

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Jurgita ŠAKĖNAITĖ

DAUGIATIKSLĖS ANALIZĖS  
IR RIZIKOS SKAIČIAVIMO DERINIMAS  
VERTINANT PASTATŲ  
GAISRINĘ SAUGĄ

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.  
Mokslinis vadovas

**prof. dr. Egidijus Rytas VAIDOGAS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

**Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:**

Pirmininkas

**prof. dr. Romualdas KLIUKAS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

**dr. Raimondas BLIŪDŽIUS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

**prof. habil. dr. Henrikas PRANEVIČIUS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

**prof. habil. dr. Leonas USTINOVIČIUS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

**prof. habil. dr. Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Oponentai:

**prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

**dr. Zenonas TURSKIS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2012 m. gruodžio 10 d. 14 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto Senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2012 m. lapkričio 9 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 2027-M mokslo literatūros knyga.

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Jurgita ŠAKĖNAITĖ

**COMBINED APPLICATION OF MULTI-  
ATTRIBUTE SELECTION AND RISK  
ANALYSIS TO THE ASSESSMENT OF  
BUILDING FIRE SAFETY**

**SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION**

**TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
CIVIL ENGINEERING (02T)**



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

**Prof Dr Egidijus Rytas VAIDOGAS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

**The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Civil Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:**

Chairman

**Prof Dr Romualdas KLIUKAS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Members:

**Dr Raimondas BLIŪDŽIUS** (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

**Prof Dr Habil Henrikas PRANEVIČIUS** (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Informatical Engineering – 07T),

**Prof Dr Habil Leonas USTINOVIČIUS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

**Prof Dr Habil Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Opponents:

**Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA** (Vilnius University, Technological Sciences, Informatical Engineering – 07T),

**Dr Zenonas TURSKIS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 2 p. m. on 10 December 2012.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 9 November 2012.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Jurgita Šakėnaitė, 2012

## **Įvadas**

### ***Problemos formulavimas***

Gaisrinė pastato sauga yra neatsiejama jo sėkmingos eksploatacijos sąlyga. Jos užtikrinimas nėra paprastas uždavinys ir jį reikia spręsti atsižvelgiant į ekonominius, technologinius, psichologinius, socialinius tikslus. Norint palengvinti sprendimų, susijusių su pastatais, priėmimą, atsižvelgiant į pastatų gaisrinę saugą ir kitus jų projektavimo bei eksploataavimo aspektus, reikia pasitelkti daugiaticklės analizės metodologiją. Tam reikia nustatyti analizės rodiklius, kiekybiškai išreiškiančius pastatų gaisrinės saugos laipsnį ir įvertinančius gaisrinės saugos priemonių savybes. Tokiais rodikliais reikia papildyti daugiaticklės analizės sprendimų matricą, apibūdinančią analizuojamą pastatą. Žinant, kad sprendžiant saugos užtikrinimo uždavinius, susiduriama su tikimybinio neapibrėžtumų modeliavimo būtinybe, daugiaticklės analizės uždavinių sprendimas, atsižvelgiant į gaisrinę saugą, turi būti papildytas metodu, kuris tinkamai įvertina matematinius neapibrėžtumų modelius.

### ***Darbo aktualumas***

Darbo aktualumas išplaukia iš opios pastatų gaisrinės saugos problemos. Nepaisant visų pastangų, pastatų ūkyje vyksta daug gaisrų, kai kada sukeliančių sunkius padarinius. Šiuolaikinės gaisrinės saugos priemonės yra brangios, o jų patikimumas nėra nepriekaištingas. Bendroji saugos kultūra, nuo kurios tiesiogiai priklauso gaisrų išvengimo sėkmė, daugelyje šalių taip pat nėra nepriekaištinga. Trūksta kompleksinio požiūrio dėl pastatų priimant sprendimus, kuriais būtų atsižvelgiama į dažnai prieštaraujančius rodiklius, nuo kurių vienaip ar kitaip priklauso gaisrinė sauga. Trūksta ir matematinių modelių, kurie leistų spręsti gaisrinės saugos problemas kartu su kitomis, su sauga nebūtinai susijusiomis, pastatų projektavimo ir naudojimo problemomis.

### ***Tyrimų objektas***

Tyrimų objektas yra pastatų gaisrinė sauga ir gaisro rizikos valdymas. Matematiniu požiūriu, tyrimo objektas yra gaisro rizikos vertinimo ir daugiaticklės analizės modelių derinimas.

### ***Darbo tikslas***

Darbo tikslas – patobulinti kiekybinį pastatų gaisrinės saugos ir rizikos vertinimą, įtraukiant gaisrinės saugos (rizikos) rodiklius į daugiaticklės analizės uždavinius.

### ***Darbo uždaviniai***

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti, kokiais kiekybiniais rodikliais būtų galima išreikšti pastato gaisrinę saugą arba riziką.
2. Suformuluoti ir išspręsti labiausiai tikėtinus daugiatiakslės analizės uždavinius, kuriuose atsižvelgiama į gaisrinę saugą ir kuriuos galima išspręsti turimais analizės metodais.
3. Integruoti kiekybinio gaisro rizikos vertinimo rezultatus į daugiatiakslę analizę.
4. Sukurti daugiatiakslės analizės metodą, kuris leistų spręsti šios analizės uždavinius, kai visi ar kai kurie sprendimų matricos elementai yra atsitiktiniai dydžiai.

### ***Tyrimų metodika***

Gaisrinės saugos, kiekybinio rizikos vertinimo ir daugiatiakslės analizės metodų derinimas, siekiant juos sujungti į vieną sprendimų priėmimo modelį. Pasitelktas stochastinis modeliavimas, sprendžiant daugiatiakslės analizės uždavinius su atsitiktine sprendimų matrica. Taikytas kompiuterinis gaisro proceso imitavimas dviejų zonų modeliu. Šis imitavimas naudotas daugiatiakslės analizės uždavinio gaisrinės saugos rodikliams nustatyti.

