VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR GAISRINĖS SAUGOS KATEDRA

Dainius Skorka

MATEMATINIO GAISRO PROCESO MODELIO VERTINIMAS TAIKANT OPERACIJŲ TYRIMO METODUS

ASSESSING MATHEMATICAL MODEL OF FIRE PROCESS BY APPLYING METHODS OF OPERATION RESEARCH

Baigiamasis magistro darbas

Saugos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX031

Gaisrinės ir gelbėjimo darbų saugos ir valdymo specializacija

Saugos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR GAISRINĖS SAUGOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

____
(Parašas)

____
(Vardas, pavardė)

____
(Data)

Dainius Skorka

MATEMATINIO GAISRO PROCESO MODELIO VERTINIMAS TAIKANT OPERACIJŲ TYRIMO METODUS

ASSESSING MATHEMATICAL MODEL OF FIRE PROCESS BY APPLYING METHODS OF OPERATION RESEARCH

Baigiamasis magistro darbas

Saugos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX031

Gaisrinės ir gelbėjimo darbų saugos ir valdymo specializacija

Saugos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	**prof. Egidijus Rytas Vaidogas**__ (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	____________ (Parašas)	________ (Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	**dr. Lina Rutkienė** ____ (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	____________ (Parašas)	________ (Data)

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR GAISRINĖS SAUGOS KATEDRA

Studijų kryptis: Saugos inžinerija	TVIRTINU
Studijų programa: Saugos inžinerija , valstybinis kodas 6211EX031	Katedros vedėjas
Specializacija: Gaisrinė ir gelbėjimo darbų sauga ir valdymas	Ritoldas Šukys
	2024-01-12

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. GGDfm-22–5761

Vilnius

Studentas (-ė): Dainius Skorka

Baigiamojo darbo tema: Matematinio gaisro proceso modelio vertinimas taikant operacijų tyrimo metodus

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Bendroji baigiamojo magistro darbo užduotis: Atlikti matematinio gaisro modeliavimo kokybės tyrimą taikant du operacijų tyrimo metodus: jautrumo analizę ir stochastinį modeliavimą. Išnagrinėti informaciją, naudojamą matematiškai modeliuojant gaisrus, ir išreikši ją tokiu pavidalu, kuris tinka taikyti jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo metodus. Pritaikyti stochastinio modeliavimo ir jautrumo analizės procedūras tiriant gaisro prognozavimui sukurtą skaičiuojamosios skysčių dinamikos (CFD) modelį ir gautus skaičiavimo rezultatus panaudoti vertinant su šiuo modeliu generuojamus rezultatus. Išnagrinėti mokslinę literatūrą, kurioje rašoma apie matematinį gaisro modeliavimą kompiuteriu, stochastinį modeliavimą ir jautrumo analizės metodus. Išnagrinėti literatūrą apie gaisro energijos išskyrimo greičio modelį (HRR modelį). Atlikti gaisro ištikto pastato skaičiavimus su CFD programa, įtraukiant šiuos skaičiavimus į stochastinio modeliavimo ciklą. Apdoroti stochastinio modeliavimo rezultatus koreliacinės analizės priemonėmis.

Vadovas profesorius Egidijus Rytas Vaidogas

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

	Dainius Skorka, 20185483	
	(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)	
	Statybos fakultetas	
	(Fakultetas)	
	Saugos inžinerija, GGDfm-22	
	(Studijų programa, akademinė grupė)	

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2024 m. sausio 12 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Matematinio gaisro proceso modelio vertinimas taikant operacijų tyrimo metodus“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas profesorius daktaras Egidijus Rytas Vaidogas.

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

			Dainius Skorka
	(Parašas)		(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Statybinių medžiagų ir gaisrinės saugos katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Saugos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Matematinio gaisro proceso modelio vertinimas taikant operacijų tyrimo metodus**
Autorius	**Dainius Skorka**
Vadovas	**Egidijus Rytas Vaidogas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Nagrinėjama problema yra matematinio gaisro modeliavimo kokybės vertinimas taikant du operacijų tyrimo metodus. Tie metodai yra jautrumo analizė ir stochastinis modeliavimas. Darbe taikomi stochastiniu modeliavimu pagrįsti jautrumo analizės metodai. Pagrindinis darbo tikslas – ištirti koreliacijas tarp matematinio gaisro modelio įvesties ir išvesties kintamųjų. Gaisrui modeliuoti taikomas skaičiuojamosios skysčių dinamikos metodas. Susisteminama ir supaprastinama informacija, naudojama matematiškai modeliuojant gaisrus. Ši informacija išreiškiama tokiu pavidalu, kuris tinka taikyti jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo metodus. Apdorojami ir nagrinėjami rezultatai, gauti matematiškai modeliuojant gaisrą stochastinio modeliavimo cikle. Darbo rezultatai leidžia giliau pažvelgti į skaičiuojamosios skysčių dinamikos taikymą prognozuojant gaisrus.

Prasminiai žodžiai: gaisras, jautrumo analizė, stochastinis modeliavimas, Monte Karlo metodas, operacijų tyrimas, skaičiuojamoji skysčių dinamika, koreliacinė analizė, energijos išskyrimo greitis.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Building Materials and Fire Safety

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

Master Degree Studies **Safety Engineering** study programme Master Graduation Thesis	
Title	**Assessing Mathematical Model of Fire Process by Applying Methods of Operation Research**
Author	**Dainius Skorka**
Academic supervisor	**Egidijus Rytas Vaidogas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The problem under consideration is the assessment of the quality of mathematical modeling of fire using two methods of operation research. Those methods include sensitivity analysis and stochastic simulation. In the work, methods of sensitivity analysis based on stochastic modeling are applied. The main purpose of the work is to study the correlations between the input and output variables of the mathematical fire model. To model a fire, the method of computational dynamics of liquids is used. Systematizes and simplifies the information used to mathematically model fires. That information shall be expressed in the form appropriate for the use of sensitivity analysis and stochastic modelling techniques. The results obtained by mathematically modeling a fire in the stochastic modeling cycle are processed and studied. The results of the work allow you to take a deeper look at the application of computational fluid dynamics in forecasting fires.

Keywords: fire, sensitivity analysis, stochastic simulation, Monte Carlo method, operations research, computation fluid dynamics, correlation analysis, heat release rate.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

LENTELIŲ SĄRAŠAS

ĮVADAS

Šiuolaikinė visuomenė aukštą gaisrinės saugos lygį laiko beveik savaime suprantamu dalyku. Mažai galvodami apie gaisro pavojų, mes pasikliauname pastatų gaisrinę saugą užtikrinančiais projektiniais sprendiniais bei ugniagesių profesiniu meistriškumu. Vystantis visuomenei ir sudėtingėjant žmonių veiklos aplinkai, turi neišvengiamai tobulėti ir gaisrinės saugos užtikrinimo metodai. Siekiant suprasti, prognozuoti ir stabdyti gaisrus bei mažinti jų poveikį aplinkai, taikomi įvairūs moksliniai metodai, įskaitant praktinius eksperimentus ir matematinį modeliavimą.

Viso mastelio eksperimentai yra brangūs ir reikalauja daug darbo. Tokie eksperimentai nedaromi atliekant kasdienį pastatų projektavimą. Praktiškesni yra mažo mastelio eksperimentai. Jų rezultatai yra naudojami kuriant ir tikrinant matematinius gaisro modelius, inžinerinius gaisro charakteristikų skaičiavimo metodus ir kompiuterio programų pavidalu įgyvendinamus skaitinius šių charakteristikų vertinimo metodus.

Matematiniai modeliai taikomi prognozuoti gaisro charakteristikas, kurios paprastai stipriai keičiasi gaisro metu. Šie modeliai turi analitinių ir skaitinių skaičiavimo algoritmų pavidalą. Sparčiai gausėjant informacijai apie su gaisru susijusius reiškinius, gilėjant tų reiškinių supratimui bei didėjant nebrangių kompiuterių skaičiuojamajai galiai, pasiekta didelė pažanga prognozuojant su gaisru susijusius reiškinius. Tokie reiškiniai yra, pavyzdžiui, dūmų plitimas uždarose patalpose, degių ir nuodingų medžiagų koncentracijos kitimas, temperatūrų, slėgių ir šiluminės spinduliuotės pasiskirstymas patalpų erdvėje. Aptariami matematiniai modeliai gali būti deterministiniai arba stochastiniai. Šiuo metu projektavimo praktikoje visiškai vyrauja deterministiniai modeliai, nors jie iš principo yra netikslūs, nes neatsižvelgia į didelius neapibrėžtumus, susijusius gaisro proceso charakteristikomis. Deterministiniai modeliai sudaryti remiantis analitiškai arba eksperimentiškai nustatytomis fizinėmis ir cheminėmis priklausomybėmis. Jie leidžia prognozuoti tik vieną gaisro scenarijų, nusakoma fiksuotomis modelio įvesties ir išvesties kintamųjų reikšmėmis.

Gaisrai uždarosiose patalpose šiuo metu yra modeliuojami kompiuteriu taikant zonų ir lauko modelius. Pastarieji dar yra vadinami skaičiuojamosios skysčių ir dujų dinamikos modeliais arba CFD modeliais (angl. *computational fluid dynamics*, CFD). Tikslesni ir daug lankstesni yra CFD modeliai, nors jie reikalauja daug skaičiavimo pastangų, negu zonų modeliai. CFD modeliai taikomi daugelyje inžinerinių disciplinų. Gaisro prognozavimui taikomas CFD variantas remiasi gaisro erdvės dalinimu į didelį skaičių poerdvių. Jiems yra formuluojamos diferencialinės lygtys, išreiškiančios lėtą, termiškai sukeliamą dujų tėkmę, pabrėžiant dūmų ir šilumos perdavimą gaisro erdvėje. Šių diferencialinių lygčių sistemos sprendimas yra pagrindinė kiekvienos CFD kompiuterio programos užduotis.

Šiuo metu Lietuvos ir, tikėtina, viso pasaulio rinkoje, susijusioje su projektuojamų pastatų gaisrinės saugos užtikrinimu, vyrauja CFD kompiuterio programa FDS (angl. *fire dynamics* *simulator*). Ji yra kasdienio darbo įrankis įmonėse, kurios ruošia pastatų projektų gaisrinės saugos dalį. Žinant, kad gaisro modeliavimas su tokiomis CFD programomis kaip FDS toli gražu nėra trivialus uždavinys, natūraliai kyla klausimas, kaip užtikrinti kiek galima aukštesnę tokio modeliavimo kokybę. Aišku, išsamiausias kokybės įvertinimas galėtų būti modeliavimo rezultatų tikrinimas atliekant pilno mastelio eksperimentą ir lyginant jo rezultatus su modeliavimo rezultatais. Tačiau šis kelias yra veikiau idealistinis siekis, nei praktiškai apsimokanti procedūra.

Gaisro modeliavimo su CFD programa kokybę galima pagerinti matematinėmis priemonėmis tiriant patį skaičiuojamosios skysčių dinamikos algoritmą. Kadangi jis yra sudėtingas ir reikalauja didelės apimties įvesties informacijos, natūraliai kyla klausimas, kaip tiksliausiai ir tikroviškiausiai tą informaciją apibrėžti. Jos prireiks, tarkime, formuojant FDS programos įvesties failą. CFD modelio įvesties ir išvesties ryšių (koreliacijų) tyrimui gerai tinka matematinių operacijų tyrimo metodų šeimos priemonės, vadinamos jautrumo analize ir stochastiniu (Monte Karlo) modeliavimu. Aišku, didžiulė operacijų tyrimo sritis suteikia ir kitų priemonių gerinti gaisro modeliavimą CFD priemonėmis. Tarkime, tam galima taikyti matematinio programavimo metodus. Tačiau šiame darbe buvo apsiribota jautrumo analize ir stochastiniu modeliavimu.

Jautrumo analizė leidžia vertinti, kokie CFD modelio įvesties kintamieji turi didžiausios įtakos išvesties kintamiesiems. Stochastinis modeliavimas sudaro galimybę kiekybiškai nustatyti, koks yra išvesties kintamųjų neapibrėžtumas (kintamumas), kai žinomas įvesties kintamųjų neapibrėžtumas. Svarbus šių dviejų operacijų tyrimo metodų taikymo aspektas yra tas, kad geriausiais jautrumo analizės metodais yra laikomi tie metodai, kurie remiasi stochastiniu modeliavimu. Vienas iš labiausiai vertinamų šios rūšies metodų yra laikomas dispersijų įnašo metodas, priklausantis globaliosios jautrumo analizės metodų šeimai. Taigi, geriausia yra taikyti jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo derinį ir, jei reikia, atskirai pasinaudoti kiekvieno metodo rezultatais.

Pagrindinis šio darbo tikslas buvo ištirti deterministinį gaisro proceso modeliavimą CFD priemonėmis, taikant jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo metodus. Siekiant šio tikslo, buvo spręsti du pagrindiniai uždaviniai:

1. Susisteminti ir supaprastinti gausią ir įvairią informaciją, naudojamą matematiškai modeliuojant gaisrus, ir išreikšti ją tokiu pavidalu, kuris tinka taikyti jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo metodus. Šį uždavinį galima pavadinti matematinio problemos formulavimo uždaviniu.
2. Pritaikyti stochastinio modeliavimo ir jautrumo analizės procedūras tiriant CFD modelį ir gautus skaičiavimo rezultatus panaudoti vertinant su šiuo modeliu generuojamus rezultatus. Šis uždavinys gali būti laikomas rezultatų, gautų sprendžiant pirmą uždavinį, tyrimu.

Šių dviejų uždavinių formulavimas ir sprendimas lėmė tai, kad ir šio darbo išvados buvo padalintos į dvi tuos uždavinius atitinkančias dalis. Sprendžiant išvardintus uždavinius buvo išnagrinėta mokslinė literatūra, kurioje rašoma apie matematinį gaisro modeliavimą kompiuteriu, stochastinį modeliavimą ir jautrumo analizės metodus. Detaliai išnagrinėta literatūra apie gaisro energijos išskyrimo greičio modelį, dar vadinamą HRR modeliu (angl. *heat release rate*). Atlikti gaisro ištikto pastato skaičiavimai su FDS programa, įtraukiant šiuos skaičiavimus į stochastinio modeliavimo ciklą. Gauti stochastinio modeliavimo rezultatai apdoroti koreliacinės analizės priemonėmis, taikant nekomercinę statistinių duomenų analizės programą IBM SPSS. Šis darbas pratęsia ir pagilina autoriaus parengtą ir 2022 metais apgintą baigiamąjį bakalauro darbą (Skorka, 2022).

1. MATEMATINIAI GAISRO PROCESO MODELIAI IR JŲ TYRIMO BEI TAIKYMO PROBLEMOS

1.1. Su pastatų gaisrais susiję matematiniai modeliai

1.1.1. Trys problemos, iškylančios modeliuojant gaisrą

Pastatų gaisrai yra sudėtingi, neretai skaudžius padarinius sukeliantys įvykiai. Inžineriniu požiūriu, gaisrų prognozavimas, būtinas jų prevencijai ir pasekmių mažinimui, gali būti išskaidytas į trijų procesų modeliavimą. Tai pačio gaisro termofizinio vystymosi modeliavimas, paprastai gaisrui lygiagretaus evakuacijos proceso modeliavimas ir statybinių konstrukcijų laikysenos veikiant gaisrui modeliavimas. Šie procesai yra glaudžiai susiję. Gaisro metu kylanti temperatūra, didėjantis uždūminimas ir mažėjantis matomumas turi neigiamos įtakos evakuacijai. Gaisro paveiktų konstrukcijų griūtys ar užsidegimas taip pat gali sustabdyti arba sulėtinti evakuaciją. Kai kurių konstrukcijų suirimas veikiant aukštai temperatūrai ir spinduliuotei gali atverti naujus kelius plisti gaisrui. Tačiau gaisro ir statybinių konstrukcijų tarpusavio sąveika nėra labai glaudi. Konstrukcijų griūties pavojus susiformuoja santykinai vėlyvoje gaisro stadijoje, kai žmonės iš degančio pastato paprastai jau būna evakuoti. Ta stadija yra vadinama gaisro trukme iki apėmimo (angl. *flashover*). Šiame darbe gaisrų modeliavimas apimantis statybinių konstrukcijų reakcijų poveikius nebus nagrinėjama.

Aprašytų procesų įvairovė, išplaukianti iš to, kad juose dalyvauja tiek žmonės, tiek statybinės konstrukcijos, tiek degimo metu susiformuojančios sąlygos, apsunkina išsamų ir detalų gaisrų pastatuose prognozavimą. Intuityviai galima spėti, kad ypač sudėtingas yra tų procesų tarpusavio priklausomybės prognozavimas. Dėl šios priežasties šiame darbe buvo nagrinėtas tik gaisro procesas, o jo ryšiai su evakuacijos ir konstrukcijų reakcijos į gaisrą procesais tirti nebuvo. Darbe aprašyti rezultatai gauti taikant vieną iš matematinio proceso modelių, kuris yra vadinamas lauko modeliu. Tai yra vienas iš dviejų plačiausiai taikomų darbe nagrinėtų modelių. Antrasis yra vadinamas zonų modeliu.

1.1.2. Zonų modelis

Terminas „zonų modelis“ naudojamas priešgaisrinės saugos inžinerijoje kompiuterio modelio tipui nustatyti gaisro modeliavimui uždarame gaisre. Kai kurie tokio modelio gaisrais laiko, kai jis vyksta tik vienoje uždaroje patalpoje, kiti gali pritaikyti zonos modelio techniką keliose patalpose ir taip apskaičiuoti dūmų ir šilumos judėjimą per pastatą.

Taikant šiuos modelius gaisro patalpos yra dalinamos į nedidelį skaičių zonų. Dažniausiai naudojamas dviejų zonų modelis, patalpa yra dalinama į viršutinę karštąją zoną ir apatinę šaltąją zoną, modeliuojant gaisrą sprendžiamos masės ir energijos tvermės lygtys kiekvienai zonai ir kiekviename modeliavimo žingsnyje. Yra naudojamos analitiškai išvestos matematinės išraiškos, leidžiančios apskaičiuoti dujų judėjimo greičius ir slėgius patalpos angose.

Šiuo metu egzistuoja daugybė kompiuterių kodų ir programinės įrangos paketų, pagrįstų zonos modelio metodu.

Uždaras gaisras gali vystytis įvairiais būdais. Vystymasis priklauso nuo (Karlsson & Quintiere, 2000):

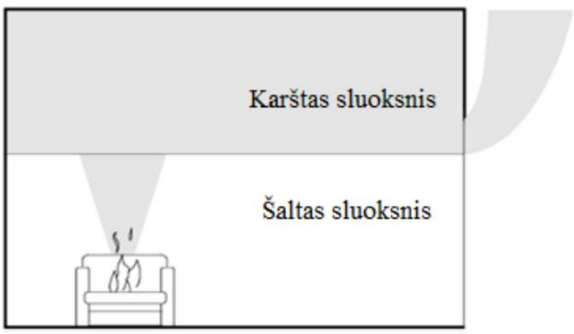
1. Uždarosios erdvės geometrijos.
2. Ventiliavimo angų.
3. Kuro rūšies, kiekio ir paviršiaus.

Užsidegus pirmajam objektui gaisras vystosi ir išskiria vis daugiau energijos. Daugiausiai energijos išskiria liepsnos. Ankstyvojoje gaisro vystymosi fazėje patalpos dydis neturi įtakos gaisrui. Jis priklauso nuo degančios kuro kiekio ir pobūdžio. Toks gaisras vadinamas kuro lemiančiu gaisru. Jam vykti užtenka deguonies. Gaisro metu išsiskiria ne tik energija, bet ir dujos bei kietosios dalelės. Jos dar vadinamas degimo produktais. Virš liepsnos susidaro kylantis nesudegusių dalelių sluoksnis, kuris yra vadinamas pliumas. Šis srautas suformuoja palubio srautą.

Patalpoje vykstant gaisrui susidaro dvi pagrindinės zonos:

1. Karštasis viršutinis sluoksnis;
2. Vėsesnis apatinis sluoksnis.

Karštasis sluoksnis būna sudarytas iš degimo produkto ir pliumo įtraukto oro. Apatinis (vėsesnis) sluoksnis sudaro pagrinde oras ir nedidelis kiekis degimo produktų.



1.1 pav. Zonų modelis (Karlsson & Quintiere, 2000)

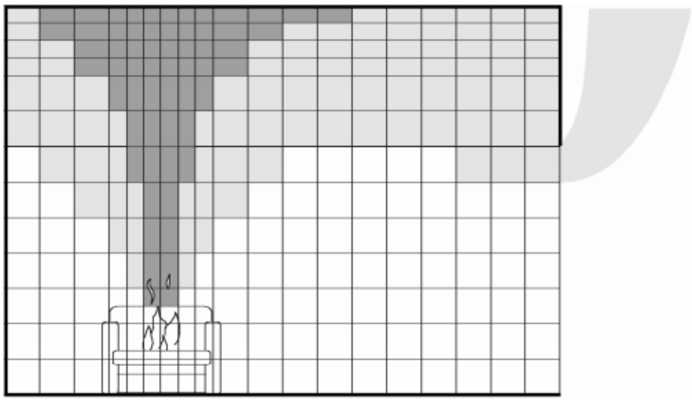
Įvykus už(si)degimui, gaisras gali vystytis pagal įvairius scenarijus. Jie priklausys nuo ventiliavimo sąlygų ir kuro. Gaisro pradžioje užsidega vienas po to keli objektai. Formuojasi karštais sluoksnis ir auga jo temperatūra.

Viena populiariausių dviejų zonų modelį įgyvendinančių kompiuterio programų yra CFAST. Ji leidžia matematinėmis priemonėmis imituoti langų išdužimo procesą, parenkant išdužusio stiklo ploto dalį ir išdužimo momentą gaisro metu.

1.1.3. Lauko modelis

Vienas geriausiai žinomų gaisro prognozavimo ir modeliavimo modelių yra lauko (CFD) modelis. Jis suteikia galimybę modeliuoti įvairių formų ir matmenų patalpas ir/ar pastatus, kadangi modelis padalina pastatą ar patalpą į daugybę tūkstančių ar šimtų tūkstančių „skaičiuojamųjų kubelių. CFD gana realistiškai ir detaliai atkuria degimo produktų (dujų) judėjimą ir sudėtį, dujų temperatūra nustatoma kiekvienam „skaičiuojamam kubeliui" labai mažais laiko intervalais. Dėl šios priežasties CFD modelis turi didesnį pranašumą, nei zonų modelis.

Skaičiavimai atliekami su CFD modeliu plačiai taikomi projektuojant ar vertinant gaisrą. Naudojant kompiuterines programas parenkami norimi gaisro parametrai nuo aplinką supančių daiktų iki gaisro reakcijos. Gaisrų modeliavimas naudojant lauko modelį užtrunka daug laiko, kad būtų galima parengti uždavinį, nustatyti vertinamus kriterijus ir atlikti rezultatų analizę.



1.2 pav. Modeliuoto gaisro patalpoje modelio suskaidymas į daugybę „skaičiuojamųjų kubelių" (Karlsson & Quintiere, 2000)

Viena populiariausių lauko modelį įgyvendinančių kompiuterinių programų yra FDS)\. Naudojant šią programą parenkant gaisro įvesties dydžius (pastato ar patalpos dydį, architektūrinį patalpų išdėstymą, šilumos išsiskyrimo greičio HRR dydį ir kt.) galima modeliuoti gaisrą kilusį pastate ar patalpoje. Baigus modeliavimo procesą gaunami išvesties dydžiai (temperatūrą, spinduliuotę į grindis, optinį gylį, efektyviąją dozę FED ir kt.) tose vietose, kur yra pastatyti virtualūs gaisro charakteristikų matavimo prietaisai. Atliekant gaisro modeliavimą šia programa reikalingi galingi kompiuterių procesoriai ir ilgas laikotarpis gaisro modeliavimo rezultatams gauti.

1.1.4. Zonų ir lauko modelių taikymo uždaviniai

Du pagrindiniai matematinių modelių taikymai yra gaisro poveikio statybinėms konstrukcijoms modeliavimas ir gaisro poveikio žmonėms, galintiems būti gaisro apimtame pastate modeliavimas (1.3 pav.). Gaisro modeliavimas skaičiuojant statybines konstrukcijas leidžia gauti temperatūros pasiskirstymą konstrukcijoje ir vertinti jos atsparumą gaisrui. Tokio modeliavimo rezultatai, gauti su lauko modelį realizuojančia FDS programa, yra parodyti 1.4 pav. FDS programos taikymų gaisro poveikiams konstrukcijoms vertinti galima rasti nemažai (pvz., Hietaniemi, 2007; Alos-Moya et al., 2014). Tačiau FDS programa ir kitos CFD metodą realizuojančios programos reikalauja ilgo skaičiavimo laiko ir galingų procesorių. Todėl konstrukcijų skaičiavimo praktikoje projektuotojai linkę naudoti anksčiau jau minėtus paprastesnius inžinerinius lokalaus gaisro ir parametrinių kreivių modelius. Tai skatina ir ta aplinkybė, kad šie inžineriniai modeliai yra įteisinti projektavimo normoje EN 1991-1-2.

<table>
<tr><th>Modeliavimo tikslas
Taikymo sritis</th><th>Statybinių konstrukcijų atsparumas ugniai</th><th>Pastato evakuacija</th><th>Gaisro plitimas</th></tr>
<tr><td>Pastatų gaisrinės saugos vertinimas</td><td rowspan="2">- Lokalieji gaisrai
- Parametriniai gaisrai
- Zonų modeliai
- Lauko modeliai</td><td rowspan="2">- Zonų modeliai
- Lauko modeliai</td><td>Paprastai neatliekama</td></tr>
<tr><td>Gaisrų tyrimas</td><td>Specifinis modeliavimas (galimas taikant skirtingus modelius)</td></tr>
<tr><td>Gaisrų tyrinėjimas (degimo procesų, plitimo ir t.t.)</td><td colspan="3">Paprastai taikomi lauko modeliai</td></tr>
</table>

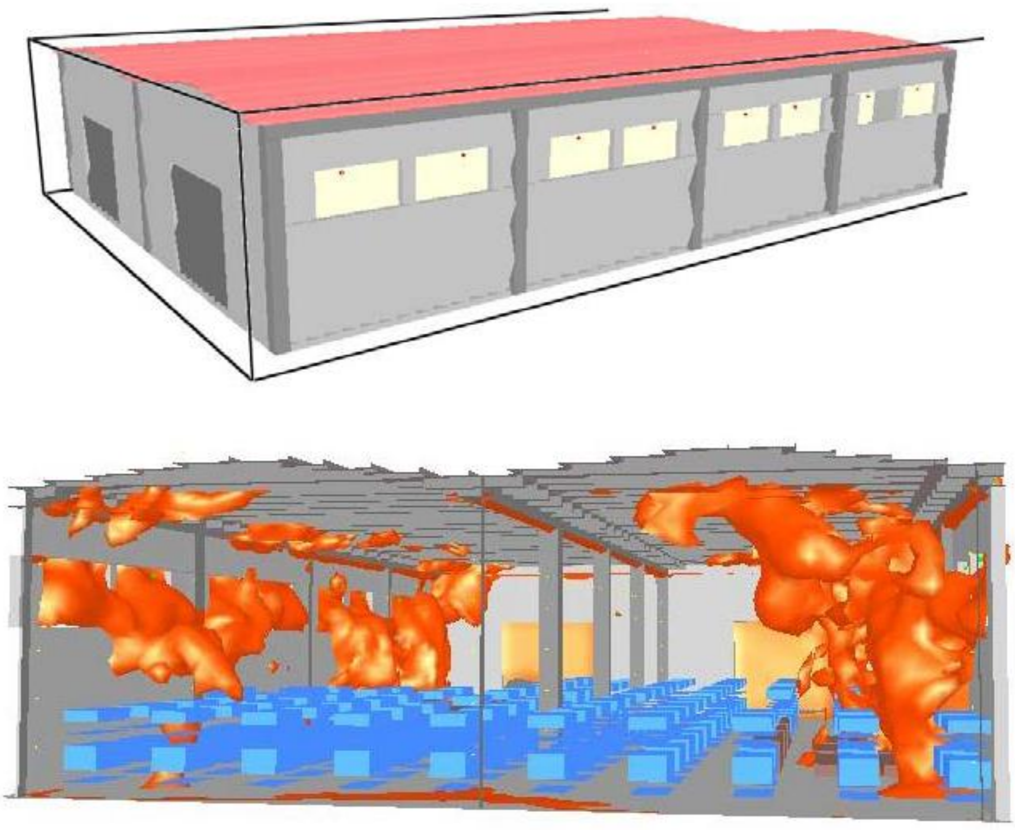
1.3 pav. Schema, vaizduojanti gaisro modelių taikymo uždavinius

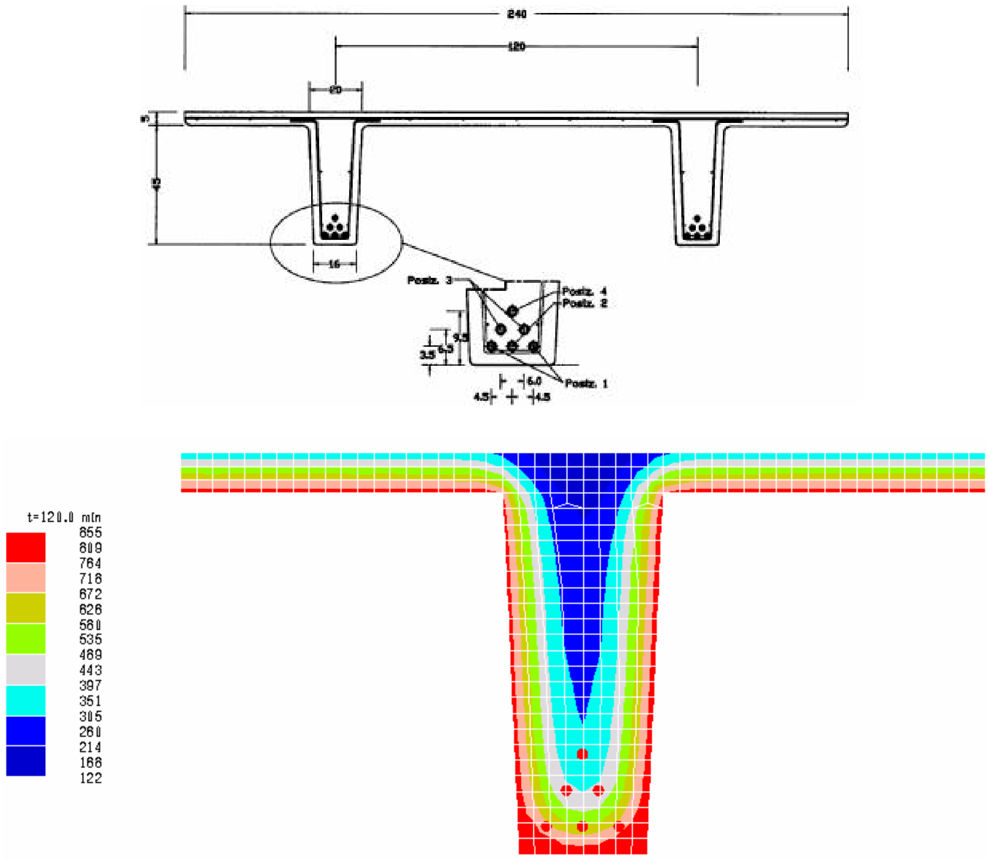
Kita vertus, CFD modeliavimas yra labai lankstus ir jį realizuojančios programos leidžia vertinti galimą poveikį ne tik statybinėms konstrukcijoms, bet ir gaisro apimtame pastate esantiems žmonėms. Kai kurie CFD rezultatai, pirmiausiai temperatūrų ir spinduliuočių reikšmių laiko sekos, tinka abiem atvejams. Kiti rezultatai – toksiškų medžiagų dozės ir matomumo (optinio gylio) reikšmės – būtinos skaičiuojant poveikį žmonėms.

Statybinių konstrukcijų projektavimas atsižvelgiant į galimus gaisro poveikius yra, galima sakyti, milžiniška ir daug dešimtmečių plėtojama sritis. Su tradicine gaisrine sauga ji yra tik tiek susijusi, kad leidžia apytikriai nustatyti laiką iki gaisro veikiamų konstrukcijų laikomosios galios netekimo. Jis yra labai svarbus ugniagesiams gelbėtojams. Tačiau civilių, sudarančių pastato populiaciją, atžvilgiu svarbesni yra CFD modeliavimo rezultatai leidžiantys įvertinti gaisro žalą žmonėms. Tai reikalauja modeliuoti gaisro vystymąsi iki apėmimo momento. Matematiškai žala žmonėms yra išreiškiama per gaisro pakeliamumo arba, atvirkščiai, nepakeliamumo sąlygas (Purser, 2009). Tikrinti šias sąlygas prireiks CFD modeliavimo rezultatų, kurie šio darbo kontekste yra žymimi modelio išvesties dydžiais y.

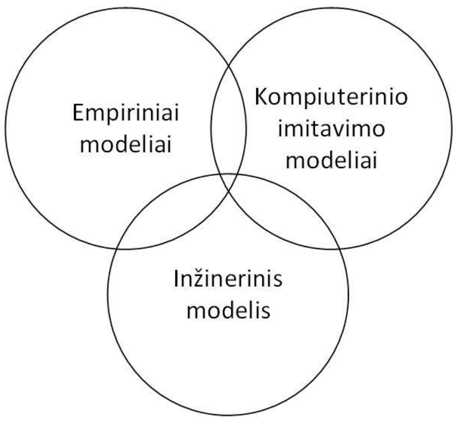
1.1.5. Žmonių evakuacijos iš gaisro apimto pastato modeliavimo priemonės

Priklausomai nuo pastato rūšies ir laiko, kurį projektuotojas turi evakuacijai įvertinti, tą vertinimą galima atlikti taikant trijų rūšių matematinius modelius: empirinius modelius, inžinerinio („rankinio“) skaičiavimo modelius ir modelius, kurie evakuacijos procesą matematiškai imituoja skaičiuojant kompiuteriu (1.5 pav.). Empiriniai modeliai yra paprasti. Jie taikomi lyginant projektuojamą konstrukciją su panašiomis konstrukcijomis, kuriose buvo imituojama evakuacija ir renkami duomenys apie šį procesą. Šiuos duomenis galima ekstrapoliuoti ir pritaikyti projektuojamam pastatui (Gwynne & Boyce, 2016).





1.4 pav. Temperatūros pasiskirstymo dvigubos T plokštės skerspjūvyje vertinimas, gautas su lauko modelio programa FDS (La Mendola, 2019)



1.5 pav. Empirinių, inžinerinių ir skaitmeninių evakuacijos modelių sankirta (Kuligowski, 2015)

Priklausomai nuo pastato rūšies ir laiko, kurį projektuotojas turi evakuacijai įvertinti, tą vertinimą galima atlikti taikant empirinius modelius, inžinerinio („rankinio“) skaičiavimo modelius ir modelius, kurie evakuacijos procesą matematiškai imituoja skaičiuojant kompiuteriu. Empiriniai modeliai yra paprasti. Jie taikomi lyginant projektuojamą konstrukciją su panašiomis konstrukcijomis, kuriose buvo imituojama evakuacija ir renkami duomenys apie šį procesą. Šiuos duomenis galima ekstrapoliuoti ir pritaikyti projektuojamam pastatui (Gwynne & Boyce, 2016).

Inžinerinis metodas evakuacijai prognozuoti naudoja empirinius duomenis, susijusius su evakuacijos kelio komponentais (durimis, laiptais ir t. t.). Jis leidžia įvertinti žmonių judėjimą evakuacijos keliuose. Tai yra daroma nagrinėjant žmonių judėjimą pro pavienius evakuacijos kelio elementus (Gwynne & Rosenbaum, 2015).

Kompiuterinio modeliavimo priemonės įgyvendina labai įvairius evakuacijos metodus. Tie metodai yra nevienodo detalumo, pradedant santykinai netiksliais homogeniško asmenų judėjimo metodais ir baigiant autonominio žmonių judėjimo trimatėje erdvėje imitavimo metodais (Kuligowski, 2015; Kuligowski & Peacock, 2005).

Inžinerinis žmonių judėjimo evakuacijos metu modelis dar vadinamas hidrauliniu modeliu (Gwynne & Rosenbaum, 2015). Esminė jo savybė yra ta, kad jis susieja žmonių judėjimo greitį su besigelbėjančių asmenų srautų tankiu. Hidraulinis modelis grindžiamas trimis pagrindinėmis prielaidomis:

1. Visi asmenys pradeda evakuotis tuo pačiu momentu.
2. Žmonių srautas nebus veikiamas trikdžių, kuriuos gali sukelti pavienių sraute esančių žmonių sprendimai.
3. Visi arba beveik visi evakuacijoje dalyvaujantys žmonės nėra neįgalūs ir gali judėti kartu su žmonių srautu.

Evakuacijos proceso modeliai, įgyvendinti kompiuterio programose, skirstomi į tris plačias klases (Kuligowski, 2015; Kuligowski & Peacock, 2005):

1. Judėjimo modelius (angl. *movement models*).
2. Dalinius elgsenos modelius (angl. *partial behavior models*).
3. Elgsenos modelius (angl. *behavioral models*).

Judėjimo modeliai telkia dėmesį į pastate esančių žmonių judėjimą ir neturi tų žmonių elgesį atspindinčių elementų. Šie modeliai leidžia nustatyti spūsčių vietas, eilių susidarymo vietas ir siaurąsias vietas („butelių kaklelius“) modeliuojamo pastato vietose. Kai kurie iš judėjimo modelių turi optimizavimo funkcijas, kurios leidžia optimizuoti evakuaciją atmetant neoptimalų asmenų elgesį.

Daliniai elgsenos modeliai pirmiausiai tinka skaičiuoti žmonių judėjimą, tačiau iki tam tikro laipsnio leidžia modeliuoti besievakuojančių žmonių elgseną. Ta elgsena yra išreiškiama iki evakuacinio laiko tikimybių skirstiniais, žmonių elgesio charakteristikomis ir dūmų poveikiu žmonių judėjimui.

Elgsenos modeliai skirti prognozuoti žmonių judėjimui, bet kartu leidžia numatyti tų žmonių elgsenos įtaką gelbėjimosi procesui. Šie modeliai imituoja sprendimų priėmimą evakavimosi metu ir (arba) tų žmonių veiksmus, susijusius su pastate susidarančiomis sąlygomis. Modeliuojama žmonių elgsena gali atspindėti pavienių žmonių arba visos populiacijos dėmesio atitraukimą nuo evakuacijos veiksmų. Kai kurie iš elgsenos modelių leidžia atlikti evakuacijos proceso rizikos vertinimą.

Evakavimosi modeliavimo kompiuteriniu metodų apibendrinimas yra pateiktas 1.6 lentelėje. Keliais aspektais aprašytos 25 kompiuterio programos, kuriomis įgyvendinti minėtų klasių modeliai. Pateikta ir papildoma informacija apie programas, kuri galėtų būti naudinga jų vartotojui.

Evakuacijos proceso modeliai, įgyvendinami kompiuterio programomis, gali būti skirstomi ir pagal matematinę modelių prigimtį bei sudėtingo žmonių judėjimo proceso idealizavimą. Šiuo požiūriu skiriami socialinės jėgos modeliai (angl. *social force models*), tinklinių automatų modeliai (angl. *cellular automata models*), skysčių dinamikos modeliai (angl. *fluid dynamic models*), agentiniai modeliai (angl. *agent-based models*) (pvz., Liu *et al.*, 2018). Trijų minėtų klasių modeliai vienaip arba kitaip įgyvendina ką tik išvardytus matematinius modelius.

Architektūriniu ir statybiniu požiūriu, evakuacijos modelius galima skirstyti į diskrečiuosius ir tolygiuosius (pvz., Han & Liu, 2017). Šis skirstymas atspindi tai, kaip yra dalinami arba nedalinami pastato aukštų plotai arba visa erdvė. 1.6 lentelėje šis skirstymas atspindėtas grafoje „Modelio detalumas žiūrint“ – „Pastato“. Skiriami sustambintojo (supaprastintojo) tinklo modeliai (angl. *coarse network models*), smulkiojo tinklo modeliai (angl. *fine network models*) ir vientisojo ploto modeliai (angl. *continuos network models*).

Gaisro poveikis evakuacijai yra akivaizdus, savaime suprantamas reiškinys. Tačiau lygiagretus matematinis gaisro ir evakuacijos procesų modeliavimas yra sudėtingas uždavinys. Techniškai gaisro poveikis yra išreiškiamas modeliuojant nepakeliamų sąlygų susidarymą evakuacijos keliuose. Žinomiausios kompiuterio programos, kurias rašant bandyta integruoti gaisro modeliavimo rezultatus į evakuacijos modeliavimą, yra „FDS+Evac“ ir „building-EXODUS“ (Korhonen, 2018; FDS+Evac, 2019; Owen *et al.*, 1997). Tačiau toks dviejų procesų – gaisro ir evakuacijos – derinimas yra speciali tyrimų tema ir šiame darbe ji aptariama nebus.

1.2. Operacijų tyrimo metodų taikymo vertinant gaisro proceso modelius galimybės

1.2.1. Operacijų tyrimo disciplinos tikslai ir pagrindiniai metodai

Operacijų tyrinėjimas (OT) (angl. *operations research*) yra mokslo disciplina, skirta kurti ir taikyti analitinius matematinius metodus, leidžiančius pagerinti sprendimo priėmimą (Operations research, 2023). OT laikomas vienu iš matematikos poskyrių, nors nesprendžia specifinių matematikos problemų, o veikiau yra matematinių metodų rinkinys. Vadybos srityje OT tiesiog laikomas vadybos mokslu. Pasitelkdamas įvairių matematikos sričių metodus, tokius kaip modeliavimą, statistiką ir optimizavimą, OT siekia surasti optimalius arba beveik optimalius sprendimų priėmimo uždavinių sprendinius. Kadangi naudojant OT metodus akcentuojamas praktinis taikymas, OT „persidengia“ su daug kitų disciplinų, ypač su pramonine inžinerija. Viena iš šios inžinerijos sričių yra saugos inžinerija ir jai priklausanti gaisrinė sauga. OT dažnai yra susijęs su praktinio pasaulio ekstremalių reikšmių nustatymu: pelno, laikysenos ar produktyvumo maksimumo ir nuostolių, rizikos ir kainos minimumo. OT atsirado prieš Antrąjį pasaulinį karą gynybos srityje ir išplito visose pramonės šakose.

OT siekė kurti ir naudoti plataus spektro problemų sprendimo metodus bei metodus taikomus pagerinti sprendimų priėmimą ir efektyvumą. Tie metodai yra minėtasis modeliavimas, dar vadinamas simuliacija, matematinis optimizavimas, masinio aptarnavimo teorija ir kiti metodai. OT srityje yra kuriami ir taikomi tikimybiniai modeliai: stochastiniai procesai, Markovo sprendimų priėmimo procesai, ekonometriniai modeliai, neuroniniai tinklai, ekspertų sistemos, daugiakriteriai metodai, tokie kaip AHP ir kiti modeliai. Beveik visos šios matematinės priemonės reikalauja formuoti matematinius modelius, kuriais yra aprašoma sistema. Gaisrinės saugos atveju sistema gali būti gaisro ištiktas pastatas ir jame esanti žmonių populiacija, o sistemą aprašantys modeliai – gaisro modelis ir evakuacijos modelis. OT specialistai, susidūrę su nauja problema, privalo nustatyti, kuris metodas geriausiai aprašo tiriamą sistemą, leidžia ją pagerinti ir neuždeda neįveikiamų apribojimų skaičiavimo laiko ir kompiuterio galios požiūriu. Šio darbo kontekste geriausio metodo paieška buvo atliekama analizuojant, kuris iš turimų jautrumo analizės metodų yra praktiškiausias tiriant gaisro procesą lemiančių veiksnių įtaką. Su skaičiavimo laiko ir kompiuterio galios apribojimų problema susidurta, kai prireikė integruoti matematinį gaisro proceso modelį į stochastinio modeliavimo ciklą.

Pagrindinės OT disciplinos, taikomos šiuolaikiniuose tyrimuose, yra tokios:

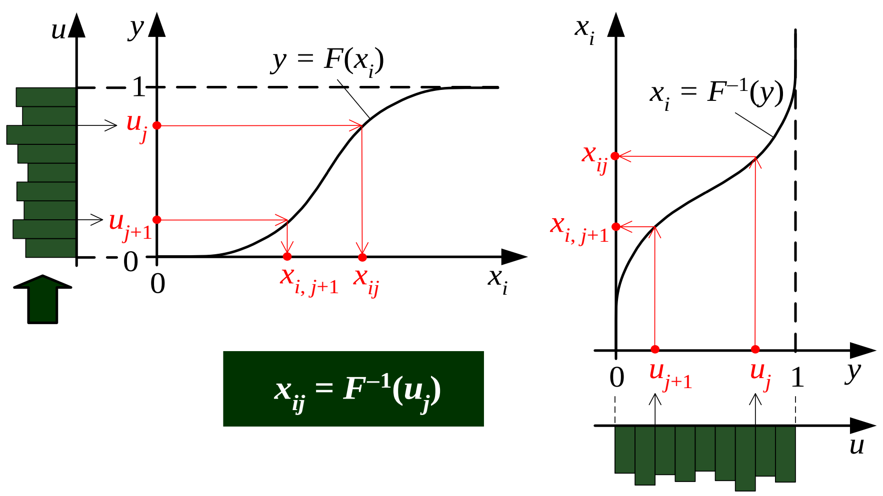
- Skaičiavimo ir informacijos technologijos.
- Gamybos, aptarnavimo ir tiekimo grandinių vadyba.
- Politinis ir viešojo sektoriaus veiklos modeliavimas.
- Įmonės kainų ir gamybinių pajėgumų valdymas.
- Imitavimas (simuliavimas).
- Stochastiniai modeliai.
- Matematinė transporto teorija.
- Lošimų teorija, tirianti pavienių žmonių ir kolektyvų tarpusavio sąveikos strategijas.
- Tiesinis ir netiesinis programavimas bei kiti matematinio optimizavimo metodai.
- Informacijos teorija, naudojama kriptografijoje (iššifravime).

Galima padaryti išvadą, kad šių disciplinų yra daug ir jos yra labai įvairios. Šiame darbe buvo tirtas matematinis gaisro proceso modeliavimas, kuris leidžia sutaupant labai daug resursų prognozuoti gaisrus esamuose ir būsimuose pastatuose. Modeliavimas buvo atliekamas taikant deterministinį matematinį modelį, išreikštą diferencialinių lygčių sistema ir vadinamą lauko modeliu (1.1.3 skyrelis). Siekiant giliau suprasti gaisro proceso ypatybes, lauko modelis buvo integruotas į stochastinį modeliavimą ir su tuo modeliavimu atliekamą jautrumo analizę. Stochastinis modeliavimas leido atsakyti į klausimą, kaip susijęs gaisrą lemiančių veiksnių atsitiktinumas su gaisro charakteristikų atsitiktinumu. Jautrumo analizė leido nustatyti, kurie iš šių atsitiktinių veiksnių turi didžiausią įtaką gaisro charakteristikoms. Žiūrint į anksčiau pateiktą OT disciplinų sąrašą, galima teigti, kad darbe aprašytiems tyrimams buvo taikyti imitavimo (simuliavimo) ir stochastinių modelių disciplinų metodai. Svarbiausias metodas, naudotas atliekant tyrimus, buvo stochastinio modeliavimo metodas.

