



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR GAISRINĖS SAUGOS KATEDRA

Ieva Umbrasaitė

TELKININIŲ GAISRŲ SPINDULIUOTĖS PROGNOZAVIMO PROBLEMOS
THE PROBLEMS OF PREDICTING THE THERMAL RADIATION OF
POOL FIRES

Baigiamasis magistro darbas

Saugos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX031

Gaisrinės ir gelbėjimo darbų saugos ir valdymo specializacija

Saugos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2020

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

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

Saugos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas: **Telkininių gaisrų spinduliuotės prognozavimo problemos**
Autorius: **Ieva Umbrasaitė** Vadovas: **Egidijus Rytas Vaidogas**

Kalba

Lietuvių
Užsienio

Anotacija

Baigiamajame darbe nagrinėjama problema yra telkininių gaisrų šiluminės spinduliuotės vertinimas. Pagrindinis darbo tikslas – išnagrinėti ir palyginti matematinius metodus, skirtus šiai spinduliuotei skaičiuoti. Taip pat siekta pritaikyti skaitinį hidrodinamikos metodą modeliuoti gaisrą, kurio telkinio forma yra netaisyklinga, o pats gaisras vyksta iš dalies uždaroje erdvėje. Tokia erdvė susidaro po transporto viadukais ir estakadomis. Darbe išnagrinėti ir palyginti inžineriniai metodai, skirti šiluminei telkininio gaisro spinduliuotei vertinti. Tirta, kaip tokį gaisrą modeliuoti taikant hidrodinamikos programą FDS. Pasiūlyta, kaip šios programos priemonėmis modeliuoti netaisyklingos formos telkinio degimą. Tirta, uždaros erdvės įtaka telkininiam gaisrui. FDS programa pritaikyta skaičiuoti šiluminį poveikį metalinėms estakados konstrukcijoms, kai po estakada degs automobilinė cisterna. Darbo rezultatai gali būti taikomi užtikrinant pramoninių objektų saugą ir tikrinant transporto statinių atsparumą automobilinių cisternų gaisrams.

Prasminiai žodžiai: telkininis gaisras, šiluminė spinduliuotė, automobilinė cisterna, transporto infrastruktūra, energijos atidavimo greitis, estakada.

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

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

Safety engineering study programme master thesis.

Title: **The problems of predicting the thermal radiation of pool fires**

Author: **Ieva Umbrasaitė** Academic supervisor: **Egidijus Rytas Vaidogas**

Theses language

Lietuvių
Foreign (English)

Annotation

The final work considers an assessment of the thermal radiation emitted by pool fires. The main purpose of this work is to analyse and compare mathematical models developed for the calculation of this radiation. One of the tasks solved in the work was an application of the simulation based on the computational fluid dynamics (CFD) to fires of irregular pools in partial enclosures. Such enclosures are formed beneath transportation overpasses. Engineering methods used for predicting thermal radiation of pool fires are described and compared. In addition, an application of CFD method to simulation of pool fires is studied. It is suggested how to apply CFD simulation to fires of pool with highly irregular shapes. The effect of partial enclosure on pool fire is investigated. Thermal radiation emitted by a road tanker fire on steel structures of an overpass is calculated by means of the FDS computer code. Findings of the work can be applied to assuring safety of industrial objects and transportation structures that can be subjected to tanker car fires.

Keywords: pool fire, thermal radiation, tanker car, transportation infrastructure, heat release rate, overpass.

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. TELKININIŲ GAISRŲ SPINDULIUOTĖ IR JOS PROGNOZAVIMO GALIMYBĖS	15
1.1. Pramoninės avarijos su telkininiais gaisrais	15
1.2. Telkininio gaisro charakteristikos	16
1.2.1. Telkinio geometrija	17
1.2.2. Liepsnos ilgis	17
1.2.3. Liepsnos posvyrio kampas	19
1.3. Inžineriniai modeliai šiluminei telkininių gaisrų spinduliuotei prognozuoti	21
1.3.1. Esami šiluminės spinduliuotės vertinimo metodai	21
1.3.2. Apytikris M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas	21
1.3.3. Apytikris taškinio šaltinio metodas	22
1.3.4. Detalus M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas	24
1.3.5. Detalus K. S. Mudan'o metodas	26
1.4. Skaitiniai modeliai šiluminei telkininių gaisrų spinduliuotei prognozuoti	28
1.5. Pirmo skyriaus išvados	32
2. ŠILUMINĖS TELKININIŲ GAISRŲ SPINDULIUOTĖS MODELIŲ PALYGINIMAS IR IŠPLĖTIMAS	33
2.1. Inžinerinių ir skaitinių šiluminės spinduliuotės modelių palyginimas	33
2.1.1. Palyginimo kriterijus	33
2.1.2. Šiluminės toluolo telkinio gaisro spinduliuotės prognozavimas inžineriniais metodais	33
2.1.3. Toluolo gaisro spinduliuotės prognozavimas skaitiniu metodu	36
2.1.4. Skaičiavimo rezultatų palyginimas	43
2.2. Telkininio gaisro modeliavimas esant netaisyklingos formos telkiniui	43
2.2.1. Gaisrai su netaisyklingos formos telkiniais	43
2.2.2. Galimybė modeliuoti netaisyklingos formos telkinio gaisrą	45

2.2.3. Modeliavimo pavyzdys.....	47
2.3. Telkininio gaisro modeliavimas iš dalies uždaroje erdvėje.....	51
2.3.1. Modeliavimo būtinybė	51
2.3.2. Modeliavimo pavyzdys.....	53
2.4. Antro skyriaus išvados	62
3. TELKININIO GAISRO SPINDULIUOTĖS POVEIKIS TRANSPORTO ESTAKADOS KONSTRUKCIJAI.....	63
3.1. Nagrinėjamas uždavinys.....	63
3.2. Telkininio gaisro modelis ir skaitinis gaisro proceso imitavimas	66
3.3. Telkininio gaisro poveikio vertinimo rezultatai	68
3.4. Trečio skyriaus išvados	69
BENDROSIOS IŠVADOS.....	71
A priedas.....	72
B priedas	75
C priedas	76
LITERATŪRA	91

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Įvykių medžio diagrama, vaizduojanti degios medžiagos nuotėkio pasekmes (pagal Beyler, 2015 su pakeitimais)	15
1.2 pav. Įvairių angliavandenilių telkinių gaisro liepsnų aukščio priklausomybės nuo degimo greičio (Mudan, 1984)	19
1.3 pav. Vėjo sukeltas liepsnos posvyris (Beyler, 2015).....	20
1.4 pav. Bedimensio vėjo greičio ir liepsnos posvyrio kampo ryšys (Mudan, 1984)	20
1.5 pav. Dydžiai, susiję su taškinio šaltinio modeliu (Beyler, 2015)	22
1.6 pav. Išmatuotų ir taškinio šaltinio metodu apskaičiuotų šiluminės spinduliuotės reikšmių palyginimas dideliems telkininiams gaisrams, apskaičiuotas reikšmės padauginus iš atsargos koeficiento 2 (įstriža tiesė vaizduoja apskaičiuotų ir išmatuotų reikšmių lygybę) (Shokri & Beyler, 1989)	23
1.7 pav. Dydžiai, naudojami skaičiuojant vaizdo daugiklį vertikaliu cilindru idealizuotai liepsnai: a – ant žemės esantys vertikalūs ir horizontalūs taikiniai, b – virš žemės esantys vertikalūs ir horizontalūs taikiniai (Beyler, 2015).....	25
1.8 pav. Vaizdo daugiklio skaičiavimo geometrija: a – vertikalaus cilindro atvejis, b – pasvirusio cilindro atvejis (Beyler, 2015).....	27
1.9 pav. Video kadrai, kuriose parodytas telkininio gaisro eksperimentas: a – vaizdo kameros kadras, b – infraraudonųjų spindulių kameros kadras (Rengel <i>et al.</i> , 2018)	30
1.10 pav. Kvadratinės formos telkinio gaisro, modeliuoto taikant FDS programą, liepsnos vaizdai, sudaryti su rezultatų vizualizavimo programa „Smokeview“ (geltonais taškais pažymėtos termoporos TB ir radiometrai RD) (Rengel <i>et al.</i> , 2018)	30
1.11 pav. Palaidos, gautos lyginant CFD modeliavimo ir eksperimento rezultatus: a – vidutinės termoporomis išmatuotos temperatūros, b – vidutiniai degimo greičiai, c – vidutinės šiluminės spinduliuotės reikšmės, d – taškais žymimi 12 eksperimentų kodai (Rengel <i>et al.</i> , 2018)	31
2.1 pav. Toluolo telkinio gaisras su taikiniu grunto lygyje	34
2.2 pav. FDS programos tinklėlis su kvadratinės formos kuru, imituojančiu apskritą toluolo telkinį.....	37
2.3 pav. Apvalaus toluolo telkinio idealizavimas to paties ploto kvadratu	37
2.4 pav. FDS langas „Edit Surfaces“	38
2.6 pav. Toluolo telkinio gaisro vizualizavimas su SMOKEVIEW programa;	39
2.7 pav. EXCEL ir STATISTICA laikmenų fragmentai, kuriuose matomos šiluminės spinduliuotės reikšmės (kW/m^2), apskaičiuotos su FDS programa	42
2.8 pav. Šiluminės spinduliuotės reikšmės, užfiksuotos virtualios termoporos, pavaizduotos 2.2 pav.	43

2.9 pav. Degaus karšto bitumo telkinys, susidaręs apirtus automobilinei cisternai ir ją pramušus (TV3.lt, žr. B priedą)	44
2.10 pav. Nuotėkio iš automobulinės cisternos sukeltas gaisras, įvykęs po transporto priemonės viaduku (kairėje) ir ant transporto priemonės viaduko (dešinėje) (Construction Equipment Guide, WVUA23, žr. B priedą).....	44
2.11 pav. Transporto avarija, įvykusi 2012 m. JAV, kurios metu cisterninei puspriekabeį atsitrenkus į viaduko atramą ištekeję 32 m ³ žaliavinės naftos ir susidarę degus netaisyklingos formos telkinys (mySA, žr. B priedą)	45
2.12 pav. „AUTOCAD“ programos langas su norimos formos telkinio kontūru	46
2.15 pav. FDS programos langas, kuriame modeliuojama telkinio forma (kairėje) ir vaizduojamas telkinio sudarymo rezultatas (dešinėje)	47
2.16 pav. FDS programos tinklelis su netaisyklingos formos kuru.....	47
2.17 pav. Energijos atidavimo greičio grafikas, gautas su FDS programa.....	48
2.18 pav. Netaisyklingos formos toluolo telkinio gaisro vizualizavimas su SMOKEVIEW programa.....	49
2.19 pav. Šiluminės spinduliuotės reikšmės, užfiksuotos virtualios termoporos	51
2.20 pav. Transporto mazgas tie JAV Oklendo miestu, kuriame susieina trys autostrados (MacArthur Maze, žr. B priedą)	52
2.21 pav. Transporto mazgas tie JAV Oklendo miestu ir benzožvežio gaisro tarp transporto estakadų padariniai (Quiel <i>et al.</i> , 2015).....	52
2.22 pav. Benzovežio gaisro po viaduku su plieninėmis perdangos sijomis padariniai (Alos-Moya <i>et al.</i> , 2014).....	53
2.23 pav. Cisterninės priekabos gaisras ties viaduku (nuotrauka kairėje) ir cisterninės puspriekabės gaisras, vykęs degant tiek cisternai, tiek greta išsipylyusiam kurui (EGP ir Fuel Tanker on Fire on I-94 in Metro Detroit, žr. B priedą).....	53
2.24 pav. FDS programos tinklelis su juodai pavaizduotu betoniniu elementu, imituojančiu tilto perdangą ir šios programos tinklelio schema, žiūrint iš betoninio elemento priekio ir viršaus	54
2.25 pav. Papildomo modeliavimo tinklelis, kuriame nebuvo integruota betoninė plokštė, tačiau buvo naudotos tos pačios temoporos, kaip ir modeliavime su plokšte (2.24 pav.)	54
2.26 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokšte (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa ir vaizduojantys gaisro padėtį 2,1 s	57
2.27 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokšte (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa ir vaizduojantys gaisro padėtį 3,9 s	57

2.28 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokšte (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa	
ir vaizduojantys gaisro padėtį 5,0 s	57
2.29 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokšte (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa	
ir vaizduojantys gaisro padėtį 100 s	58
2.30 pav. Gaisro židinio centre išdėstytos 2-os termoporos (2.24 pav.) temperatūros ir spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikai kairėje) ir be plokštės (grafikai dešinėje) (pateiktieji grafikai sudaryti su FDS programa)	58
2.31 pav. Ties tilto kraštu išdėstytos 9-os termoporos (2.24 pav.) temperatūros ir šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikai kairėje) ir be plokštės (grafikai dešinėje) (pateiktieji grafikai sudaryti su FDS programa)	59
2.32 pav. Temperatūrų, išmatuotų modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 2-ai termoporai	59
2.33 pav. Šiluminės spinduliuotės, išmatuotos modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 2-ai termoporai	60
2.34 pav. Temperatūrų, išmatuotų modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 9-ai termoporai	60
2.35 pav. Šiluminės spinduliuotės, išmatuotos modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 9-ai termoporai	61
3.1 pav. Pietinio aplinkkelio Vilniaus mieste atkarpa su nagrinėjama estakados dalimi (nuotraukos gautos iš Maps.lt tinklapio)	64
3.2 pav. Pietinio aplinkkelio estakados rytinės dalies vaizdas (autorės nuotrauka)	64
3.3 pav. Estakados tarpatramis, po kuriuo buvo modeliuojamas benzininės automobilinės cisternos gaisras (autorės nuotrauka)	65
3.4 pav. Nekarpytos metalinės estakados silos, kurios gali būti paveiktos automobilinės cisternos gaisro (autorės nuotrauka)	65
3.5 pav. Virtualių termoporų išdėymas po dėžiniais estakados sijų skerspjūviais ir degančios cisternos indo padėtis estakados skerspjūvio atžvilgiu (termoporos pavaizduotos ir numeruotos raudona spalva)	66
3.6 pav. Keturios FDS programos modelio, sudaryto nagrinėjamam estakados tarpatramiui, projekcijos	67
3.7 pav. Gaisro po estakada vaizdas iš viršaus, sudarytas su SMOKEVIEW programa ir maždaug atitinkantis 15 gaisro sekundę	68

3.8 pav. Automobilinės cisternos gaisro vaizdas iš estakados šono, sudarytas su SMOKEVIEW programa ir maždaug atitinkantis 15 gaisro sekundę	68
3.9 pav. Virtualiomis termoporomis išmatuotos temperatūros dėžinio estakados sijos skerspjūvio apačioje.....	69
C.1.1 pav. Su FDS programa sudaryti 1-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	76
C.1.2 pav. Su FDS programa sudaryti 2-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	76
C.1.3 pav. Su FDS programa sudaryti 3-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	77
C.1.4 pav. Su FDS programa sudaryti 4-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	77
C.1.5 pav. Su FDS programa sudaryti 5-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	77
C.1.6 pav. Su FDS programa sudaryti 6-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	77
C.1.7 pav. Su FDS programa sudaryti 7-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	78
C.1.8 pav. Su FDS programa sudaryti 8-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	78
C.1.9 pav. Su FDS programa sudaryti 9-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	78
C.2.1 pav. Su FDS programa sudaryti 1-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	79
C.2.2 pav. Su FDS programa sudaryti 2-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	79
C.2.3 pav. Su FDS programa sudaryti 3-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	79
C.2.4 pav. Su FDS programa sudaryti 4-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	79
C.2.5 pav. Su FDS programa sudaryti 5-os termoporos termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)	80
C.2.6 pav. Su FDS programa sudaryti 6-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	80

C.2.7 pav. Su FDS programa sudaryti 7-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	80
C.2.8 pav. Su FDS programa sudaryti 8-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	80
C.2.9 pav. Su FDS programa sudaryti 9-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje).....	81
C.3.1 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 1–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	81
C.3.2 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 2–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	82
C.3.3 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 3–ia termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	82
C.3.4 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 4–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	83
C.3.5 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 5–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	83
C.3.6 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 6–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	84
C.3.7 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 7–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	84
C.3.8 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 8–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	85
C.3.9 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 9–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	85
C.4.1 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 1–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	86
C.4.2 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 2–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	86
C.4.3 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 3–ia termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	87
C.4.4 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 4–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	87
C.4.5 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 5–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	88

C.4.6 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 6–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	88
C.4.7 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 7–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	89
C.4.8 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 8–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	89
C.4.9 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 9–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas	90

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Empiriniai parametrai a , b ir c , naudojami skaičiuoti vidutinės bedimensio liepsnos ilgio H/D reikšmės pagal (1.4) lygtį	18
1.2 lentelė. Parametrai, naudojami liepsnos posvyrio kampui θ skaičiuoti pagal (1.5) formulę*	20
2.1 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis, termoporomis išmatuotų 1001 temperatūrų ir šiluminės spinduliuotės reikšmių, gautų gaisrą modeliuojant be plokštės, statistika	56
2.2 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis, termoporomis išmatuotų 1001 temperatūrų ir šiluminės spinduliuotės reikšmių, gautų gaisrą modeliuojant su plokšte, statistika	56
2.3 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis termoporomis išmatuotų 1001 temperatūrų skirtumų, gautų gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių statistikos	61
2.4 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis termoporomis išmatuotų 1001 šiluminių spinduliuočių skirtumų, gautų gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių statistikos ..	62
A.1 lentelė. Programa „Atmospheric Transmissivity“, skirta skaičiuoti atmosferos perduodamumo koeficiento τ reikšmės	72

IVADAS

Šiuolaikinės pramonės įmonės naudoja daug degių skysčių ir suskystintųjų dujų. Nemažai tokių medžiagų yra vežama automobiliais ir traukiniais bei tiekiama vamzdiniais. Tokios medžiagos daugiausia yra komerciniai angliavandeniliai. Jų svarba pramonei yra kritinė. Be degių skysčių ir suskystintųjų dujų pramonė nustotų veikusi. Kita vertus, šių medžiagų sandėliavimas, perdirbimas ir vežimas sukelia rimtą pramoninės saugos problemą. Nutekėjus degiam skysčiui arba suskystintosioms dujoms gali būti daug žalos žmonėms, turtui ir aplinkai. Vienas iš avarijos, kuri gali prasidėti degaus skysčio nuotėkiu, scenarijus yra telkininis gaisras. Jis gali kilti, kai avariniu būdu nutekėjus degiam skysčiui susiformuos ir užsidegs to skysčio telkinys. Žinoma, kad telkininiai gaisrai yra dažniausiai pramonės įmonėse vykstantys gaisrai.

Pagrindinis telkininio gaisro poveikis yra jo liepsnų skleidžiama spinduliuotė. Ji gali pažeisti šalia telkininio gaisro esančius objektus. Tai gali būti stacionari įranga, transporto priemonės arba žmonės. Jeigu pažeidžiamas objektas pats gali užsidegti arba sprogti, šiluminė spinduliuotė pasireikš kaip pramoninės avarijos domino poveikis. Fiziniai eksperimentai, kurių metu yra imituojamas telkininis gaisras ir matuojama jo skleidžiama spinduliuotė, reikalauja daug sąnaudų, ypač jei tai eksperimentai su dideliais kuro telkiniais. Todėl šiluminė telkininio gaisro spinduliuotė paprastai vertinama matematiškai modeliuojant. Kaip ir visi matematiniai modeliai, spinduliuotei vertinti skirti modeliai nėra labai tikslūs. Tačiau juos yra pravartu naudoti bent apytikriai nuspėjant, koks bus spinduliuotės intensyvumas.

Iki šio laiko buvo pasiūlyta keletas matematinių modelių, leidžiančių įvertinti šiluminę telkininio gaisro spinduliuotę. Šis faktas savaime iškelia modelių palyginimo ir tinkamiausio modelio pasirinkimo problemą. Šio darbo tikslas ir buvo gvildinti tą problemą. Tam buvo sprendžiami tokie uždaviniai:

1. Išnagrinėti mokslinėje literatūroje pasiūlytus matematinius metodus, skirtus vertinti šiluminę telkininio gaisro spinduliuotę.
2. Įvertinti spinduliuotės vertinimo metodų taikymo galimybes ir palyginti skaičiavimo rezultatus, gaunamus skaičiuojant alternatyviais metodais.
3. Ištirti, kaip taikyti skaičiuojamosios skysčių dinamikos (hidrodinamikos) metodą telkininiam gaisrui modeliuoti.
4. Išnagrinėti, kaip modeliuoti netaisyklingos formos telkininį gaisrą taikant hidrodinamikos metodą, kai šis gaisras vyksta iš dalies uždaroje erdvėje, pavyzdžiui, po transporto viaduku arba estakada.

Sprendžiant šiuos uždavinius buvo analizuota mokslinė literatūra bei renkami ir sisteminami duomenys apie avarijas, kurių metu kilo telkininiai gaisrai. Taikytos analitinės telkininių gaisrų

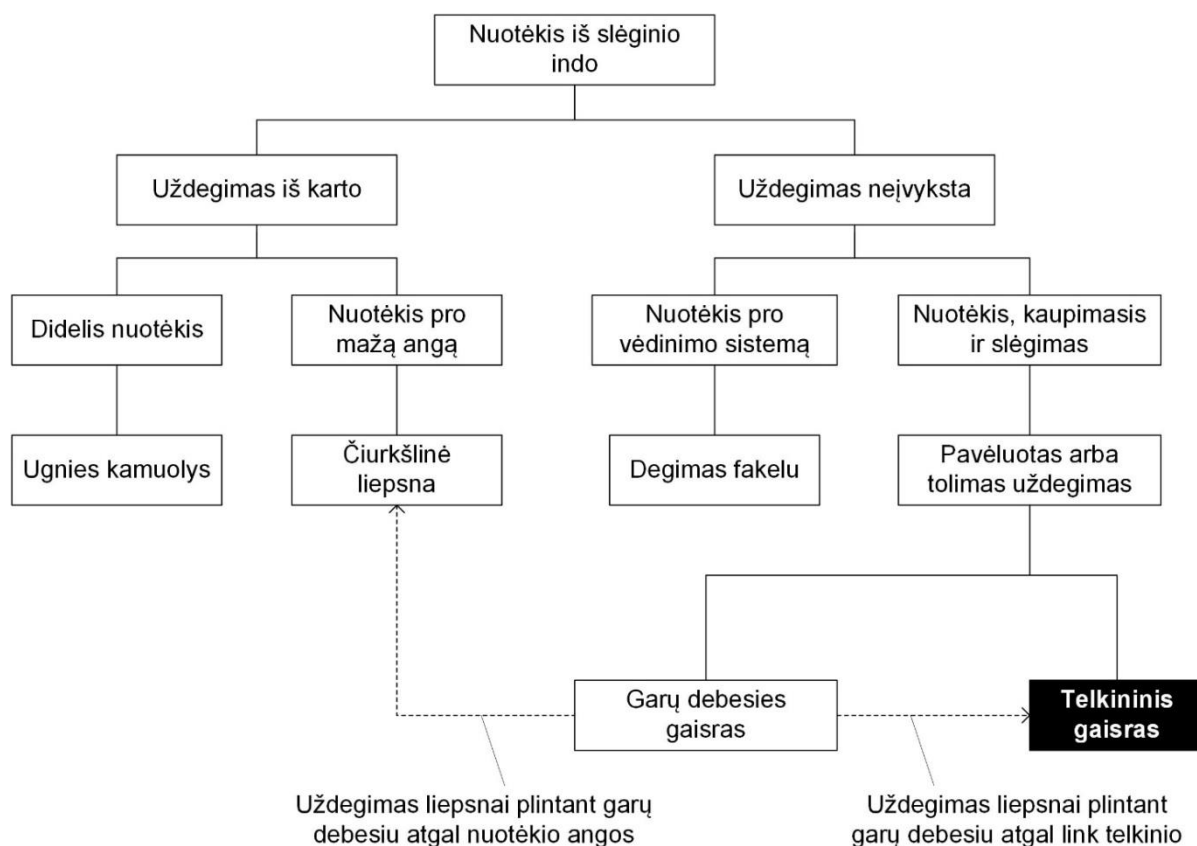
modeliavimo priemonės ir skaitiniai šio reiškinių imitavimo metodai. Skaičiavimams atlikti naudota hidrodinamikos metodo kompiuterio programa, leidžianti modeliuoti netaisyklingos formos telkininį gaisrą. Atliktas trumpas Vilniaus mieste pastatytos transporto estakados tyrimas, vykdant transporto srauto po ja stebėjimą, estakados konstrukcijų vertinimą ir matavimą.

1. TELKININIŲ GAISRŲ SPINDULIUOTĖ IR JOS PROGNOZAVIMO GALIMYBĖS

1.1. Pramoninės avarijos su telkininiais gaisrais

Vienas iš pagrindinių iššūkių užtikrinant pramonės objektų priešgaisrinę saugą yra didelių ir atvirų angliavandenilių gaisrų poveikis. Vykstant šiems gaisrams, pagrindinis pažaidas sukeliantis poveikis yra šiluminė spinduliuotė. Įvairios aplinkybės ir sąlygos lemia, kad atviras gaisras gali vykti įvairiais būdais. Nutekėjusi ir uždegta medžiaga gali sukelti telkininius gaisrus, čiurkšlinius gaisrus, garų debesų gaisrus ir ugnies kamuolius. Šių gaisrų prigimtis yra skirtinga. Skiriasi ir jų skleidžiama šiluminė spinduliuotė. Šiame darbe detalai nagrinėjama, kaip vertinti atvirų telkininių gaisrų spinduliuotę.

Tipinė įvykių medžio diagrama, prasidedanti degios medžiagos nuotėkiu ir pasibaigianti įvairių rūšių gaisrais, yra pavaizduota 1.1 pav. Šia medžio diagrama pavaizduoti avarijų scenarijai turi prasidėti nuotėkio iš slėginio indo. Tik esant nuotėkiui bus galimas čiurkšlinis gaisras. Telkininis gaisras gali vykti degiai medžiagai nutekėjus tiek iš slėginio indo, tiek iš atmosferinio indo. Nuotėkis gali įvykti iš talpyklos arba iš vamzdyno, kurio slėgis paprastai yra didesnis už atmosferinį.



1.1 pav. Įvykių medžio diagrama, vaizduojanti degios medžiagos nuotėkio pasekmes (pagal Beyler, 2015 su pakeitimais)

Jei nuotėkis įvyksta į atmosferą ir nutekėjusi medžiaga iš karto neužsidega, po nuotėkio gali įvykti keletas reiškinių. Nutekėjusi medžiaga gali staigiai garuoti, nutekėjęs skystis gali tekėti ir kauptis bei palaipsniui virsti garais. Nutekėjusiam skysčiui susikaupus į telkinį, jis gali užsidegti. Kadangi užsidegimas įvyksta vėliau už nuotėkį, toks užsidegimas vadinamas pavėluotu. Telkininio gaisro charakteristikos labai priklausys nuo telkinio formos. Degti gali ir judantis, besiformuojantis telkinys.

Jei telkinys iš karto arba pavėluotai neuždegamas, vyks telkinio garavimas ir formuosius garų ir oro mišinio debesis. Jis gali pasiekti degių koncentraciją ir būti vėjo nešamas link uždegimo šaltinio. Debesiui užsidegus, liepsnos frontas gali pasiekti telkinį ir jį uždegti. Šį procesą grafiškai simbolizuoja trumpa punktyrinė linija, parodyta 1.1 pav. apatiniame dešiniajame kampe. Kita punktyrinė linija 1.1 pav. reiškia gaisro scenarijų, kai garų debesis išdega ir degti lieka nuotėkį nulėmęs kuro veržimasis pro čiurkšlę formuojančią angą.

Įvykių medžio diagrama pavaizduota 1.1 pav., atspindi keletą galimų avarijos scenarijų. Šiame darbe bus nagrinėjamas tik scenarijus, kuris sukelia telkininį gaisrą. Tačiau telkinio uždegimo požiūriu reikia atsižvelgti ir į galimą garų debesies gaisrą. Debesis susiformuos garuojant telkiniui ir šis gali būti uždegamas garų debesies liepsnos fronto.

1.2. Telkininio gaisro charakteristikos

Šiluminė telkininio gaisro spinduliuotė priklauso nuo daugelio parametrų, kaip antai kuro sudėties, telkinio dydžio ir formos, gaisro trukmės, taikinio nuotolio iki gaisro ir šiluminių taikinio charakteristikų. Vertinti telkininio gaisro spinduliuotę reikia taikant trijų pagrindinių žingsnių procedūrą:

1. Geometrinį telkininio gaisro apibūdinimą, tai yra, fizinių liepsnos matmenų nustatymą ir degimo greičio vertinimą. Skaičiuojant šiluminę spinduliuotę gaisro dydis bus išreiškiamas matomų liepsnų ir dūmų kontūru, kuris yra vidurkinamas pagal laiką.
2. Šiluminį gaisro apibūdinimą, tai yra, vidutinės liepsnų skleidžiamosios galios nustatymą. Šiluminės spinduliuotės stiprumas priklauso nuo kuro rūšies, sudėties, liepsnų dydžio ir temperatūros. Spinduliuotę mažinantys veiksniai yra suodžiai virš liepsnų, ore esantys vandens garai ir anglies dvideginis.
3. Šiluminės spinduliuotės duotame taške skaičiavimą. Tokį skaičiavimą galima atlikti žinant liepsnų geometriją, liepsnų skleidžiamą spinduliuotę bei taikinio vietą, geometriją ir orientaciją. Jei telkinys yra toli nuo gaisro vietos, pavyzdžiui, per kelis šimtus metrų, spinduliuotės sugėrimas jai sklindant atmosfera bus žymus. Jis priklausys nuo kelio ilgio, liepsnų temperatūros ir santykinės atmosferos drėgmės.

1.2.1. Telkinio geometrija

Dažniausiai telkininio gaisro liepsna yra nusakoma ištisinės liepsnos modeliu (angl. *solid flame model*). Liepsna yra idealizuojama vertikaliu arba pasvirusiu cilindru. Fizikoje jis laikomas pilkojo kūno skleidėju (angl. *grey body emitter*). Liepsnų plotas yra nulemiamas jų diametro apačioje, liepsnos aukščio ir jos posvyrio. Diametras priklauso nuo telkinio dydžio, o šis, savo ruožtu, yra lemiamas nutekėjusios medžiagos kiekio ir nuotėkio greičio. Liepsnų aukštis paprastai priklauso nuo jų diametro ir degimo greičio. Šie veiksniai turi įtakos liepsnos geometrijai.

Telkininio gaisro geometrija yra lemiamą kuro nuotėkio pobūdžio ir vietos. Liepsnos aukštis ir ilgis tiesiogiai lemia pavojų galimiems telkiniams, nes jie tiesiogiai lemia liepsnų skleidžiamos šilumos perdavimą ir jų atstumą iki aplinkinio objekto. Virš liepsnų susidaro karštų dujų vilktis (pliumas). Jam maišantis su aplinkiniu oru keičiasi šio darinio temperatūra, sklaidimo greitis ir plotis. Virš kuro susidarančių liepsnų temperatūra yra aukšta ir liepsnos yra švytinčios. Liepsnos periodiškai kinta, todėl liepsnų viršūnė svyruoja. Todėl liepsnos aukščio nustatymas yra gana sąlyginis. Matematiniai modeliai leidžia nustatyti vidutinį liepsnos aukštį.

1.2.2. Liepsnos ilgis

Turbulentinių liepsnų ilgis yra vertinamas remiantis eksperimentiniais duomenimis ir naudojant Froude'o modeliavimo principus. Jais remiantis priklausomybės tarp liepsnos geometrijos yra išreiškiamos per bedimensį degimo greitį

$$m^* = \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \quad (1.1)$$

ir bedimensį vėjo greitį

$$u^* = \frac{u_w}{u_c} = \frac{u_w}{(g\dot{m}''D/\rho_a)^{1/3}}, \quad (1.2)$$

čia $\dot{m}''$ – 1 m² kuro ploto masės netekties greitis (kg/(s m²)); ρ_a – oro tankis (kg/m³); g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s²); D – telkinio diametras (m); u_w – vėjo greitis (m/s). Skaičiuojant pagal (1.2) formulę ir gavus, kad u^* yra mažesnis už 1, u^* reikšmę reikia imti 1.

Bedimensio degimo greičio m^* alternatyva yra bedimensis energijos išskyrimo greitis Q^* , kuris yra proporcingas m^* . Dydis Q^* skaičiuojamas pagal formulę

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a c_p T_a D^2 \sqrt{gD}}, \quad (1.3)$$

čia $\dot{Q} - 1 \text{ m}^2$ kuro ploto energijos išskyrimo greitis (W/m^2).

Dauguma priklausomybių, susiejančių liepsnos ilgį H su bedimensiais dydžiais m^* ir u^* , turi tokį pavidalą;

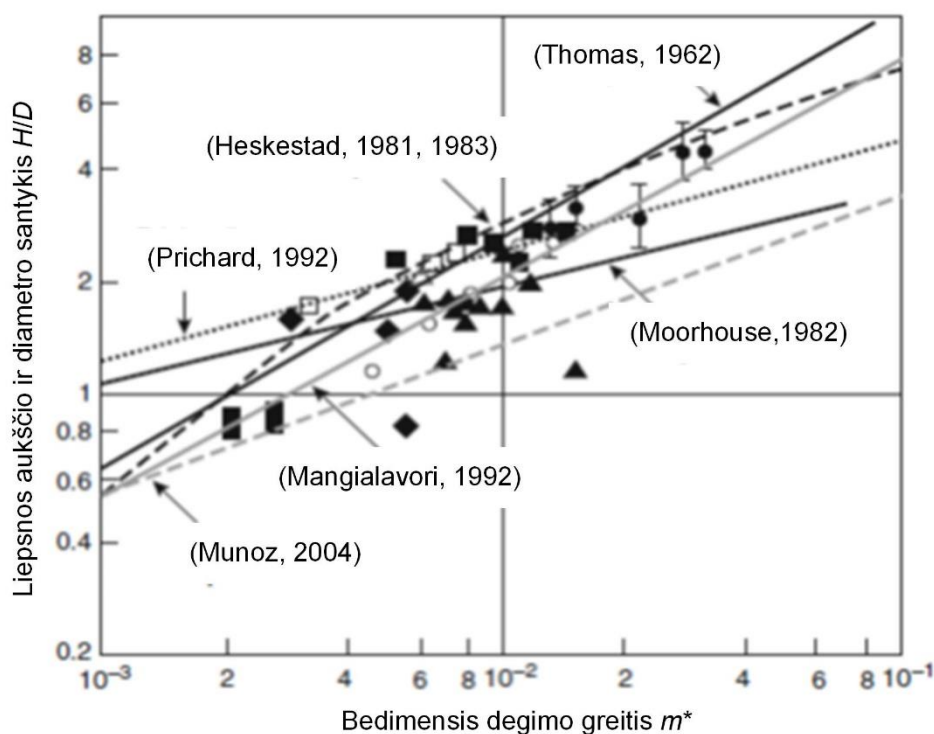
$$\frac{H}{D} = a (m^*)^b (u^*)^c, \quad (1.4)$$

čia a , b ir c yra empiriniai, eksperimentais nustatyti parametrai. Jų reikšmės yra pateiktos 1.1 lentelėje. Parametrai, pateikti 1.1 lentelėje tinka skaičiuoti vidutinį liepsnos ilgį. Vidutinis liepsnos ilgis yra aukštis, kurį liepsna viršija 50 % laiko. K. S. Mudan'as palygino 1.1 lentelėje apibrėžtus modelius su eksperimentiniais duomenimis. Rezultatai yra pateikti grafiškai 1.2 pav. Grafike yra vaizduojamos teorinės ir empirinės bedimensio degimo greičio m^* ir bedimensio liepsnos ilgio H/D priklausomybės. Empiriniai duomenys, gauti atliekant mažų gabaritų eksperimentus, rodo mažesnes liepsnos aukščio reikšmes nei teorinės prognozės. Didesnių gabaritų eksperimentuose empiriniai duomenys daugmaž „persidengia“ su teorinių modelių formulėmis. Empiriniams duomenims yra būdinga gana didelė statistinė sklaida. 1.2 pav. yra parodyta, kaip priklauso ilgio ir diametro santykis H/D nuo bedimensio masės netekimo greičio m^* . 1.2 pav. apibendrina 1.1 lentelės informaciją.

1.1 lentelė. Empiriniai parametrai a , b ir c , naudojami skaičiuoti vidutinės bedimensio liepsnos ilgio H/D reikšmes pagal (1.4) lygtį

a	b	c	Kuras	Šaltinis
42	0,61	*	Mediniai rentiniai	(Thomas, 1962)
6,2	0,254	- 0,044	SGD telkinys apie 15 m diametro	(Moorhouse, 1982)
31,6	0,58	*	Angliavandenilių telkiniai 1 m – 6 m	(Mangialavori & Rubino, 1992)
10,615	0,305	- 0,03	Angliavandenilių telkiniai 6 m – 22 m diametro telkiniai	(Prichard & Binding, 1992)
7,74	0,375	- 0,096	Angliavandenilių 1 m – 6 m diametro telkiniai	(Munoz, <i>et. al.</i> , 2004)
3,7 Q0,4 – 1,02		*	Daug rūšių, paprastai naudojamų laboratoriniuose eksperimentuose	(Heskestad, 1983, 1981)

* Neįvertinta vėjo įtaka ir (1.4) formulėje imama, kad $u^* = 1$.



1.2 pav. Įvairių angliavandenilių telkinių gaisro liepsnų aukščio priklausomybės nuo degimo greičio (Mudan, 1984)

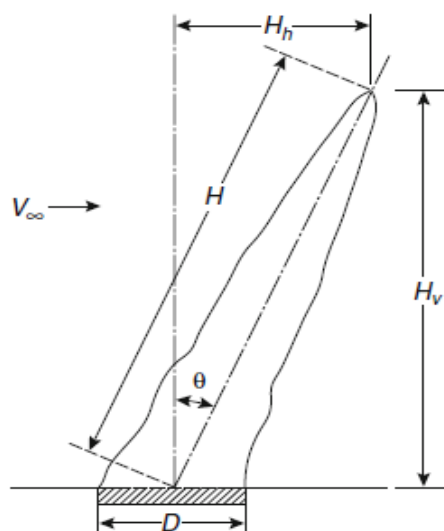
1.2.3. Liepsnos posvyrio kampas

Telkininio gaisro liepsnos ilgis, susidarantis pučiant vėjui, buvo tirtas keleto autorių. Vėjo veikiamos liepsnos schema yra pavaizduota 1.3 pav. Pagrindinis parametras, nusakantis vėjo poveikį yra posvyrio kampas θ . Stambesniems telkininiams gaisrams posvyrio kampą θ galima skaičiuoti pagal tokią formulę

$$\cos \theta = \begin{cases} du^{*e} & , \text{ kai } u^* \geq 1 \\ 1 & , \text{ kai } u^* < 1 \end{cases} \quad (1.5)$$

čia d ir e – yra modelio parametrai, kurių reikšmės buvo gautos įvairiems autoriams atliekant eksperimentus. Parametrų reikšmės yra pateiktos 1.2 lentelėje.

Eksperimentuose užfiksuotos liepsnos pasvyrimo kampo reikšmės, gautos deginant angliavandenilių telkinius, yra pateiktos 1.4 pav. Čia vaizduojamos bedimensio vėjo greičio ir posvyrio kampo kosinuso empirinės ir teorinės priklausomybės. Empiriniams duomenims būdinga didelė sklaida, o teoriniai modeliai duoda gana skirtingus rezultatus. Tiksliausiu ir priimtinausiu reikėtų laikyti AGA modelį.