### ***Mokslinis darbo naujumas***

Mokslinis darbo naujumas yra daugiatiakslės analizės metodų ir gaisrinės saugos skaičiavimo derinimas, vertinant pastatų gaisrinę saugą. Atliekant šį derinimą, buvo patobulintas sprendimų priėmimas įvairiais pastatų statybos ir saugaus eksploatavimo aspektais. Sprendžiant daugiatiakslės analizės uždavinius, kuriuose atsižvelgiama į pastatų gaisrinę saugą, siūlomi tokie naujumo elementai:

1. Gaisro rizikos indeksų įtraukimas į daugiatiakslės analizės uždavinį, kuris sprendžia pasirinkimą tarp pastatų, individualaus pastato gaisrinės saugos sistemų, alternatyvių projektuojamo pastato architektūrinių sprendimų.
2. Gaisro rizikos išraiškos elementų įtraukimas į daugiatiakslės analizės sprendimų matricą. Rizika yra labai išsami gaisrinės saugos charakteristika, todėl daugiatiakslės analizės problemos, kuriose yra įtraukti gaisro rizikos įverčiai, leidžia detaliai nusakyti pastato gaisrinės saugos būklę.
3. Daugiatiakslės analizės uždavinio aprašymas ir sprendimas, kai visi ar kai kurie sprendimo matricos elementai yra atsitiktiniai dydžiai. Tokius uždavinius galima spręsti, atliekant neapibrėžtumų transformavimą,

pasitelkus stochastinį modeliavimą. Atsitiktinės sprendimo matricos gali būti sudaromos, naudojant gaisro rizikos išraiškos elementus, kurie yra neapibrėžti epistemine prasme. Šis neapibrėžtumas yra išreikiamas tikimybiniais skirstiniais, parenkamais kiekybinės rizikos analizės metodais.

### ***Darbo rezultatų praktinė reikšmė***

Gauti tyrimų rezultatai gali būti taikomi priimant efektyvius ir kompleksiškus sprendimus, susijusius su pastatų gaisrine sauga. Tyrimų rezultatai leis palengvinti sprendimų priėmimą pastatų pirkėjams ir savininkams, draudikams, architektams (konstruktoriams), gaisrinės saugos sistemų gamintojams. Sprendimai gali būti susiję su alternatyviais gaisrinės saugos sprendimais, pasirinkimu tarp pastatų su skirtingu gaisrinės saugos lygiu, apsisprendimu naudoti vieną iš galimų statybinės pramonės produktų su skirtingomis gaisrinėmis charakteristikomis. Šie pasirinkimai dažniausiai turės būti atliekami vienu metu atsižvelgiant į keletą rodiklių, tarp kurių bus rodiklių, susijusių su gaisrine sauga. Tokie pasirinkimai gali būti atliekami, formuluojant ir sprendžiant daugiatišklės analizės uždavinį.

### ***Ginamieji teiginiai***

1. Priimant daugiatišklus sprendimus apie projektuojamus ir rekonstruojamus pastatus, reikia atsižvelgti į pastatų gaisrinę saugą ir tą saugą kiekybiškai išreikšti.
2. Daugiatišklės analizės metodai yra suderinami su gaisrinės saugos vertinimu, nes šis vertinimas leidžia įvertinti saugą kiekybiniais matais, kuriuos galima įtraukti į daugiatišklės analizės rodiklius.
3. Gaisrinės saugos vertinimo rezultatai gali būti tiek fiksuoti (deterministiniai) indeksai, tiek epistemine prasme neapibrėžti (atsitiktiniai) gaisro rizikos išraiškos elementai. Taikant pirmuosius, daugiatišklės analizės uždavinius galima spręsti įprastais metodais, taikant antruosius, daugiatišklę analizę reikės atlikti su atsitiktine sprendimų matrica. Spręsti tokią problemą prireiks naujo metodo.
4. Daugiatišklės analizės uždavinys, išreikštas atsitiktine sprendimų matrica, gali būti sprendžiamas, atliekant neapibrėžtumų transformavimą stochastinio modeliavimo būdu. Tam reikia įprasto daugiatišklės analizės metodo algoritmą integruoti į stochastinio modeliavimo ciklą ir analizės uždavinį spręsti daug kartų, kiekvieną kartą generuojant skirtingą sprendimų matricą, gautą stochastiškai modeliuojant. Kaip geriausią alternatyvą galima imti tą, kuri

dažniausiai buvo analizės sprendinys stochastinio modeliavimo cikluose.

### ***Darbo rezultatų aprobavimas***

Darbo rezultatai publikuoti šešiuose mokslo leidiniuose: trys – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę; trys – kituose leidiniuose.

Darbo rezultatai ir teiginiai aprobuoti ir pristatyti trijose mokslinėse konferencijose:

- 10-oje tarptautinėje konferencijoje „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, vykusioje 2010 m. gegužės 19–21 d. d. Vilniuje;
- 13-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, tema „STATYBA“, vykusioje 2010 m. kovo 25 d. Vilniuje.
- 12-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, tema „STATYBA“, vykusioje 2009 m. kovo 25–27 d. d. Vilniuje;

### ***Disertacijos struktūra***

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, išvados, literatūros šaltiniai, autorės publikacijų sąrašas ir aštuoni priedai. Darbo apimtis – 136 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 46 numeruotos formulės, 39 paveikslai ir 32 lentelės. Rašant disertaciją naudota 171 literatūros šaltinis.

## **1. Sprendimų priėmimas, atsižvelgiant į riziką ir saugą: mokslinės literatūros apžvalga**

Pirmame skyriuje apžvelgiami mokslininkų atlikti tyrimai daugiatikslės analizės ir pastatų gaisro rizikos vertinimo srityse. Pateikti du pagrindiniai metodai, taikomi vertinant pastatų gaisrinę saugą, t. y. gaisro rizikos indeksų skaičiavimo ir formalaus gaisro rizikos vertinimo metodai. Jie yra trumpai apžvelgiami, analizuojami jų privalumai bei trūkumai. Nustatyta, kad gaisro rizikos indeksai yra paprastai skaičiuojami ir lengvai taikomi praktikoje. Tačiau jie turi esminį trūkumą – jie nėra pagrįsti kokia nors griežta mokslinė metodologija ir jų skaičiavimas yra specialistų susitarimo reikalas. Be to, įvairiose šalyse taikomi įvairūs indeksai. Formalus gaisro rizikos vertinimas yra grindžiamas kiekybinės rizikos analizės metodologija. Toks vertinimas atliekamas taikant griežtas tikimybinio skaičiavimo taisykles ir panaudojant statistinius duomenis bei ekspertų nuomones. Tačiau formalus rizikos vertinimas yra santykinai sudėtingas ir reikalauja aukštos matematinės



kvalifikacijos. Tikėtina, kad priimant kompleksinius sprendimus, susijusius su pastato gaisrine sauga, jos užtikrinimas bus grindžiamas gaisro rizikos indeksais, o ne formaliu rizikos vertinimu.