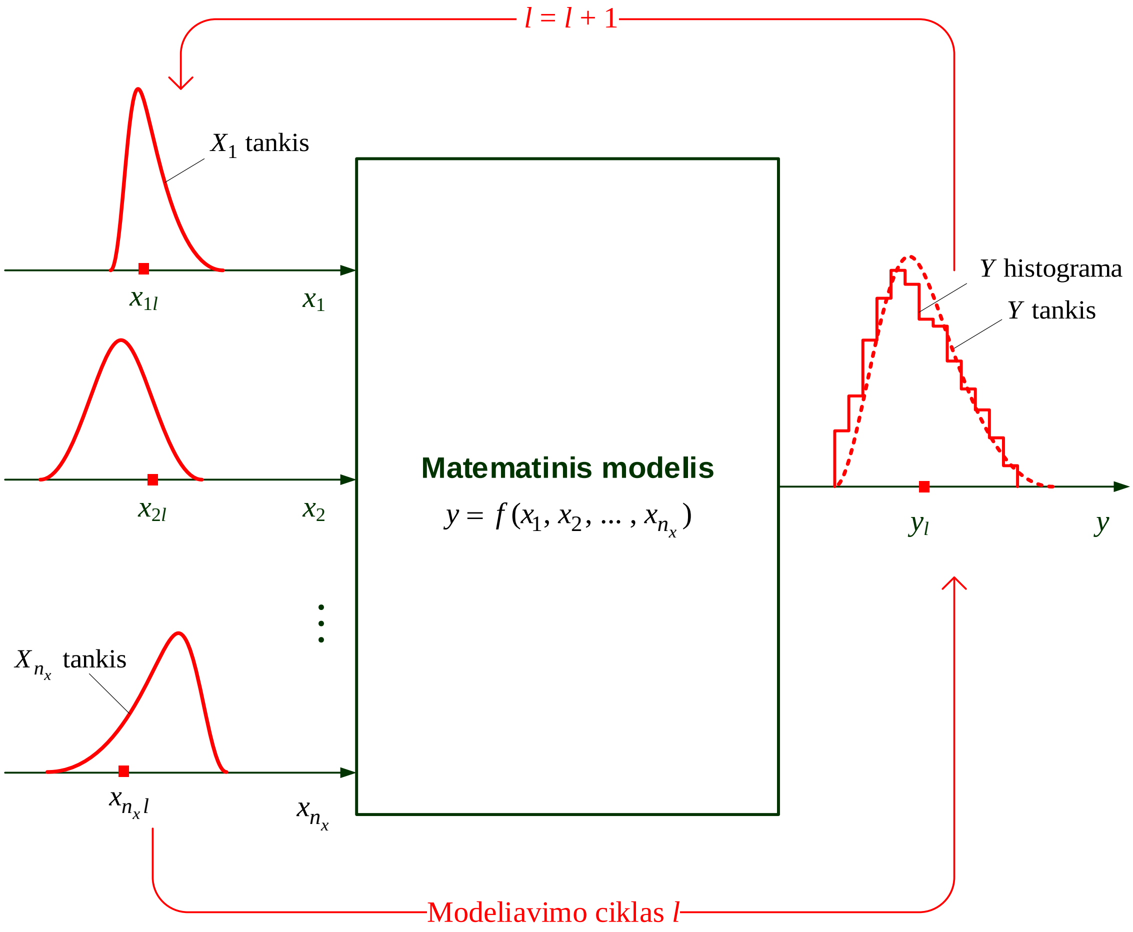
1.2.2. Stochastinio modeliavimo tikslas ir taikymas prognozuojant gaisrus

Stochastinis modeliavimas (angl. *stochastic simulation*) yra matematinės sistemos imitavimas atsitiktiniu būdu (stochastiškai) kaitaliojant sistemą nusakančius kintamuosius, kurie aprašomi tikimybiniais modeliais, dažniausiai tikimybių skirstiniais. Šių kintamųjų reikšmės (realizacijos) yra generuojamos ir įstatomos į sistemos modelį. Skaičiuojant su šiuo modeliu yra gaunami sistemos išvesties dydžiai, kurie paprastai yra įrašomi į kompiuterio atmintį. Šis skaičiavimo procesas yra kartojamas naudojant vis kitą atsitiktinių įvesties dydžių aibę. Šis skaičiavimo ciklas yra kartojamas kol sukaupiamas pakankamai didelis kiekis rezultatų, kurie leidžia įvertinti sistemos išvesties dydžių tikimybių skirstinius ir su jais susijusias charakteristikas (pvz., reikšmių amplitudes).

Šiuolaikinės kompiuterinės technikos galimybės ir išvystyti algebros metodai leidžia atlikti labai didelį skaičių modeliavimo ciklų ir taip sukaupti daug informacijos apie sistemos charakteristikas. Pagrindinis įvesties dydžių generavimo metodas šiandien yra atsitiktinių skaičių generatoriaus (angl. RNG) panaudojimas. RNG remiasi atsitiktinių reikšmių generavimu iš tolygiojo tikimybių skirstinio U(0, 1) ir tų reikšmių transformavimo naudojant sistemos įvesties kintamųjų skirstinius (1.6 pav.). Bendra stochastinio modeliavimo procedūros idėja yra grafiškai paaiškinta 1.7 pav., kuriame pavaizduotas stochastinio modeliavimo ciklas *i*.



1.6 pav. Atsitiktinio didžio su duotąja pasiskirstymo funkcija $F(x)$ reikšmių generavimo schema, grindžiama atsitiktinių reikšmių U(0, 1) generatoriaus panaudojimu



1.7 pav. Matematinis tiriamos sistemos modelis su tankio funkcijomis, nusakančiomis įvesties ir išvesties kintamuosius ir tų kintamųjų reikšmės (realizacijos), apskaičiuotos stochastinio modeliavimo cikle l

Šio darbo kontekste stochastinis modeliavimas buvo taikytas tiriant matematinį gaisro proceso modelį. Įvesties kintamaisiais buvo laikyti tokie dydžiai kaip kuro išskiriama energija, degančio objekto konfigūracija, gaisro židinio vieta. Išvesties dydžiais buvo laikoma šiluminė spinduliuotė į grindis, gaisro patalpos temperatūra, matomumas, pavojingųjų medžiagų koncentracija. Stochastinio modeliavimo būdu gautos susijusios įvesties ir išvesties reikšmių aibių poros buvo pritaikytos ir jautrumo analizei. Informatyviausi ir efektyviausi jautrumo analizės metodai remiasi stochastiniu tiriamos sistemos modeliavimu. Bene pagrindinė tokio modeliavimo problema buvo ta, kad deterministinis lauko modelis, matematiškai imituojantis gaisro procesą, yra labai sudėtingas ir uždavinio sprendimas naudojant šį modelį reikalavo santykinai ilgo skaičiavimo laiko. Pavyzdžiui, gaisro darbe minimoje koncertų salėje modeliavimas su *Intelcore i7* ~5 GHz greičio procesoriumi truko apie 6 valandas.

1.2.3. Gaisro procesų modelių tyrimas taikant koreliacinę analizę ir jautrumo analizę

Platus matematinių gaisro proceso ir evakuacijos modelių taikymas iškelia problemų bei uždavinių. Vienas tokių uždavinių yra modelio rezultatų neapibrėžtumo vertinimas. Šis uždavinys kyla dėl to, kad neįmanoma visiškai tiksliai nustatyti modelio argumentų ir parametrų (įvesties kintamųjų) reikšmių. Realiose situacijose joms yra būdingas statistinis kintamumas. Praktiniuose skaičiavimuose dažniausiai svarbu parodyti, kad tam tikri sistemos ar reiškinio kintamieji (pvz., maksimali gaisro patalpos temperatūra, taikiniams tenkanti spinduliuotė, pavojingų degimo produktų koncentracija, matomumas uždūmintoje patalpoje) neviršys leistinų ribų. Šiai problemai nagrinėti būtina įvertinti modelio rezultatų kintamumą ir iš jo išplaukiantį neapibrėžtumą.

Kitas ne mažesnę praktinę reikšmę turintis uždavinys yra modelio išvesties dydžių jautrumo įvesties parametrų kintamumui įvertinimas. Modelio parametrų jautrumo rodikliai leidžia nustatyti, kiek svarbus yra konkretus įvesties kintamasis modelio rezultatui. Jautrumo rodikliai yra kiekybiniai dydžiai, todėl įvesties kintamųjų svarbą galima ranguoti ir nustatyti labiausiai modelio rezultatus veikiančius kintamuosius. Jautrumo analizės rezultatai yra svarbūs siekiant nustatyti, kokius įvesties kintamuosius verta tikslinti, o kokių tikslumo didinimas turi mažai įtakos rezultato neapibrėžtumui. Kadangi tikslus modelio parametrų vertinimas dažnai susijęs su nemažomis išlaidomis (ypač jei reikia atlikti papildomus eksperimentus), jautrumo analizės rezultatai leidžia efektyviai paskirstyti tyrimų prioritetus.

Matematinio modelio neapibrėžtumo analizė

Matematiniai modeliai paprastai yra išreiškiami kelių argumentų funkcija, kuri turi keletą parametrų:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_{n_x} \mid \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m), \tag{1.9}$$

čia x_1, x_2, ..., x_{n_x} – modelio argumentai, kurių skaičius yra n; $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$ – modelio parametrai, kurių skaičius yra m; y – modelio išvesties dydis, $f(\cdot)$ – funkcija, siejanti modelio argumentus ir išvesties dydį. Matematiniai modeliai, kuriuos taikant yra prognozuojamas gaisro procesas, turi laibai didelį įvesties dydžių skaičių n. Neapibrėžtumo ir jautrumo analizė neretai atliekama nagrinėjant tik modelio argumentų poaibį x_1, x_2, ..., x_j, ..., x_{n_x}, sudarytą n_x iš mus labiausiai dominančių įvesties kintamųjų x_j. Gaisro modeliavimo atveju tie kintamieji gali būti degančio objekto charakteristikos, gaisro ištikto pastato geometrinės charakteristikos, ventiliavimo procesą lemiantys dydžiai. Bendru atveju n_x yra daug mažesnis už n. Simbolis x_j toliau žymės įvesties kintamųjų reikšmes, o jį atitinkantis simbolis X_j pabrėš faktą, kad įvesties dydis gali būti neapibrėžtas (atsitiktinis).

Matematinio modelio apibrėžimas (1.9) yra supaprastintas, nes dažniausiai turime ne vieną, o kelias išvestis, kurios išreiškia nagrinėjamo proceso arba reiškinio charakteristikas. Tai reiškia, kad modelio išvestis yra vektorius $\boldsymbol{y} = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_{n_y})$, o ne skaliarinis dydis y. Vektoriaus $\boldsymbol{y}$ komponentai y_j, nagrinėti šiame darbe, buvo temperatūra gaisro pastate, gaisro sukelta šiluminė spinduliuotė, matomumui matematiškai priešingas optinis gylis ir gaisro poveikį žmogui kiekybiškai išreiškianti efektyvioji dozė.

Modelio rezultato neapibrėžtumo problema kyla dėl to, kad modelio argumentai x_1, x_2,..., x_{n_x} nėra tiksliai žinomi arba gali svyruoti realios aplinkos sąlygomis. Todėl juos galime laikyti atsitiktiniais dydžiais ir aprašyti tikimybinių skirstinių tankio funkcijomis $p(x_1)$, $p(x_2)$, ... , $p(x_{n_x})$. Šių tikimybinių skirstinių parinkimas yra uždavinys, kurį reikia spręsti apdorojant statistinius duomenis apie dydžius x_j ir (arba) išgaunant ekspertų informaciją apie galimas šių dydžių reikšmes.

Modelio funkcija $f(\cdot)$, siejanti argumentus su rezultatu, bendru atveju yra sudėtinga ir dažnai netiesinė funkcija, kuri paprastai neegzistuoja išreikštine forma. Sudėtingų modelių atveju funkcija $f(\cdot)$ yra išreiškiama kompiuterių programų algoritmais. Neapibrėžtumo ir jautrumo analizei atlikti nebūtina žinoti analitinę $f(\cdot)$ išraišką – reikia tik turėti užprogramuotą jos skaičiavimo algoritmą. Gaisro modeliavimo atveju funkcija $f(\cdot)$ yra išreiškiama sudėtinga diferencialinių lygčių sistema, kuriai spręsti naudojamas skaitinis metodas (algoritmas).

Modelio argumentų neapibrėžtumo schematinis ryšys su modelio rezultatų neapibrėžtumu pavaizduotas 1.5 pav. Žinodami modelio argumentų tikimybinius skirstinius galime atsitiktinai parinkti (generuoti) argumentų reikšmes ir sudaryti modelio argumentų reikšmių derinius x_{1i}, x_{2i},..., x_{ni} (Kopustinskas et al., 2007). Atlikus modelio skaičiavimus kiekvienam argumentų deriniui, gaunamos skirtingos modelio rezultato reikšmės y_i ir tai atspindi rezultato neapibrėžtumą. Siekiant įvertinti modelio rezultatų neapibrėžtumą kiekybiškai, modelio rezultatas analizuojamas kaip atsitiktinis dydis ir vertinamos modelio rezultato skirstinio charakteristikos. Modelio rezultato neapibrėžtumo analizė leidžia atsakyti į klausimą, kokia yra tikimybė, kad modelio rezultatas bus didesnis arba mažesnis, nei tam tikra riba, arba kad nepateks į tam tikro dydžio intervalą. Šie klausimai dažnai turi svarbią praktinę reikšmę, ypač jei modelio rezultatų analizė turi užtikrinti technologinio proceso saugą (pvz., avarijos atveju slėgis vamzdynuose neturi viršyti leistinos ribos, arba vandenilio koncentracija neturi sudaryti sprogaus mišinio). Nesant galimybės atlikti neapibrėžtumo analizę, paprastai taikomos konservatyvios prielaidos apie modelio argumentų reikšmes ir priimamos papildomos konservatyvios scenarijaus sąlygos, tačiau toks metodas neleidžia užtikrinti, kad konservatyvumas išlaikomas viso skaičiavimo metu, o gauti konservatyvūs rezultatai dažnai reiškia ir neefektyvius technologinio proceso apribojimus.

Matematinio modelio jautrumo analizė

Matematinio modelio jautrumo analizė skirta ištirti labiausiai modelio išvesties dydžius keičiančius įvesties veiksnius. Jautrumo analizės rezultatas yra modelio įvesties kintamųjų (argumentų ir parametrų) sąrašas, išreikštas jų svarbą vertinančiais dydžiais. Sukurtas ne vienas jautrumo analizės metodas. Todėl dažnai naudinga palyginti skirtingais jautrumo analizės metodais gautus analizės rezultatus.

Jautrumo analizės metodai skirstomi į lokaliuosius ir globaliuosius. Trumpa jų apžvalga yra pateikta 1.1 lentelėje. Turint reikalo su labai sudėtingais gaisro procesą nusakančiais modeliais, racionalu taikyti globaliuosius jautrumo analizės metodus. Jie nusako ne tik pavienių įvesties kintamųjų x_j įtaką gaisro charakteristikoms y_j, bet ir įtaką kurią lemia bendras įvesties dydžių kintamumas. Mažiau informacijos suteikiantys lokalūs jautrumo analizės metodai vertina įvesties dydžių įtaką modelio rezultatui tik vieno taško aplinkoje, o ne visoje šių dydžių kitimo erdvėje.

Globaliosios jautrumo analizės principas yra gana paprastai nusakomas. Atliekant globaliąją jautrumo analizę iškarto kaitaliojami visi įvesties dydžiai X_j ir išvesties dydis Y. Siekiama nustatyti, kiek kiekvieno įvesties dydžio kaitaliojimas turi įtakos išvesties dydžio kintamumui. Bendras įvesties dydžių kaitaliojimas leidžia įvertinti jų visų įtaką išvesties dydžiui Y, o ne tik pavienių X_j įtaką.

1.1 lentelė. Bendroji matematinių jautrumo analizės metodų klasifikacija (Skorka, 2022)

Metodų grupė	Metodo pavadinimas	Metodo principas	Metodo taikymo sąlygos
Lokalieji	Vieno veiksnio kaitaliojimas (*one-at-a-time method*)	Pakeičiama vieno įvesties kintamojo X_j reikšmė, paslenkant ją pradinės nominaliosios reikšmės atžvilgiu. Likusiųjų įvesties kintamųjų reikšmės nekeičiamos. Kintamojo X_j reikšmė gražinama į pradinę padėtį ir tokiu pat būdu kaitaliojamos likusiųjų kintamųjų reikšmės.	Reikalauja skaičiuoti su gaisro modeliu $f(\cdot)$ iš viso n_j+1 kartų, kur n_j yra šio modelio argumentų, naudojamų jautrumo analizei atlikti, skaičius.
	Dalinių išvestinių metodas (*derivative-based method*)	Jautrumo analizė atliekama taške x_0 skaičiuojant dalinių išvestinių reikšmes $\left.\frac{\partial Y}{\partial X_j}\right\|_{x_0}$. Siekiant išvengti matavimo vienetų įtakos apskaičiuotos reikšmės yra dauginamos iš santykio $\frac{X_{0j}}{Y_0}$, kurio skaitiklis ir vardiklis yra susiję su nagrinėjamu tašku x_0.	Reikalauja, kad gaisro modelis $f(\cdot)$ egzistuotų išreikštine forma ir būtų diferencijuojamas pagal argumentus X_j.
	Jautrumo indeksas (*sensitivity index*)	Kiekvieno įvesties kintamojo X_j įtaka įvertinama jo maksimalios ir minimalios reikšmės nuošimčiu $SI_j = \frac{Y_{max,j} - Y_{min,j}}{Y_{max,j}} 100\%$. Šioje formulėje $Y_{max,j}$ ir $Y_{min,j}$ yra išvesties kintamojo reikšmės gautos į matematinį modelį įstačius didžiausią ir mažiausią įvesties kintamojo X_j reikšmę.	Reikalauja skaičiuoti su gaisro modeliu $f(\cdot)$ $2n_j$ kartų. Taip pat reikalauja priskirti didžiausią ir mažiausią kiekvieno įvesties kintamojo X_j reikšmes $X_{max,j}$ ir $X_{min,j}$, net jei tos reikšmės neturi natūraliai esančių apribojimų.

Metodų grupė	Metodo pavadinimas	Metodo principas	Metodo taikymo sąlygos
	Reikšmingumo rodikliai (*importance factors*)	Kiekvienam įvesties kintamajam X_j skaičiuojami trys reikšmingumo rodikliai I_{1j}, I_{2j} ir I_{3j} (Downing et al., 1985). Pirmas rodiklis I_{1j} yra išvesties kintamojo Y neapibrėžtumo ir jautrumo įvesties kintamojo X_j kaitaliojimui sandauga. Jis yra proporcingas skirtumui $\Delta Y_j = f(\dots, \mu_{X_j} + 2\sigma_{X_j}, \dots) - f(\dots, \mu_{X_j}, \dots)$. Antras rodiklis yra $I_{2j} = \max Y - \min Y$, kur minimali ir maksimali reikšmės gaunamos į modelį $f(\cdot)$ įstatant X_j reikšmes $\mu_{X_j} \pm 4\sigma_{X_j}$. Trečias rodiklis yra išvesties kintamojo dispersija σ_Y^2, gaunama į modelį X_j įstatant atsitiktinį argumentą X_j, o likusius įvesties dydžius laikant pastoviais. Aiškios nuorodos, kaip ranguoti kintamuosius X_j, apskaičiavus iš karto tris rodiklius I_{1j}, I_{2j} ir I_{3j}, nėra.	Metodas reikalauja didelio stochastinio gaisro proceso modeliavimo (skaičiavimo su gaisro modeliu $f(\cdot)$) skaičiaus. Nevisai aišku, kaip vienu metu taikyti tris jautrumo rodiklius I_{1j}, I_{2j} ir I_{3j}.
	Atsijojimo metodas (*screening*)	Kiekvienas įvesties kintamasis X_j yra laikomas atsitiktiniu dydžiu. Generuojamos jo reikšmės ir apskaičiuojamas išvesties vidurkis μ_Y. Procedūra kartojama kiekvienam įvesties parametrui. Pagal apskaičiuotus įvesties vidurkius sprendžiama, kurie iš įvesties dydžiai turi didelės įtakos funkcijai Y, o kurių įtaka yra maža. Mažą įtaką turintys dydžiai yra atsijojami ir taip sumažinamas jautrumo analizės uždavinio argumentų skaičius.	Metodas reikalauja didelio stochastinio gaisro proceso modeliavimo (skaičiavimo su gaisro modeliu $f(\cdot)$) skaičiaus.

1.1 lentelės tęsinys

Metodų grupė	Metodo pavadinimas	Metodo principas	Metodo taikymo sąlygos
Globalieji	Faktorialinė analizė (*factorial design*)	Fatorialinė analizė atliekama kiekvienam įvesties kintamajam X_j suformuojant jo reikšmių aibę ir skaičiuojant išvesties kintamąjį Y visiems tų aibių reikšmių deriniams. Pavyzdžiui, jeigu matematinis modelis turi penkis įvesties kintamuosius ir kiekvienas iš jų yra nusakomas 25 %, 50 % ir 75 % procentiliais, jautrumo rodikliams gauti su modelius teks skaičiuoti $5^3 = 125$ kartų.	Metodas daug kartų skaičiuoti su reikalauja gaisro modeliu $f(\cdot)$. Skaičiavimų skaičius smarkiai auga didėjant įvesties kintamųjų n_j skaičiui.
	Pirsono koreliacijos koeficientas r_P (*Pearson's correlation*)	Teigiama koeficiento reikšmė r_{Pj} reiškia tuo stipresnį ryšį tarp įvesties dydžio X_j ir išvesties dydžio Y, tuo šis koeficientas didesnis. Neigiama r_{Pj} reiškia atvirkštinį ryšį („kuo didesnis įvesties dydis, tuo mažesnis išvesties dydis“). Koeficiento r_P trūkumas yra tai, kad jis tinka tik tiesinio stochastinio ryšio tarp įvesties dydžių ir išvesties dydžių atvejui. Bendru atveju Pirsono koeficiento skaičiavimas reikalauja daug kartų perskaičiuoti matematinį gaisro proceso modelį atliekant stochastinį modeliavimą.	
	Spirmeno koreliacijos koeficientas r_S (*Spearman's correlation*)	Techniškai koeficientas r_S tinka monotoninio ryšio tarp X_j ir Y atvejui. Jo reikšmė yra skaičiuojama pagal Pirsono koeficiento formulę, tačiau pradinės X_j ir Y reikšmės yra pakeičiamos stebėjimo rangais. Formaliai Spirmeno koreliacijos koeficientą r_S galima taikyti ir nesant stebėjimo porų monotoniškumui. Jis tiks tuo atveju, kada stochastinis ryšys tarp įvesties ir išvesties yra netiesinis. Kaip ir Pirsono koeficiento atveju Spirmeno koeficiento skaičiavimas reikalauja santykinai didelio stochastinio gaisro proceso modeliavimo skaičiaus.	Koreliacinės analizės metodai gali būti taikomi skaičiuojant su gaisro modeliu $f(\cdot)$ santykinai mažą skaičių kartų. Tas skaičius gali išplaukti iš statistinio koeficientų r_P , r_S , r_K ir $r_{X_1Y\|X_2}$ reikšmingumo pagrindimo (Čekanavičius & Murauskas, 2011). Taip pat šis skaičius gali būti parenkamas sprendžiant minimaliai pakankamo imties dydžio nustatymo problemą (Sachs, 1982).
	Kendelo koreliacijos koeficientas r_K (*Kendall's tau correlation*)	Ranginis Kendelo koreliacijos koeficientas yra artimas Spirmeno koreliacijos koeficientui, todėl pirmojo pranašumai ir trūkumai sutampa su antrojo pranašumais ir trūkumais.	
	Dalinis koreliacijos koeficientas (*regression*)	Metodas tinka tam atvejui, kai stipri koreliacija tart įvesties kintamųjų X_j gali turėti įtakos įvesties ir išvesties dydžių X_j ir Y priklausomumui. Jautrumas vertinamas skaičiuojant dalinius koreliacijos koeficientus, tarkime $r_{X_1Y\|X_2}$.	

1.1 lentelės tęsinys

Metodų grupė	Metodo pavadinimas	Metodo principas	Metodo taikymo sąlygos
	Regresinė analizė (*partial correlation coefficient*)	Esant gana retai sutinkamam tiesiniam ryšiui tarp įvesties ir išvesties dydžių X_j ir Y, tų dydžių reikšmių poras galima apibūdinti regresijos tiese. Jos regresijos koeficientai, išreiškiantys kampo tarp tiesės ir abscisių ašies tangentą, gali būti naudojami ranguojant įvesties dydžius X_j pagal jų įtaką išvesties dydžiui Y. Regresinė analizę racionalu atlikti naudojant standartizuotus įvesties ir išvesties dydžius. Tai leidžia pašalinti šių dydžių dimensijų įtaką regresinės analizės rezultatams.	Tiesinis ryšys tarp įvesties kintamųjų X_j ir išvesties kintamojo Y yra aptinkamas retai. Gaisro proceso modelis $f(\cdot)$ yra sudėtingas ir nereikėtų laukti, kad ryšiai tarp jo įvesties ir išvesties dydžių būtų tiesiniai.
	Taškinių diagramų metodas (*scatter diagrams*)	Gerai tinka greitam pradiniam įvertinimui. Leidžia grafiškai išreikšti koreliacijos ir tiesiškumo laipsnį. Taškines diagramas sunku taikyti tais atvejais, kai jų pobūdis yra labai specifinis ir netiesinis. Taškinės diagramos nesuteikia galimybės kiekybiškai išreikšti ryšio tarp X_j ir Y laipsnį.	Metodas yra labai paprastas, o su gaisro modeliu $f(\cdot)$ užtenka skaičiuoti tiek kartų, kiek reikia vizualiai nustatyti vyraujančių kintamųjų įtaką X_j gaisro charakteristikai Y. Skaičiavimas ir diagramų braižymas gali būti atliekamas iteraciniu principu.
	Dispersijų įnašo (I. Sobolio) metodas (*variance-based method, Sobol sensitivity indices*)	Jautrumas vertinamas dekomponuojant (išskirstant) išvesties dispersiją σ_Y^2 į įvesties kintamųjų X_j dispersijas $V_j = \sigma_{X_j}^2$ ir tų kintamųjų porų, trejetų ir t. t. bendros skaidos dispersijas V_{jk}, V_{jkl}, ... (Saltelli et al., 2008; Sobol, 2001). Pagrindiniai kiekybiniai jautrumo rodikliai yra pirmos eilės jautrumo indeksai $S_j = V_j/\sigma_Y^2$ ir antros eilės indeksai $S_{jk} = V_{jk}/\sigma_Y^2$. Aukštesnių eilių indeksų reikšmės paprastai yra ignoruojamos, nes bendra, daugialypė didelio skaičiaus kintamųjų skaida dažniausiai būna maža arba neegzistuoja.	Metodas laikomas universaliausia ir išsamiausia globaliosios jautrumo analizės priemone. Tačiau jis reikalauja didelio stochastinio gaisro proceso modeliavimo (skaičiavimo su gaisro modeliu $f(\cdot)$) skaičiaus. Aukštesnių eilių dispersijų V_{jk}, V_{jkl}, ... skaičiavimas yra gana sudėtingas.

1.1 lentelės tęsinys

Metodų grupė	Metodo pavadinimas	Metodo principas	Metodo taikymo sąlygos
	Elementarių poveikių metodas (*elementary effects method*)	Elementarus įvesties kintamojo poveikis X_j yra išreiškiamas dydžiu d_j = $(f(x_1, \dots, x_{j-1}, x_j + \Delta, \dots, x_{n_j}) - f(x_1, \dots, x_{j-1}, x_j, \dots, x_{n_j}))/\Delta$, kurio išraiškoje Δ yra iš anksto pasirenkamas įvesčių reikšmių padidėjimas. Generuojamos elementarių poveikių d_j aibės $\boldsymbol{d}_j = (d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jr})$, kurių elementų skaičius yra r. Aibės d_j yra vadinamos imtimis. Šių imčių analizė leidžia įvertinti įvesties kintamųjų X_j poveikį išvesties dydžiui Y (Campolongo & Saltelli, 1997; Campolongo et al., 2007). Didelė imties $\boldsymbol{d}_j$ vidurkio reikšmė rodo, kad X_j turi didelę įtaką išvesčiai Y. Didelis imties $\boldsymbol{d}_j$ standartas arba kitas sklaidos matas rodo, kad X_j yra stipriai susijęs su kitais įvesties dydžiais ir (arba) ryšys tarp X_j ir Y yra ženkliai netiesinis.	Elementariausiu atveju, imčių $\boldsymbol{d}_j$ dydis r yra lygus dviem. Jos sudarytos iš reikšmės, gaunamos pirmą kartą skaičiuojant su X_j reikšme ir antrą kartą skaičiuojant su padidinta reikšme $X_j + \Delta$. Tai reikalauja skaičiuoti su modeliu gaisro modeliu $f(\cdot)$ iš viso $4n_j$ kartų. Jeigu r > 2, skaičiuoti su modeliu $f(\cdot)$ reikia $2rn_j$ kartų. Skaičiavimų skaičių galima šiek tiek sumažinti taikant sudėtingesnę imčių $\boldsymbol{d}_j$ sudarymo procedūrą (Morris, 1991).

1.1 lentelės pabaiga

Globaliosios jautrumo analizės metodų praktiškumui esminės įtakos turi reikalaujamas skaičiavimų su modeliu $f(\cdot)$ skaičius. Galima sakyti, kad šis skaičius yra tų metodų „Achilo kulnas“. Kadangi gaisro proceso modelis yra sudėtingas ir skaičiavimas su juo reikalauja daug laiko net naudojant šiuolaikinius kompiuterius, aptariamas skaičius tampa svarbiu kriterijumi pasirenkant globaliosios jautrumo analizės metodą.

Išnagrinėjus 1.1 lentelėje išvardintus globaliosios jautrumo analizės metodus buvo nustatyta, kad koreliacinės ir regresinės analizės metodai reikalauja santykinai mažo skaičiavimų su modeliu $f(\cdot)$ skaičiaus. Skaičiuoti būtina maždaug tiek kartų, kiek minimaliai prireikia rezultatų gauti koreliacijos koeficientų ir tiesinės regresinės analizės parametrų reikšmes. Tikslaus atsakymo į klausimą, koks turėtų būti šis „minimalus“ skaičius, reikia ieškoti nagrinėjant matematines procedūras, leidžiančias įvertinti minimalų statistinių imčių dydį (Sachs, 1982). Šiame darbe šis skaičius buvo parenkamas intuityviai ir atsižvelgiant į tai, kad nagrinėtuose pavyzdžiuose kiekvienas skaičiavimas atliekamas su modeliu $f(\cdot)$.

1.3. Tyrimams taikyti stochastinio modeliavimo ir jautrumo analizės metodai

1.3.1. Globaliosios jautrumo analizės metodas

Dispersijų įnašo (I. Sobolio) metodas pripažintas geriausiu globaliosios jautrumo analizės metodu (Saltelli et al., 2008). Tiesa, jis reikalauja daug kartų skaičiuoti su modeliu $f(\cdot)$ įgyvendinant stochastinio modeliavimo ciklą, schematiškai pavaizduotą 1.7 pav. Jautrumo rodiklis, naudojamas dispersijų įnašo metodo, yra globalieji jautrumo indeksai (angl. *global sensitivity indices*), šiame darbe žymimi simboliais S_i, S_{ij}, S_{ijk}, ... Kai įvesties kintamųjų X_i skaičius n_x yra lygus trims, globalieji jautrumo indeksai skaičiuojami pagal formules, išreiškiančias dispersijų santykius (pvz., Sobol, 2001):

$$S_i = \frac{V_i}{V}, i = 1, 2, 3, \tag{1.10a}$$

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}, i < j, \tag{1.10b}$$

ir

$$S_{123} = \frac{V_{123}}{V}, \tag{1.10c}$$

čia simboliai V, V_i, V_{ij} ir V_{123} žymi dispersijas ir yra paaiškinti toliau šio skyrelio tekste. Jautrumo indeksų suma turi būti lygi vienetui:

$$\sum_i S_i + \sum_{i<j} S_{ij} + S_{123} = 1. \tag{1.10d}$$

Formulių grupėje, pažymėtoje (1.10) numeriu, dydis V yra atsitiktinio išvesties kintamojo Y dispersija apibrėžta 1.2 lentelėje. Kitos dispersijos V_i, V_{ij} ir V_{123} yra gaunamos taikant funkcijos $f(x)$ ANOVA išskaidymą, paaiškintą 1.2 lentelėje.

Globaliuosius jautrumo indeksus S_i, S_{ij}, S_{123} ir juos lemiančias dispersijas V, V_i, V_{ij} ir V_{123} galima paaiškinti paprasta analogija, o toks aiškinimas yra labai populiarus teorinėje fizikoje. Įsivaizduokime autobusą su trimis ašimis, tarkime tokį, koks parodytas 1.8 pav. Trys ašys reiškia, kad $n_x = 3$. Išvesties dispersiją V galima suprasti, kaip vibraciją, kuri veikia konkrečioje autobuso vietoje sėdintį keleivį ir yra sukeliama visų trijų ašių. Tuomet dispersijos V_i bus vibracijos V dalys, sukeliamos pavienių ašių. Dispersijas V_{ij} galima interpretuoti kaip vibracijos V dalis, kurios sukeliamos bendro ir vienalaikio ašių i ir j poveikio, o V_{123} bus V dalis, kurią nulemia bendras ir vienalaikis visų trijų ašių veikimas. Globalieji jautrumo indeksai S_i, S_{ij} ir S_{123} gali būti interpretuojami analogiškai, nes jie yra tik ką tik išvardintų dispersijų normalizavimo rezultatas.

1.8 pav. Globaliosios jautrumo analizės apibūdinimas pasinaudojant analogija, kaip autobuso rato ašys perduoda vibraciją pasirinktoje vietoje esančiam keleiviui, tą vibraciją interpretuojant kaip išvesties kintamojo dispersiją V (autobuso nuotrauka daryta autoriaus)

Apibendrinant šią autobuso analogiją galima pasakyti, kad dalinių dispersijų supratimas išplaukia iš (1.15) sąlygos (pvz., Borgonovo & Peccati, 2007). Dispersijos V_i išreiškia individualų įvesties kintamųjų x_i įnašą į funkcijos $f(\boldsymbol{x})$ dispersiją V. Dydžiai V_{ij} parodo, koks yra argumentų X_i ir X_j tarpusavio sąveikos (kooperacijos) įnašas į išvesties dydžio dispersiją V. Pagaliau dispersija V_{123} parodo, kokia yra likutinė dispersijos V dalis, kurią galima paaiškinti tik visų trijų argumentų X_1, X_2 ir X_3 tarpusavio sąveikos įtaka.

Analitiškai skaičiuoti (1.11), (1.12) ir (1.14) išraiškų logaritmus paprastai yra neįmanoma. Todėl dispersijas V, V_i, V_{ij} ir V_{123} siūloma vertinti stochastiškai modeliuojant (pvz., Homma & Saltelli, 1996). Šių dispersijų įverčių skaičiavimo formulės, skirtos stochastiniam modeliavimui, pateiktos ir paaiškintos 1.3 lentelėje.

Praktinis dispersijų įnašo metodo įgyvendinimas susiduria su įvesties kintamųjų x_i reikšmių parinkimo problema. Šiems kintamiesiems iš prigimties yra būdingas neapibrėžtumas. Juos reikia modeliuoti atsitiktiniais dydžiais X_i, nusakomais tikimybių skirstinių. Jų tankiai schematiškiai pavaizduoti 1.9 pav. Tačiau statistinių duomenų, tinkančių parinkti X_i skirstinius, rasti praktiškai neįmanoma daugumai gaisro situacijų. Toks duomenų „deficitas“ būdingas daugeliui globaliosios jautrumo analizės taikymo atvejų. Informacija, kurią dažniausiai galima gauti apie įvesties kintamuosius x_i yra jų nominaliosios reikšmės x_{ni}. Jos nustatomos norminių dokumentų arba yra nusistovėjusios praktikoje, o neretai parenkamos intuityviai. Atsakyti į klausimą, koks galėtų būti dydžių x_i tikimybių skirstinys, paprastai negalima. Todėl jautrumo analizė atliekama taikant randomizavimo procedūrą.

Randomizavimas (angl. *randomization*) yra plačią reikšmę turintis terminas, kurio aprašymą galima rasti ir *Vikipedijoje*. Šio darbo plotmėje, randomizavimas buvo atliktas kintamiesiems x_i suformuojant intervalus $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ ir šiems intervalams priskiriant tolygiuosius tikimybių skirstinius (1.10 pav.). Tai yra iliustruota . Toks radomizavimas yra įprastas atliekant globaliąją jautrumo analizę (Saltelli, 2008). Intervalai $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ paprastai formuojami imant $\pm 10\%$ arba $\pm 20\%$ rėžius, apskaičiuojamus nominaliajai reikšmei x_{ni}.

Globaliosios jautrumo analizės procedūrą nėra lengva įgyvendinti programuojant pačiam. Tačiau galima pasinaudoti nemokama kompiuterio programa SIMLAB ir kitomis panašiomis globaliosios jautrumo analizės programomis (1.11 pav.). Jos įgyvendina šią procedūrą ir buvo sukurtos finansuojant Europos Komisijai.

1.3.2. Jautrumo vertinimas taikant koreliacijos koeficientus

Koreliacijos koeficientai yra paprastai suskaičiuojami dydžiai, kurių reikšmes lengva interpretuoti jautrumo analizės požiūriu. Koreliacinės analizės rezultatus taip pat lengva išreikšti ir suprasti grafiškai, braižant taškines diagramas. 1.1 lentelėje minimi koreliacijos koeficientai tinka tiek esant tiesiniam, tiek netiesiniam stochastiniam ryšiui tarp atsitiktinių įvesties kintamųjų X_i ir išvesties dydžio Y. Globaliąją jautrumo analizę galima atlikti stochastinio modeliavimo būdu gautoms poroms (x_{il}, y_l) (i = 1, 2, ... , N), kur N yra šio modeliavimo ciklų skaičius. Skaičiuoti galima tris koreliacijos koeficientus:

parametrinį Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientą

$$r_i = \frac{\sum_{l=1}^{N}(x_{il} - \bar{x}_i)(y_l - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{l=1}^{N}(x_{il} - \bar{x}_i)^2 (y_l - \bar{y})}\sqrt{\sum_{l=1}^{N}(y_l - \bar{y})^2}}, \tag{1.11a}$$

neparametrinį, ranginį Spirmeno koreliacijos koeficientą

$$r_{si} = 1 - \frac{6\sum_{l=1}^{N} d_{il}^2}{N^3 - N}, \tag{1.11b}$$

neparametrinį, ranginį Kendalo koreliacijos koeficientą

$$\tau_i = 1 - \frac{\Sigma_i}{\frac{N(N-1)}{2}}, \tag{1.11c}$$

čia $\bar{x}_i$ ir $\bar{y}$ – reikšmių x_{il} ir y_l vidurkiai; d_{il} – reikšmių x_{il} ir y_l rangų skirtumas; Σ_i – suderintų ir nesuderintų porų (x_{il}, y_l) skaičiaus skirtumas.

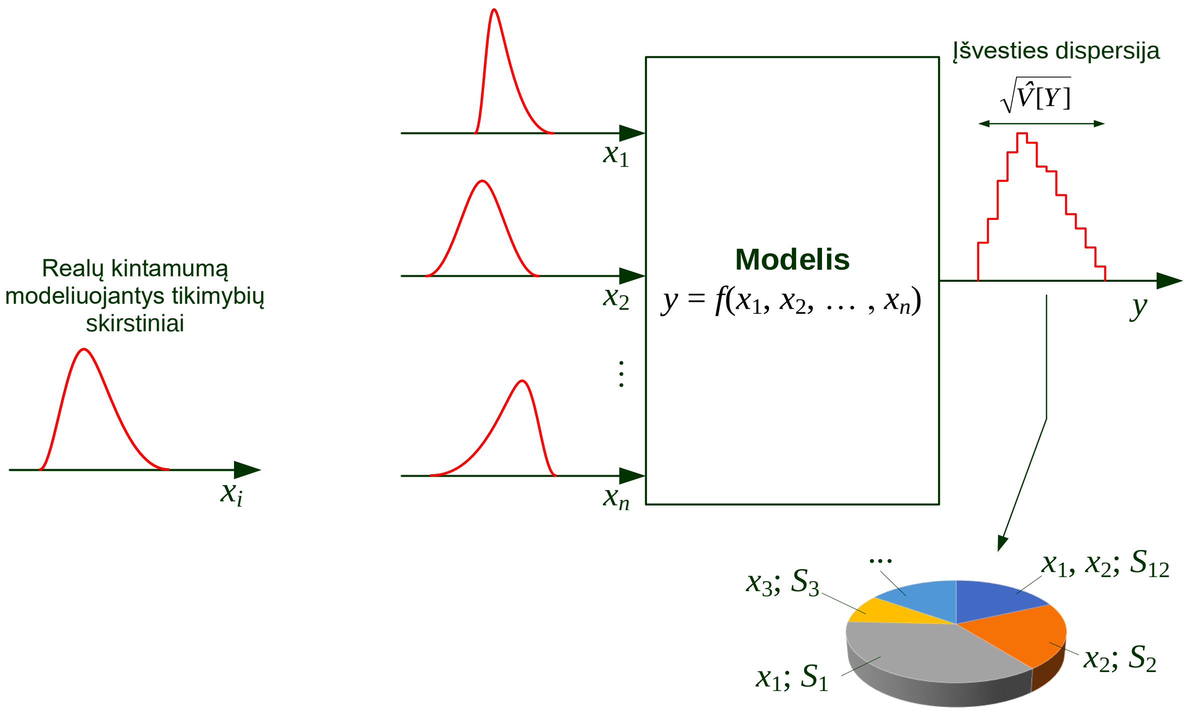
Koreliacijos koeficientai r_i , r_{si} ir τ_i yra paprasta ir lengvai pritaikoma jautrumo analizės priemonė. Tačiau jie yra porinės priklausomybės tarp X_i ir Y rodikliai. Todėl netinka vertinti, kokią įtaką išvesties kintamajam y gali turėti įvesties dydžių x_i, x_j, ... tarpusavio sąveika (kooperacija). Taigi, koreliacijos koeficientai r_i , r_{si} ir τ_i negali atstoti dispersijų įnašo metodo antro ir aukštesnių lygių globaliuosius jautrumo indeksus S_{ij} , S_{ijk} , ... Tačiau koreliacinės analizės rezultatai tinka grubiai įvertinti dispersijų įnašo metodu gaunamus rezultatus ir tam tikra prasme atstoja šio metodo pirmo lygio indeksus S_i .

1.2 lentelė. Dispersijos, naudojamos skaičiuojant globaliuosius jautrumo indeksus pagal (1.10) formules

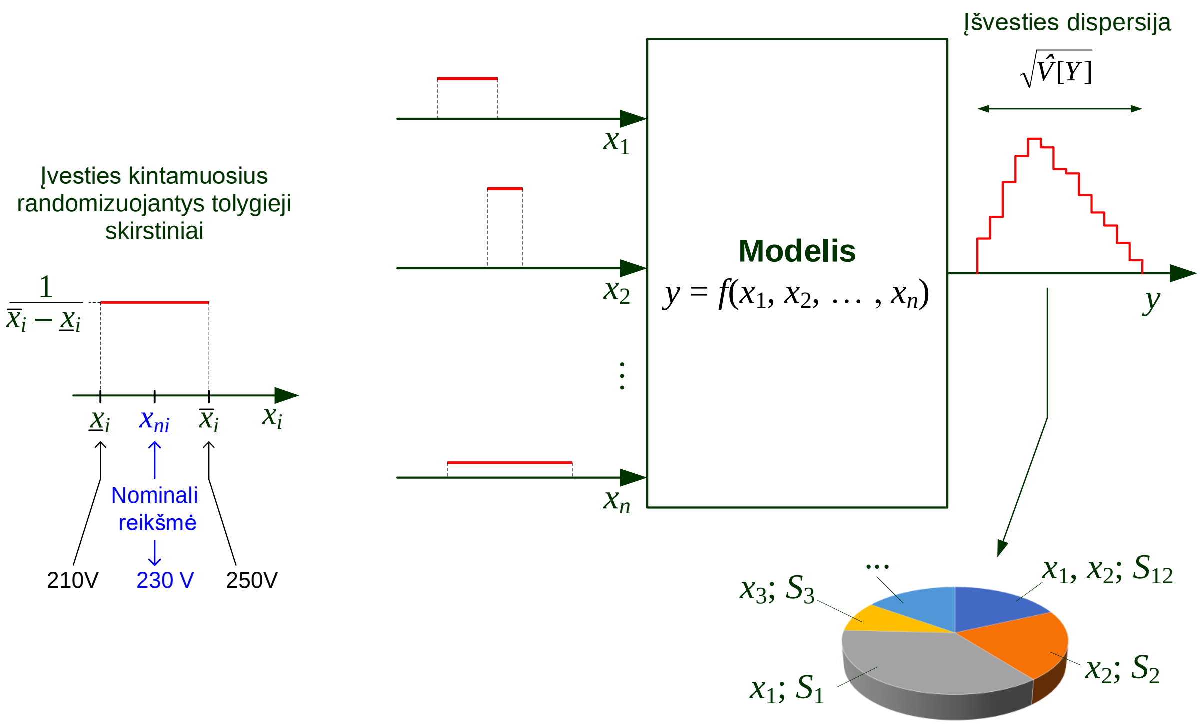
Dispersija	Dispersijos formulė	Formulės paaiškinimas
V	$V = \int f^2(\boldsymbol{x})\,\mathrm{d}F(\boldsymbol{x}) - f_0^2,$	Funkcija $F(\boldsymbol{x}) = F_1(x_1) \times F_2(x_2) \times F_3(x_3)$ yra simultaninė funkcijos $f(\boldsymbol{x})$ argumentų pasiskirstymo funkcija, o f_0 yra tos funkcijos reikšmių vidurkis, skaičiuojamas pagal išraišką $f_0 = \int \ldots \int f(\boldsymbol{x})\,\mathrm{d}F(\boldsymbol{x})$.
V_i	$V_i = \int f_i^2(x_i)\,\mathrm{d}F_i(x_i)$, $(i = 1, 2, 3)$	Funkcijos $f_i(x_i)$ ir $f_{ij}(x_i, x_j)$ gaunamos taikant funkcijos $f(\boldsymbol{x})$ ANOVA (angl., *analysis of variance*) išskaidymą (pvz., Sobol, 2001). Jis yra išreiškiamas formule $f(\boldsymbol{x}) = f_0 + \sum_{i=1}^{n} f_i(x_i) + \sum_{i<j} f_{ij}(x_i, x_j) + f_{123}(x_1, x_2, x_3)$, kurios komponentai $f_i(x_i)$ ir $f_{ij}(x_i, x_j)$ gaunami integruojant funkciją $f(x)$, t. y., $f_i(x_i) = \int \ldots \int f(\boldsymbol{x}) \prod_{k \neq i} \mathrm{d}x_k - f_0$, ir $f_{ij}(x_i, x_j) = \int \ldots \int f(\boldsymbol{x}) \prod_{k \neq i, j} \mathrm{d}x_k - f_i(x_i) - f_j(x_j) - f_0$,
V_{ij}	$V_{ij} = \iint f_{ij}^2(x_i, x_j)\,\mathrm{d}F_i(x_i)\,\mathrm{d}F_j(x_j)$, $(i < j)$	
V_{123}	$V_{123} = V - \sum_{i=1}^{n} V_i - \sum_{i<j} V_{ij}.$	—

1.3 lentelė. Dispersijų įverčiai, skaičiuojami stochastiškai modeliuojant ir naudojami gauti apytikres globaliųjų jautrumo indeksų reikšmes

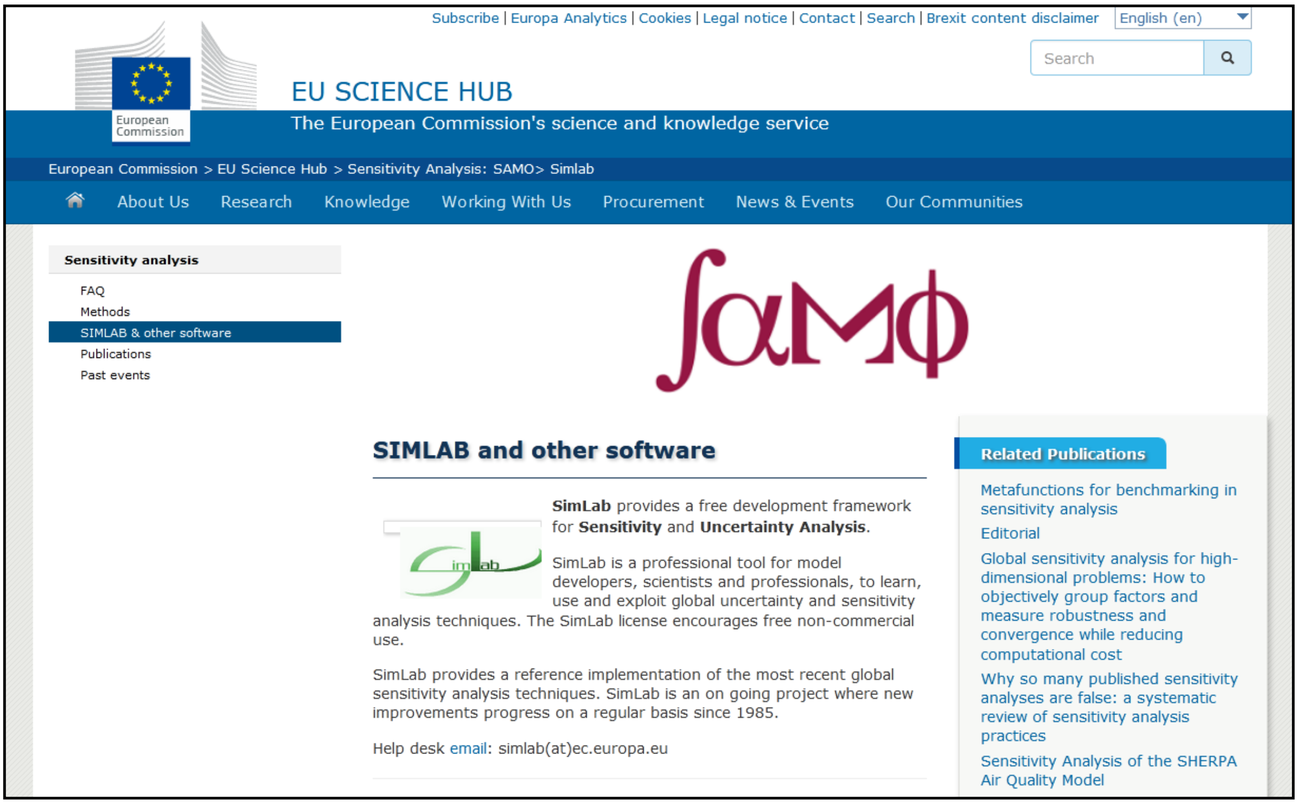
Dispersija	Dispersijos įvertis	Dispersijos įverčio formulė	Formulės paaiškinimas
V	$\hat{V}$	$\hat{V}=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N} f^2(\boldsymbol{x}_m)-\hat{f}_0^2,$	Dydis N yra modeliavimo ciklų skaičius, $\boldsymbol{x}_l$ yra vektoriaus reikšmė, generuota modeliavimo cikle l, o $\hat{f}_0$ yra vidurkio f_0 įvertis, apskaičiuotas pagal išraišką $\hat{f}_0=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N} f(\boldsymbol{x}_m)$.
V_i	$\hat{V}_i$	$\hat{V}_i=\left(\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N} f(\boldsymbol{u}_m, x_{im})\, f(\boldsymbol{v}_m, x_{im})\right)-\hat{f}_0^2,$	Dydis x_{il} yra argumento x_i reikšmė, generuota modeliavimo cikle l, $\boldsymbol{u}_l$ ir $\boldsymbol{v}_l$ – visų vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentų, išskyrus x_i, reikšmės, generuotos modeliavimo cikle l. Sumos dėmenys $f(\boldsymbol{u}_l, x_{il})$ × $f(\boldsymbol{v}_l, x_{il})$ reiškia, kad $f(\boldsymbol{u}_l, x_{il})$ reikšmė skaičiuojama modeliavimo cikle l generuojant visų vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentų reikšmes, o $f(\boldsymbol{v}_l, x_{il})$ reikšmė skaičiuojama tame pačiame cikle l pakartotinai generuojant visų vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentų reikšmės, išskyrus reikšmę x_i.
V_{ij}	$\hat{V}_{ij}$	$\hat{V}_{ij}=\left(\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N} f(\boldsymbol{r}_m, x_{im}, x_{jm})\, f(\boldsymbol{s}_m, x_{im}, x_{jm})\right)-\hat{V}_i-\hat{V}_j-\hat{f}_0^2,$	Dydžiai x_{il} ir x_{jl} yra argumentų x_i ir x_j reikšmės, generuotos modeliavimo cikle l, $\boldsymbol{r}_l$ ir $\boldsymbol{s}_l$ yra visų vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentų, išskyrus x_i ir x_j, reikšmės, generuotos modeliavimo cikle l. Taigi modeliavimo cikle l vieną kartą generuojamos visų vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentų reikšmes ir dar kartą visi $\boldsymbol{x}$ komponentai, išskyrus x_{il} ir x_{jl}.
V_{123}	$\hat{V}_{123}$	$\hat{V}_{123}=\hat{V}-\sum_{i=1}^{n}\hat{V}_i-\sum_{i<j}\hat{V}_{ij}.$	Dispersijos V_{123} įvertis $\hat{V}_{123}$ skaičiuojamas pakeičiant tikslius 1.2 lentelėje pateiktos formulės dydžius įverčiais, skaičiuojamais pagal šioje lentelėje pateiktas formules.