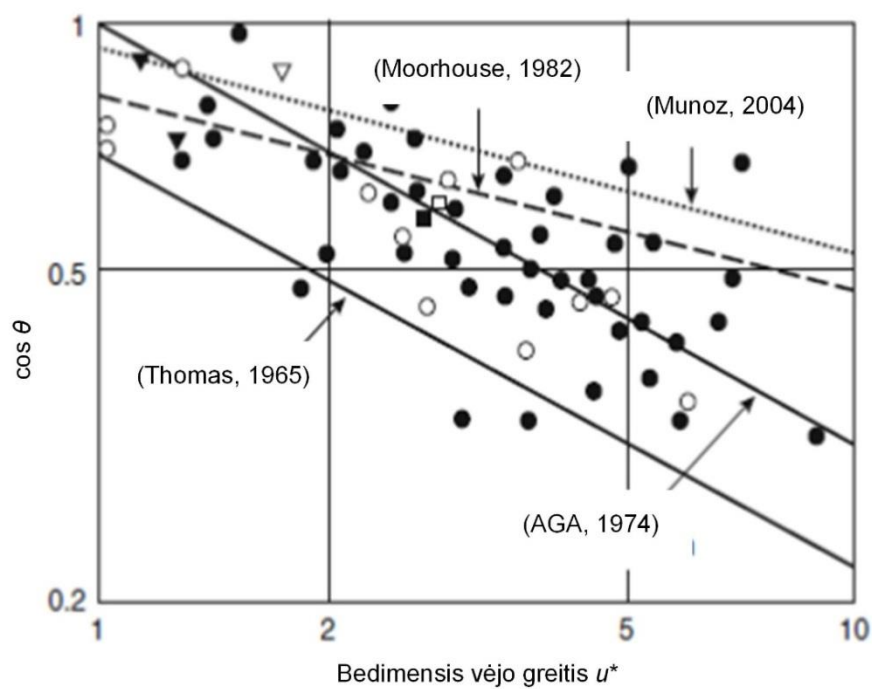


1.3 pav. Vėjo sukeltas liepsnos posvyris (Beyler, 2015)

1.2 lentelė. Parametrai, naudojami liepsnos posvyrio kampui θ skaičiuoti pagal (1.5) formulę*

d	e	Kuras	Šaltinis
0,7	– 0,49	Mediniai rentiniai	(Thomas, 1965)
1	– 0,5	SGD telkiniai	(AGA, 1974)
0,86	– 0,25	SGD telkiniai	(Moorhouse, 1982)
0,96	– 0,26	Angliavandenilių 1 m – 6 m diametro telkiniai	(Munoz, <i>et. al.</i> , 2004)

* Skaičiuojant pagal (1.5) formulę ir gavus, kad u^* yra mažesnis už 1, u^* reikšmė reikia imti 1.



1.4 pav. Bedimensio vėjo greičio ir liepsnos posvyrio kampo ryšys (Mudan, 1984)

1.3. Inžineriniai modeliai šiluminei telkininių gaisrų spinduliuotei prognozuoti

1.3.1. *Esami šiluminės spinduliuotės vertinimo metodai*

Šiluminė spinduliuotė, kuri toliau bus žymima simboliu $\dot{q}''$, gali būti vertinama taikant įvairius metodus. Jie skiriasi savo detalumu ir teoriniu griežtumu. Kai kurie metodai tinka labai grubiai vertinti telkininio gaisro pavojų. Detalesni metodai leidžia gauti tikslesnius spinduliuotės $\dot{q}''$ įverčius, tačiau reikalauja detalesnių skaičiavimų ir daugiau pradinių duomenų. Jeigu skaičiuojant grubesniu metodu paaiškėja, kad saugus atstumas iki galimo telkininio gaisro yra šiek tiek per mažas, galima pasitelkti tikslesnius metodus tikrinant šį atstumą. Tais atvejais, kai telkininio gaisro pavojus ir galimos pasekmės yra dideli, spinduliuotę $\dot{q}''$ vertinti reikėtų kiek galima tikslesniais metodais.

Šiluminės spinduliuotės $\dot{q}''$ vertinimas pagal visus metodus sudarytas iš trijų pagrindinių žingsnių:

1. Telkinio matmenų ir kuro degimo greičio nustatymo.
2. Telkininio gaisro liepsnos geometrijos ir terminių charakteristikų nustatymo.
3. Taikinio vietoje veikiančios šiluminės spinduliuotės skaičiavimo.

Šiame poskyryje aprašyti šiluminės spinduliuotės $\dot{q}''$ vertinimo metodai buvo sukurti remiantis empirine informacija, atspindinčią eksperimentinius bandymus. Todėl šių metodų negalima „aklai“ taikyti visoms gaisrų situacijoms. Pavyzdžiui, toliau aprašytas taškinio šaltinio metodas netinka vertinti spinduliuotę arti gaisro esantiems taikiniams.

Toliau bus aprašyti keturi spinduliuotės $\dot{q}''$ vertinimo metodai. Du metodai gali būti laikomi supaprastintais, o kiti du tikslesniais ir detalesniais

1.3.2. *Apytikris M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas*

Šis metodas remiasi eksperimentiniais duomenimis, surinktais stebint didelius telkininius gaisrus. M. Shokri's ir C. L. Beyler'is sukūrė formulę skaičiuoti šiluminę spinduliuotę grunto lygyje (Shokri & Beyler, 1989). Šiluminė spinduliuotė $\dot{q}''$ yra siejama su vertikalaus taikinio atstumu iki telkinio centro. Formulė šiluminei spinduliuotei skaičiuoti yra tokia:

$$\dot{q}'' = 15,4 \left(\frac{L}{D} \right)^{-1,59} \text{ (kW/m}^2\text{)}, \quad (1.6)$$

čia D – telkininio gaisro diametras (m), L – atstumas nuo telkininio gaisro centro iki taikinio krašto (m). Taigi, apskrito telkinio kraštas atitinka L/D reikšmę, lygią 0,5. Nors (1.6) formulė buvo sudaryta apskritų telkinių gaisrams, ji gali būti naudojama ir neapskritiems telkiniams, kurių kraštinis santykis

artimas vienetai. Ekvivalentinis tokių telkinių diametras turi būti skaičiuojamas pagal transformuotą apskritimo ploto formulę.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}, \quad (1.7)$$

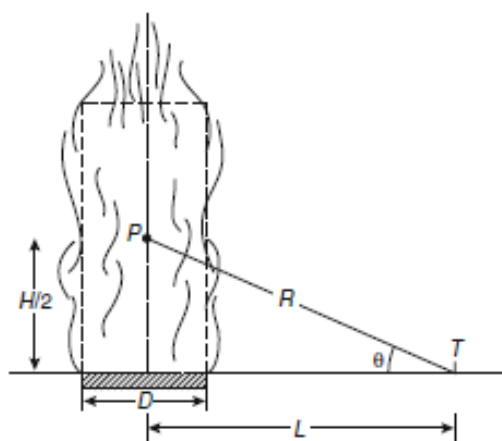
čia A – neapskritiminio telkinio plotas.

Yra žinoma, kad šiluminė spinduliuotė pasidaro didžiausia spinduliavimo šaltinio aukščio viduryje. Todėl telkiniai esantys šiame lygyje bus veikiami didesnės spinduliuotės, jei spinduliuotė apskaičiuojama pagal (1.6) formulę.

Spinduliuotės reikšmės, apskaičiuotas pagal (1.6) formulę, patariama dauginti iš atsargos koeficiento, lygaus 2 (Beyler, 2015). Taip bus gaunami konservatyvūs spinduliuotės įverčiai. Jeigu siekiama realistinio spinduliuotės įverčio, dauginti iš dviejų nebūtina.

1.3.3. Apytikris taškinio šaltinio metodas

Dar vienas būdas apytikriai įvertinti šiluminę spinduliuotę yra liepsnos modeliavimas taškiniu šaltiniu, kuris išdėstytas tikrosios liepsnos viduryje (1.5 pav.). Taškinio šaltinio modelis yra paprasčiausias modelis spinduliavimo šaltiniui nustatyti (Drysdale, 2011). Taškinio šaltinio modelis išreiškiamas paprasta priklausomybe, kuri susieja spinduliuotę su atvirkštiniu atstumo R kvadratu. Realistiškesni spinduliuotės šaltinio modeliai reikalauja skaičiuoti vaizdo (konfigūracijos) daugiklį (angl. *view factor*) pagal labai sudėtingas formules.



1.5 pav. Dydžiai, susiję su taškinio šaltinio modeliu (Beyler, 2015)

Taškinio šaltinio modelis išreiškiamas tokia formule šiluminei spinduliuotei skaičiuoti:

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{Q}_r \cos \theta}{4\pi R^2}, \quad (1.8)$$

čia $\dot{Q}_r$ – išspinduliuojamos energijos atidavimo greitis, θ – kampas tarp normalės į taikinį ir linijos tarp taikinio ir taškinio šaltinio, (1.4 pav.). R – atstumas nuo taškinio šaltinio iki taikinio.

Ekvivalentinio taškinio šaltinio P padėtis yra telkininio gaisro centre ir liepsnų aukščio viduryje. Liepsnų aukštį H (m) siūloma skaičiuoti pagal tokią formulę (Heskestad, 1983):

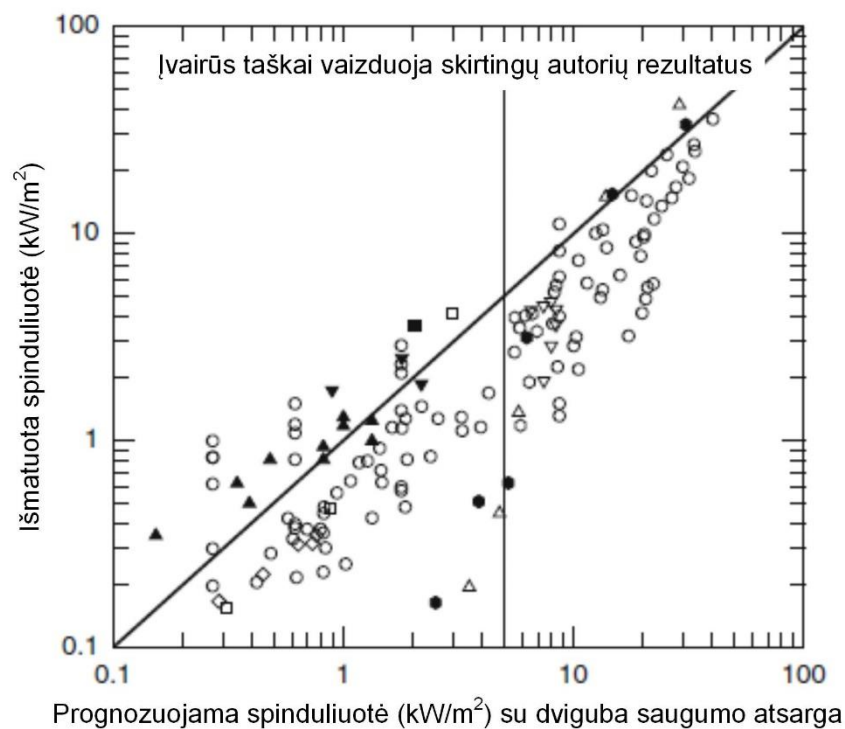
$$H = 0,235\dot{Q}^{2/5} - 1,02D, \quad (1.9)$$

čia $\dot{Q}$ – telkininio gaisro energijos atidavimo greitis (W), D – telkinio diametras (m).

Išspinduliuojamos energijos atidavimo greitis $\dot{Q}_r$ gaunamas dauginant visos energijos atidavimo greitį $\dot{Q}$ iš spinduliuotės dalies koeficiento χ_r :

$$\dot{Q}_r = \chi_r \dot{Q} = (0,21 - 0,0034D)\dot{Q}, \quad (1.10)$$

čia D – telkininio diametras, matuojamas metrais. Spinduliuotės dalies χ_r koeficientas priklauso tiek nuo kuro rūšies, tiek nuo telkinio ploto (žr., pvz., Karlsson & Quintiere, 2000).



1.6 pav. Išmatuotų ir taškinio šaltinio metodu apskaičiuotų šiluminės spinduliuotės reikšmių palyginimas dideliems telkininiams gaisrams, apskaičiuotas reikšmes padauginus iš atsargos koeficiento 2 (įstriža tiesė vaizduoja apskaičiuotų ir išmatuotų reikšmių lygybę) (Shokri & Beyler, 1989)

Kai šiluminė spinduliuotė yra mažesnė už 5 kW/m², pagal taškinio šaltinio modelį apskaičiuotas reikšmes patariama dauginti iš atsargos koeficiento 2 (Beyler, 2015). Apskaičiuotų ir išmatuotų šiluminės spinduliuotės reikšmių palyginimas yra pateiktas 1.6 pav. Šiame brėžinyje apskaičiuotos

spinduliuotės reikšmės buvo padaugintos iš dviejų. Vertikali linija yra minimali spinduliuotės reikšmė, kuriai patartina naudoti taškinio šaltinio modelį. Taškų pasiskirstymas 1.6 pav. aiškiai parodo, kad taškinio šaltinio modelis su atsargos koeficientu 2, duoda konservatyvias (per dideles) spinduliuotės prognozes, kai spinduliuotės reikšmės mažesnės už 5 kW/m². Šį atsargos koeficientą verta naudoti konservatyviai projektuojant pavojingą įrangą. Jei reikia realistinių spinduliuotės prognozių, atsargos koeficientas neturėtų būti taikomas.

1.3.4. Detalus M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas

M. Shokri's ir C. L. Beyler'is sukūrė metodą prognozuoti šiluminę spinduliuotę, kuris pagrįstas atviroje literatūroje paskelbtais duomenimis (Shokri & Beyler, 1989). Jie susiejo eksperimentinius duomenis apie liepsnos spinduliuotę į išorinius taikinius su vidutine liepsnos paviršiaus skleidžiama galia (angl. *emissive power*) E . Ryšys tarp $\dot{q}''$ ir E buvo vaizdo daugiklis F_{12} , kuris dar yra vadinamas formos, geometrijos arba konfigūracijos daugikliu. Dydis F_{12} yra geometrinės prigimties ir jo reikšmės kinta nuo 0 iki 1. M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas yra išreikštas tokia lygtimi:

$$\dot{q}'' = EF_{12}. \quad (1.11)$$

Skaičiuojant vaizdo daugiklį telkinio gaisro liepsna yra idealizuojama cilindru, kurio diametras D yra lygus telkinio diametrui, o aukštis H yra lygus liepsnos aukščiui. Jeigu neapskrito telkinio kraštinių santykis yra artimas 1, jis gali būti pakeistas to pačio ploto apskritu telkiniu su diametru apskaičiuojamu pagal (1.7) formulę. Liepsnos aukštį H siūloma skaičiuoti pagal (1.9) formulę.

Vaizdo daugiklis horizontaliai ir vertikalčiai taikinio padėtims turi būti skaičiuojamas pagal tokias formules:

$$F_{12,H} = \frac{[B - (1/S)]}{\pi\sqrt{B^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} - \frac{[A - (1/S)]}{\pi\sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}, \quad (1.12a)$$

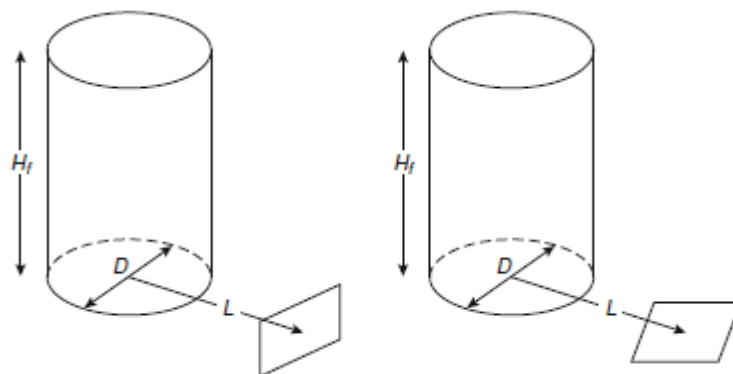
$$F_{12,V} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(S-1)}{(S+1)}} + \frac{Ah}{\pi S \sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}. \quad (1.12b)$$

Šiose formulėse esantys pagalbiniai geometriniai dydžiai yra skaičiuojami pagal tokias formules:

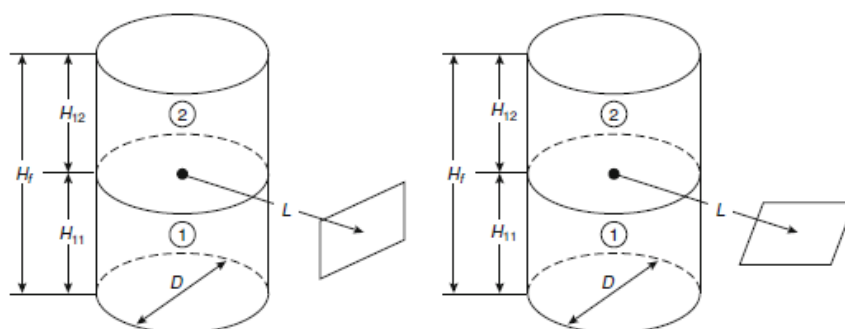
$$A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S}, \quad B = \frac{1 + S^2}{2S}, \quad S = \frac{2L}{D}, \quad h = \frac{2H}{D}, \quad (1.13)$$

čia L yra atstumas tarp cilindro centro ir taikinio. Kintamieji, įtraukti į (1.12) formules yra grafiškai paaiškinti 1.7 pav.

a



b



1.7 pav. Dydziai, naudojami skaičiuojant vaizdo daugiklį vertikaliu cilindru idealizuotai liepsnai: a – ant žemės esantys vertikalūs ir horizontalūs taikiniai, b – virš žemės esantys vertikalūs ir horizontalūs taikiniai (Beyler, 2015)

Maksimali vaizdo daugiklio reikšmė gaunama, kaip vektorinė horizontalaus ir vertikalaus daugiklių suma:

$$F_{12,\max} = \sqrt{F_{12,H}^2 + F_{12,V}^2}. \quad (1.14)$$

M. Shokri's ir C. L. Beyler's, remdamiesi eksperimentiniais duomenimis, suformavo lygtį, siejančią liepsnos skleidžiamą galią su jos diameteru:

$$E = 58(10^{-0,00823 \times D}). \quad (1.15)$$

Pagal šią lygtį galima apskaičiuoti vidutinę skleidžiamą galią, vidurkinant pagal visą liepsnos aukštį. Ši galia yra daug mažesnė už lokalių intensyvaus spinduliavimo liepsnos plotų skleidžiamą galią.

Skleidžiama galia E mažėja didėjant telkinio diameterui. Taip nutinka dėl juodų dūmų sklaidimo už liepsnos ribų. Šie dūmai užtemdo šviečiančias telkininio gaisro liepsnas.

1.3.5. Detalus K. S. Mudan'o metodas

K. S. Mudan'as sukūrė metodą vertinti telkininių gaisrų spinduliuotes tiek sąlygoms be vėjo, tiek vėjui veikiant liepsnas (Mudan, 1984). Šiluminės spinduliuotės intensyvumą pasiūlyta skaičiuoti pagal tokią formulę:

$$\dot{q}'' = \tau F_{12} E, \quad (1.16)$$

čia E – vidutinė liepsnos paviršiaus skleidžiamoji galia (kW/m^2); F_{12} – vaizdo daugiklis; τ – atmosferos perduodamumo koeficientas. Atmosferos perduodamumo koeficientas τ yra dydis, parodantis kokią dalį energijos, plintančios šiluminės spinduliuotės pavidalu, sugeria oras. Pagrindiniai oro komponentai, sugeriantys spinduliuotę, yra vandens garai ir anglies dioksidas. Akivaizdu, kad dydis τ taip pat priklausys ir nuo atstumo tarp liepsnos ir taikinio. Dydžio τ skaičiavimo formulės yra paaiškintos A priede.

Šiluminės spinduliuotės vertinimo formulė (1.16) gali būti naudojama liepsnas idealizuojant tiek vertikaliu cilindru, tiek ir pasvyruoju cilindru. Tam reikia žinoti liepsnų diametrą ir aukštį. Diametru imamas telkinio diametras D . Liepsnos aukščiu H laikomas matomos, dūmais netemdomos liepsnos aukštis. Jis apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\frac{H}{D} = 42D \left(\frac{\dot{m}''_{\infty}}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,61}, \quad (1.17)$$

čia $\dot{m}''_{\infty}$ – masės degimo greitis, susijęs su vieno kvadratinio metro telkinio plotu ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$); ρ_a – oro tankis (kg/m^3); g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s^2). Jei į telkininio gaisro liepsną pučia vėjas, liepsnos aukščio ir diametro santykį reikia skaičiuoti pagal tokią formulę:

$$\frac{H}{D} = 55 \left(\frac{\dot{m}''_{\infty}}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,67} (u^*)^{-0,21}, \quad (1.18)$$

čia u^* – bedimensinis vėjo greitis, kurį reikia apskaičiuoti pagal formulę:

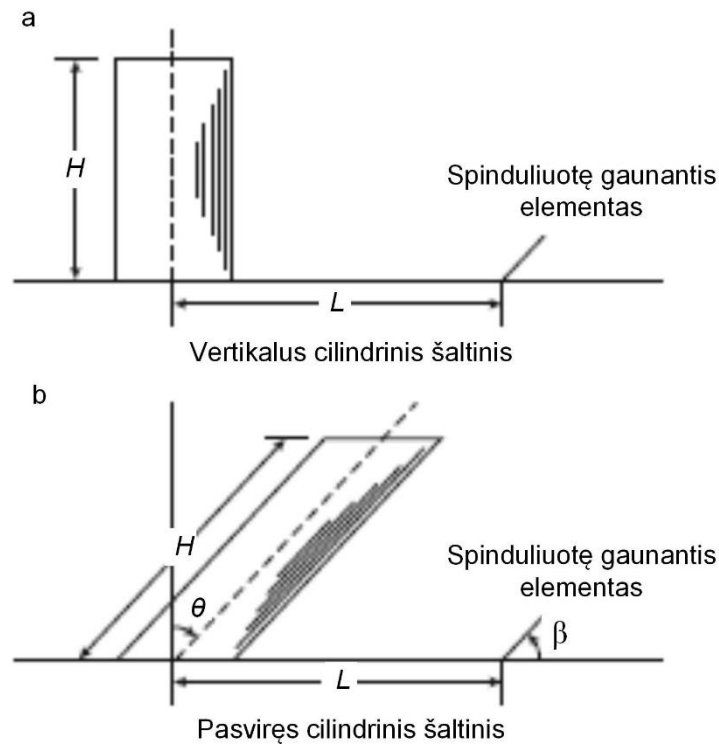
$$u^* = \frac{u_w}{(g\dot{m}''_{\infty}D / \rho_a)^{1/3}}, \quad (1.19)$$

čia u_w – vėjo greitis (m/s).

Stipriai pučiant vėjui liepsna pasvirs. Posvyrio kampą galima apskaičiuoti žinant u^* reikšmę

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{kai } u^* \leq 1 \\ 1/\sqrt{u^*}, & \text{kai } u^* \geq 1 \end{cases} \quad (1.20)$$

šioje formulėje bedimensis vėjo greitis yra skaičiuojamas matuojant fizinį vėjo greitį 1,6 m aukštyje. Kai vėjo greitis nulinis arba labai mažas liepsną idealizuojantis cilindras laikomas stačiu, o kai vėjo greitis pakankamas liepsną pakreipti ji yra idealizuojama pasvirusiu cilindru (1.8 pav.).



1.8 pav. Vaizdo daugiklio skaičiavimo geometrija: a – vertikalaus cilindro atvejis, b – pasvirusio cilindro atvejis (Beyler, 2015)

Vaizdo daugiklis vertikalaus cilindro atveju vertikaliam ir horizontaliam taikiniams skaičiuojamas pagal (1.12) formules.

Vaizdo daugiklis pasvirusiam cilindrai yra skaičiuojamas pagal formules

$$\pi F_V = \frac{a \cos \theta}{b - a \sin \theta} \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1 + a \sin \theta)}{\sqrt{AB}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{A} \left(\frac{b-1}{b+1} \right)^{1/2}}{\sqrt{B} \left(\frac{b-1}{b+1} \right)^{1/2}} + \frac{\cos \theta}{\sqrt{C}} \times \left[\tan^{-1} \frac{ab - (b^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{b^2 - 1} \sqrt{C}} + \tan^{-1} \frac{(b^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{b^2 - 1} \sqrt{C}} \right] - \frac{a \cos \theta}{(b - a \sin \theta)} \tan^{-1} \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} \quad (1.21a)$$

$$\pi F_H = \tan^{-1} \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} - \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1+a \sin \theta)}{\sqrt{AB}} \times \tan^{-1} \sqrt{\frac{A}{B} \left(\frac{b-1}{b+1} \right)^{1/2}} + \frac{\sin \theta}{\sqrt{C}} \times \left[\tan^{-1} \frac{ab - (b^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{b^2 - 1} \sqrt{C}} + \tan^{-1} \frac{(b^2 - 1)^{1/2} \sin \theta}{\sqrt{C}} \right] \quad (1.21b)$$

Kai liepsnos posvyrio kampas θ yra lygus nuliui, (1.21) formulės supaprastėja iki (1.12) formulių. Pagalbiniai (1.21) formulėse esantys geometriniai dydžiai yra skaičiuojami taip:

$$a = H / R, b = L / R, A = a^2 + (b+1)^2 - 2a(b+1)\sin \theta, B = a^2 + (b-1)^2 - 2a(b-1)\sin \theta,$$

$$C = 1 + (b^2 - 1)\cos^2 \theta.$$

Skleidžiamoji liepsnos galia cilindrinės liepsnos atveju vertinama taikant tokią formulę:

$$E = E_{\max} e^{-sD} + E_s (1 - e^{-sD}), \quad (1.22)$$

čia $E_{\max}$ – „juodojo kūno“ skleidžiamoji galia, lygi 140 kW/m²; dūmų skleidžiamoji gali, lygi 20 kW/m²; s – slopinimo koeficientas, lygus 0,12 m⁻¹.

1.4. Skaitiniai modeliai šiluminei telkininių gaisrų spinduliuotei prognozuoti

Šiluminė telkininio gaisro spinduliuotė $\dot{q}''$ gali būti vertinama ir skaičiuojamosios skysčių dinamikos (hidrodinamikos) metodu. Įvairiomis kalbomis rašomoje mokslinėje literatūroje šis metodas paprastai vadinamas anglišku trumpiniu CFD (ang. *computational fluid dynamics*). CFD trumpinys bus naudojamas ir tolesniame tekste. CFD yra skysčių mechanikos mokslo šaka, kuri analizuoja ir sprendžia skysčių tėkmės problemas (pvz., Computational Fluid Dynamics, žr. A priedą).

CDF metodas taikomas ir gaisrams modeliuoti (pvz., Yeoh & Yuen, 2009). Gaisro procesas yra imituojamas skaitiniais metodais sprendžiant sudėtingą diferencialinių lygčių sistemą, kuri vadinama *Navier – Stockes* lygtimis. Tam naudojamos CFD metodą įgyvendinančios programos ir skaičiuojama su didelės galios kompiuteriais. Žinomiausia ir dažniausiai naudojama gaisro modeliavimui pritaikyta CFD programa yra FDS (angl. *fire dynamics simulator*) (McGrattan *et al.*, 2010). Ji atlieka stambių sūkurių modeliavimą (angl. *large eddy simulation*), kurio uždavinys matematiškai yra formuluojamas vienu iš *Navier – Stockes* lygčių pavidalų. Stambių sūkurių modeliavimas tinka mažo greičio, temperatūros varomų srovių atvejui ir leidžia prognozuoti gaisro keliamų dūmų ir karščio pernešimą. Taigi, taikant FDS programą yra modeliuojama gaisro evoliucija.

Maždaug nuo XX a. devinto dešimtmečio pradėti tyrimai, kaip CFD metodu modeliuoti telkininius gaisrus (Novozhilov, 2001). Šie tyrimai yra tęsiami iki šių dienų (Palazzi *et al.*, 2017;

Rangaiaigh & Lakshminarayanan, 2018). Ieškoma, kaip tobulinti matematinį CFD aparatą, kad modeliavimas būtų kuo tikslesnis ir lankstesnis. Principinis CFD metodo pranašumas prieš anksčiau aprašytus inžinerinius metodus yra tas, kad CFD priemonėmis galima modeliuoti bet kokios formos telkinio gaisrą, vienu metu vykstančius kelis telkininius gaisrus arba gaisrus, kurie susisaro skirtinguose lygiuose (Vasanth *et al.*, 2014, 2015, 2017). Kitas principinis skirtumas tarp inžinerinių ir skaitinio metodų yra tai, kad pirmieji buvo sukurti remiantis eksperimentiniais duomenimis ir juos tiesiogiai atspindi, o CFD modeliavimas yra daugiau teorinis spėjimas, kurį reikia tikrinti darant eksperimentus.

Modeliuojant skysčio degimą CFD priemonėmis, laikoma, kad skysčio garavimas degimo metu yra skysčio temperatūros ir garų koncentracijos virš telkinio paviršiaus funkcija (McGrattan *et al.*, 2019). Santykinė garų koncentracija virš telkinio yra išreiškiama bedimensiu garų ir oro santykiu χ_l ir jis yra skysčio virimo temperatūros T_b funkcija. Šis santykis išplaukia iš klasikinės termodinaminės Klaperono – Klausijuso lygties (pvz., Wark, 1988). Santykis χ_l yra taip išreiškiamas (Prasad *et al.*, 1999):

$$\chi_l = \exp \left\{ - \frac{h_v W_F}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right\}, \quad (1.23)$$

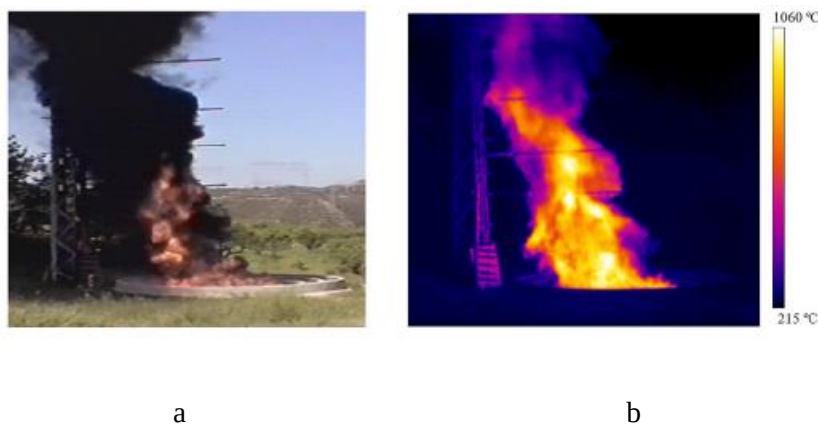
čia h_v – skysto kuro (skysčio) garavimo šiluma, W_F – molekulinis kuro garų svoris, T_s – kuro paviršiaus temperatūra, R – universalioji dujų konstanta. Skysčio degimo greitis $\dot{m}''$ yra išreiškiamas garavimo greičiu ir vertinamas Maksvelo – Stefano sklaidos (difuzijos) formule (Taylor & Krishna, 1993). FDS programa turi tokį šios formulės pavidalą:

$$\dot{m}'' = 0,037 \cdot 0,6^{1/3} \text{Re}^{4/5} D_{lg} \frac{\bar{p}_m W_F}{RT_g} \ln \left\{ \frac{\chi_g - 1}{\chi_l - 1} \right\}, \quad (1.24)$$

čia Re – Reinoldso skaičius, D_{lg} – skysčio garų sklaidumas, $\bar{p}_m$ – garų slėgis, χ_g – bedimensis garų ir oro santykis FDS tinklelio elemente (celėje) g , kuris yra virš skysčio paviršiaus, T_g – skysčio garų temperatūra. Degantis skystis FDS modelyje yra laikomas termiškai storu (pusiau begaliniu, angl. *thermally thick*) kūnu. Taigi, skysčio degimo greitis $\dot{m}''$ FDS modelyje ir panašiose programose ne užduodamas, kaip paprasta skysto kuro charakteristika, o modeliuojamas taikant (1.23) ir (1.24) formules. Tai reiškia, kad vietoj vieno skaičiaus $\dot{m}''$ programos įvesties duomenyse reikia užduoti (1.23) ir (1.24) lygčių kairiųjų pusių dydžius, siejamus su konkrečiais degiais skysčiais. Vadinasi, pradinės informacijos uždavimas skaitiniame CFD metode yra daug sudėtingesnis už paprastą $\dot{m}''$ reikšmės uždavimą anksčiau aprašytuose inžineriniuose metoduose.

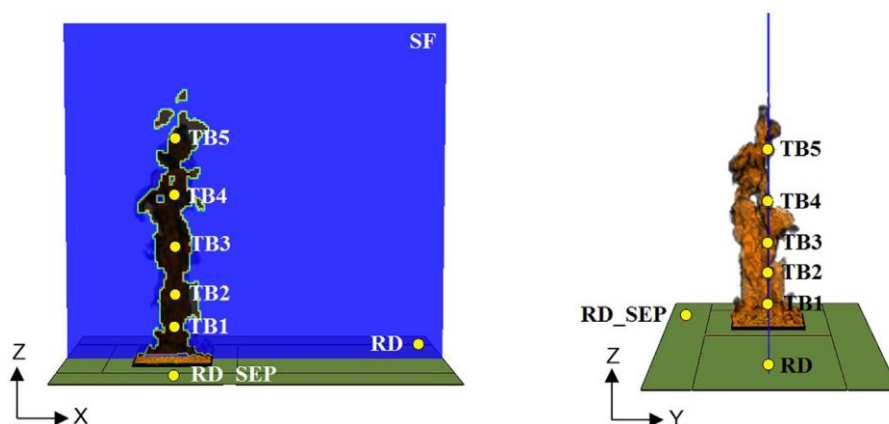
Mokslinių straipsnių, kuriuose CFD modeliavimo rezultatai yra lyginami su fizinių telkininių gaisrų eksperimentų matavimais, yra labai mažai. Paminėti galima B. Rengel'io ir kt. darbą, kuris

lygino CFD skaičiavimo rezultatus su telkininio gaisro eksperimentu (Rengel *et al.*, 2018). Gaisras buvo imituojamas deginant 12 apskritų benzino ir dyzelino telkinių, su 1 m – 6 m diametrais (1.9 pav.). Telkiniai buvo suformuoti apvaliuose gelžbetoniniuose induose.



1.9 pav. Video kadrai, kuriuose parodytas telkininio gaisro eksperimentas: a – vaizdo kameros kadras, b – infraraudonųjų spindulių kameros kadras (Rengel *et al.*, 2018)

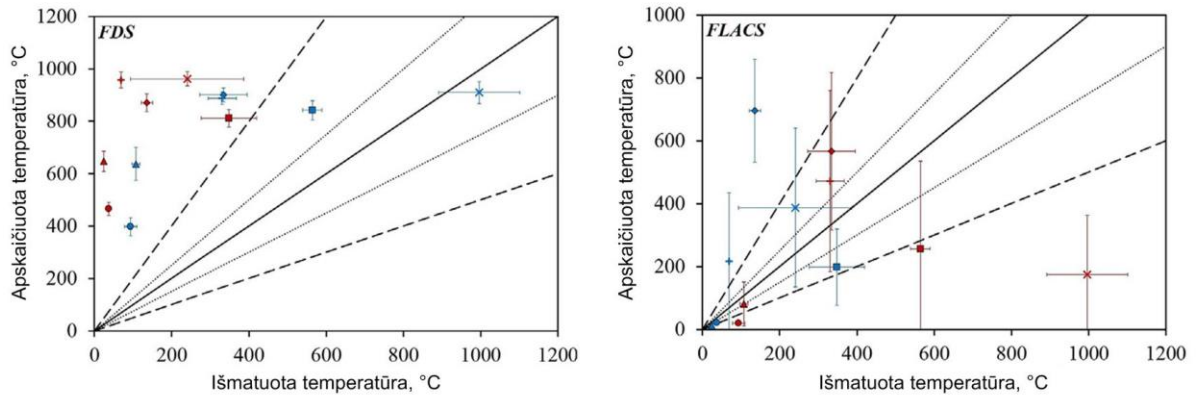
Fizinio eksperimento rezultatai buvo lyginami su CFD modeliavimo rezultatais, o šis atliktas taikant FDS ir FLACS-Fire programas. Telkininio gaisro liepsnos modeliavimo procesą atspindintys FDS grafikai parodyti 1.10 pav.



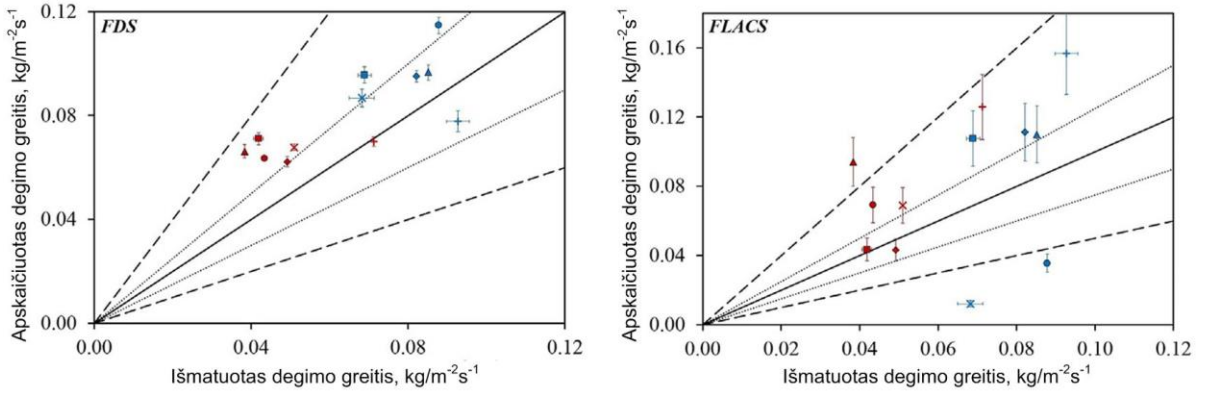
1.10 pav. Kvadratinės formos telkinio gaisro, modeliuoto taikant FDS programą, liepsnos vaizdai, sudaryti su rezultatų vizualizavimo programa „SMOKEVIEW“ (geltonais taškais pažymėtos termoporos TB ir radiometrai RD) (Rengel *et al.*, 2018)

Skaitinio prognozavimo paklaidos yra grafiškai išreikštos 1.11 pav. Akivaizdu, kad skirtumas tarp skaitinio modeliavimo ir eksperimento rezultatų yra didelis. FDS programos rezultatai daugiau nukrypę nuo eksperimentinių (nukrypę nuo idealaus atitikimo 45° tiesės), negu FLACS programos. FDS programa prognozuoja per aukštas temperatūras ir per žemas šiluminės spinduliuotės $\dot{q}''$ reikšmes. FLACS programos rezultatams nėra būdingas bendras temperatūros ir spinduliuotės nuokrypis į didesnę arba mažesnę pusę, tačiau šie rezultatai yra labai išsibarstę 45° tiesės atžvilgiu. Degimo greičio $\dot{m}''$ prognozės, gautos taikant abi programas, yra mažiausiai išsibarsčiusios ir

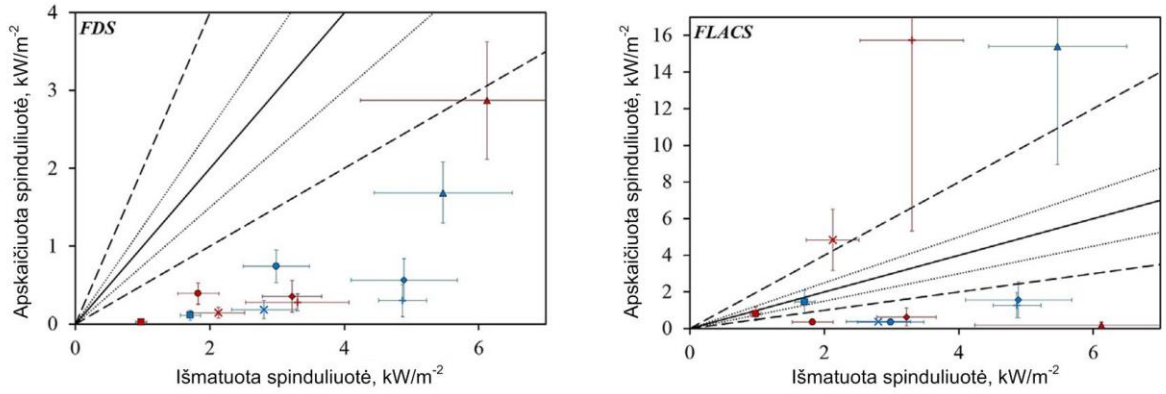
rezultatai išsidėstę arčiausiai 45° tiesės. Tačiau šie degimo greičio $\dot{m}''$ modeliavimo rezultatai tiesiogiai netaikomi vertinant telkininių gaisrų poveikį. Todėl jų reikšmė yra tik teorinė.



a) temperatūra



b) degimo greitis



c) šiluminė spinduliuotė

• 22_D15 • 21_G15 ▲ 01_D3 ▲ 17_G3 ■ 04_D3 ■ 03_G3 ♦ 14_D4 ♦ 13_G4 + 10_D5 + 08_G5 × 07_D6 × 06_G6

d) eksperimento kodas

1.11 pav. Paklaidos, gautos lyginant CFD modeliavimo ir eksperimento rezultatus: a – vidutinės termoporomis išmatuotos temperatūros, b – vidutiniai degimo greičiai, c – vidutinės šiluminės spinduliuotės reikšmės, d – taškais žymimi 12 eksperimentų kodai (Rengel *et al.*, 2018)

1.5. Pirmo skyriaus išvados

1. Analizuojant mokslinę literatūrą nustatyta, kad telkininiai gaisrai yra dažniausi gaisrai pramonės objektuose. Telkininis gaisras yra pramoninės avarijos sekos dalis. Ši avarija visada prasideda degios medžiagos nuotėkiu. Telkininis gaisras yra tik viena nuotėkio pasekmė. Toks nuotėkis gali baigtis sprogitu arba kitokio pobūdžio gaisrais.
2. Nustatyta, kad pagrindinis telkininio gaisro poveikis yra šiluminė spinduliuotė. Ją galima vertinti taikant inžinerinius skaičiavimo metodus. Jie dar vadinami „rankinio“ skaičiavimo metodais. Šie metodai buvo sudaryti remiantis telkininius gaisrus imituojančių eksperimentų duomenimis. Inžinerinių metodų privalumas yra jų paprastumas, leidžiantis tikrinti ir kritiškai vertinti skaičiavimų kokybę.
3. Rasta, kad iki šiol buvo pasiūlyti keli inžineriniai metodai šiluminei telkininio gaisro spinduliuotei vertinti. Jie leidžia modeliuoti įvairius telkininio gaisro atvejus, kurie skiriasi telkinio formos, liepsnos pavidalo ir gaisro aplinkos požimiū. Kai kuriais atvejais galima taikyti daugiau nei vieną inžinerinį metodą, kitais atvejais spinduliuotę teks vertinti tik taikant specializuotą metodą.
4. Literatūroje pateikti skaičiavimai, atlikti taikant įvairius inžinerinius metodus, leidžia daryti išvadą, kad skirtingi metodai duoda gana skirtingus rezultatus. Tačiau praktiniu požiūriu rezultatų skirtumas nėra kritiškas. Jei reikia, spinduliuotę galima vertinti konservatyviausiu, didžiausią jos reikšmę leidžiančiu skaičiuoti metodu.
5. Nustatyta, kad inžineriniai metodai yra pritaikyti tik apskritų telkinių gaisrams. Juos dar galima taikyti tais atvejais, kai telkinio forma gali būti suvesta į apskritimą. Jei telkinys yra pailgas arba netaisyklingos formos, inžineriniais metodais apskaičiuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės gali būti netikslios. Be to, inžineriniai metodai tinka tik atvirame ore vykstantiems gaisrams. Jei telkininis gaisras vyks iš dalies uždaroje erdvėje, tarkime, tunelyje arba po tiltu, prognozuoti jo spinduliuotę inžineriniais metodais nepavyks.
6. Šiluminę telkininio gaisro spinduliuotę galima vertinti ir skaitiniu CFD metodu. Jis leidžia modeliuoti telkininį gaisrą, kai kuro telkinys yra netaisyklingos formos, o gaisro erdvė yra nebūtinai atvira. Taikyti skaitinį telkininio gaisro modeliavimą yra gana sudėtinga, o pats modeliavimas reikalauja santykinai didelių skaičiavimo kompiuteriu sąnaudų.
7. Negausūs duomenys apie CFD modeliavimo ir telkinių gaisrų eksperimentų rezultatų palyginimą leidžia daryti išvadą, kad šie rezultatai gana stipriai skiriasi. Šiluminės telkininio gaisro spinduliuotės prognozavimą CFD metodu sunkina ir tai, kad skirtingos kompiuterio programos, kuriomis įgyvendintas šis metodas, duoda skirtingus rezultatus tai pačiai gaisro situacijai.