Norint suderinti daugiatikslę analizę ir kiekybinį gaisrinės saugos vertinimą, reikia išspręsti tokius uždavinius:

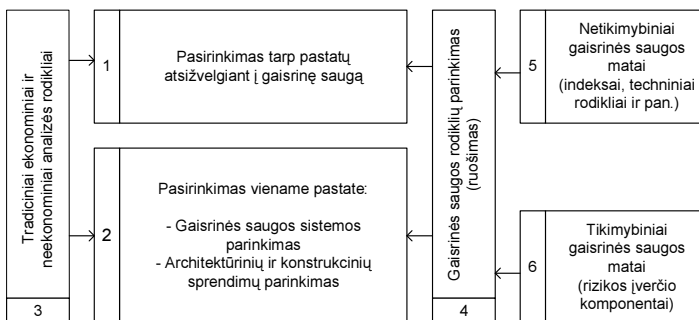
1. Nustatyti, kokius gaisrinės saugos rodiklius galima taikyti daugiatikslės analizės sprendimų matricoje.
2. Suformuluoti ir išspręsti pastatų daugiatikslės analizės uždavinius, kurie dažniausiai gali iškilti praktikoje.
3. Sukurti daugiatikslės analizės metodą, leidžiantį spręsti šios analizės uždavinius, kai gaisrinę saugą nusakantys rodikliai yra išreikšiami atsitiktiniais dydžiais.

Pirmame skyriuje apibendrinama medžiaga, paskelbta Šakėnaitės (2010) bei Šakėnaitės ir Vaidogo (2010a).

## **2. Gaisrinės saugos rodiklių įtraukimas į daugiatikslį sprendimų priėmimą**

Antrame disertacijos skyriuje formuluojama ir sprendžiama keletas daugiatikslės analizės problemų, priimant sprendimus, susijusius su pastatų gaisrine sauga. Su būtinybe rinktis tarp kelių sprendimų gali susidurti fiziniai ir juridiniai asmenys: gaisrinę saugą reglamentuojančios institucijos, draudikai, architektai ir pastatų konstruktoriai, gaisrinės saugos sistemų gamintojai ir pastatų savininkai. Antrame skyriuje tiriamos trys pasirinkimo problemos: racionalios gaisrinės saugos sistemos parinkimas iš kelių galimų, pasirinkimas iš keleto pastatų, atsižvelgiant į jų gaisrinę saugą, ir gaisrinės saugos sistemos parinkimas, vertinant gaisro riziką. Šių problemų sprendimų matricos yra formuluojamos tiek kaip deterministinės, tiek kaip atsitiktinės matricos. Analizės uždaviniai su deterministinėmis sprendimų matricomis sprendžiami tradiciniais metodais, uždaviniai su atsitiktine sprendimų matrica sprendžiami disertacijoje pasiūlytu nauju metodu. Jis paremtas daugiatikslės analizės ir stochastinio modeliavimo derinimu.

Priimant sprendimus, susijusius su pastatų gaisrinės saugos užtikrinimu, gali tekti lyginti pastatus su skirtingu gaisrinės saugos laipsniu (1 pav. 1 blokas). Daugiatikslius sprendimus gali tekti priimti ir vertinant atskirą pastatą. Jų gali prireikti parenkant pastato gaisrinę saugą užtikrinančias sistemas, lyginant skirtingų gaisrinių charakteristikų statybos pramonės gaminius, pasirenkant tarp alternatyvių architektūrinių ir konstrukcinių pastato sprendimų (1 pav. 2 blokas). Tokį lyginimą racionalu atlikti taikant daugiatikslės analizės metodus, kuriuose vienu metu vertinama keletas rodiklių.



**1 pav.** Bendrieji ir su gaisrine sauga susiję daugiatakslės pastatų analizės rodikliai

Tradiciškai pastatų daugiatakslės analizės uždaviniai sprendžiami, atsižvelgiant į keletą ekonominių ir neekonominių rodiklių (1 pav. 3 blokas). Tuos rodiklius galima taikyti kartu su gaisrinės saugos rodikliais (1 pav. 4 blokas). Pastato gaisrinės saugos rodikliai taip pat gali būti ekonominiai ir neekonominiai. Ekonominiai gaisrinės saugos sistemų rodikliai yra analogiški kitų pastatų sistemų ekonominiams rodikliams. Tačiau gaisrinės saugos sistema yra apibūdinama ir svarbiais neekonominiais rodikliais: gaisro gesinimo parametrais, efektyvumu ir patikimumu. Šie rodikliai yra nemažiau svarbūs nei ekonominiai rodikliai, nes gaisrinės saugos sistemos labai svarbios siekiant išvengti sunkių, kartais katastrofiškų gaisro padarinių.

Į daugiatakslės analizės uždavinį reikia įtraukti ir rodiklius, atspindinčius gaisro riziką. Gaisro rizikos matai gali būti netikimybiniai (gaisro rizikos indeksai ir panašūs dydžiai) ir tikimybiniai (gaisro rizikos įverčio komponentai) (1 pav. 5 ir 6 blokai). Kai kuriuos iš šių rizikos matų galima tiesiogiai laikyti daugiatakslės analizės rodikliais, o kitus naudoti netiesiogiai, t. y. per juos išreiškiant rodiklių reikšmes.

Gaisrinės saugos rodikliai, taikomi renkant iš kelių pastatų, gali būti mažiau detalūs, nei rodikliai, taikomi renkant iš kelių gaisrinės saugos sistemų. Daugiatakslės analizės rodikliai, kurie išreiškia viso pastato gaisrinės saugos laipsnį, yra dviejų tipų: gaisro rizikos indeksai ir kiekybinis gaisro rizikos įvertis.

Gaisro rizikos indeksai yra santykinai paprastai skaičiuojami dydžiai ir jų reikšmės priklauso nuo daugelio veiksnių, lemiančių gaisrinę saugą. Jie plačiai taikomi kai kuriose šalyse ir juos paprasta įtraukti į daugiatakslės analizės uždavinį. Tačiau gaisro rizikos indeksai nėra pakankamai pagrįsti griežtais

moksliniais principais ir jų taikymas yra grindžiamas susitarimu tarp specialistų ir gaisrinę saugą reguliuojančių institucijų.