1.9 pav. Globalioji jautrumo analizė įvesties kintamuosius X_i modeliuojant tikimybių skirstiniais



1.10 pav. Įvesties kintamųjų X_i randomizavimas, atliekamas nusakant juos tolygiuoju tikimybių skirstiniu ir taikomas atliekant globaliąją jautrumo analizę



1.11 pav. Europos Komisijos informacija apie globaliosios jautrumo analizės programą ir kitas panašias programas, sukurtas finansuojant Komisijai (EU Science Hub, 2023)

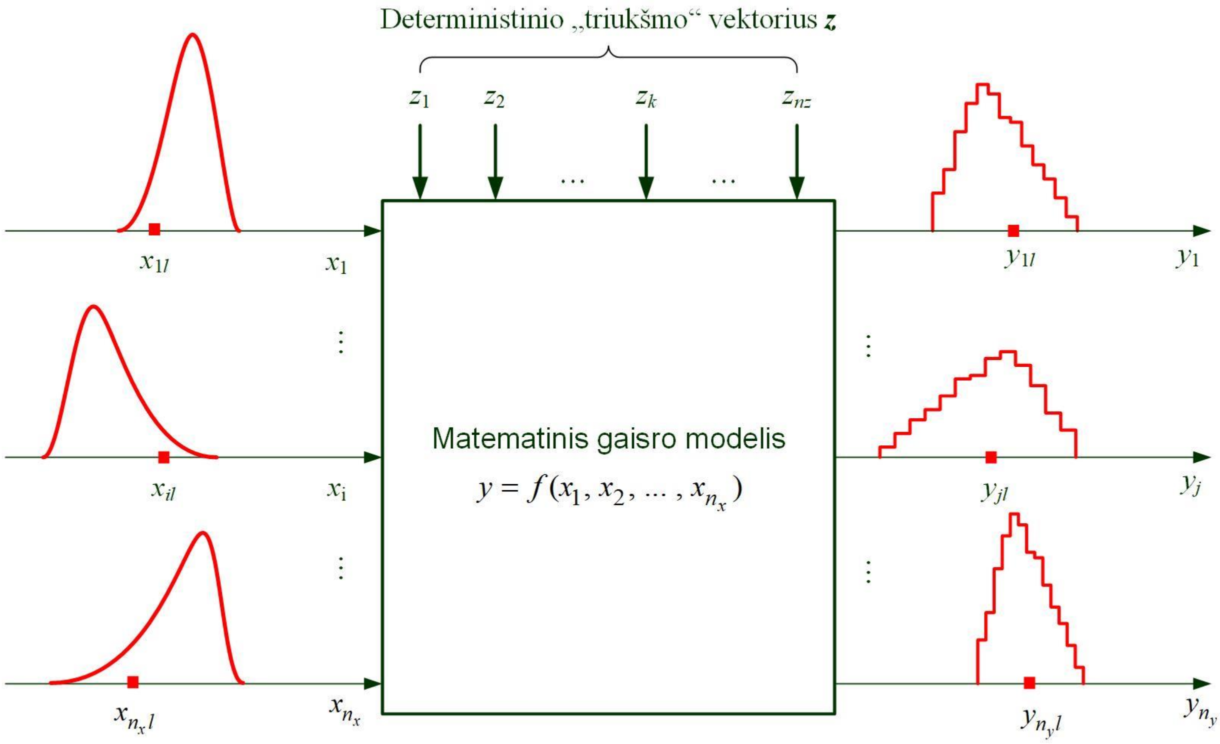
2. MATEMATINIO GAISRO MODELIAVIMO INTEGRAVIMAS Į ORERACIJŲ TYRINĖJIMO PROCEDŪRAS

2.1. Gaisro modelio vieta stochastinio modeliavimo cikle

Gaisrinės saugos užtikrinimas yra iš esmės sprendimų priėmimo seka ir tų sprendimų praktinis įgyvendinimas. Terminas „sprendimas“ reiškia, kad jį priimantis asmuo (architektas, konstruktorius, gaisrinės saugos specialistas ir sąmatininkas) sprendžia įvairaus pobūdžio problemas: pasirinkimo iš kelių alternatyvų problemą, kainos minimizavimo, gaisrinės saugos sistemos efektyvumo didinimo, įrengimo laiko ir sąnaudų mažinimo, atitikimo formaliems nors ir ne visada tiksliai apibrėžtiems reikalavimams. Ne mažai šių problemų gali būti matematiškai formalizuotos kaip operacijų tyrinėjimo uždaviniai. Kai kurie iš jų gali būti sprendžiami atsietai nuo gaisro proceso prognozavimo. Pavyzdžiui, sprinklerių tinklo išdėstymas gali būti atliekamas tenkinant norminio dokumento reikalavimus ir per daug nesusimąstant koks gali būti gaisras, kurį šie sprinkleriai gesins.

Tačiau jei kalbama apie gaisro ištikto pastato žmonių saugą, formalus normomis pagrįstas sprendimų priėmimas tampa problemiškas. Žmonės yra labai jautrūs gaisro poveikiams. Todėl labai svarbu yra gaisro procesą prognozuoti kiek galima tiksliau. Tokia prognozė labai apsunkinama tos aplinkybės, kad gaisro procesui būdingas didelis neapibrėžtumas. Iš anksto sunku tiksliai pasakyti, kur kils gaisras, kokie objektai degs, kaip plėsis evakuacijos kelių uždūminimas, kokia temperatūra ir spinduliuotė bei nuodingosios medžiagos veiks besigelbėjančius žmones. Atsakyti į tokius klausimus galima atliekant matematinį su gaisro procesu susijusių neapibrėžtumų vertinimą. Pagrindinė operacijų tyrinėjimo priemonė, skirta kiekybiškai išreikšti neapibrėžtumus, yra stochastinis modeliavimas. Jo rezultatai tiesiogiai tinka vertinant neapibrėžtumo laipsnį bei taikant tokias procedūras kaip gaisro proceso modelio jautrumo analizė.

Jei gaisro modelį interpretuosime kaip sistemą su neapibrėžtomis įvestimis ir išvestimis, pavaizduotomis 2.1 pav., kils natūralus klausimas, kaip formuoti įvesties ir išvesties vektorius $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_{n_x})$ ir $\boldsymbol{y} = (y_1, y_2, \cdots, y_j, \cdots, y_{n_y})$ Jei gaisro ištiktą patalpą (pastatą) suprasti kaip sistemą, modeliuojamą taikant 1.7 pav. pavaizduota funkcija $f(\cdot)$, įvesties dydžių gali būti tiek, kiek leidžia zonų ir laiko modelius įgyvendinančios kompiuterio programos, pirmiausiai, CFAST ir FDS. Modeliuoti realius gaisrus nesinaudojant zonų ir laiko programomis neįmanoma. Tos programos turi gana plačią įvesties kintamųjų aibę. Tačiau ji nebūtinai atspindi visus gaisro situaciją apibūdinančius dydžius arba leidžia juos atspindėti paprastomis programos įvesties priemonėmis. Pavyzdžiui, naujesnėse CFAST programos versijose yra galimybė modeliuoti gaisro patalpos energijos sumažėjimą dėl jos kondukcinio išspinduliavimo pro konstrukcinį patalpos perimetrą. Tačiau FDS programoje (arba bent 5-je jos versijoje) to lengvai padaryti negalima.



2.1 pav. Gaisro modelio įvesties kintamųjų išskyrimas į atsitiktinius įvesties kintamuosius, išreikštus vektoriumi $\boldsymbol{x}$, ir fiksuoto „triukšmo“ kintamuosius, sugrupuotus į vektorių $\boldsymbol{z}$ (indeksas l nurodo į reikšmę, generuotą modeliavimo cikle su numeriu l (angl. *loop*))

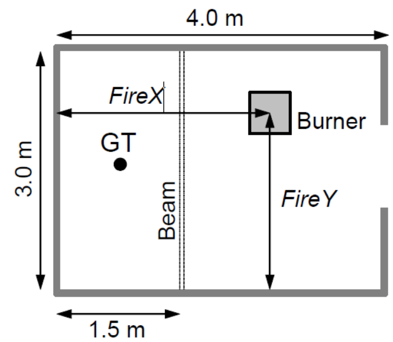
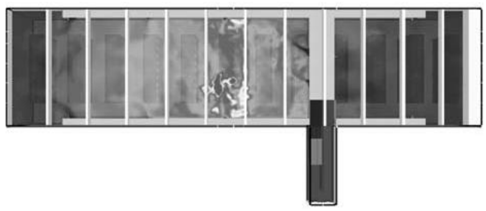
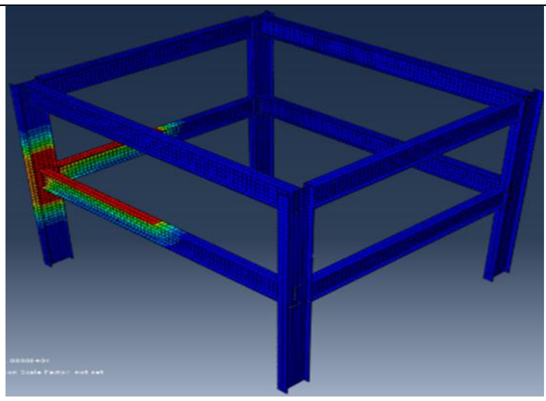
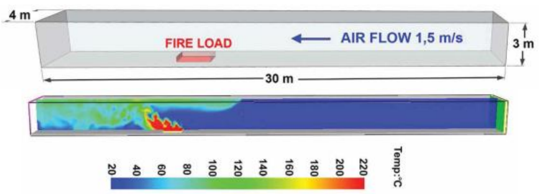
Teoriškai įvesties kintamųjų (vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentų x_j) skaičius gali būti santykinai didelis net paprasčiausios patalpos gaisro modeliavimo atveju. Ką jau bekalbėti apie šių kintamųjų reikšmių derinių skaičių, kuris yra aktualus lokaliosios jautrumo analizės atveju ir gana svarbus atliekant globaliąją jautrumo analizę. Šioje situacijoje, vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentų pasirinkimas tampa intuicijos ir tyrimo tikslų pasirinkimo problema. Dalis įvesties informacijos gali būti išreikšta vektoriumi $\boldsymbol{x}$, tada kita dalis taps likutine informacija, kurią išreikš atsitiktiniais nelaikomi ir į vektorių $\boldsymbol{z}$ sugrupuoti kintamieji (2.1 pav.). Kalbant eksperimentų planavimo terminais, vektorius $\boldsymbol{z}$ gali būti laikomas fiksuotu (deterministiniu) triukšmu. Kokią įtaką jo kaitaliojimui turės stochastinio modeliavimo rezultatai, galima įvertinti neformaliai bandymų ir klaidų metodu arba formaliai, taikant jautrumo analizę. Kuo sudėtingesnis yra sistemos modelis, tuo sudėtingiau apsispręsti, kuriam iš vektorių $\boldsymbol{x}$ arba $\boldsymbol{z}$ priskirti gaisro procesą daugiau ar mažiau lemiantį veiksnį.

2.2. Jautrumo analizės uždavinio formulavimas ir gaisro modeliavimo įvesties informacijos detalizavimas

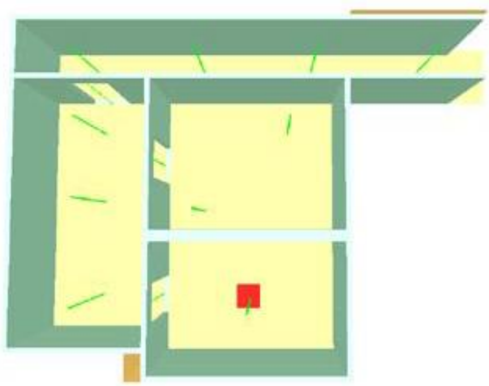
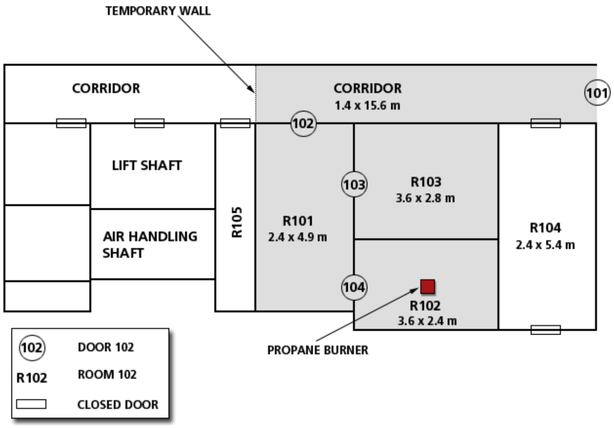
2.2.1. Tiriamojo uždavinio pasirinkimas

Jeigu laikytis intuityvaus įvesties vektoriaus $\boldsymbol{x}$ formavimo taktikos, pravartu būtų panagrinėti, kokius įvesties dydžius pasirinko mokslinių straipsnių autoriai, taikę stochastinio modeliavimo metodą tiriant gaisro modelius. Dauguma šių straipsnių buvo skelbiami daugiausiai per praėjusius du dešimtmečius ir jų rezultatai yra apibendrinti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Informacija įvesties dydžių vektorius ***x***, suformuotus tiriant gaisro modelius stochastiškai modeliuojant

Įvesties dydžiai (įvesties vektoriaus ***x*** komponentai)	Nagrinėjamos patalpos schema ir informacijos šaltinis	Gaisro modelis
Sijos aukštis (m) U(0; 0,6) Gaisro augimo laikas (s) U(60, 180) Gaisro židinio plotas (m^2) N(0,8; 0,6^2) Pirma gaisro židinio koordinatė (m) U(0, 4) Antra gaisro židinio koordinatė (m) U(0, 3)	Hipotetinė patalpa  (Hostikka et al., 2005)	CFAST ir FDS
Degalų masė* Aušintuvo galia* Uždegimo temperatūra* Maksimali HRR reikšmė* Užsidegusios spintos numeris* Kolonos numeris (nepaaiškinta) * HRR kilimo greitis* * Įvesties kintamųjų dimensijos ir skirstiniai cituojamame straipsnyje nenurodyti	 (Keski-Rahkonen et al., 2007)	CFAST ir FDS
Angų koeficientas U(0,0,2; 0,2) Patalpos plotas U(0, 500) Sijų ir kolonų lentynos storis U(7,5; 55)	 (Almadani & Fu, 2022)	ABAQUS
Gaisro apkrova (MJ/m^2) N(50; 15^2) Laikas iki evakuacijos pradžios (s) N(240; 120^2)	Požeminė šachta  (Adjiski et al., 2019)	FDS

2.1 lentelės tęsinys

Įvesties dydžiai (įvesties vektoriaus ***x*** komponentai)	Nagrinėjamos patalpos schema ir informacijos šaltinis	Gaisro modelis
Masės nykimo rodiklis (m^2/kg) U(7,6; 9,8)* Santykinė suodžių dalis (–) T(0,015; 0,027; 0,227) HRR (kW) U(100, 900) * angl. *mass extinction coefficient*	FDS modelis ir eksperimentinė patalpa   (Lindstrom & Lund, 2009)	FDS

2.1 lentelėje pateikta informacija apie pasirinktus įvesties vektoriaus ***x*** komponentus gauta panagrinėjus penkias publikacijas. Aišku, ši apžvalga nėra išsami. Tačiau labai daug straipsnių, kuriuose stochastinis modeliavimas būtų taikomas tiriant matematinius gaisro modelius, rasti nepavyko. Galima suformuluoti keletą teiginių apie 2.1 lentelėje cituojamų tyrimų aspektą pasirenkant vektorių ***x***:

1. Stochastinio modeliavimo pavyzdžiuose nagrinėjamos gaisro patalpos yra labai paprastos. Iš esmės tai vienos patalpos gaisro pavyzdžiai, kuriuos galima pavadinti grynai akademiškais. Tai yra suprantama, nes nuo tokių paprastų pavyzdžių prasideda kiekvienas tyrimas. Tačiau šiuolaikinių kompiuterių skaičiavimo galia leidžia spręsti ir sudėtingesnius, realesnes gaisro situacijas iliustruojančius pavyzdžius.
2. Vektoriaus ***x*** komponentų pasirinkime sunku įžvelgti kokį nors sistemiškumą. Kiekviename tyrime naudotas vektoriaus ***x*** komponentų sąrašas yra skirtingas. Susidaro įspūdis, kad straipsniuose aprašyti ir 2.1 lentelėje minimi pavyzdžiai tiesiog įrodo, kad stochastinį

modeliavimą galima taikyti nagrinėjamame kontekste. Tačiau kitų rezultatų, kuriuos galima būtų gauti vienaip ar kitaip sisteminant vektoriumi $\boldsymbol{x}$ išreiškiamą informaciją, įžvelgti sunku.

3. Atsitiktinių dydžių, įvardintų vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentais, tikimybių skirstinių pasirinkimas, atrodo, atliekamas intuityviai. Jokių samprotavimų apie skirstinių rūšies ir parametrų reikšmių pasirinkimą straipsniuose nėra. Tik vieno straipsnio autoriai pripažįsta, kad atsitiktinių dydžių skirstinius teks uždavinėti subjektyviai, o kita dalis gali turėti statistine informacija ar matematiniu modeliavimu pagrįstus skirstinius (Au et al., 2007).

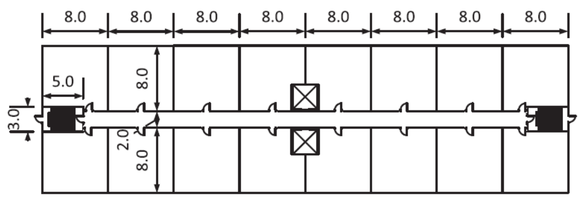
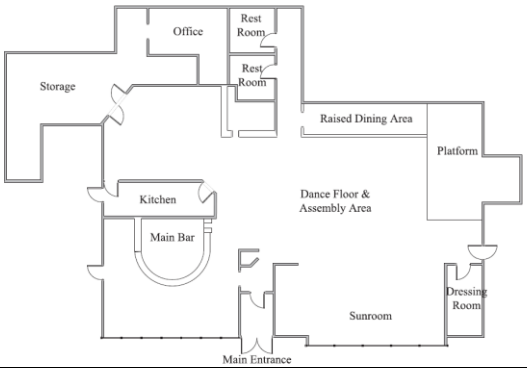
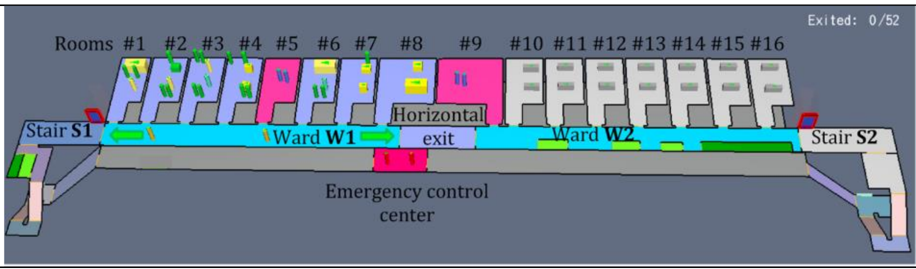
Dar vienas informacijos šaltinis apie įvesties vektoriaus $\boldsymbol{x}$ formavimą yra moksliniai straipsniai, kuriuose aprašomas stochastinio modeliavimo taikymas prognozuojant evakuaciją iš gaisro apimtų pastatų. Ši informacija pateikiama ir straipsniai yra cituojami 2.2 lentelėje. Galima vėlgi pasakyti, kad tokių straipsnių paskelbta nedaug. Juose pateikiami stochastinio modeliavimo pavyzdžiai nagrinėja realistiškesnius pastatus, jeigu lyginsime su pastatais iš 2.1 lentelėje cituojamų darbų. Tačiau įvesties vektoriaus $\boldsymbol{x}$ formavimo požiūriu 2.1 ir 2.2 lentelėse minimi straipsniai yra panašūs. Atsitiktinių įvesties kintamųjų tikimybių skirstinių uždavimas evakuacijai skirtuose 2.2 lentelėje cituojamuose straipsniuose atrodo visiškai subjektyvus. Pasirinktieji skirstiniai nepagrindžiami nei empirine statistinių duomenų informacija, nei subjektyvia informacija, gaunama apklausiant ekspertus (angl. *elicitation of expert opinion*).

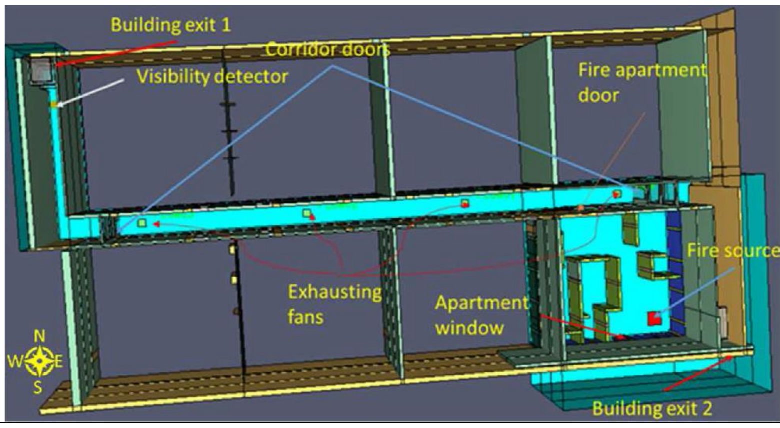
Apibendrinant šiame poskyryje pateiktus samprotavimus ir turimą informaciją apie įvesties vektoriaus $\boldsymbol{x}$ formavimą galima teigti, kad šis uždavinys šiuo metu net nepradėtas sistemingai spręsti. Manome, kad vektoriaus $\boldsymbol{x}$ formavimą reikėtų pradėti nuo stochastiniu modeliavimu grindžiamos jautrumo analizės. Tam reikėtų atlikti pirminį didelio skaičiaus įvesties kintamųjų randomizavimą ir, nustačius didžiausią įtaką turinčius kintamuosius, bandyti visiškai arba iš dalies subjektyviai uždavinėti jų tikimybių skirstinius.

2.2.2. Gaisro charakteristikų panaudojimas formuojant įvesties vektorių

Formuojant įvesties vektorių $\boldsymbol{x}$ pirmiausiai galima vadovautis ta mintimi, kad gaisro procesui nemažą įtaką turinčią pastato arba patalpos geometriją (matmenis bei langų ir durų angų išdėstymą) ir konstrukcinių medžiagų pasirinkimą lemia architekto ir konstruktoriaus sprendimai. Gaisrinės saugos specialistas čia daugiausiai prisidės tik tuo, kad tikrins, ar pastato (patalpos) išplanavimas ir apdailos medžiagos tenkina norminių gaisrinės saugos dokumentų reikalavimus. Tačiau pastatų patalpos yra užpildomos degti galinčiais objektais ir (arba) medžiagomis, kurių reikia pastatų vartotojams. Gaisrinės saugos požiūriu tie objektai ir medžiagos yra kuras. Kuru taip pat reikia laikyti degias apdailos medžiagas, tarkime, vidaus paviršių dangas. Duotosios geometrijos pastate su jo architektūrinio projekto lemiančiomis ventiliavimo sąlygomis gaisras bus toks, koks bus gaisro patalpų kuras. Todėl įvesties vektorių $\boldsymbol{x}$ pirmiausiai reikėtų sudarinėti iš įvairios rūšies kuro charakteristikų.

2.2 lentelė. Įvesties vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentai, naudoti atliekant gaisro modelių jautrumo analizę

Informacija	Nagrinėjamos patalpos schema ir informacijos šaltinis
Evakuacijos modelis	Originalus CUrisk modelis, sukurtas Kanados *Carleton* universitete
Modeliuojami pastatai	Šešių aukštų pastatas su žemiau parodytu aukšto planu  *Station* naktinis klubas 
Įvesties dydžiai	Įvesties dydžiai yra tikimybių skirstiniai, kurie nusako kiekvieno pastato populiacijos asmens elgesį evakuacijos metu.
Šaltinis	Zhang et al. (2013, 2017)
Evakuacijos modelis	PATHFINDER
Modeliuojamas pastatas	
Įvesties dydžiai	Įvairių pastato populiaciją sudarančių žmonių judėjimo greičiai: normalieji skirstiniai, vidurkių reikšmės 0,04 m/s, ... , 1,35 m/s, standartų reikšmės 0,04 m/s, ... , 0,32 m/s; tolygieji skirstiniai, minimali reikšmė 0,52 m/s, maksimali reikšmė 1,75 m/s. Laikai, skirti pasiruošti judėti: lognormalieji skirstiniai, vidurkių reikšmės 43 s, ... , 73 s, standartų reikšmės 6,44 s, ... , 60 s. Laikai, skirti pasiruošti judėti žmonėms su judėjimo apribojimais: normalieji skirstiniai, vidurkių reikšmės 42 s, ... , 110 s, standartų reikšmės 7,9 s, ... , 36 s.
Šaltinis	Tinaburri (2022)

Evakuacijos modelis	PATHFINDER derinamas su FDS
Modeliuojamas pastatas	Trijų aukštų pastatas su žemiau parodytu aukšto planu 
Įvesties dydžiai	Randomizuotos kintamųjų reikšmės: maksimali HRR reikšmė (kW), koridoriaus plotis (m), santykinė suodžių dalis (–), gaisro patalpos lango plotis (m), gaisro patalpos durų plotis (m), srovės pro ventiliatorių greitis (kg/s).
Šaltinis	Wang et al. (2022)

Pagrindinė matematinio gaisro modelio dalis yra gaisro metu degančių objektų energijos išskyrimo greičio kreivės (HRR kreivės, angl. *heat release rate*). Jos pačios vadinamos „modeliais“, tai yra, HRR modeliais (Karlsson & Quintiere, 2000). Degti galinčio objekto arba medžiagos HRR kreivė dažniausiai žymima laiko funkcija $\dot{Q}(t)$ ir išreiškiama formule

$$\dot{Q}(t) = \Delta h_{eff} \times \dot{m}(t)\,, \tag{2.1}$$

čia Δh_{eff} – veiksmingoji (efektyvioji) degimo šiluma savitoji kuro šiluma, išreiškianti energijos kiekį, kurį išskiria vienas kilogramas kuro, kuris paprastai nevisiškai sudega (kJ/kg); $\dot{m}(t)$ – degančio kuro masės netekimo greitis, kuris daugumai kuro rūšių keičiasi degimo metu (kg/s). Taškas simboliuose $\dot{Q}(t)$ ir $\dot{m}$ bei kituose simboliuose reiškia greitį (dydžio išvestinę pagal laiką).

Kai kada masės netekimo greitis yra siejamas ne su degančiu objektu, o tik su vienu kvadratiniu metru to kuro ploto. Šiuo atveju masės netekimo greitį įprasta žymėti simboliu $\dot{m}''(t)$ ir jo dimensija yra kg/(m^2 s). Atitinkamai koreguojamas ir energijos greičio simbolis, t. y. $\dot{Q}''(t)$. Juo išreiškiamo dydžio dimensija yra kJ/(m^2 s) arba kW/m^2.

Gaisrai yra gana sunkiai prognozuojami reiškiniai, kurie gali įvykti pagal daug scenarijų, ir juos turi atspindėti $\dot{Q}''(t)$ funkcija. Formuojant funkciją $\dot{Q}''(t)$ reikia atsižvelgti į tai, kad scenarijus gali keistis įrengiant ventiliavimo, gaisro aptikimo bei gaisro gesinimo sistemas. Pakankamai tiksliai modeliuoti daugelį gaisro scenarijų ir galimų to gaisro poveikių konstrukcijoms įvairovę yra per brangu ir nepraktiška. Šiuolaikiniame projektavime yra nusistovėjusi procedūra, kai gaisro poveikis yra išreiškiamas itin schematiška funkcija, formuojama darant tris supaprastinimus, kuriuos galima taip aprašyti:

1. Galimo kuro savybės didelio ploto gaisruose gali būti labai nevienodos ir detalus energijos išskyrimo greičio modeliavimas gali būti sudėtingas. Todėl supaprastintai modeliuojant gaisrą, kurio plotas yra A_{fire}, naudojamasi ploto atžvilgiu vidutine reikšme $\dot{Q}''(t)$, vadinama angliškų trumpiniu HRRPUA (angl. *heat release rate per unit area*). Funkcija $\dot{Q}''(t)$ skaičiuojama pagal formulę

$$\dot{Q}''(t) = \frac{\dot{Q}(t)}{A_{fire}}. \tag{2.2}$$

2. HRRPUA funkcija $\dot{Q}''(t)$ supaprastinama skaičiuojant vidutinę HRRPUA reikšmę $\dot{Q}''$ per nagrinėjamą degimo laikotarpį. Taikomos įvairios vidurkio $\dot{Q}''$ skaičiavimo procedūros, iliustruotos 2.3 pav. Vidutinė reikšmė $\dot{Q}''$ paprastai susiejama su pastatų rūšimi, o ne su konkrečiu kuru. HRRPUA reikšmes galima rasti JK standarte PD 7974-1 (BSI, 2003). Standartas išskiria keturių rūšių pastatus ir nustato HRRPUA reikšmes, pateiktas 2.3 lentelėje. Šios reikšmės remiasi JAV dokumentu NFPA 92B (NFPA, 1991). Mokslinėje literatūroje galima rasti HRRPUA reikšmių ir kitų rūšių pastatams (2.4 lentelė).
3. Pradinė HRR funkcija $\dot{Q}(t)$ supaprastinama gaisro poveikį išreiškiant itin schematiška HRR funkcija, kuri gaisro trukmę dalina į augimo iki maksimalios reikšmės $\dot{Q}_{max}$ tarpsnį t_g, pastovaus degimo tarpsnį t_b ir gesimo tarpsnį t_d (2.3 pav.) Ši supaprastinta HRR proceso idealizacija vadinama projektinio gaisro kreive (angl. *design fire curve*). Viena iš jos formų yra tokia (Ingason, 2009):

$$\dot{Q}(t) = \begin{cases} \dot{Q}_{max}(t/t_g)^2, & \text{kai} \quad 0 < t \le t_g, \\ \dot{Q}_{max}, & \text{kai} \quad t_g < t \le (t_g + t_b), \\ \dot{Q}_{max}\exp\{-4(t - t_g - t_b)/t_d\}, & \text{kai} \quad (t_g + t_b) < t \le (t_g + t_b + t_d). \end{cases} \tag{2.3}$$

2.3 lentelė. Standarto PD 7974-1 nustatomos HRRPUA reikšmės keturių rūšių pastatams (BSI, 2003)

Pastatų arba patalpų rūšys	HRRPUA reikšmė $\dot{Q}''$, kW/m^2	A_{fire} = 5000 kW/HRRPUA, m^2
Parduotuvės	550	9,1
Biurai	290	17,2
Viešbučių kambariai	250	20
Pramoninės, išskyrus sandėliavimą	92 – 620, priklausomai nuo kuro išdėstymo	8,1 – 54

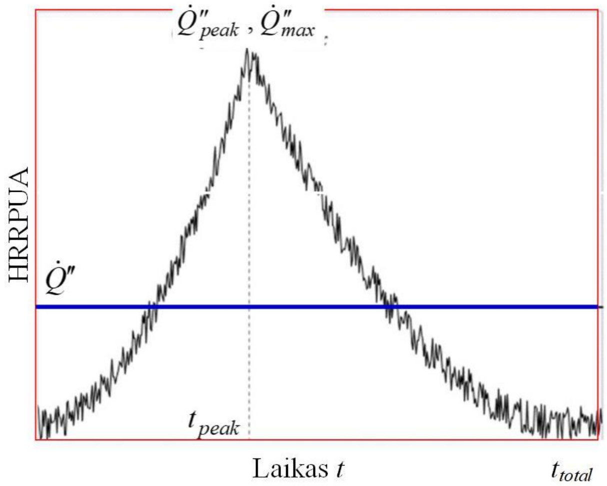
2.4 lentelė. Mokslinėje literatūroje pateikiamos HRRPUA reikšmės ir tų reikšmių intervalai (Hopkin et al., 2019).

Patalpos tipas	HRRPUA reikšmė $\dot{Q}''$, kW/m^2	A_{fire} = 5000 kW/HRRPUA, m^2
Parduotuvės	270–1200 (maksimumas)	4,2 – 18,5
Biurai	150–650 (maksimumas)	7,7 – 33,3
Viešbučių kambariai	250 (vidurkis)	20
Gyvenamosios patalpos	320–570 (maksimumas)	8,8 – 15,6
Pramoninės patalpos	90–620 (vidurkis)	8,1 – 55,5
Bibliotekos	500	10
Mokyklos klasės	250	20
Sandėliavimo patalpos	400–20 000 (maksimumas)	0,25 – 12,5

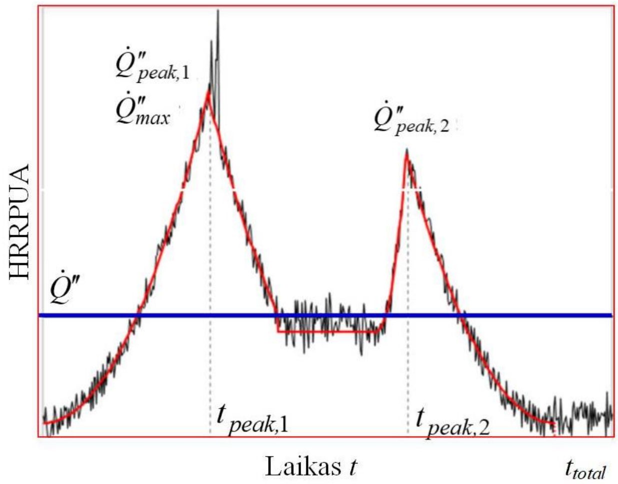
Gaisro augimo tarpsnio HRR reikšmės $\dot{Q}(t)$ (2.3) formulėje skaičiuojamos pagal išraišką $(\dot{Q}_{max}/t_g^2)\times t^2$. Dydžiai $\dot{Q}_{max}$ ir t_g nulems, kaip greitai auga gaisras. Jie buvo pasiūlyti JAV dokumente NFPA 204M suformulavus kvadratinį gaisro augimo modelį (NFPA, 1985):

$$\dot{Q}(t) = \alpha t^2 = \frac{\dot{Q}_{max}}{t_g^2} t^2, \tag{2.4}$$

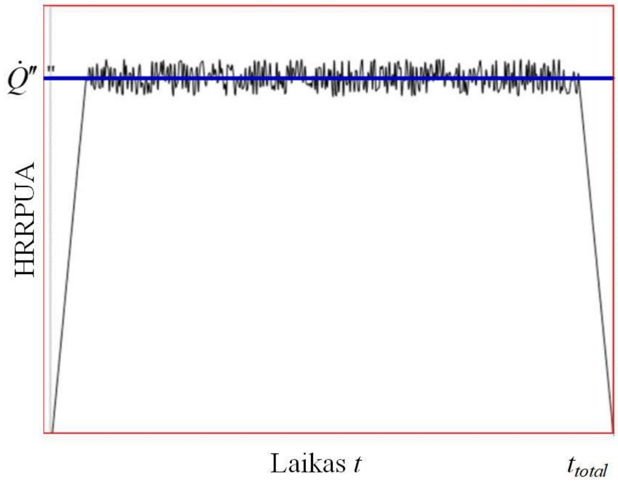
čia α yra gaisro augimo parametras (kW/s^2), kurio reikšmės yra energijos išskyrimo greičio $\dot{Q}(t)$ didėjimo iki maksimalios reikšmės $\dot{Q}_{max}$ = 1055 kW (1000 Btu/s) greičiai, kitaip tariant, energijos išskyrimo pagreičiai. Dokumentas NFPA 204M išskyrė keturias pagreičio α reikšmes (2.5 lentelė). Pagreičių α reikšmės 0,003 – 0,19 kW/s^2 susietos su įvairaus tipo patalpomis (2.5 lentelė). Naudojant šias reikšmes bandyta apibūdinti įvairios paskirties patalpų gaisro augimo greitį. Parametro α įtraukimas į (2.3) modelį naujos informacijos nesuteikia. Tai tiesiog kitų dviejų parametrų $\dot{Q}_{max}$ ir t_g funkcija.



$\dot{Q}''$ reikšmė nusakanti HRRPUA $\dot{Q}''(t)$ su kylančia ir krentančia dalimis

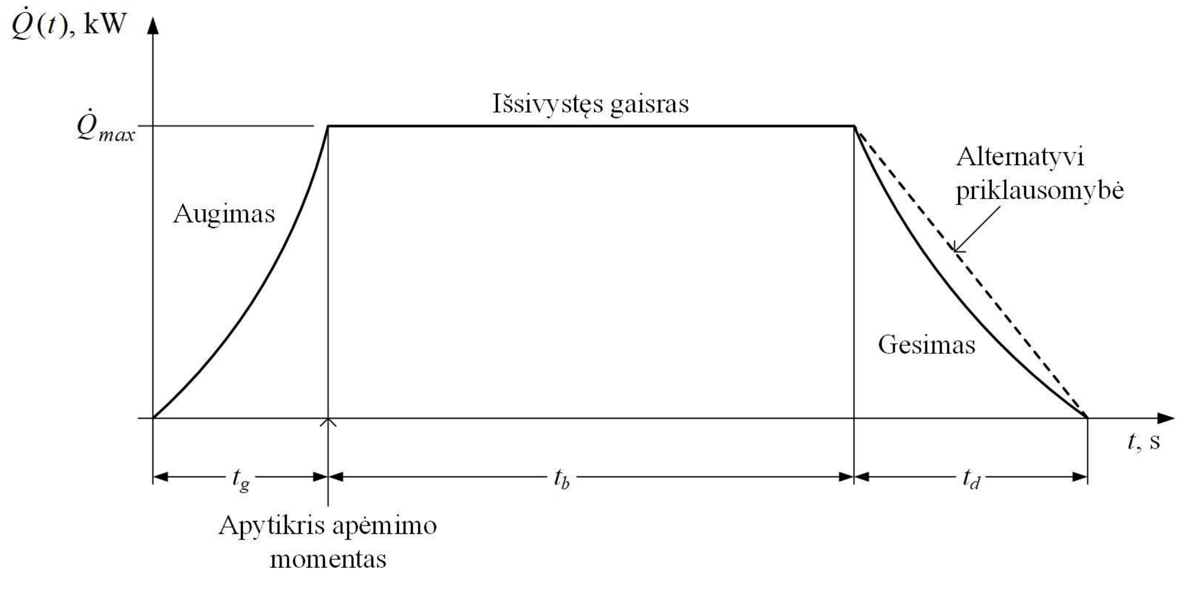


$\dot{Q}''$ reikšmė HRRPUA funkcijai $\dot{Q}''(t)$ su dviem maksimumais ir nusistovėjusia dalimi



Vidutinė HRRPUA reikšmė $\dot{Q}''$, nusakanti telkininį gaisrą

2.2 pav. HRRPUA funkcijos $\dot{Q}''(t)$ vidurkinimo pavyzdžiai (Hopkin et al., 2019)



2.3 pav. Projektavimui naudojama supaprastinta HRR funkcija (Ingason, 2009; Karlsson & Quintiere, 2000)

2.5 lentelė. Keturi gaisro augimo pagreičiai α ir laikai t_g, per kuriuos pasiekiama $\dot{Q}_{max}$ reikšmė 1055 kW (NFPA, 1985)

Gaisro augimo greitis	α, kW/s^2	Laikas pasiekti 1055 kW, s
Ypač greitas	0,19	75
Greitas	0,047	150
Vidutinis	0,012	300
Lėtas	0,003	600

2.6 lentelė. Gaisro augimo pagreičiai, siejami su įvairaus tipo patalpomis (Karlsson & Quintiere, 2000)

Patalpos tipas	Gaisro augimo greitis
Gyvenamoji patalpa	Vidutinis
Viešbutis, globos namai ir pan.	Greitas
Prekybos ir pramogų centrai	Ypač greitas
Mokyklos ir biurai	Greitas

HRRPUA reikšmės, pateiktos 2.3 ir 2.4 lentelėse, yra siejamos su maksimalia gaisro HRR reikšme, dar vadinama piku ir žymima simboliu $\dot{Q}''_{peak}$ (2.2 pav.). Laikoma, kad mažesnėms patalpoms, kaip antai, biurams, butams, medicinos įstaigų kambariams, ši reikšmė lygi 5 MW, o maksimali prekybos ir pramogų centrų gaisro HRR lygi 10 MW (Staffansson, 2010). Tai formaliai, aritmetiškai reiškia, kad sandauga $\dot{Q}'' \times A_{fire}$ netūrėtų viršyti piko $\dot{Q}''_{peak}$. 2.3 ir 2.4 lentelėse yra apskaičiuoti gaisro plotai A_{fire}, atitinkantys 5 MW reikšmę. Ši reikšmė taip pat yra siejama su vadinamuoju 5 MW projektiniu gaisru (angl. 5 MW *design fire*), vykstančiu $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ plote ir naudojamu projektuoti dūmų šalinimo sistemas patalpoms su sprinkleriais. Vertinant gaisro poveikį konstrukcijoms, 5 MW projektinio gaisro modelis netaikomas (Purkiss & Li, 2017).

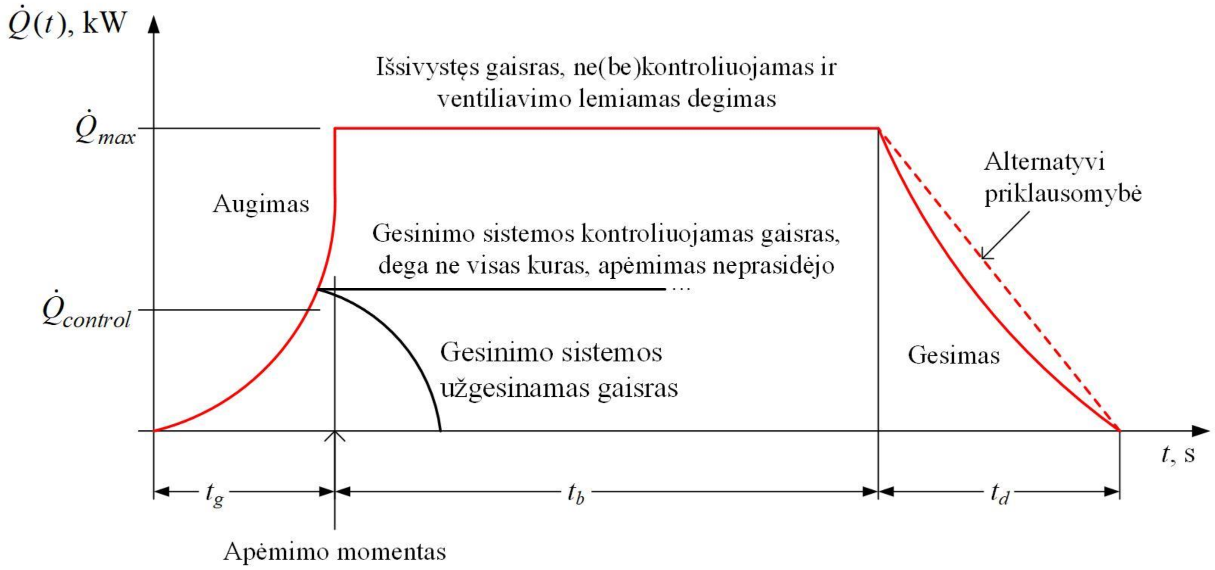
Apibendrinant galima pasakyti, kad gaisro apibūdinimas vienintele HRRPUA vidutine reikšme $\dot{Q}''$ yra labai grubus supaprastinimas. Vienintelis jo privalumas yra tas, kad $\dot{Q}''$ reikšmės buvo nustatytos labai įvairios paskirties gaisro patalpoms ir šios reikšmės modeliuojant gaisrą leidžia atsižvelgti į galimą gaisro plotą A_{fire}. Dar viena gaisro charakteristika, kurią reikia sieti su vidutiniu dydžiu $\dot{Q}''$ išreiškiamu gaisro modeliu, yra gaisro trukmė t_{total} (2.2 pav.). Aukščiau minėtos publikacijos konkrečių pasiūlymų, kaip parinkti t_{total} reikšmę, nepateikia (BSI, 2003, NFPA, 1985, Hopkin et al., 2019). Tačiau t_{total} yra natūrali, neatsiejama gaisro modelio dalis. Išnagrinėjus vidutiniu dydžiu $\dot{Q}''$ išreiškiamą modelį šio darbo požiūriu galima suformuluoti tokį įvesties kintamųjų vektorių $\boldsymbol{x}$:

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \dot{Q}'' \\ A_{fire} \\ t_{total} \end{pmatrix}. \qquad (2.5)$$

Vektoriaus $\boldsymbol{x}$ komponentai HRRPUA modelio kontekste nėra funkciškai susieti (yra nepriklausomi). Todėl juos galim naudoti atliekant jautrumo analizę.