2. ŠILUMINĖS TELKININIŲ GAISRŲ SPINDULIUOTĖS MODELIŲ PALYGINIMAS IR IŠPLĖTIMAS

2.1. Inžinerinių ir skaitinių šiluminės spinduliuotės modelių palyginimas

2.1.1. Palyginimo kriterijus

Pagrindinis telkininio gaisro poveikis yra šiluminė spinduliuotė. Jos kitimas pasirinktame taške šalia gaisro yra atsitiktinis procesas. Tai reiškia, kad spinduliuotė svyruoja (osciliuoja) ir šiam procesui yra būdingas neapibrėžtumas. Tačiau šis svyravimas laikomas santykinai mažu, nes energijos išsiskyrimo greitis (HRR greitis) degant telkiniui yra pastovus. Todėl spinduliuotės intensyvumas pasirinktame taške modeliuojamas pastoviu dydžiu $\dot{q}''$ (1.3 poskyris). Šis dydis ir naudojamas lyginant skirtingų šiluminės spinduliuotės modelius.

Telkininį gaisrą galima modeliuoti ir skaitiniu CFD metodu (1.4 poskyris). Plačiausiai žinoma kompiuterinė priemonė, su kuria įgyvendinamas šis metodas, yra FDS programa. Skaičiuojant su ja gaunama, kad teoriškai pastovus telkininio gaisro energijos išsiskyrimo greitis HRR šiek tiek svyruoja. Todėl svyruoja ir CFD metodu apskaičiuojama $\dot{q}''$ reikšmė. Šio svyravimo priežastis gali slypėti FDS programos algoritme. Todėl lyginant $\dot{q}''$ reikšmę, apskaičiuotą inžineriniais metodais, su CFD modeliavimo rezultatu, reikės atsižvelgti į $\dot{q}''$ svyravimą gaunamą skaitiniu metodu.

2.1.2. Šiluminės toluolo telkinio gaisro spinduliuotės prognozavimas inžineriniais metodais

Iš talpyklos nutekėjo toluolas ir pasklido 12 m diametro apsauginio pylimo plote. Atstumas nuo telkininio gaisro centro iki telkinio yra 30 m.

Reikia apskaičiuoti šiluminę spinduliuotę, kuri veiks ant žemės stovintį taikinį (2.1 pav.). Bus taikomi tokie metodai:

1. M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas.
2. Taškinio šaltinio metodas.
3. Detalus M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas.
4. Detalus K. S. Mudan'o metodas.

Toluolo ir oro savybės yra tokios:

1. Toluolo degimo šiluma $\Delta H_c = 40\,550$ kJ/kg.
2. Toluolo masės netekties greitis $\dot{m}_{\infty}'' = 0,1126$ kg/(m²s).
3. Oro temperatūra 20 °C ir tankis $\rho_a = 1,2$ kg/m³.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_r &= (0,21 - 0,0034D)(\dot{m}_\infty'' A \Delta H_c) = \\ &= (0,21 - 0,0034 \times 12) 0,1126 \times 113,1 \times 40,55 \times 10^3 = 87\,400 \text{ kW}.\end{aligned}$$

Taškinio šaltinio aukštis H_T bus pusė liepsnos aukščio, atstumas iki taikinio, R , turės būti apskaičiuotas pagal Pitagoro teoremą, o 1.4 pav. pavaizduotas kampas tarp normalės į taikinį ir linijos tarp taikinio ir taškinio šaltinio, θ , galės būti gautas pagal paprastą trigonometrinę formulę:

$$H_T = \frac{H}{2} = \frac{33,1}{2} = 16,55 \text{ m};$$

$$R = \sqrt{L^2 + H_T^2} = \sqrt{30^2 + 16,55^2} = 34,3 \text{ m};$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H_T}{L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{16,55}{30}\right) = 28,9^\circ.$$

Apskaičiavus tarpines reikšmes, taškinio šaltinio prognozuojama šiluminė spinduliuotė bus tokia:

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{Q}_r \cos \theta}{4\pi R^2} = \frac{87\,400 \cos 28,9^\circ}{4 \pi 34,3^2} = 5,18 \text{ kW/m}^2.$$

Detalus M. Shokri'o ir C. L. Beyler'io metodas

Liepsnų skleidžiama galia apskaičiuojama pagal (1.15) formulę, įstatant telkinio diametrą:

$$E = 58(10^{-0,00823D}) = 58(10^{-0,00823 \times 12}) = 46,2 \text{ kW/m}^2.$$

Taikant (1.14) formulę apskaičiuojami pagalbiniai dydžiai, priklausantys vaizdo daugiklių formulėms (1.12):

$$S = \frac{2L}{D} = \frac{2 \times 30}{12} = 5;$$

$$H = 0,23\dot{Q}^{2/5} - 1,02D = 32,11 \text{ m};$$

$$h = \frac{2H}{D} = \frac{2 \times 32,11}{12} = 5,35;$$

$$A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S} = \frac{5,35^2 + 5^2 + 1}{2 \times 5} = 5,46;$$

$$B = \frac{(1 + S^2)}{2S} = \frac{(1 + 5^2)}{2 \times 5} = 2,6.$$

Apskaičiavus šiuos pagalbinus dydžius pagal (1.12) formules apskaičiuoti horizontalaus taikinio vaizdo daugiklis $F_{12,H} = 0,039$ ir vertikalaus taikinio vaizdo daugiklis $F_{12,V} = 0,088$. Tuomet maksimalus vaizdo daugiklis, susijęs su didžiausia šilumine spinduliuote bus:

$$F_{12,max} = \sqrt{F_{12,H}^2 + F_{12,V}^2} = \sqrt{0,039^2 + 0,088^2} = 0,0963.$$

Maksimali šiluminė spinduliuotė į taikinį, apskaičiuota pagal Shokri'io ir Beyler'io metodą, bus tokia:

$$\dot{q}'' = EF_{12,max} = 46,2 \times 0,0963 = 4,45 \text{ kW/m}^2.$$

Detalus K. S. Mudan'o metodas

Pagal K. S. Mudan'o metodą šiluminė spinduliuotė $\dot{q}''$ yra skaičiuojama pagal (1.16) formulę. Tam pirmiausiai pagal (1.22) formulę reikia apskaičiuoti skleidžiamąją cilindrinės liepsnos galią:

$$E = E_{max} e^{-sD} + E_s (1 - e^{-sD}) = 140 e^{-0,12 \times 12} + 20(1 - e^{-0,12 \times 12}) = 48,43 \text{ kW/m}^2.$$

Maksimalus vaizdo daugiklis $F_{12,max}$ K. S. Mudan'o metode bei M. Shokri'io ir C. L. Beyler'io metode, esant sąlygoms be vėjo, bus tas pats ir lygus 0,0963. Taigi, belieka pagal A priedo formules apskaičiuoti atmosferos perduodamumo koeficiento τ reikšmę. Abiem metodais įvertinta šiluminė spinduliuotė $\dot{q}''$ skirsis tiek, kokio didumo yra τ reikšmė. Koeficiento τ reikšmė priklauso nuo atstumo iki taikinio x , aplinkos temperatūros ir santykinės drėgmės (A priedas). Šiame pavyzdyje $x = 30 - 12/2 = 24 \text{ m}$ (2.1 pav.). Pasirinkus, kad aplinkos temperatūra yra 20°C ir santykinė drėgmė yra 77 %, gaunama, kad $\tau = 0,758$. Taigi, spinduliuotės įvertis, apskaičiuotas pagal K. S. Mudan'o metodą bus maždaug 25 % mažesnis nei apskaičiuotas pagal M. Shokri'io ir C. L. Beyler'io metodą.

2.1.3. Toluolo gaisro spinduliuotės prognozavimas skaitiniu metodu

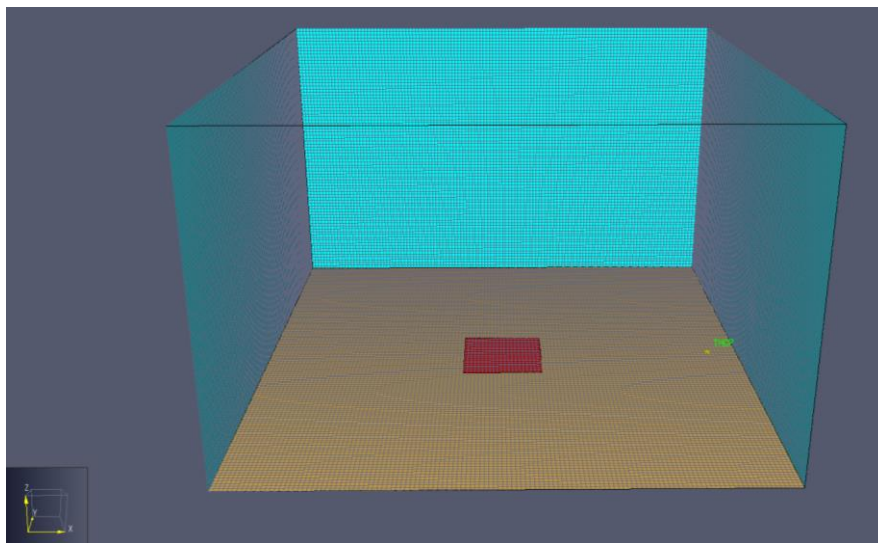
Gaisro situacijos idealizavimas

Siekiant įvertinti toluolo telkinio šiluminę spinduliuotę skaitiniu CFD metodu, buvo naudota FDS programa. Modeliavimui atlikti buvo sudarytas erdvinis tinklelis (angl. *mesh*). Jis yra parodytas 2.2 pav. Tinklelis diskretizuoja erdvę ir jo pagrindu yra formuluojama diferencialinių lygčių sistema, kurią sprendžia FDS programa. Kuo šis tinklelis yra smulkesnis, tuo didesnė ir sudėtingesnė yra lygčių sistema. Sprendžiant šį pavyzdį visi tinklelio langelio matmenys buvo 0,5 m.

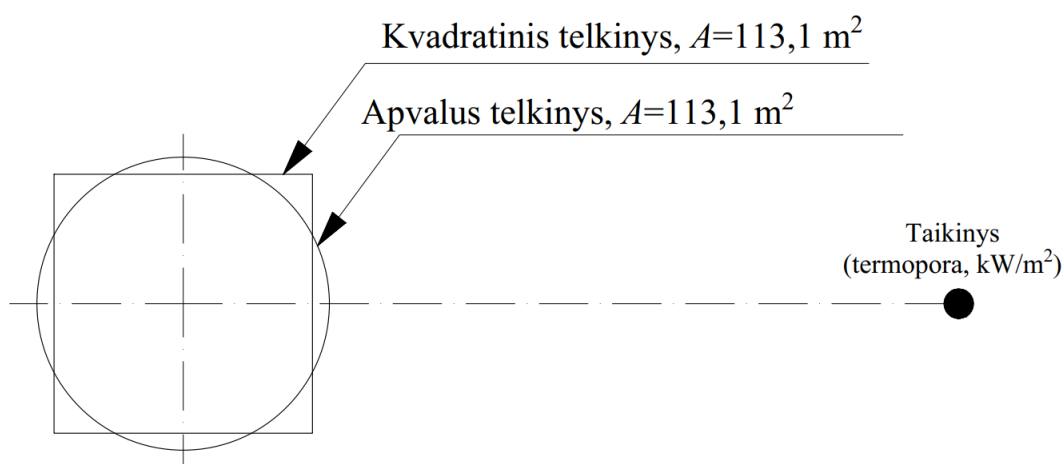
Atliekant modeliavimą, degantis objektas buvo išdėstytas ties apatine tinklelio plokštuma. Ši plokštuma buvo uždara šiluminei spinduliuotei. Likusios penkios plokštumos buvo nustatytos

atviromis. Tai leido imituoti gaisro procesą atviroje atmosferoje. Programa FDS degančius objektus leidžia formuoti pagal tinklelio langelius. Tačiau dažniausiai degantis objektas idealizuojamas stačiakampiu arba kvadratu. Idealizavimas kvadratu buvo panaudotas ir šiame pavyzdyje, nes tai yra įprasta turint reikalo su telkiniais gaisrais (1.7 formulė, 1.3.2 sk.). Tačiau mūsų idealizavimas buvo atvirkštinis, nes pereita nuo apskritimo prie ekvivalentinio kvadrato (2.3 pav.).

Telkininio gaisro taikiny, 2.1 pav. pavaizduotas dešinėje esančiu cilindru, FDS modelyje buvo išreikštas virtualia termopora (angl. *thermocouple*), kuri matavo ją veikiančią šiluminę spinduliuotę. Ji buvo išreiškiama kW/m^2 .



2.2 pav. FDS programos tinklelis su kvadratinės formos kuru, imituojančiu apskritą toluolo telkinį



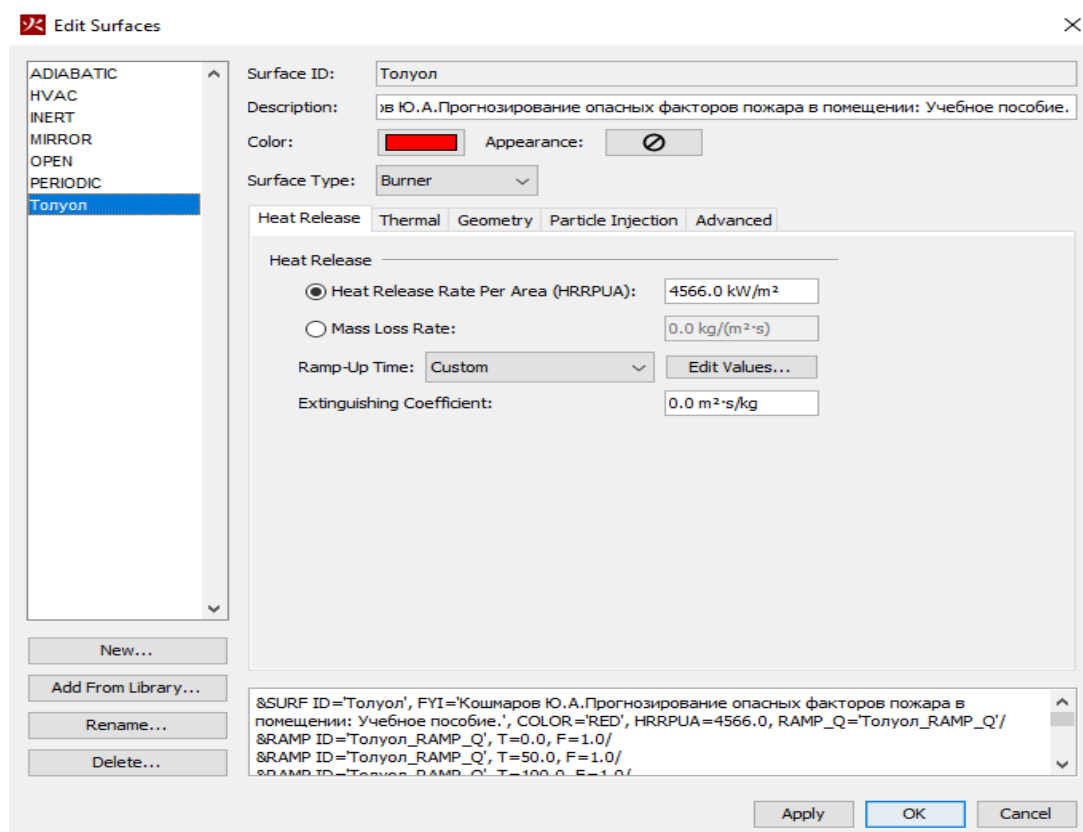
2.3 pav. Apvalaus toluolo telkinio idealizavimas to paties ploto kvadratu

Kuro energijos atidavimo greičio (HRR) modeliavimas

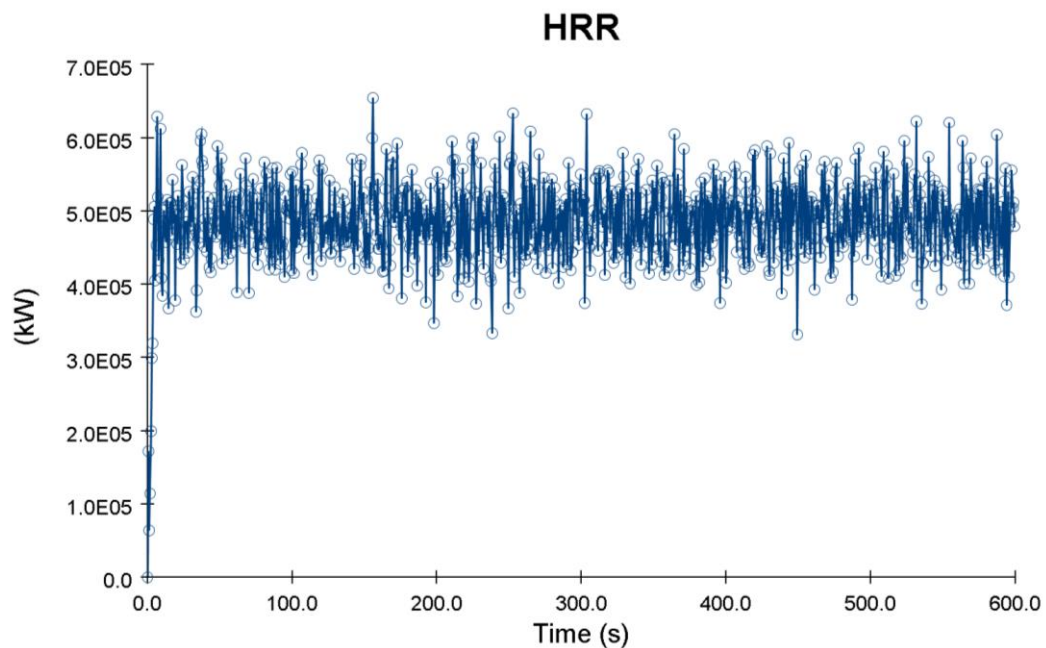
Kaip minėta anksčiau, degant skystam kurui energijos atidavimo greitis $\dot{Q}_r$, literatūroje dažnai žymimas trumpiniu HRR, būna pastovus. Jei kalbėtume apie pavyzdyje nagrinėjamą toluolo telkinį, greičio reikmė bus $\dot{Q}_r = 87\,400 \text{ kW} = 8,74 \times 10^3 \text{ kW}$ (2.1.2 sk.). Ši greičio $\dot{Q}_r$ reikšmė, susijusi su

spinduliuotės dalies koeficientu χ_r (1.10) formulė, 1.3.3 sk.). FDS programoje koeficientas χ_r toluolui įvertinamas automatiškai. Todėl $\dot{Q}_r$ reikšmė parenkama suskaičiuojant sandaugą $\dot{m}_\infty'' \Delta H_c$, kuri yra lygi 4566 kW/m². Tai atliekama FDS lange „Edit Surfaces“ (2.4 pav.). Tada ši sandauga programos yra padauginama iš degančio objekto ploto A .

Skaičiuojant su FDS programa, pastovus energijos atidavimo greitis $\dot{Q}_r$ yra perskaičiuojamas ir atsiranda jo reikšmės svyravimas, pavaizduotas 2.5 pav. Šis svyravimas yra sukeltas skaitmeninio FDS modelio nestabilumo (McGrattan *et al.*, 2010). Matosi, kad 2.5 pav. pavaizduotas osciliuojantis grafikas svyruoja apie nustatytą reikšmę $\dot{m}_\infty'' A \Delta H_c = 5,164 \times 10^5$ kW.



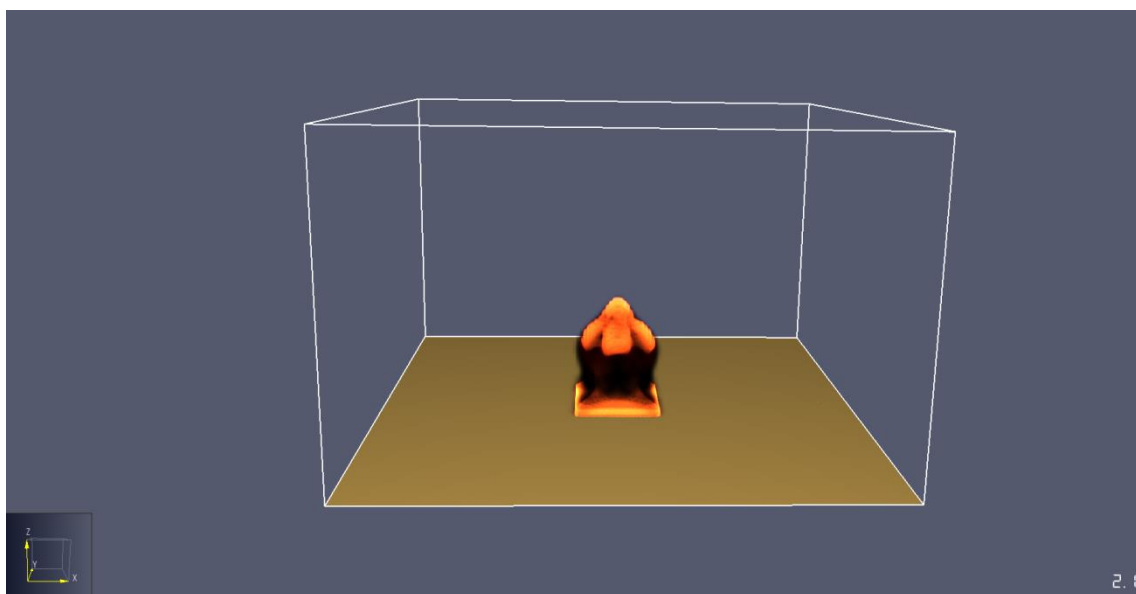
2.4 pav. FDS langas „Edit Surfaces“



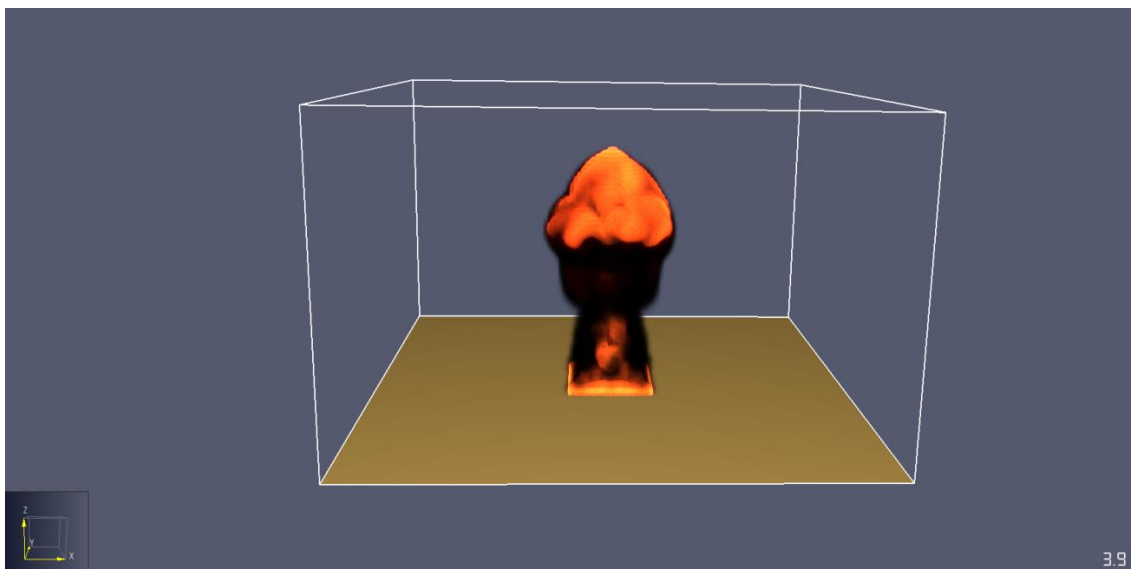
2.5 pav. Energijos atidavimo greičio grafikas, gautas su FDS programa

Gaisro proceso vizualizavimas

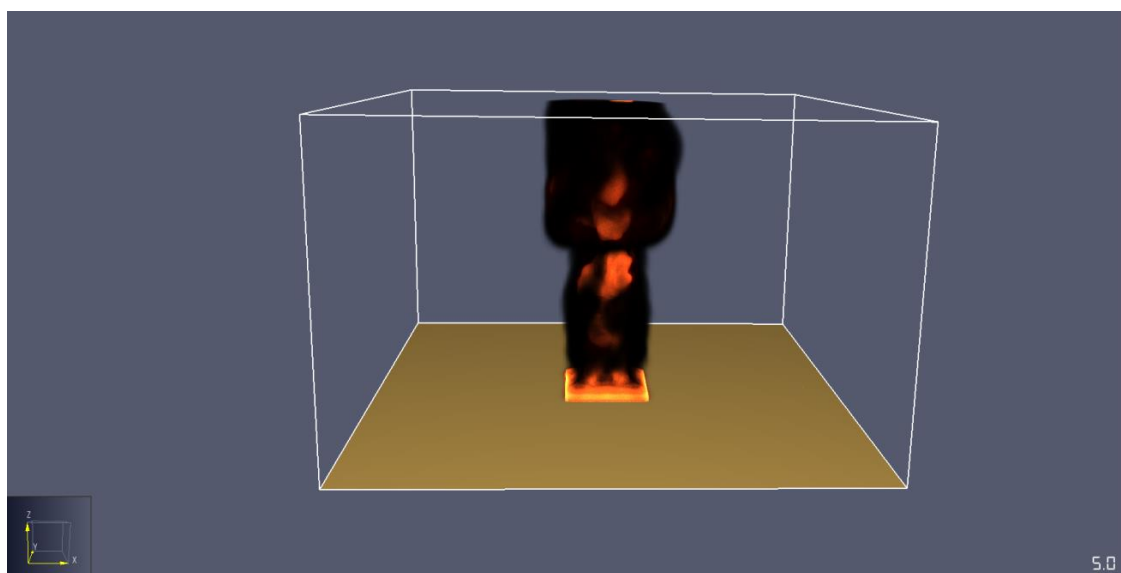
Suformavus FDS programos modelį buvo atliktas skaičiavimas, skaitiniu būdu imituojantis telkininį toluolo gaisrą. Šios programos rezultatai yra vizualizuojami su programa SMOKEVIEW. Vizualizavimas atliekamas imituojant video filmą ir šio filmo kadrai yra pateikti 2.6 pav. Jie vaizduoja gaisro būklę laiko momentais 2.1 s, 3.9 s, ... , 600 s. Gaisro vaizdas laiko tarpsnyje 5 – 600 s keičiasi mažai, tai grafiškai liudija, kad gaisras vyksta energiją atiduodant vienodu greičiu. Iki laiko momento 5 s vyko liepsnos kilimas be dūmų išsiskyrimo. Tačiau šis pradinis laiko tarpsnis buvo labai trumpas ir didesnės įtakos galimiems taikiniams neturės.



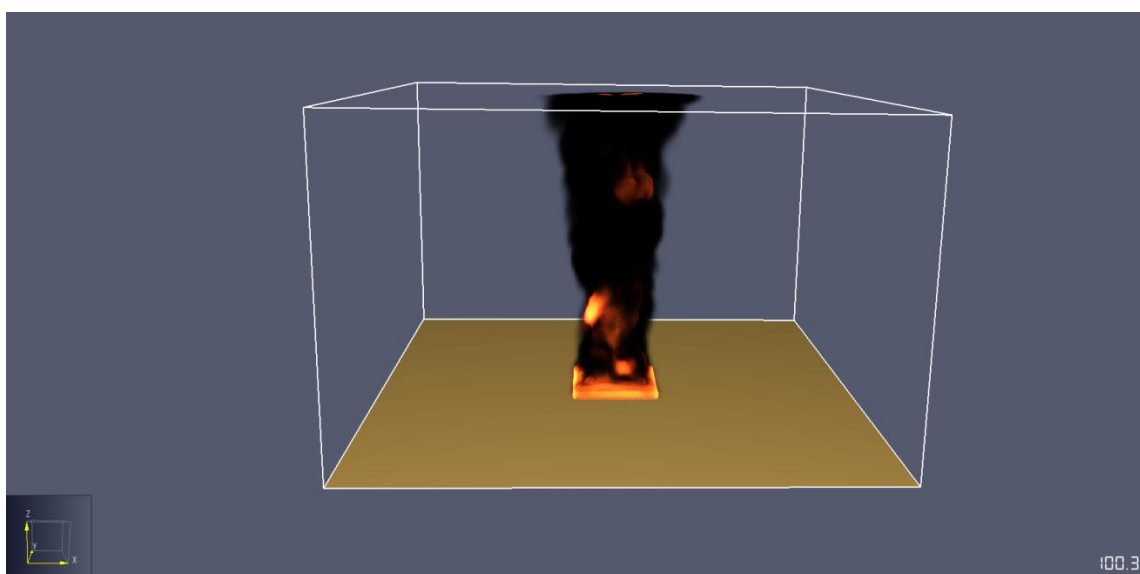
2.6 pav. Toluolo telkinio gaisro vizualizavimas su SMOKEVIEW programa: a) gaisro padėtis 2,1 s;



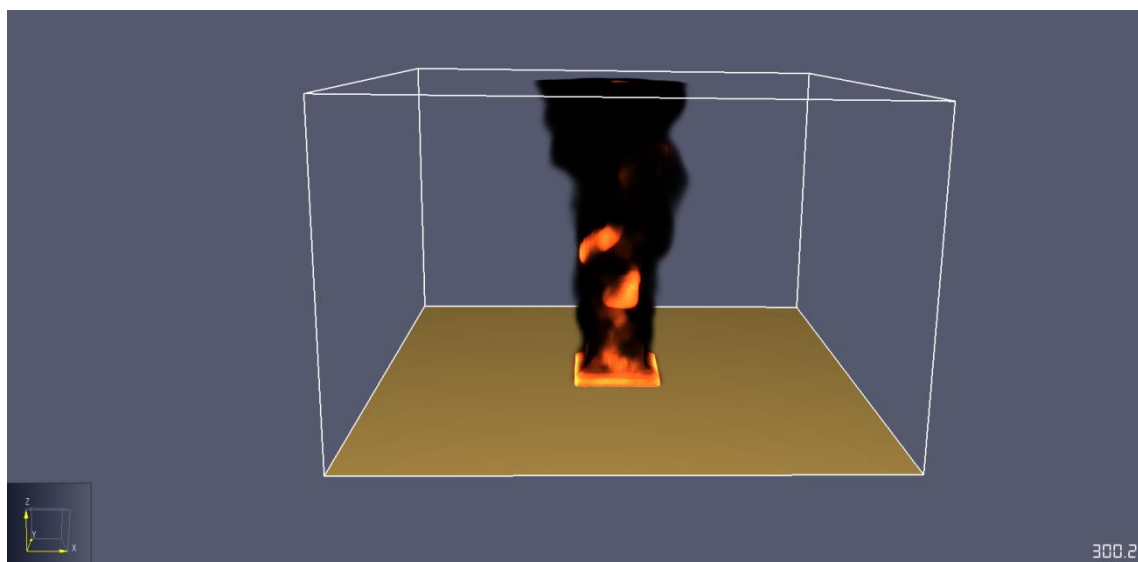
b) gaisro padētis 3,9 s;



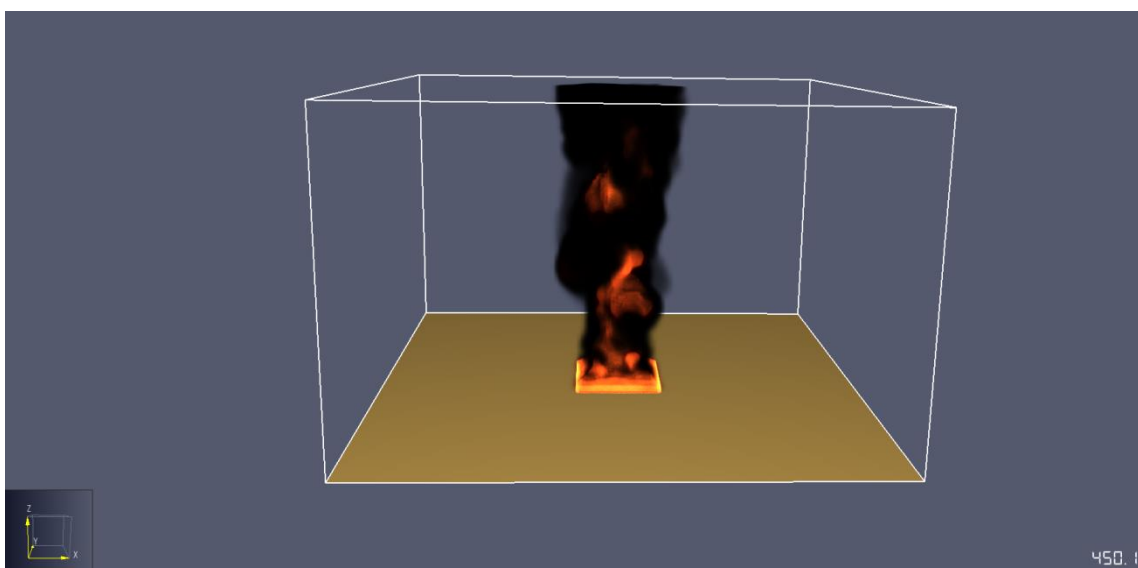
c) gaisro padētis 5,0 s;



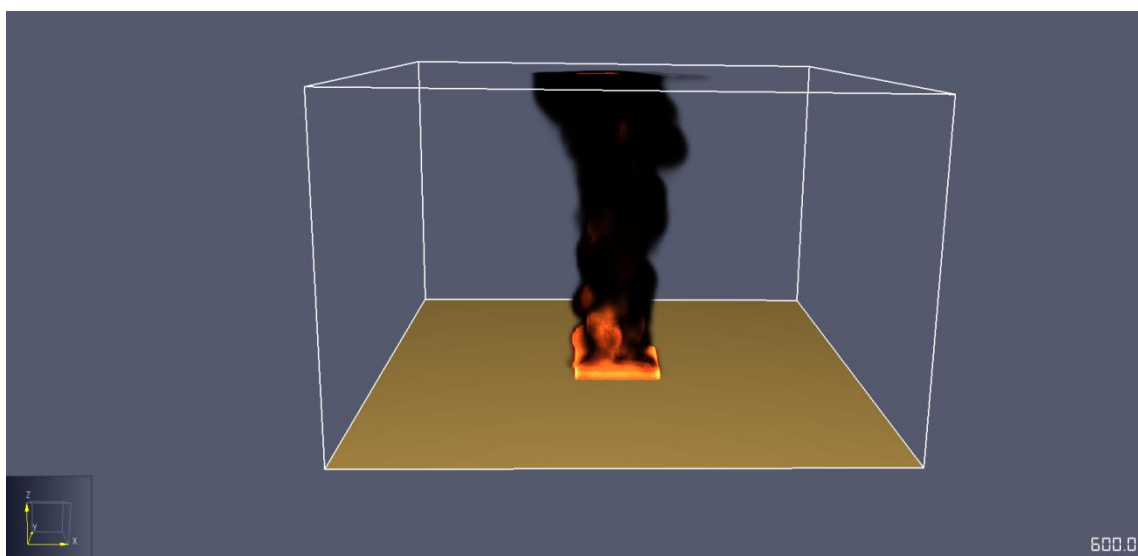
d) gaisro padētis 100 s;



e) gaisro padēti 300 s;



f) gaisro padētis 450 s;



g) gaisro padēti 600 s.