Be to, indeksų naudojimas daugiatiakslės analizės uždaviniuose gali būti problemiškas. Sunku lyginti skirtingų indeksų reikšmes. Kai kurie indeksai yra taikomi tiktai konkrečios paskirties pastatams, pvz., medicinos įstaigoms. Be to, indeksai neturi įvesties kintamųjų, kurie leistų atskirti skirtingus gaisrinės saugos priemonių tipus, saugos sistemas su skirtingu patikimumo lygmeniu.

Kai pastatui pasirinkti taikoma daugiatiakslė analizė, jos rodiklius galima imti gaisro rizikos išraiškos komponentus. Gaisro rizika yra išreiškiama galimų gaisro scenarijų tikėtinumais ir šių scenarijų pasekmių sunkumo matais. Gana sudėtingą bendrąją gaisro rizikos išraišką galima supaprastinti, apskaičiuojant vidutinius sunkumo matus, susijusius su galimais gaisro scenarijais. Tokius matus galima naudoti daugiatiakslės analizės rodikliais. Tarp vidutinių gaisro sunkumų bus ekonominio pobūdžio dydžiai, t. y. tiesioginiai ir netiesioginiai piniginiai nuostoliai dėl gaisro. Taigi, daugiatiakslis pasirinkimas, remiantis gaisro rizikos įverčiu, turės ir ekonominį aspektą. Neekonomiai analizės rodikliai, apskaičiuojami remiantis rizikos įverčiu, bus vidutinis žuvusių ir sužeistų žmonių skaičius, pastato ar jame esančio gamybos proceso eksploatavimo nutraukimo laikas.

Potencialaus gaisro, kurį turėtų apriboti saugos sistema  $a_i$ , rizika yra išreiškiama pasekmėmis  $o_{ir}$  ir pasekmių patyrimo dažniais  $l_{ir}$ , čia  $r$  yra gaisro scenarijaus numeris. Dydžiai  $o_{ir}$  ir  $l_{ir}$ , susieti su keturiais paprastais gaisro scenarijais, yra iliustruoti 2 paveiksle. Kiekvienos pasekmės  $o_{ir}$  gali būti apibūdintos  $n$  sunkumo matų (sunkumų), turinčių skirtingus matavimo vienetus. Sunkumai gali būti grupuojami į vektorių

$$s_{ir} = (s_{ir1}, s_{ir2}, \dots, s_{irj}, \dots, s_{irm}) \quad (1)$$

Gaisro kilimas	Aptikimas ir alyarmas	Gesinimas $a_i$	Gaisro scenarijus	Pasekmių dažniai $o_{ir}$	Pasekmių sunkumai $o_{ir}$
			$r = 1$	$l_1 = l_0(1 - p_1)(1 - p_{12})$	$s_{11} = (s_{111}, s_{112}, s_{113}, s_{114})$
			$r = 2$	$l_2 = l_0(1 - p_n)p_{12}$	$s_{12} = (s_{121}, s_{122}, s_{123}, s_{124})$
			$r = 3$	$l_3 = l_0p_1(1 - p_{12})$	$s_{13} = (s_{131}, s_{132}, s_{133}, s_{134})$
			$r = 4$	$l_4 = l_0p_1p_{12}$	$s_{14} = (s_{141}, s_{142}, s_{143}, s_{144})$

**2 pav.** Įvykių medžio diagrama, iliustruojanti dydžius, sudarančius rizikos įvertį: pasekmių dažniai  $l_{ir}$ , pasekmių įvykiai  $o_{ir}$ , pasekmių sunkumai  $s_{ir}$

Imant dydžius  $l_{ir}$ ,  $o_{ir}$ ,  $s_{ir}$ , alternatyvos  $a_i$  rizika gali būti išreiškiama formule

$$\text{Rizika}_i \equiv \{ (l_{ir}, o_{ir}, s_{ir}), r = 1, 2, \dots, n_i \}. \quad (2)$$

Bendruoju atveju pasekmių skaičius  $n_i$  gali būti skirtingas esant skirtingoms alternatyvoms. Taigi, rizikos dėmenų skaičius gali keistis einant nuo vienos alternatyvos prie kitos. Kai pasekmės  $o_{ir}$  yra apibūdinamos keliais skirtingais sunkumo matais, rizika (2) išreiškia gana įvairią informaciją. Apskaičiavus sunkumų vektorius  $s_{ir}$  ( $r = 1, 2, \dots, n_i$ ), galima skaičiuoti  $n$ -matį vidutinių (laukiamų) sunkumų vektorių, susijusių su alternatyva  $i$ :

$$c_i = \left( \sum_{r=1}^{n_i} l_{ir} s_{ir1}, \sum_{r=1}^{n_i} l_{ir} s_{ir2}, \dots, \sum_{r=1}^{n_i} l_{ir} s_{irj}, \dots, \sum_{r=1}^{n_i} l_{ir} s_{irm} \right). \quad (3)$$

Jei pasekmės  $o_{ir}$  yra apibūdinamos tik pavieniu sunkumo matu  $s_{ir}$  (vektoriai  $s_{ir}$  turi tik vieną komponentą), vidutinis sunkumas  $\sum_{r=1}^{n_i} l_{ir} s_{irj}$  bus skaliarinis dydis ir alternatyvų  $a_i$  palyginimas bus trivialus, su sąlyga, kad lyginant nenaudojami kiti daugiatislės analizės rodikliai.

Vertinant riziką, pasekmių patyrimo dažniai  $l_{ir}$  dažnai laikomi neapibrėžtais epistemine prasme. Šis neapibrėžtumas yra išreiškiamas atitinkamais atsitiktiniais dydžiais  $L_{ir}$ . Su šiais dydžiais vektoriaus (3) komponentai taip pat tampa atsitiktiniais dydžiais:

$$\tilde{c}_{ij} = \sum_{r=1}^{n_i} L_{ir} s_{irj}. \quad (4)$$

Įtraukus dydžius  $\tilde{c}_{ij}$ , daugiatislės pasirinkimo problema tampa uždaviniu su atsitiktiniais rodiklių vektoriais

$$\tilde{c}_i = (\tilde{c}_{i1}, \tilde{c}_{i2}, \dots, \tilde{c}_{ij}, \dots, \tilde{c}_{im}). \quad (5)$$

Vektoriai  $\tilde{c}_i$  gali būti panaudoti sudarant atsitiktinę sprendimų matricą

$$\tilde{C} = [\tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_i, \dots, \tilde{c}_m]^T. \quad (6)$$