Gaisro apibūdinimas projektine gaisro kreive, pavaizduota 2.3 pav. taip pat turi privalumų ir trūkumų. Ši kreivė yra gana grubi faktinio HRR proceso $\dot{Q}(t)$ idealizacija. Maksimali $\dot{Q}(t)$ reikšmė $\dot{Q}_{max}$, lygi 1055 kW (1000 Btu/s), atrodo dirbtina ir pagrįsta tik tuo, kad buvo pasiūlyta dokumente NFPA 204M ir atkartota vėlesniuose dokumentuose NFPA 92B (NFPA, 1985, 1991, 2009). Kita vertus, reikšmė $\dot{Q}_{max}$ tinka nusakyti tris gaisro proceso įvykius (momentus):

1. Pasiekus $\dot{Q}_{max}$ reikšmę, gaisras tampa lemiamas ventiliavimo ir degimas nusistovi.
2. Aktyvuojama gaisro gesinimo sistema, gaisras vyksta toliau energijai išsiskiriant kontroliuojamu $\dot{Q}_{max}$ greičiu (2.4 pav.).
3. Prasideda gesimo tarpsnis.



2.4 pav. Gesinimo sistemos įtaka gaisrui, nusakomam projektine gaisro kreive ($\dot{Q}_{control}$ – HRR reikšmė, kai aktyvuojama gesinimo sistema) (Ingason, 2009; Karlsson & Quintiere, 2000)

Projektinė gaisro kreivė nusako vieno objekto degimą ir nesiejama su vienetiniu kuro plotu. Tai reiškia, kad patalpoje ne vienu metu užsidegus kelių skirtingų rūšių kurui, ji nebetiks apytikriai nusakyti bendros gaisro energijos išskyrimą. Kiekvieno objekto degimą teks modeliuoti atskirai. Kita vertus, projektinė gaisro kreivė buvo pritaikyta nusakyti įvairių objektų degimą, tarkime, įvairių rūšių automobilių degimą (Ingason, 2009). Žmonių evakuacijai labai svarbus yra apėmimo momentas (angl., *flashover*). Jis projektinio gaisro kreivės modelyje nusakomas augimo tarpsnio pabaigos momentu t_g (2.4 pav.). Evakuacija turi baigtis per laiką t_g. Apėmimas prasideda, kai visas kuras, esantis gaisro patalpoje pradeda degti (pvz., SFPE, 2016). Tuomet dega visas esamas kuras, energijos išskyrimo greitis nedidėja ir nusistovi. Išsivysčiusio gaisro tarpsnis po apėmimo yra svarbus vertinant statybinių konstrukcijų atsparumą ugniai ir užtikrinant ugniagesių saugą.

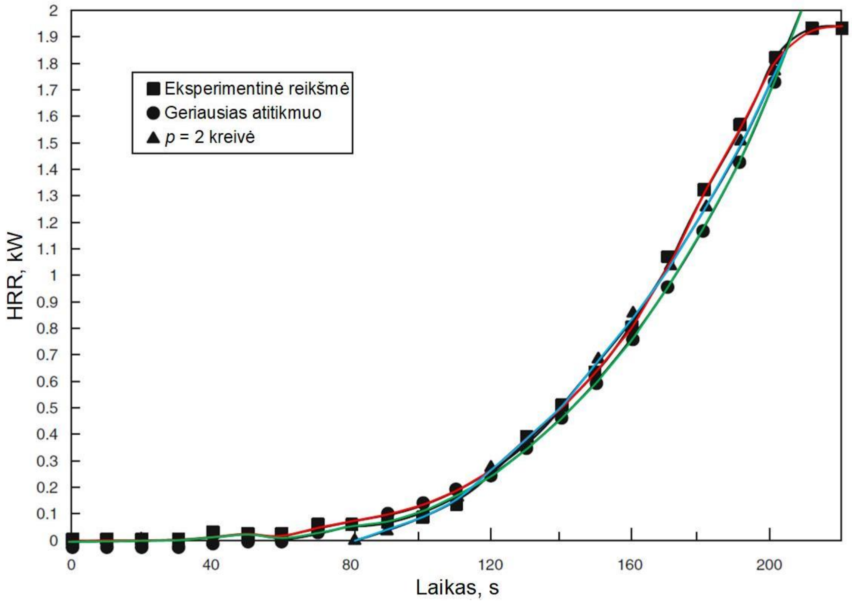
Taigi, norėdami taikyti projektinę gaisro kreivę konkrečiai patalpai, turime žinoti kokia bus $\dot{Q}_{max}$ reikšmė prasidėjus apėmimui, t.y. kokiu maksimaliu greičiu bus skleidžiama viso degančio kuro energija. Įprasta NFPA reikšmė $\dot{Q}_{max}$ = 1055 kW ≈ 1,0 MW tinka ne visiems degantiems objektams. Pavyzdžiui, įvairių rūšių automobilių $\dot{Q}_{max}$ reikšmė svyruoja 8 – 200 MW ribose (Ingason, 2009). Kai kurių baldų $\dot{Q}_{max}$ reikšmė kinta 1 – 6 MW intervale (SFPE, 2016, 1332 p.). Tačiau bet kuriuo atveju $\dot{Q}_{max}$ reikšmė gali būti tiesiogiai išmatuota kalorimetru. Kitas dydis, kurį įmanoma išmatuoti tiesiogiai yra apėjimo momentas t_g. Gavus $\dot{Q}_{max}$ ir t_g reikšmes, galima apskaičiuoti pagreičio α reikšmę, lygią $\dot{Q}_{max}/t_g^2$.

Sprendžiant praktinius uždavinius, bus žinoma tik patalpos paskirtis ir su ja susijusi α reikšmės kategorija bei ją atitinkanti pagreičio reikšmė (2.5 ir 2.6 lentelės). Dydį $\dot{Q}_{max}$ galima gauti iš eksperimentinių rezultatų (žr. 40.4 lentelę žinyne SFPE (2016)). Tada galima apskaičiuoti t_g reikšmę, lygią $(\dot{Q}_{max}/\alpha)^{1/2}$.

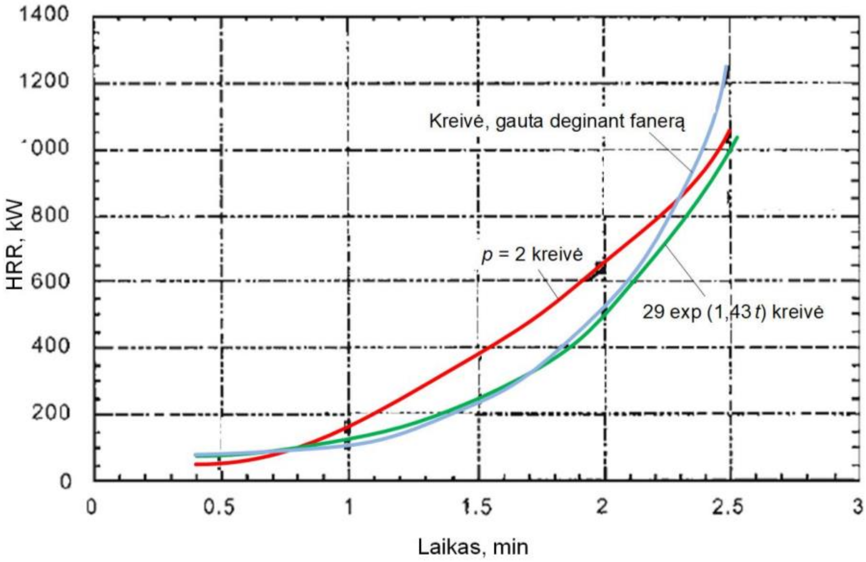
Dar vienas dydis gaisro augimo modelyje (2.4) yra laipsnio rodiklis „2“. Jis taip pat, kaip ir $\dot{Q}_{max}$ reikšmė 1055 kW, yra priimtas veikiau dėl patogumo. Kai kurioms kuro rūšims laipsnio rodiklis „2“ neužtikrina geriausio modelio ir eksperimentinių rezultatų atitikimo gaisro augimo tarpsnyje. Tokio neatitikimo pavyzdžiai yra HRR kreivės, gautos kalorimetre bandant kėdę ir faneros fragmentą (2.5 ir 2.6 pav.). Todėl NFPA dokumentuose yra siūloma bendresnė HRR išraiška gaisro augimo tarpsniui (NFPA, 2009):

$$\dot{Q}(t) = \alpha t^p, \tag{2.6}$$

čia p – modelio parametras, kurio reikšmė užtikrina geriausią modelio atitikimą eksperimentiniams duomenims.



2.5 pav. Empirinė HRR kreivė, gauta deginant kėdę kalorimetre, bei dvi teorinės kreivės, pritaikytos prie empirinių rezultatų (SFPE, 2016)



2.6 pav. Faneros bandymo kalorimetre HRR rezultatai bei kvadratinė ir eksponentinė kreivės pritaikytos prie šių rezultatų (Höglander & Sundström, 1997)

Apibendrinant galima pasakyti, kad atliekant gaisro modeliavimą pasitelkus projektinę gaisro kreivę ir dėmesį telkiant gaisro tarpsniui iki apėmimo, galima suformuluoti tokį įvesties kintamųjų vektorių $\boldsymbol{x}$:

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \alpha \\ \dot{Q}_{max} \\ p \end{pmatrix}. \tag{2.7}$$

Šio vektoriaus komponentus galima laikyti funkciškai nepriklausomais ir tą vektorių taikyti jautrumo analizei.

Baigiant šį skyrelį, natūraliai kyla klausimas, kurį iš dviejų skyrelyje aprašytų HRR modelių taikyti atliekant jautrumo analizę. Kitaip tariant, kurį iš dviejų vektorių $\boldsymbol{x}$, apibrėžtų lygtimis (2.5) ir (2.7), naudoti kaip įvestį į šios analizės algoritmus. Abu HRR modeliai labai supaprastintai išreiškia gaisro energijos išskyrimą. Tačiau, jei gaisro modeliavimas atliekamas vertinant į jį patekusių žmonių saugumą, taikyti galima tik projektinės gaisro kreivės modelį, pavaizduotą 2.3 ir 2.4 pav. ir apibrėžtą laiko tarpsnyje iki apėmimo reiškinio. Vidutinės HRRPUA reikšmės $\dot{Q}''$ modelis tam aplamai netinka. Taigi žemiau pateikti samprotavimai ir spręsti pavyzdžiai daugiausiai nagrinės atvejį, kai HRR procesas $\dot{Q}(t)$ yra modeliu, kurio parametrai formuoja (2.7) lygtimi išreikštą vektorių.

2.3. Gaisro modeliavimo rezultatų parengimas jautrumo analizei

2.3.1. Išvesties informacijos įvairovės ir sudėtingumo problema

Gaisro proceso prognozavimas skaičiuojant su zonų ir lauko modeliais suteikia nemažai informacijos, kurią toliau reikia apdoroti, siekiant panaudoti ją operacijų tyrinėjimo kontekste:

1. Gaisro procesas yra apibūdinamas išvesties kintamųjų vektoriumi $\boldsymbol{y} = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_{n_y})$, kuris gali turėti santykinai didelį skaičių n_y komponentų (gaisro proceso charakteristikų).
2. Dauguma gaisro proceso charakteristikų y_j yra laiko funkcijos ir tai galima pažymėti simboliu $y_j(t)$.
3. Matematiškai zonų ir lauko modeliai turi diferencialinių lygčių sistemų pavidalą ir tos sistemos sprendžiamos diskretizuojant parinktą gaisro laiką, tarkime t_{fire}, į santykinai didelį skaičių n_τ intervalų $(0, t_1($, $(t_1, t_2($, ... , $(t_{\tau-1}, t_\tau($, ... , $[t_{n_\tau-1}, t_{n_\tau}[$. Gaisro proceso charakteristikos apskaičiuojamos kiekvienam laiko momentui t_τ (τ = 1, 2, ... , n_τ). Taip gaunamos nuo laiko priklausančios gaisro proceso charakteristikos y_j reikšmių laiko seka $y_j(t_\tau)$ (τ = 1, 2, ... , n_τ) (angl. *time history*). Šis rezultatas yra iliustruotas 2.5 ir 2.6 pav.

Taigi, gaisro modeliavimo rezultatai gaunami taikant tokią palaipsniui išskleidžiamą priklausomybių seką:

$$y = f(\boldsymbol{x}), \tag{2.8a}$$

čia $f(\cdot)$ – skaliarinė funkcija, siejanti gaisro charakteristiką y su įvesties vektoriumi $\boldsymbol{x}$;

$$\boldsymbol{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_j \\ \vdots \\ y_{n_y} \end{pmatrix} = \boldsymbol{f}\,(\boldsymbol{x}) = \begin{pmatrix} f_1(\boldsymbol{x}) \\ f_2(\boldsymbol{x}) \\ \vdots \\ f_j(\boldsymbol{x}) \\ \vdots \\ f_{n_y}(\boldsymbol{x}) \end{pmatrix}, \tag{2.8b}$$

čia $\boldsymbol{f}\,(\cdot)$ – vektorinė funkcija, siejanti gaisro charakteristikas y_j su įvesties vektoriumi $\boldsymbol{x}$;

$$y(t) = f\,(\boldsymbol{x}\,|\,t), \tag{2.8c}$$

čia $y(t)$ – gaisro charakteristika, išreikšta kaip laiko funkcija, $f\,(\cdot\,|\,t)$ – skaliarinė funkcija kurios argumentas yra gaisro proceso laikas t;

$$\boldsymbol{y}\,(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_j(t) \\ \vdots \\ y_{n_y}(t) \end{pmatrix} = \boldsymbol{f}\,(\boldsymbol{x}\,|\,t) = \begin{pmatrix} f_1(\boldsymbol{x}\,|\,t) \\ f_2(\boldsymbol{x}\,|\,t) \\ \vdots \\ f_j(\boldsymbol{x}\,|\,t) \\ \vdots \\ f_{n_y}(\boldsymbol{x}\,|\,t) \end{pmatrix}, \tag{2.9a}$$

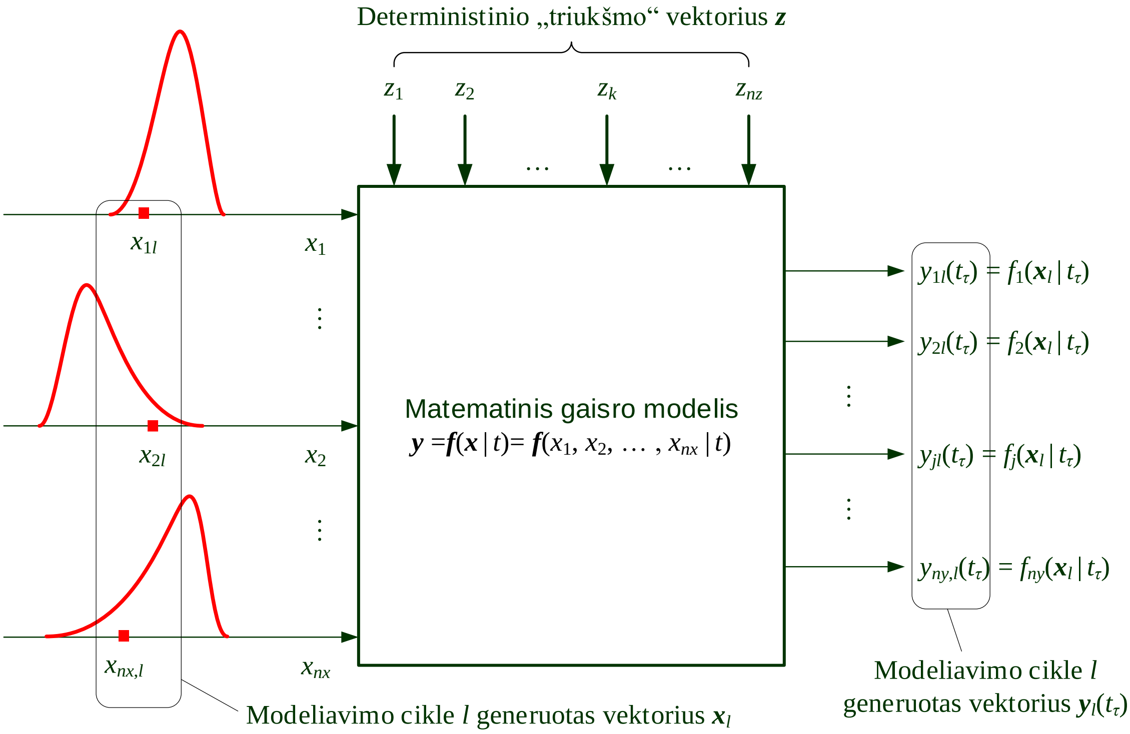
ir

$$\boldsymbol{y}_l\,(t_\tau) = \begin{pmatrix} y_{1l}(t_\tau) \\ y_{2l}(t_\tau) \\ \vdots \\ y_{jl}(t_\tau) \\ \vdots \\ y_{n_y l}(t_\tau) \end{pmatrix} = \boldsymbol{f}\,(\boldsymbol{x}_l\,|\,t_\tau) = \begin{pmatrix} f_1(\boldsymbol{x}_l\,|\,t_\tau) \\ f_2(\boldsymbol{x}_l\,|\,t_\tau) \\ \vdots \\ f_j(\boldsymbol{x}_l\,|\,t_\tau) \\ \vdots \\ f_{n_y}(\boldsymbol{x}_l\,|\,t_\tau) \end{pmatrix}, \tag{2.9b}$$

bei

$$\boldsymbol{x}_l = (x_{1l}, x_{2l}, \ldots, x_{il}, \ldots, x_{n_x l}), \tag{2.10}$$

čia $\boldsymbol{y}_l\,(t_\tau)$ – gaisro charakteristikų vektoriaus reikšmė, apskaičiuota modeliavimo cikle l gaisro momentui (modeliavimo žingsniui) t_τ ; $y_{jl}(t_\tau)$ – gaisro charakteristikos j reikšmė, cikle l ir modeliavimo momentu t_τ ; $f_j(\boldsymbol{x}_l\,|\,t_\tau)$ – vektorinės funkcijos $\boldsymbol{f}(\cdot)$ komponentas j , gautas modeliavimo žingsnyje t_τ įstatant vektorių x_l , generuotą modeliavimo cikle l (2.7 pav.).

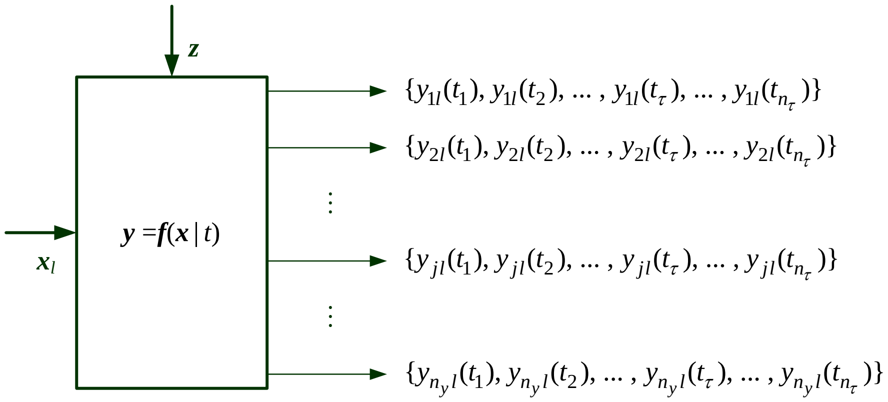


2.7 pav. Grafinė gaisro modeliavimo ciklo l, kuriame apskaičiuojama išvesties kintamųjų vektorių seka $\{\boldsymbol{y}_l(t_1),\ \boldsymbol{y}_l(t_2),\ \ldots,\boldsymbol{y}_l(t_\tau),\ \ldots,\ \boldsymbol{y}_l(t_{n_\tau})\}$, iliustracija, atitinkanti skaičiavimo su modeliu $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}\,|\,t)$ žingsnį t_τ

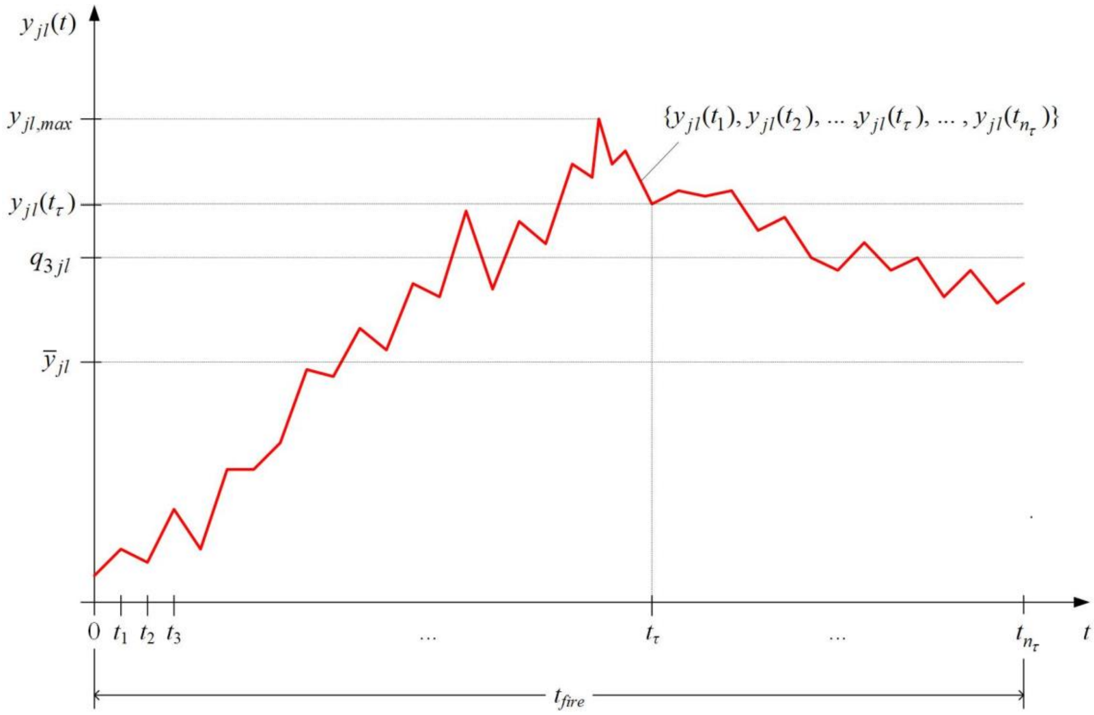
Kadangi kiekviename stochastinio modeliavimo cikle l su modeliu $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}\,|\,t)$ skaičiuojama n_τ kartų, galutinis modeliavimo rezultatas yra gaisro charakteristikų $y_j(t)$ reikšmių sekos $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ (j = 1, 2, … , n_y). Taigi, lakoniškiausias grafinis stochastinio modeliavimo ciklo l apibūdinimas gali būti toks, kaip parodyta 2.8 pav.

Gaisro charakteristikų reikšmių sekos $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ dar yra vadinamos laiko sekomis (angl. *time histories*). Grafinė laiko sekos schema parodyta 2.9 pav. Laiko sekos suteikia informacijos apie charakteristikos $y_{jl}(t)$ su numeriu j kitimą gaisro metu, apskaičiuotą modeliavimo cikle l. Tačiau tos informacijos kiekis paprastai būna labai didelis, nes diskretizuojant parinktą gaisro laiką t_{fire} siekiama, kad laiko intervalų ($t_{\tau-1}$, t_τ(plotis (pločiai) $t_\tau - t_{\tau-1}$ būtų kiek galima mažesni. Šį didelį kiekį informacijos yra sunku integruoti į tokias procedūras, kaip jautrumo analizė. Tokios procedūros paprastai reikalauja apskaičiuoti dviejų skaliarinių dydžių poras

(x_{il}, y_{jl}). Todėl reikia rasti būdą, pašalinti laiko rodiklį t iš rezultato $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), ... ,y_{jl}(t_\tau), ... , y_{jl}(t_{n_\tau})\}$. Šis uždavinys nėra trivialus, nes laiko seką reikia išreikšti vienu dydžiu.



2.8 pav. Modeliavimo ciklo l teikiama informacija, išreikšta gaisro charakteristikų reikšmių sekų $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), ... ,y_{jl}(t_\tau), ... , y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ pavidalu



2.9 pav. Grafinė sekos $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), ... ,y_{jl}(t_\tau), ... , y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ ir jos pagrindu skaičiuojamų dydžių iliustracija

2.3.2. Išvesties informacijos išreiškimas skaliariniais dydžiais

Gavus stochastinio modeliavimo žingsnio l rezultatą 2.8 pav. pavaizduotomis laiko sekų $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), ... ,y_{jl}(t_\tau), ... , y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ pavidalu, kyla klausimas, kaip trumpiau, lakoniškiau nusakyti šiomis sekomis išreiškiamą informaciją. Problema kyla iš to, kad jautrumo analizės metodai, pagrįsti stochastiniu modeliavimu, remiasi skaliarinių dydžių porų (x_{il}, y_l) (l = 1, 2, ... , N) skaičiavimu. Šios poros komponuojamos ir stochastinio modeliavimo būdu gautų įvesties ir išvesties vektorių porų ($\mathbf{x}_l$, $\mathbf{y}_l$), jeigu nagrinėjamas daugiau kaip vienas išvesties dydis, t. y. vektorius $\mathbf{y}_l$ turi pavidalą $(y_{1l}, y_{2l}, \ldots, y_{jl}, \ldots, y_{n_y l})$, . Taigi, kyla klausimas, kaip nusakyti seką $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$, susijusią su išvesties kintamuoju y_l vienu skaliariniu dydžiu.

Ankstesniame mūsų darbe buvo pasiūlyta idėja, seką $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ interpretuoti kaip statistinę imtį ir ją nusakantį skaliarinį dydį išreikšti kaip imties charakteristiką (Skorka, 2022). Taigi, seką $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ galima nusakyti vienu iš trijų rodiklių:

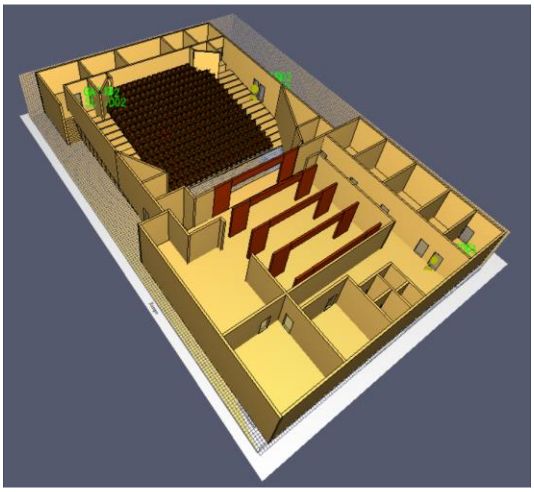
vidurkiu $\bar{y}_{jl} = \dfrac{1}{n_\tau} \sum_{\tau=1}^{n_\tau} y_{jl}(t_\tau)$, (2.11)

maksimumu $y_{jl,max} = \max_\tau \{y_{jl}(t_\tau),\ \tau = 1, 2, \ldots, n_\tau\}$, (2.12)

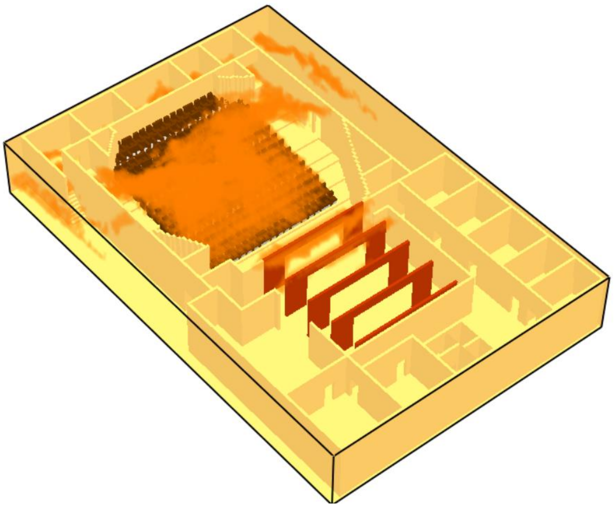
viršutiniu sekos $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ kvartiliu $q_{3jl} = y_{([n_\tau \cdot 0{,}75]+1)}$, (2.13)

čia $y_{([n_\tau \cdot 0{,}75]+1)}$ yra sekos elementas su numeriu $[n_\tau \cdot 0{,}75]+1$. Dydžiai $\bar{y}_{jl}$, $y_{jl,max}$ ir Q_{3jl} yra iliustruoti 2.9 pav. Mūsų nuomone, geriausia skaliarinė charakteristika, atstovaujanti seką $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ yra kvantilis q_{3jl}. Maksimali reikšmė $y_{jl,max}$ būna labai nestabili ir dažnai lemiama ne tik modeliuojamo gaisro pobūdžio, bet ir gaisro modelio sprendimo algoritmo ypatybių. Vidurkis $\bar{y}_{jl}$ yra per daug konservatyvi, žema reikšmė, ypač kai sekos elementai medianos $y_{([n_\tau \cdot 0{,}5]+1)}$ atžvilgiu išsidėstę santykinai simetriškai.

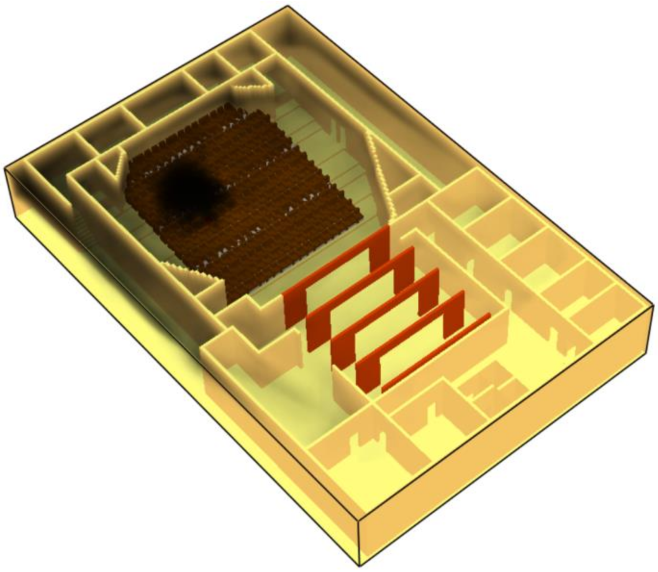
Laiko sekų $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ nusakymas su statistinėmis charakteristikomis susidūrė su ta problema, kad sekų pobūdis gali būti labai įvairus. Siekiant tai ištirti, buvo atliktas gaisro modeliavimas žiūrovų salėje ir gretimose patalpose. Salė parodyta 2.10 pav. a. Žiūrovų salės gaisro modeliavimas atliktas FDS programa, kuri automatiškai sudaro laiko sekų brėžinius. Modeliuojamame pastate buvo išdėstytos keturios virtualios termoporos temperatūros reikšmėms skaičiuoti, keturi virtualūs radiometrai šiluminei spinduliuotei vertinti ir keturi virtualūs prietaisai efektyviajai dozei FED skaičiuoti. Taigi, atlikus gaisro skaičiavimą buvo gauta 12 laiko sekų, pavaizduotų 2.9 – 2.11 pav.



(a) žiūrovų salės modelis, sudarytas FDS programa

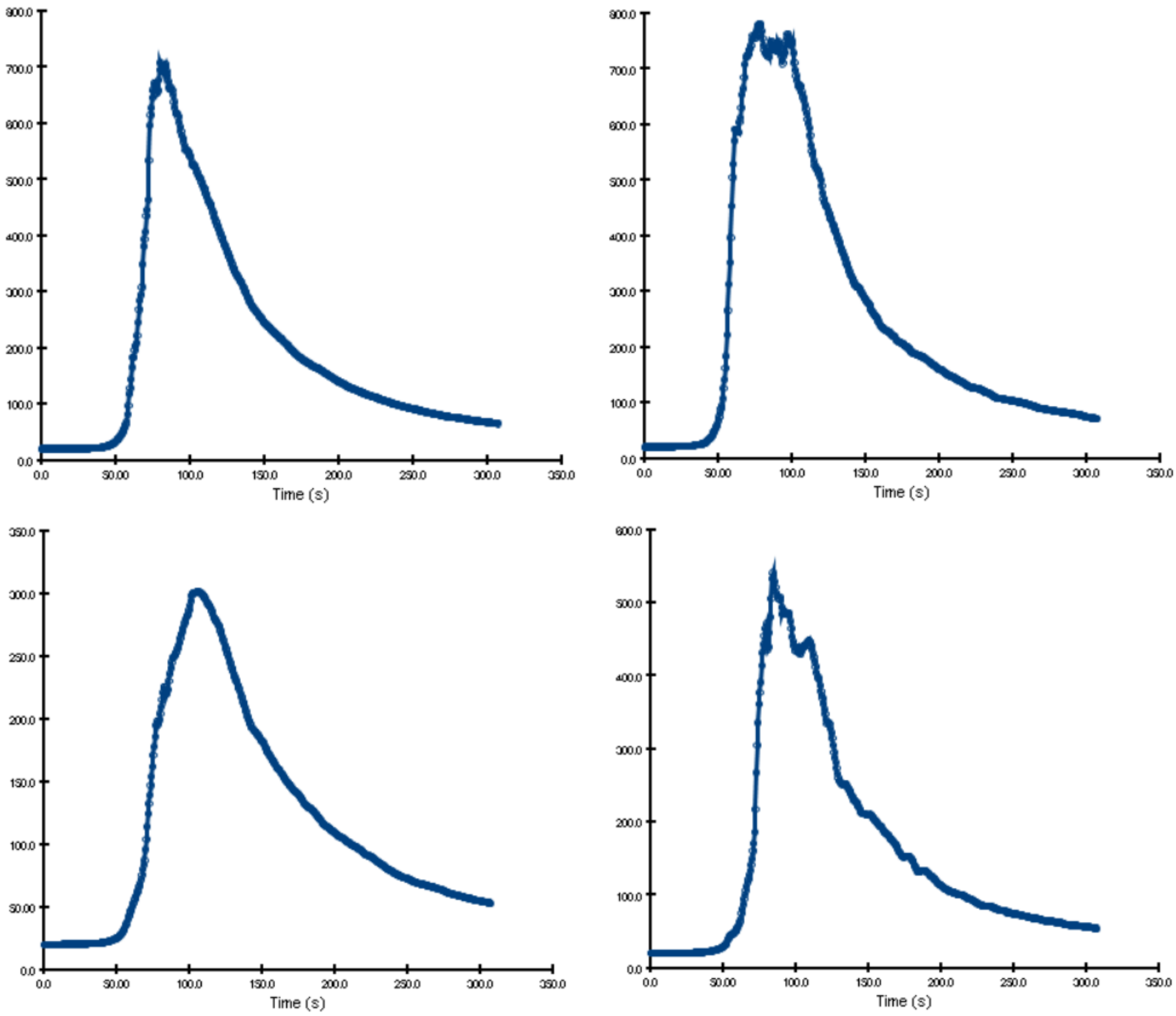


(b) liepsnos plitimas gaisro metu, gautas vizualizuojant su SMOKEVIEW programa



(c) dūmų plitimas, gautas su SMOKEVIEW programa

2.10 pav. Gaisro modeliavimas žiūrovų salėje

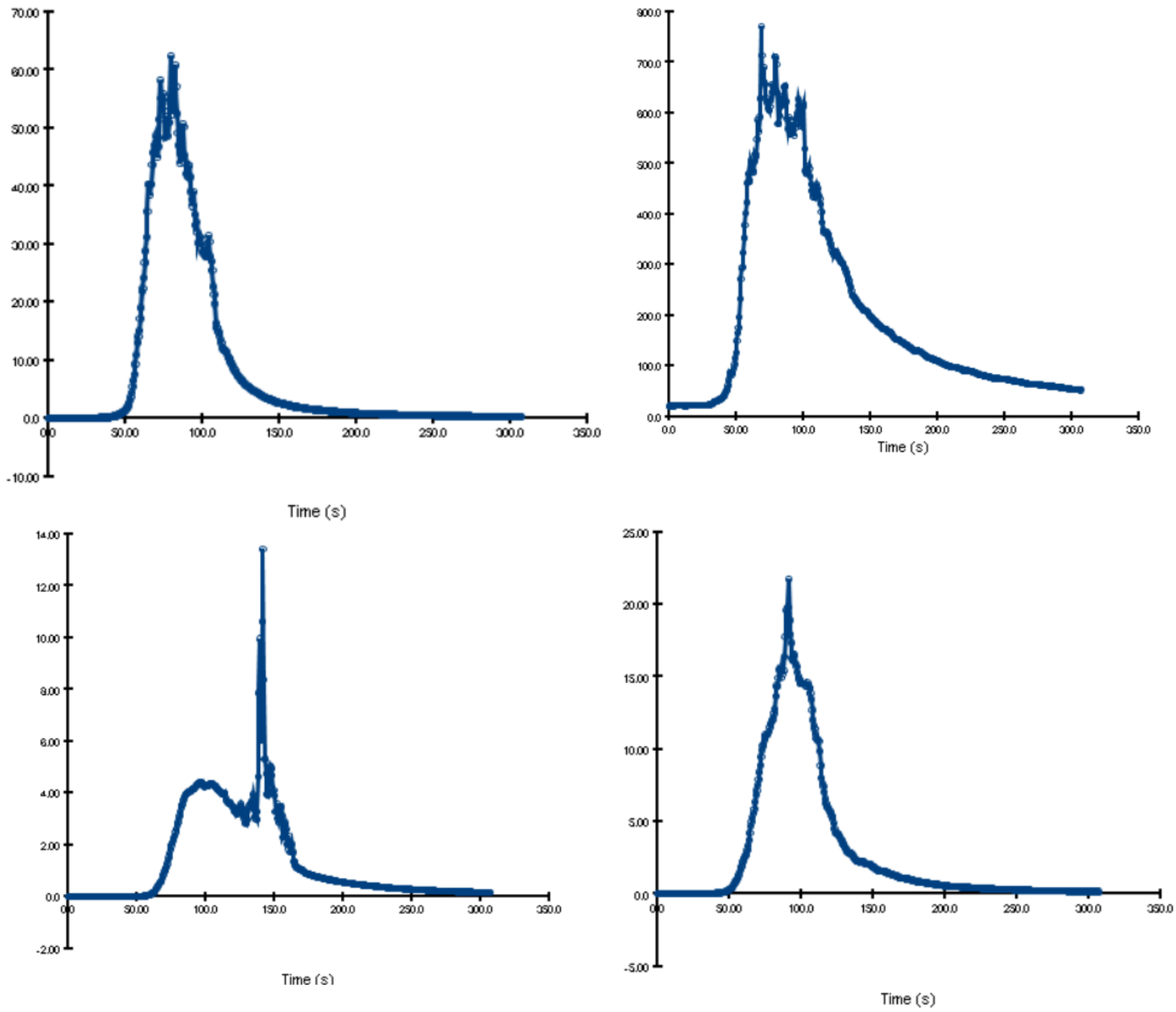


2.11 pav. Keturios temperatūros laiko sekos, užfiksuotos virtualiomis termoporomis, naudotomis modeliuojant žiūrovų salės gaisrą (vertikaliosios ašies dimensija visur yra °C)

Panagrinėjus šias tris laiko sekų grafikų grupes matyti, kad

1. Temperatūros laiko sekos keturiose gaisro ištiktos salės vietose pagal savo charakterį skyrėsi mažai (2.11 pav.). Visos sekos turi kylančią ir krentančią dalis, o temperatūros reikšmės panašios.
2. Šiluminės spinduliuotės laiko sekos aiškiai skiriasi viena nuo kitos (2.12 pav.). Viršutinės dvi turi osciliuojančią maksimalių reikšmių dalį, o apatinė dešinioji aiškiai išreikštą maksimalią reikšmę. Tačiau apatinės kairiosios laiko sekos grafikas iš esmės skiriasi nuo likusių trijų.
3. Efektyviosios dozės FED reikšmių laiko sekos, pavaizduotos 2.11 pav. pagal charakterį nesiskiria. Tačiau jos iš esmės kitokios, nei kylančia ir krentančią dalį turinčios temperatūros ir spinduliuotės kreivės. FED kreivių skirtumas pirmiausiai yra matomas žiūrint, kaip greitai auga ta kreivė. Tai atspindi aptariamų kreivių tiesumo laipsnis.

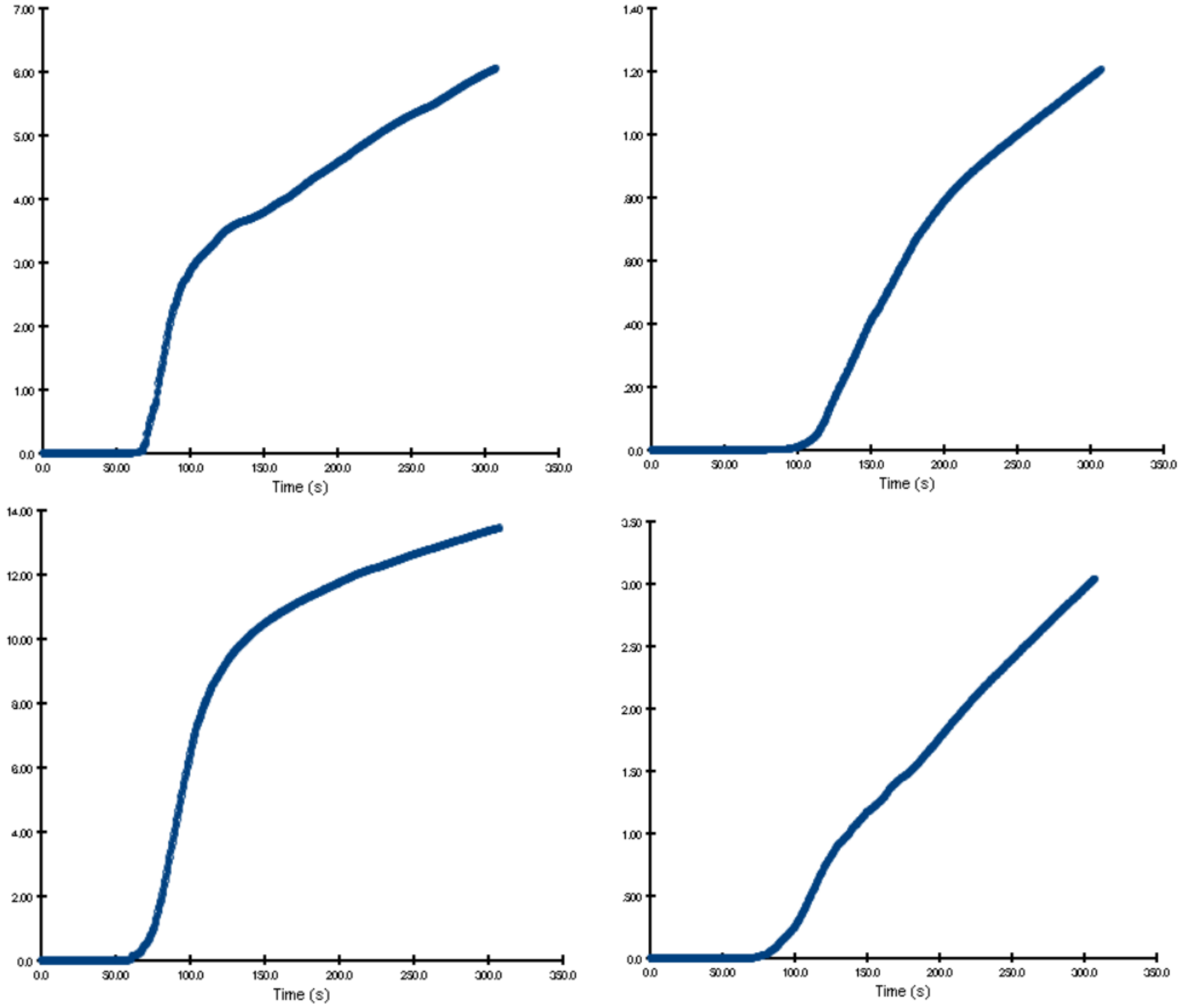
Gaisro modeliavimo rezultatų sekų įvairovė reiškia, kad kiekvienos sekos apibūdinimas tik vienu skaliariniu dydžiu yra sudėtingas uždavinys. Galima intuityviai spėti, kad vieno dydžio vargu ar pakaks. Tačiau jautrumo analizės algoritmai reikalauja, kad kiekviena iš sekų $\{y_{jl}(t_1), y_{jl}(t_2), \ldots, y_{jl}(t_\tau), \ldots, y_{jl}(t_{n_\tau})\}$ (j = 1, 2, ... , n_y) būtų nusakyta tik vienu dydžiu, siejamu su įvesties vektoriaus reikšme x_l, generuota stochastinio modeliavimo cikle l.



2.12 pav. Keturios šiluminės spinduliuotės laiko sekos, apskaičiuotos užprogramavus virtualius radiometrus, naudotomis modeliuojant žiūrovų salės gaisrą (vertikalios ašies dimensija visur yra kW/m^2)

Mūsų idėja buvo apeiti šią problemą siejant jautrumo analizės rezultatus su konkrečiu laiko momentu t_τ. Modeliavimo cikle l suskaičiuojama išvesties kintamojo reikšmę $y_{jl}(t_\tau)$. Ši reikšmė ir įvesties vektoriaus x_l komponento reikšmė x_{il} sudaro porą $(x_{il}, y_{jl}(t_\tau))$, tinkamą jautrumo analizei atlikti. Pakartojus stochastinio modeliavimo ciklą N_l kartų, gausime įvesties vektoriaus $\boldsymbol{x}$ reikšmių aibę $\{\boldsymbol{x}_l, l = 1, 2, \ldots, N_l\}$ ir išvesties kintamojo y_j reikšmių, siejamų su laiko momentu t_τ, aibę

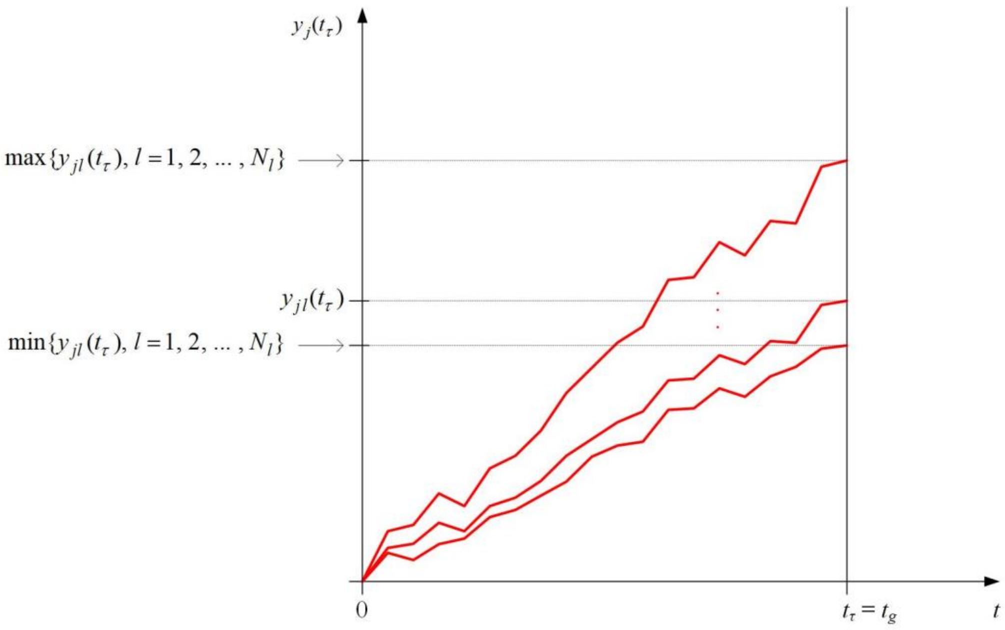
$\{y_{jl}(t_\tau), l = 1, 2, \ldots, N_l\}$. Šios aibės sudarymas yra grafiškai iliustruotas 2.13 pav. Remiantis 2.2.1 skyrelyje pateiktais samprotavimais, priimsime, kad laiko momentas t_τ, kuriam bus sudaroma aibė $\{y_{jl}(t_\tau), l = 1, 2, \ldots, N_l\}$ yra gaisro apėmimo momentas t_g (2.3 ir 2.4 pav.).