Modeliavimo rezultatai

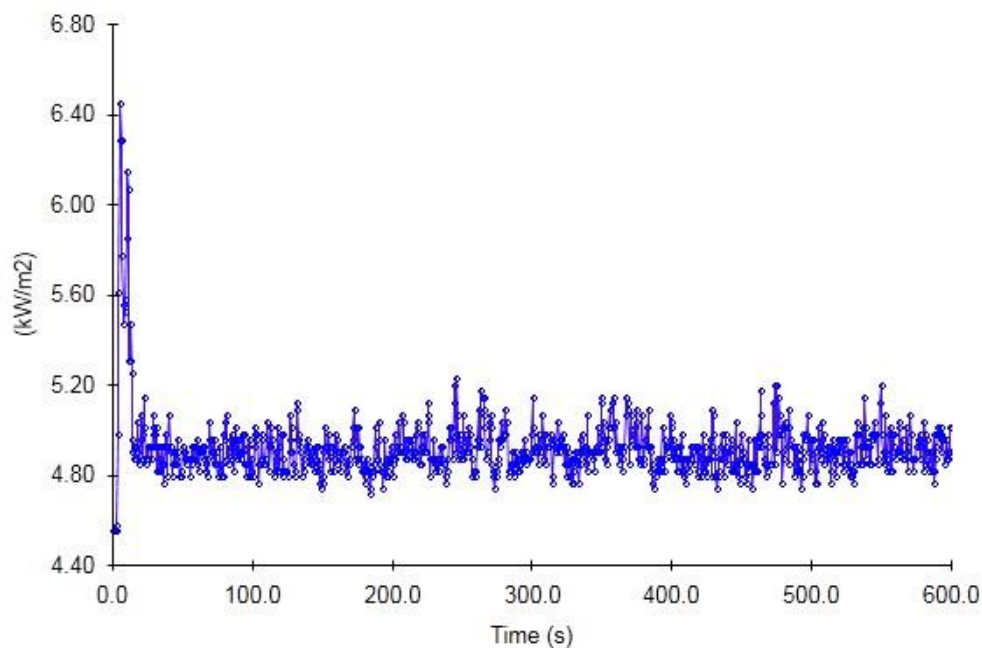
Pagrindinis skaitinio gaisro modeliavimo rezultatas yra šiluminė spinduliuotė, užfiksuota 2.7 pav. Ji imituoja taikinį, kuris buvo nustatytas spinduliuotę skaičiuojant inžineriniais metodais (2.1 pav.). Termoporos padėtis buvo parinkta taip, kad atitiktų šio taikinio padėtį gaisro atžvilgiu. FDS programos rezultatai išvedami ne tik grafiškai, bet ir skaitiniu EXCEL laikmenų pavidalu. Laikmena, kurioje surašytos šiluminės spinduliuotės reikšmės, yra pavaizduota 2.7 pav.

Apskaičiuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės grafiškai yra pavaizduotos 2.8 pav. Šios reikšmės osciliuoja, nes tokį kintamumą turi energijos atidavimo greitis, pavaizduotas 2.5 pav. Atsakymas į klausimą, kokią spinduliuotę gauna pasirinktas taikiny, yra dvejopas. Galima apskaičiuoti osciliuojančių spinduliuotės reikšmių vidurkius arba, atsargos dėlei, konservatyviai aukštą šių reikšmių kvantilį. Pavyzdyje apskaičiuotas vidurkis yra lygus $4,92 \text{ kW/m}^2$, o 90 % procentilis yra $5,04 \text{ kW/m}^2$.

1	s	kW/m ²
2	Time	THCP
3	0.00E+00	1.68E+00
4	6.04E-01	1.68E+00
5	1.22E+00	1.68E+00
6	1.82E+00	1.68E+00
7	2.42E+00	1.68E+00
8	3.01E+00	1.69E+00
9	3.61E+00	1.84E+00
10	4.21E+00	2.07E+00
11	4.81E+00	2.32E+00
12	5.40E+00	2.38E+00
13	6.00E+00	2.32E+00
14	6.61E+00	2.13E+00
15	7.21E+00	2.05E+00
16	7.80E+00	2.02E+00
17	8.41E+00	2.04E+00
18	9.00E+00	2.06E+00
19	9.60E+00	2.16E+00
20	1.02E+01	2.27E+00
21	1.08E+01	2.24E+00
22	1.14E+01	1.96E+00
23	1.20E+01	1.96E+00
24	1.26E+01	2.02E+00
25	1.32E+01	1.94E+00
26	1.38E+01	1.81E+00
27	1.44E+01	1.83E+00
28	1.50E+01	1.80E+00
29	1.56E+01	1.82E+00
30	1.62E+01	1.80E+00
31	1.68E+01	1.82E+00
32	1.74E+01	1.81E+00
33	1.80E+01	1.86E+00
34	1.86E+01	1.79E+00
35	1.92E+01	1.79E+00
36	1.98E+01	1.83E+00
37	2.04E+01	1.87E+00
38	2.10E+01	1.80E+00
39	2.16E+01	1.84E+00
40	2.22E+01	1.90E+00

	1	2
	t	q
1	0.00E-01	1.68E+00
2	6.04E-01	1.68E+00
3	1.22E+00	1.68E+00
4	1.82E+00	1.68E+00
5	2.42E+00	1.68E+00
6	3.01E+00	1.69E+00
7	3.61E+00	1.84E+00
8	4.21E+00	2.07E+00
9	4.81E+00	2.32E+00
10	5.40E+00	2.38E+00
11	6.00E+00	2.32E+00
12	6.61E+00	2.13E+00
13	7.21E+00	2.05E+00
14	7.80E+00	2.02E+00
15	8.41E+00	2.04E+00
16	9.00E+00	2.06E+00
17	9.60E+00	2.16E+00
18	1.02E+01	2.27E+00
19	1.08E+01	2.24E+00
20	1.14E+01	1.96E+00
21	1.20E+01	1.96E+00
22	1.26E+01	2.02E+00
23	1.32E+01	1.94E+00
24	1.38E+01	1.81E+00
25	1.44E+01	1.83E+00
26	1.50E+01	1.80E+00
27	1.56E+01	1.82E+00
28	1.62E+01	1.80E+00
29	1.68E+01	1.82E+00
30	1.74E+01	1.81E+00
31	1.80E+01	1.86E+00
32	1.86E+01	1.79E+00
33	1.92E+01	1.79E+00
34	1.98E+01	1.83E+00
35	2.04E+01	1.87E+00
36	2.10E+01	1.80E+00
37	2.16E+01	1.84E+00
38	2.22E+01	1.90E+00
39	2.28E+01	1.85E+00
40	2.34E+01	1.79E+00

2.7 pav. EXCEL ir STATISTICA laikmenų fragmentai, kuriuose matomos šiluminės spinduliuotės reikšmės (kW/m^2), apskaičiuotos su FDS programa



2.8 pav. Šiluminės spinduliuotės reikšmės, užfiksuotos virtualios termoporos, pavaizduotos 2.2 pav.

2.1.4. Skaičiavimo rezultatų palyginimas

Šiame poskyryje spręstas uždavinys leido įvertinti toluolo telkinio gaisro spinduliuotę, taikant tiek inžinerinį, tiek skaitinį metodus. Gautos reikšmės, išreikštos kW/m^2 , svyruoja nuo $3,16 \text{ kW/m}^2$ iki $5,18 \text{ kW/m}^2$. Skaitiniu būdu apskaičiuotos spinduliuotės reikšmės osciliuoja (2.8 pav.). Todėl rezultatą gali atspindėti jų vidurkis, lygus $4,92 \text{ kW/m}^2$, ir 90 % procentilis, kurio reikšmė yra $5,04 \text{ kW/m}^2$.

Gauta, kad inžineriniais metodais apskaičiuotos reikšmės apytikriai atitinka skaitiniu metodu gautą reikšmę. Skirtumas yra nežymus, tačiau skaičiavimo sąnaudos labai skiriasi.

Inžineriniai metodai praktiškai reikalauja minimalių sąnaudų, o skaičiavimas FDS programa su kelių branduolių kompiuteriu truko keliolika valandų. Tačiau šį rezultatą reikėtų laikyti FDS programos patikrinimu, nes inžineriniai metodai leidžia vertinti tik apskritų telkinių gaisro spinduliuotę. Skaitinis metodas tinka bet kokios formos telkinio gaisro spinduliuotei vertinti.

2.2. Telkininio gaisro modeliavimas esant netaisyklingos formos telkiniui

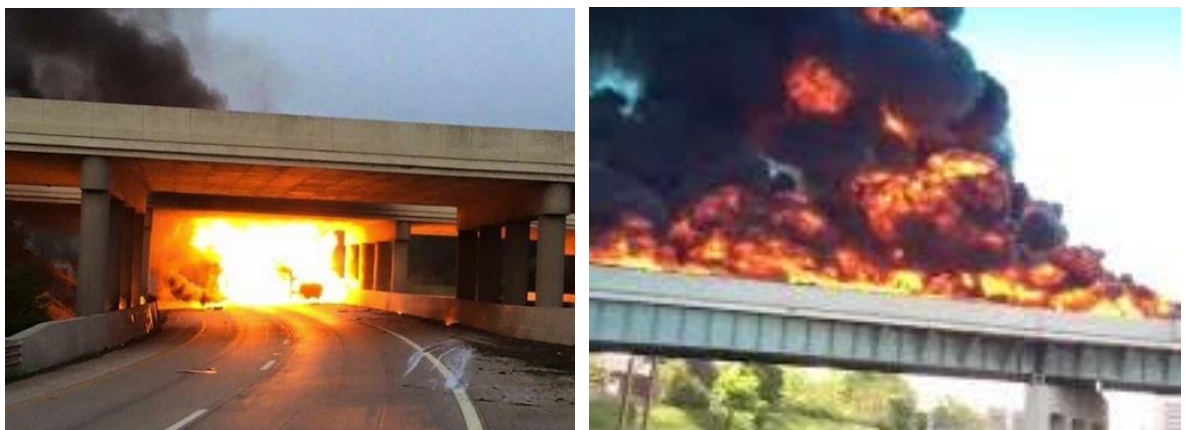
2.2.1. Gaisrai su netaisyklingos formos telkiniais

Telkininio gaisro aplinkybės gali būti įvairios galimos telkinio formos susidarymo požiūriu. Ji priklausys pirmiausiai nuo nuotėkio vietos reljefo. Telkinys gali susidaryti nuotėkiui įvykus tokioje vietoje, kuri lems apskritimu idealizuoti tinkamą telkinio formą. Spinduliuotę tada bus galima prognozuoti 1.3 poskyryje aprašytais metodais. Tačiau nuotėkio vietos reljefas gali būti gana netaisyklingas ir telkinys bus sudėtingesnės formos.

Netaisyklingos formos telkinį idealizuoti apskritimu ne visada bus galima. Tokį telkinį lemiančio reljefo pavyzdys dažnai būna kelio paviršiaus arba šalikelės plotas, kuriame įvyksta nuotėkis iš kurą vežančios transporto priemonės (2.9 pav.). Jeigu toks nuotėkis įvyksta greta transporto infrastruktūros objekto arba ant jo, nuotėkis gali suformuoti netaisyklingos formos telkinį, kurio gaisras tą objektą gali stipriai pažeisti (2.10 pav.). Transporto statinių reljefas ir nuotėkio iš transporto priemonių pobūdis gali nulemti telkinio formą, kuri yra labai tolima nuo apskritimo. Tokie nuotėkiai retkarčiais įvyksta ir tai kelia būtinybę prognozuoti jų sukeltamų gaisrų spinduliuotę. Kitaip tariant, kyla būtinybė vertinti netaisyklingos formos telkinių gaisrų spinduliuotę.



2.9 pav. Degaus karšto bitumo telkinys, susidaręs apirtus automobilinei cisternai ir ją pramušus (TV3.lt, žr. B priedą)



2.10 pav. Nuotėkio iš automobilinės cisternos sukeltas gaisras, įvykęs po transporto priemonės viaduku (kairėje) ir ant transporto priemonės viaduko (dešinėje) (Construction Equipment Guide, WVUA23, žr. B priedą)

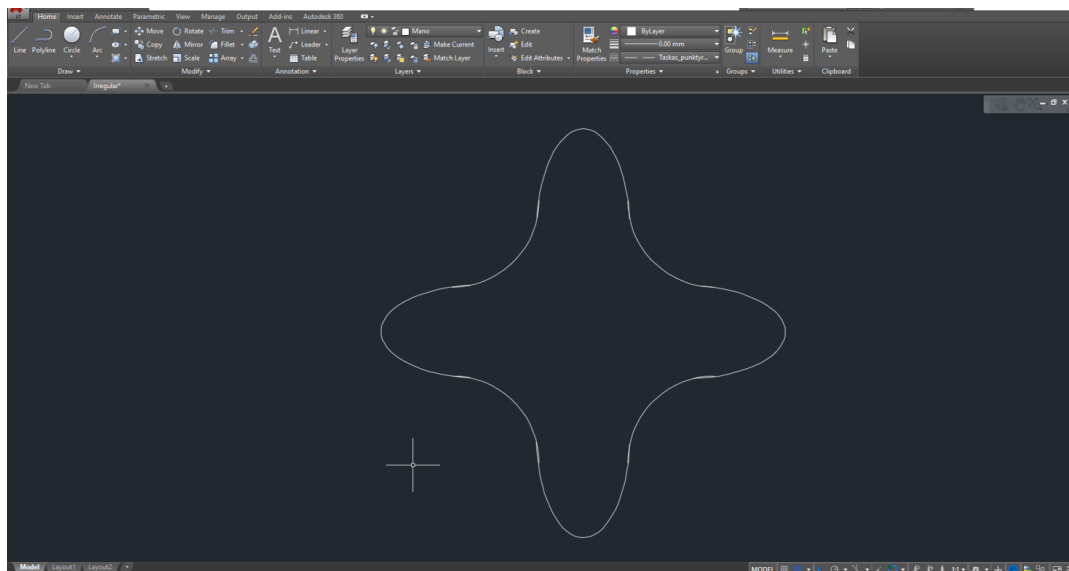


2.11 pav. Transporto avarija, įvykusi 2012 m. JAV, kurios metu cisterninei puspriekabei atsitrenkus į viaduko atramą išteko 32 m³ žaliavinės naftos ir susidarė degus netaisyklingos formos telkinys (mySA, žr. B priedą)

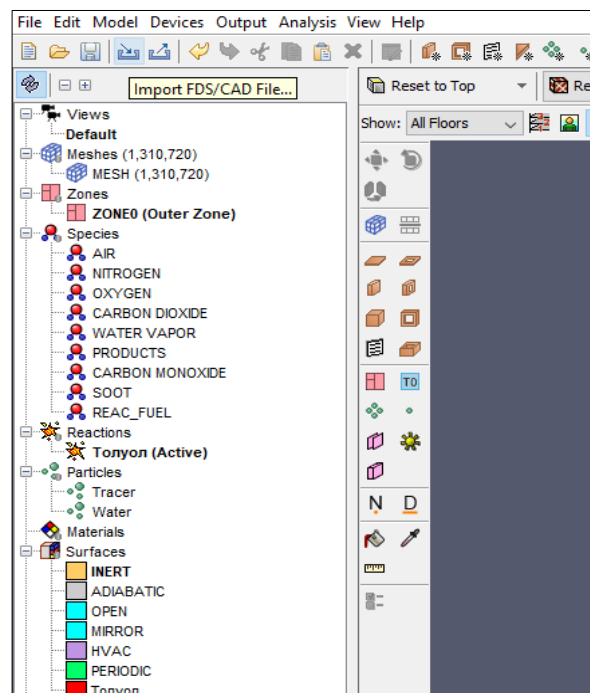
2.2.2. *Galimybė modeliuoti netaisyklingos formos telkinio gaisrą*

Prognozuoti netaisyklingos formos telkinio gaisro spinduliuotei tinka CFD modeliavimas. Dažniausiai jis bus bene vienintelė galimybė tokiai prognozei atlikti. Jau minėta, kad šiame darbe naudojama FDS programa automatiškai leidžia pasirinkti tik stačiakampės formos kuro objektus. Tačiau yra galimybė degantį objektą formuoti bet kokios formos. Ją atveria FDS programos sąsaja su tokiomis projektavimo programomis, kaip „AUTOCAD“.

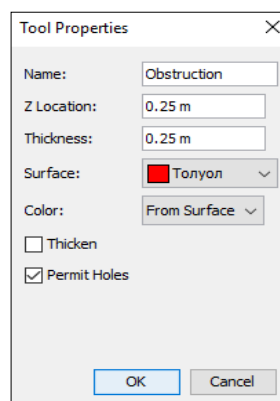
Su „AUTOCAD“ programa sudaromas norimos formos telkinys (pvz., 2.12 pav.). Tuomet naudojantis FDS programos komandų eilutės „Import CAD Files“ mygtuku brėžinys sukurtas „AUTOCAD“ programa perkiamas į pasirenkamą modeliavimo tinklėlio plokštumą (2.13 pav.). Prieš parenkant gaisro židinį „Tool Properties“ lange pažymima, kokia medžiaga sudarys formuojamą telkinį (2.14 pav.). Modeliavimo tinklėlyje įkeltos „AUTOCAD“ formos kontūras apvedamas, siekiant suformuoti FDS programos atpažįstamą degantį objektą (2.15 pav.).



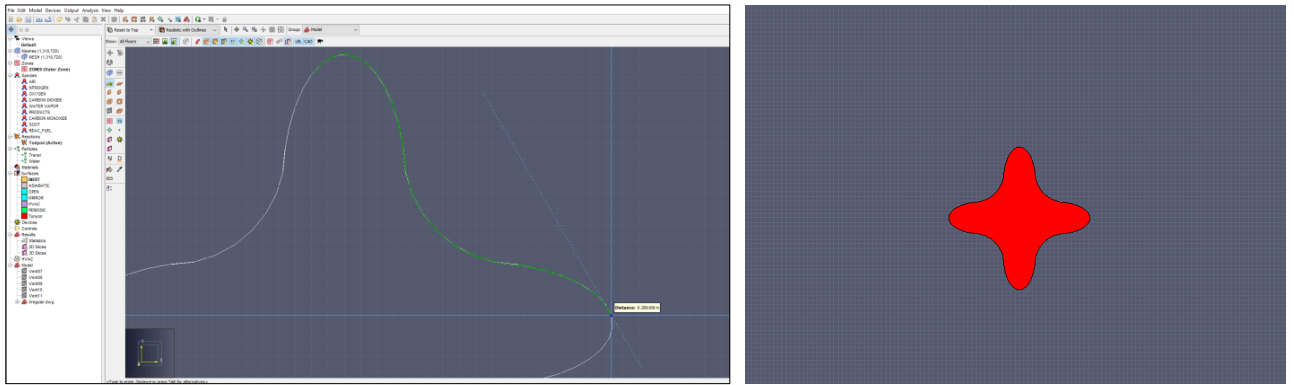
2.12 pav. „AUTOCAD“ programos langas su norimos formos telkinio kontūru



2.13 pav. FDS programos komandų eilutės „Import CAD Files“ mygtuko aktyvavimas



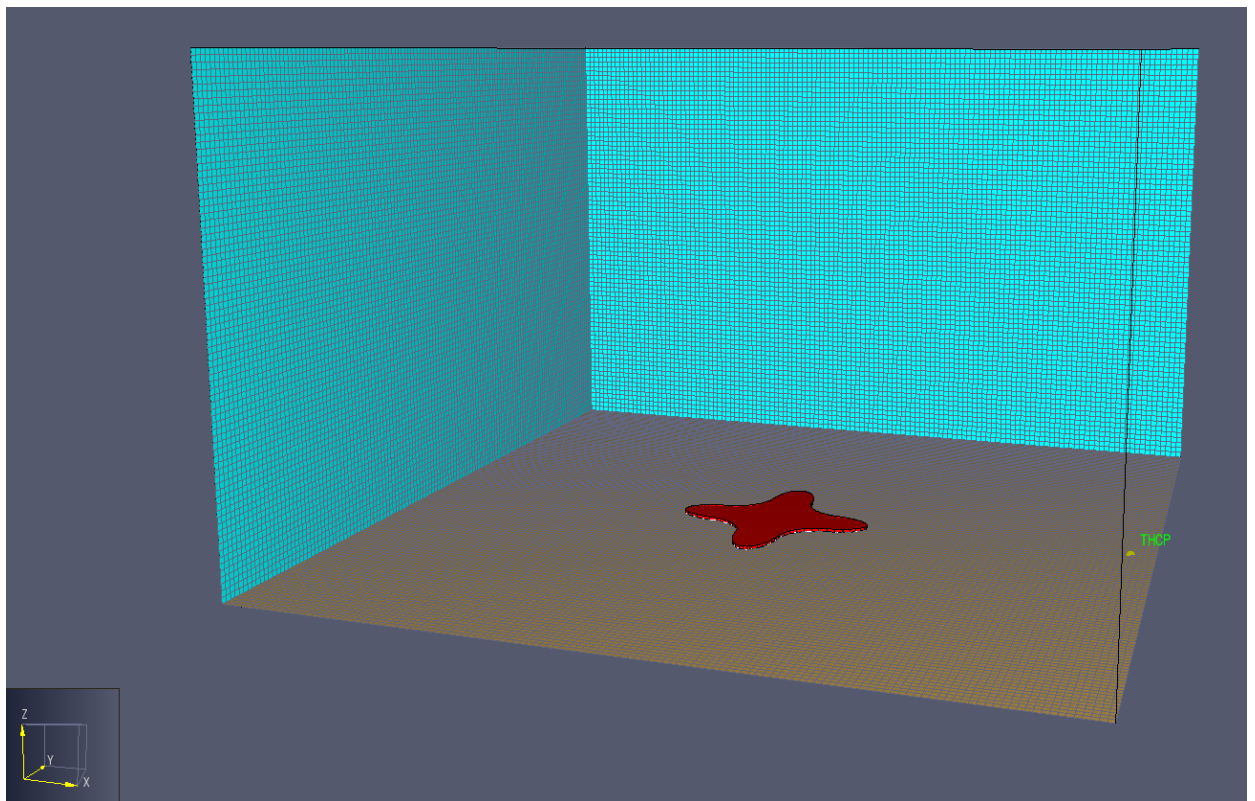
2.14 pav. „Tool Properties“ langas



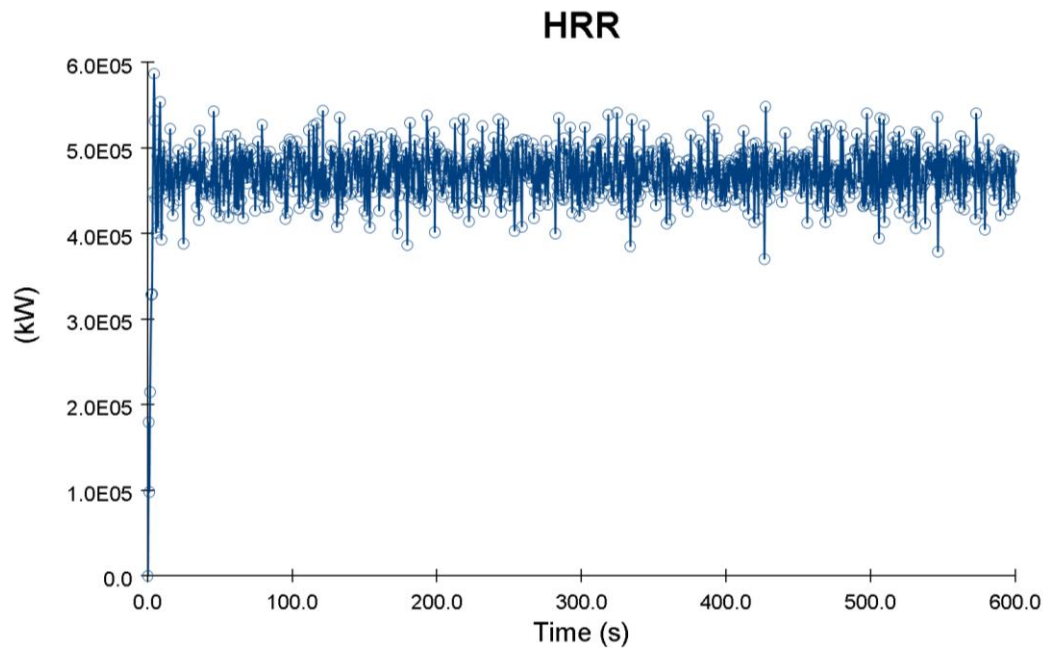
2.15 pav. FDS programos langas, kuriame modeliujama telkinio forma (kairėje) ir vaizduojamas telkinio sudarymo rezultatas (dešinėje)

2.2.3. Modeliavimo pavyzdys

Aprašyta netaisyklingos formos telkinio modeliavimo procedūra toliau bus iliustruota skaičiavimo pavyzdžiu. Telkininis gaisras buvo modeliuojamas su FDS programa. Degantis telkinys buvo keturkampės žvaigždės formos (2.16 pav.). Šio degančio objekto įkėlimas iš „AUTOCAD“ programos į FDS programą yra aprašytas ankstesniame poskyryje (2.15 pav.). Modeliuojant buvo laikoma, kad žvaigždės formos telkinį sudarys toluolas. Šiai medžiagai FDS programos generuotos osciliuojančios HRR reikšmės yra pavaizduotos 2.17 pav.



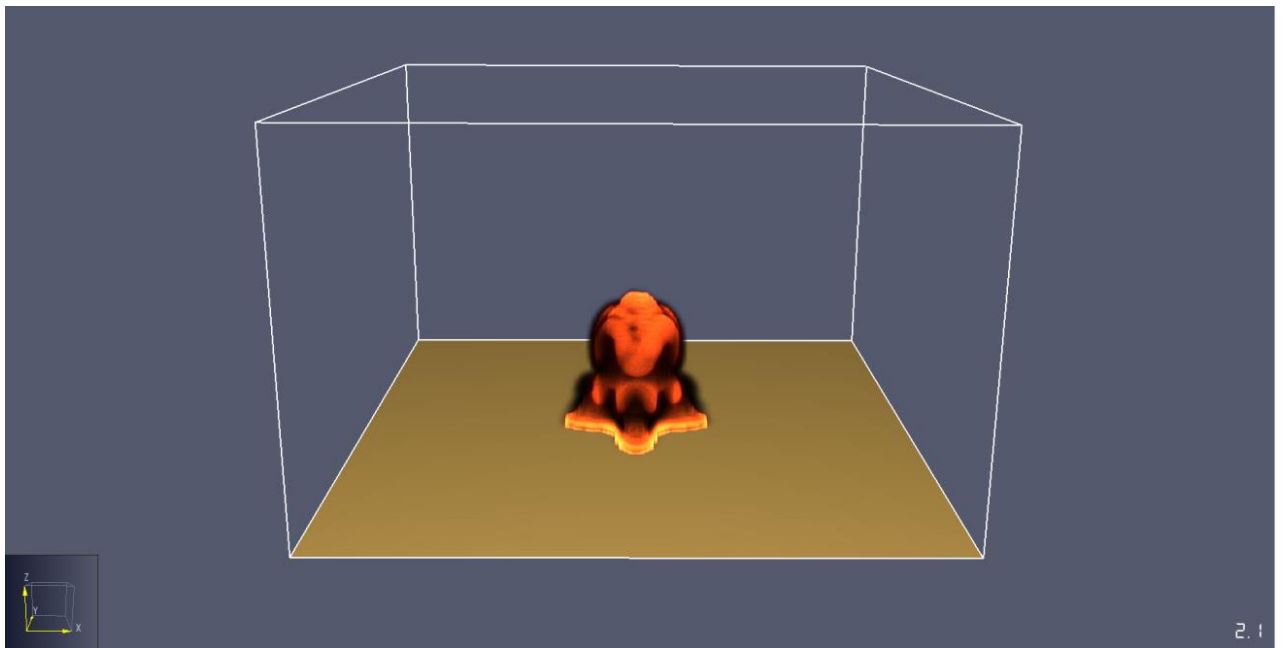
2.16 pav. FDS programos tinklėlis su netaisyklingos formos kuru



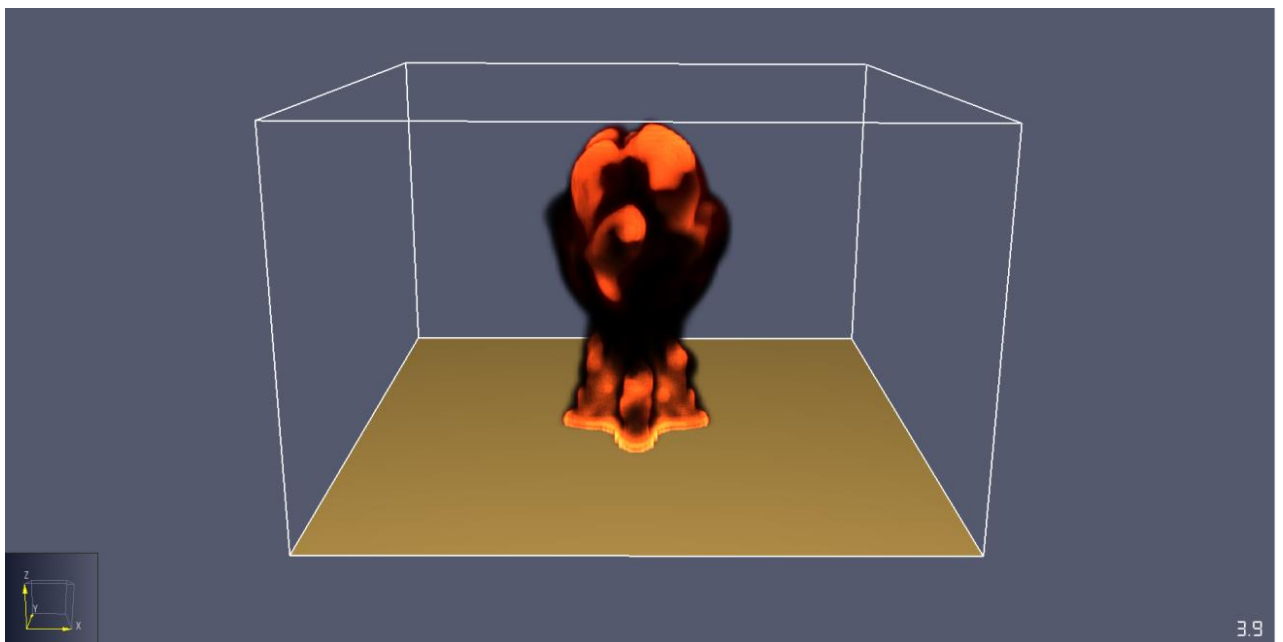
2.17 pav. Energijos atidavimo greičio grafikas, gautas su FDS programa

Sprendžiant šį pavyzdį siekta, kad netaisyklingos formos telkinio plotas būtų maždaug lygus telkinių, nagrinėtų 2.1 poskyrio pavyzdžiuose, plotams. Netaisyklingos formos telkinio plotas buvo tik šiek tiek mažesnis už anksčiau minėtus plotus. Todėl HRR reikšmės, pavaizduotos 2. 17 pav. yra kiek mažesnės už 2.5 pav. pavaizduotas reikšmes. Modeliuoto gaisro vystymasis pačioje jo pradžioje ir paskutinę modeliavimo sekundę yra vizualizuotas 2.18 pav. Mus dominantis modeliavimo rezultatas buvo šiluminė spinduliuotė užfiksuota termoporos, išdėstytos apatiniam tinklelio kampe (2.16 pav.). Termoporos padėtis tokia pati, kaip ir 2.1.3 skyrelyje nagrinėtame pavyzdyje 2.2 pav.

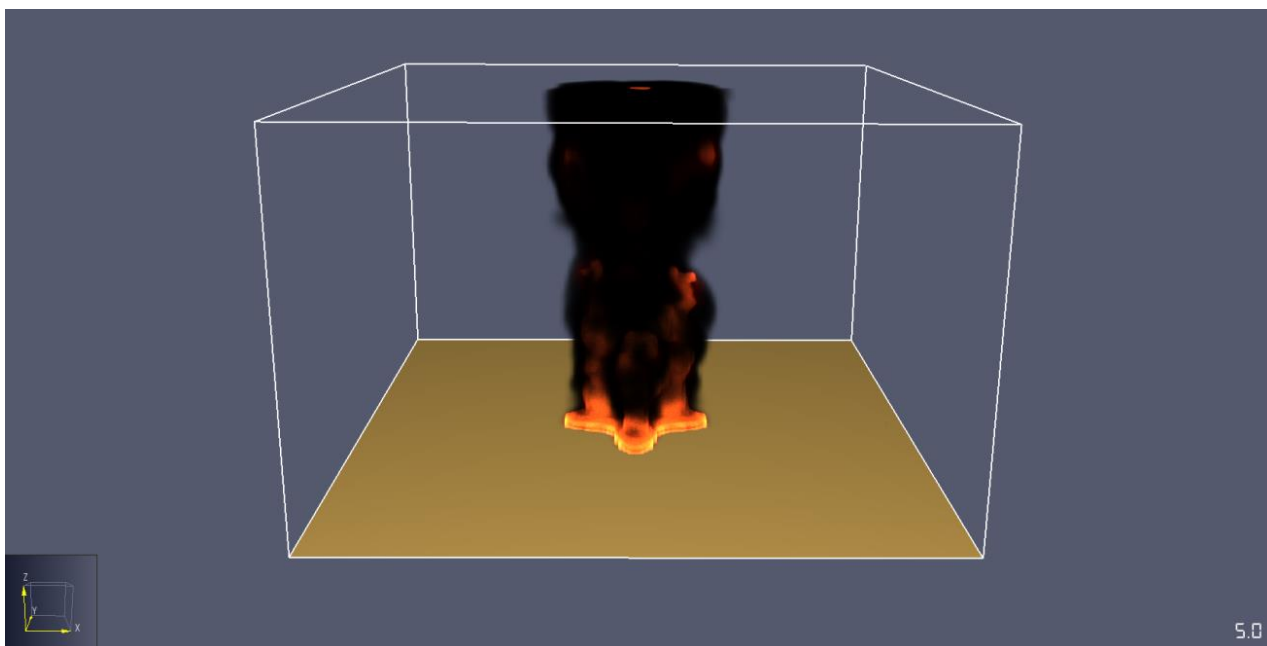
Modeliavimo rezultatas yra osciliuojančių šiluminės spinduliuotės reikšmių grafikas, pavaizduotas 2.19 pav. Gautas spinduliuotės reikšmių vidurkis yra $5,31 \text{ kW/m}^2$, o 90 % procentilis yra $5,47 \text{ kW/m}^2$. Gautoji reikšmė yra šiek tiek mažesnė už 2.1.3 skyrelyje nagrinėto pavyzdžio reikšmę. Tai galima aiškinti tuo, kad žvaigždės formos telkinio plotas buvo mažesnis už stačiakampio telkinio plotą. Kita vertus, tai galima aiškinti ir tuo, kad degantis žvaigždės formos telkinys spinduliuotę galėjo paskirstyti kitaip nei stačiakampis telkinys.



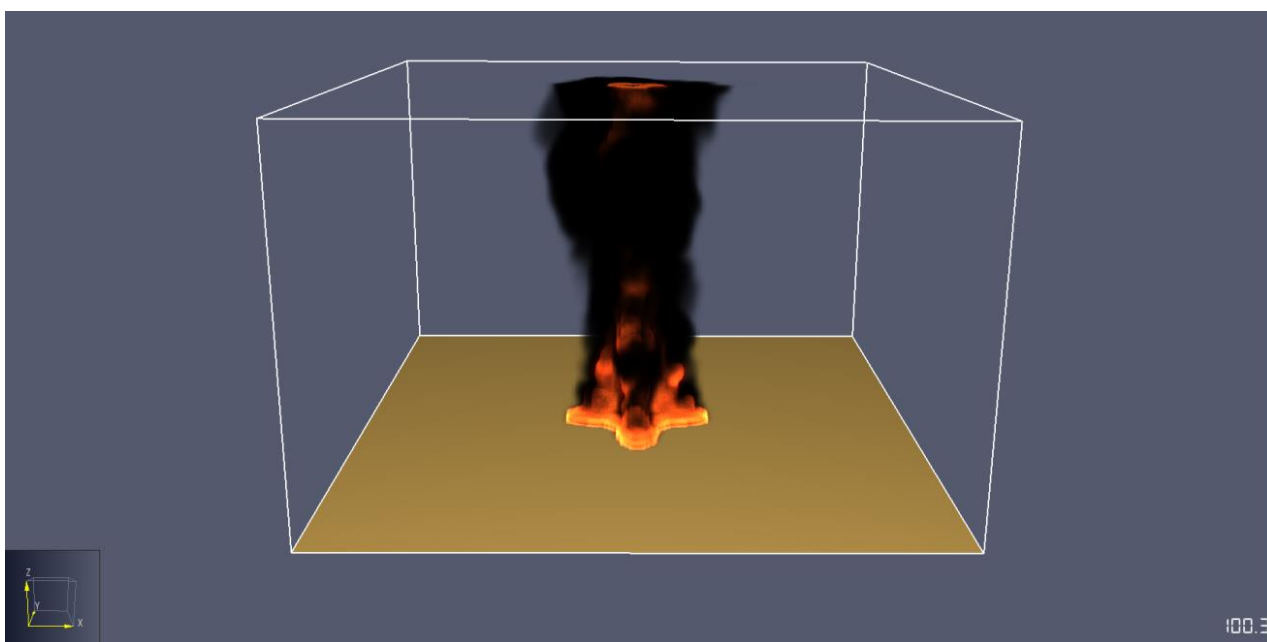
2.18 pav. Netaisyklingos formos toluolo telkinio gaisro vizualizavimas su SMOKEVIEW programa: a)
 gaisro padėtis 2,1 s;



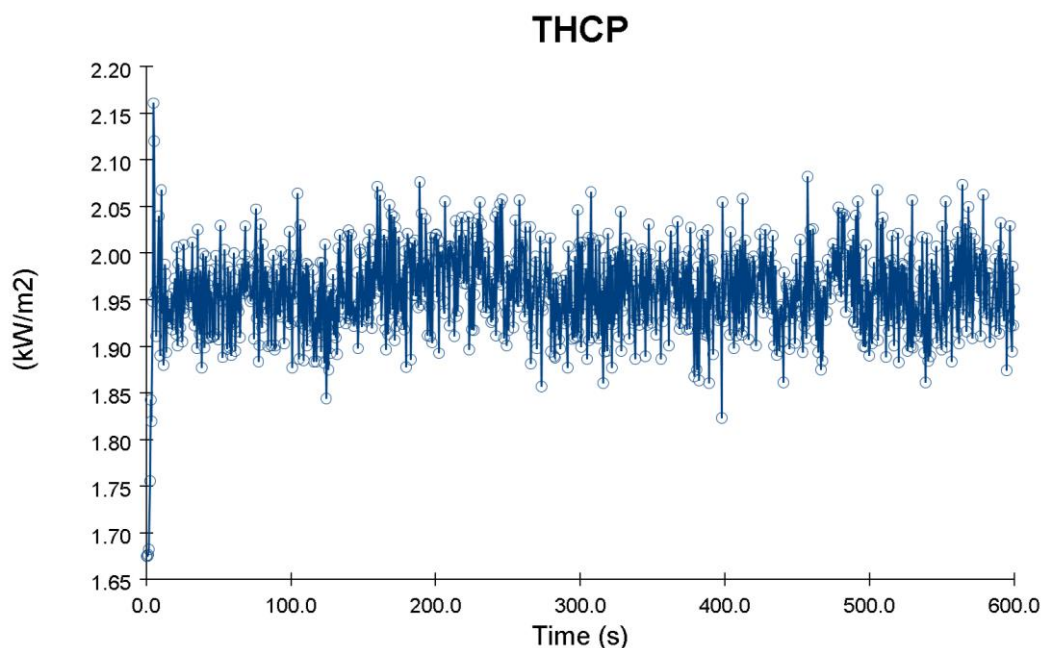
b) gaisro padėtis 3,9 s;



c) gaisro padētis 5,0 s;



d) gaisro padētis 100 s;



2.19 pav. Šiluminės spinduliuotės reikšmės, užfiksuotos virtualios termoporos

2.3. Telkininio gaisro modeliavimas iš dalies uždaroje erdvėje

2.3.1. Modeliavimo būtinybė

Telkiniai gaisrai gali vykti ir dalinai uždaroje erdvėje, kur yra įmanomas greitesnis arba lėtesnis gaisro ventiliavimas. Statybiniai tokių erdvių pavyzdžiai yra tuneliai ir erdvės po transporto statiniais: erdvės po tiltais ir viadukais, erdvės tarp žemės ir transporto estakadų bei erdvės tarp įvairaus lygio estakadų. Telkininio gaisro pastarojoje erdvėje pavyzdys buvo 2007 m. įvykęs automobilinės cisternos (benzovežio) gaisras, vykęs transporto mazge ties JAV Oklendo miestu (Quiel *et al.*, 2015). Šiame mazge jungėsi trys autostrados (2.20 pav.). Gaisras vyko benzovežiui užsidegus tarp dviejų skirtingo lygio estakadų. Gaisro poveikis pažeidė estakadų konstrukcijas ir jos nugriuvo (2.21 pav.). Gaisro nuostoliai buvo 9 mln. JAV dolerių, išleistų estakados remontui, ir 6 mln. dolerių ekonominių nuostolių per dieną (Garlock *et al.*, 2012). Paprastesnis telkininio gaisro, vykusio transporto infrastruktūroje pavyzdys buvo 2002 m. įvykęs benzovežio gaisras po metaliniu viaduku Birmingemo mieste, esančiame JAV Alabamos valstijoje (Alos-Moya *et al.*, 2014). Degė cisterninė pusprickabė ir jos skleidžiamas spinduliuotė stipriai pažeidė viaduko sijas (2.22 pav.).

