR in  $[0, 1]$ .
        return None
    if f1 >= 0.0:
        # Even at  $r=100\%$  the project is NPV-positive — IRR is enormous.
        # Cap at 1.0 = 100% for reporting.
        return 1.0
    try:
        return float(brentq(lambda r: _npv(r, annual_revenue, n), 0.0, 1.0))
    except Exception: # pragma: no cover
        return None

```

```

def compute_cell(scenario: str, init: str) -> dict[str, float | str | None]:
    """Compute one row of the economics table."""
    csv = SIM_DIR / f"scenario_{scenario}_{init}.csv"
    df = pd.read_csv(csv, index_col=0)
    annual_revenue = float(df["storage_discharge_revenue_eur"].sum())
    annual_discharge_mwh = float(df["P_discharge_MW"].sum())

    if annual_revenue > 1e-9:
        simple_payback = CAPEX_EUR / annual_revenue
    else:
        simple_payback = float("inf")

    if annual_discharge_mwh > 1e-9:
        lcoh_r0 = (CAPEX_EUR / LIFETIME_YEARS + OPEX_EUR_PER_YR) /
annual_discharge_mwh
        crf_v = _crf(VERT_WACC, LIFETIME_YEARS)
        lcoh_rvert = (CAPEX_EUR * crf_v + OPEX_EUR_PER_YR) / annual_discharge_mwh
    else:
        lcoh_r0 = float("inf")
        lcoh_rvert = float("inf")

    npv_vert = _npv(VERT_WACC, annual_revenue)
    irr_pct = _irr(annual_revenue)
    efc = annual_discharge_mwh / Q_NOM_MWH

    return {
        "scenario": scenario.upper(),
        "init": init,
        "annual_revenue_eur": annual_revenue,
        "annual_discharge_mwh": annual_discharge_mwh,
        "efc": efc,
        "simple_payback_yr": simple_payback,
        "lcoh_r0_eur_per_mwh": lcoh_r0,
        "lcoh_rvert_eur_per_mwh": lcoh_rvert,
        "npv_rvert_eur": npv_vert,
        "irr_pct": irr_pct * 100.0 if irr_pct is not None else None,
    }

def build_economics_table() -> pd.DataFrame:
    """Build the 9-cell economics table."""
    rows: list[dict] = []
    for sc in SCENARIOS:
        for init in INIT_NAMES:
            rows.append(compute_cell(sc, init))

```

```
df = pd.DataFrame(rows)
return df
```

```
def _write_economics_md(df: pd.DataFrame, out_path: Path) -> None:
    """Write the methodology-aware narrative + 9-cell table."""
    lines = [
        "# Economic translation — Topic 14 of `findings/system_logic.md`",
        "",
        "Constants used:",
        f"- CAPEX = €{CAPEX_EUR:,.0f} (Topsectorenergie / ASME midpoint placeholder)",
        f"- Lifetime N = {LIFETIME_YEARS} years (Danish Energy Agency TTES factsheet)",
        f"- OPEX = {OPEX_RATE * 100:.1f} % of capex/yr = €{OPEX_EUR_PER_YR:,.0f}/yr "
        "(Danish Energy Agency, bundled placeholder)",
        f"- WACC r = {VERT_WACC * 100:.2f} % nominal pre-tax (VERT heating sector, "
        "June 2022 update)",
        "",
        "Annual revenue = tank discharge revenue only "
        "(Topic 14 — charging is non-revenue under the Klaipėdos precedent).",
        "",
        "## 9-cell investor-metrics table",
        "",
        "| Scenario | Init | Annual revenue (€/yr) | Annual discharge (MWh) | EFC "
        "| Simple payback (yr) | LCOH @ r=0 (€/MWh) | LCOH @ r=3.15 % (€/MWh) "
        "| NPV @ r=3.15 % (€) | IRR (%) |",
        "|---|---|---:|---:|---:|---:|---:|---:|",
    ]
    for _, r in df.iterrows():
        irr_str = f"{r['irr_pct']:.2f}" if r["irr_pct"] is not None else "n/a"
        payback_str = (
            f"{r['simple_payback_yr']:.1f}"
            if r["simple_payback_yr"] != float("inf")
            else "∞"
        )
        lines.append(
            f"| {r['scenario']} | {r['init']} | {r['annual_revenue_eur']:.0f} "
            f"| {r['annual_discharge_mwh']:.1f} | {r['efc']:.1f} "
            f"| {payback_str} | {r['lcoh_r0_eur_per_mwh']:.2f} "
            f"| {r['lcoh_rvert_eur_per_mwh']:.2f} "
            f"| {r['npv_rvert_eur']:.0f} | {irr_str} |"
        )

    # Per-column winners (best per metric).
    finite = df[df["simple_payback_yr"] != float("inf")]
    if not finite.empty:
        lines.append("")
```

```

lines.append("## Per-metric winners")
best_rev = df.loc[df["annual_revenue_eur"].idxmax()]
best_payback = finite.loc[finite["simple_payback_yr"].idxmin()]
best_lcoh = finite.loc[finite["lcoh_rvert_eur_per_mwh"].idxmin()]
best_npv = df.loc[df["npv_rvert_eur"].idxmax()]
lines += [
    f"- Best annual revenue: ** {best_rev['scenario']}/{best_rev['init']}** "
    f"(€{best_rev['annual_revenue_eur']:,.0f}/yr)",
    f"- Best (lowest) simple payback: ** {best_payback['scenario']}/"
    f"{best_payback['init']}** ({best_payback['simple_payback_yr']:1f} yr)",
    f"- Best (lowest) LCOH @ r=3.15 %: ** {best_lcoh['scenario']}/"
    f"{best_lcoh['init']}** (€{best_lcoh['lcoh_rvert_eur_per_mwh']:2f}/MWh)",
    f"- Best (highest) NPV @ r=3.15 %: ** {best_npv['scenario']}/"
    f"{best_npv['init']}** (€{best_npv['npv_rvert_eur']:,.0f})",
]

```

```

out_path.write_text("\n".join(lines), encoding="utf-8")

```

```

def main() -> None:

```

```

    df = build_economics_table()
    SIM_DIR.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
    df.to_csv(SIM_DIR / "economics_2025.csv", index=False)
    _write_economics_md(df, SIM_DIR / "economics_2025.md")
    print(df.to_string(index=False))

```

```

if __name__ == "__main__":

```

```

    main()

```