2.13 pav. Keturios efektyviosios dozės FED reikšmių laiko sekos (vertikalios ašys dimensijos neturi, nes dozė FED yra bematis dydis)

2.3.3. Išvesties informacijos detalizavimas

Išvesties informacijos supaprastinimas pagal 2.14 pav. pavaizduotą schemą rėmėsi sprendimu gaisrą modeliuoti atsižvelgiant į galimą žalą žmonėms, būsiantiems gaisro ištiktame pastate. Modeliavimo laiko trukmė buvo laikas nuo gaisro pradžios iki apėmimo momento t_g (2.2.2 skyrelis). Tai kartu yra ir gaisro augimo tarpsnio pabaigos momentas. Žmonės privalo evakuotis iš pastato iki apėmimo momento t_g. Evakavimosi eigai gali turėti nepakeliamų sąlygų susidarymas evakuacijos keliuose. Todėl modeliuojant gaisrą išvesties kintamaisiais y_j buvo pasirinktos tos gaisro charakteristikos, kurios nusako gaisro pakeliamumą (angl. *tenability*) ir matomumą evakuacijos keliuose:



2.14 pav. Schema, vaizduojanti išvesties kintamojo y_j reikšmių sekas, gautas stochastiškai modeliuojant, baigiamas laiko momentu t_τ ir naudojamas sudaryti šio kintamojo reikšmių aibę $\{y_{jl}(t_\tau), l=1, 2, \dots, N_l\}$, skirtą jautrumo analizei

1. Patalpos temperatūra $T_v(t)$.
2. Šiluminės spinduliuotė žmogaus galvos aukštyje, $R_v(t)$.
3. Efektyvioji dozės $FED_v(t)$.
4. Optinis gylis $OD_v(t)$.

Indeksas v sieja šias charakteristikas su virtualių jas matuojančių prietaisų išdėstymu vertikaliose ašyse tarp grindų ir lubų. Charakteristikos buvo matuojamos keliose modeliuojamo pastato vietose, todėl v > 1. Šiame skyrelyje indekso v dėl paprastumo nenaudosime. Dabar galime konkretizuoti išvesties vektorių $y(t)$, kurio bendra forma išreikšta (2.9a) lygtimi.

$$\boldsymbol{y}(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} T(t) \\ R(t) \\ FED(t) \\ OD(t) \end{pmatrix}. \tag{2.14}$$

Stochastinio modeliavimo l gaisro modeliavimas buvo atliekamas iki apėmimo momento t_g ir taip gaunamos reikšmės $y_{1l}(t_g) \equiv T_l(t_g)$, $y_{2l}(t_g) \equiv R_l(t_g)$, $y_{3l}(t_g) \equiv FED_l(t_g)$ ir $y_{4l}(t_g) \equiv OD_l(t_g)$. Tos reikšmės buvo naudojamos formuoti poras su įvesties vektoriaus x_l komponentais $x_{1l} \equiv \alpha_l$, $x_{2l} \equiv \dot{Q}_{max,l}$ ir $x_{3l} \equiv p_l$. Jos naudotos jautrumo analizei atlikti.

3. JAUTRUMO ANALIZĖS IR STOCHASTINIO GAISRO MODELIAVIMO TAIKYMO UŽDAVINIAI

3.1. Tyrimo metu spręsti uždaviniai

Siekiant integruoti matematinį gaisro proceso modeliavimą į operacijų tyrinėjimą, antrame šio darbo skyriuje buvo išnagrinėta, kaip įtraukti gaisro modelį į stochastinio modeliavimo ciklą. Šiame skyriuje stochastinis modeliavimas pritaikytas sprendžiant du uždavinius, susijusius su gaisro prognozavimu:

1. Jautrumo analizės uždavinys, skirtas nustatyti degimo procesą lemiančių veiksnių įtaką gaisro aplinkos pakeliamumui.
2. Stochastinio modeliavimo uždavinys, skirtas nustatyti, kokią įtaką daro realaus gaisro energijos atidavimo greičio (HRR) reikšmių nuokrypiai nuo idealizuoto projektinio gaisro HRR.

Atliekant stochastinį modeliavimą, buvo generuojamos gaisro modelio išvesties kintamųjų reikšmės, nusakančios gaisro aplinkos pakeliamumą. Tai buvo temperatūros, šiluminės spinduliuotės, efektyviosios dozės ir optinio gylio reikšmės. Šių reikšmių imtis galima buvo panaudoti vertinant gaisro modelio išvesties neapibrėžtumą. Tačiau šio uždavinio nesprendėme, nes gaisro modelio įvesties dydžių reikšmės buvo generuojamos taikant randomizavimo procedūrą. Ji yra techninė priemonė, kuri iš esmės skiriasi nuo statistinių duomenų apie įvesties dydžius rinkimo, tų duomenų aprašymo tikimybių skirstiniais ir įvesties dydžių generavimo iš šių skirstinių. Išvesties informacija, gauta randomizuojant įvesties dydžius, nėra labai vertinga.

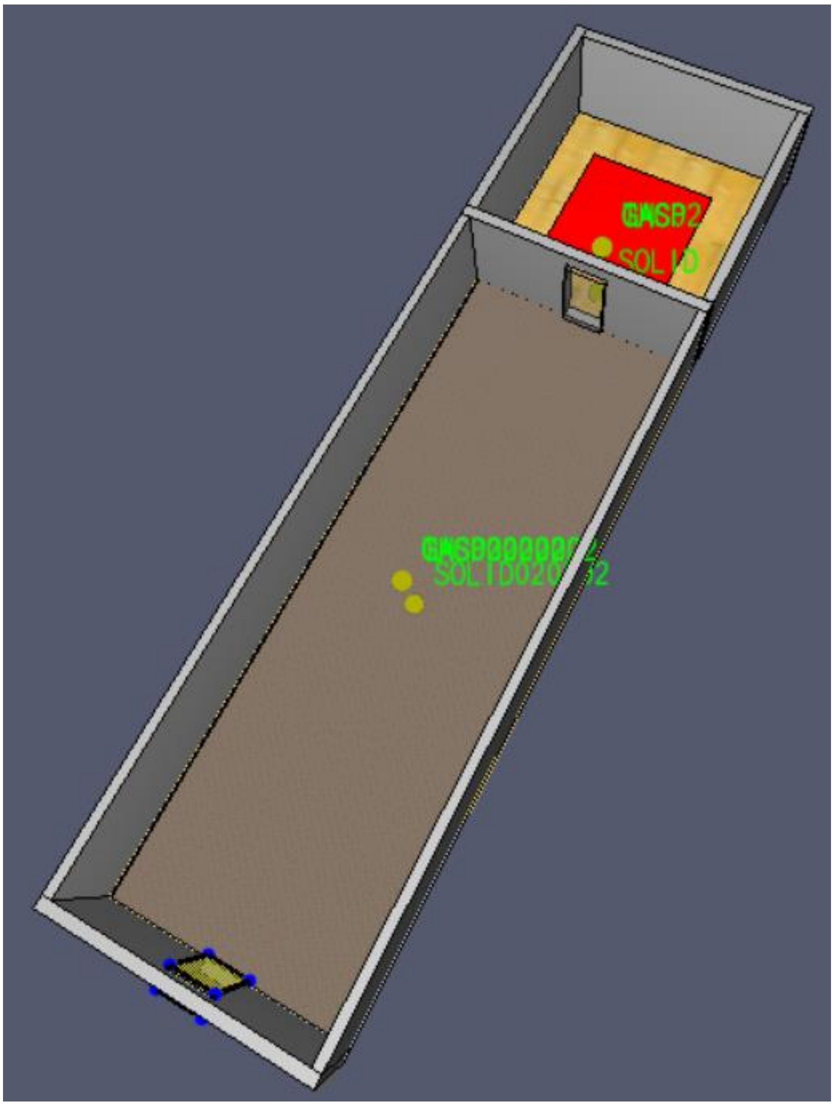
Abu anksčiau išvardinti uždaviniai spręsti nagrinėjant tą patį, santykinai nesudėtingą pastatą, aprašytą tolesniame poskyryje. Nesudėtingas pastatas buvo pasirinktas daugiausiai dėl to, kad jo gaisro modeliavimas kompiuteriu netruktų per ilgai. Stochastinis modeliavimas reikalauja kartoti į jo ciklą integruotą gaisro modeliavimą daug kartų, kiekvieną kartą generuojant statistiškai besiskiriantį įvesties kintamųjų reikšmių derinį. Panašiais samprotavimais apie modeliuojamo objekto paprastumą remiasi ir giminingi stochastinio gaisro modeliavimo uždaviniai, kurių sprendimą galima rasti mokslinėje literatūroje (2.2.1 skyrelis).

3.2. Tyrimams naudotas gaisro ištikto pastato modelis

3.2.1. Nagrinėjamos pastato patalpos

Gaisro modeliavimui parenkamas prekybos paskirties pastatas (3.1 pav.). Visos patalpos išdėstytos 20,5 m ilgio ir 5,5 m pločio plote. Gaisro proceso modeliavimui naudojami virtualūs prietaisai (jutikliai), matuojantys temperatūrą, šiluminę spinduliuotę, efektyviąją dozę ir optinį gylį, yra išdėstyti gaisro patalpoje prieš evakuacinį išėjimą ir gretimos patalpos centre. Patalpos aukštis

2,4 m. Patalpos angų matmenys yra 0,9 m pločio ir 2,00 m aukščio. Gaisro modeliavimui naudojamo tinklelio dydis yra 0,10×0,10×0,10 m. Bendras patalpų plotas yra 112 m^2. Viso pastato sienos yra pagamintos iš gipso kartono, mažesniosios patalpos grindys yra pušinės, o didžiosios patalpos grindys išklotos plytelėmis.



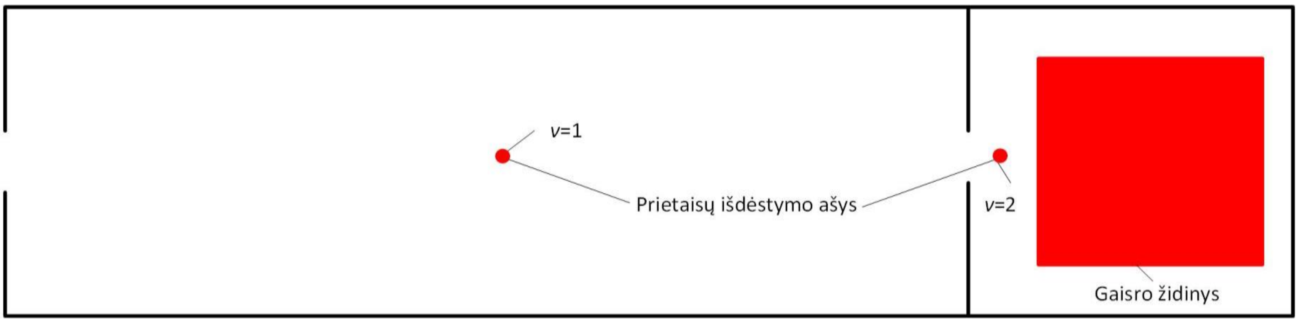
3.1 pav. Gaisro modeliavimui pasirinkto objekto planas

3.2.2. Nagrinėti išvesties dydžiai ir jų matavimo modeliavimas

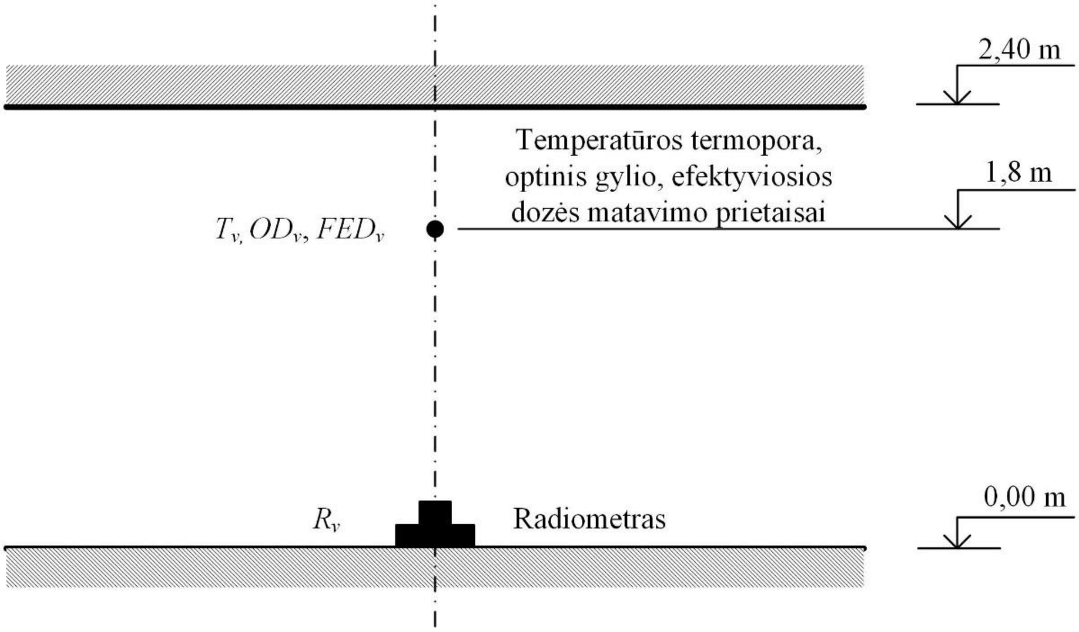
Atliekant skaičiavimus buvo pasirinktas prekybos paskirties pastatas. Didžioji patalpa yra priimama kaip prekybos salė, o mažesnioji – sandėlis. Gaisro židinio vieta yra sandėlio centre. Židinys yra 9 m^2 ploto, projektuojamo gaisro šilumos išsiskyrimo greitis programuojamas 555kW/m^2.

Virtualiųjų gaisro parametrų matavimo vertikalės įrengiamos sandėlyje šalia išėjimo ir prekybos salės centre (3.2 pav.). Prietaisų (jutiklių) išdėstymo vietos (ašys) buvo žymimos kintamuoju v, kurio reikšmės buvo 1 ir 2. Kiekvienoje iš dviejų ašių buvo išdėstyta po keturis prietaisus pagal schemą, paaiškintą 3.3 pav.

3.2 pav. Nagrinėjamų patalpų modelis, sudarytas skaičiuoti su FDS programa

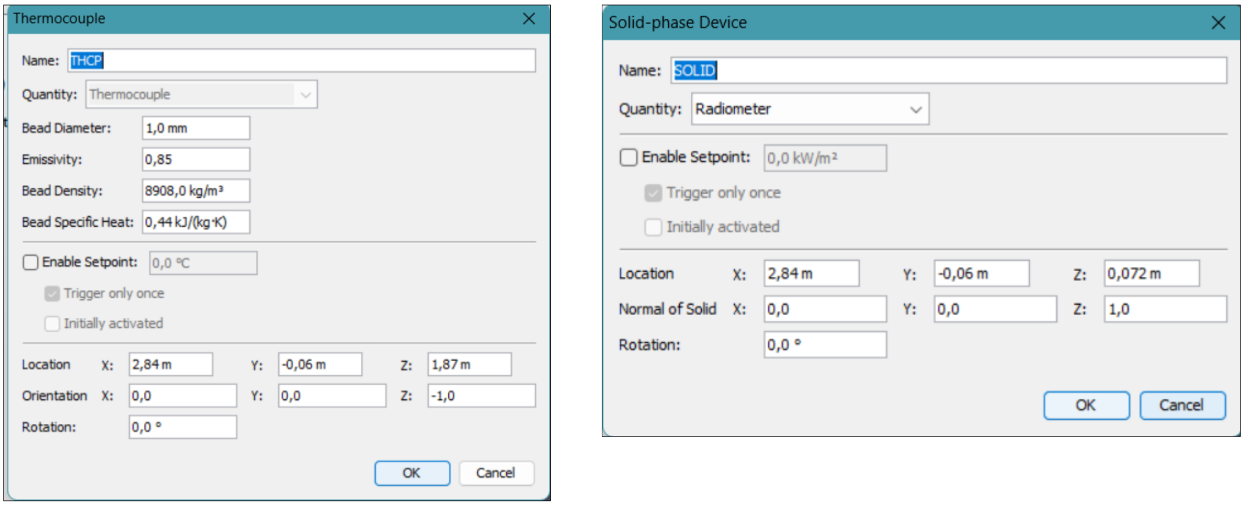


3.3 pav. Schema, vaizduojanti keturias gaisro kilimo vietas bei tris grupes vertikaliai išdėstytų prietaisų (jutiklių), kuriais gaisro modeliavimo metu buvo matuojami su žmonių sauga susiję gaisro poveikiai

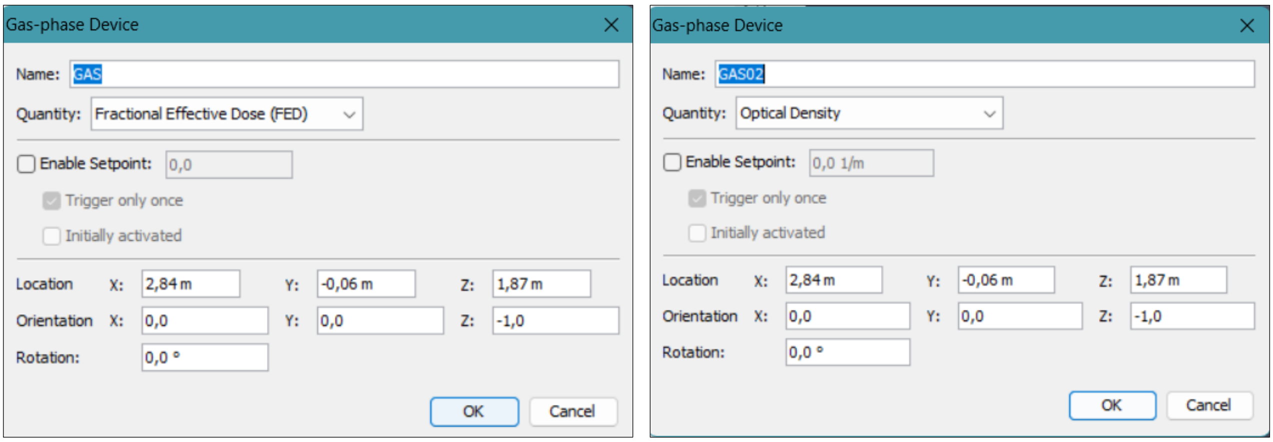


3.4 pav. Virtualių gaisro charakteristikų matavimo prietaisų (jutiklių) išdėstymo schema vertikalėje, kurios numeris yra v (v = 1, 2,) kurie fiksuoja gaisro charakteristikas

Modeliuojat gaisrą buvo fiksuojami jo proceso parametrai išdėstant termoporą, matuojančią temperatūrą, optinio gylio jutiklį ir efektyviosios dozės jutiklį 1,80 m aukštyje bei radiometrą grindų lygyje. Šis išdėstymas yra paaiškintas 3.4 ir 3.5 pav. Radiometro pozicija buvo pasirinkta siekiant įvertinti, kada gaisras nagrinėjamoje patalpoje pasieks apėmimo stadiją, tai yra 15 – 20 kW/m^2 siekiančią spinduliuotę į grindis (Karlsson & Quintiere, 2000).



(a) virtualių termometro ir radiometro programavimo langai



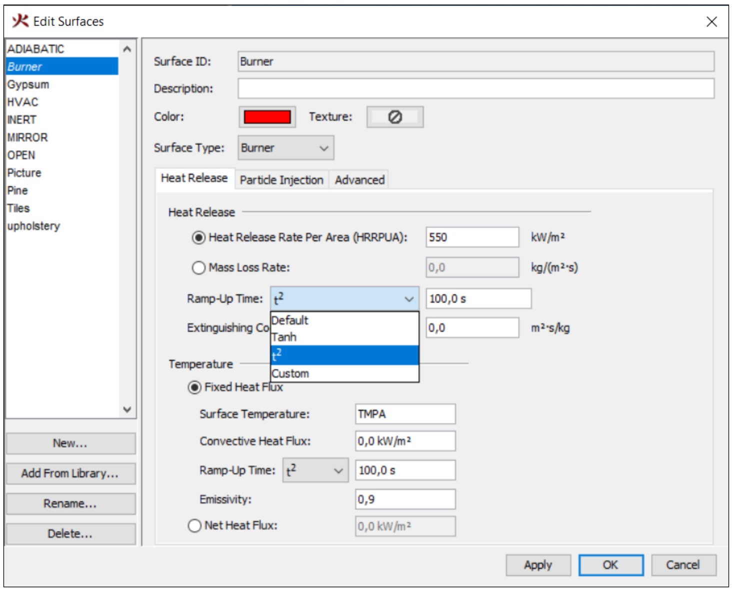
(b) virtualių FED ir optinio gylio jutiklių programavimo langai

3.5 pav. Virtualių prietaisų (jutiklių) programavimas FDS programos priemonėmis

3.2.3. Degimo proceso modeliavimas

Degimo proceso modeliavimas buvo atliekamas programuojant HRR reikšmes pagal pasirinktą modelį. Tam buvo naudojamas *Edit Surfaces* langas (3.6 pav.). Programavimas pradedamas nuo HRRPUA reikšmės priėmimo, po to parenkamas HRR modelis. 3.6 pav. iliustruoja, kaip pasirinkti kvadratinį gaisro augimo modelį.

Šiame darbe atlikti skaičiavimai rėmėsi kvadratiniu gaisro augimo modeliu $\dot{Q}(t) = \alpha t_g^2$. Tačiau siekiant įvertinti gaisro charakteristikų jautrumą įvesties kintamiesiems, laipsnio rodiklis „2“ buvo pakeistas į įvesties kintamąjį x_3, t. y., nagrinėtas modelis $\dot{Q}(t) = \alpha t_g^{x_3}$.



3.6 pav. Degančio objekto HRR funkcijos $\dot{Q}(t_\tau)$ programavimas pasirenkant kvadratinį gaisro augimo modelį $\dot{Q}(t) = \alpha t_g^2$, kuriame HRR augimo pagreitis α automatiškai skaičiuojamas uždavus augimo trukmės t_g reikšmę 100 s

3.3. Jautrumo analizės uždavinys

3.3.1. Duomenų paruošimas jautrumo analizei atlikti

Įvesties vektorius $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, x_3) \equiv (\alpha, \dot{Q}_{max}, p)$ buvo sudarytas remiantis samprotavimais, pateiktais 2.2.2 skyrelyje. Nominaliosios įvesties vektoriaus komponentų x_i $(i = 1,\ 2,\ 3)$ reikšmės pateiktos 3.1 lentelėje. Tos reikšmės parinktos darant prielaidą, kad 3.1 pav. pavaizduotame pastate bus prekybos patalpos su „greitu“ gaisro augimo pagreičiu $x_1 \equiv \alpha = 0{,}047\ \text{kW/s}^2$ ir HRRPUA reikšme $\dot{Q}''$, lygia 550 kW/m^2 (2.3, 2.5 ir 2.6 lentelės). Gaisras buvo modeliuojamas 3 m ×3 m plote, pavaizduotame 3.2 ir 3.3 pav. Tai reiškia, kad gaisro plotas A_{fire} buvo lygus 9 m^2, o maksimali HRR reikšmė $\dot{Q}_{max}$ buvo lygi 4,95 ≈ 5 MW.

3.1 lentelė. Gaisro modelio įvesties kintamieji ir su jais susijusios reikšmės

Įvesties dydis	Inžinerinis žymėjimas	Nominalioji reikšmė	Augimo trukmė t_g	Randomizavimo ± 10 % intervalas $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$	$\overline{x}_i - \underline{x}_i$
x_1	α	0,047 kW/s^2	326 s	[0,0423 kW/s^2; 0,0517 kW/s^2]	0,0094 kW/m^2
x_2	$\dot{Q}_{max}$	5000 kW		[4500 kW; 5500 kW]	1000 kW
x_3	p	2,0		[1,8; 2,2]	0,4

3.3.2. *Įvesties informacijos reikšmių generavimas*

Atliekant jautrumo analizę, 3.1 lentelėje patektos nominaliosios reikšmės buvo randomizuotos, suformuojant ± 10 % intervalus $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$. Remiantis randomizavimo principu, laikyta, kad įvesties kintamieji x_i yra tolygiai pasiskirstę intervaluose $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$. Imant, kad x_i tikimybių skirstinys yra tolygusis, jautrumo analizei būtinos kintamųjų reikšmės x_{il} stochastinio modeliavimo cikle l buvo generuojamos taikant formulę

$$x_{il} = \underline{x}_i + (\overline{x}_i - \underline{x}_i)u_{il} \ (i = 1, 2, 3), \tag{3.1}$$

čia u_{il} – tolygiojo tikimybių skirstinio intervale)0, 1(reikšmė, generuota įvesties kintamajam x_i modeliavimo cikle l.

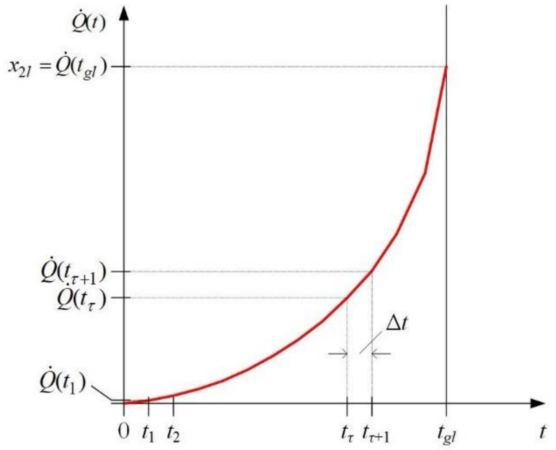
Generavus x_{1l} ir x_{2l}, taikant išraišką $(x_{2l}/x_{1l})^{1/2}$ buvo skaičiuojama gaisro augimo tarpsnio reikšmė t_{gl}, susijusi su modeliavimo ciklu l. Tuomet, sudarius vektorių x_l ir apskaičiavus jį atitinkantį laiką t_{gl}, buvo formuojamas kuro degimo HRR modelis $\dot{Q}(t)$, naudotas modeliuojant gaisrą cikle l (3.6 pav.). Tam kiekviename cikle buvo atliekami skaičiavimai, skirti atsižvelgti į generuotą laipsnio rodiklio p reikšmę x_{3l}:

1. Augimo ciklo trukmė t_{gl} buvo dalinama į n_τ intervalų, kurių plotis buvo Δt (3.7 pav.). Kadangi nominalioji t_g reikšmė yra 326 s, buvo priimta, kad $n_\tau = 65$ ir gauta, kad Δt yra apytikriai lygus 5 s ir svyruoja intervale 3 – 9 s, priklausomai nuo generuotos reikšmės t_{gl}. Šis augimo tarpsnio diskretizavimas buvo pakankamai smulkus ir leido atsižvelgti į generuotų laipsnio rodiklio p reikšmių x_{3l} skirtumus skirtinguose stochastinio modeliavimo cikluose.
2. Gavus diskretizuoto laiko reikšmes t_τ (τ = 1, 2, ... , n_τ), buvo skaičiuojamos jas atitinkančios HRR reikšmės $\dot{Q}(t_\tau)$, kintančios nuo 0 iki $\dot{Q}(t_{gl})$ (3.7 pav.). Reikšmės $\dot{Q}(t_\tau)$ skaičiuotos pagal išraišką

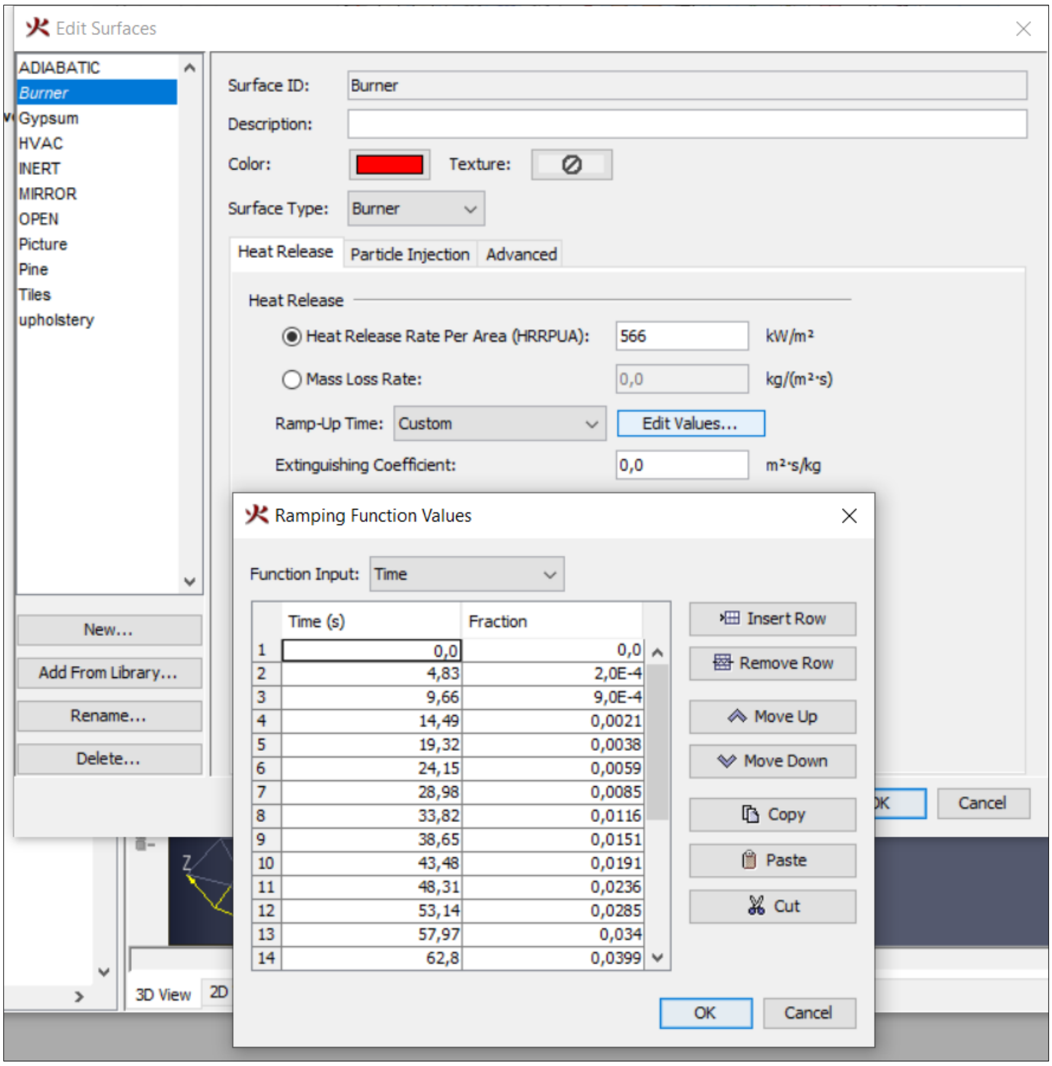
$$\dot{Q}(t_\tau) = x_{1l}\, t_\tau^{x_{3l}}. \tag{3.2}$$

Atlikus šiuos skaičiavimus, gautos reikšmių poros $(0, 0)$, $(t_1, \dot{Q}(t_1))$, ... , $(t_\tau, \dot{Q}(t_\tau))$, ... , $(t_{gl}, \dot{Q}(t_{gl}))$ buvo naudojamos kompiuteriu modeliuojant gaisrą. Tos poros buvo pritaikomos FDS programos įvesčiai skaičiuojant transformuotas HRR reikšmes $(t_\tau, \dot{Q}(t_\tau)/x_{2l}) \equiv (t_\tau, \dot{Q}(t_\tau)/\dot{Q}(t_{gl}))$.

Paskutiniosios poros reikšmė yra $(t_\tau, 1{,}0)$. Šios reikšmių poros ir HRRPUA maksimumas x_{2l}/A_{fire} buvo FDS programos įvesties informacija įvedama lange *Edit Surfaces* (3.8 pav.).



3.7 pav. Gaisro energijos išskyrimo greičio (HRR) proceso modeliavimas



3.8 pav. FDS programos langas, kuriame buvo įvedama maksimali HRRPUA reikšmė x_{2l}/A_{fire} ir HRR kreivę formuojančios reikšmių poros $(t_\tau, \dot{Q}(t_\tau)/x_{2l})$

3.3.3. *Stochastinio modeliavimo ir jautrumo analizės rezultatai*

Įvesties reikšmių x_{il} (i = 1, 2, 3) generavimas atliktas 50 kartų, t.y., N = 50. Šias reikšmės galima rasti C priede. Sugeneruotų imčių $\{x_{il}, l = 1, 2, \ldots, N\}$ statistikos pateiktos 3.2 lentelėje. Čia svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad gaisro augimo laiko reikšmės t_{gl}, apskaičiuotos naudojant x_{il} reikšmes, svyravo tarp 189 s ir 591 s. Tai reiškia, kad degimo procesą reikėjo modeliuoti ne ilgesniam kaip 591 s laikui.

Taikant imtis $\{x_{il}, l = 1, 2, \ldots, N\}$, buvo atlikta N gaisro proceso skaičiavimų ir gautos išvesties kintamųjų imtys $\{y_{jl}, l = 1, 2, \ldots, N\}$ (j = 1, 2, 3, 4). Jos buvo gautos kiekvienai iš dviejų modeliuojamo pastato patalpų, parodytų 3.2 ir 3.3 pav. Imčių elementai y_{jl} buvo gaisro charakteristikų reikšmės, matuotos virtualiai prietaisais (jutikliais), išdėstytai dviejose vertikalėse (3.4 pav.). Imtys $\{y_{jl}, l = 1, 2, \ldots, N\}$ (j = 1, 2, 3, 4), susijusios su pirma ir antra vertikalėmis yra pateiktos C priedo C.1 ir C.2 lentelėse.

3.2 lentelė. Gaisro modelio įvesties kintamųjų imčių $\{x_{il}, l = 1, 2, \ldots, N\}$ (i = 1, 2, 3) ir gaisro augimo trukmės reikšmių t_{gl} statistikos

Įvesties dydis	$[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$	Min	Max	Vidurkis	Variacijos koeficientas, %
x_1	[0,0423 kW/s^2; 0,0517 kW/s^2]	0,042 kW/s^2	0,051 kW/s^2	0,047 kW/s^2	5,83*
x_2	[4500 kW; 5500 kW]	4538 kW	5478 kW	5007 kW	5,78*
x_3	[1,8; 2,2]	1,814	2,200	1,991	5,55*
t_g	–	189 s	591 s	358 s	32,3

* Tolygiojo tikimybių skirstinio U(0, 1) variacijos koeficiento reikšmė yra 5,8 %.

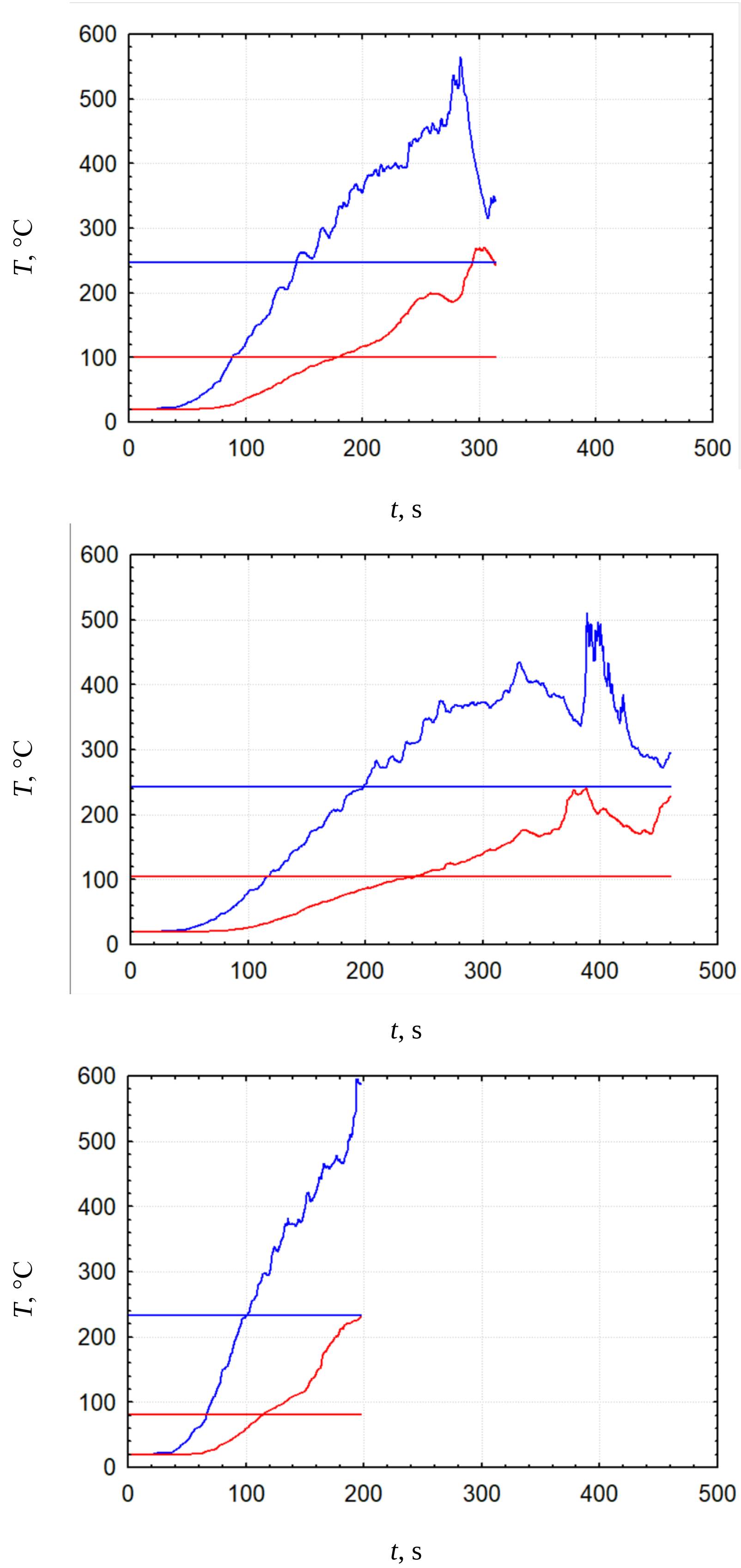
Siekiant iliustruoti gaisro modeliavimo proceso rezultatus, 3.9 – 3.12 pav. buvo nubraižyti laiko sekų $\{y_{jl}(t_\tau), j = 1, 2, 3, 4\}$ grafikai, gauti dalinant modeliavimo laiką t_{gl} į 1000 intervalų, t. y., imant, kad n_τ = 1000. Grafikai sudaryti modeliavimo ciklams $l = 1$, $l = 25$ ir $l = 50$. Juose modeliavimo trukmės buvo $t_{g1} = 314$ s, $t_{g25} = 459$ s ir $t_{g50} = 197$ s (A.1 lentelė). 3.9 – 3.12 pav. pavaizduoti viršutiniai ir apatiniai grafikai atitinką pirmą ir antrą virtualių matavimo prietaisų vertikalę (3.3 ir 3.4 pav.). Kitaip tariant, viršutiniai grafikai susiję su gaisro patalpa, o apatiniai – su gretima, didesne patalpa (3.2 pav.). Iš šių grafikų išplaukia, kad apskaičiuotos temperatūrų reikšmės $y_{1l}(t_\tau) \equiv T(t_\tau)$ yra gana nestabilios paskutinėje modeliavimo tarpsnio $[0, t_{gl}]$ dalyje. Spinduliuotės ir optinio gylio reikšmės $y_{2l}(t_\tau) \equiv R(t_\tau)$ ir $y_{4l}(t_\tau) \equiv OD(t_\tau)$ stipriai osciliuoja modeliavimui einant į pabaigą. Sukauptosios dozės reikšmėms $y_{3l}(t_\tau) \equiv FED(t_\tau)$ būdingas santykinis stabilumas toms reikšmėms monotoniškai didėjant. Paskutinės sekų reikšmės $y_{1l}(t_{gl})$, $y_{2l}(t_{gl})$ ir $y_{4l}(t_{gl})$, apskaičiuotos stochastinio modeliavimo cikle l, gali stipriai skirtis nuo kelių arba keliolikos prieš tai gautų reikšmių. Palyginus modeliavimo cikluose 1, 25 ir 50 gautas laiko sekas, matosi, kad šios sekos gali labai skirtis. Todėl buvo įdomu taikant jautrumo analizės priemones patikrinti, ar ir kiek koreliuoja išvesties dydžiai $y_{1l}(t_{gl})$, $y_{2l}(t_{gl})$, $y_{3l}(t_{gl})$ su įvesties dydžiais $x_{1l} \equiv \alpha_l$, $x_{2l} \equiv \dot{Q}_{max,l}$ ir $x_{3l} \equiv p_l$.

3.3.4. Jautrumo analizės rezultatai

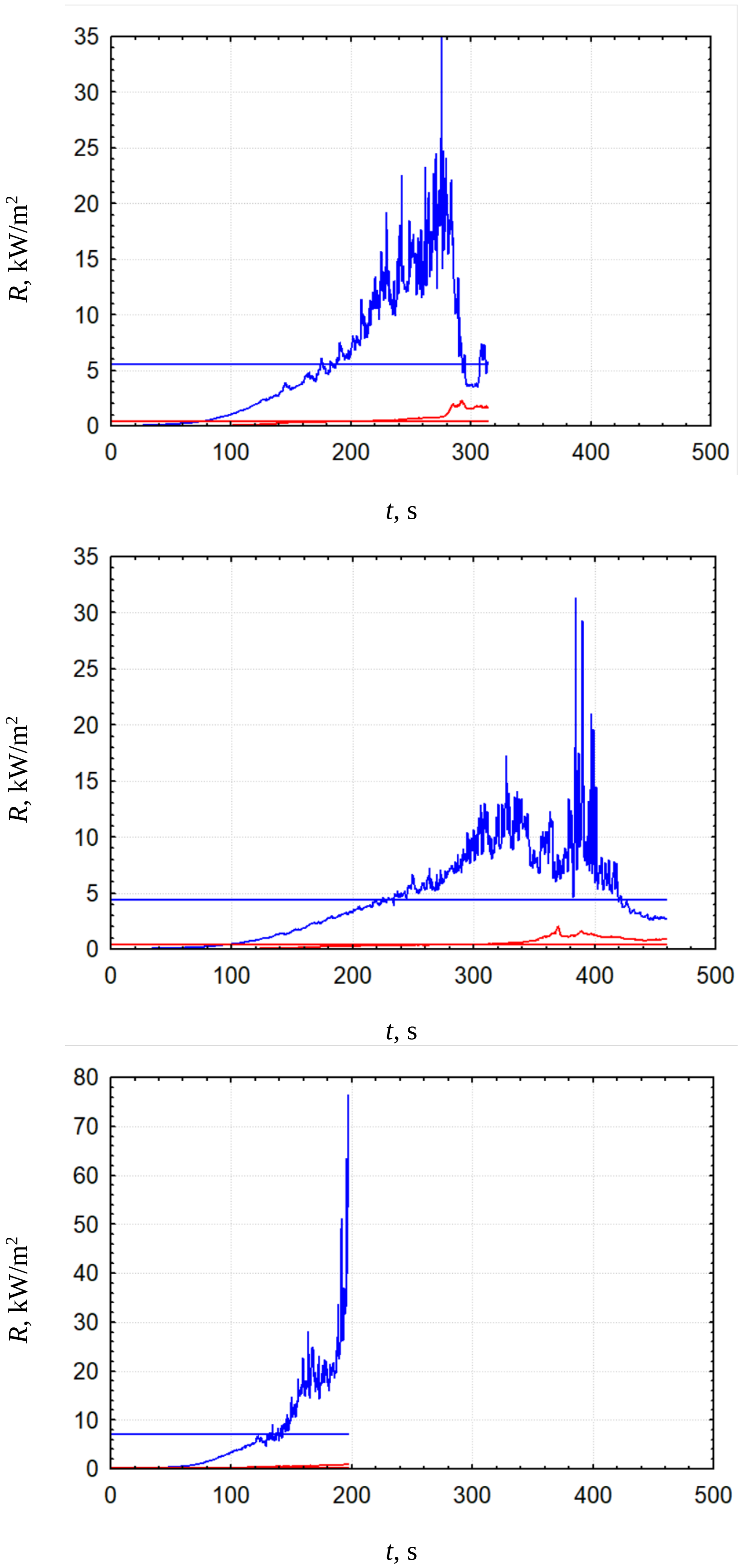
Jautrumo analizė buvo atlikta skaičiuojant 1.3.2 skyrelyje apibrėžtus Pirsono, Spirmeno ir Kendalo koreliacijos koeficientus r_P, r_S ir r_K. Skaičiuota su stochastinio modeliavimo metu gautomis rezultatų poromis $(x_{il}, y_{jl}) = (x_{il}, y_{jl}(t_{gl}))$ ($i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3, 4$). Prieš taikant šiuos stochastinės priklausomybės rodiklius, buvo nubraižytos taškinės porų (x_{il}, y_{jl}) diagramos. Jos pateiktos D priede. Tiek taškinės diagramos, tiek koreliacijos koeficientų r_P, r_S ir r_K reikšmės, pateiktos 3.3 – 3.6 lentelėse liudija tokius rezultatus:

1. Išvesties dydžių $y_1(t_g) \equiv T(t_g)$, $y_2(t_g) \equiv R(t_g)$, $y_3(t_g) \equiv FED(t_g)$ ir $y_4(t_g) \equiv OD(t_g)$ koreliacija su gaisro augimo pagreičiu $x_1 \equiv \alpha$ yra silpna. Tai liudija 3.3 ir 3.4 lentelėse pateikti rezultatai bei D.1 lentelėje parodytos taškinės diagramos.
2. Egzistuoja silpna, bet statistiškai reikšminga teigiama koreliacija tarp maksimalios HRR reikšmės $x_2 \equiv \dot{Q}_{max}$ ir temperatūros $y_1(t_g) \equiv T(t_g)$ bei sukauptosios dozės $y_3(t_g) \equiv FED(t_g)$ (3.3, 3.4 ir D.1 lentelės).
3. Egzistuoja stiprus teigiamas ir santykinai stiprus neigiamas netiesinis stochastinis ryšys tarp pirmos ir antros vertikalės temperatūrų $y_1(t_g) \equiv T(t_g)$ ir laipsnio rodiklio $x_3 \equiv p$, kuris yra HRR reikšmės $\dot{Q}(t)$ modelio (2.6) parametras (3.3 ir ir D.3 lentelės).
4. Panašus teigiamas ir neigiamas netiesinis stochastinis ryšys nustatytas ir vertinant spinduliuotės $y_2(t_g) \equiv R(t_g)$ ryšį su parametru $x_3 \equiv p$ (3.4 ir D.3 lentelės).
5. Aiškiai matomas yra neigiamas ir silpnai netiesinis stochastinis ryšys tarp sukauptosios dozės $y_3(t_g) \equiv FED(t_g)$ ir parametro $x_3 \equiv p$ (3.5 ir D.3 lentelės).
6. Optinio gylio $y_4(t_g) \equiv OD(t_g)$ atveju, vienintelė statistiškai reikšminga priklausomybė su įvesties dydžiais nustatyta tik parametrui $x_3 \equiv p$ (3.6 ir D.3 lentelės). Pirmosios vertikalės

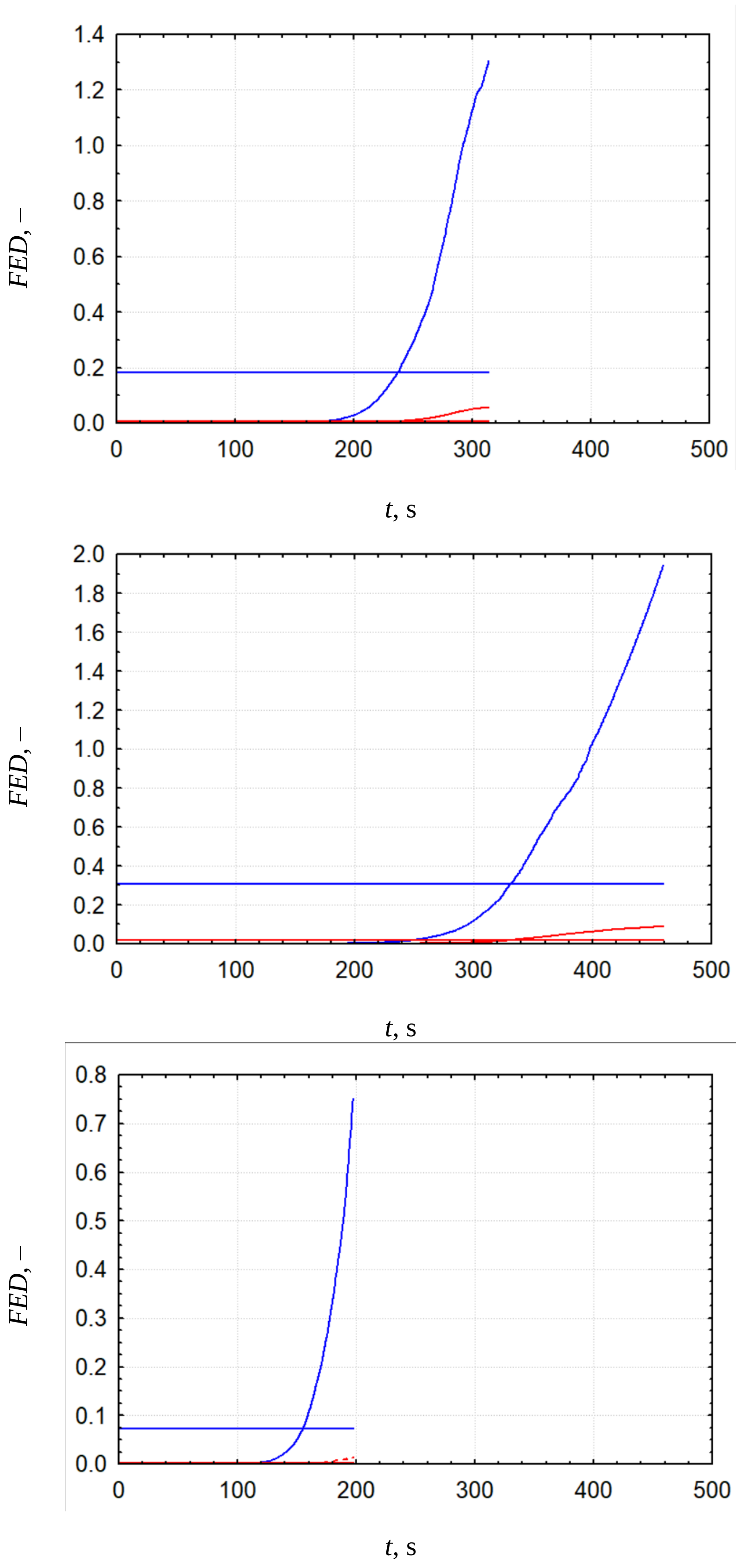
optinis gylis turi gana sudėtingą atvirkštinės „U“ formos priklausomybę nuo laipsnio rodiklio parametro $x_3 \equiv p$.