Telkininiai gaisrai po transporto statiniais gali vykti tiek degant pačiai cisternai, tiek greta esančiam išsipilusiam kurui (2.23 pav.). Tokiems gaisrams bus būdingos dvi savybės: telkinio forma bus nereguliari arba primenanti cisternos planą, gaisras vyks pusiau uždaroje erdvėje. Klasikiniai, inžineriniai telkininių gaisrų spinduliuotės vertinimo metodai tokiems gaisrams modeliuoti netinka. Pasikliauti teks CFD metodu. Norint ištirti šio metodo tinkamumą dalinai uždaram gaisrui modeliuoti buvo išspręstas toliau aprašytas pavyzdys. Jis išplečia 2.1.3 skyrelyje aprašytą skaičiavimo pavyzdį.



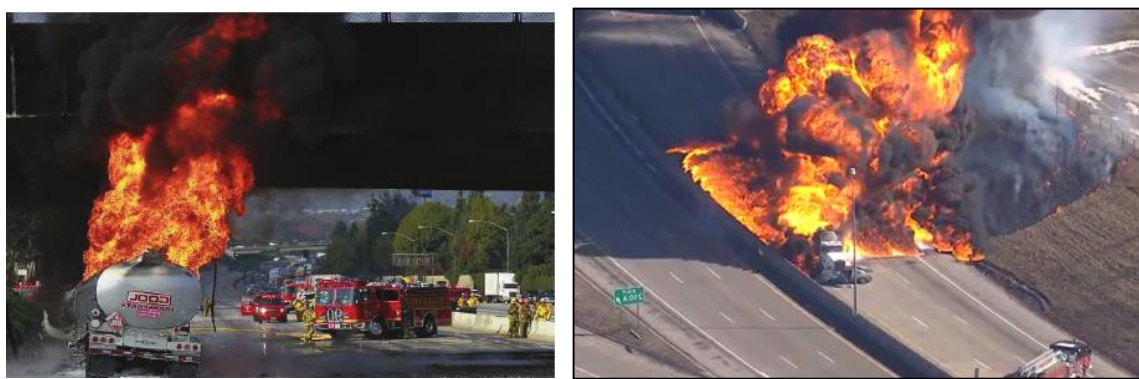
2.20 pav. Transporto mazgas tie JAV Oklendo miestą, kuriame susieina trys autostrados (MacArthur Maze, žr. B priedą)



2.21 pav. Transporto mazgas tie JAV Oklendo miestą ir benzovežio gaisro tarp transporto estakadų padariniai (Quiel *et al.*, 2015)



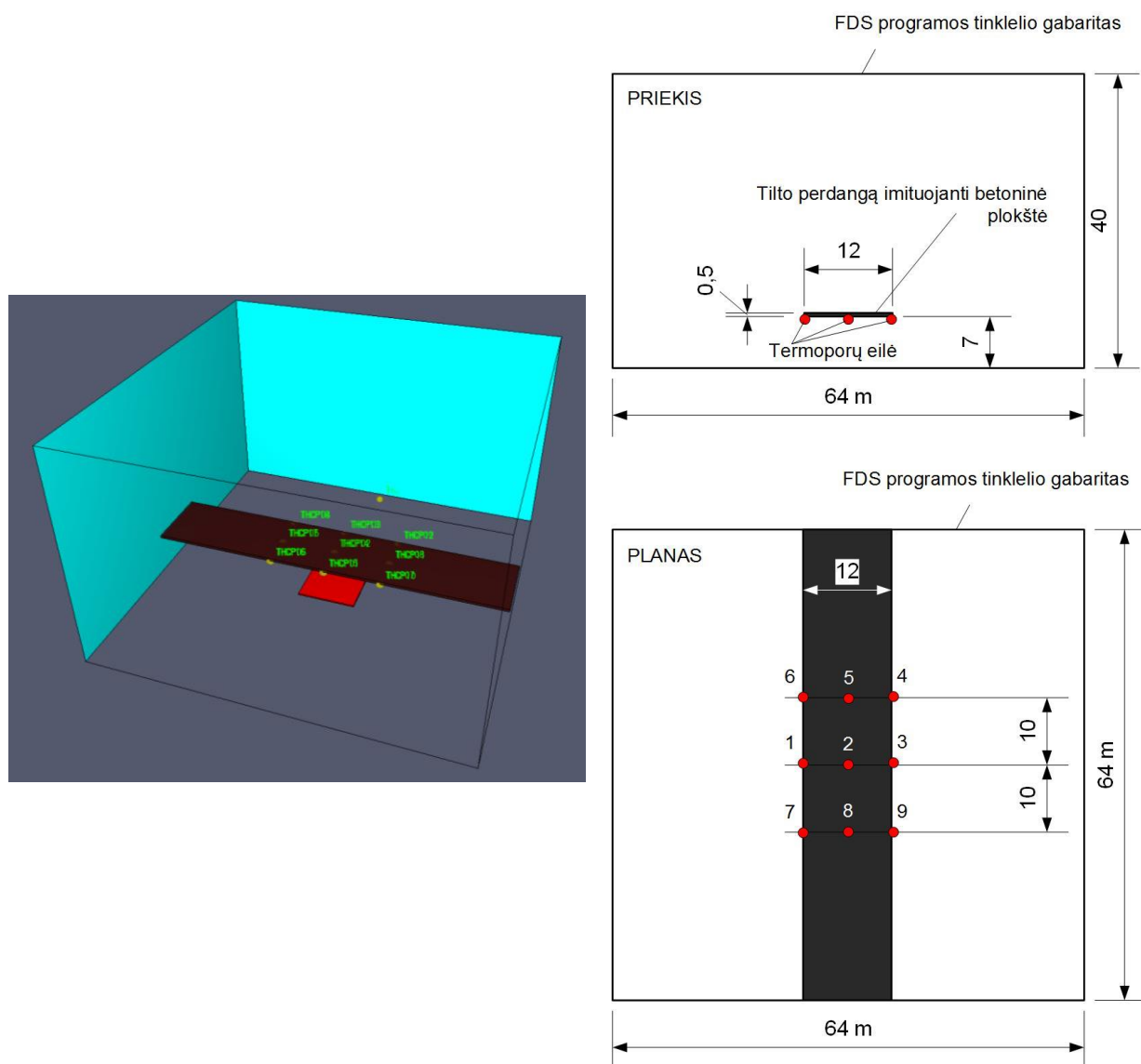
2.22 pav. Benzovežio gaisro po viaduku su plieninėmis perdangos sijomis padariniai (Alos-Moya *et al.*, 2014)



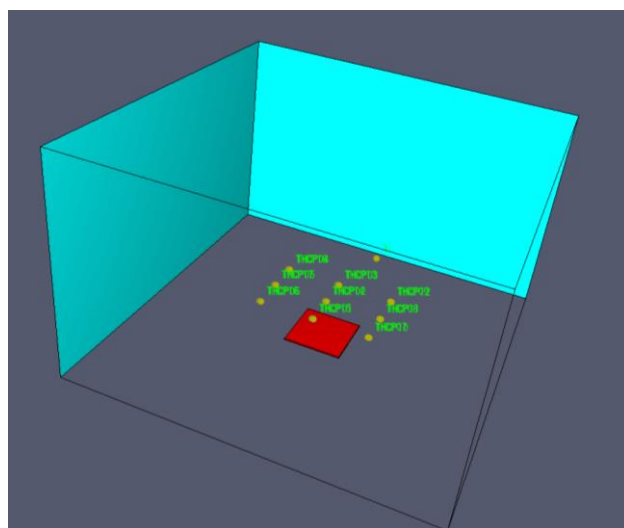
2.23 pav. Cisterninės priekabos gaisras ties viaduku (nuotrauka kairėje) ir cisterninės puspriekabės gaisras, vykęs degant tiek cisternai, tiek greta išsipyliusiui kurui (EGP ir Fuel Tanker on Fire on I-94 in Metro Detroit, žr. B priedą)

2.3.2. Modeliavimo pavyzdys

Anksčiau aprašytuose pavyzdžiuose gaisras buvo modeliuojamas sudarant erdvinį tinklą, kuris imitavo atvirą erdvę (2.1.3 ir 2.2.3 sk.). Toks modeliavimas leidžia palyginti kompiuteriu atliekamus skaičiavimus su „rankinio“ skaičiavimo rezultatais (2.1.2 sk.). Tačiau „rankinis“ skaičiavimas neleidžia prognozuoti telkinio gaisro spinduliuotės dalinai uždaroje erdvėje, pvz., erdvėje po tiltu arba tunelyje. Pasitelkiant gaisro modeliavimą kompiuteriu tokią erdvę galima nesunkiai imituoti. Šiame skyrelyje yra išspręstas uždavinys, kai į 2.1.3 ir 2.2.3 sk. naudotą erdvinį tinklą buvo integruota betoninė plokštė, kuri imitavo tilto perdangą (2.24 pav.). Betoninės plokštės apačioje buvo išdėstytos devynios termoporos temperatūrai fiksuoti ir devynios termoporos šiluminei spinduliuotei fiksuoti. Siekiant palyginti, kokią įtaką temperatūroms ir spinduliuotėms turės plokštės integravimas į gaisro erdvę, papildomai atliktas modeliavimas be šios plokštės. Pastarajame modeliavime naudotos tos pačios vietose išdėstytos temperatūros ir spinduliuotės termoporos (2.25 pav.).



2.24 pav. FDS programos tinklėlis su juodai pavaizduotu betoniniu elementu, imituojančiu tilto perdangą ir šios programos tinklėlio schema, žiūrint iš betoninio elemento priekio ir viršaus



2.25 pav. Papildomo modeliavimo tinklėlis, kuriame nebuvo integruota betoninė plokštė, tačiau buvo naudotos tos pačios temoporos, kaip ir modeliavime su plokšte (2.24 pav.)

Modeliavimo rezultatas yra temperatūros ir šiluminės spinduliuotės reikšmės, FDS programos išsaugomos EXCEL programos laikmenose, bei šių reikšmių grafikai, automatiškai sudaromi skaičiuojant su FDS. Remiantis skaičiavimo su FDS rezultatais, kurie turi laiko sekų pavidalą, galima grafiškai atvaizduoti telkininio gaisro procesą. Grafiškai rezultatams vaizduoti yra naudojama SMOKEVIEW programa. Ją taikant sudaryti telkininio gaisro liepsnos (skaidriosios zonos) ir virš jos esančių dūmų (tamsiosios zonos) vaizdai (2.26 – 2.29 pav.). Šie grafikai atspindi gaisro padėtį 2,1 s, 3,3 s, 5,0 s ir 100 s laiko momentais. Grafikai pateikti poromis, lyginant variantus su tilto plokšte ir be jos. Akivaizdžiai matyti, kad liepsnų ir dūmų masyvo forma abiem variantams pastebimai skiriasi.

Kiekvienai iš 9 termoporų gautos temperatūros ir šiluminės spinduliuotės grafikų poros, leidžiančios vizualiai įvertinti plokštės įtaką nagrinėjamiems gaisro poveikiams. Visi 18 grafikų yra pateikti C priede. Šiame skyrelyje parodyti tik grafikai, susiję su dviem termoporomis:

1. Centrine termopora 3×3 termoporų tinklelyje, t. y., antra termopora, parodyta 2.24 pav.
2. Kampine, devinta, termopora, parodyta 2.24 pav.

Kadangi telkininio gaisro modeliavimas buvo atliktas diskretizuojant 600 s gaisro trukmę į 1001 laiko momentą, kiekvienai termoporai buvo skaičiuota po 1001 šių gaisro charakteristikų skirtumą. Temperatūra ir spinduliuotė per 600 s gaisro trukmę pastebimai svyravo. Tam svyravimui buvo būdingas atsitiktinumumas. Todėl į suskaičiuotas reikšmes galima žiūrėti kaip į statistines imtis ir lyginti jas skaičiuojant vidurkius, standartus ir t. t. Tokių imčių statistikos buvo suskaičiuotos temperatūros ir spinduliuotės reikšmėms, gautoms modeliuojant su plokšte ir be plokštės. Rezultatai pateikti 2.1 ir 2.2 lentelėse. Panagrinėjus lentelėse pateiktus skaičius, akivaizdžiai matyti, kad gaisro centre esanti 2-a termopora užfiksavo aukščiausią temperatūrą ir spinduliuotę. Be to, apskaičiuotos statistikos neblogai išreiškia ir simetriškumą vertikalios, centrinės gaisro ašies atžvilgiu. Ta ašis eina pro 2-ą termoporą ir kertasi su išilgine centrine plokštės ašimi. Tarkime, temperatūros reikšmių vidurkis apskaičiuotas 5-ai termoporai yra 50,5 °C, o vidurkis 8-ai termoporai yra 54,8 °C. Temperatūros vidurkiai 4-ai ir 6-ai termoporai yra, atitinkamai, 37,4 °C ir 41,1 °C. Santykinai nedidelius vidurkių skirtumus galima paaiškinti FDS programos algoritmo specifiška. Pagal šią programą apskaičiuotos temperatūros ir spinduliuotės reikšmės gana stipriai osciliuoja. Tai akivaizdžiai matyti, žiūrint į 2.30 ir 2.31 pav. pateiktus grafikus bei grafikus, kuriuos galima rasti C priede.

Žiūrint į 2.30 ir 2.31 pav. pateiktus grafikus, matyti, kad temperatūros ir spinduliuotės reikšmės svyruoja nevienodai, lyginant modeliavimą su plokšte ir be jos. Tikslesnį grafinį palyginimą galima gauti atimant temperatūros ir spinduliuotės reikšmes vieną iš kitos duotiesiems gaisro laiko momentams. Atėmus gauta 18 grafikų, išreiškiančių šių dviejų gaisro charakteristikų reikšmių skirtumus. Skirtumų reikšmių grafikai, susiję su visomis devyniomis termoporomis, pateikti C priede. Šio skyrelio 2.32 – 2.35 pav. pateikti skirtumų grafikai, sudaryti 2-ai ir 9-ai termoporoms.

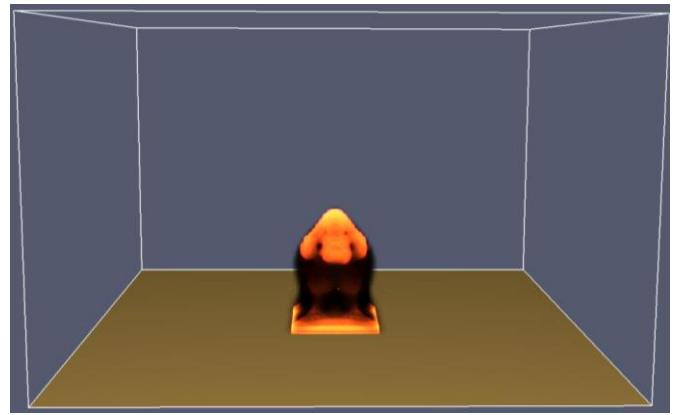
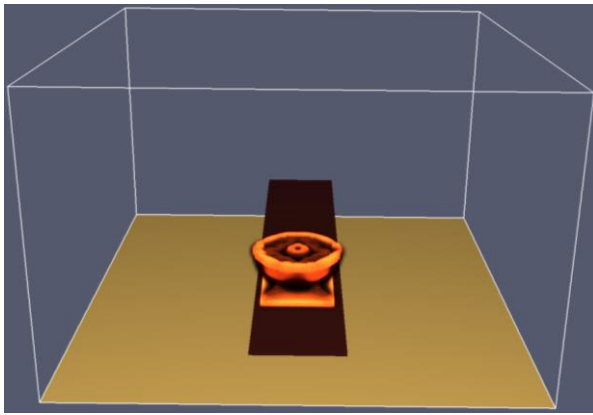
2.1 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis, termoporomis išmatuotų 1001 temperatūrų ir šiluminės spinduliuotės reikšmių, gautų gaisrą modeliuojant be plokštės, statistika

Termo- pora	Vidurkis, °C	Stadartas, °C	Min, °C	Max, °C	Vidurkis, °kW/m ²	Stadartas, °kW/m ²	Min, °kW/m ²	Max, °kW/m ²
	Temperatūra				Spinduliuotė			
1	141,2	50,62	20,00	727,0	90,57	66,36	1,67	1170,0
2	1121,9	8,80	20,00	1300,0	930,19	19,14	1,67	1520,0
3	84,8	10,76	20,00	120,0	49,69	17,95	1,67	100,0
4	37,4	8,07	20,00	46,2	12,26	19,02	1,67	23,7
5	50,5	11,52	20,00	65,5	22,14	22,69	1,67	44,8
6	41,1	8,73	20,00	48,4	14,75	20,23	1,67	28,2
7	43,5	10,55	20,00	54,9	15,18	21,60	1,67	31,2
8	54,8	12,69	20,00	77,8	22,62	22,16	1,67	45,5
9	38,7	7,81	20,00	48,9	12,24	16,78	1,67	22,8

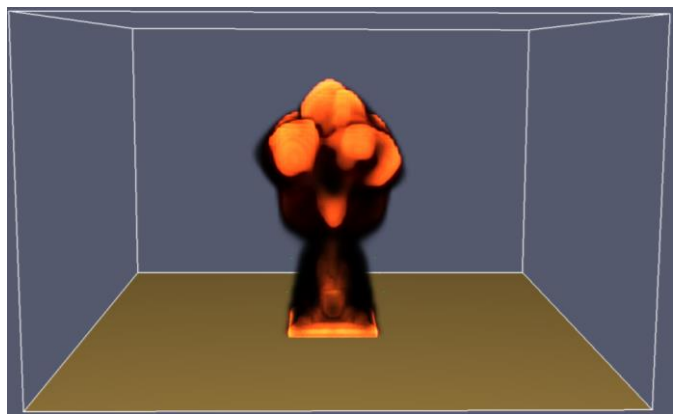
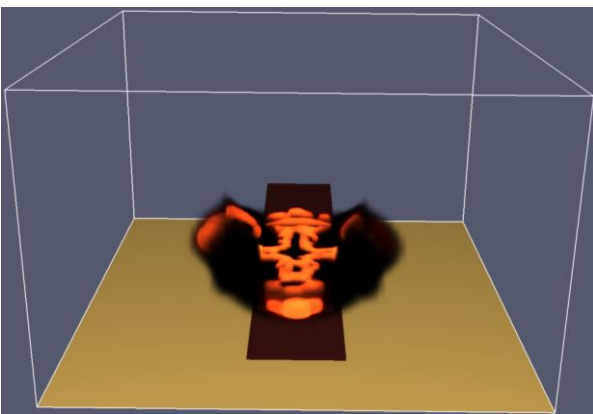
2.2 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis, termoporomis išmatuotų 1001 temperatūrų ir šiluminės spinduliuotės reikšmių, gautų gaisrą modeliuojant su plokšte, statistika

Termo- pora	Vidurkis, °C	Stadartas, °C	Min, °C	Max, °C	Vidurkis, °kW/m ²	Stadartas, °kW/m ²	Min, °kW/m ²	Max, °kW/m ²
	Temperatūra				Spinduliuotė			
1	141,2	50,62	20,00	727,0	574,3	1,67	1460	242,6
2	1121,9	8,80	20,00	1300,0	1003,4	1,67	1590	220,5
3	84,8	10,76	20,00	120,0	895,9	1,67	1490	248,8
4	37,4	8,07	20,00	46,2	61,7	1,67	803	105,4
5	50,5	11,52	20,00	65,5	367,6	1,67	1130	222,4
6	41,1	8,73	20,00	48,4	161,8	1,67	809	173,0
7	43,5	10,55	20,00	54,9	290,4	1,67	1090	246,4
8	54,8	12,69	20,00	77,8	637,3	1,67	1280	229,2
9	38,7	7,81	20,00	48,9	410,2	1,67	1160	300,8

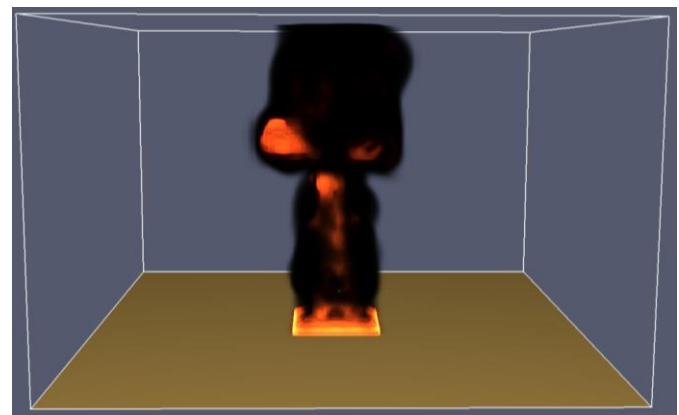
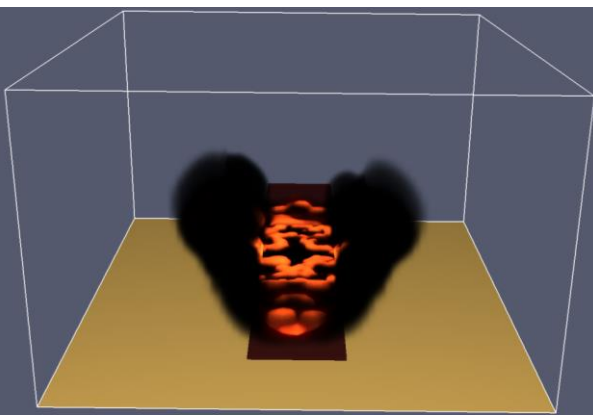
Apskaičiuoti skirtumai stipriai svyruoja ir tas svyravimas turi atsitiktinį pobūdį (žr., pvz., 2.32 – 2.35 pav.). Todėl skirtumų reikšmės galima laikyti statistinėmis imtimis ir apskaičiuoti tų imčių vidurkį, variacijos koeficientą, procentilius ir ekstremalias reikšmes. Imčių statistikos yra pateiktos 2.3 lentelėje, apibūdinant temperatūrų skirtumus, ir 2.4 lentelėje nusakant šiluminės spinduliuotės reikšmių skirtumus.



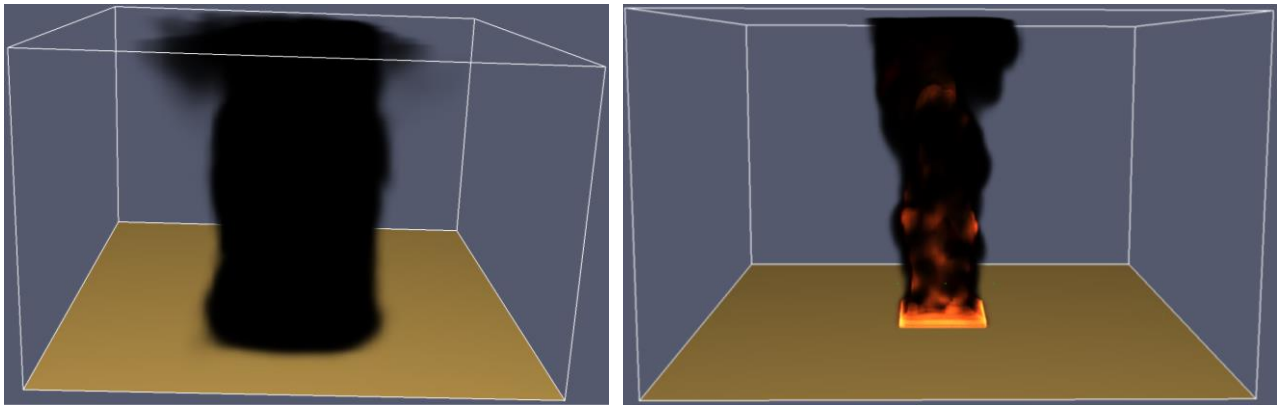
2.26 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokšte (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa ir vaizduojantys gaisro padėtį 2,1 s



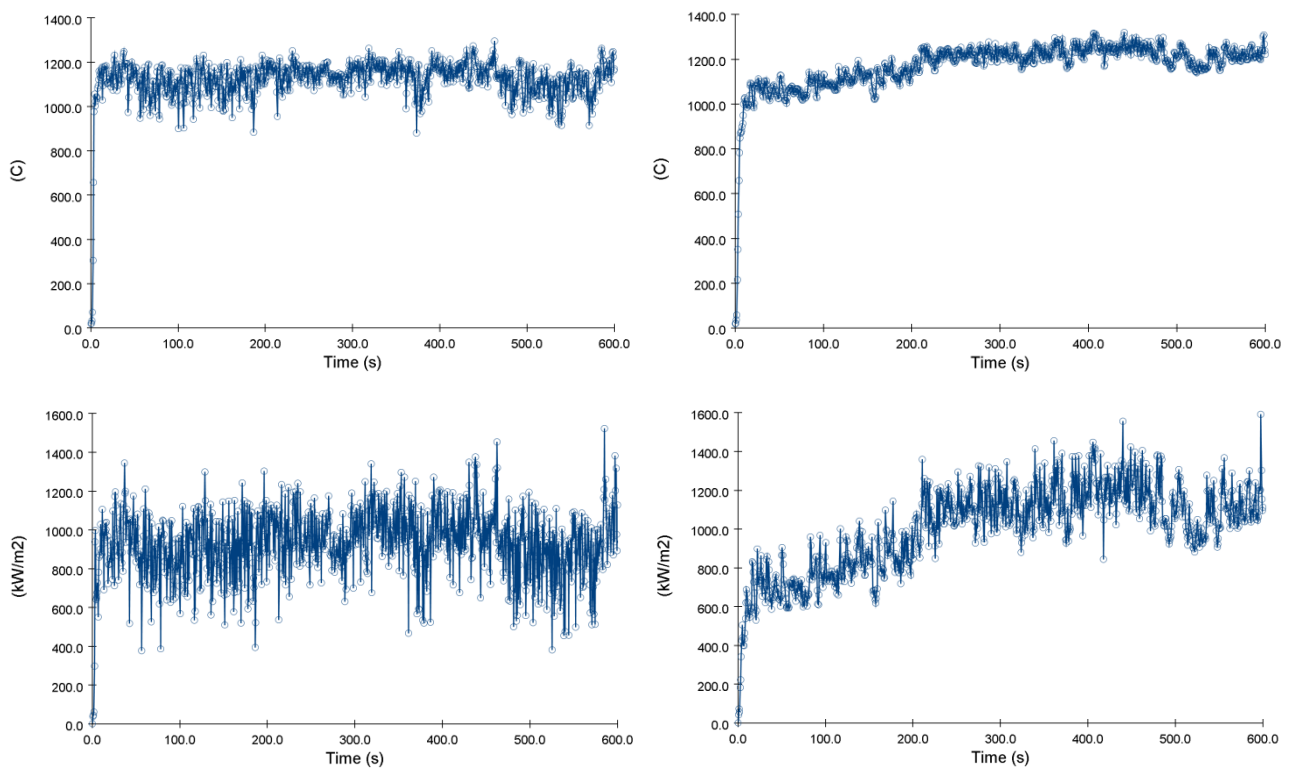
2.27 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokšte (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa ir vaizduojantys gaisro padėtį 3,9 s



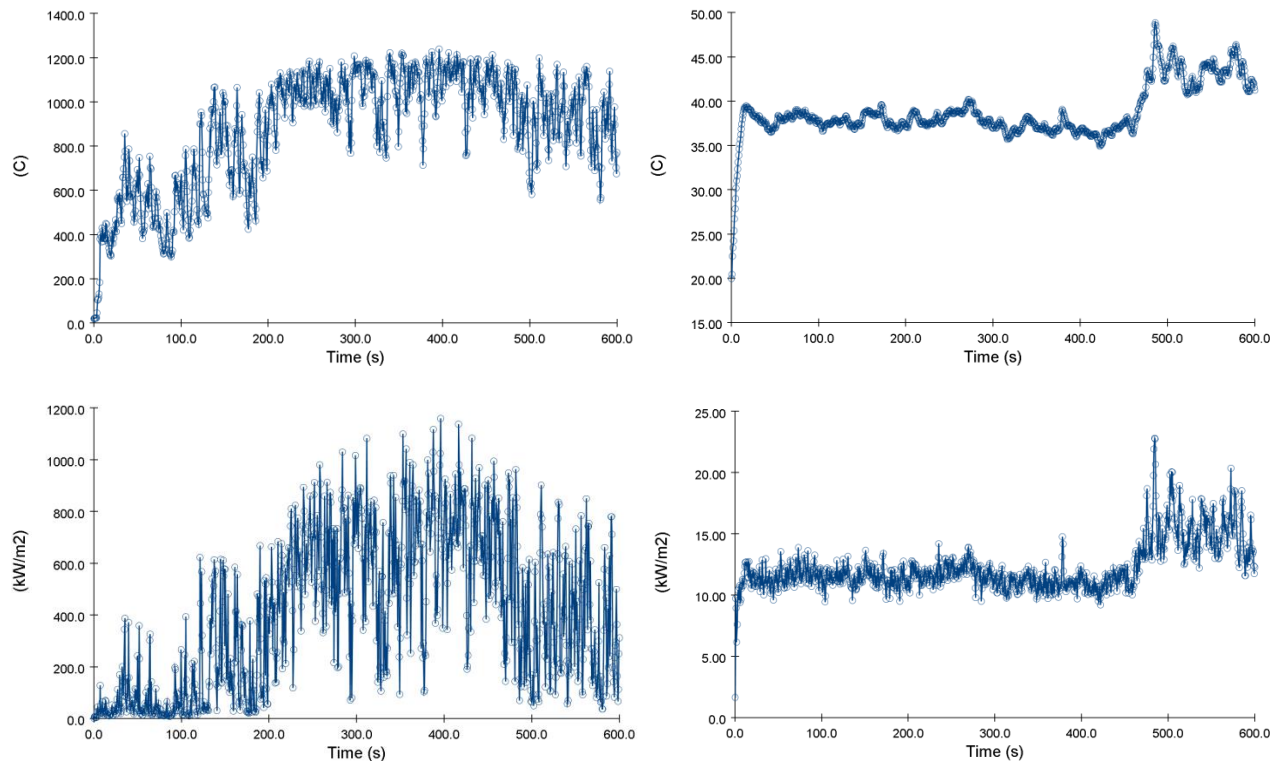
2.28 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokšte (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa ir vaizduojantys gaisro padėtį 5,0 s



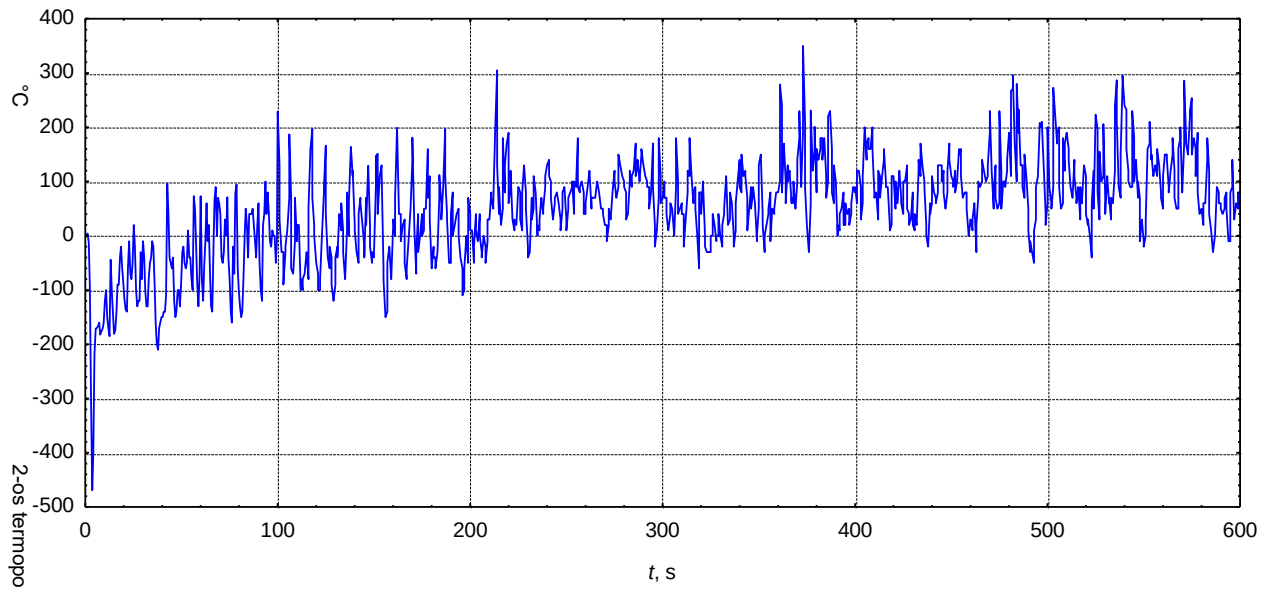
2.29 pav. Kvadratinės formos toluolo telkinio gaisro, vykstančio po tilto plokštės (kairėje) ir atviroje erdvėje (dešinėje), vaizdai, sudaryti su SMOKEVIEW programa ir vaizduojantys gaisro padėtį 100 s



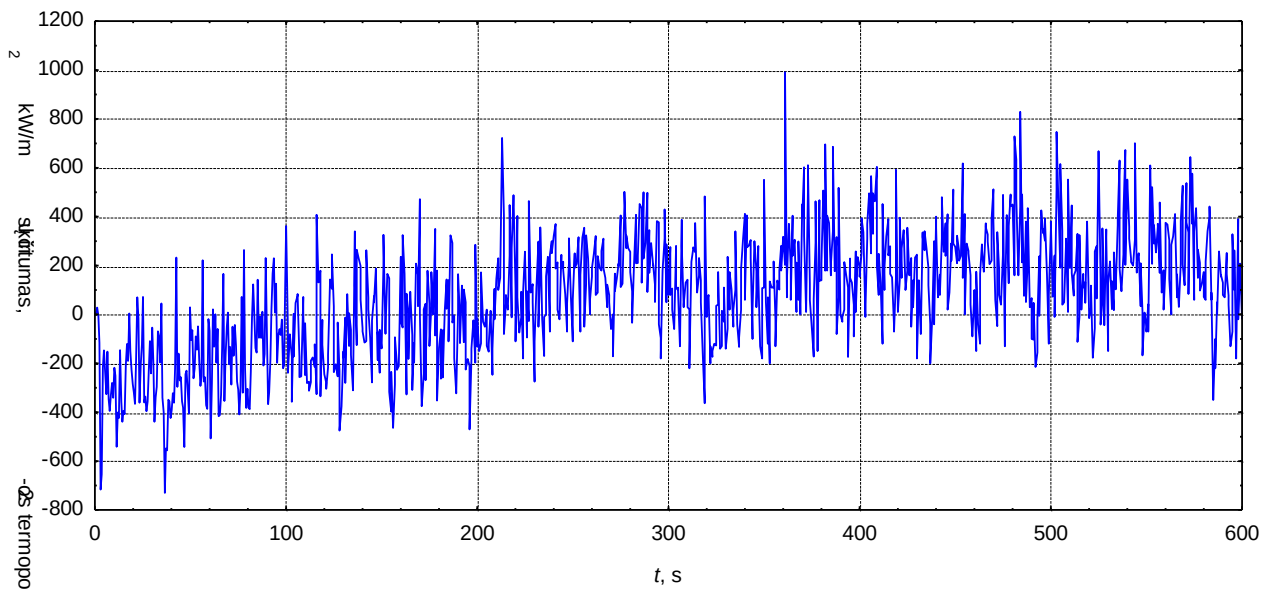
2.30 pav. Gaisro židinio centre išdėstytos 2-os termoporos (2.24 pav.) temperatūros ir spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikai kairėje) ir be plokštės (grafikai dešinėje) (pateiktieji grafikai sudaryti su FDS programa)



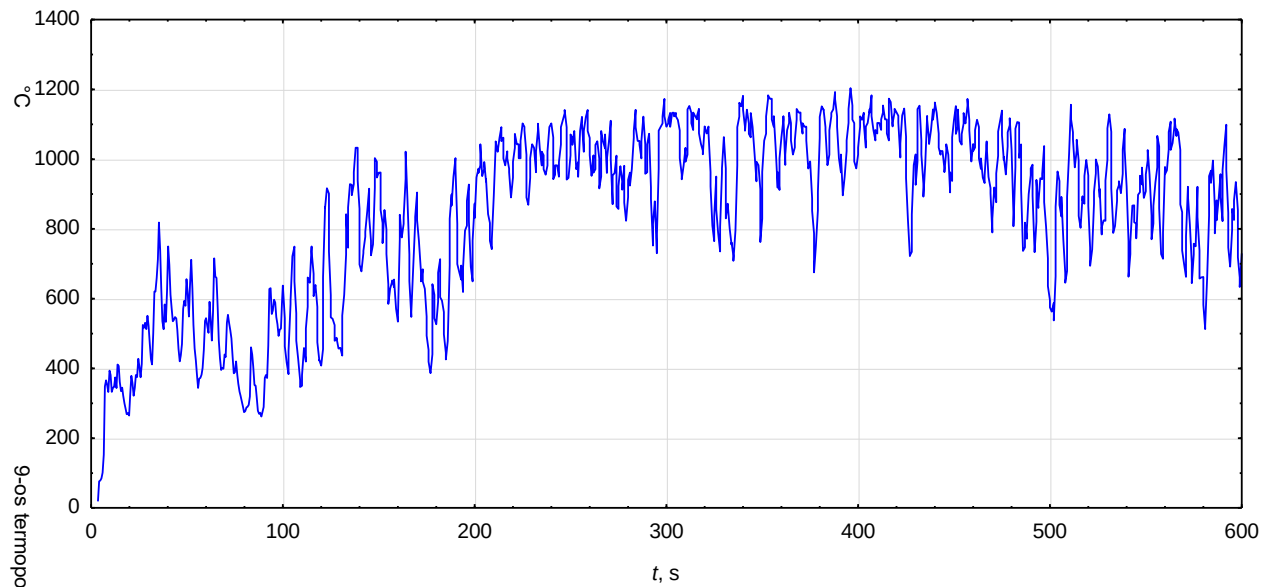
2.31 pav. Ties tilto kraštu išdėstytos 9-os termoporos (2.24 pav.) temperatūros ir šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikai kairėje) ir be plokštės (grafikai dešinėje) (pateiktieji grafikai sudaryti su FDS programa)



2.32 pav. Temperatūrų, išmatuotų modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 2-ai termoporai

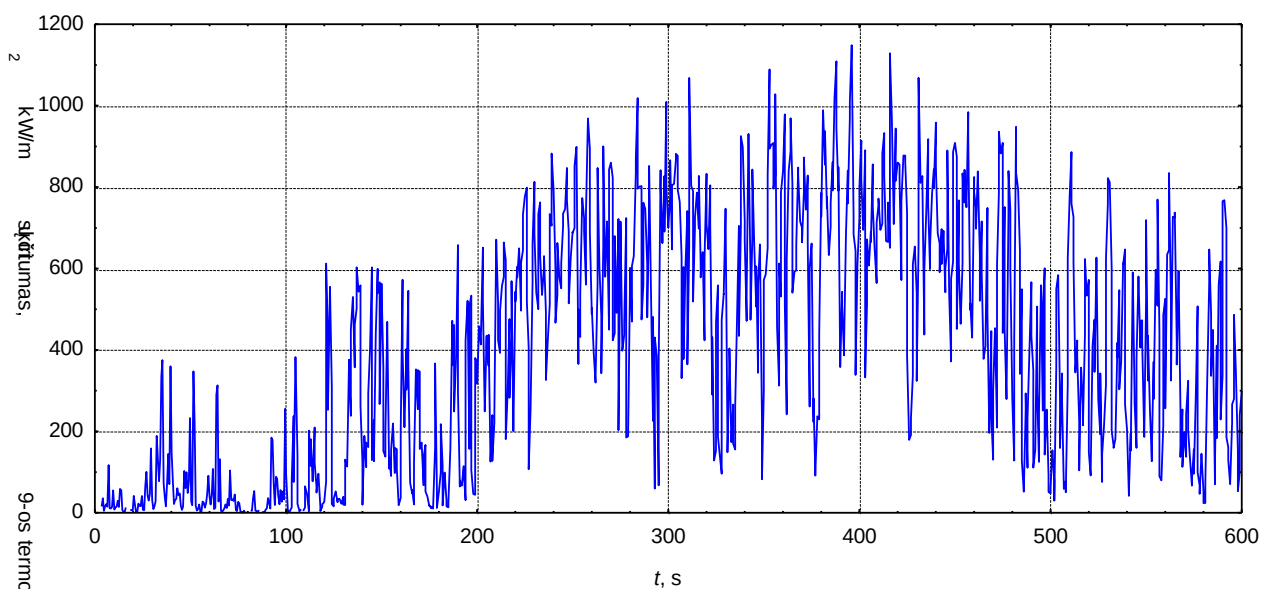


2.33 pav. Šiluminės spinduliuotės, išmatuotos modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 2-ai termoporai



2.34 pav. Temperatūrų, išmatuotų modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 9-ai termoporai

Imčių statistikos iš 2.3 lentelės leidžia padaryti akivaizdžią išvadą, kad temperatūros ir spinduliuotės reikšmės labai padidėja į modelį įvedus tiltą imituojančią betoninę plokštę. Mažiausiai temperatūra išauga 2-os termoporos taške. Tai galima paaiškinti tuo, kad ši termopora yra virš telkininio gaisro centro ir ties ta termopora yra minimalus ventiliavimas abiem gaisro atvejais. Kraštinėse termoporose temperatūros esant plokštei yra pastebimai didesnės nei temperatūros be plokštės. Tai galima paaiškinti karštų degimo produktų kaupimusi ties plokštės apačia.