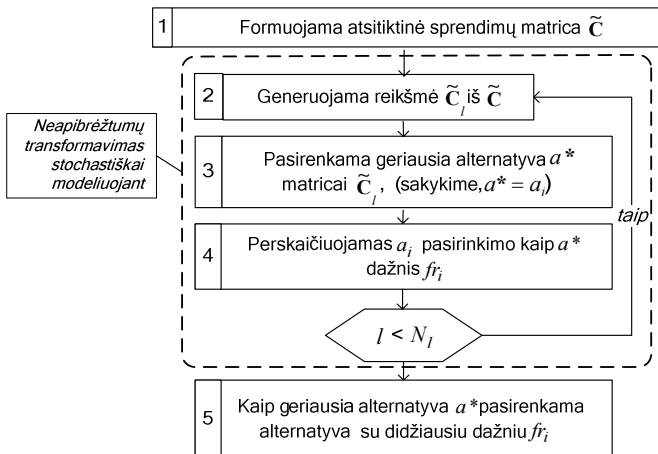
Kai sprendimo matrica  $\tilde{C}$  yra atsitiktinė, konkrečios alternatyvos  $a_i$  pasirinkamas geriausiaja  $a^*$  tampa atsitiktiniu įvykiu su tikimybe

$$p_i = P(\text{parinkti } a_i \text{ kaip } a^* \mid NM, K_k). \quad (7)$$

Čia  $NM$  reiškia normalizavimo metodo pasirinkimą skaičiuoti bedimensių rodiklių matricą  $\bar{C}$ , o  $K_k$  žymi daugiatikslių analizės kriterijų, kuris naudojamas nustatyti  $a^*$ . Pagrindinė šios disertacijos idėja yra ta, kad geriausia alternatyva yra ta, kurios parinkimo tikimybė yra didžiausia. Kitaip tariant, daugiatikslių analizės kriterijus gali būti išreiškiamas tokiu pavidalu:

$$a^* \text{ bus ta } a_i, \text{ kurios } i \text{ tenkina sąlygą } i = \operatorname{argmax}\{p_i, i = 1, 2, \dots, m\}. \quad (8)$$

Tikimybės  $p_i$  gali būti vertinamos transformuojant neapibrėžtumus, išreikštus matricos  $\tilde{C}$  elementais per normalizavimo formulę  $NM$  ir kriterijaus  $K_k$  išraišką. Toks transformavimas gali būti atliktas, taikant stochastinį (Monte Karlo) modeliavimą. Jis gali būti atliktas  $N_l$  kartų kartojant Monte Karlo ciklą. Ciklas  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, N_l$ ) prasideda atsitiktinės matricos  $\tilde{C}$  reikšmės  $\tilde{C}_l$  generavimu (3 pav. 2 blokas). Po to, taikant normalizavimą  $NM$  ir kriterijų  $K_k$ , randama geriausioji alternatyva  $a^*$ , atitinkanti reikšmę  $\tilde{C}_l$  (3 pav. 3 blokas). Kartojant modeliavimo ciklą didelį skaičių  $N_l$  kartų, gaunami santykiniai alternatyvų  $a_i$  pasirinkimo kaip geriausios  $a^*$  dažniai (3 pav. 4 blokas). Dažniai  $fr_i$  yra tikimybių  $p_i$  įverčiai. Alternatyva su didžiausiu dažniu  $fr_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) gali būti pasirenkama kaip geriausia, t. y.,  $a^* = a_i$ , čia  $i = \operatorname{argmax}\{fr_i, i = 1, 2, \dots, m\}$ .



**3 pav.** Stochastinio modeliavimo algoritmas, skirtas daugiatikslei analizei atlikti, kai sprendimų matricos elementai yra atsitiktiniai dydžiai

Pagrindinė antro disertacijos skyriaus išvada yra ta, kad daugiatišką analizę galima įvairiai derinti su kiekybiniu gaisrinės saugos vertinimu. Toks vertinimas gali būti atliekamas, pasitelkiant įvairius gaisrinės saugos rodiklius, kuriuos nesunku įtraukti į daugiatišką analizės sprendimų matricą. Praktiniu požiūriu patraukliausi gali būti daugiatišką analizės uždaviniai, kurių rodikliai yra gaisro rizikos indeksai. Juos santykinai lengva skaičiuoti, o daugiatišką analizės uždavinys su tokiais rodikliais gali būti sprendžiamas įprastiniais analizės metodais. Pastatų daugiatišką analizės uždavinius galima spręsti rodikliais imant ir gaisro rizikos komponentus. Šios rizikos išraiška visapusiškai apibūdina pastato gaisrinę saugą ir yra skaičiuojama, remiantis griežtais, moksliskai pagrįstais metodais. Tačiau rizikos skaičiavimas yra sudėtingas. Daugiatišką analizę, kurioje atsižvelgiama į gaisro rizikos įvertį, yra sunkiau įgyvendinama nei analizę, kurioje naudojami gaisro rizikos indeksai. Sprendžiant daugiatišką analizės uždavinius, kuriuose paisoma pastatų gaisrinės saugos, gali tekti susidurti su sprendimų matrica, kurios elementai yra atsitiktiniai dydžiai. Uždavinius su tokia matrica galima spręsti, pasitelkiant stochastinį modeliavimą.

Antrame skyriuje apibendrinama medžiaga, paskelbta Šakėnaitės (2009), Vaidogo ir Šakėnaitės (2010b, 2011a ir 2011b).

### **3. Tyrimo rezultatų taikymas medicinos įstaigų pastatams**

Šiame skyriuje aprašomas tyrimo rezultatų taikymas medicinos įstaigų pastatams. Surinkus atitinkamus statistinius duomenis apie gaisrus medicinos įstaigų pastatuose, nustatyta, kad šiems pastatams yra būdinga didelė gaisro rizika. Remiantis JAV duomenimis apie gaisrus medicinos įstaigose, apie 44 % gaisrų kyla slaugos namuose, apie 23 % ligoninėse. Lyginant gaisrus, kylančius medicinos įstaigose ir negyvenamosios paskirties pastatuose, matyti, kad gaisrai medicinos įstaigose pareikalauja daugiau aukų, tačiau jų nuostoliai yra mažesni (1 lentelė). Šis santykinai didelis pavojus žmonių gyvybėms ir lėmė tai, kad trečiajame disertacijos skyriuje daugiatišką analizės metodai taikomi medicinos įstaigų pastatams.