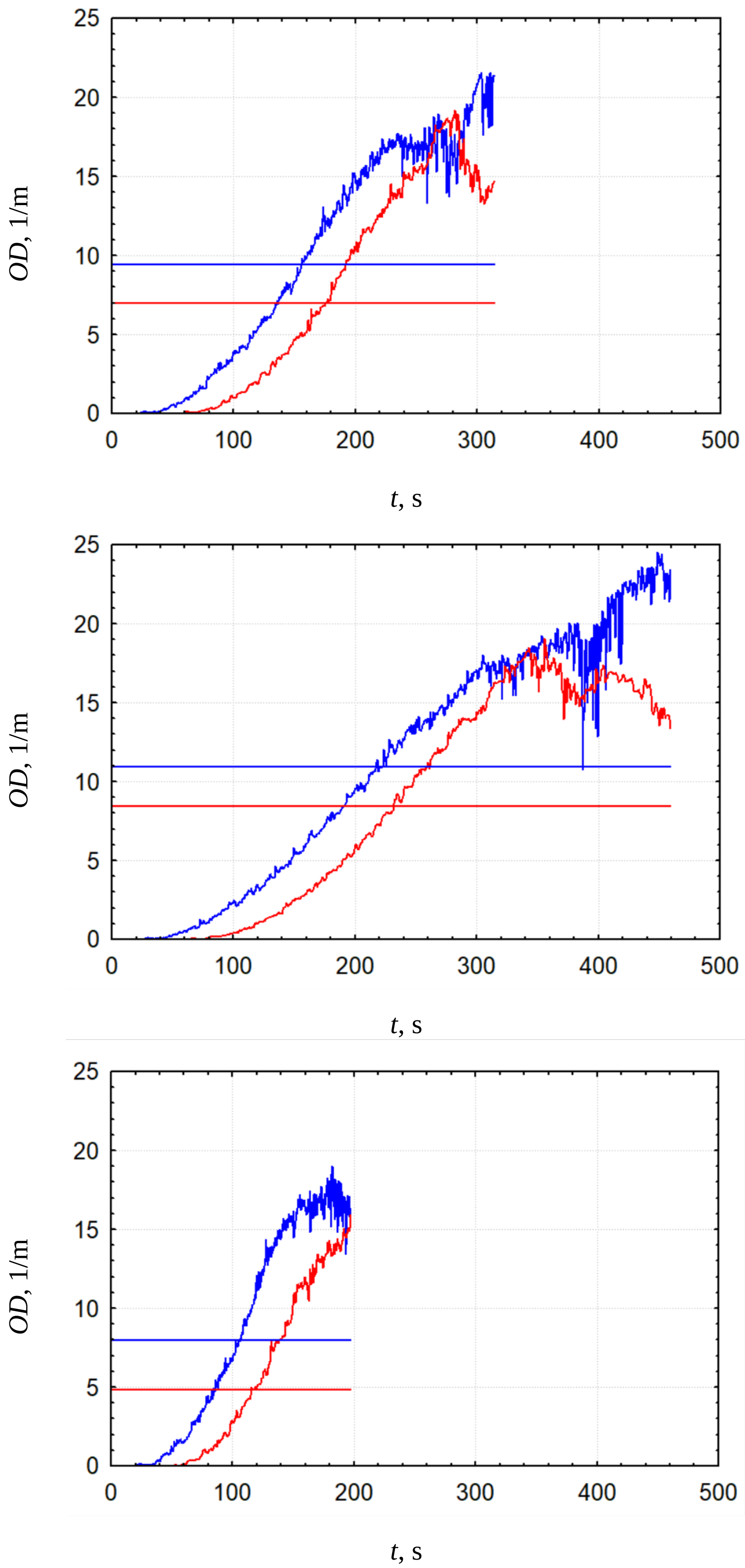
3.9 pav. Temperatūros laiko sekos $\{y_{1l}(t_\tau) \equiv T(t_\tau),\ l = 1,\ 25,\ 50\}$ ($t_\tau \in [0,\ t_{gl}]$, n_τ = 1000; laiko t_{gl} reikšmės pateiktos A.1 lentelėje; horizontalios linijos rodo laiko sekų vidurkius, pateiktus C priede)



3.10 pav. Spinduliuotės laiko sekos $\{y_{2l}(t_\tau) \equiv R(t_\tau),\ l = 1,\ 25,\ 50\}$ ($t_\tau \in [0,\ t_{gl}]$, n_τ = 1000; laiko t_{gl} reikšmės pateiktos A.1 lentelėje; horizontalios linijos rodo laiko sekų vidurkius, pateiktus C priede)



3.11 pav. Dozės FED laiko sekos $\{y_{2l}(t_\tau) \equiv FED(t_\tau),\ l = 1,\ 25,\ 50\}$ ($t_\tau \in [0,\ t_{gl}]$, n_τ = 1000; laiko t_{gl} reikšmės pateiktos A.1 lentelėje; horizontalios linijos rodo laiko sekų vidurkius, pateiktus C priede)



3.12 pav. Optinio gylio laiko sekos $\{y_{2l}(t_\tau) \equiv OD(t_\tau),\ l = 1,\ 25,\ 50\}$ ($t_\tau \in [0,\ t_{gl}]$, n_τ = 1000; laiko t_{gl} reikšmės pateiktos A.1 lentelėje; horizontalios linijos rodo laiko sekų vidurkius, pateiktus C priede)

3.3 lentelė. Koreliacijos koeficientai, apskaičiuoti modeliavimo rezultatų poroms (x_{il}, y_{1l}) (l = 1, 2, ... , 50), kurių antrasis komponentas yra temperatūra $T(t_{gl})$ *

Įvesties dydis	Temperatūra pirmoje vertikalėje $y_1 \equiv T_1(t_g)$			Temperatūra antroje vertikalėje $y_1 \equiv T_2(t_g)$		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$x_1 \equiv \alpha$	– 0,113	– 0,129	– 0,0857	+ 0,003	+ 0,037	+ 0,00898
$x_2 \equiv \dot{Q}_{max}$	– 0,002	+ 0,031	+ 0,0229	**+ 0,375**	**+ 0,394**	**+ 0,2777**
$x_3 \equiv p$	**+ 0,865**	**+ 0,848**	**+ 0,6708**	**– 0,467**	**– 0,374**	**– 0,2149**

* Paryškintos koreliacijos koeficientų reikšmės yra statistiškai reikšmingos.

3.4 lentelė. Koreliacijos koeficientai, apskaičiuoti modeliavimo rezultatų poroms (x_{il}, y_{2l}) (l = 1, 2, ... , 50), kurių antrasis komponentas yra spinduliuotė $R(t_{gl})$ *

Įvesties dydis	Spinduliuotė pirmoje vertikalėje $y_2 \equiv R_1(t_g)$			Spinduliuotė antroje vertikalėje $y_2 \equiv R_2(t_g)$		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$x_1 \equiv \alpha$	– 0,042	– 0,115	– 0,0776	+ 0,057	+ 0,115	– 0,0873
$x_2 \equiv \dot{Q}_{max}$	+ 0,095	– 0,113	– 0,0833	+ 0,193	+ 0,223	+ 0,1584
$x_3 \equiv p$	**+ 0,722**	**+ 0,938**	**+ 0,7917**	**– 0,386**	**– 0,314**	**– 0,2067**

* Paryškintos koreliacijos koeficientų reikšmės yra statistiškai reikšmingos.

3.5 lentelė. Koreliacijos koeficientai, apskaičiuoti modeliavimo rezultatų poroms (x_{il}, y_{3l}) (l = 1, 2, ... , 50), kurių antrasis komponentas yra efektyvioji dozė $FED(t_{gl})$ *

Įvesties dydis	FED pirmoje vertikalėje $y_3 \equiv FED_1(t_g)$			FED antroje vertikalėje $y_3 \equiv FED_2(t_g)$		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$x_1 \equiv \alpha$	+ 0,096	+ 0,143	+ 0,0857	+ 0,076	+ 0,130	+ 0,0743
$x_2 \equiv \dot{Q}_{max}$	**+ 0,325**	**+ 0,324**	**– 0,2156**	+ 0,261	+ 0,186	– 0,1258
$x_3 \equiv p$	**– 0,885**	**– 0,892**	**– 0,7377**	**– 0,911**	**– 0,981**	**– 0,8897**

* Paryškintos koreliacijos koeficientų reikšmės yra statistiškai reikšmingos.

3.6 lentelė. Koreliacijos koeficientai, apskaičiuoti modeliavimo rezultatų poroms (x_{il}, y_{4l}) (l = 1, 2, ... , 50), kurių antrasis komponentas yra optinis gylis $OD(t_{gl})$ *

Įvesties dydis	Optinis gylis pirmoje vertikalėje $y_4 \equiv OD_1(t_g)$			Optinis gylis antroje vertikalėje $y_4 \equiv OD_2(t_g)$		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$x_1 \equiv \alpha$	+ 0,246	+ 0,252	+ 0,1673	– 0.182	– 0,095	– 0,0596
$x_2 \equiv \dot{Q}_{max}$	– 0,143	– 0,172	– 0,1045	– 0,073	– 0,048	– 0,0278
$x_3 \equiv p$	**– 0,454**	**– 0,450**	**– 0,3554**	+ 0,250	+ 0,159	+ 0,1054

* Paryškintos koreliacijos koeficientų reikšmės yra statistiškai reikšmingos.

Siekiant patikrinti jautrumo analizės koreliacijos koeficientus, pateiktus 3.3 – 3.6 lentelėse, buvo taip pat apskaičiuoti jautrumo indeksai S_i, S_{ij} ir S_{123} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4). Tam taikytos 1.3.1 skyrelyje pateiktos formulės (žr. 1.2 ir 1.3 lenteles). Šios formulės buvo įgyvendintos kompiuterio programoje GLOBAL SENSITIVITY, aprašytoje M. Kuzabavičiaus baigiamajame magistro darbe (Kuzabavičius, 2022). Gautos jautrumo indeksų reikšmės $\hat{S}_i$, $\hat{S}_{ij}$ ir $\hat{S}_{123}$ yra pateiktos 3.7 lentelėje. Indeksų reikšmės skaičiuotos tik pirmajai matavimo prietaisų vertikalei ir turi būti lyginamos su tos vertikalės koreliacijos koeficientais, pateiktais antrame, trečiame ir ketvirtame 3.3 – 3.6 lentelių stulpeliuose.

3.7 lentelė. Globalieji įvesties kintamųjų $x_1 \equiv \alpha$, $x_2 \equiv \dot{Q}_{max}$ ir $x_3 \equiv p$ jautrumo indeksai, apskaičiuoti išvesties kintamiesiems y_j (j = 1, 2, 3, 4)

Išvesties kintamasis	Atsitiktinis argumentas arba jų derinys	Bendrasis žymėjimas	Jautrumo indeksai $\hat{S}_i$, $\hat{S}_{ij}$ arba $\hat{S}_{123}$	Globaliojo jautrumo rangas
$y_1 \equiv T(t_g)$	α	x_1	$\hat{S}_1$ = 0,0713	2
	$\dot{Q}_{max}$	x_2	$\hat{S}_2$ = 0,0121	3
	p	x_3	$\hat{S}_3$ = 0,901	1
	α ir $\dot{Q}_{max}$	x_1 ir x_2	$\hat{S}_{12}$ < 0,001	Neranguota
	α ir p	x_1 ir x_3	$\hat{S}_{13}$ = 0,0031	"
	$\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2 ir x_3	$\hat{S}_{23}$ = 0,0028	"
	α, $\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2, x_2 ir x_3	$\hat{S}_{123}$ < 0,001	"
$y_2 \equiv R(t_g)$	α	x_1	$\hat{S}_1$ = 0,0202	3
	$\dot{Q}_{max}$	x_2	$\hat{S}_2$ = 0,0498	2
	p	x_3	$\hat{S}_3$ = 0,912	1
	α ir $\dot{Q}_{max}$	x_1 ir x_2	$\hat{S}_{12}$ = 0,00781	Neranguota
	α ir p	x_1 ir x_3	$\hat{S}_{13}$ = 0,00491	"
	$\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2 ir x_3	$\hat{S}_{23}$ = 0,00502	"
	α, $\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2, x_2 ir x_3	$\hat{S}_{123}$ < 0,001	"
$y_3 \equiv FED(t_g)$	α	x_1	$\hat{S}_1$ = 0,103	3
	$\dot{Q}_{max}$	x_2	$\hat{S}_2$ = 0,178	2
	p	x_3	$\hat{S}_3$ = 0,697	1
	α ir $\dot{Q}_{max}$	x_1 ir x_2	$\hat{S}_{12}$ = 0,00711	Neranguota
	α ir p	x_1 ir x_3	$\hat{S}_{13}$ = 0,00912	"
	$\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2 ir x_3	$\hat{S}_{23}$ = 0,00526	"
	α, $\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2, x_2 ir x_3	$\hat{S}_{123}$ < 0,001	"
$y_4 \equiv OD(t_g)$	α	x_1	$\hat{S}_1$ = 0,342	2
	$\dot{Q}_{max}$	x_2	$\hat{S}_2$ = 0,118	3
	p	x_3	$\hat{S}_3$ = 0,521	1

3.7 lentelės tęsinys

	α ir $\dot{Q}_{max}$	x_1 ir x_2	$\hat{S}_{12}$ = 0,00150	Neranguota
	α ir p	x_1 ir x_3	$\hat{S}_{13}$ = 0,00277	"
	$\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2 ir x_3	$\hat{S}_{23}$ = 0,0741	"
	α , $\dot{Q}_{max}$ ir p	x_2, x_2 ir x_3	$\hat{S}_{123}$ = 0,00732	"

Jautrumo indeksų reikšmės leido ranguoti įvesties kintamuosius pagal jų dispersijų įnašą į išvesties dydžių y_j dispersijas. Rangai pateikti dešiniame 3.7 lentelės stulpelyje. Akivaizdu, kad didžiausią įnašą turi įvesties kintamasis x_3, žymintis HRR modelio $\dot{Q}(t)$ laipsnio rodiklį p (žr. (2.6) formulę). Šie rangai sutampa su rangais, kurie išplaukia iš koreliacijos koeficientų r_P, r_S ir r_K reikšmių. Mūsų nuomone pagrindiniu reikia laikyti rangavimą pagal Spirmeno koeficiento r_S reikšmes, nes jis tinka esant netiesinei atsitiktinei įvesties ir išvesties kintamųjų priklausomybei. Kai priklausomybė yra artima tiesinei, Spirmeno koeficiento r_S įgauna reikšmes, artimas Pirsono koeficiento r_P reikšmėms.

Koreliacijos koeficientų pranašumas prieš globaliojo jautrumo indeksus yra tas, kad koeficientai leidžia ne tik kiekybiškai išreikšti jautrumo laipsnį, bet ir nusakyti jo pobūdį, pavyzdžiui, netiesiškumą, teigiamumą arba neigiamumą, sklaidos laipsnį. Jautrumo indeksų privalumas prieš koreliacijos koeficientus yra tas, kad jie leidžia vertinti bendrą (kombinuotą) įvesties kintamųjų įtaką išvesties kintamiesiems. Mūsų atveju tą įtaką išreiškia indeksai $\hat{S}_{ij}$ ir $\hat{S}_{123}$. Tačiau skaičiavimo rezultatai, pateikti 3.7 lentelėje parodė, kad bendra įtaka yra labai maža ir iš šio jautrumo indeksų privalumo yra mažai naudos. Todėl tolesnė jautrumo analizė buvo atliekama tik taikant koreliacijos koeficientus.

Apibendrinant koreliacinės analizės rezultatus, pateiktus 3.3 – 3.6 lentelėse, galima teigti, kad gaisro modeliavimo išvesties dydžiai $y_1(t_g) \equiv T(t_g)$, $y_2(t_g) \equiv R(t_g)$, $y_3(t_g) \equiv FED(t_g)$ ir $y_4(t_g) \equiv OD(t_g)$ yra mažai jautrūs gaisro augimo pagreičio $x_1 \equiv \alpha$ kaitaliojimui. Skaičiuojant buvo gauta, kad egzistuoja santykinai silpnas bet statistiškai reikšmingas ryšys tarp temperatūros $y_1(t_g) \equiv T(t_g)$ bei efektyviosios dozės $y_3(t_g) \equiv FED(t_g)$ ir maksimalios HRR reikšmės $x_2 \equiv \dot{Q}_{max}$. Tačiau šis ryšys išvesties dydžių $y_1(t_g)$ ir $y_3(t_g)$ atvejais buvo nustatytas tik vienai iš dviejų modelio patalpų, pavaizduotų 3.2 ir 3.3 pav.. Be to, temperatūros ir dozės atvejais tos patalpos skyrėsi (3.3 ir 3.5 lentelės). Fizinė šio rezultato prigimtis yra neaiški ir tokį rezultatą sunku komentuoti.

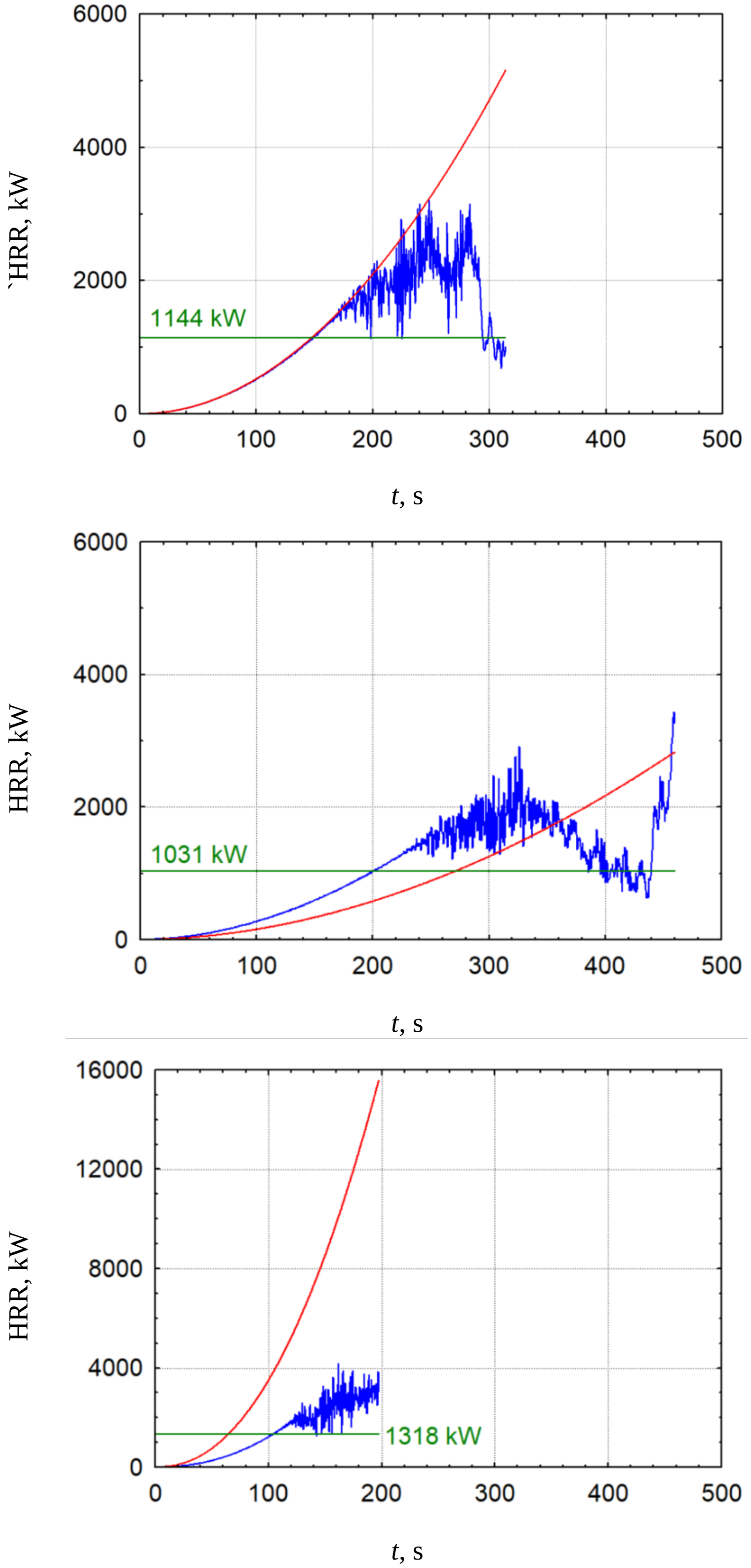
Aiškiausias ir kiek netikėtas rezultatas buvo tas, kad išvesties dydžiai $y_1(t_g) \equiv T(t_g)$, $y_2(t_g) \equiv R(t_g)$ ir $y_3(t_g) \equiv FED(t_g)$ yra santykinai jautrūs laipsnio rodiklio parametrui $x_3 \equiv p$.

Statistiškai reikšminga ir santykinai stipri koreliacija buvo gauta ir laipsnio rodiklio $x_3 \equiv p$ bei optinio gylio pirmoje patalpoje, $OD_1(t_g)$, atveju (3.6 lentelė). HRR modelio, išreikšto (2.6) lygtimi, parametras p nėra fizinis dydis. Jis yra veikiau HRR augimo kreivės pritaikymo eksperimentiniams matavimams rezultatas. Toks pritaikymas iliustruotas 2.5 ir 2.6 pav. Todėl ieškoti fizinio ryšio tarp p ir išvesties dydžių $y_1(t_g) \equiv T(t_g)$, $y_2(t_g) \equiv R(t_g)$, $y_3(t_g) \equiv FED(t_g)$ ir $y_4(t_g) \equiv OD(t_g)$ nėra prasmės. Tačiau faktas, kad gaisro modeliavimo rezultatai yra santykinai stipriai jautrūs laipsnio rodiklio p kaitaliojimui, reikalauja atsargiai taikyti vyraujančią rodiklio reikšmę $p = 2$. Mūsų nuomone, reikia atlikti papildomus eksperimentinius tyrimus, kad įsitikinti, jog reikšmė $p = 2$ geriausiai išreiškia HRR reikšmės augimo scenarijų.

3.3 –3.6 lentelėse pateikiamų rezultatų komentarai yra susiję su siekiu nustatyti ryšį tarp (2.6) lygtimi išreikšto HRR modelio $\alpha t^p = (\dot{Q}_{max}/t_g^p)\, t^p$ parametrų α, $\dot{Q}_{max}$ ir p bei išvesties dydžių $y_1(t_g)$, $y_2(t_g)$, $y_3(t_g)$ ir $y_4(t_g)$. Atlikus 50 stochastinio modeliavimo ciklų, kuriuose buvo skaičiuojami radomizuoti dydžiai $x_{1l} \equiv \alpha_l$, $x_{2l} \equiv \dot{Q}_{max,l}$ ir $x_{3l} \equiv p_l$ ir matematiškai modeliuojant gaisrą gauti išvesties dydžiai $y_{1l}(t_g)$, $y_{2l}(t_g)$, $y_{3l}(t_g)$ ir $y_{4l}(t_g)$, nustatyta, kad poroms (x_{il}, y_{jl}) būdingas didelis statistinis kintamumas. Tai liudija 3.9 – 3.12 pav. parodyti laiko sekų grafikai ir taškinės diagramos, pateiktos D priede. Galima daryti prielaidą, kad šis didelis statistinis kintamumas nulėmė santykinai mažas koreliacijos koeficientų reikšmes, pateiktas 3.3 –3.6 lentelėse. Taigi, tai galėjo būti santykinai mažo išvesties dydžių $y_j(t_g)$ jautrumo įvesties dydžiams x_i priežastis.

Viena iš tokio didelio statistinio išvesties kintamumo priežastis gali būti tai, kad matematiškai modeliuojant gaisrą cikle l pradinis HRR modelis $\dot{Q}_{max,l}(t) = \alpha_l t^{p_l}$ yra perskaičiuojamas į HRR reikšmių laiko seką, kuriai būdingas santykinai didelis osciliavimas maždaug antroje modeliavimo proceso dalyje. Grafinė šio rezultato iliustracija pateikta 3.13 pav.

Grafikai, pateikti 3.13 pav., vaizduoja randomizavimo būdu gautas sekas $\dot{Q}_{max,l}(t)$ ($t \in [0, t_g]$) ir FDS programa apskaičiuotas osciliuojančias sekas, susijusias su trimis modeliavimo ciklais l = 1, 25, 50. Tos sekos ir buvo faktinis gaisro energijos išskyrimo modelis. Galima spėti, kad pastarasis HRR reikšmių osciliavimas ir lėmė didelį išvesties dydžių $y_{1l}(t_g)$, $y_{2l}(t_g)$, $y_{3l}(t_g)$ ir $y_{4l}(t_g)$ kintamumą. Šis osciliavimas gali būti laikomas papildomu ir nekontroliuojamu randomizavimu stochastinio modeliavimo procese.



3.13 pav. Parinktosios HRR funkcijos $\dot{Q}(t_\tau)$ ir FDS programos generuotos HRR funkcijos laiko sekų grafikai, išreikšti, atitinkamai, monotoniškai kylančia kreive ir osciliuojančia kreive ir sudaryti stochastinio modeliavimo ciklams l = 1, 25, 50 (n_τ = 1000) (horizontalios linijos yra HRR reikšmių vidurkiai)

Siekiant sumažinti statistinio įvesties ir išvesties dydžių kintamumo įtaką jautrumo analizės rezultatams, ta analizė buvo atlikta apskaičiavus FDS programa generuojamų HRR reikšmių laiko sekų vidurkius ir išvesties dydžių laiko sekų vidurkius. Pirmieji buvo skaičiuojami pagal formulę

$$\bar{\dot{Q}}_{FDS,l} = \frac{1}{n_\tau} \sum_{\tau=1}^{n_\tau} \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau)\ (n_\tau = 1000), \tag{3.3}$$

čia $\dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau)$ – HRR reikšmė, apskaičiuota stochastinio modeliavimo cikle l su FDS programa laiko momentui t_τ. Vidurkių $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ reikšmės pateiktos A priedo A.1 lentelėje. Išvesties dydžių vidurkiai skaičiuoti pagal formulę

$$\bar{y}_{jl} = \frac{1}{n_\tau} \sum_{\tau=1}^{n_\tau} y_{jl}(t_\tau)\ (n_\tau = 1000). \tag{3.4}$$

Išvesties vidurkių $\bar{y}_{jl}$ reikšmės, susijusios su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis, yra pateiktos C.1 ir C.2 lentelėse (žr. C priedą). Laiko intervalų skaičius n_τ, lygis vienam tūkstančiui, yra automatiškai parenkamas FDS programos algoritmo ir nepriklauso nuo modeliuojamo gaisro trukmių t_{gl}. Tokia diskretizcija yra pakankamai smulki turint omenyje, kad maksimali t_{gl} reikšmė buvo 591 s (3.2 lentelė).

Iš apskaičiuotų įvesties ir išvesties dydžių vidurkių buvo suformuotos poros $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{jl})$ (j = 1, 2, 3, 4; l = 1, 2, ... , 50) ir pagal 1.3.2 skyrelio formules apskaičiuoti Pirsono, Spirmeno ir Kendalo koreliacijos koeficientai r_P, r_S ir r_K. Jų reikšmės pateiktos 3.7 lentelėje. Taip pat buvo nubraižytos taškinės porų $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{jl})$ diagramos. Jas galima rasti E priede.

Rezultatai, pateikti 3.8 lentelėje, rodo, kad beveik visi išvesties dydžių vidurkiai $\bar{y}_j$ (j = 1, 2, 3, 4) yra jautrūs HRR reikšmių vidurkio $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ kaitaliojimui. Tai liudija statistiškai reikšmingos ir santykinai didelės visų trijų rūšių koreliacijos koeficientų reikšmės. Išimtį sudaro tik temperatūros gaisro patalpoje vidurkis $\bar{y}_1$. Jam koreliacijos koeficientų reikšmės r_P, r_S ir r_K buvo lygios, atitinkamai, , + 0,022, + 0,016 ir +0,045. Tai mažos ir statistiškai nereikšmingos reikšmės. Visus 3.8 lentelėje pateiktus rezultatus grafiškai patvirtina ir taškinės vidurkių porų $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{jl})$ diagramos, pavaizduotos E priede.

3.8 lentelė. Koreliacijos koeficientai, apskaičiuoti modeliavimo rezultatų vidurkių poroms $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{jl})$ (j = 1, 2, 3, 4; l = 1, 2, ... , 50), kurių komponentai pateikti A.1, C.1 ir C.2 lentelėse (žr. A ir C priedą)*

Įvesties vidurkis	Temperatūros pirmoje vertikalėje vidurkis $\bar{y}_1$			Temperatūros antroje vertikalėje vidurkis $\bar{y}_1$		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$	– 0,016	+ 0,022	+ 0,045	**– 0,667**	**– 0,728**	**– 0,469**
	Spinduliuotės pirmoje vertikalėje vidurkis $\bar{y}_2$			Spinduliuotės antroje vertikalėje vidurkis $\bar{y}_2$		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$	**+ 0,818**	**+ 0,850**	**+ 0,656**	**– 0,606**	**– 0,674**	**– 0,424**
	FED pirmoje vertikalėje vidurkis $\bar{y}_3$			FED antroje vertikalėje vidurkis $\bar{y}_3$		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$	**– 0,639**	**– 0,769**	**– 0,518**	**– 0,686**	**– 0,800**	**– 0,566**
	OD pirmoje vertikalėje vidurkis $\bar{y}_4$			OD antroje vertikalėje $\bar{y}_4$ vidurkis		
	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K	Pirsono r_P	Spirmeno r_S	Kendalo r_K
$\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$	**– 0,765**	**– 0,790**	**– 0,543**	**– 0.683**	**– 0,802**	**– 0,569**

* Paryškintos koreliacijos koeficientų reikšmės yra statistiškai reikšmingos.

Koreliacijos koeficientų r_P, r_S ir r_K reikšmės, pateiktos 3.7 lentelėje gali būti taip pakomentuotos keturiais požiūriais.

Pirma, silpną gaisro patalpos (pirmos prietaisų vertikalės) ir temperatūros vidurkių $\bar{y}_{1l}$ ir HRR reikšmių vidurkių $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ koreliaciją galima būtų paaiškinti mažu dydžių $\bar{y}_{1l}$ kintamumu. Jų variacijos koeficientas buvo lygus 3,4 %, o reikšmės svyravo intervale (208 °C, 261 °C). Reikšmių $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ variacijos koeficientas ir amplitudė buvo, atitinkamai, 8,2 % ir (970 °kW, 1318 °kW). Taigi, kiek besikeistų $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ reikšmės porose $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{1l})$, E.1 lentelėje parodyta taškinė diagrama buvo santykinai plokščia su šiek tiek augančiu temperatūros reikšmių kintamumu didesnių HRR reikšmių kryptimi. Fizinė šio rezultato prigimtis gali būti ta, kad ribotas gaisro patalpos ventiliavimas neleido labai kilti temperatūroms 1,8 m aukštyje, net ir tais atvejais, kai HRR reikšmės buvo didesnės.

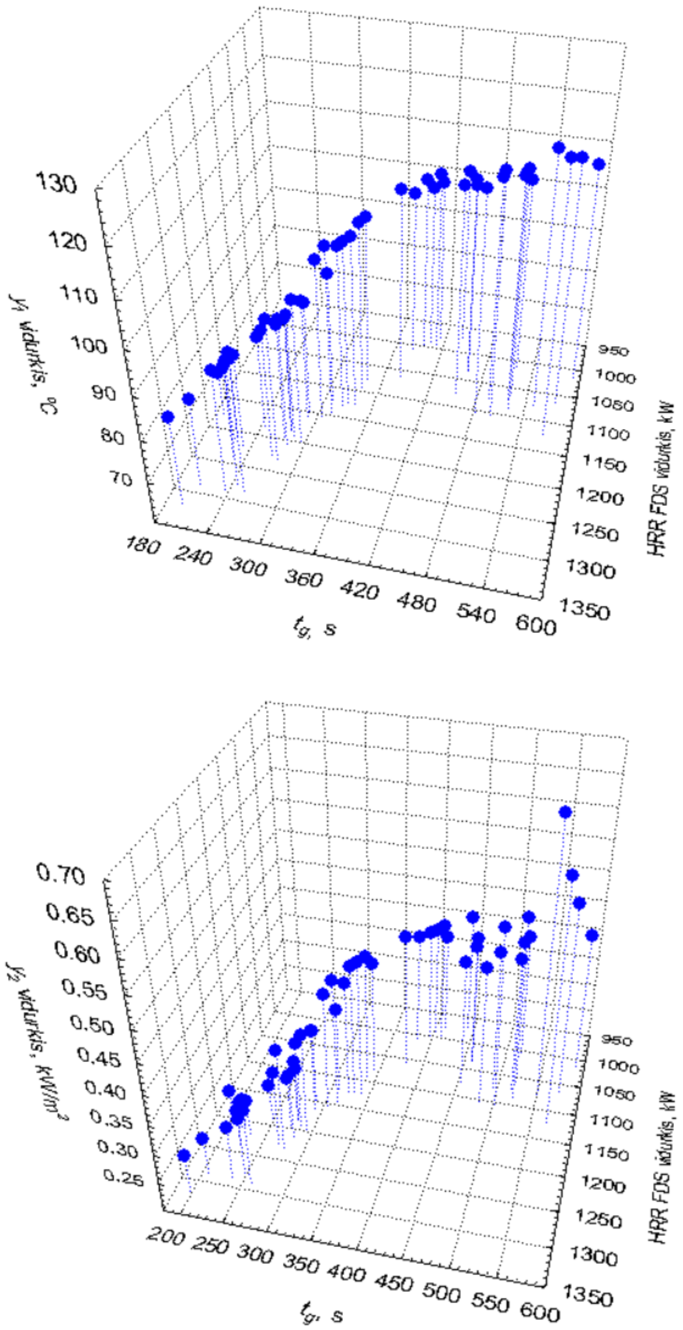
Antra, koreliacija tarp spinduliuotės į gaisro patalpos grindis vidurkių $\bar{y}_2$ ir HRR reikšmių vidurkių $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ yra teigiama ir santykinai stipri. Jai būdingas netiesiškumas (E.1 lentelė). Šis rezultatas yra lauktinas, nes kuo didesnis yra gaisro energijos išskyrimo greitis, tuo didesnė turi būti ir spinduliuotė.

Trečia, ryšys tarp temperatūros ir spinduliuotės vidurkių $\bar{y}_{1l}$ ir $\bar{y}_{2l}$ antroje, didesnėje patalpoje ir HRR reikšmių vidurkių $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ išreiškiamas neigiama netiesine koreliacija. Absoliučiosios Spirmeno koeficiento reikšmės antrosios vertikalės poroms $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{1l})$ ir $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{1l})$ yra santykinai didelės ir lygios, atitinkamai, | – 0,728 | ir | – 0,674 | (3.7 lentelė). Šis koreliacinės analizės rezultatas taip pat gali būti paaiškintas tarpinio dydžio, būtent, augimo ciklo trukmės t_g įtaka vidurkiams $\bar{y}_{1l}$ ir $\bar{y}_2$. Grafiškai ši įtaka buvo nustatyta sudarius trimates taškines reikšmių trejetų $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{1l})$ ir $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{2l})$ diagramas (3.14 pav.). Reikšmių t_{gl} ir $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ amplitudės yra, atitinkamai, (189 s, 591 s) ir (970 °kW, 1318 °kW), o variacijos koeficientai yra 32 % ir 8,2 %. Tai reiškia, kad t_{gl} reikšmių kintamumas buvo maždaug 3,5 karto didesnis už $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ reikšmių kintamumą. Neigiamo koreliacijos susidarymą galima taip paaiškinti:

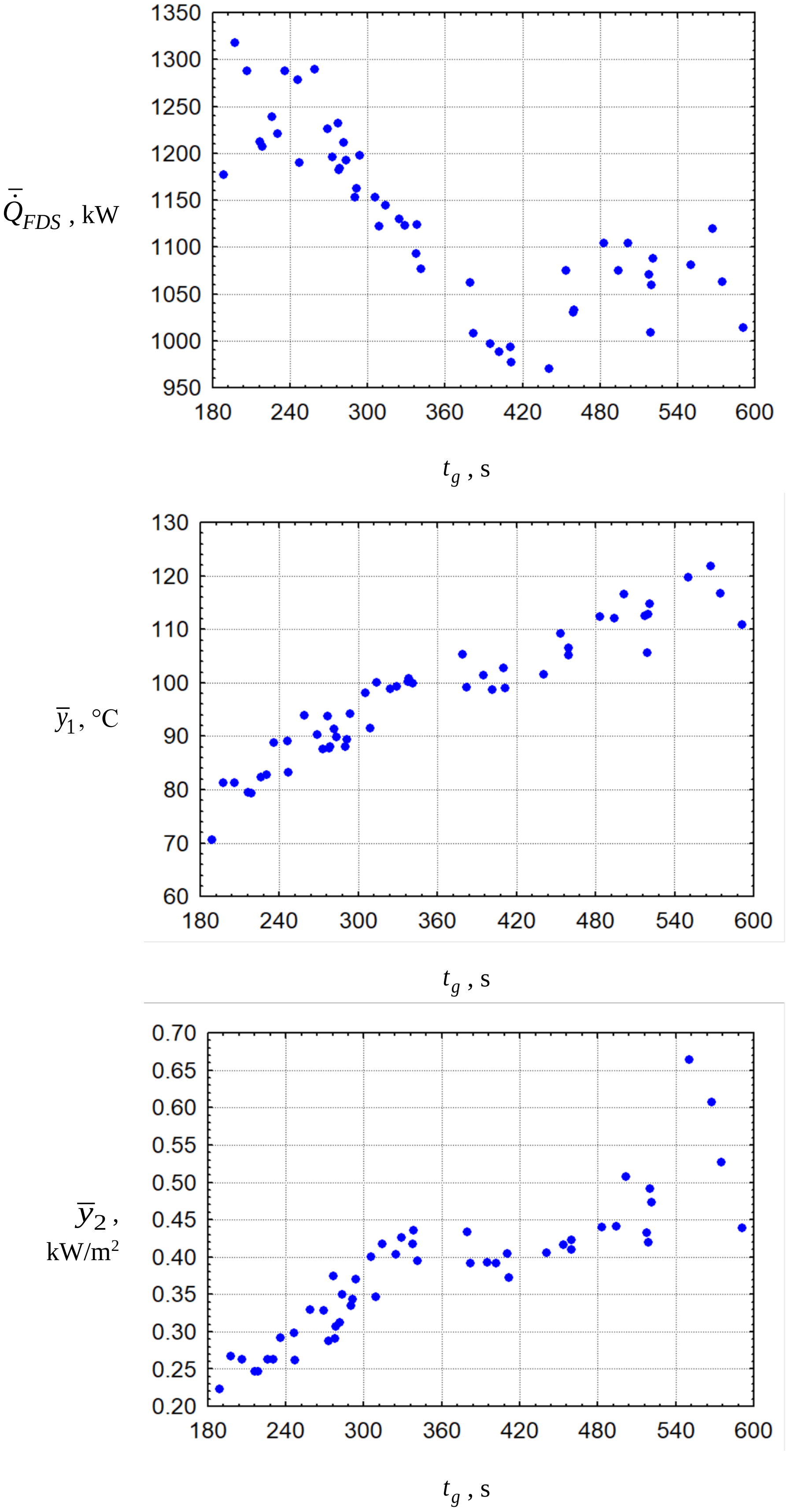
1. Didesnės $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ reikšmės būdavo pasiekiamos greičiau, t. y. atitiko mažesnes t_{gl} reikšmes. Tai liudija viršutinė diagrama, parodyta 3.14 pav.
2. Vidurkiams $\bar{y}_{1l}$ ir $\bar{y}_{2l}$ būdingas priešingas rezultatas, t. y., didesnės $\bar{y}_{1l}$ ir $\bar{y}_{2l}$ atitiko didesnes t_{gl} reikšmes (žr. apatines dvi diagramas, pateiktas 3.14 pav.).
3. Taigi, kuo mažesnės buvo t_{gl} reikšmės, tuo didesnės gaudavosi $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ reikšmės ir mažesnės buvo $\bar{y}_{1l}$ ir $\bar{y}_{2l}$ reikšmės (E.1 lentelė).

Ketvirta, neigiamas ir netiesines HRR reikšmių vidurkio $\bar{\dot{Q}}_{FDS}$ bei efektyviosios dozės ir optinio gylio vidurkių $\bar{y}_3$ ir $\bar{y}_4$ koreliacijas galima taip pat paaiškinti bendra augimo ciklo trukmės t_g įtaka šiems dydžiams. Ši įtaka grafiškai atsiskleidžia sudarius trimates taškines reikšmių trejetų $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{3l})$ ir $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{4l})$ diagramas. Jos pavaizduotos E.1 pav., esančiame E priede, ir savo pobūdžiu panašios į 3.14 pav. parodytas diagramas.

Apibendrinant galima teigti, kad augimo ciklo trukmė t_g atlieka užslėptojo kintamojo vaidmenį susidarant $\bar{\dot{Q}}_{FDS}$ ir $\bar{y}_j$ (j = 1, 2, 3, 4) priklausomybėms. Jos išplaukia iš (2.6) lygtimi išreikšto HRR modelio $\alpha t^p = (\dot{Q}_{max}/t_g^p)\, t^p$ prigimties. Sutinkamai su šiuo modeliu, kuo didesnės yra HRR reikšmės, tuo greičiau jos yra pasiekiamos.



3.14 pav. Taškinės reikšmių trejetų $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{1l})$ ir $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{2l})$ (l = 1, 2, ... , 50) diagramos, atskleidžiančios augimo ciklo trukmės laiko t_g dydžių įtaka $\bar{y}_{1l}$, $\bar{y}_{2l}$ ir $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$ priklausomybėms



3.15 pav. Taškinės porų $(t_{gl}, \dot{\bar{Q}}_{FDS,l})$, $(t_{gl}, \bar{y}_{1l})$ ir $(t_{gl}, \bar{y}_{2l})$ ($l = 1, 2, \ldots, 50$) diagramos

3.4. Stochastinio modeliavimo uždavinys ir rezultatai

Ta aplinkybė, kad jautrumo analizei atlikti taikyta koreliacinė analizė rėmėsi stochastinio modeliavimo rezultatais, sudaro galimybę panaudoti šiuos rezultatus matematinio gaisro modelio savybių tyrimui. Pradinė mūsų idėja buvo nagrinėti HRR modelio parametrų, laikytų įvesties kintamaisiais x_i, įtaką išvesties kintamiesiems y_j. Ši idėja detaliai aprašyta 2.2.2 skyrelyje, o nagrinėti įvesties kintamieji (parametrai) buvo sugrupuoti į vektorių $(x_1, x_2, x_3)^{\mathrm{T}}$ dar žymėtą simboliu $(\alpha, \dot{Q}_{max}, p)^{\mathrm{T}}$ (žr. (2.7) lygtį). Šio vektoriaus komponentai sudarė įvesties HRR modelį $\dot{Q}(t)$, t. y., išraiškas αt^p $t \in [0, (\dot{Q}_{max}/\alpha)^{1/p}]$ arba $x_1 t^{x_3}$ $t \in [0, (x_2/x_1)^{1/x_3}]$.

Siekiant atlikti stochastiniu modeliavimu pagrįstą jautrumo analizę, įvesties kintamieji x_i buvo randomizuotos jų reikšmės x_{il} generuotos iš intervalų, nusakytų tolygiaisiais tikimybių skirstiniais (3.1 lentelė). Šios reikšmės naudotos kaip kintantys FDS programos įvesties dydžiai ir taip gautos išvesties kintamųjų reikšmės y_{jl}. Procedūra kartota 50 kartų, t. y. $l = 1, 2, \dots, 50$, ir taip sudarytos imtys $\{y_{jl}, l = 1, 2, \dots, 50\}$ (j = 1, 2, 3, 4). Jas reikia laikyti stochastinio modeliavimo rezultatu ir taikyti išreiškiant neapibrėžtumus, susijusius su išvesties kintamaisiais. Tam reikėtų skaičiuoti imčių $\{y_{jl}, l = 1, 2, \dots, 50\}$ statistikas (vidurkius, variacijos koeficientus ir t. t.). Tačiau šie rodikliai nebūtų labai informatyvūs, nes įvesties reikšmių x_{il} kintamumas, suformuotas randomizuojant, yra dirbtinis. Tačiau vienas, paslėptas stochastinio modeliavimo rezultatas mums buvo įdomus.