2.35 pav. Šiluminės spinduliuotės, išmatuotos modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių skirtumai apskaičiuoti 9-ai termoporai

Šiluminės spinduliuotės reikšmių skirtumų statistikos pateiktos 2.4 lentelėje. Jos yra labai nereguliarios. Galima pastebėti tik tai, kad įvedus plokštę, termoporų fiksuojama spinduliuotė išauga. Tai taip pat galima paaiškinti karštų degimo produktų kaupimusi ties plokštės apačia.

Bendrai imant, 2.3 ir 2.4 lentelėse pateiktos reikšmės nėra lengvai interpretuojamos. Turint omenyje tai, kad telkininio gaisro centras yra toje pačioje ašyje kaip ir 2-a termopora, turėtume tikėtis daugmaž simetriškų rezultatų, užfiksuotų priešingose pusėse esančiomis termoporomis. Pavyzdžiui, panašūs temperatūrų ir spinduliuotės skirtumai turėtų būti gauti 5-ai ir 8-ai termoporoms. Tokių rezultatų negauta ir tai galima paaiškinti FDS programos algoritmo ypatybėmis.

2.3 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis termoporomis išmatuotų 1001 temperatūrų skirtumų, gautų gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių statistikos

Termopora	Vidurkis, °C	Min, °C	Max, °C	10 % procentilis, °C	90 % procentilis, °C	Variacijos koef., %
1	845,1	0,0	1184,2	649,0	1025,0	19,0
2	49,3	– 469,0	350,0	– 70,0	160,0	186,9
3	1052,4	– 3,6	1253,9	916,6	1163,0	13,1
4	337,1	– 2,1	984,1	148,2	642,6	57,4
5	785,7	0,0	1092,9	525,4	996,4	23,4
6	553,1	0,0	1062,5	327,4	863,4	37,3
7	770,7	0,0	1181,0	500,6	1070,2	28,4
8	968,4	0,0	1192,8	822,6	1099,5	13,8
9	837,4	– 2,1	1203,9	429,6	1113,0	30,8

2.4 lentelė. Devyniomis, 2.24 pav. parodytomis termoporomis išmatuotų 1001 šiluminių spinduliuočių skirtumų, gautų gaisrų modeliuojant su plokšte ir be plokštės, reikšmių statistikos

Termo- pora	Vidurkis, kW/m ²	Min, kW/m ²	Max, kW/m ²	10 % procentilis, kW/m ²	90 % procentilis, kW/m ²	Variacijos koef., %
1	275,2	– 3,0	1077,9	29,5	669,1	90,0
2	614,7	– 0,7	1263,3	316,1	913,6	37,4
3	397,9	– 4,7	1148,7	18,3	812,2	75,6
4	846,2	– 15,9	1444,5	495,7	1122,6	29,5
5	73,3	– 730,0	991,0	– 253,0	377,0	336,5
6	483,7	– 408,0	1407,2	157,3	796,4	51,3
7	147,1	– 7,2	797,3	8,8	426,8	118,1
8	345,4	– 1,2	1110,1	61,1	646,7	64,8
9	49,5	– 15,0	789,2	– 6,40	175,1	213,9

2.4. Antro skyriaus išvados

1. Tiriant telkininių gaisrų skleidžiamos šiluminės spinduliuotės vertinimą nustatyta, kad vienodai sėkmingai šias spinduliuotes galima vertinti tiek inžineriniais, tiek skaitiniais metodais. Spinduliuotės skaičiavimo rezultatai, gauti stačiakampiam telkinio gaisrui, gaunami maždaug vienodi naudojant tiek skaitinius, tiek inžinerinius metodus.
2. Inžineriniai telkininio gaisro šiluminės spinduliuotės vertinimo metodai yra pritaikyti tik taisyklingos formos telkinių gaisrams. Norint skaičiuoti netaisyklingos formos telkinio gaisro spinduliuotę, reikia taikyti skaitinį metodą. Rasta, kad importuoti duomenis apie netaisyklingo telkinio geometriją į skaitinio metodo modelį galima nubraižant šį telkinį CAD programa ir grafinį objektą įstatant į skaitinio metodo tinklą.
3. Skaitinis telkininio gaisro modeliavimas leidžia prognozuoti šį gaisrą, kai jis vyksta iš dalies uždaroje erdvėje. To neleidžia padaryti inžineriniai metodai, nes jie buvo sukurti telkinio degimui visiškai atviroje erdvėje. Pasiūlyta skaitinį telkininio gaisro modeliavimą papildyti geometriniu elementu, kuris imituoja tilto perdangos konstrukciją. Skaitinis metodas leis įvertinti temperatūrą ir spinduliuotę, kurios veiks šį elementą.
4. Analizuojant telkininio gaisro modeliavimo skaitiniu metodu rezultatus nustatyta, kad šiems modeliavimo rezultatams yra būdingas gana stiprus osciliavimas (svyravimas). Jo priežastis turėtų glūdėti sudėtingame matematiname algoritme, kuris naudojamas sprendžiant gaisro procesą aprašančią diferencialinių lygčių sistemą.

3. TELKININIO GAISRO SPINDULIUOTĖS POVEIKIS TRANSPORTO ESTAKADOS KONSTRUKCIJAI

3.1. Nagrinėjamas uždavinys

Vilniaus centrinės dalies apvažiavimo dalis, atidaryta 2008 m., yra pietinis aplinkkelis. Jo ilgis yra maždaug 3 km. Aplinkkelis yra tarptautinio IXB transporto koridoriaus atkarpa. Jis nutiestas tarp Lazdynų tilto bei S. Dariaus ir S. Girėno gatvės. 2009 m. aplinkkeliui suteiktas Tūkstantmečio gatvės pavadinimas. Jos dalis yra transporto estakada virš Savanorių prospekto žiedo (3.1 pav.). Estakada yra transporto tiltas, kurio perdangos konstrukcija yra kompozitinė. Ją sudaro keturios dėžinio skerspjuvio metalinės sijos, palaikančios gelžbetoninę estakados važiuojamosios dalies plokštę. Metalinės sijos yra nekarpytos ir remiasi ant juostomis išdėstytų elipsės skerspjuvio gelžbetoninių kolonų (3.2 ir 3.3 pav.).

Savanorių prospekto žiedu nuolat vyksta intensyvus eismas. Neretai žiedu važiuoja cisterniniai automobiliai. Kai kurios žiedo vietos yra avaringos ir cisterniniai automobiliai gali sukelti eismo įvykius arba nukentėti nuo jų. Tokie eismo įvykiai gali inicijuoti cisterninio automobilio gaisrą. Viena iš žiedo vietų, kur toks gaisras galėtų įvykti, yra pietinė žiedo dalis po estakada (3.4 pav.). Pavojingiausia cisternos gaisro vieta būtų apie estakados perdangos vidurį, kuris yra maždaug 3.4 pav. pavaizduoto visureigio vietoje. Toliau bus sprendžiamas uždavinys, kokį poveikį metalinėms estakados sijoms galėtų sukelti anksčiau minėtoje vietoje užsidedęs automobilinės cisternos indas.

Cisternos indo degimas bus modeliuojamas kaip telkininis gaisras. Bus laikoma, kas jis vyks iš dalies uždaroje erdvėje po estakados konstrukcija. Didžiausią poveikį šiai konstrukcijai gaisras padarys tuomet, kai degantis objektas paveiks maksimalų perdangos apačios plotą. Todėl laikysime, kad cisternos indo vidurys bus išsidėstęs išilginėje estakados konstrukcijos ašyje (3.4 pav.). Taip pat padarysime supaprastinančias prielaidas, kad išilginė cisternos indo ašis yra statmena išilginei estakados ašiai. Kadangi nekarpytose sijose didžiausias teigiamas momentas susidaro tarpatramio viduryje, cisternos išilginės ašies padėtis sutaps su šia perdangos sijų vieta.

Cisternos indo gaisro poveikis bus vertinamas įrengus šešias virtualias termoporas. Jos išdėstytos vidurinių tilto perdangos sijų apačioje, ties pasvirusios briaunos viduriu ir po sijų lentynomis (3.5 pav.). Termoporomis užfiksuotos temperatūros reikšmės bus įvesties informacija, tinkama vertinti gaisro poveikį dėžinio skerspjuvio sijoms. Mokslinėje literatūroje paskelbti straipsniai leidžia daryti išvadą, kad gaisro veikiamose sijose temperatūros pasiskirstymą reikia skaičiuoti ir tų sijų deformacijas prognozuoti, taikant baigtinių elementų metodą (pvz., Alos-Moya *et al.*, 2014). Taigi, šiame skyriuje gauti rezultatai bus įvesties informacija, skirta skaičiuoti kompozitinę tilto perdangą ir tikrinti jos atsparumą gaisrui.



3.1 pav. Pietinio aplinkkelio Vilniaus mieste atkarpa su nagrinėjama estakados dalimi (nuotraukos gautos iš Maps.lt tinklapio)



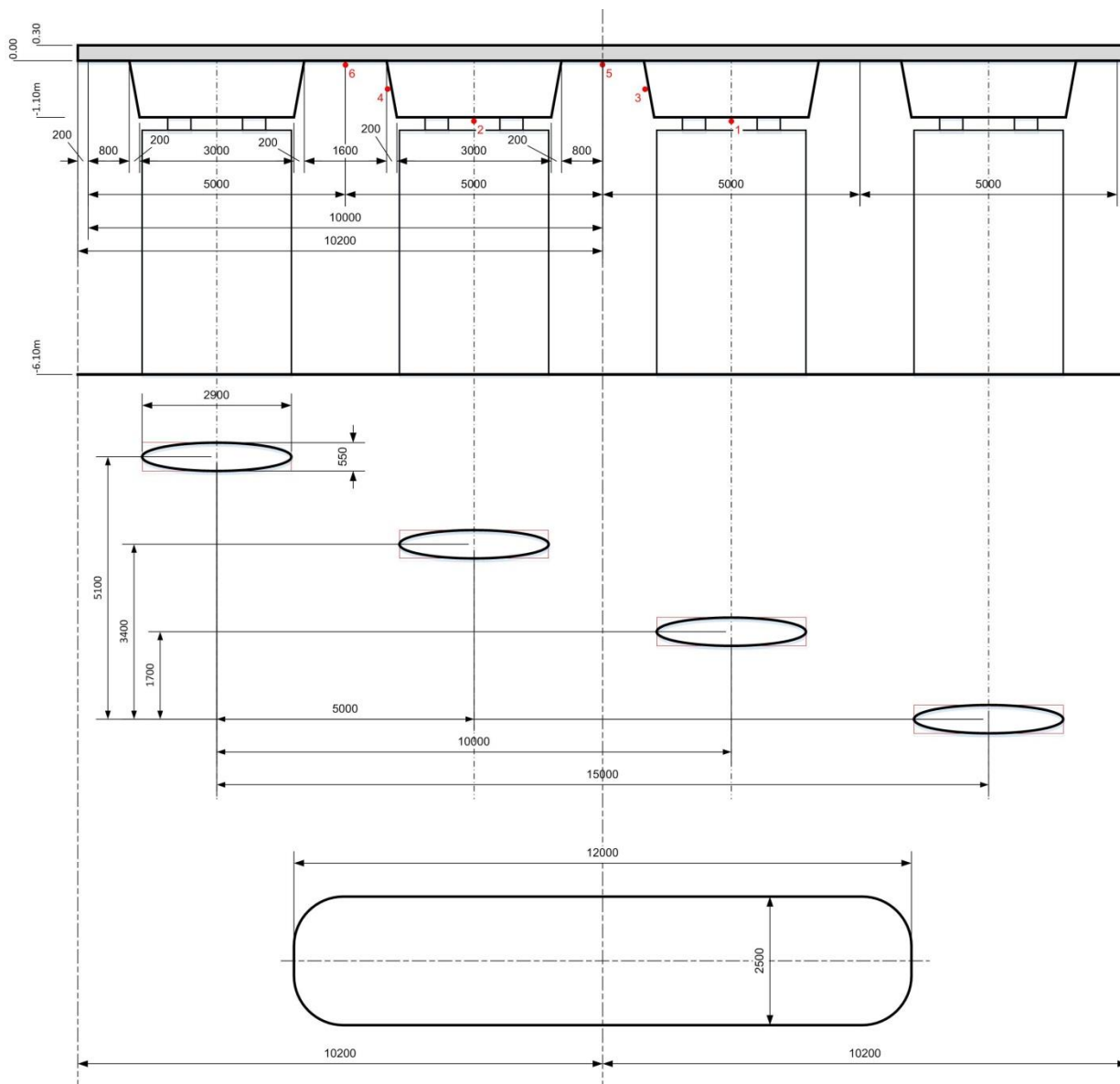
3.2 pav. Pietinio aplinkkelio estakados rytinės dalies vaizdas (autorės nuotrauka)



3.3 pav. Estakados tarpatramis, po kuriuo buvo modeliuojamas benzininės automobilinės cisternos gaisras
(autorės nuotrauka)



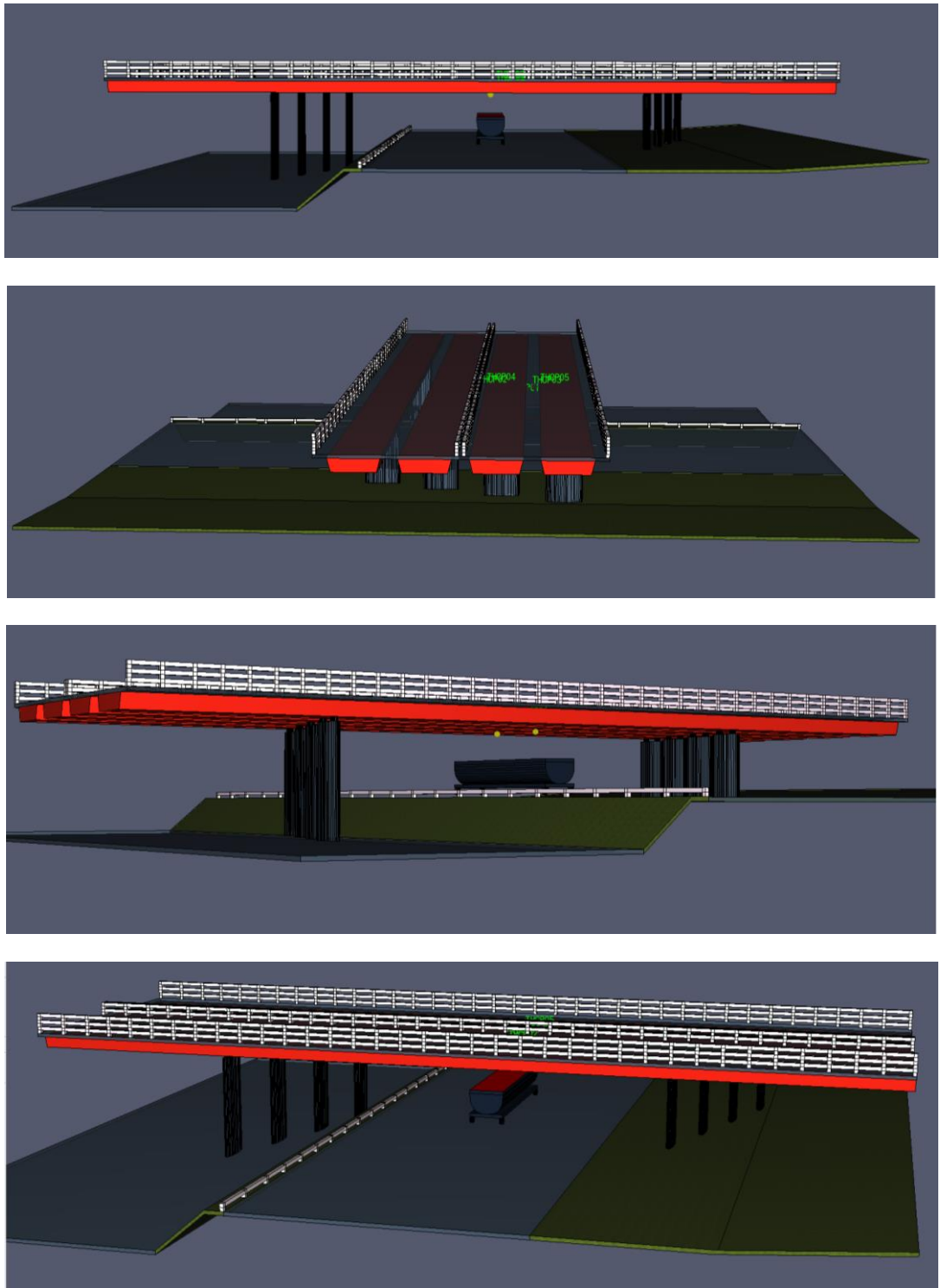
3.4 pav. Nekarpytos metalinės estakados sijos, kurios gali būti paveiktos automobilinės cisternos gaisro
(autorės nuotrauka)



3.5 pav. Virtualių termoporų išdėstymas po dėžiniais estakados sijų skerspjūviais ir degančios cisternos indo padėtis estakados skerspjūvio atžvilgiu (termoporos pavaizduotos ir numeruotos raudona spalva)

3.2. Telkinio gaisro modelis ir skaitinis gaisro proceso imitavimas

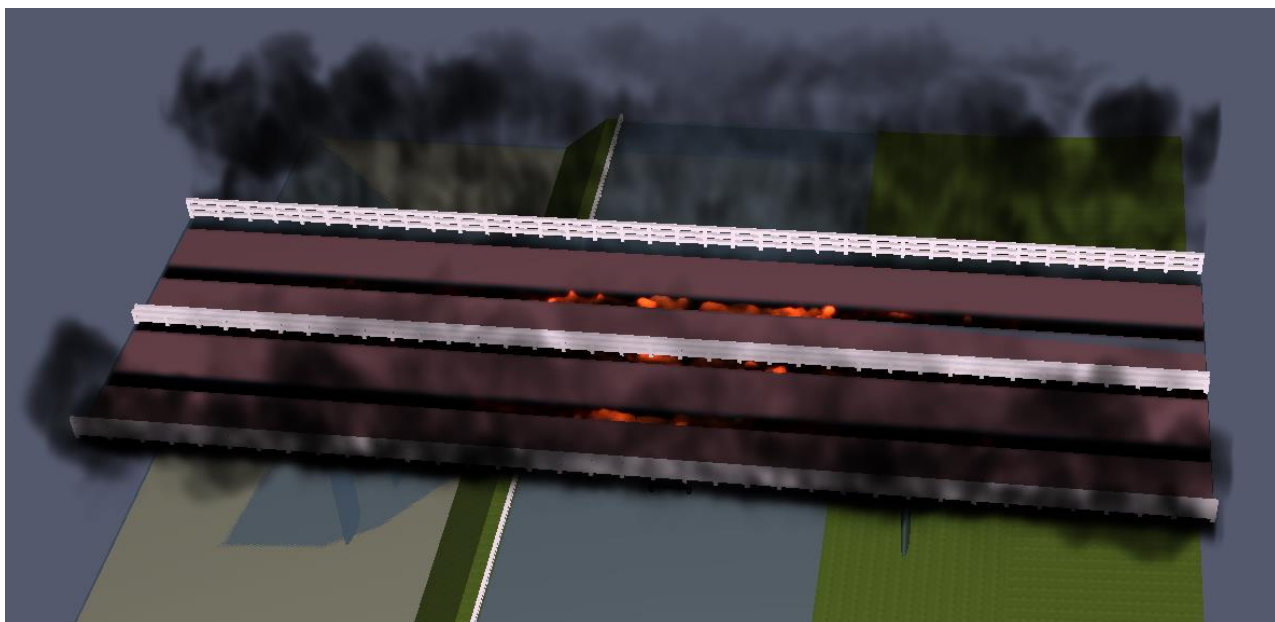
Cisterninio automobilio gaisras po transporto estakada buvo modeliuojamas su FDS programa. Estakados dalies ir degančios cisternos modelis, sudarytas su šia programa, yra pavaizduotas 3.6 pav. Dėl aiškumo, FDS programos tinklelis nepavaizduotas. Parodyta tik estakados konstrukcija ir po ja degantis objektas. Tinklelio langelio matmenys buvo 0,25 m. Gabaritiniai tinklelio matmenys buvo 64 m × 64 m × 20 m. Degantis objektas buvo cisternos indas. Jo degimas modeliuotas kaip telkininis gaisras. Telkinys buvo 12 m × 2,5 m plane, o telkinio altitudė virš gatvės paviršiaus buvo 2,75 m. Ši altitudė maždaug atitinka cisterninių puspriekabių indų išilginės ašies aukštį.



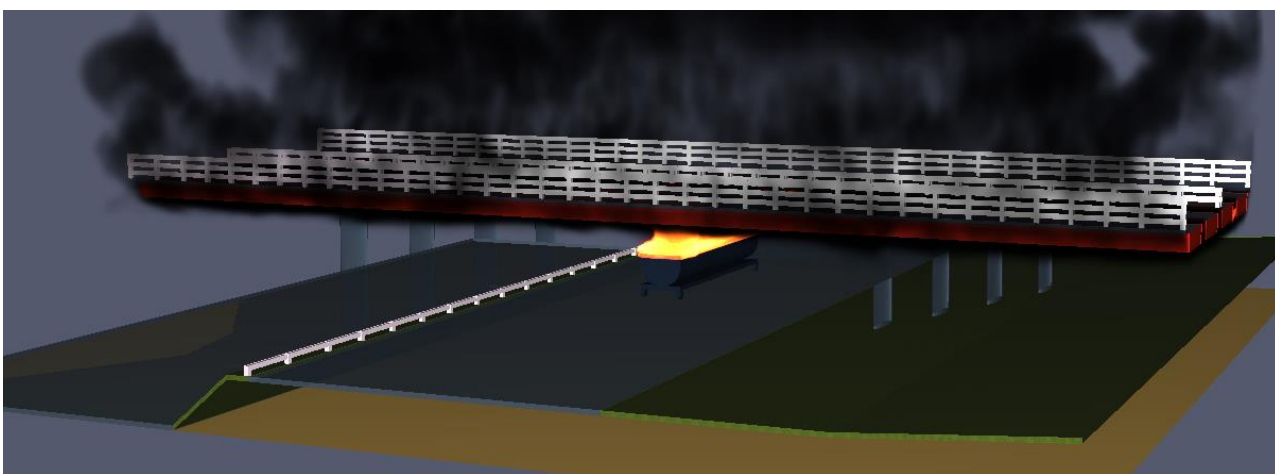
3.6 pav. Keturios FDS programos modelio, sudaryto nagrinėjamam estakados tarpatramiui, projekcijos

Modeliuojant cisternos indo gaisrą buvo laikoma, kad degs benzino krovinys. Benzino masės netekties greitis $\dot{m}_{\infty}''$ buvo lygus $0,055 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Savitoji benzino degimo šiluma buvo $43\,700 \text{ kJ/kg}$. Taigi, viso telkinio energijos išskyrimo greitis naudotas modeliuojant gaisrą, buvo $0,055 \times 12 \times 2,5 \times 43\,700 = 7210,5 \text{ kW} = 7,21 \text{ MW}$. Gaisras buvo modeliuojamas 300 s laikotarpyje. Šis santykinai trumpas laikas pasirinktas todėl, kad cisternos indo degimas greitai stabilizuojasi ir gaisro poveikis konstrukcijai nusistovi. Ilgesnis modeliavimas naujų rezultatų neduotų.

Atliekant skaičiavimus su aštuonių branduolių kompiuteriu, modeliavimas truko maždaug 30 val. Skaitinio modeliavimo rezultatai, gauti su FDS programa gali būti dinamiškai vaizduojami (animuojami) SMOKEVIEW programa. Du animacijos vaizdai pateikti 3.7 – 3.8 pav.



3.7 pav. Gaisro po estakada vaizdas iš viršaus, sudarytas su SMOKEVIEW programa ir maždaug atitinkantis 15 gaisro sekundę

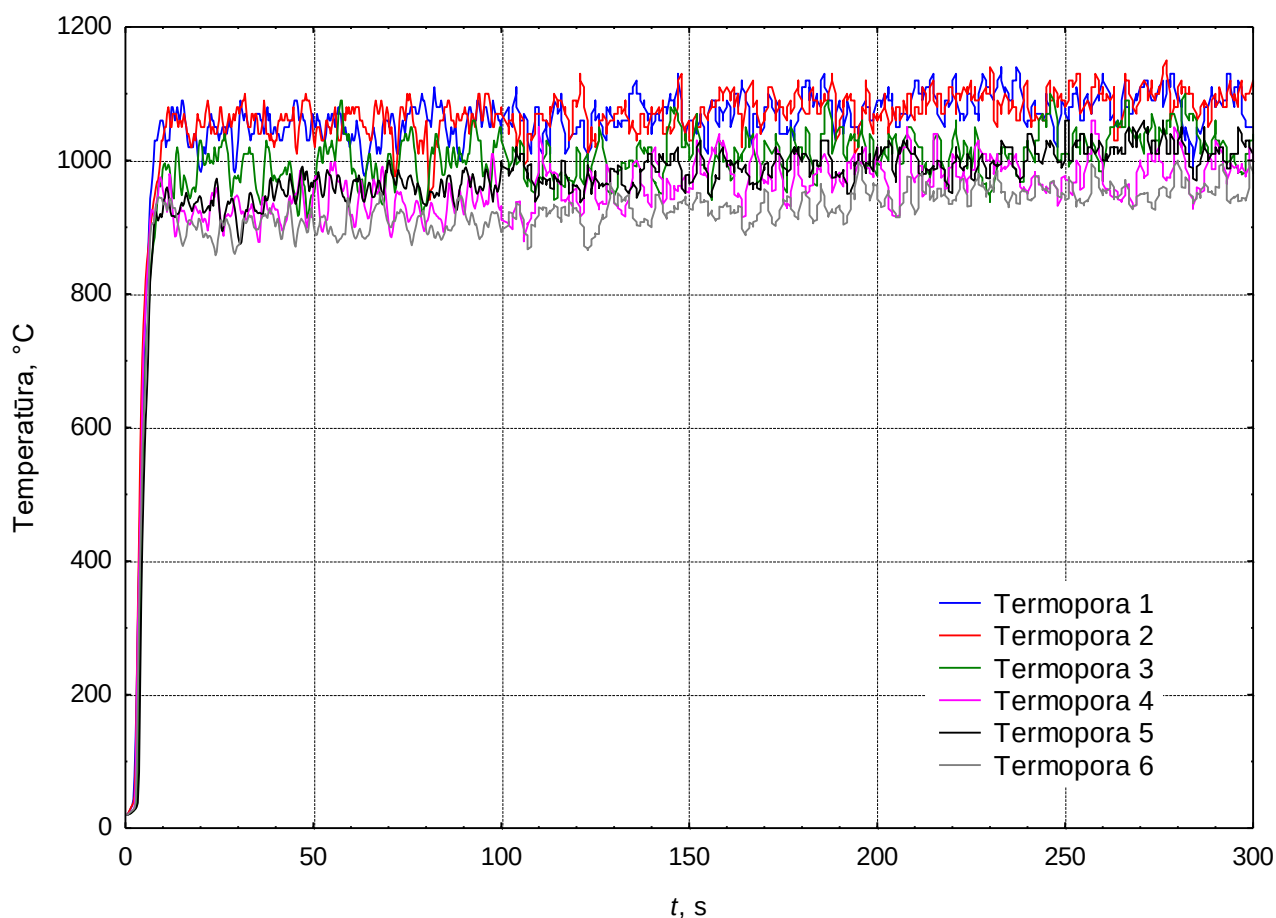


3.8 pav. Automobilinės cisternos gaisro vaizdas iš estakados šono, sudarytas su SMOKEVIEW programa ir maždaug atitinkantis 15 gaisro sekundę

3.3. Telkininio gaisro poveikio vertinimo rezultatai

Pagrindinis modeliavimo rezultatas buvo temperatūrų, išmatuotų šešiomis virtualiomis termoporomis, reikšmių laiko sekos. Grafiškai jos yra pavaizduotos 3.9 pav. Matyti, kad didžiausios temperatūros buvo užfiksuotos 1-os ir 2-os termoporų, kurios išdėstytos dežinio skerspjuvio apačioje. Mažiausios temperatūros buvo užfiksuotos 4-os ir 6-os termoporų. Tai galima paaiškinti tuo, kad jos buvo šiek tiek užstotos nuo gaisro spinduliuotės kairiosios sijos dežinės dalies. Visų termoporų fiksuojamos temperatūros stabilizavosi maždaug po 15 s. Vėliau joms buvo būdingas labai nežymus

didėjimo trendas. Mažiausia ir didžiausia temperatūros, užfiksuotos laikotarpyje 20 – 300 s, buvo, atitinkamai, 914,3 °C ir 1150 °C.



3.9 pav. Virtualiomis termoporomis išmatuotos temperatūros dėžinio estakados sijos skerspjūvio apačioje

Skaiciavimai buvo atlikti termoporas išdėstant tik viename estakados pjūvyje, todėl gautos temperatūrų reikšmės yra tik dalinis rezultatas. Jeigu reikėtų skaičiuoti plienines perdangos sijas baigtinių elementų metodu, termoporų turėtų būti daugiau ir jas reikėtų paskleisti tiek skersine, tiek išilgine sijų kryptimi. Tačiau skaičiavimas iš esmės būtų toks pat kaip ir skaičiavimas su šešiomis termoporomis. Didesnis termoporų skaičius tik pareikalautų ilgesnių skaičiavimų.

3.4. Trečio skyriaus išvados

1. Faktas, kad per pastaruosius du dešimtmečius Lietuvoje vyko daugiausiai ES lėšomis finansuojama transporto objektų statyba, leidžia daryti išvadą, kad kartu iškilo ir gaisrinės saugos problemų. Dalis objektų buvo viadukai ir estakados, projektuoti ir statyti kaip kompozitinės konstrukcijos. Jos yra santykinai jautrios transporto priemonių gaisrams, lyginant su gelžbetoninėmis konstrukcijomis. Konstrukciniu požiūriu pavojingiausi gaisrai gali vykti po viadukais ir estakadomis.

2. Automobilių eismo estakada, kuri yra Vilniaus pietinio aplinkkelio dalis, pastatyta naudojant kompozitinę perdangą. Metalinės perdangos sijos gali būti paveiktos cisterninio automobilio gaisro, jei šis gaisras įvyktų transporto žiedo atkarpoje po estakados konstrukcija. Todėl šią konstrukciją buvo verta patikrinti, cisternos indo gaisrą modeliuojant kaip telkininį gaisrą.
3. Atlikus cisternos indo gaisro modeliavimą, kurio metu cisterna išdėstyta po pietinio aplinkkelio estakada, gauta, kad metalinės šio statinio sijos bus veikiamos labai aukštų temperatūrų. Jos gali siekti nuo 914,3 °C iki 1150 °C. Skaičiavimų rezultatai leidžia daryti išvadą, kad sijas veikiančios temperatūros stabilizuojasi maždaug 20 s nuo gaisro pradžios. Jos turėtų išlikti maždaug pastovios kol cisternos inde neišdegs visas krovinys.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą nustatyta, kad telkininiai gaisrai yra dažniausi pramonės objektuose pasireiškiantys gaisrai. Telkininiai gaisrai taip pat vyksta ir vežant degiąsias medžiagas. Jie kyla užsidegant automobilinėms cisternoms ir (arba) iš jų išsipyliusiam kroviniui. Telkininių gaisrų metu dažniausiai dega komerciniai angliavandeniliai.
2. Nustatyta, kad pagrindinis telkininio gaisro poveikis yra šiluminė spinduliuotė, kurią galima vertinti taikant įvairius matematinius metodus. Juos galima suskirstyti į inžinerinius (rankinio skaičiavimo) metodus ir skaitinius metodus, kurie yra įgyvendinami kompiuterio programomis. Pastarieji metodai yra vadinami hidrodinamikos arba CFD metodais.
3. Rasta, kad iki šiol yra pasiūlyti keli inžineriniai metodai, skirti šiluminei telkininio gaisro spinduliuotei vertinti. Skaičiuojant pagal šiuos metodus gaunamos gana skirtingos šiluminės spinduliuotės reikšmės. Tačiau praktiniu požiūriu rezultatų skirtumas nėra kritiškas. Inžinerinius metodus yra paprasta taikyti. Jie sudaryti apskritų telkininių gaisrams modeliuoti. Be to, inžineriniai metodai tinka skaičiuoti tik atvira ore vykstančių gaisrų spinduliuotę.
4. Šiluminę telkininio gaisro spinduliuotę galima vertinti ir skaitiniais CFD metodais. Jie leidžia modeliuoti telkininius gaisrus, kai dega netaisyklingos formos telkinys, o gaisro erdvė yra nebūtinai atvira. Tokių gaisrų pavyzdžiai yra gaisrai tuneliuose ir gaisrai po transporto statiniais, kaip antai viadukais ir estakadomis.
5. Išnagrinėjus inžinerinius telkininių gaisrų šiluminės spinduliuotės vertinimo metodus galima padaryti išvadą, kad juos yra paprasta taikyti ir jų formulės remiasi eksperimentų duomenimis. Tačiau inžineriniai metodai turi ribotą, griežtai apibrėžtą taikymo sritį. Skaitiniai CFD metodai yra daug universalesni, bet skaičiavimas su jais reikalauja didelių laiko sąnaudų. Be to, CFD metodų rezultatai gali labai nukrypti nuo eksperimentinių duomenų.
6. Atlikus šiluminės telkininių gaisrų spinduliuotės vertinimo priemonių tyrimą galima padaryti išvadą, kad neretai vieno ir to pačio gaisro spinduliuotę galima vertinti keliais alternatyviais metodais. Rezultatai, gaunami taikant kelis metodus, neišvengiamai skirsis. Projektinius sprendimus galima priiminti remiantis konservatyviausiu rezultatu arba tuo rezultatu, kuris skaičiuotojo požiūriu yra realistiškiausias. Bet kuriuo atveju, jeigu galima, reikia taikyti du ar daugiau metodų.
7. Per pastaruosius du dešimtmečius Lietuvoje nemažai pastatyta daugiausiai ES lėšomis finansuojamų transporto viadukų ir estakadų. Galima padaryti išvadą, kad tai sukėlė gaisrinės saugos problemą. Ant šių statinių ir po jais gali kilti telkininiai gaisrai, kai degs automobilinės cisternos. Kiek mums žinoma, šios rūšies statiniai nebuvo projektuoti, atsižvelgiant į telkininio gaisro galimybes. Todėl šiame darbe siūlomas telkininio gaisro modeliavimas CFD metodu gali būti pritaikytas patikrinti transporto infrastruktūros objektų atsparumą telkininiams gaisrams.

Atmosferos perduodamumo koeficiento skaičiavimas

Atmosferos perduodamumo koeficientas τ įvertina terminės radiacijos dalį, sugeriamą atmosfera. Daugiausiai radiacijos sugeria ore esantis anglies dvideginis ir vandens garai. Sugėrimas mažina radiaciją, kuri pasiekia taikinio paviršių. Atmosferinis perduodamumas priklauso nuo atstumo tarp liepsnos ir taikinio, d . Anglies dvideginio kiekis atmosferoje kinta mažai, tačiau vandens garų kiekis svyruoja pakankamai daug ir priklauso nuo temperatūros ir atmosferinės drėgmės. Atmosferinis perduodamumas gali būti vertinamas tokiomis lygtimis (Casal, 2008, p. 75):

$$\tau = \begin{cases} 1,53(P_w d)^{-0,06}, & \text{kai } P_w d < 10^4 \text{ N/m} \\ 2,02(P_w d)^{-0,09}, & \text{kai } P_w \leq P_w d \leq 10^5 \text{ N/m} \\ 2,85(P_w d)^{-0,12}, & \text{kai } P_w d \geq 10^5 \text{ N/m} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Čia P_w dalinis vandens garų slėgis atmosferoje (Pa). Yra keletas būdų skaičiuoti P_w reikšmei skaičiuoti. Vienas iš jų turi tokios formulės pavidalą (Wagner & Pruss, 1993):

$$P_w = P_c \cdot \exp\{(a_1\tau + a_2\tau^{1,5} + a_3\tau^3 + a_4\tau^{3,5} + a_5\tau^4 + a_6\tau^{7,5})T_c/T\}. \quad (\text{A.2})$$

kur

$$\tau = 1 - T/T_c. \quad (\text{A.3})$$

čia $P_c = 22\,064$ kPa ir $T_c = 647,096$ °K yra, atitinkamai, vandens garų ir temperatūros reikšmės kritiniame taške; T_a – aplinkos temperatūra, kurios reikšmei skaičiuojamas slėgis P_w ; $a_1, \dots, a_6$ yra empiriniai koeficientai su tokiomis reikšmėmis $a_1 = -7,859\,517\,83$, $a_2 = 1,844\,082\,59$, $a_3 = -11,786\,6497$, $a_4 = 22,680\,7411$, $a_5 = -15,961\,8719$, $a_6 = 1,801\,225\,02$.

Atmosferos perduodamumo koeficiento τ skaičiavimo pagal (A.1) – (A.3) formules algoritmas buvo užprogramuotas FORTRAN kalba. Programa yra pateikta A.1 lentelėje.