Daugiatišką analizės uždavinį, kuriame paisoma gaisrinės saugos, galima spręsti, parenkant pastatų medicinos įstaigai, tokio pastato gaisrinės saugos sistemą ir priimant architektūrinius medicinos pastatų sprendimus. Trečiaame disertacijos skyriuje išspręsti trys daugiatišką analizės uždaviniai.

Pirmame uždavinyje sprendžiama, kokias alternatyvias gaisrinės saugos sistemas galima įrengti ligoninėje. Parenkama viena iš keturių alternatyvių gaisrinės saugos priemonių, kurias sudaro įvairiai išdėstomi dūmų detektoriai ir sprinkleriai. Pasirenkami penki rodikliai, įvertinantys gaisrinės saugos sistemas.

Vienas iš rodiklių yra sistemos įrengimo kaina. Gaisrinė sauga yra kiekybiškai išreiškiamą gaisro rizikos indeksu FSES. Šis indeksas yra plačiai taikomas ligoninių gaisrinei saugai vertinti. Jis skaičiuojamas trimis ligoninės skyriams: slaugos ir palaikomojo gydymo, chirurgijos-traumatologijos ir terapijos skyriams. Į daugiataklės analizės sprendimų matricą yra įrašyti slaugos ir palaikomojo gydymo skyriaus duomenys, suskaičiuoti su šiuo indeksu. Tačiau šis indeksas neleidžia tiesiogiai įvertinti galimo gaisro aukų skaičiaus bei gaisro sunaikinto turto. Todėl į uždavinį įtraukti dar du rodikliai, atspindintys šias gaisro pasekmes (laukiamas aukų skaičius bei tikėtinas sunaikinto turto dydis). Penktasis rodiklis yra sistemos įrengimo laikas. Įrengimo metu ligoninės skyrių darbas bus apribotas.

**1 lentelė.** Vidutinis medicinos įstaigose ir negyvenamosios paskirties pastatuose žuvusių ir sužeistų žmonių skaičius bei vidutiniai nuostoliai dėl gaisrų

Vidutiniai nuostoliai	Gaisrai medicinos įstaigose	Gaisrai negyvenamosios paskirties pastatuose
	1996–1998	
Žuvusiųjų skaičius 1000 gaisrų	2,2	1,7
Sužeistųjų skaičius 1000 gaisrų	59,2	22,1
Piniginiai nuostoliai dėl gaisrų, \$	4286	21 878
	2004–2006	
Žuvusiųjų skaičius 1000 gaisrų	1,2	0,8
Sužeistųjų skaičius 1000 gaisrų	26,6	12,3
Piniginiai nuostoliai dėl gaisrų, \$	5312	21 898

Antrasis uždavinys sprendžia, kaip parinkti pastatą slaugos namams. Šio tipo medicinos įstaigose įvyko labai skaudžių gaisrų. Todėl, sprendžiant pastato parinkimo uždavinį, taikyti keli rodikliai, išreiškiantys gaisrinę saugą. Šiame uždavinyje yra naudojamas gaisro rizikos indeksas FRAME. Jo reikšmė priklauso nuo daugelio veiksnių, lemiančių pastato gaisrinę saugą. Sprendžiant daugiataklės analizės uždavinį, suskaičiuotos šio indekso reikšmės, atspindinčios pastato ir jame esančių žmonių saugą. Kiti analizės rodikliai yra ekonominiai: esamo pastato, jo pritaikymo slaugos namams kainos, pastato metinės eksploataavimo išlaidos. Be šių rodiklių, alternatyvieji pastatai apibūdinti ir kitais rodikliais, t. y., išplanavimu, aplinkos triukšmo lygiu, susisiekimo patogumu, atstumu iki artimiausios ugniagesių komandos.

Trečiasis uždavinys sprendžia, kaip parinkti rekonstruojamos ligoninės architektūrinį sprendimą. Nagrinėjami trys skirtingi rekonstruojamos ligoninės aukšto planai. Gaisrinės saugos požiūriu šie planai skiriasi tikėtiniausia gaisro kilimo patalpa ir evakuacijos galimybėmis. Gaisrinę saugą atspindintys

daugiatikslės analizės rodikliai šiame uždavinyje išreiškiami per evakuacijos laiką ir per laiką iki nepakeliamų sąlygų susidarymo galimos evakuacijos keliuose. Šie rodikliai laikomi atsitiktiniais dydžiais ir daugiatikslės analizės uždavinys sprendžiamas disertacijoje pasiūlytu stochastinio modeliavimo metodu.

Apibendrinant trečią skyrių, galima teigti, kad medicinos įstaigų pastatams būdinga padidinta gaisro rizika. Todėl, priimant daugiatikslius sprendimus apie tokius pastatus, racionalu įtraukti gaisrinės saugos rodiklius į sprendimų matricą. Medicinos įstaigų pastatai gali labai skirtis techniniu, ekonominiu ir eksploataavimo požiūriu. Todėl, priimant sprendimus dėl jų projektavimo, eksploataavimo ir išigyjimo, gali tekti spręsti įvairius daugiatikslės analizės uždavinius. Gaisrinės saugos rodikliai, naudojami šiuose uždaviniuose, taip pat gali būti įvairūs: bendro pobūdžio rodikliai (pvz., gaisro rizikos indeksai) ir specifiniai rodikliai (pvz., laikas iki nepakeliamų sąlygų susidarymo evakuacijos keliuose). Spręsti medicinos įstaigų pastatų daugiatikslės analizės uždavinius gali tekti tiek įprastiniais metodais, tiek disertacijoje pasiūlytu metodu, kuris grindžiamas stochastiniu modeliavimu.

Trečiame skyriuje apibendrinama medžiaga, paskelbta Vaidogo ir Šakėnaitės (2011b).