Atlikus kartotinius skaičiavimus buvo nustatyta, kad pradinės HRR funkcijos $\dot{Q}(t)$ ir FDS programos generuotos HRR funkcijos $\dot{Q}_{FDS}(t)$ reikšmės pastebimai skiriasi pradedant maždaug gaisro augimo tarpsnio viduriu (3.13 pav.). Stochastinio modeliavimo cikle l, tos reikšmės buvo sugrupuojamos į laiko sekas $\{\dot{Q}_l(t_\tau), t_\tau = t_{1l}, t_{2l}, \dots, t_{n_\tau l}\}$ ir $\{\dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau), t_\tau = t_{1l}, t_{2l}, \dots, t_{n_\tau l}\}$ $(t_\tau \in [0, t_{gl}], t_{gl} = t_{n_\tau l}, \tau = 1, 2, \dots, n_\tau, n_\tau = 1000)$. Taigi, kiekvienam ciklo l laiko momentui t_τ buvo apskaičiuojama reikšmių pora $(\dot{Q}_l(t_\tau), \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau))$. Šios poros komponentai sudarė taškus $(t_\tau, \dot{Q}_l(t_\tau))$ ir $(t_\tau, \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau))$, kurie modeliavimo ciklams l = 1, 25, 50 yra pavaizduoti 3.13 pav., sujungus tuos taškus linijomis. Natūraliai kilo klausimas, kiek skiriasi funkcijos $\dot{Q}(t)$ ir $\dot{Q}_{FDS}(t)$, kaip tą skirtumą išreikšti pasinaudojant reikšmių poromis $(\dot{Q}_l(t_\tau), \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau))$.

Statistinio pobūdžio informacija, tinkanti lyginti HRR funkcijas $\dot{Q}(t)$ ir $\dot{Q}_{FDS}(t)$, buvo išreikšta skirtumais $\dot{Q}_l(t_\tau) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau)$. Iš šių skirtumų buvo suformuota 50 imčių

$$\mathit{\Delta}_{Q,l} = \{\dot{Q}_l(t_\tau) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau),\ t_\tau = t_{1l}, t_{2l}, \dots, t_{n_\tau l}\}\ \ (l = 1, 2, \dots, 50) \tag{3.5}$$

ir tos imtys pritaikytos vertinant skirtumus tarp funkcijų $\dot{Q}(t)$ ir $\dot{Q}_{FDS}(t)$. Buvo apskaičiuotos tokios imčių $\mathit{\Delta}_{Q,l}$ statistikos: vidurkiai $\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l}$, standartai $\mathrm{s}\mathit{\Delta}_{Q,l}$, asimetrijos koeficientai $\mathrm{a}\mathit{\Delta}_{Q,l}$, minimalios ir maksimalios reikšmės $\min\mathit{\Delta}_{Q,l}$ ir $\max\mathit{\Delta}_{Q,l}$. Iš viso gauta 50 kiekvienos statistikos reikšmių. Jos yra pateiktos F priede.

Statistikoms $\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l}$ ir $\mathrm{s}\mathit{\Delta}_{Q,l}$ bei $\min\mathit{\Delta}_{Q,l}$ ir $\max\mathit{\Delta}_{Q,l}$ (l = 1, 2, ... , 50) buvo sudarytos histogramos, pavaizduotos 3.16 pav. Šios statistikos gautos kiekvienam ciklui l vidurkinant skirtumus $\dot{Q}(t)$ – $\dot{Q}_{FDS}(t)$ pagal laiką t ir atliekant kitus su gaisro laiku t susijusius skaičiavimo veiksmus. Tarkime, vidurkis $\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l}$ buvo skaičiuojamas pagal formulę

$$\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l} = \frac{1}{n_\tau}\sum_{\tau=1}^{n_\tau}(\dot{Q}_l(t_{\tau l}) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_{\tau l})), \tag{3.6}$$

o standarto reikšmė $s\mathit{\Delta}_{Q,l}$ gauta pagal formulę

$$\mathrm{s}\mathit{\Delta}_{Q,l} = \left(\frac{1}{n_\tau}\sum_{\tau=1}^{n_\tau}\left((\dot{Q}_l(t_{\tau l}) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_{\tau l})) - \bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l}\right)^2\right)^{1/2}. \tag{3.7}$$

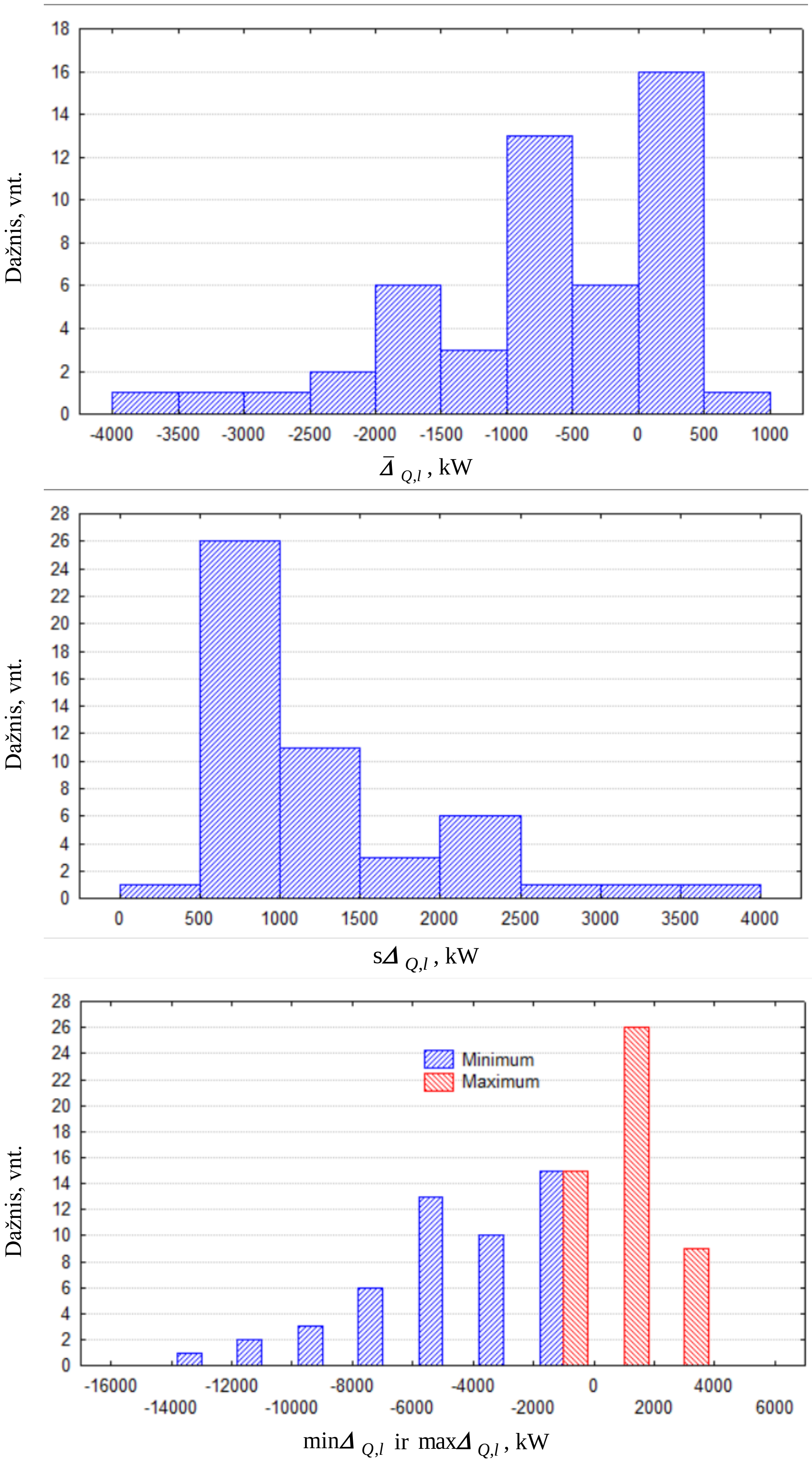
Iš statistikų $\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l}$, $s\mathit{\Delta}_{Q,l}$, $\min\mathit{\Delta}_{Q,l}$ ir $\max\mathit{\Delta}_{Q,l}$ buvo suformuotos keturios imtys $\{\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$, $\{s\mathit{\Delta}_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$, $\{\min\mathit{\Delta}_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$ ir $\{\max\mathit{\Delta}_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$. Tų imčių histogramos ir yra parodytos 3.16 pav. Vidurkinant pagal ciklo numerį l, buvo apskaičiuotos tų imčių statistikos. Tarkime, imtį $\{\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$ apibūdinančios imties statistikos, buvo vidurkis

$$\bar{\mathit{\Delta}}_Q = \frac{1}{N}\sum_{\tau=1}^{N}\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l}\ (N = 50), \tag{3.8}$$

variacijos koeficientas

$$\mathrm{cov}\mathit{\Delta}_Q = (\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l})^{-1}\left(\frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N}(\bar{\mathit{\Delta}}_{Q,l} - \bar{\mathit{\Delta}}_Q)^2\right)^{1/2} \times 100\ \%\ (N = 50), \tag{3.9}$$

minimali ir maksimali reikmės



3.16 pav. Histogramos, sudarytos imčių $\Delta_{Q,l} = \{\dot{Q}_l(t_\tau) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau),\ t_\tau = t_{1l},\ t_{2l},\ \ldots,\ t_{1000}\}$ vidurkiams $\bar{\Delta}_{Q,l}$, standartams $s\Delta_{Q,l}$ bei minimalioms ir maksimalioms reikšmėms $\min\Delta_{Q,l}$ ir $\max\Delta_{Q,l}$

$$\min\Delta_Q = \min_l \{\Delta_{Q,l}\} \text{ ir } \max\Delta_Q = \max_l \{\Delta_{Q,l}\}. \tag{3.10}$$

Imčių $\{\bar{\Delta}_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$, $\{s\Delta_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$, $\{\min\Delta_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$ ir $\{\max\Delta_{Q,l},\ l = 1, 2, \dots, 50\}$ statistikos yra pateiktos 3.9 ir F.1 lentelėse. Šios antrojo lygio statistikos („imties statistikų statistikos“), pažymėtos simboliais $\bar{\Delta}_Q$, $\mathrm{cov}\Delta_Q$, $\min\Delta_Q$ ir $\max\Delta_Q$, papildo ir patikslina informaciją, išreikštą 3.16 pav. pateiktomis histogramomis. Tiek statistikos, tiek histogramos leidžia padaryti kai kurias išvadas apie funkcijų $\dot{Q}(t)$ ir $\dot{Q}_{FDS}(t)$ skirtumus:

1. Dauguma 50 skirtumų $\dot{Q}_l(t_\tau) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau)$ vidurkių $\bar{\Delta}_{Q,l}$ ($l = 1, 2, \dots, 50$), yra neigiami. Jų yra apie 66 %. Šį rezultatą galima interpretuoti taip, kad HRR funkcijos $\dot{Q}_{FDS}(t)$ reikšmėms, apskaičiuojamoms su FDS programa, daro įtakos ribotas gaisro patalpos ventiliavimas. Įvesties HRR funkcijos $\dot{Q}(t)$ reikšmės gaunamos laisvo degimo sąlygomis. Toks rezultatas buvo lauktinas.
2. Kita vertus, maždaug 34 % reikšmių $\bar{\Delta}_{Q,l}$ buvo teigiamos. Šis rezultatas yra paradoksalus ir sunkiai paaiškinamas. Ribotas ventiliavimas gali turėti tik mažinančios įtakos HRR reikšmėms. Atsakymo, matyt, reikia ieškoti aiškinantis FDS programos algoritmo ypatybes.
3. Vidurkių reikšmėms $\bar{\Delta}_{Q,l}$ yra būdingas didelis kintamumas. Jų variacijos koeficientas buvo 144 %, o amplitudė – nuo 3561 kW iki 516 kW (3.9 lentelė). Variacijos koeficiento reikšmė 144 % daug kartų viršija įvesties dydžių x_i variacijos koeficientus 5,55 – 5,83 %, gautus randomizavimo intervalus $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ aprašius tolygiaisiais tikimybių skirstiniais (3.2 lentelė). Galima prieiti prie išvados, kad FDS programos algoritmas labai padidina santykinai mažą randomizuotų įvesties dydžių x_i, nusakančių pradinę HRR funkciją $\dot{Q}(t)$, kintamumą ir generuoja didelį vidinės HRR funkcijos $\dot{Q}_{FDS}(t)$ kintamumą.
4. Didelė vidurkių $\bar{\Delta}_{Q,l}$ variacijos koeficiento $\mathrm{cov}\Delta_Q$ reikšmė natūraliai atspindi ir didelę šių dydžių amplitudę $[\min\Delta_Q, \max\Delta_Q]$ = [– 3561 kW, 516 kW]. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad mažiausia vidurkių reikšmė – 3561 kW penkis kartus viršijo vidurkį – 702,7. Tai atskleidžia faktą, kad modeliuojant su FDS programa galimi labai dideli vidinės funkcijos $\dot{Q}_{FDS}(t)$ nuokrypiai nuo įvesties funkcijos $\dot{Q}(t)$.

5. Imčių $\{s\Delta_{Q,l},\ l = 1, 2, \ldots, 50\}$, $\{\min\Delta_{Q,l},\ l = 1, 2, \ldots, 50\}$ ir $\{\max\Delta_{Q,l},\ l = 1, 2, \ldots, 50\}$ variacijos koeficientai yra santykinai dideli ir lygūs, atitinkamai, 62,4 %, 71,1 % ir 119,5 % (3.9 lentelė). Tai reiškia, kad skirtumai $\dot{Q}_l(t_\tau) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau)$, generuoti atliekant kiekvieną iš 50 stochastinio modeliavimo ciklų, tuose cikluose svyravo apie vidurkius $\bar{\Delta}_{Q,l}$ gana nevienodai. Su modeliavimo ciklais susijusios standartų reikšmės $s\Delta_{Q,l}$ kito nuo 486 kW iki 3612 kW. Taigi, didžiausia ir mažiausia $s\Delta_{Q,l}$ reikšmės skiriasi beveik 7,5 karto. Šis rezultatas taip pat liudija apie didelę vidinę randomizaciją, kuri yra generuojama FDS programos ir jo vartotojui nėra galimybės lengvai tą randomizaciją valdyti.

3.9 lentelė. Dydžių $\bar{\Delta}_{Q,l}$, $s\Delta_{Q,l}$, $\min\Delta_{Q,l}$ ir $\max\Delta_{Q,l}$ ($l = 1, 2, \ldots, 50$) imčių statistikų skaičiavimo rezultatai

Statistika	Vidurkių $\bar{\Delta}_{Q,l}$ imtis	Standartų $s\Delta_{Q,l}$ imtis	Minimumų $\min\Delta_{Q,l}$ imtis	Maksimumų $\max\Delta_{Q,l}$ imtis
Vidurkis $\bar{\Delta}_Q$, kW	– 702,7	1181,3	– 4266,2	809,3
Var. koef. $\mathrm{cov}\Delta_Q$, %	143,9	62,4	71,1	119,5
Min. $\min\Delta_Q$, kW	– 3560,8	486,0	– 12884,7	0,0
Maks. $\max\Delta_Q$, kW	516,1	3612,3	– 495,3	3121,7

Apibendrinant galima teigti, kad stochastinio modeliavimo rezultatai atskleidė įdomų, nors ir entuziazmo nekeliantį faktą, kad FDS programos algoritmas pradinį deterministinį HRR modelį perskaičiuoja į vidinį HRR modelį ir šie modeliai gali stipriai skirtis. Iš anksto negalima pasakyti, koks bus tas vidinis HRR modelis. Santykinai silpnas pradinio HRR modelio randomizavimas sukeliant nedidelį jo kintamumą gali virsti labai stipriu vidinio HRR modelio kintamumu. Tiksliai ir išsamiai paaiškinti šį FDS programos taikymo rezultatą yra sunku. Tam reikėtų atlikti papildomus tyrimus.

4. IŠVADOS

4.1. Bendro pobūdžio išvados

1. Analizuojant gaisrų prognozavimo problemą nustatyta, kad gaisro procesas yra sudėtingas reiškinys, apibūdinamas dideliu skaičiumi rodiklių. Jų reikšmės paprastai smarkiai keičiasi gaisro vystymosi metu. Nemaža dalis šių rodiklių yra susijusi su žmonių, galinčių būti gaisro apimtame pastate, sauga. Šių rodiklių visuma nusako gaisro pakeliamumo sąlygas, o pagrindiniai rodikliai yra žmones veikianti temperatūra, spinduliuotė ir su patalpų uždūminimu susiję poveikiai.
2. Nagrinėjant gaisrų prognozavimą iškilo klausimas, kokie fiziniai dydžiai turi didžiausios įtakos pakeliamumo sąlygas nusakantiems rodikliams. Prieita prie išvados, kad matematiškai šis klausimas išreiškiamas jautrumo analizės ir su ja susijusio stochastinio modeliavimo uždavinių pavidalu. Jautrumo analizė ir stochastinis modeliavimas yra metodai, priklausantys operacijų tyrinėjimo mokslo disciplinai. Ji yra platus praktines problemas sprendžiančių matematinių metodų rinkinys.
3. Išnagrinėjus jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo taikymo galimybes ir naudą prognozuojant gaisrus nustatyta, kad šiuos uždavinius tenka spręsti kompiuteriu kartotinai modeliuojant gaisrą. Gaisro proceso modelis turi „juodosios dėžės“ pobūdį. Šio darbo kontekste jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo tikslas – susieti tos „dėžės“ įvestį nusakančias gaisro charakteristikas su pakeliamumo sąlygas apibūdinančiais rodikliais.
4. Atlikus trumpą jautrumo analizės metodų apžvalgą, nutarta pasitelkti tuos analizės metodus, kurie remiasi stochastiniu modeliavimu. Literatūroje teigiama, kas jautrumo analizė, atliekama stochastiškai modeliuojant, yra efektyviausia iš visų analizės metodų. Be to, stochastinis modeliavimas, taikomas nepriklausomai nuo jautrumo analizės, gali suteikti naudingos informacijos apie pakeliamumo sąlygas nusakančių gaisro proceso rodiklių kintamumą.
5. Išnagrinėjus publikacijas apie stochastinio modeliavimo ir jautrumo analizės metodų taikymą pastatų gaisrinei saugai vertinti, rasta, kad jose sprendžiami pavyzdžiai nagrinėja santykinai paprastus pastatus, o gaisro modeliavimui taikytos gerai žinomos kompiuterio programos. Paprastų pastatų pasirinkimą lėmė ta aplinkybė, kad šios programos gaisrą modeliuoja gana ilgą laiką. Tas laikas padidėja tiek kartų, kiek yra kartojamas stochastinio modeliavimo ciklas. Todėl ir šio darbo skaičiavimo rezultatai gauti nagrinėjant architektūriniu požiūriu paprastą pastatą.
6. Panagrinėjus anksčiau spręstus pastatų gaisrų modeliavimo uždavinius nustatyta, kad net ir paprastų pastatų atveju gaisro modelio įvesties kintamųjų skaičius yra labai didelis. Jie gali būti tiek fiziniai dydžiai, tiek abstrakčios, iš gaisro modelio išplaukiančios charakteristikos, tarkime, erdvės ir laiko diskretizavimo intervalai. Įvesties kintamųjų gausa sukelia problemą, kuriuos iš jų pasirinkti sprendžiant jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo uždavinius.

7. Susidūrus su gaisro modelio įvesties kintamųjų gausos problema, prieita prie išvados, kad racionaliausia apsiriboti tais kintamaisiais, kurie nusako užsidegusio objekto degimo procesą. Šie kintamieji yra degimo energijos išskyrimo greičio modelio parametrai. Jis dar vadinamas HRR modeliu. Dėmesio sutelkimas į HRR modelio parametrus leido supaprastinti jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo uždavinius, pažvelgiant į juos svarbiausiu gaisro modeliavimo aspektu.
8. HRR modelių, siejamų su konkrečiais degančiais objektais (konkrečios paskirties pastatų patalpomis) yra santykinai daug. Be to, degimo energijos išskyrimo greičiams būdingas didelis statistinis kintamumas. Todėl atliekant praktinius skaičiavimus beveik išimtinai taikomi supaprasti HRR modeliai. Žinant šiuos faktus, padaryta išvada, kad šiame darbe nagrinėtus jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo uždavinius pradžioje reikia spręsti remiantis supaprastintais HRR modeliais.
9. Nutarus jautrumo analizės ir stochastinio modeliavimo uždavinius sieti su pakeliamumo sąlygų vertinimo problema, nustatyta, kad geriausiai šiems uždaviniams spręsti tinka supaprastintas HRR modelis, susiejantis energijos išskyrimo greitį su gaisro laiko kvadratu t^2 (t-kvadrato modelis). Modelis taikomas gaisro tarpsniui iki apėmimo pradžios, vadinamu gaisro augimo tarpsniu ir darbe žymėtu simboliu t_g. Žmonės turi būti evakuoti prieš prasidedant apėmimui, nes jam artėjant didėja nepakeliamų sąlygų susidarymo pavojus.
10. Gaisro modeliavimui pasirinkus t-kvadrato HRR modelį prieita prie išvados, kad iš šio modelio natūraliai išplaukia trys įvesties kintamieji jautrumo analizei ir stochastiniam modeliavimui atlikti: gaisro augimo pagreitis, pastovus energijos išskyrimo greitis ir modelio argumentu tarnaujančio laiko laipsnio rodiklis, kuriuo tyrimo sumetimais buvo pakeistas dvejetas t^2 išraiškoje. Šie trys įvesties kintamieji pilnai išreiškia ir kiek praplečia t-kvadrato modelį.
11. Remiantis šio darbo autoriaus turimomis žiniomis apie pakeliamumo sąlygų susidarymo kriterijus, nustatyta, kad keturios gaisro charakteristikos, įtrauktos į tuos kriterijus, gali būti naudojami kaip išvesties kintamieji, atliekant gaisro modelio jautrumo analizę ir įtraukiant šį modelį į stochastinio modeliavimo ciklą. Tos charakteristikos yra žmogų veikianti temperatūra ir šiluminė spinduliuotė bei sukauptoji dozė ir optinis gylis.
12. Nagrinėjant jaurumo analizės taikymo galimybes šio darbo kontekste nustatyta, kad ją labai apsunkina visų keturių ankstesnėje išvadoje išvardintų išvesties kintamųjų skaičiuojamų reikšmių pavidalas. Modeliuojant gaisrą, kiekvieno kintamojo reikšmės išreiškiamos ne fiksuotais dydžiais, o laiko sekomis. Tačiau jautrumo analizės metodai buvo sukurti tirti matematinius modelius, kurių išvesties kintamųjų reikšmės būna fiksuoti, skaliariniai dydžiai.

4.2. Išvados, susijusios su skaitiniu gaisro modeliavimu ir to modeliavimo rezultatais

1. Gaisro modelio išvesties kintamųjų išreiškimo laiko sekomis problemą galima spręsti bent dviem būdais. Pirma, laiko sekas galima pakeisti momentinėmis reikšmėmis, apskaičiuojamomis gaisro

augimo pabaigos momentui t_g. Antra, tas sekas taip pat galima vidurkinti pagal t_g ir pakeisti apskaičiuotais vidurkiais. Pakartojus tokius keitimus stochastinio modeliavimo cikle, gausime išvesties kintamųjų momentinių reikšmių, susijusių su t_g, aibę arba tų kintamųjų vidurkių aibę.

2. Nustatyta, kad momentinių reikšmių aibės kintamumas yra daug didesnis už vidurkių aibės kintamumą. Todėl jautrumo analizės rezultatai, gauti taikant momentines reikšmes ir vidurkius, skyrėsi vienas nuo kito. Jautrumo analizė, atliekama taikant laiko sekų vidurkius, yra stabilesnė, geriau atskleidžia matematinio gaisro modelio ypatybes.
3. Išvesties kintamųjų laiko sekų vidurkinimas yra tik vienas iš būdų nusakyti tas sekas fiksuotomis reikšmėmis. Vidurkius galima pakeisti kitokią informaciją išreiškiančiais dydžiais, pavyzdžiui, konservatyviais procentiliais. Tenka konstatuoti, kad reikia gilesnio tyrimo siekiant rasti optimalų būdą, kaip atspindėti laiko sekų informaciją fiksuotomis reikšmėmis. Kiek mums žinoma, ši problema jautrumo analizės srityje iki šiol gvildenta nebuvo.
4. Nagrinėjant literatūrą apie matematinį gaisrų modeliavimą rasta, kad jis yra beveik išimtinai deterministinis. Informacijos apie gaisro modelių įvesties kintamųjų tikimybių skirstinius rasti nepavyko. Tai natūraliai apsunkina jautrumo analizės metodų, kurie remiasi stochastiniu modeliavimu, taikymą. Tokiais atvejais jautrumo analizė atliekama randomizuojant įvesties kintamųjų reikšmes. Šiame darbe taikyti dažnai naudojami ± 10 % randomizavimo intervalai.
5. Atliekant gaisro modeliavimus, įtrauktus į stochastinio modeliavimo ciklą, aptiktas papildomas randomizavimo šaltinis. Jis susidaro dėl to, kad modeliuojant gaisrą su CFD programa, pradinis HRR modelis yra perskaičiuojamas į vidinį tos programos modelį. Pastarasis modelis gali stipriai skirtis nuo pradinio modelio. Vidiniam modeliui būdingas santykinai didelis atsitiktinio pobūdžio energijos išskyrimo greičio reikšmių svyravimas (atsitiktinis osciliavimas).
6. Darbe atlikti skaičiavimai parodė, kad jautrumo analizę verta pradėti skaičiuojant koreliacijos koeficientus, tai yra, taikant koreliacinę analizę. Vėliau šios analizės rezultatus galima patikrinti pritaikius dispersijų įnašo metodą. Koreliacinė analizė yra paprastesnė ir informatyvesnė už šį metodą. Ji leidžia ne tik išrikiuoti įvesties kintamuosius pagal jų įtaką, bet ir atskleisti jų ryšio su išvesties kintamaisiais pobūdį, pavyzdžiui, to ryšio netiesiškumą ir teigiamumą arba neigiamumą.
7. Jautrumo analizės rezultatai gauti skaičiuojant koreliacijos koeficientus leidžia padaryti išvadą, kad šie rezultatai gali būti labai įvairialypiai, net jei gaisras modeliuojamas santykinai paprastam pastatui. Jie priklauso nuo to, kurioje gaisro ištikto pastato patalpoje matuojamos išvesties kintamųjų reikšmės, kokia yra išvesties kintamojo fizinė prigimtis, kokie užslėpti kintamieji, jei tokie egzistuoja, gali turėti įtakos įvesties ir įvesties kintamųjų ryšiams.
8. Kai kurie jautrumo analizės rezultatai, gauti sprendžiant darbe nagrinėtą pavyzdį, buvo netikėti. Paaiškinti jų fizinę prigimtį nebuvo paprasta. Pavyzdžiui, gautos neigiamos koreliacijos tarp energijos išskyrimo greičio ir išvesties kintamųjų (temperatūros, šiluminės spinduliuotės, dozės

ir optinio gylio). Darbe pabandėme paaiškinti tokių jautrumo analizės rezultatų prigimtį. Tačiau galima daryti išvadą, kad matematinis gaisro proceso modelis yra tiek sudėtingas, jog reikia išsamesnių tyrimų atskleisti jo įvesties ir išvesties informacijos koreliacijas. Tokie tyrimai galėtų pagerinti praktikoje nusistovėjusį gaisrų prognozavimo matematiškai modeliuojant lygį.

LITERATŪRA

Adjiski, V., Zubicek, V., Despodov, Z. (2019). Monte Carlo simulation of uncertain parameters to evaluate the evacuation process in an underground mine fire emergency. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, November, 907–917.

Airah, W. P. M. (2011). Tenability criteria for design of smoke hazard management systems. *Ecolibrium*, August, 32–37.

Alos-Moya, J., Paya-Zaforteza, I., Garlock, M. E. M., Loma-Ossorio, E. Hospitaler, A. (2014). Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models. *Engineering Structures*, 68 (June), 96–110.

Au, S. K., Wang, Z.-H., & Lo, S.-M. (2007). Compartment fire risk analysis by advanced Monte Carlo simulation. *Engineering Structures*, 29(9), 2381–2390.

Beverly Hills Supper Club fire. (2022). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Beverly_Hills_Supper_Club_fire#Fire

Borgonovo, E., & Peccati, L. (2007). Global sensitivity analysis in inventory management. *International Journal of Production Economics*, 108(1–2), 302–313.

BSI (2003). *PD 7974-1:2003, Application of fire safety engineering principles to the design of buildings: Part 1 – initiation and development of fire within the enclosure of origin (sub-system 1).* London: BSI Standards Publication.

Campolongo, F., Cariboni, J., Saltelli, A. (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Softvare*, 22(10), 1509 – 1518.

Campolongo, F., & Saltelli, A. (1997). Sensitivity analysis of an environmental model: an application of different analysis methods. *Reliability Engineering & System Safety*, 57(1), 49–69.

Čekanavičius, V.; Murauskas, G. (2011). *Statistika ir jos taikymai II*. Vilnius: TEV.

Downing, D. J., Gardner, R. H., & Hoffman, F. O. (1985). An Examination of Response-Surface Methodologies for Uncertainty Analysis in Assessment Models. *Technometrics*, 27(2), 151 – 163.

EN 1991-1-2. (2002). *Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization. Brussels

EU Science Hub. (2023). *European Commission*. https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/simlab

FDS+Evac. (2019). *National Institute of Standards and Technology*. https://pages.nist.gov/fds-smv/

Gwynne, S. M. V. Boyce, K. E. (2016). Engineeiring data. in: M. J. Hurley. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed.*, New York etc.: Springer: 2429–2551.

Gwynne, S. M. V., Rosenbaum, E. R. (2015). Employing the hydraulic model in assessing emergency movement. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed.*, New York etc.: Springer: 2115–2151.

Han, Y. & Liu, H. (2017). Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation. *Physica*, A 469, 499–509.

Hietaniemi, J. (2007). Probabilistic simulation of fire endurance of a wooden beam. *Structural Safety* 29, 2007: 322-336.

Höglander, K., & Sundström, B. (1997). *Design fires for preflashover fires. Characteristic heat release rates of building contents*. Boras, Swedish National Testing and Research Institute.

Homma, T., & Saltelli, A. (1996). Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering and System Safety*, 52(1), 1–17.

Hopkin, C., Spearpoint, M., & Hopkin, D. (2019). A review of design values adopted for heat release rate per unit area. *Fire Technology,* 55, 1599–1618.

Hostikka S; Korhonen, T; Keski-Rahkonen, O. (2005). Two-model Monte Carlo Simulation of Fire Scenarios. *VTT Technical Research Centre of Finland*, 1241–1252

Ingason, H. (2009). Design fire curves for tunnels. *Fire Safety Journal*, 44(2), 259–265.

Karlsson, V., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Pressed., New York etc.: Springer: 2170–2114.

Keski-Rahkonen, O., Mangs, J., Hostikka, S., & Korhonen, T. (2007). Quantitative application of Monte Carlo simulation in Fire-PSA. *Kerntechnik*, 72(3), 149–155. doi:10.3139/124.100333

Klote, J. H., (2016). Smoke Control, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed.*, New York etc.: Springer: 1818–1819.

Kopustinskas, V., Alzbutas, R. ir Augutis J. (2007). Matematinių modelių parametrų jautrumo ir rezultatų neapibrėžtumo statistiniai tyrimo metodai. *Energetika*, sausis, 10 –15.

Korhonen, T (2018). *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac. Technical Reference and User's Guide*. Helsinki: VTT.

Kuligowski, E. D. (2015). Human behaviour in fire,in. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed.*, New York etc.: Springer: 2170–2114.

Kuligowski, E. D.; Peacock R. D. (2005). *A review of building evacuation models*. National institute of standards and technology, Washington, DC.

Kuzabavičius, M. (2022). *Gaisro sukeliamo suskystintųjų dujų cilindrų skilimo pavojaus vertinimas. Baigiamasis magistro darbas*. Vilnius. VGTU.

Lindstrom, T. & Lund, D. (2009*). A method of quantifying user uncertainty in FDS by using Monte Carlo analysis*,Lund, Lund universitet.

Liu, B; Liu, H; Zhang, H.; Qin, X. (2018). A social force evacuation model driven by video data. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 84(May), 190–203.

McGrattan, K. & Forney, G. (2000). *Fire Dynamics Simulator -User's Manual*. NISTIR 6469. Gaithersburg, MD: NIST.

Morris, D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2), 161 – 174.

NFPA (1985). *Guide for Smoke and Heat Venting, NFPA 204M*. Quincy, National Fire Protection Association.

NFPA (1991). *Guide for Smoke Management System in Malls, Atria, and Large Areas, NFPA 92B, 1991 Edition.* Quincy: NFPA.

NFPA (2009). *Guide for Smoke Management System in Malls, Atria, and Large Areas, NFPA 92B, 2009 Edition.* Quincy: NFPA.

Operations research. (2023). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Operations_research

Owen, M., Galea, E. R., Lawrence, P. (1997). Advanced occupational behaviour features of the building-EXODUS evacuation model. In Y. Hasemi (Ed.), *Fire Safety Science* (pp. 795–806). Melbourne: International Association of Fire Safety Science.

Purkiss, J.A. & Li, L.Y. (2017). *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Boca Raton, CRC Press.

Purser, D.A., (2009). Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases and heat. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th ed.* National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269, , pp. 2/96 – 2/193.

Ronchi, E., Arias, S., La Mendola, S., & Johansson, N. (2019). *A fire safety assessment approach for evacuation analysis in underground physics research facilities. Fire Safety Journal, 108, 102839.* doi:10.1016/j.firesaf.2019.102839

Sachs, L., (1982). Applied Statistics. *A Handbook of Techniques*. Springer-Verlag, New York

Saltelli, A.; Ratto, M.; Andres, T. (2008). Global sensitivity analysis. *The Primer*. Chichester: Wiley.

SFPE (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed.*, New York etc.: Springer.

Skorka, D. (2022). Žmonių saugos gaisro apimtuose komerciniuose pastatuose vertinimas taikant jautrumo analizės metodą. *Baigiamasis bakalauro darbas*. Vilnius: VGTU.

Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mahtematics and Computers in Simulation*, 55(1–3), 271–280.

Staffansson, L. (2010). *Selecting design fire. Department of Fire Safety Engineering and Systems Sfety*, Lund, Lund university.

Tinaburri, A., (2022). Principles for Monte Carlo agent-based evacuation simulations including occupants who need assistance. From RSET to RiSET. *Fire Safety Journal*, 127, 1–21.

Wang, H., Dembsey, N., A., Meacham, B., J., Liu, S., Simeoni, A. (2022 A sensitivity matrix method to understand the building fire egress performance gap. *Fire Safety Journal*, 127, 1–15.

Zhang, X., Li, X., & Hadjisophocleous, G. (2013). A probabilistic occupant evacuation model for fire emergencies using Monte Carlo methods. *Fire Safety Journal*, 58, 15–24.

Zhang, X., Li, X., & Hadjisophocleous, G. (2014). A probabilistic occupant response model for fire emergencies. *Fire Safety Journal*, 68, 41–51.

A priedas.

Gaisro modelio įvesties kintamųjų reikšmės naudotos jautrumo analizei

Šiame priede pateiktos gaisro modelio įvesties kintamųjų reikšmės x_{il} (i = 1, 2, 3; l = 1, 2, ... , 50), generuotos stochastiškai modeliuojant ir naudotos jautrumo analizei atlikti (A.1 lentelė). Taip pat pateiktos gaisro augimo trukmės reikšmės ir t_{gl} ir HRRPUA reikšmės $\dot{Q}''$. Šių reikšmių gavimas aprašytas 3.3.1 ir 3.3.2 skyreliuose.

A.1 lentelė. Jautrumo analizės įvesties kintamųjų reikšmės x_{il} (i = 1, 2, 3) ir su jomis susiję dydžiai t_{gl} ir $\dot{Q}''$ bei FDS programa apskaičiuotų HRR reikšmių vidurkiai $\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$

l	x_{1l}, kW/s^2	x_{2l}, kW	x_{3l}, –	t_{gl}, s	$\dot{Q}''$, kW/m^2	$\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}$, kW/m^2
1	5,1090E-02	5094	2,002	314,0	566,0	1144,44
2	4,9130E-02	5286	1,852	521,4	587,4	1087,59
3	4,4700E-02	4538	2,200	188,8	504,2	1176,96
4	4,8230E-02	4621	1,913	401,8	513,5	988,23
5	4,9020E-02	5066	2,032	293,7	562,9	1197,46
6	5,1390E-02	4920	1,918	395,2	546,7	996,84
7	4,9990E-02	4902	2,038	281,5	544,6	1211,45
8	4,4130E-02	4659	2,056	277,7	517,6	1182,21
9	4,2490E-02	5182	2,025	324,5	575,8	1130,16
10	4,5080E-02	4986	1,991	341,2	554,0	1076,97
11	4,9010E-02	4842	1,839	520,0	538,0	1059,23
12	5,1270E-02	5106	1,985	329,1	567,3	1123,51
13	5,0850E-02	5407	1,862	501,5	600,8	1104,00
14	4,3140E-02	4610	2,042	290,3	512,2	1153,39
15	4,9400E-02	5168	1,985	338,1	574,2	1123,78
16	4,6510E-02	4791	1,918	410,4	532,3	993,55
17	4,4480E-02	4593	2,014	309,1	510,3	1122,09
18	4,5050E-02	4816	1,948	382,2	535,1	1007,82
19	4,6320E-02	5312	2,116	246,1	590,2	1278,14
20	5,0330E-02	4705	1,831	519,1	522,8	1009,26
21	4,7860E-02	4934	2,130	226,0	548,3	1238,64
22	4,5580E-02	5070	2,077	268,9	563,3	1226,11
23	4,8640E-02	4713	2,040	278,3	523,6	1183,95
24	4,6860E-02	4538	1,907	411,6	504,2	976,82
25	4,2310E-02	5034	1,906	459,5	559,3	1030,72
26	5,0130E-02	5464	1,953	379,3	607,2	1062,18
27	4,3600E-02	5248	1,886	494,3	583,1	1074,96
28	4,7650E-02	4878	2,146	216,3	542,0	1212,09
29	4,8130E-02	4838	2,117	230,4	537,6	1220,46
30	4,5410E-02	5478	2,106	258,9	608,7	1289,97
31	4,2360E-02	4754	2,073	273,0	528,2	1195,71
32	4,8000E-02	4741	2,135	218,6	526,8	1207,49
33	4,7030E-02	5247	1,860	517,7	583,0	1071,05
34	4,7770E-02	4692	2,026	291,5	521,3	1162,71
35	4,3460E-02	5160	1,851	550,6	573,4	1080,90

A.1 lentelės tęsinys

36	4,2930E-02	4586	1,814	591,0	509,5	1013,61
37	4,9230E-02	4657	1,882	440,7	517,4	970,23
38	4,6400E-02	5380	2,134	236,1	597,8	1288,02
39	4,7220E-02	5269	2,181	206,3	585,5	1287,48
40	4,9110E-02	5458	1,832	567,5	606,4	1119,84
41	5,0780E-02	5233	2,053	276,8	581,4	1231,71
42	4,8240E-02	5384	1,881	483,1	598,2	1103,91
43	4,2610E-02	4714	2,108	247,1	523,8	1189,90
44	4,6060E-02	5439	1,909	453,5	604,4	1074,91
45	4,4570E-02	5187	2,039	305,5	576,4	1153,30
46	5,1230E-02	5169	1,879	459,8	574,4	1033,13
47	4,3370E-02	5126	2,006	337,8	569,5	1092,65
48	4,6050E-02	5043	1,826	574,9	560,4	1062,96
49	4,6600E-02	4844	2,046	283,4	538,2	1192,33
50	4,9430E-02	5475	2,198	197,4	608,3	1317,84

B priedas.

FORTRAN programa „HRR“ energijos išskyrimo greičio sekoms generuoti

Priede pateiktas FORTRAN kalba parašytos programos „HRR“ tekstas bei įvesties ir išvesties failų tekstai. Programa sukurta reikšmių poroms skaičiuoti $(t_\tau,\ \dot{Q}(t_\tau)/x_{2l}) \equiv (t_\tau,\ \dot{Q}(t_\tau)/\dot{Q}(t_{gl}))$ ($\tau = 1, 2, \ldots, n_\tau$) kiekviename stochastinio modeliavimo cikle l (3.3.2 skyrelis). Šios poros buvo naudojamos sudarant gaisro HRR modelį, naudojamą skaičiuojant su FDS programa. Programos tekstas pateiktas B.1 lentelėje, įvesties failas parodytas B.2 lentelėje

B.1 lentelė. Programos HRR tekstas

```
      PROGRAM HRR
*
       INTEGER seed, nx, n_tau, tau
       INTEGER missing
*
      REAL*8  x(100),x_nom(100), tg
       REAL*8  Afire, HRRPUA, HRR_tau, fraction
      REAL*8  half_width, delta_l, delta_u
      REAL*8  URAND
*
      OPEN(1,FILE='Data.txt',STATUS='OLD')
      OPEN(2,FILE='Results.txt',STATUS='OLD')
      OPEN(3,FILE='Results_HRR.txt',STATUS='OLD')
*
* Read the values of the released volume and the length of trench pool
      READ(1,'(G10.3)') nx
      READ(1,'(G10.3)') seed
      READ(1,'(G10.3)') N
      READ(1,'(/\)')
      READ(1,'(G10.3)') (x_nom(i), i=1,nx)
      READ(1,'(/\)')
      READ(1,'(G10.3)') half_width
      READ(1,'(G10.3)') Afire
      READ(1,'(G10.3)') n_tau
*
      WRITE(*,*) 'HRR is running ... '
*
* Assign missing data code
      missing=-9999
* Compute factor for lower and upper limits of randomisation interval
       delta_l = 1.0-0.01*half_width
       delta_u      = 1.0+0.01*half_width
* Write the caption for simulation data file
      WRITE(2,'(10A10)') 'l', 'x1',  'x2',  'x3', 'tg', 'HRRPUA'
*
```

```
* The main simulation loop
      DO l=1,N
* Generate values of randomnised input variables
        DO i=1,nx
             x(i)=x_nom(i)*delta_l+(delta_u-delta_l)*x_nom(i)*URAND(seed)
        END DO
* Compute the duration of the fire growth period
        tg=(x(2)/x(1))**(1.0/x(3))
* Compute the value of HRRPUA
        HRRPUA=x(2)/Afire
* Assign zeros to time and HRR at the origin
        t_tau = 0.0
        HRR_tau = 0.0
* Develop HRR sequence for the current simulation run
        WRITE(3,'(I10,E10.4,2I10)') missing,HRRPUA, missing, missing
        WRITE(3,'(I10,100E10.4)') l, t_tau, HRR_tau, x(2)
        DO tau=1,n_tau
           t_tau = t_tau + tg/n_tau
           HRR_tau=x(1)*t_tau**x(3)
          fraction = HRR_tau/x(2)
          WRITE(3,'(I10,100E10.4)') l, t_tau, fraction, HRR_tau
        END DO
         WRITE(2,'(I10,100E10.4)') l, (x(i), i=1,nx), tg, HRRPUA
      END DO
*
      STOP
      END
```

B.2 lentelė. Programos HRR įvesties failas

```
3          : The number of input variables
23213      : The seed value
50         : The number of simulation runs
*
0.047      : Nominal value of x1
5000.      : Nominal value of x2
2.         : Nominal value of x3
*
10.        : Interval half-width for randomisation (%)
9.         : Area of fire (m^2)
5          : Number of intervals used for the discretisation of the fire growth time
```

B.3 lentelė. Programos HRR išvesties failo fragmentas, kuriame pavaizduota dalis reikšmių $(t_\tau, \dot{Q}(t_\tau)/x_{21})$ (τ = 1, 2, ... , 65) (3.3.2 skyrelis)

-9999	.5660E+03	-9999	-9999
1	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00
1	.4831E+01	.2348E-03	.1196E+01
1	.9662E+01	.9404E-03	.4790E+01
1	.1449E+02	.2118E-02	.1079E+02
1	.1932E+02	.3767E-02	.1919E+02
1	.2415E+02	.5888E-02	.2999E+02
1	.2898E+02	.8481E-02	.4320E+02
1	.3382E+02	.1155E-01	.5882E+02
1	.3865E+02	.1509E-01	.7685E+02
1	.4348E+02	.1910E-01	.9728E+02
1	.4831E+02	.2358E-01	.1201E+03
1	.5314E+02	.2854E-01	.1454E+03
1	.5797E+02	.3397E-01	.1730E+03
1	.6280E+02	.3988E-01	.2031E+03
1	.6763E+02	.4625E-01	.2356E+03
1	.7246E+02	.5310E-01	.2705E+03
1	.7729E+02	.6043E-01	.3078E+03
1	.8212E+02	.6822E-01	.3475E+03
1	.8695E+02	.7650E-01	.3897E+03
1	.9179E+02	.8524E-01	.4342E+03
1	.9662E+02	.9446E-01	.4812E+03
1	.1014E+03	.1042E+00	.5305E+03
1	.1063E+03	.1143E+00	.5823E+03
1	.1111E+03	.1250E+00	.6365E+03
1	.1159E+03	.1361E+00	.6931E+03
1	.1208E+03	.1477E+00	.7521E+03
1	.1256E+03	.1597E+00	.8136E+03
1	.1304E+03	.1723E+00	.8774E+03
1	.1353E+03	.1853E+00	.9437E+03
1	.1401E+03	.1987E+00	.1012E+04
1	.1449E+03	.2127E+00	.1083E+04
1	.1498E+03	.2271E+00	.1157E+04
1	.1546E+03	.2420E+00	.1233E+04
1	.1594E+03	.2574E+00	.1311E+04
1	.1642E+03	.2733E+00	.1392E+04
1	.1691E+03	.2896E+00	.1475E+04
1	.1739E+03	.3064E+00	.1561E+04
1	.1787E+03	.3237E+00	.1649E+04
1	.1836E+03	.3414E+00	.1739E+04
1	.1884E+03	.3596E+00	.1832E+04
1	.1932E+03	.3783E+00	.1927E+04
...	...	...	...

C priedas.

Jautrumo analizei naudotos gaisro modelio išvesties kintamųjų reikšmės

Šio priedo C.1 ir C.2 lentelėse pateiktos gaisro charakteristikų y_{jl} imtys, gautos 50 kartų modeliuojant gaisrą su įvesties dydžiais x_{il} (i = 1, 2, 3) iš B priedo B.1 lentelės (l = 1, 2, ... , 50). Charakteristikos susijusios su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis, pavaizduotomis 3.2 – 3.4 pav. Charakteristikų reikšmės $y_{jl} = y_{jl}(t_\tau)$ buvo apskaičiuotos modeliavimo proceso pabaigos laikams $t_\tau = t_{gl}$, t. y., paskutiniame kiekvieno modeliavimo proceso l žingsnyje (2.12 pav.). C.1 ir C.2 lentelėse taip pat yra pateiktos laiko sekų vidurkių $\bar{y}_{jl}$ reikšmės, apskaičiuotos pagal (2.11) formulę.