A.1 lentelė. Programa „Atmospheric Transmissivity“, skirta skaičiuoti atmosferos perduodamumo koeficiento τ reikšmes

```

PROGRAM Atmospheric Transmissivity
* Ambient temperature and relative humidity
* The distance to the target
* The partial vapour pressure
* The atmospheric transmissivity
REAL*8 t_ambient, RH

```

```

REAL*8 x, pvp, tau_a
REAL*8 PW
*
    t_ambient = 20.d0
    RH = 77.d0
    x = 30.d0
* Calculate the the partial vapour pressure of water at actual path length
    pvp=PW(t_ambient)*x*RH/100.d0
* Calculate the value of atmospheric transmissivity (Casal 2009: 75-76)
    IF(pvp.LE.1.d4) THEN
        tau_a=1.53d0*pvp**(-0.06d0)
    ELSE IF(pvp.GT.1.d4.AND.pvp.LT.1.d5) THEN
        tau_a=2.02d0*pvp**(-0.09d0)
    ELSE
        tau_a=2.85d0*pvp**(-0.12d0)
    END IF
*
    WRITE(*,'(A40, E12.4)') 'The partial vapour pressure:', pvp
    WRITE(*,'(A40, E12.4)') 'The atmospheric transmissivity:', tau_a
*
    STOP
    END
*****
*****
    REAL*8 FUNCTION PW(T_inC)
* A function for computing vapour pressure of water, PW (in Pa), from Wagner
and Pruss (1993)
* from http://www.kayelaby.npl.co.uk/chemistry/3\_4/3\_4\_2.html
    REAL*8 T_inC, T
    REAL*8 p, pc, a1, a2, a3, a4, a5, a6, Tc
    REAL*8 tau
*
    T=T_inC+273.15d0
    pc=22064.d0
    a1 = -7.85951783d0
    a2 = 1.84408259d0
    a3 = -11.7866497d0
    a4 = 22.6807411d0
    a5 = -15.9618719d0
    a6 = 1.80122502d0
    Tc = 647.096d0
    tau = 1.d0-T/Tc
*

```

```
PW=1000.d0*pc*DEXP(  
&      (a1*tau + a2*tau**1.5 + a3*tau**3 + a4*tau**3.5  
&      + a5*tau**4 + a6*tau**7.5)*Tc/T)  
RETURN  
END
```

Tekste minimos organizacijos ir tinklavietės

Computational Fluid Dynamics (2019). Prieiga per internetą:

https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics

Construction Equipment Guide (2019). Prieiga per internetą:

<https://www.constructionequipmentguide.com/us-dot-allocates-1m-in-emergency-funds-for-i-70-fix/25760>

EGP (2019). Prieiga per internetą:

<http://egpnews.com/2011/12/demolition-of-bridge-after-tanker-truck-inferno-set-to-begin-freeway-may-reopening-friday-evening/>

Fuel Tanker on Fire on I-94 in Metro Detroit (2019). Prieiga per internetą:

<https://imgur.com/gallery/xS6nM/comment/378651909>

MacArthur Maze (2019). Prieiga per internetą:

https://en.wikipedia.org/wiki/MacArthur_Maze

mySA (2019). Prieiga per internetą:

https://www.mysanantonio.com/news/local_news/article/Tanker-truck-clips-I-35-bridge-spills-crude-4104910.php

TV3.lt (2019). Prieiga per internetą:

<https://www.tv3.lt/naujiena/902476/www.tv3.lt/lenktynes>

WVUA23 (2019). Prieiga per internetą:

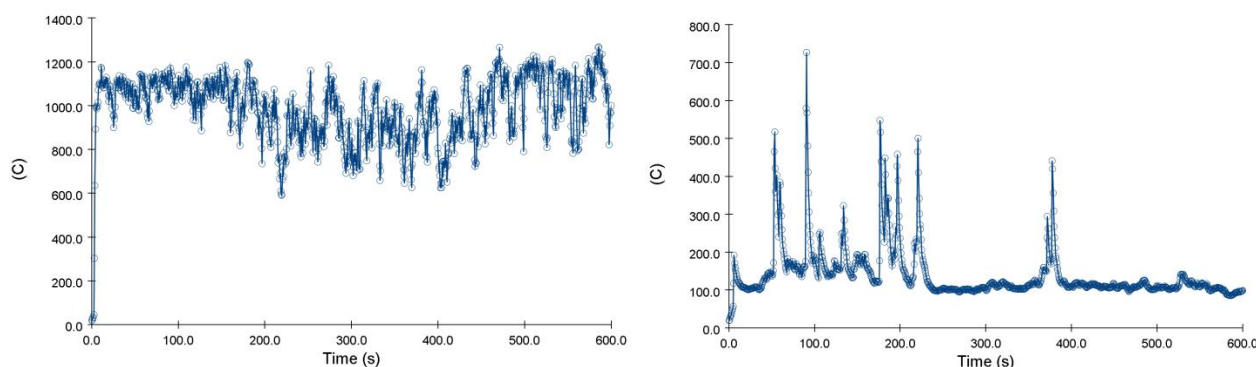
<https://wvua23.com/update-hugh-thomas-bridge-crash-victim-identified/>

Pavyzdyje su tilto imitacija apskaičiuotos temperatūrų ir šiluminės spinduliuotės reikšmės

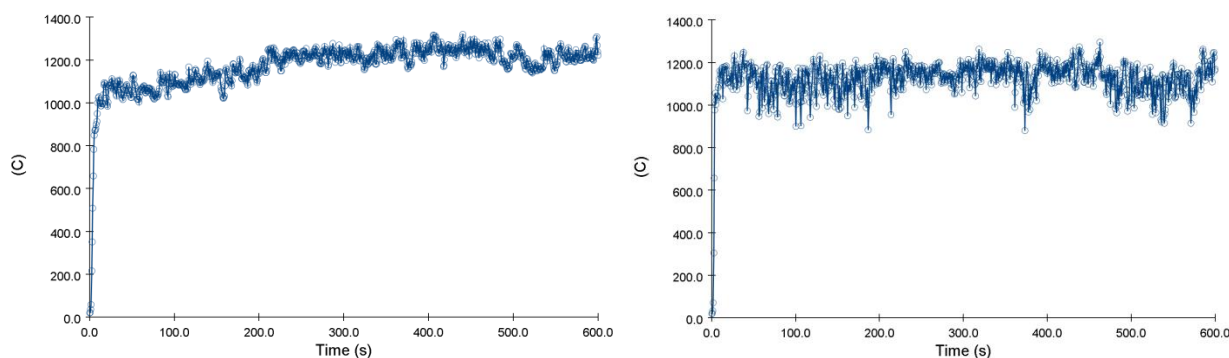
Šiame priede pateikti grafikai, vaizduojantys temperatūros ir šiluminės spinduliuotės kitimą, gauti FDS programa modeliuojant gaisrą. Temperatūros ir spinduliuotės reikšmės gautos sprendžiant uždavinį, kuriame nagrinėtas tilto perdangos imitacija betoninės plokštės pagalba (2.3.2 sk.). Tiriant šios plokštės įtaką telkininio gaisro poveikiui jis buvo modeliuotas su plokšte ir be jos. Abiem atvejais buvo naudota po devynias temperatūros ir spinduliuotės termoporas. (2.24 ir 2.25 pav.). Priedo medžiaga padalinta į temperatūros kitimo grafikus ir šiluminės spinduliuotės kitimo grafikus. Grafikai pateikti poromis, lyginant atvejus su plokšte ir be jos. Grafikai išrikiuoti pagal termoporų numerius.

C.1. Temperatūros kitimo grafikai

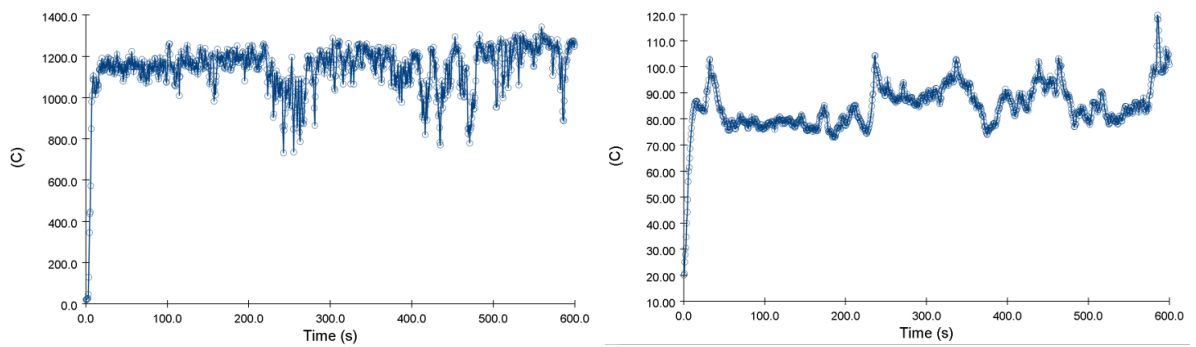
Devyniomis termoporomis, parodytomis 2.24 pav., per 600 s trunkantį, kompiuteriu imituojamą gaisrą išmatuotos temperatūros reikšmės pateiktos C.1.1 – C.1.9 pav. Pateiktieji grafikai suformuoti FDS programos pagalba.



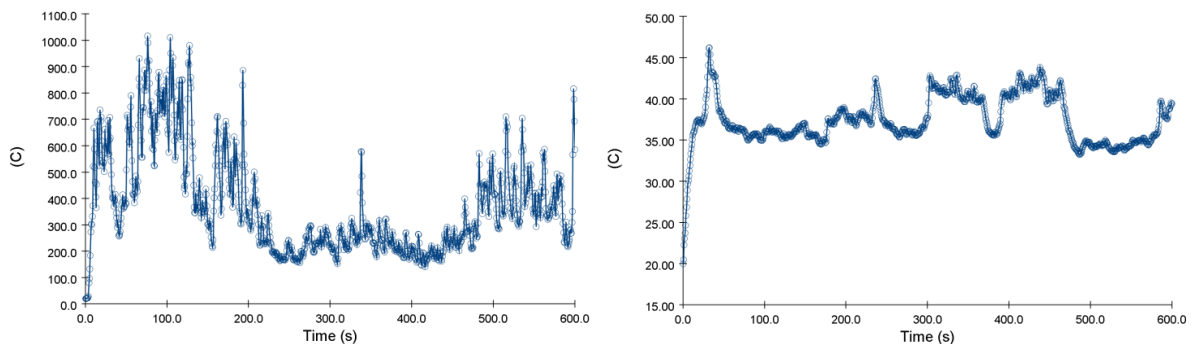
C.1.1 pav. Su FDS programa sudaryti 1-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



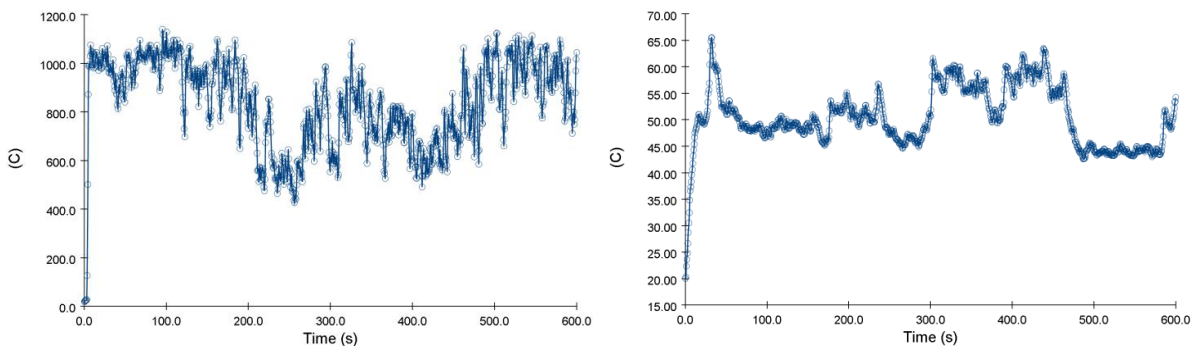
C.1.2 pav. Su FDS programa sudaryti 2-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



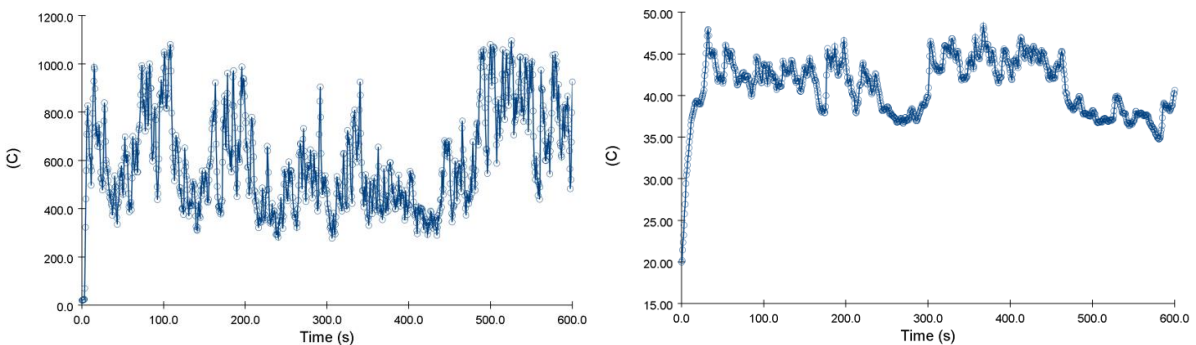
C.1.3 pav. Su FDS programa sudaryti 3-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



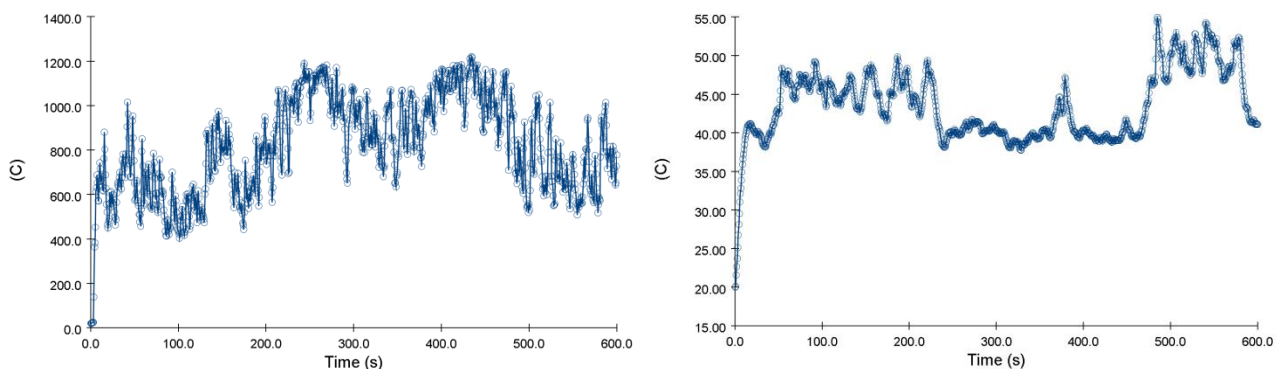
C.1.4 pav. Su FDS programa sudaryti 4-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



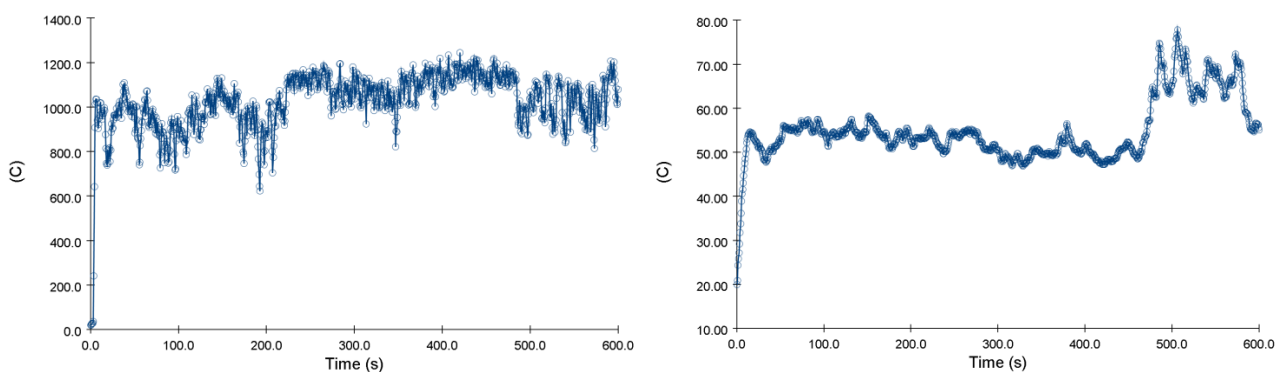
C.1.5 pav. Su FDS programa sudaryti 5-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



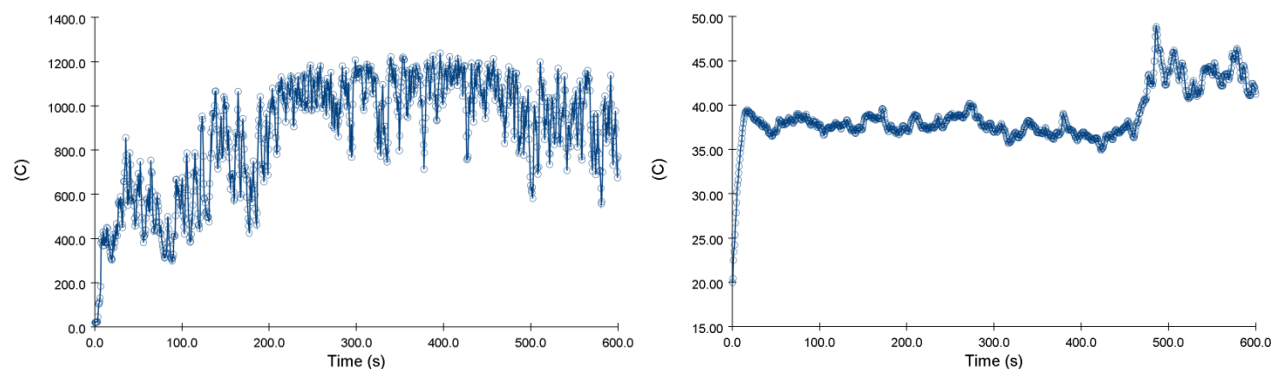
C.1.6 pav. Su FDS programa sudaryti 6-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



C.1.7 pav. Su FDS programa sudaryti 7-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



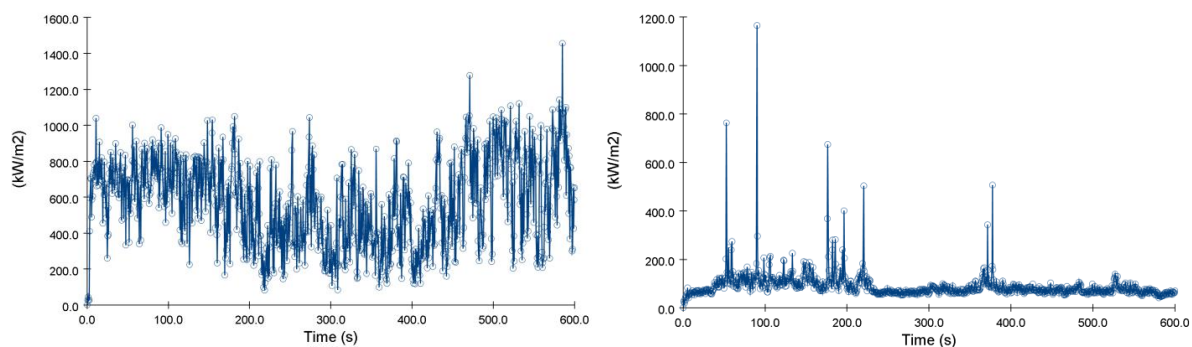
C.1.8 pav. Su FDS programa sudaryti 8-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



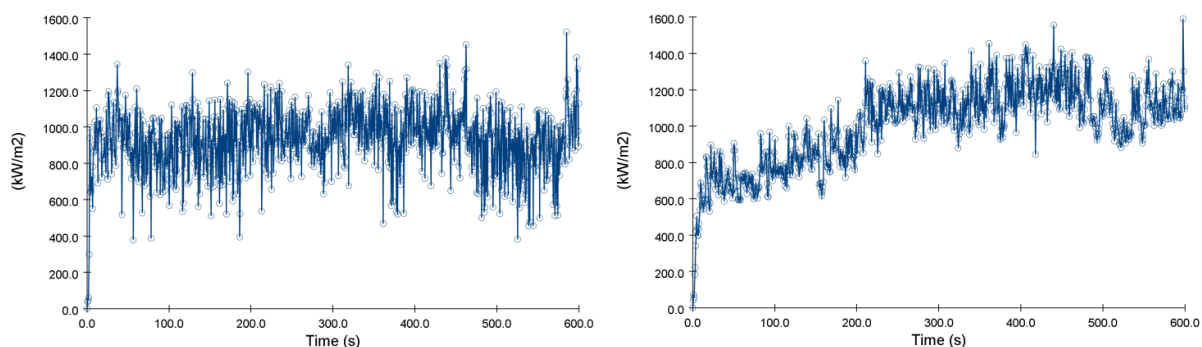
C.1.9 pav. Su FDS programa sudaryti 9-os termoporos matuotos temperatūros reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)

C.2. Šiluminės spinduliuotės kitimo grafikai

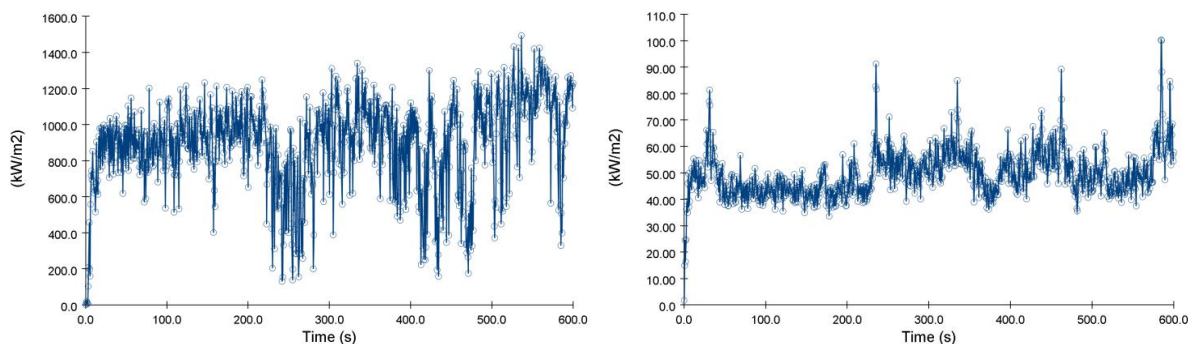
Devyniomis termoporomis, parodytomis 2.24 pav., išmatuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės pateiktos C.2.1 – C.2.9 pav. Jos gautos kompiuteriu imituojant 600 s trunkantį gaisrą. Grafikai sudaryti skaičiuojant su FDS programa.



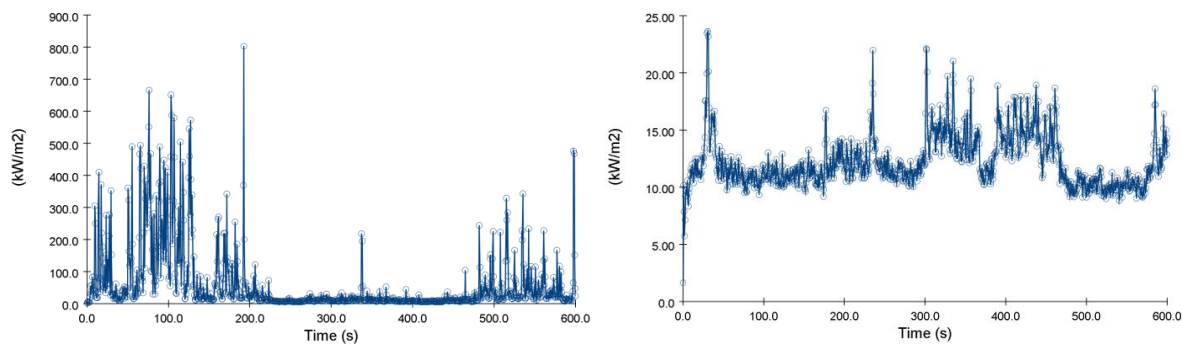
C.2.1 pav. Su FDS programa sudaryti 1-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



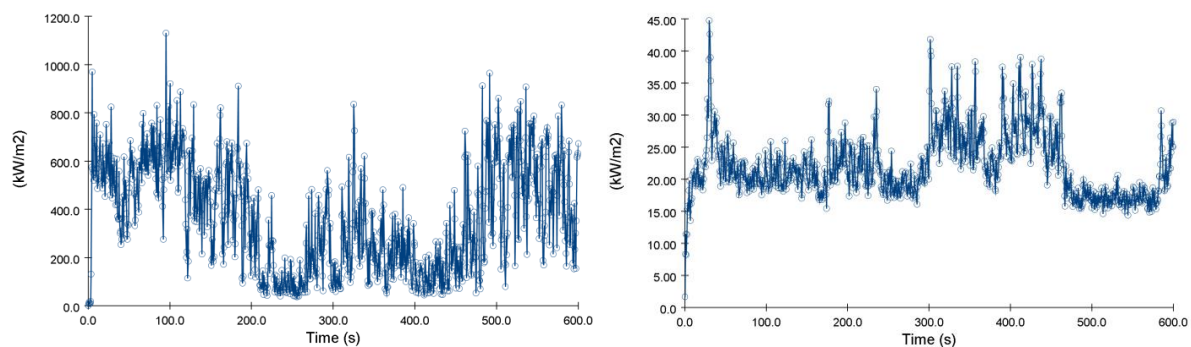
C.2.2 pav. Su FDS programa sudaryti 2-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



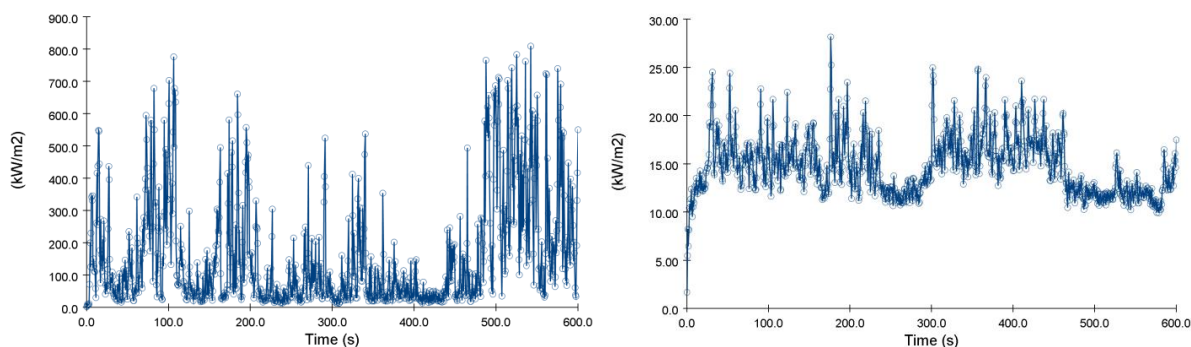
C.2.3 pav. Su FDS programa sudaryti 3-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



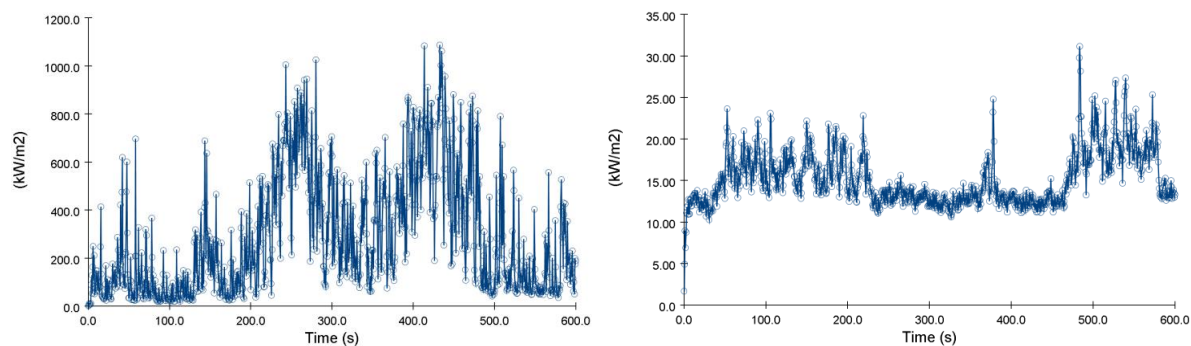
C.2.4 pav. Su FDS programa sudaryti 4-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



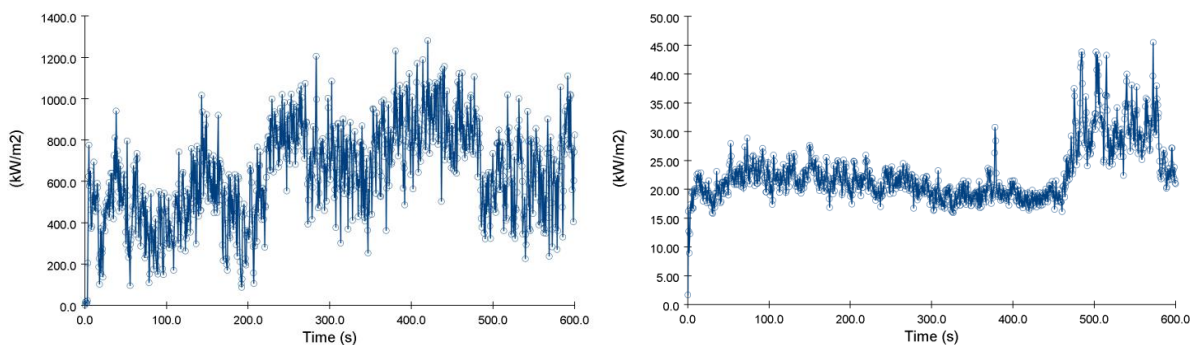
C.2.5 pav. Su FDS programa sudaryti 5-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



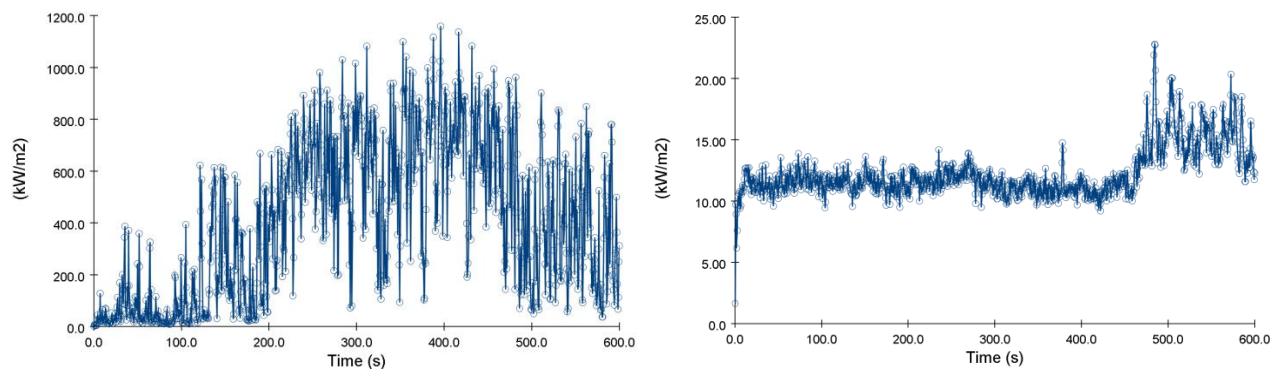
C.2.6 pav. Su FDS programa sudaryti 6-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



C.2.7 pav. Su FDS programa sudaryti 7-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



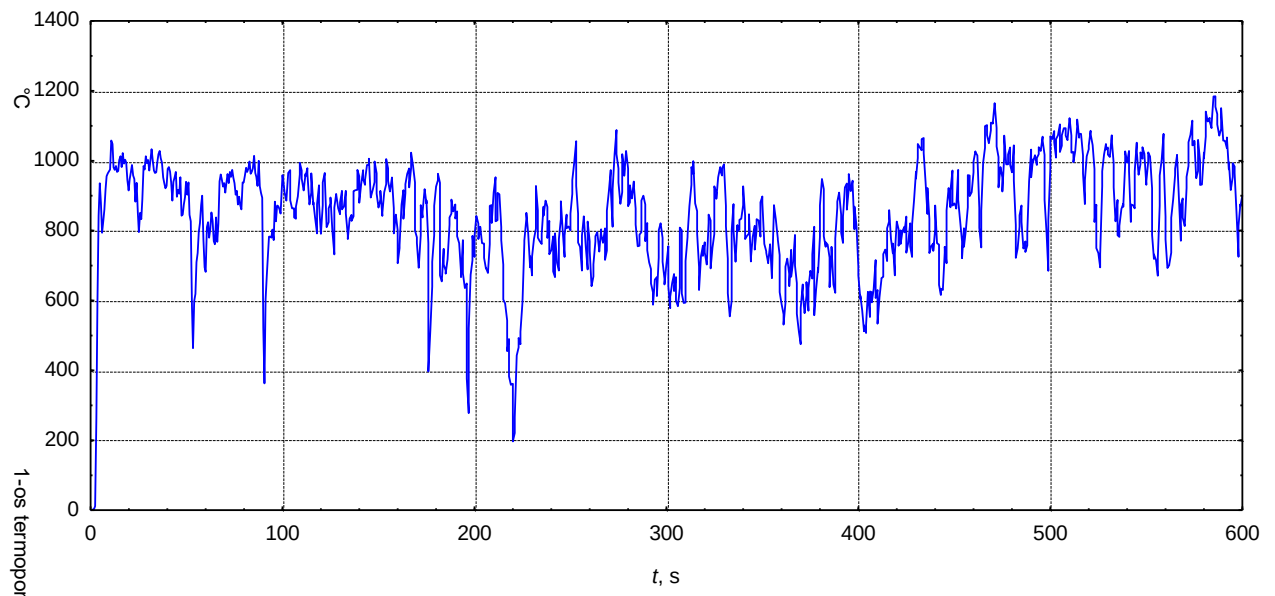
C.2.8 pav. Su FDS programa sudaryti 8-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)



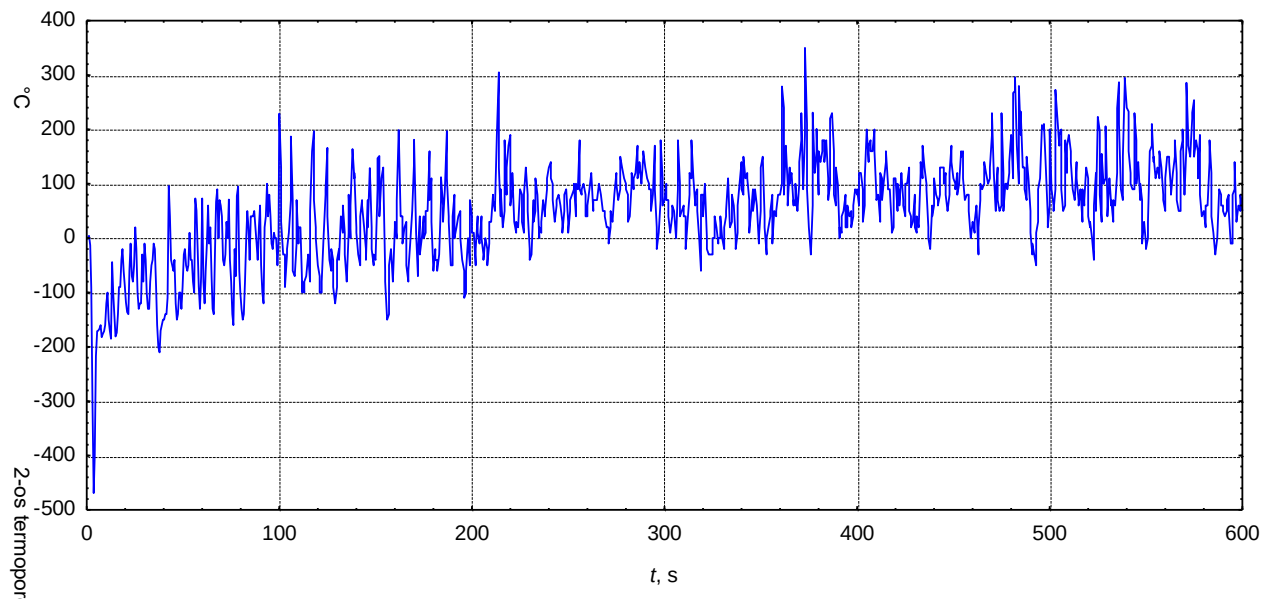
C.2.9 pav. Su FDS programa sudaryti 9-os termoporos matuotos šiluminės spinduliuotės reikšmės modeliuojant su plokšte (grafikas kairėje) ir be plokštės (grafikas dešinėje)

C.3. Temperatūrų skirtumų kitimo grafikai

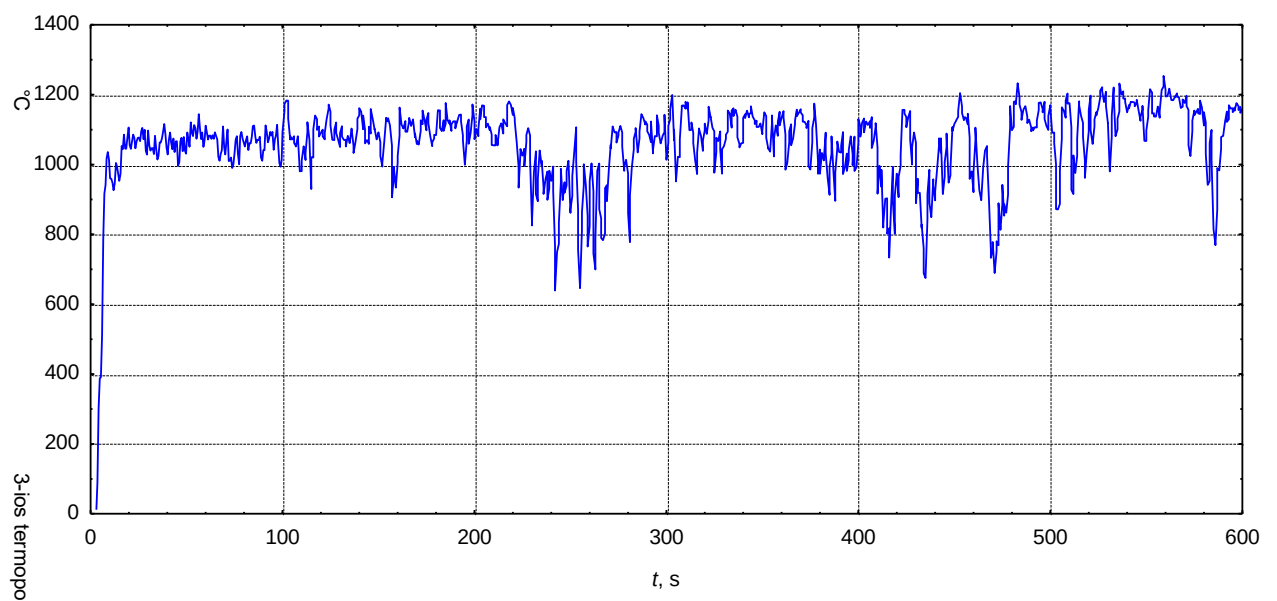
Devyniomis termoporomis, parodytomis 2.24 pav., išmatuotų temperatūrų, gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, skirtumų grafikai yra pateikti C.3.1 – C.3.9 pav.