## **Bendrosios išvados**

1. Išnagrinėjus mokslinėje literatūroje aprašomus gaisrinės saugos vertinimo ir daugiatikslės analizės metodus, nustatyta, kad, priimant sprendimus, susijusius su statybinio turto, tikslinga juos derinti. Iki šiol daugiatikslei pastatų analizei gaisrinės saugos rodikliai sistemingai nebuvo taikomi.
2. Išanalizavus kiekybinio gaisrinės saugos vertinimo galimybes, nustatyta, kad daugiatikslės analizės, taikomos pastatams, rodikliais, apibūdinančiais gaisrinę saugą, gali būti gaisro rizikos indeksai ir kiekybinis gaisro rizikos įvertis. Šios analizės sprendimų matricoje galima taikyti ir kitus rodiklius, susijusius su gaisrine sauga: pastato atstumą iki gaisrinės, ugniagesių komandos reakcijos laiką, gaisro gesinimo efektyvumą, laiką iki nepakeliamų sąlygų susidarymo gaisro metu.
3. Tiriant daugiatikslės pastatų analizės papildymą gaisrinės saugos rodikliais, nustatyta, kad gaisro rizikos indeksus galima skaičiuoti deterministiniais metodais ir įtraukti į analizės uždavinį. Tačiau jie ne visada gali pakankamai tiksliai atspindėti skirtumus tarp analizės



- uždavinyje nagrinėjama pastatų gaisrinės saugos lygio arba alternatyvių pavienio pastato gaisrinės saugos sistemų.
4. Ištyrus, kaip derinti kiekybinį gaisro rizikos vertinimą ir daugiataksię analizę, rasta, kad gaisro rizikos įvertį galima naudoti, skaičiuojant šios analizės rodiklius. Šie rodikliai gali būti vidutiniai gaisro pasekmių sunkumo matai, išreiškiantys materialinę žalą, nukentėjusiųjų skaičių, veiklos nutraukimo laiką. Skaičiuoti rizikos įvertį yra sudėtinga, todėl į daugiataksię analizę ją reikėtų įtraukti, nagrinėjant pastatus su didele gaisro rizika.
  5. Sprendžiant daugiatakslės pastatų analizės papildymo gaisrinės saugos rodikliais uždavinį, nustatyta, kad šios analizės sprendimų matricos elementai gali būti atsitiktiniai. Juos išreikš tikimybių skirstiniai, nusakantys stochastinius arba episteminius neapibrėžtumus gaisrinę saugą apibūdinančių dydžių atžvilgiu. Episteminiai neapibrėžtumai pirmiausia bus būdingi rizikos įvertimo elementams, tiesiogiai ar netiesiogiai įtrauktiems į sprendimų matricą.
  6. Sukurtas daugiatakslės analizės metodas, leidžiantis spręsti uždavinį, kai visi ar kai kurie sprendimų matricos elementai yra atsitiktiniai dydžiai. Metodo esmė yra racionaliausios alternatyvos pasirinkimas, stochastiniu modeliavimo metodu. Modeliuojama generuojant sprendimų matricos reikšmes ir kiekvienai reikšmei sprendžiant įprastą daugiatakslės analizės uždavinį. Racionaliausia alternatyva bus ta, kurios pasirinkimo dažnis stochastinio modeliavimo procese bus didžiausias.
  7. Surinkus statistinius duomenis apie gaisrus medicinos įstaigų pastatuose, nustatyta, kad šiems pastatams yra būdinga didelė gaisro rizika. Priimant daugiatakslius sprendimus, gali tekti spręsti uždavinius, kuriuose paisoma tokių pastatų gaisrinės saugos. Į ją reikės atsižvelgti parenkant pastatą medicinos įstaigai, gaisrinės saugos sistemą šioms įstaigoms ir priimant architektūrinius sprendimus.

## **Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas**

### ***Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose***

Vaidogas, E. R.; Šakėnaitė, J. 2011. A brief look at data on the reliability of sprinklers used in conventional buildings. *Journal of Civil Engineering and Management* 17(1): 115–125. ISSN 1392-3730X. (Thomson ISI Web of Science)

Vaidogas, E. R.; Šakėnaitė, J. 2011. Multi-attribute decision making in economics of fire protection. *Inžinerine Ekonomika – Engineering Economics* 22(3): 262–270. ISSN 1392-2785. (Thomson ISI Web of Science)

Vaidogas, E. R.; Šakėnaitė, J. 2010. Protecting built property against fire disasters: multi-attribute decision making with respect to fire risk. *International Journal of Strategic Property Management* 14(4): 391–407. ISSN 1648-715X. (Thomson ISI Web of Science)

### ***Straipsniai kituose leidiniuose***

Šakėnaitė, J.; Vaidogas, E. R. 2010. Fire risk indexing and fire risk analysis: a comparison of pros and cons, in the *10th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*, held in Vilnius on 19–21 May. 2010. Vilnius: Technika. Selected papers 2: 1297–1305. ISBN 9789955285946.

Šakėnaitė, J. 2010. A comparison of methods used for fire safety evaluation, in the *XIII Conference of Lithuanian Young Scientists “Lithuania without science – Lithuania without Future”*, *Civil Engineering*, held in Vilnius, Lithuania on March 25. 2010. Vilnius: Technika. Selected papers: 36–42. ISSN 2029-2252.

Šakėnaitė, J. 2009. The problem of sprinkler reliability, in the *XII Conference of Lithuanian Young Scientists “Lithuania without science – Lithuania without Future”*, *Civil Engineering*, held in Vilnius, Lithuania on March 25–27. 2009. Vilnius: Technika. Selected papers: 34–40. ISSN 2029-2341.

### **Trumpos žinios apie autorių**

Jurgita Šakėnaitė gimė 1982 m. gruodžio 19 d. Švenčionyse.

2005 m. įgijo vadybos ir verslo administravimo bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universitete, Statybos fakultete. 2007 m. įgijo statybos inžinerijos magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universitete, Statybos fakultete. 2008–2012 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantė. Nuo 2006 iki dabar dirba asistente Vilniaus Gedimino technikos universiteto Darbo ir gaisrinės saugos katedroje.

# **COMBINED APPLICATION OF MULTI-ATTRIBUTE SELECTION AND RISK ANALYSIS TO THE ASSESSMENT OF BUILDING FIRE SAFETY**

## ***Formulation of the problem***

Fire safety is an important component of building safety and is indispensable for a successful exploitation of the building. The prevention of fires is a complex task, which must be solved by taking into account economic, technological, psychological and social considerations. Building-related decisions, which are concerned with fire safety and other aspects of building design and exploitation, could be facilitated by applying the methodology of multi-criteria decision making (MCDM). The building-related MCDM problems must be supplemented with attributes which numerically express the level of fire safety as well as attributes which characterise fire protection measures. These attributes must be included into the decision matrix of MCDM. As a solution of safety related problems often requires a probabilistic modelling of uncertainties, an MCDM method must be developed to solve selection problems with a decision matrix, the components of which are random variables.