C.1 lentelė. Išvesties kintamųjų reikšmės y_{jl} (j = 1, 2, 3, 4), susijusios su pirma virtualių matavimo prietaisų vertikale ir gautos įtraukus matematinį gaisro modelį į stochastinio modeliavimo ciklą (3.3 ir 3.4 pav.)

l	y_{1l}, °C	y_{2l}, kW/m^2	y_{3l}, –	y_{4l}, m^{-1}	$\bar{y}_{1l}$, °C	$\bar{y}_{2l}$, kW/m^2	$\bar{y}_{3l}$, –	$\bar{y}_{4l}$, m^{-1}
1	341,3	5,76	1,304	21,3	247,2	5,55	0,183	9,42
2	327,8	2,08	2,134	17,9	243,0	3,82	0,414	11,66
3	472,9	16,69	0,340	16,6	207,8	5,08	0,034	7,31
4	289,1	3,17	1,258	22,6	232,8	4,15	0,206	10,19
5	360,1	3,34	1,524	21,5	249,6	7,78	0,173	9,20
6	269,9	3,23	1,363	22,8	235,6	4,45	0,234	10,44
7	508,1	34,62	1,460	19,0	250,5	8,68	0,143	8,81
8	508,9	48,73	1,112	17,1	241,8	7,12	0,111	8,50
9	358,1	4,40	1,285	21,2	243,5	5,48	0,185	9,57
10	309,7	4,64	1,186	21,0	236,1	4,69	0,181	9,76
11	302,3	2,22	2,350	21,1	243,9	4,43	0,382	11,23
12	369,8	5,20	1,225	21,1	244,6	5,21	0,178	9,62
13	347,4	2,22	1,915	16,3	239,5	4,01	0,367	11,52
14	406,1	6,42	0,974	19,4	232,7	5,36	0,114	8,84
15	355,1	4,87	1,394	22,0	245,9	5,44	0,201	9,79
16	280,8	3,09	1,475	22,9	239,5	4,66	0,238	10,29
17	335,7	3,60	1,031	20,8	231,5	5,00	0,129	9,10
18	299,1	3,61	1,321	20,7	236,6	4,63	0,210	10,11
19	512,7	45,45	1,256	15,6	246,4	8,21	0,121	8,58
20	313,1	2,31	2,367	21,3	243,9	4,77	0,366	11,18
21	525,6	22,93	0,716	17,4	229,8	5,76	0,074	8,14
22	489,6	11,80	1,070	18,0	240,7	6,73	0,122	8,76
23	447,6	5,38	0,910	17,4	236,0	5,58	0,104	8,68
24	288,4	3,49	1,426	23,0	238,6	4,59	0,218	10,10
25	295,5	2,73	1,935	21,6	242,5	4,41	0,308	10,90
26	282,6	3,23	1,595	22,6	244,1	4,76	0,270	10,58
27	310,0	2,20	1,749	16,8	235,4	3,84	0,329	11,30
28	662,8	46,16	0,603	14,4	226,2	6,58	0,059	7,86
29	519,0	20,92	0,752	17,7	225,3	5,74	0,074	8,25
30	495,3	13,10	1,532	17,4	261,0	9,42	0,155	8,68
31	551,6	20,62	1,093	17,8	243,5	6,80	0,104	8,42
32	556,4	20,46	0,643	17,6	225,1	6,06	0,061	7,89

33	345,1	2,20	2,222	15,4	241,5	4,03	0,400	11,53
34	392,5	7,10	1,015	18,1	236,7	5,65	0,123	8,90
35	283,8	2,26	2,512	18,1	243,8	4,46	0,462	11,55
36	323,2	2,14	2,229	16,9	237,2	3,57	0,375	11,38
37	263,9	3,22	1,398	23,5	236,3	4,27	0,232	10,47
38	578,9	46,52	1,171	16,2	243,9	8,18	0,108	8,41
39	629,0	56,94	0,738	16,4	231,3	6,51	0,070	7,96
40	263,2	2,04	2,630	20,2	247,5	4,25	0,523	11,87
41	397,2	3,94	1,190	19,5	245,7	6,07	0,144	9,03
42	369,8	2,42	2,080	19,3	244,1	4,16	0,369	11,37
43	547,0	29,70	0,796	15,6	228,9	5,79	0,083	8,31
44	310,3	2,23	1,758	21,2	238,9	4,09	0,315	11,19
45	421,7	5,91	1,294	18,9	241,2	5,43	0,177	9,45
46	281,3	2,29	1,755	21,0	237,8	4,07	0,308	11,16
47	309,1	3,76	1,248	21,1	238,7	4,83	0,193	9,79
48	278,1	2,03	2,411	18,4	242,4	3,82	0,453	11,63
49	419,5	10,35	1,111	20,2	239,1	5,96	0,129	8,87
50	587,5	70,63	0,751	16,4	232,8	7,15	0,073	7,98

C.2 lentelė. Išvesties kintamųjų reikšmės y_{jl} (j = 1, 2, 3, 4), susijusios su antra virtualių matavimo prietaisų vertikale ir gautos įtraukus matematinį gaisro modelį į stochastinio modeliavimo ciklą (3.3 ir 3.4 pav.)

l	y_{1l}, °C	y_{2l}, kW/m^2	y_{3l}, –	y_{4l}, m^{-1}	$\bar{y}_{1l}$, °C	$\bar{y}_{2l}$, kW/m^2	$\bar{y}_{3l}$, –	$\bar{y}_{4l}$, m^{-1}
1	242,4	1,64	0,057	14,7	100,1	0,42	0,008	6,99
2	325,6	3,20	0,141	16,6	114,8	0,47	0,024	9,05
3	217,7	0,74	0,007	14,2	70,5	0,22	0,001	4,19
4	171,2	0,75	0,068	15,6	98,8	0,39	0,012	7,77
5	273,8	1,78	0,053	15,4	94,2	0,37	0,006	6,77
6	166,5	0,67	0,071	16,3	101,4	0,39	0,013	7,90
7	229,5	1,56	0,048	17,7	91,4	0,31	0,005	6,53
8	217,8	1,92	0,037	16,2	87,7	0,29	0,004	6,19
9	216,8	1,46	0,058	15,6	98,8	0,40	0,008	7,12
10	199,1	1,14	0,056	16,5	99,9	0,39	0,009	7,25
11	315,7	1,81	0,130	17,6	112,9	0,49	0,022	8,80
12	209,3	1,26	0,060	15,8	99,3	0,43	0,009	7,27
13	325,0	10,58	0,124	13,9	116,6	0,51	0,023	8,82
14	230,5	2,34	0,043	16,1	88,0	0,33	0,005	6,39
15	211,8	1,20	0,062	16,5	100,8	0,44	0,009	7,36
16	166,4	0,77	0,073	15,5	102,8	0,40	0,013	7,86
17	256,3	1,56	0,047	14,7	91,4	0,35	0,006	6,69
18	164,1	0,74	0,065	14,8	99,2	0,39	0,011	7,66
19	226,2	1,29	0,035	17,3	89,0	0,30	0,003	5,96
20	313,2	1,07	0,091	10,5	105,7	0,42	0,020	8,62
21	212,4	0,85	0,022	17,5	82,3	0,26	0,002	5,41
22	240,6	1,85	0,039	14,0	90,4	0,33	0,004	6,31
23	222,1	2,38	0,039	17,0	88,0	0,31	0,004	6,37
24	163,4	0,71	0,071	16,6	99,1	0,37	0,012	7,84
25	226,9	0,91	0,089	13,8	105,2	0,42	0,018	8,42
26	180,1	0,79	0,071	14,1	105,3	0,43	0,013	7,89
27	328,5	2,53	0,115	17,0	112,0	0,44	0,020	8,58
28	226,6	0,83	0,015	16,1	79,5	0,25	0,002	5,05
29	211,7	0,91	0,023	18,0	82,8	0,26	0,002	5,46
30	237,1	1,56	0,042	15,6	93,9	0,33	0,004	6,21

C.2 lentelės tęsinys

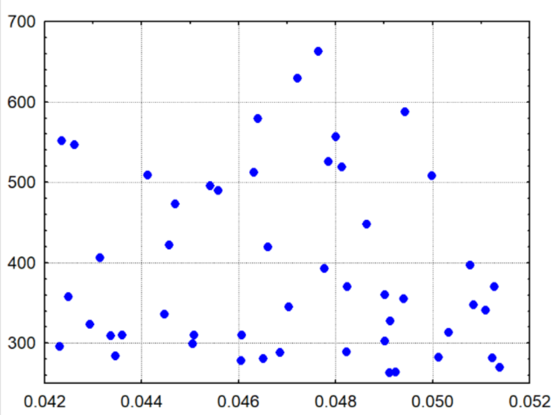
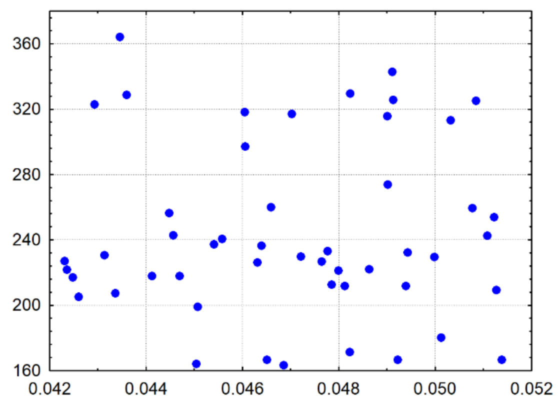
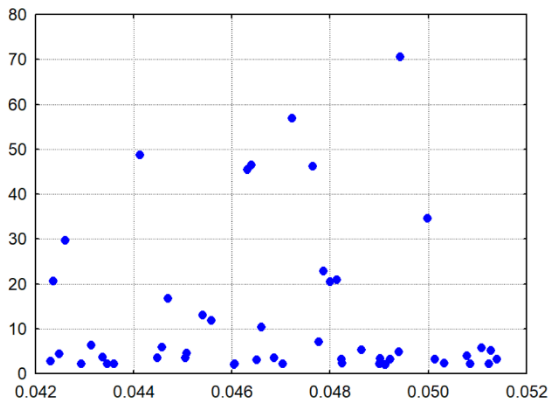
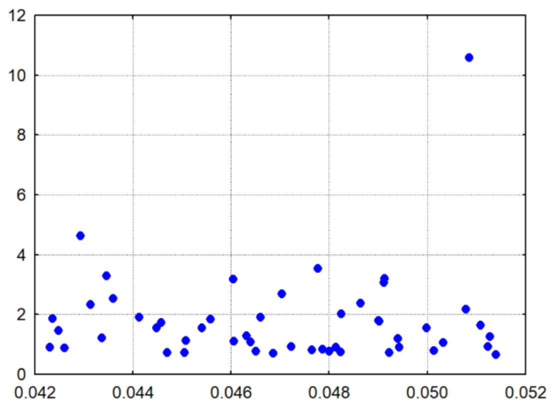
31	221,8	1,88	0,038	17,5	87,7	0,29	0,004	6,21
32	221,2	0,79	0,015	15,9	79,3	0,25	0,002	5,00
33	316,9	2,70	0,120	15,9	112,5	0,43	0,023	8,91
34	232,9	3,54	0,041	16,1	89,4	0,34	0,005	6,49
35	364,1	3,29	0,146	15,5	119,7	0,66	0,027	8,94
36	322,8	4,64	0,132	16,2	110,8	0,44	0,025	8,94
37	166,5	0,74	0,081	13,8	101,6	0,41	0,016	8,19
38	236,3	1,08	0,031	17,4	88,7	0,29	0,003	5,81
39	229,8	0,93	0,015	16,2	81,2	0,26	0,002	5,00
40	342,9	3,08	0,190	17,5	121,8	0,61	0,031	9,34
41	259,4	2,17	0,045	14,1	93,8	0,37	0,005	6,58
42	329,6	2,02	0,112	16,5	112,4	0,44	0,021	8,70
43	204,9	0,88	0,028	18,4	83,3	0,26	0,003	5,68
44	297,2	1,11	0,083	11,0	109,3	0,42	0,018	8,36
45	242,8	1,74	0,053	14,5	98,1	0,40	0,007	6,91
46	253,7	0,92	0,084	10,8	106,5	0,41	0,018	8,38
47	207,3	1,22	0,059	16,1	100,2	0,42	0,009	7,24
48	318,2	3,19	0,154	16,2	116,8	0,53	0,027	9,07
49	260,0	1,90	0,040	13,2	89,9	0,35	0,005	6,45
50	232,1	0,90	0,013	15,9	81,3	0,27	0,001	4,84

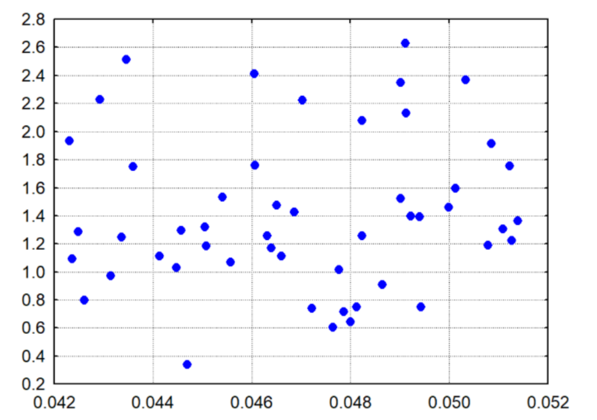
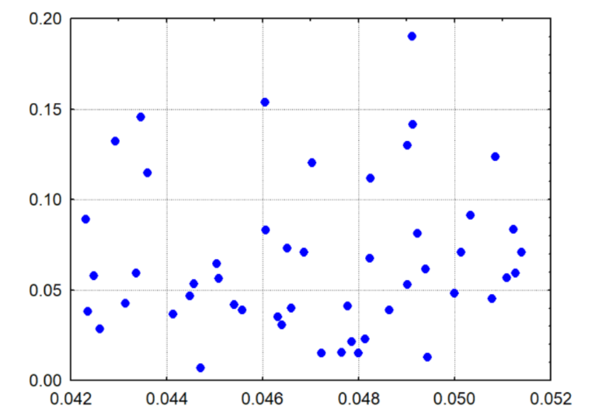
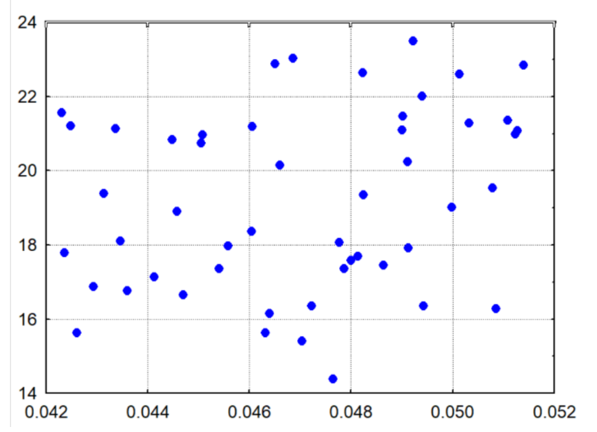
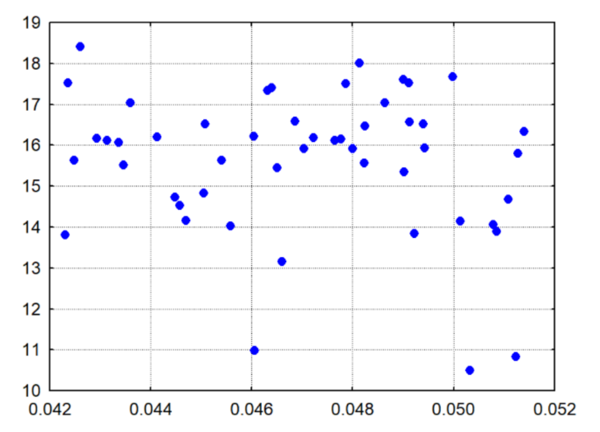
D priedas.

Taškinės gaisro modelio įvesties ir išvesties kintamųjų porų diagramos

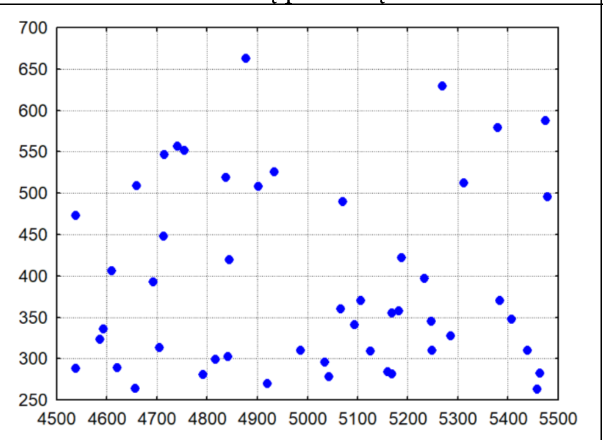
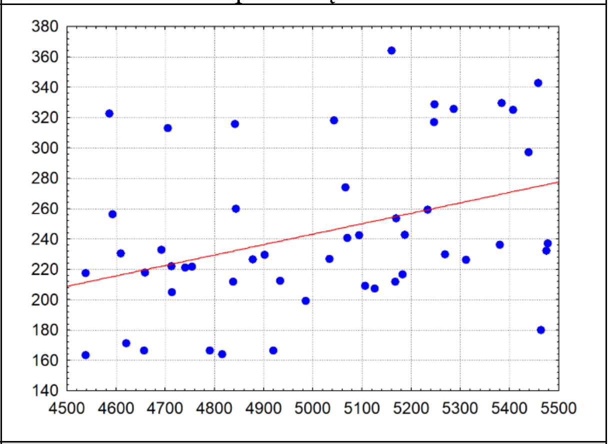
Šiame priede yra pateiktos gaisro modelio įvesties ir išvesties charakteristikų porų (x_{il}, y_{jl}) (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4; l = 1, 2, ... , 50) diagramos, susijusios su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis, pavaizduotomis 3.2 – 3.4 pav. Diagramos sugrupuotos pagal įvesties vektoriaus x_i (i = 1, 2, 3) komponentus ir pateiktos D.1 – D.3 lentelėse.

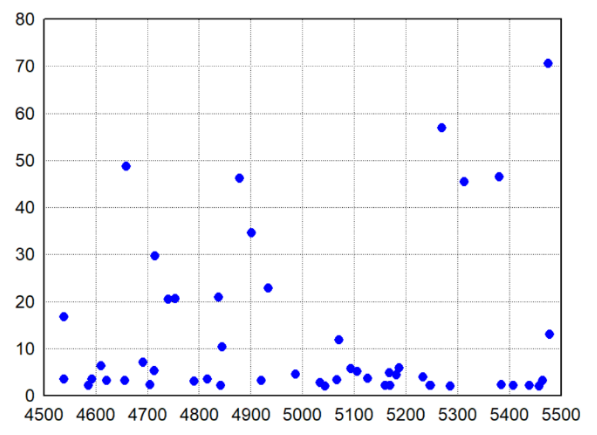
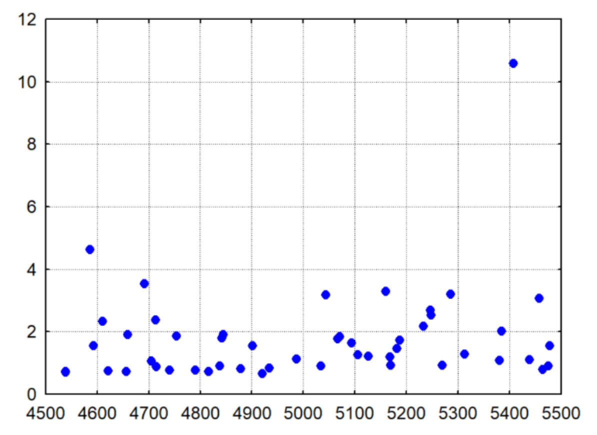
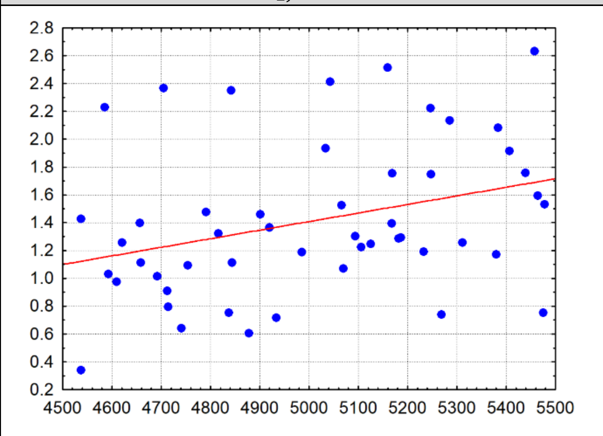
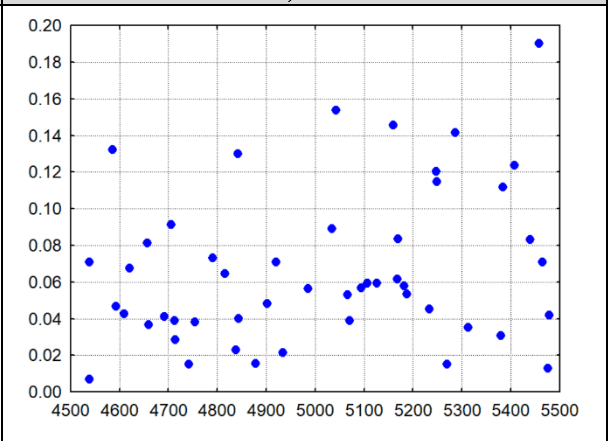
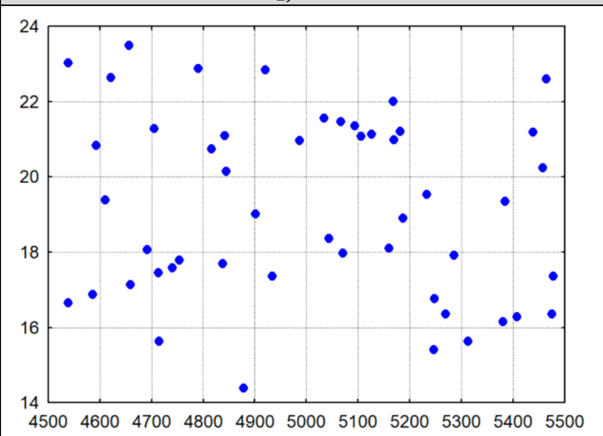
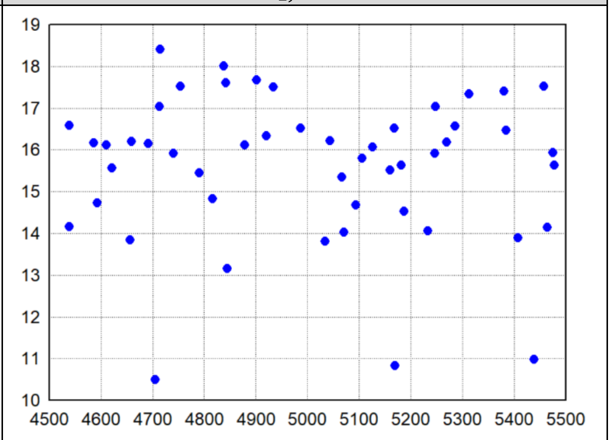
D.1 lentelė. Taškinės diagramos, sudarytos gaisro augimo pagreičio $\alpha \equiv x_{1l}$ ir gaisro modelio išvesties dydžių poroms (x_{1l}, y_{jl}) (l = 1, 2, ... , 50), susijusioms su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis (3.3 – 3.4 pav.)

	Pirma virtualių prietaisų vertikalė	Antra prietaisų vertikalė
y_1, °C		
	x_1, kW/s^2	x_1, kW/s^2
y_2, kW/m^2		
	x_1, kW/s^2	x_1, kW/s^2

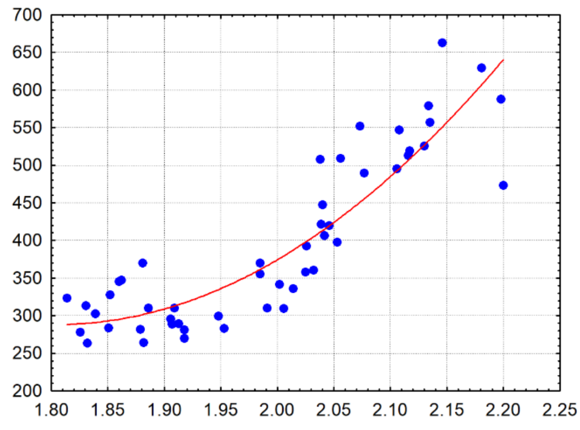
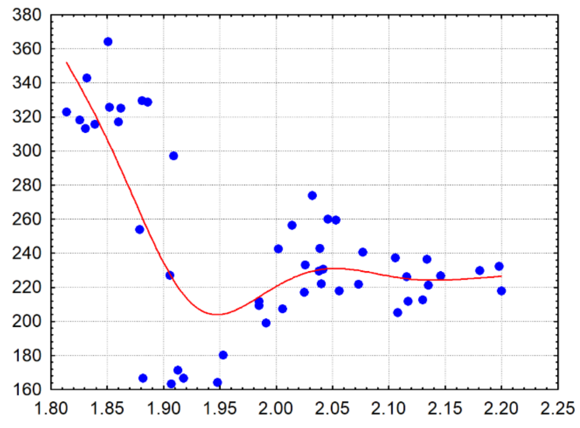
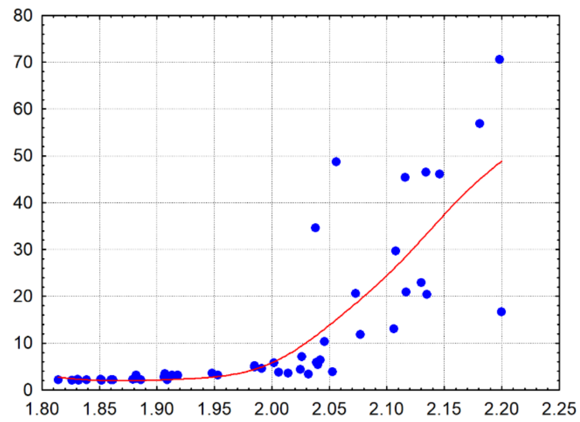
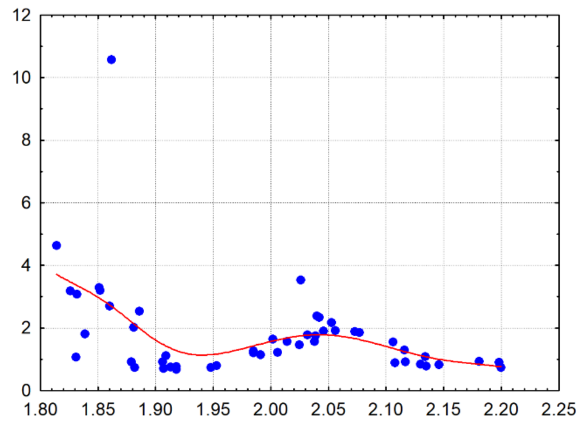
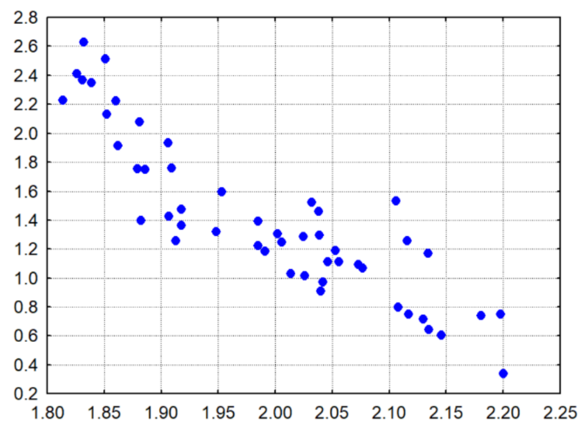
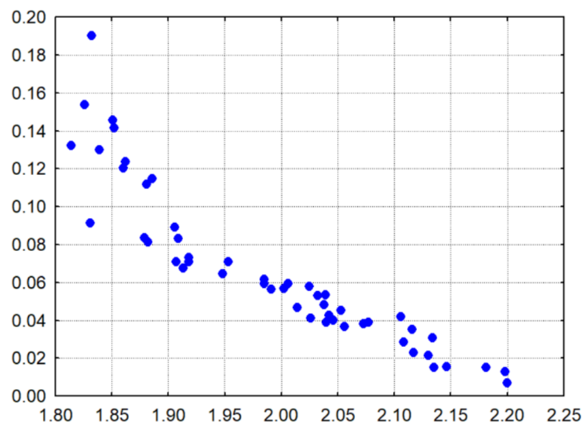
y_3, –		
	x_1, kW/s^2	x_1, kW/s^2
y_4, m^{-1}		
	x_1, kW/s^2	x_1, kW/s^2

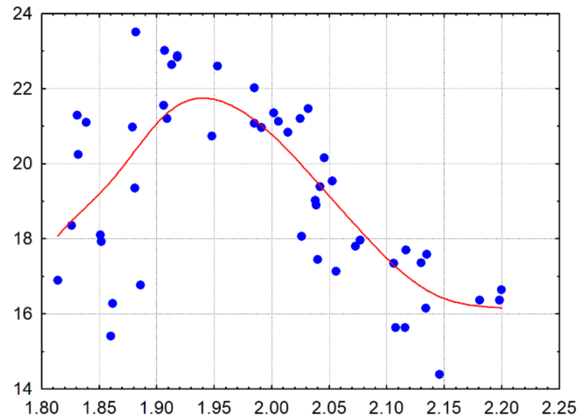
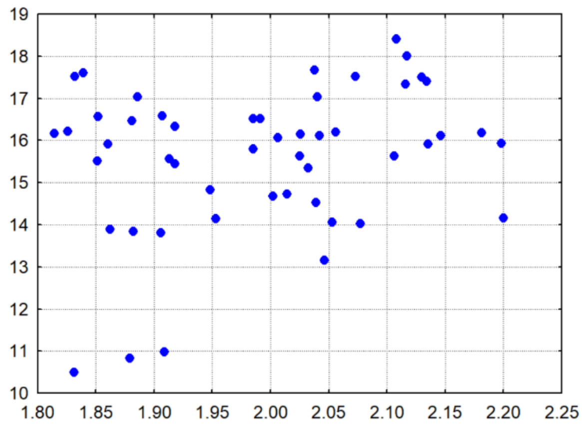
D.2 lentelė. Taškinės diagramos, sudarytos maksimalios HRR reikšmės $\dot{Q}_{max} \equiv x_{2l}$ ir gaisro modelio išvesties dydžių poroms (x_{2l}, y_{jl}) ($l = 1, 2, \ldots, 50$), susijusioms su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis (3.3 – 3.4 pav.)

	Pirma virtualių prietaisų vertikalė	Antra prietaisų vertikalė
y_1, °C		
	x_2, kW	x_2, kW

<table>
<tr><td>y_2, kW/m^2</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td>x_2, kW</td><td>x_2, kW</td></tr>
<tr><td>y_3, –</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td>x_2, kW</td><td>x_2, kW</td></tr>
<tr><td>y_4, m^{-1}</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td>x_2, kW</td><td>x_2, kW</td></tr>
</table>

D.3 lentelė. Taškinės diagramos, sudarytos HRR modelio, išreikšto (2.6) lygtimi, laipsnio rodikliui $p \equiv x_{3l}$ ir gaisro modelio išvesties dydžių poroms (x_{2l}, y_{jl}) ($l = 1, 2, \ldots, 50$), susijusiomis su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis (3.3 – 3.4 pav.)

	Pirma virtualių prietaisų vertikalė	Antra prietaisų vertikalė
y_1, °C		
	x_3, –	x_3, –
y_2, kW/m^2		
	x_3, –	x_3, –
y_3, –		
	x_3, –	x_3, –

y_4, m^{-1}	 24 22 20 18 16 14 1.80 1.85 1.90 1.95 2.00 2.05 2.10 2.15 2.20 2.25	 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 1.80 1.85 1.90 1.95 2.00 2.05 2.10 2.15 2.20 2.25
	x_3, –	x_3, –

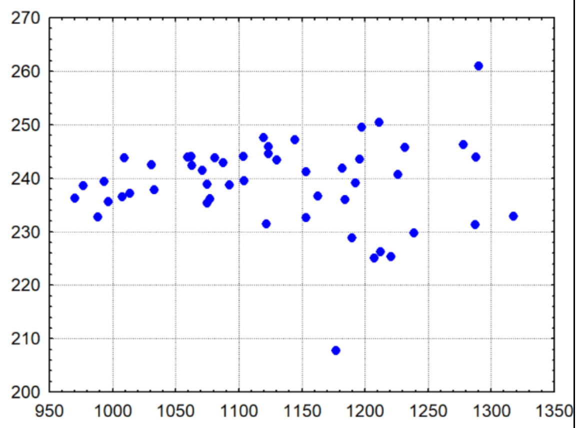
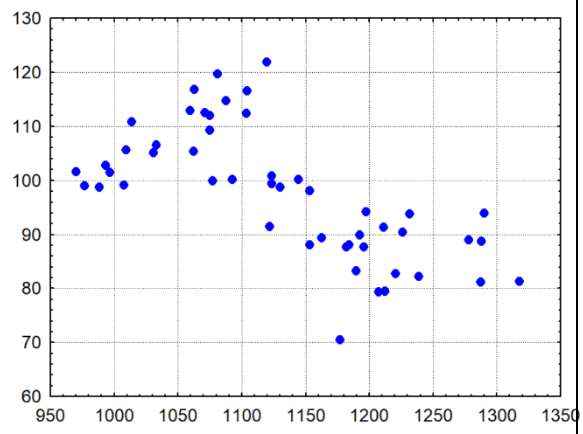
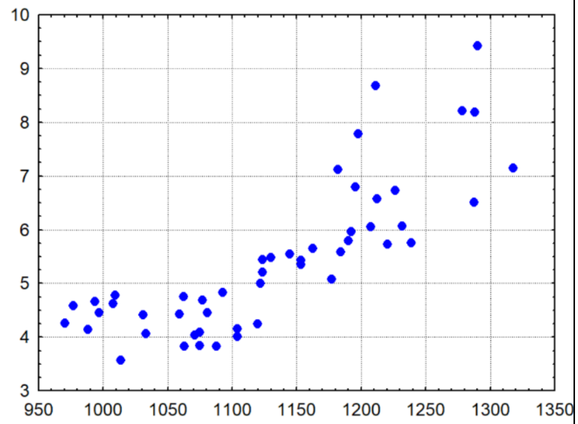
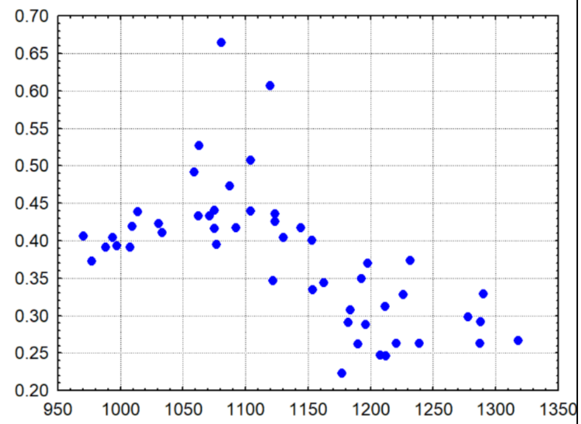
E priedas.

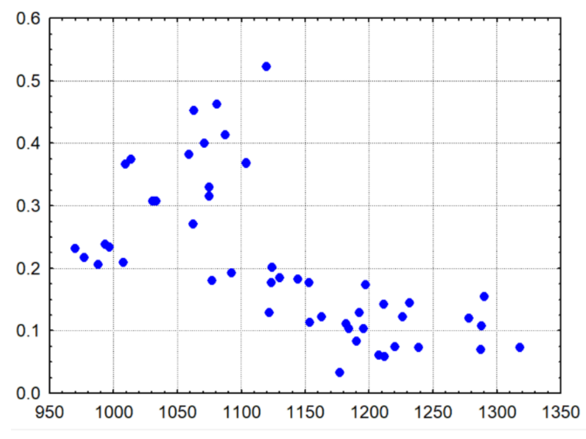
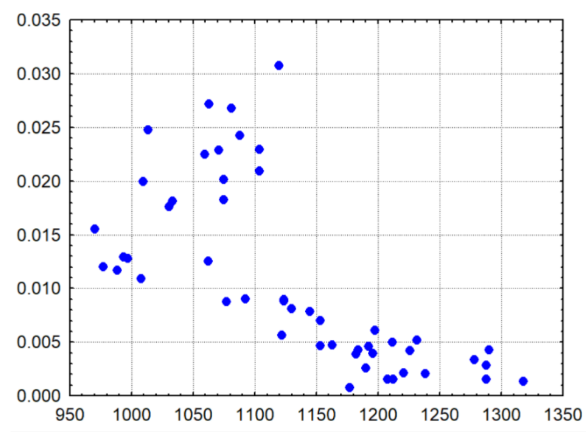
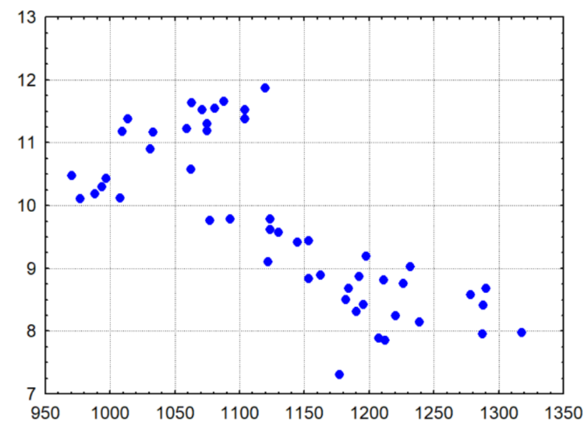
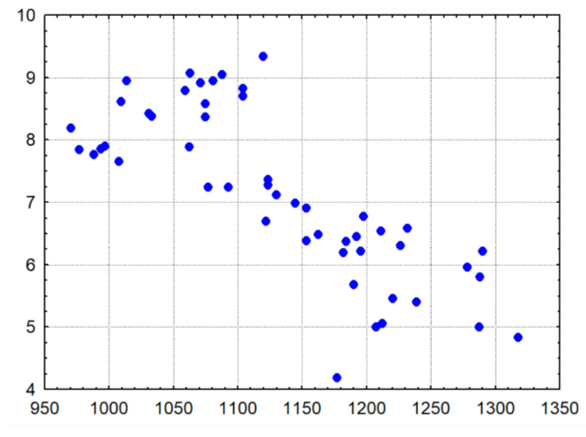
Gaisro modelio įvesties ir išvesties kintamųjų reikšmių vidurkių porų diagramos

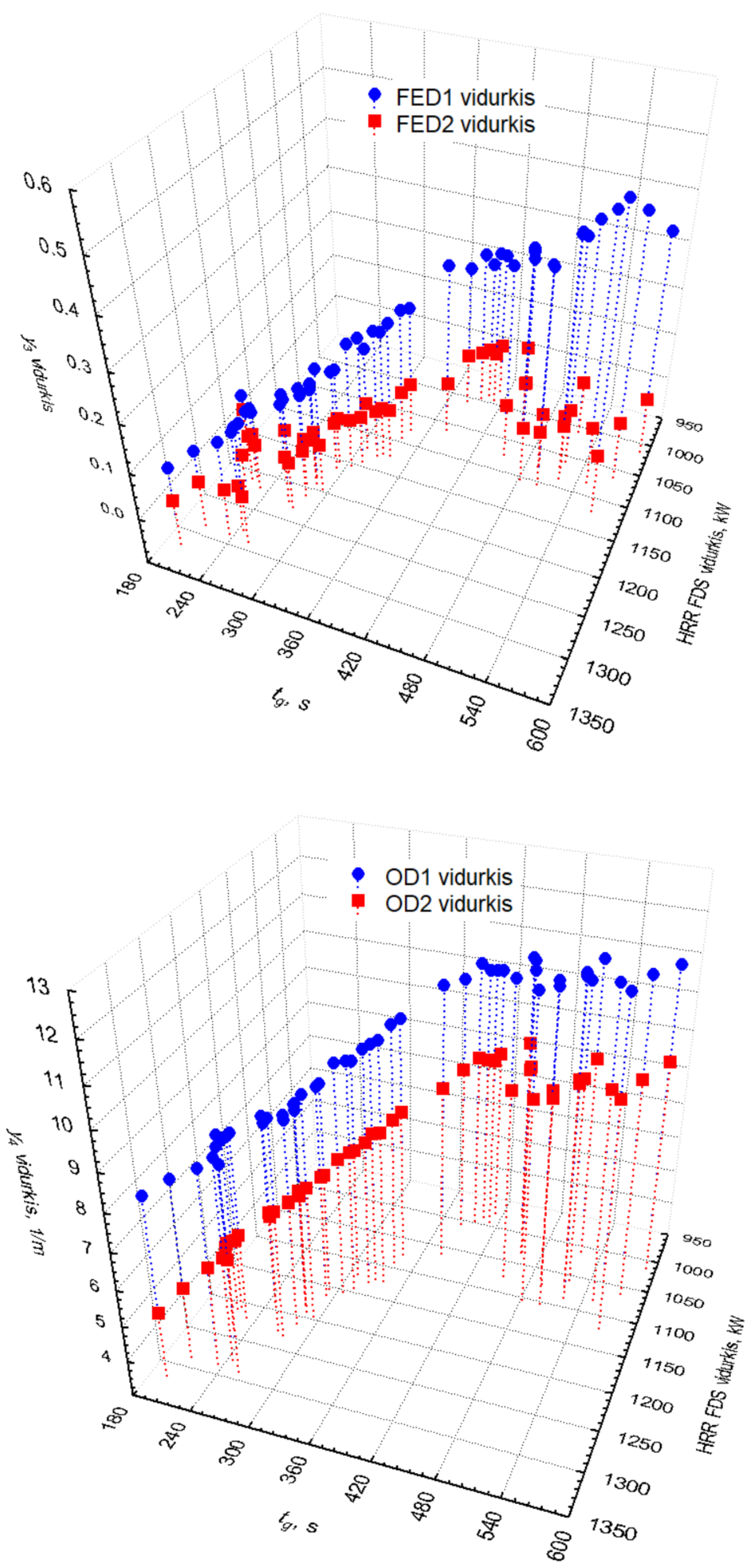
Priede yra pateiktos gaisro modelio įvesties ir išvesties kintamųjų reikšmių vidurkių porų $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{jl})$ (j = 1, 2, 3, 4; l = 1, 2, ... , 50) diagramos, susijusios su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis, pavaizduotomis 3.2 – 3.4 pav. Vidurkiai skaičiuoti pagal (3.3) ir (3.4) formules (3.3.3 skyrelis). Diagramos pateiktos E.1 lentelėje.

Priedo pabaigoje pateiktos dvi trimatės taškinės diagramos, vaizduojančios reikšmių trejetus $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{3l})$ ir $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{4l})$ ir atskleidžiančios augimo ciklo trukmės laiko t_g įtaką HRR vidurkiui $\bar{\dot{Q}}_{FDS}$ bei išvesties dydžiams $\bar{y}_3$ ir $\bar{y}_4$ (sukauptajai dozei ir optiniam gyliui) (žr. E.1 pav.).

E.1 lentelė. Taškinės diagramos, sudarytos vidurkių reikšmių poroms $(\bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{jl})$ ir susijusioms su pirma ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikalėmis (3.3 – 3.4 pav.)

<table>
<tr><td></td><td>Pirma virtualių prietaisų vertikalė</td><td>Antra prietaisų vertikalė</td></tr>
<tr><td>$\bar{y}_1$, °C</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td>$\bar{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td><td>$\bar{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td></tr>
<tr><td>$\bar{y}_2$, kW/m^2</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td>$\bar{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td><td>$\bar{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>$\overline{y}_3$, –</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td>$\overline{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td><td>$\overline{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td></tr>
<tr><td>$\overline{y}_4$,
m^{-1}</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td></td><td>$\overline{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td><td>$\overline{\dot{Q}}_{FDS}$, kW</td></tr>
</table>



E.1 pav. Taškinės reikšmių trejetų $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{3l})$ ir $(t_{gl}, \bar{\dot{Q}}_{FDS,l}, \bar{y}_{4l})$ (l = 1, 2, ... , 50) diagramos, susijusios su pirma virtualių matavimo prietaisų vertikale (mėlyni taškai) ir antra virtualių matavimo prietaisų vertikale (raudoni taškai)

F priedas.

Energijos išskyrimo greičio (HRR) reikšmių skirtumų statistikos

Šiame priede pateikiamos imčių $\Delta_{Q,l} = \{\dot{Q}_l(t_\tau) - \dot{Q}_{FDS,l}(t_\tau),\ t_\tau = t_{1l}, t_{2l}, \ldots, t_{1000,l}\}$ (l = 1, 2, ..., 50), apibrėžtų (3.5) lygtimi, statistikos. Jos išvardintos F.1 lentelėje.

F.1 lentelė. Energijos išskyrimo greičių reikšmių imčių $\Delta_{Q,l}$ statistikos

l	Vidurkis $\bar{\Delta}_{Q,l}$ (kW)	Standartas $s\Delta_{Q,l}$ (kW)	Asimetrijos koef. $a\Delta_{Q,l}$	$\min\Delta_{Q,l}$ reikšmė (kW)	$\max\Delta_{Q,l}$ reikšmė (kW)
1	– 573,0	1037	– 2,128	– 4346,9	281,4
2	330,4	555	– 0,348	– 1011,7	1604,5
3	– 2927,8	2948	– 0,893	– 10614,7	0,0
4	45,3	650	– 1,664	– 2016,8	1012,3
5	– 812,0	1127	– 1,733	– 5124,4	0,5
6	– 36,3	743	– 1,552	– 2201,5	1157,4
7	– 789,0	1007	– 1,406	– 4241,7	0,4
8	– 908,3	1079	– 1,267	– 4647,7	0,0
9	– 850,5	1262	– 1,773	– 5117,3	121,7
10	– 505,7	1020	– 2,044	– 3846,6	546,0
11	435,8	516	0,407	– 766,6	2612,9
12	– 445,5	948	– 2,071	– 3811,5	467,2
13	302,6	594	– 0,236	– 1278,7	2134,7
14	– 770,8	985	– 1,481	– 4228,6	0,3
15	– 463,6	957	– 2,018	– 3861,8	634,0
16	– 9,4	685	– 1,691	– 2173,8	1047,4
17	– 530,1	858	– 2,029	– 4231,0	223,4
18	– 192,0	816	– 1,951	– 2816,0	886,7
19	– 1952,7	2086	– 1,084	– 7929,8	0,0
20	431,2	531	0,638	– 810,2	2943,4
21	– 1952,8	2056	– 1,053	– 7719,1	0,0
22	– 1310,4	1506	– 1,276	– 6091,0	0,0
23	– 759,0	985	– 1,518	– 4379,6	0,4
24	84,5	608	– 1,559	– 1921,5	1204,2
25	56,7	603	– 1,268	– 1945,6	1438,2
26	– 338,3	975	– 1,745	– 3206,0	848,7
27	177,9	600	– 0,763	– 1441,8	1984,3
28	– 2189,7	2279	– 0,998	– 8666,9	0,0
29	– 1714,7	1823	– 1,094	– 7108,3	0,0
30	– 1890,5	2061	– 1,144	– 8177,1	0,0
31	– 1135,7	1290	– 1,184	– 4962,4	0,0
32	– 1924,2	2003	– 0,992	– 7575,3	0,0
33	305,8	582	– 0,089	– 1189,0	2061,7
34	– 635,5	895	– 1,686	– 3864,9	269,0
35	373,8	583	0,527	– 1173,6	3121,7
36	516,1	521	0,758	– 495,3	2427,7
37	182,1	572	– 1,038	– 1464,6	1457,2
38	– 2284,5	2398	– 1,009	– 9051,3	0,0
39	– 3061,6	3121	– 0,938	– 11484,6	0,0
40	455,4	486	0,144	– 730,2	2064,2

41	– 1078,9	1353	– 1,508	– 5645,2	0,0
42	207,8	581	– 0,745	– 1452,7	2091,3
43	– 1562,0	1679	– 1,121	– 6589,5	0,0
44	2,8	700	– 1,231	– 2009,3	1293,9
45	– 981,5	1362	– 1,787	– 5716,2	0,3
46	177,7	603	– 0,889	– 1528,3	1682,5
47	– 674,2	1164	– 1,975	– 4479,6	155,8
48	472,0	556	0,696	– 676,1	2689,2
49	– 870,9	1102	– 1,436	– 4602,1	0,2
50	– 3560,8	3612	– 0,913	– 12884,7	0,0
$\bar{\varDelta}_Q$ *	– 702,7	1181,3	—	– 4266,2	809,3
$\mathrm{cov}\varDelta_Q$	143,9	62,4	—	71,1	119,5
$\min\varDelta_Q$	– 3560,8	486,0	—	– 12884,7	0,0
$\max\varDelta_Q$	516,1	3612,3	—	– 495,3	3121,7
* Stulpelių statistikos $\bar{\varDelta}_Q$, $\mathrm{cov}\varDelta_Q$, $\min\varDelta_Q$ ir $\max\varDelta_Q$ paaiškintos 3.4 poskyryje.					