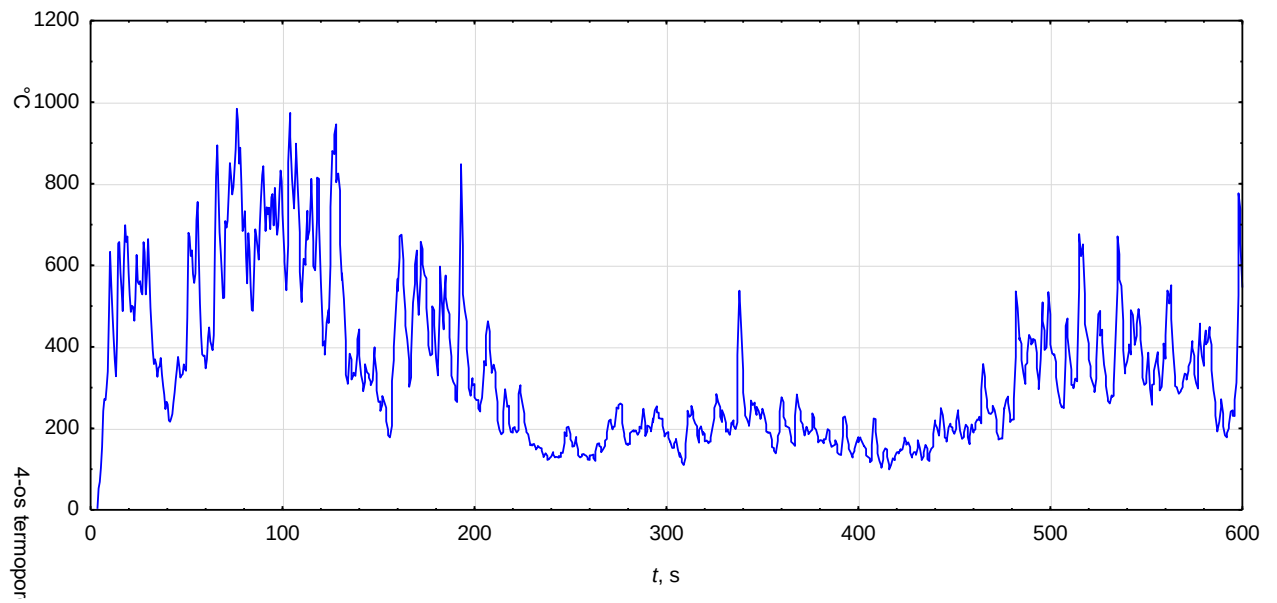
C.3.1 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 1–ą termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



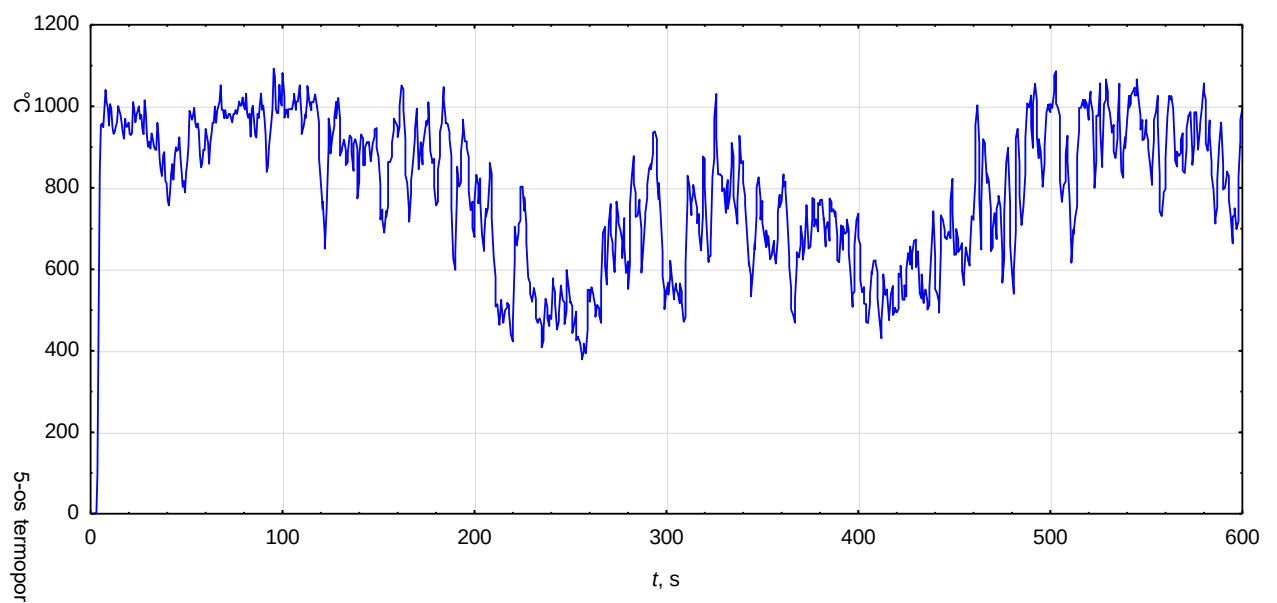
C.3.2 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 2–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



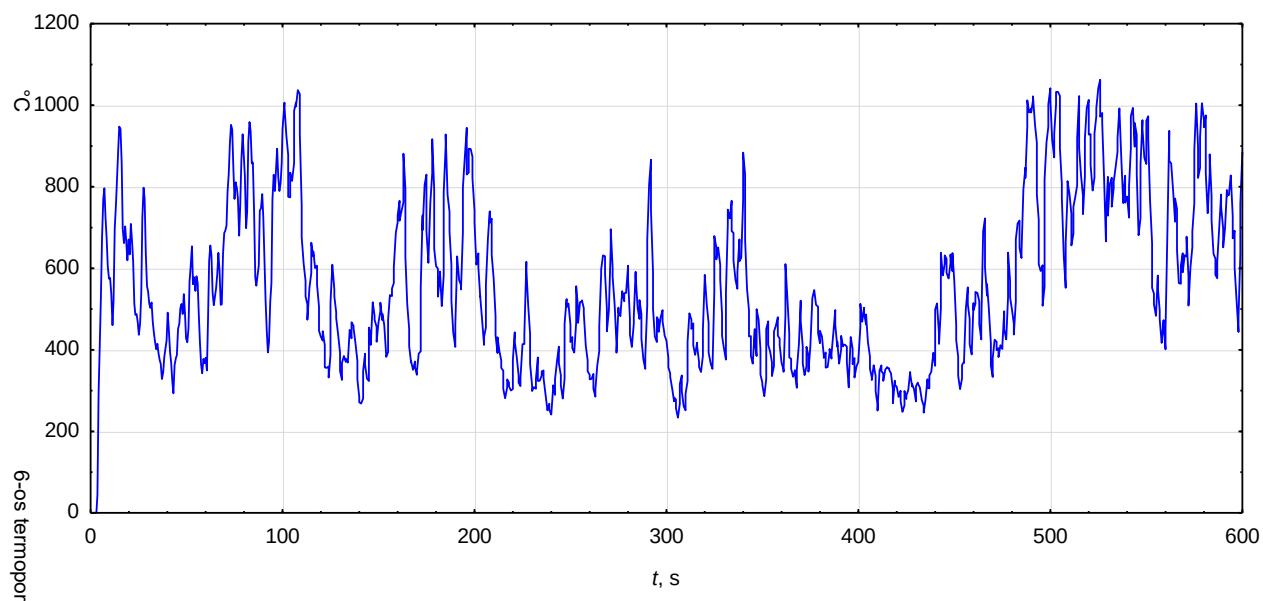
C.3.3 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 3–ia termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



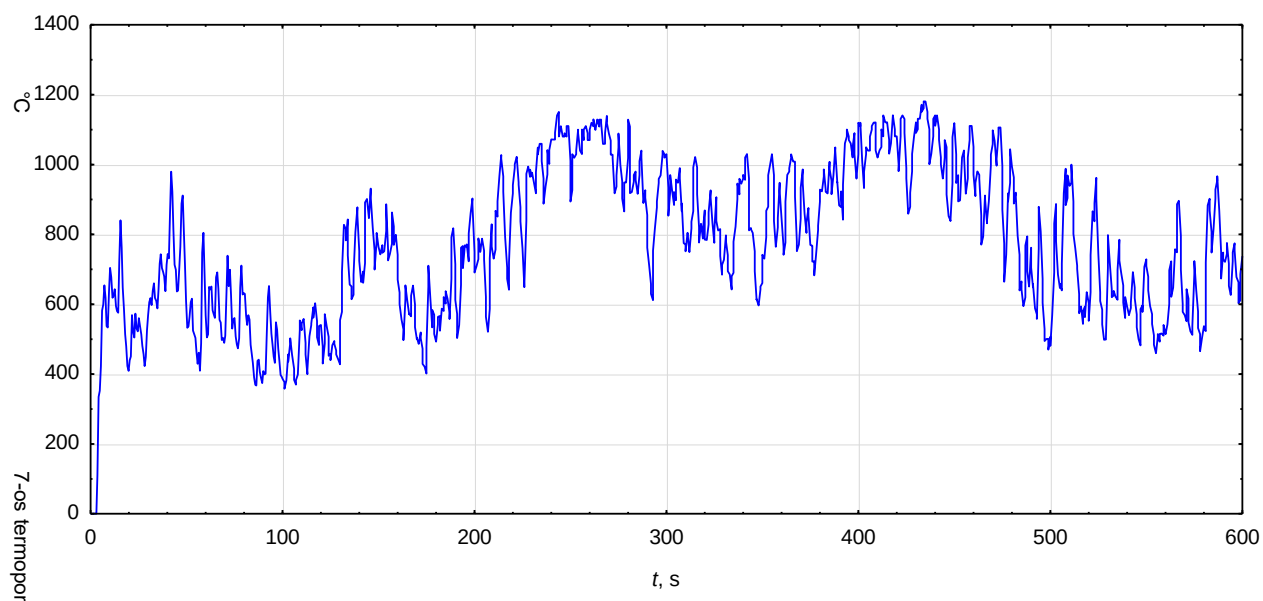
C.3.4 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 4–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



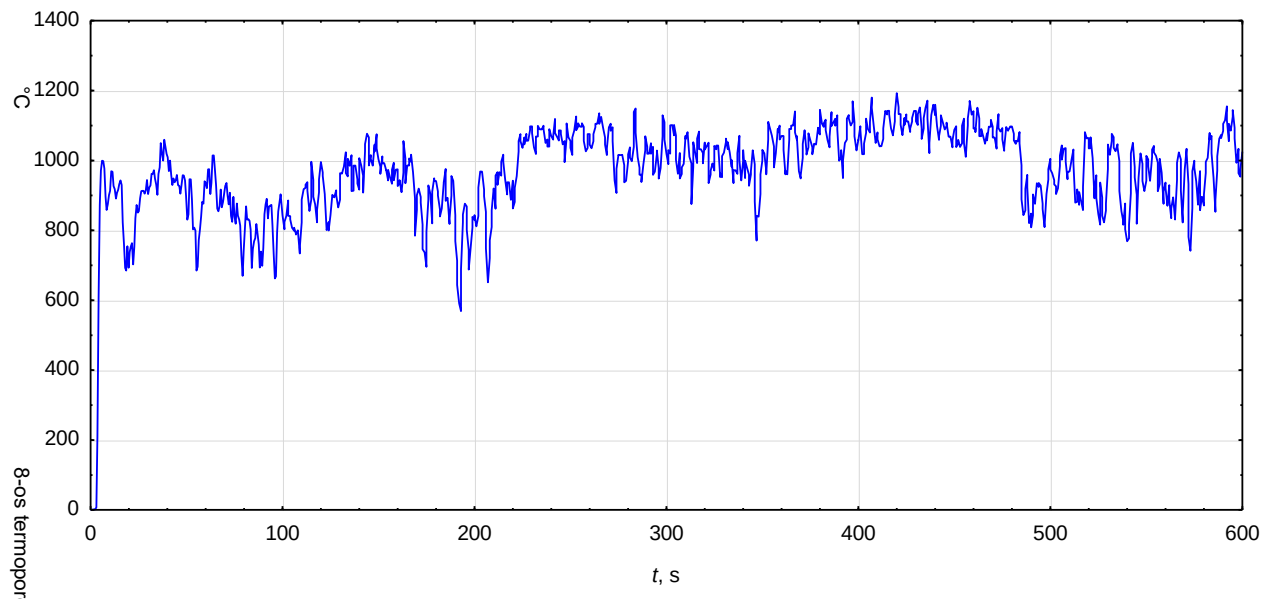
C.3.5 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 5–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



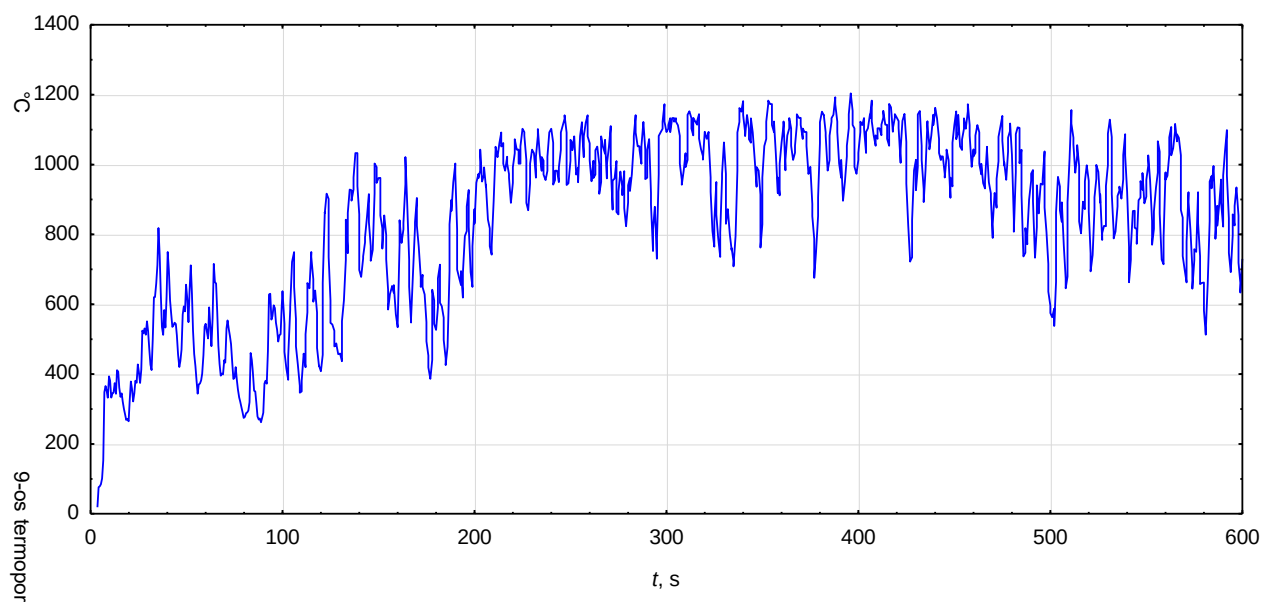
C.3.6 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 6–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



C.3.7 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 7–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



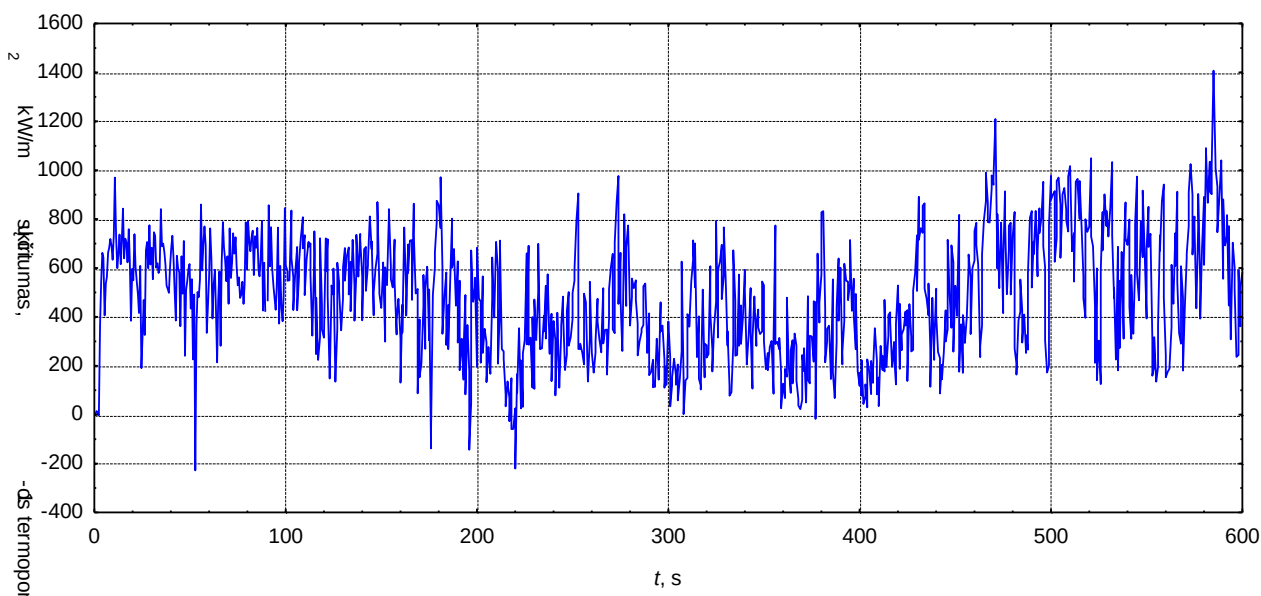
C.3.8 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 8–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



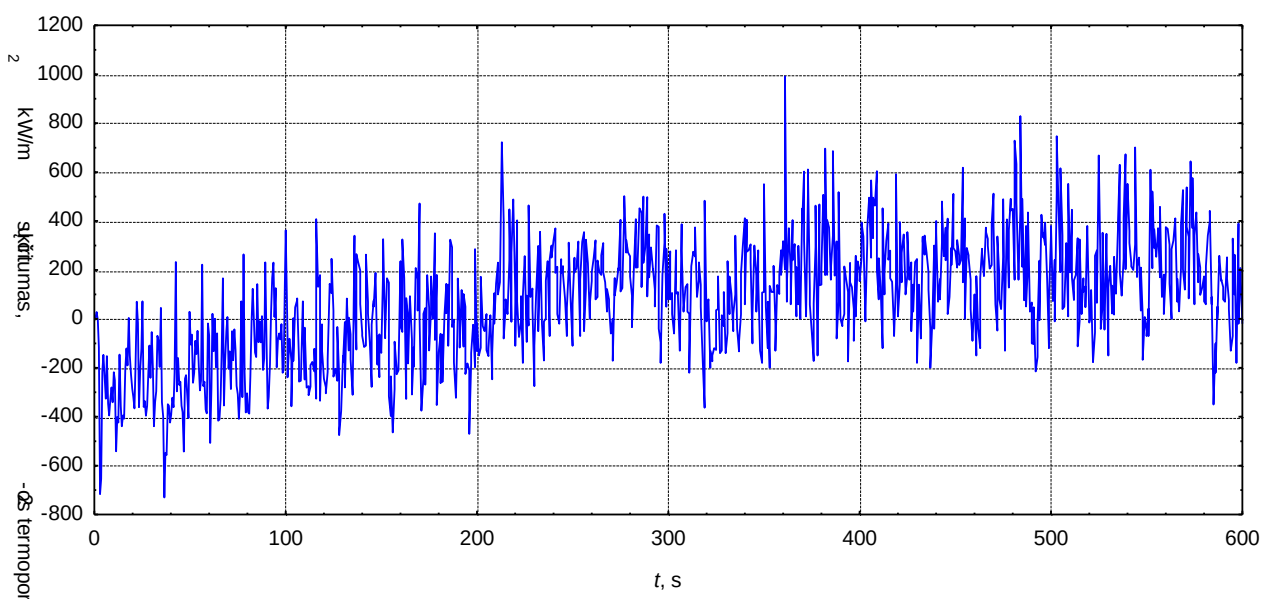
C.3.9 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 9–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas

C.4. Spinduliuočių skirtumų kitimo grafikai

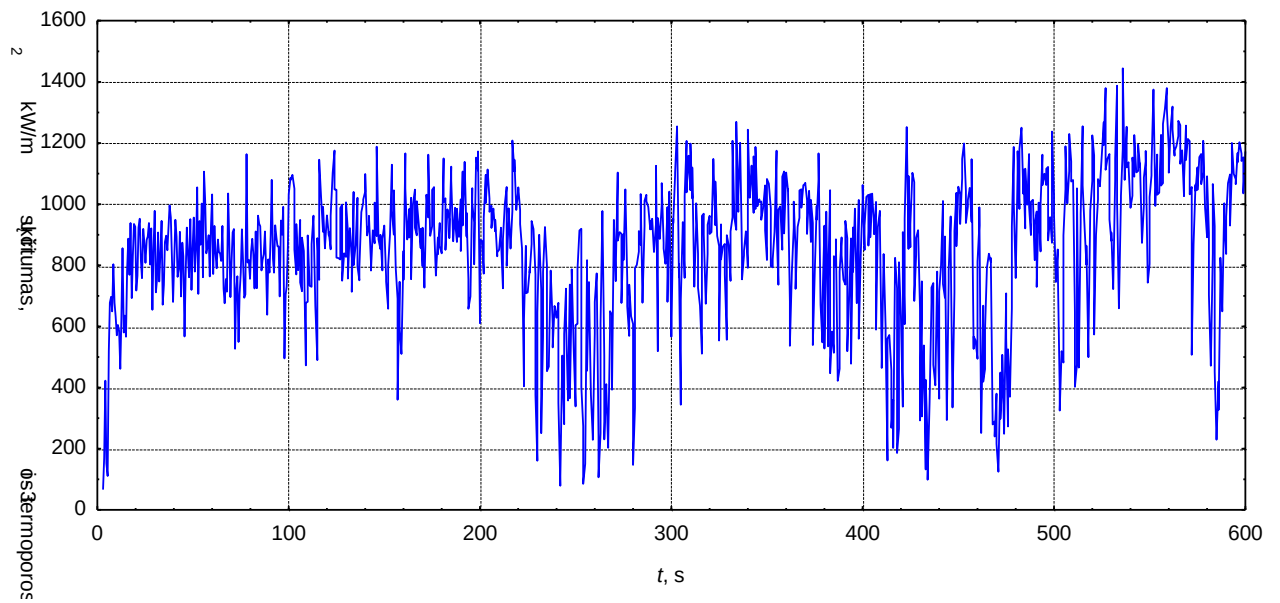
Devyniomis termoporumis, parodytomis 2.24 pav., išmatuotų spinduliuočių, gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, skirtumų grafikai yra pateikti C.4.1 – C.4.9 pav.



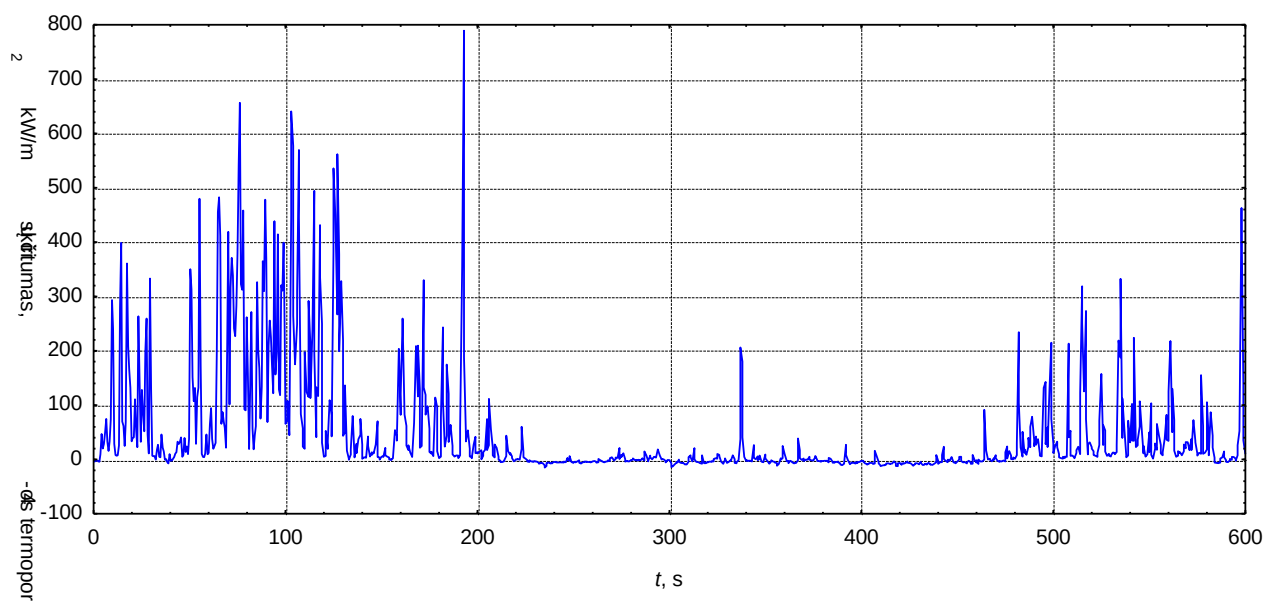
C.4.1 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 1–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



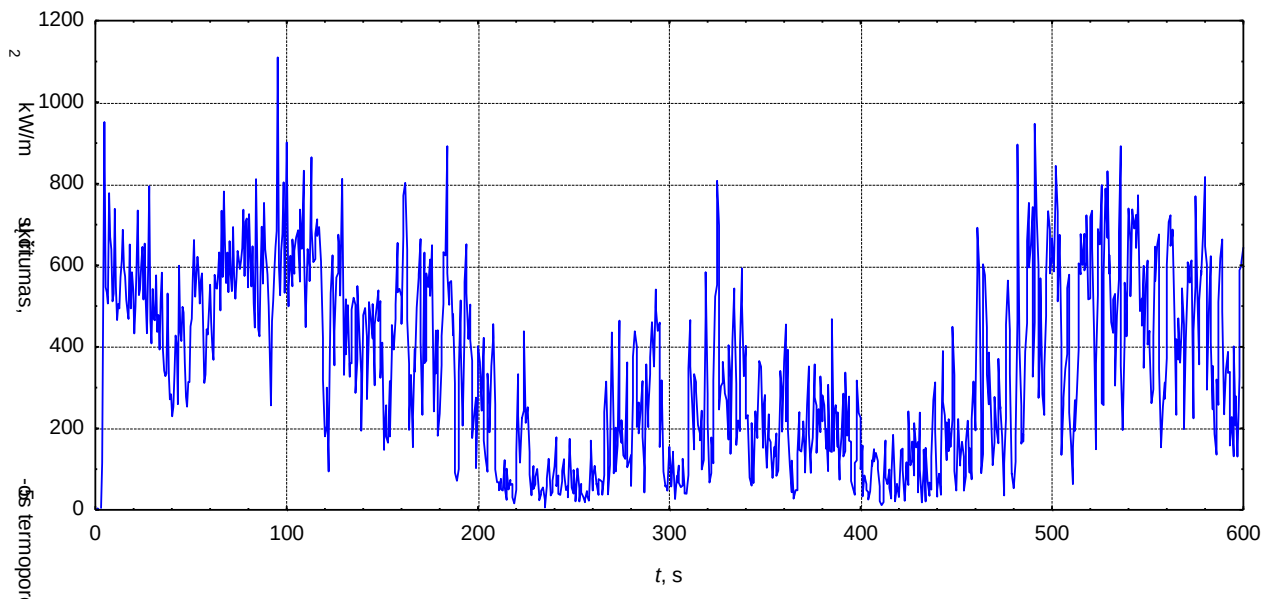
C.4.2 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 2–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



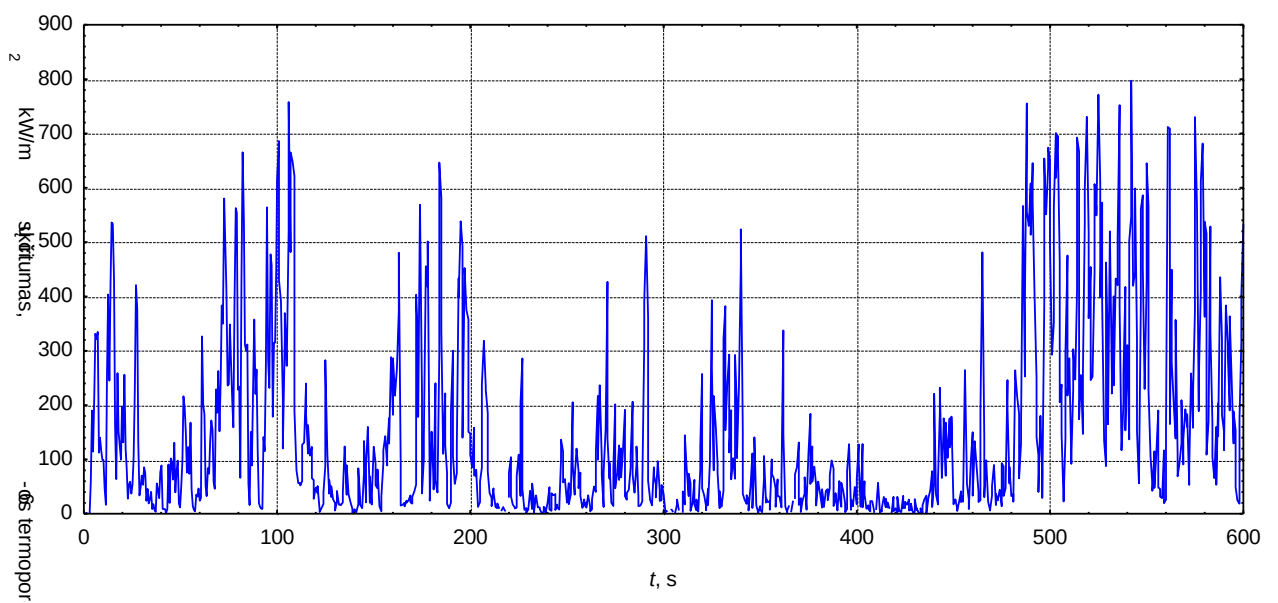
C.4.3 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 3–ia termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



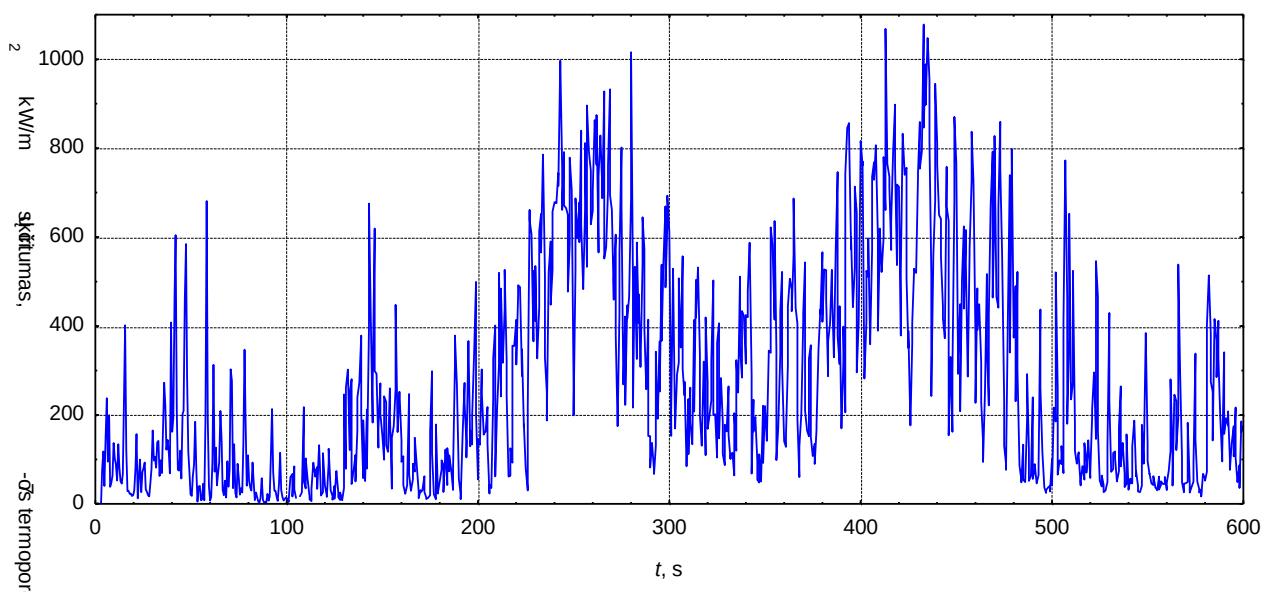
C.4.4 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 4–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



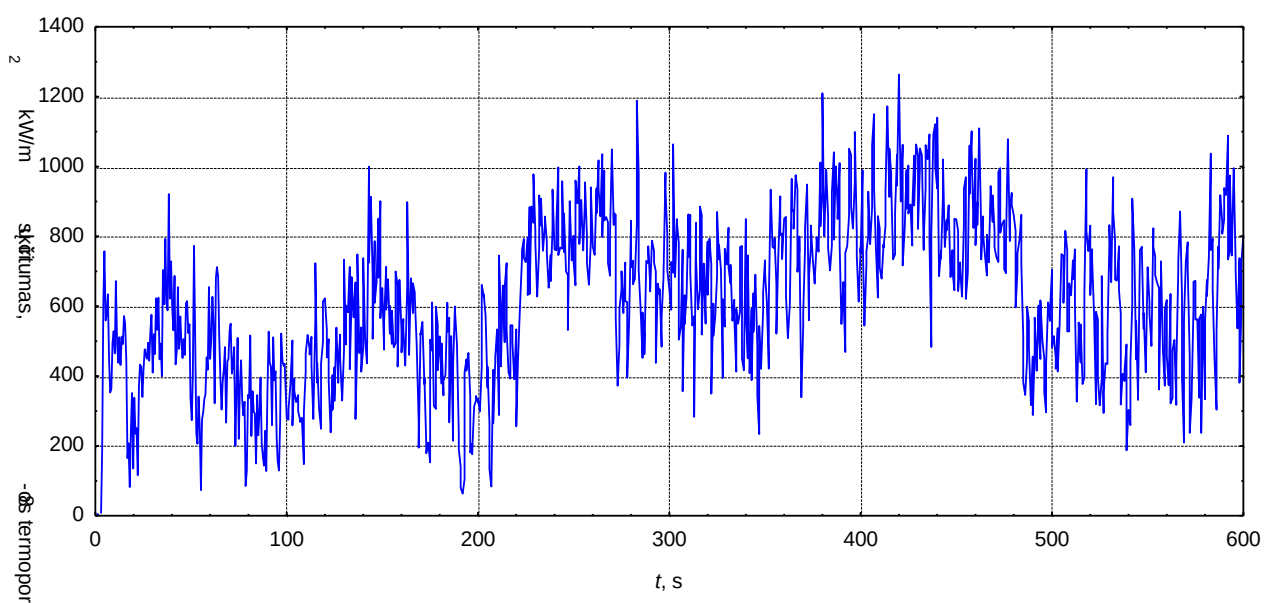
C.4.5 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 5–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



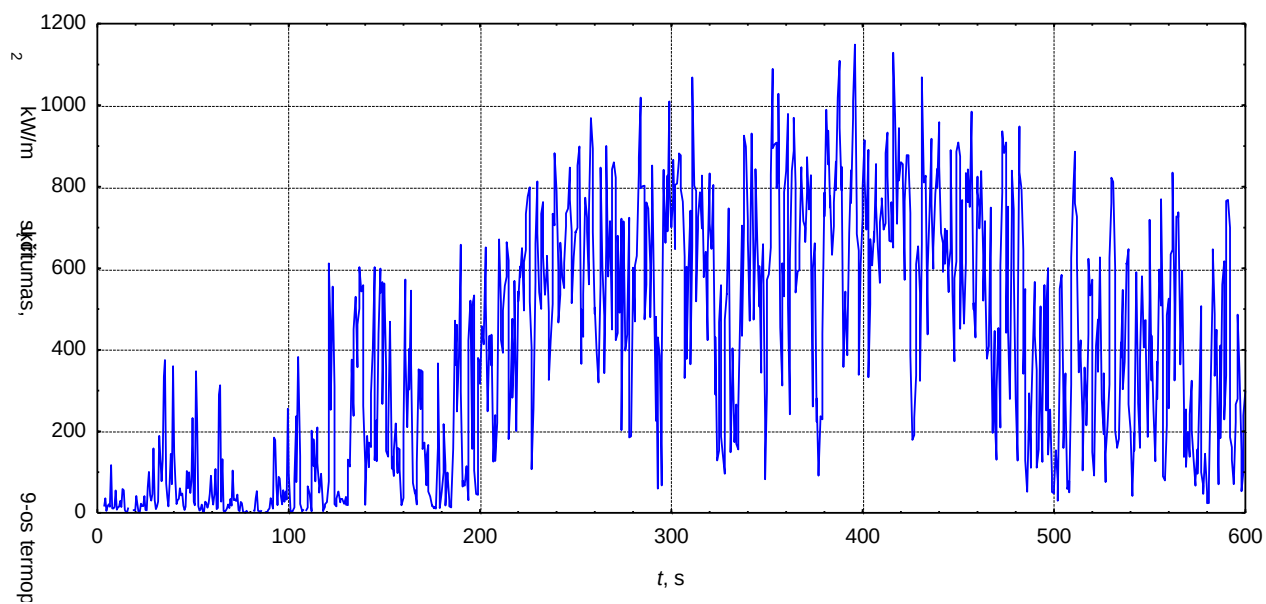
C.4.6 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 6–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



C.4.7 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 7–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



C.4.8 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 8–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas



C.4.9 pav. Temperatūrų skirtumų, gautų matuojant 9–a termopora ir gaisrą modeliuojant su plokšte ir be plokštės, grafikas

LITERATŪRA

- Allender P. J. (1979). Fire Safety Analysis for Public Mass Transit Trains. *Fire and Materials*, 3(2), 84–90.
- 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.
- AGA, (1974). *LNG Safety Research Program*. Report IS 3–1. Huston: American Gas Association.
- Beyler, C. L. (2015). Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires. In M. J. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed. (pp. 2591–2663). New York etc.: Springer.
- Beyler, C. L. (2015). Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires. In M. J. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed. (pp. 2591–2663). New York etc.: Springer.
- Casal, J. (2008). *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. Amsterdam: Elsevier.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics* (3 ed.). New York: Wiley.
- Emori, I. & Saito, K. (1983). Scaling correlation and smoke observations of oil tank fires under wind-blown conditions. In *Chemical and physical process in combustion, fall technical meeting* (1–4)., Providence: Combustion Institute/Eastern States Section.
- Federal Aviation Administration, Department of Transportation. (2000). *Federal Aviation Administration System Safety Handbook*. Washington: FAA.
- Garlock, M., Paya-Zaforteza, I., Kodur, V., Gu, L. (2012). Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies. *Engineering Structures*, 35(1), 89–98.
- Heskestad, G. (1983). Luminous Height of Turbulent Diffusion Flames. *Fire Safety Journal*, 5(2), 103–108.
- Heskestad, G. (1981). Peak Gas Velocities and Flame Heights of Buoyancy–Controlled Turbulent Diffusion Flames. In: *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: Combustion Institute, 951–960.
- Karlsson, B. and Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press.
- Mangialavori, G. & Rubino, F. (1992). In: *Seventh International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in Process Industry*. Italy: Taorina.
- Loy, Y. Y, Rangaiah, G. P., Lakshminarayanan, S. (2018). Surrogate modelling of net radiation flux from poolfires in a hydrocarbon storage facility. *Process Safety and Environmental Protection*, 114 (February), 269–309.
- Marker, T., Sarkos, C. and Hill, R. (1997). Water spray system development and evaluation for enhanced postcrash fire survivability and in-flight protection in cargo compartments. In *Proceedings Aircraft Fire Safety, AGARD–CP–587* (12–1–12.12). Neuilly Sur Seine: Group for Aerospace Research and Development Conference Proceedings.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W. et al. (2010). *Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018–5. Gaithersburg, MD: NIST.
- McGrattan, K. B., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. (2019). *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018-1. Washington: NIST.
- Modarres M. (2006). *Risk Analysis in Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Mudan, K. S. (1984). Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires. *Progress Energy Combustion Science*, 10(1), 59–80.
- Munoz, M., Arnaldos, J & Planas C (2004). Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame*, 139(4), 263–277.
- Moorhouse, J. (1982). Scaling Criteria for Pool Fires Derived from Large–Scale Experiments. In: *Institution of Chemical Engineers Symposium*, 71, 165–179.
- National Fire Protection Association. (2006). *Life Safety Code*. Quincy: NFPA.

- Novozhilov, V. (2001). Computational fluid dynamics modelling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27(5), 611–666.
- O’Neil, W. A. (1994). *Opening Address. In Conference Proceedings Fire Safety on Ships Developments into the 21st Century*. UK: London. Institute of Marine Engineers.
- Palazzi, E., Caviglione, C., Reverberi, A. P., Fabiano, B. (2017). A short-cut analytical model of hydrocarbon poolfire of different geometries, with enhanced viewfactor evaluation. *Process Safety and Environmental Protection*, 110 (August), 89–101.
- Prasad, K. , Li, C., Kailasanath, K., Ndubizu, C., Ananth, R., Tatem, P.A. (1999). Numerical modelling of methanol liquid pool fires. *Combustion Theory and Modelling*, 3(7), 743–768.
- Prichard, M., Binding, T. (1992). In: *Symposium on Major Hazards Onshore and Offshore*. London: Institution of Chemical Engineers, p. 491–505.
- Quiel, S. E., Yokoyama, T., Bregman, L. S., Mueller, K. A., Marjanishvili, Sh. M. (2015). A streamlined framework for calculating the response of steel-supported bridges to open-air tanker truck fires. *Fire Safety Journal*, 73 (April), 63–75.
- Rengel, B., Mata, C., Pastor, E., Casal, J., Planas, E. (2018). A priori validation of CFD modelling of hydrocarbon pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56(1), 18–31.
- Taylor, R., Krishna, R. (1993). *Multicomponent Mass Transfer*. New York: Wiley.
- Thomas, P. (1965). *Fire Spread in Wooden Cribs, Part III, The Effect of Wind*. Fire Research Note 600. Borehamwood: Fire Research Station.
- Thomas, P. H. (1962). *The Size of Flames from Natural Fires*, Ninth Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 844–859.
- Shokri M. & Beyler, C. L. (1989). Radiation from Larger Pool Fires. *SFPE Journal of Fire Protection Engineering*, 4(1), 141–150.
- Vasanth, S., Tauseef, S. M., Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2014). Multiple pool fires: occurrence, simulation, modeling and management, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 29(May), 103–121.
- Vasanth, S., Tauseef, S. M., Abbasi T., Abbasi, S. A. (2015). CFD simulation of pool fires situated at differing elevations, *Process Safety and Environmental Protection*, 94(1), 89–95.
- Vasanth, S., Tauseef, S. M., Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2017). Simulation of multiple pool fires involving two different fuels, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 48(July), 289–296.
- Wagner., W., Pruss., A. (1993). International equations for the saturation properties of ordinary water substance. Revised according to the international temperature scale of 1990. *Journal of Chemical Reference Data*, 22(3), 783–787.
- Wark, K. (1988). *Generalized Thermodynamic Relationships*. New York: McGraw-Hill.
- Yeoh, G. H., Yuen, K. K. (2009). *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering. Theory, Modelling and Practice*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.