## ***Topicality of the problem***

The fires in built property are still a serious problem. They happen in buildings despite all preventive efforts and some of them take a heavy toll. The modern fire protection measures are expensive and not necessarily highly reliable. The general safety culture, which directly influences the success of fire prevention, is far from perfect in many countries. The building-related decision making still lacks to a great degree a complex and integrated approach which could take into account contradictory factors related to fire safety in one way or another. There is a lack of mathematical models which allow to solve problems of fire safety in one complex with other building design and exploitation problems which are not necessarily related to building safety.

## ***Research object***

The object of research is fire safety of buildings considered from the standpoint of fire risk management. In mathematical terms, the research object is an integration of risk assessment models and mathematical models used for multi-attribute selection.

### ***The aim of the work***

The aim of the work was a combination of fire safety assessment and MCDM by supplementing the decision matrix of MCDM with attributes expressing the level of fire safety and fire risk.

### ***Tasks of the work***

1. To find out numerical indicators of building fire safety or risk which can serve as attributes of a building-related MCDM.
2. To formulate and solve most likely to-be-met-in-practice building-related MCDM problems which take into account fire safety and can be dealt with presently available MCDM methods.
3. To integrate results of a formal fire risk assessment produced by the quantitative risk analysis (QRA) into MCDM.
4. To develop an MCDM method allowing to solve the selection problem with a decision making matrix, all or some elements of which are random variables.

### ***Methodology of research***

The methodology of research was an analysis of presently available methods used in the fields of fire safety, QRA and MCDM. The methodological core of research was analysis of the aforementioned methods with an aim to combine them in one decision making model. Stochastic simulation was applied to a solution of MCDM problems with random decision matrices. A computer-aided fire simulation model, known as the two-zone model was applied for specifying attribute values of a building-related MCDM problem.

### ***Scientific novelty***

The main scientific novelty consists in combining methods of MCDM and fire safety assessment. The combining aims to improve decision making concerning various aspects of construction and safe exploitation of buildings. This requires to introduce novel elements into MCDM. To solve MCDM problems with respect to fire safety, the following new methodological developments are suggested:

1. An integration of fire risk indices into MCDM problems which consider a selection among several buildings, fire safety systems in an individual building, alternative architectural solutions of the building under design.
2. An incorporation of elements of a fire risk profile into the decision matrix of an MCDM problem. The risk profile is a comprehensive

measure of fire safety and MCDM problems involving estimates of fire risk can consider the fire safety problem in a very detailed manner.

3. A solution of MCDM problems with the decision matrices, all or some elements of which are random variables, accomplished via a simulation-based propagation of uncertainties expressed by probability distributions of these variables. Such matrices can be composed from elements of risk profile which are uncertain in the epistemic sense. This uncertainty is quantified by probability distribution specified by means of QRA.

### ***Practical significance of the work results***

The achieved research results can be used for the decisions concerning fire safety of built property. These decisions may involve alternative solutions (alternatives) of fire protection measures, comparison of buildings with different fire safety levels, the choice among construction products with different properties of performance in fire. The need to choose among alternatives may be faced by various interested parties: fire safety regulators (authorities on national level), insurers, architects (building designers), and manufacturers of fire protection measures, property owners and buyers. The problem of choice will often involve the need to consider simultaneously several characteristics (attributes) of alternatives, and those related to fire safety. Such a choice can be formalised as a problem of MCDM.

### ***The statements presented for the defence***

1. Fire safety of existing and future buildings must be taken into account in building-related MCDM. This requires to express fire safety quantitatively.
2. Methods of MCDM can be combined with the assessment of fire safety, because fire safety can be expressed by numerical measures and these can be applied as attributes in MCDM problems.
3. Results of fire safety assessment can be expressed either by fixed (deterministic) indices or by components of risk profile which are uncertain in the epistemic sense and are computed by means of QRA. Indices can be included MCDM problems solved by means of conventional MCDM methods. An inclusion of uncertain components of the fire risk profile will yield a random decision making matrix. A special MCDM method must be developed to solve an MCDM problem expressed by such a matrix.
4. An MCDM problem with a random decision making matrix can be solved by applying a simulation-based uncertainty propagation. For

this purpose, algorithm of a conventional (deterministic) MCDM method must be integrated into a Monte Carlo loop and the problem of MCDM solved repeatedly in the simulation run, each time for a different decision making matrix generated by means of simulation. The MCDM alternative with the highest frequency of selection as the best one can be chosen as a final result of MCDM.

### ***Approval of the results***

The main statements of the dissertation were published in six scientific articles: three articles – in the Thomson ISI Web of Science register (Vaidogas and Šakėnaitė 2010b; Vaidogas and Šakėnaitė 2011a, 2011b), three – in other editions (Šakėnaitė 2009, 2010; Šakėnaitė and Vaidogas 2010a).

The main statements of the dissertation were discussed during three national scientific conferences:

- one – in the 10th International Conference on Modern building materials, structures and techniques, held in Vilnius, 2010;
- two – in the Conference of Lithuanian Young Scientists “Lithuania without science – Lithuania without Future”, held in Vilnius, 2009–2010.

### ***Dissertation structure***

The dissertation consists of an introduction, three numbered chapters, conclusions, list of references and author’s publications and eight annexes. The volume of the dissertation is 136 pages, excluding annexes. The dissertation includes 46 numbered formulas, 39 pictures and 32 tables. The list of references consists of 171 items.

The first chapter of the dissertation presents a review and evaluation of the published work on MCDM, fire risk assessment and fire risk indexing. The necessity to include fire risk indices and fire risk profile into a building-related MCDM is stated.

The second chapter of the dissertation proposes a formulation and solution of several MCDM problems which take into account the fire safety of buildings. Three selection problems are considered: selection of a cost-effective fire safety system, selection among several alternative buildings with regard to fire safety and choice between alternative fire protective measures. It shown that these problems can be solved by applying traditional, deterministic MCDM methods and a stochastic MCDM method proposed in the dissertation.

The third chapter of the dissertation describes a combined application of multi-attribute selection and fire safety assessment to making decisions concerning medical facilities. Three examples of the multi-attribute selection

with respect to fire safety are presented. MCDM problems formulated in these examples are solved by applying deterministic and stochastic MCDM methods.

### ***General conclusions***

1. An analysis of the scientific literature on methods of quantitative fire safety assessment and multi-attribute selection led to the conclusion that it is advisable to combine these methods for making decisions on built property, especially, buildings with increased fire risk. It was found that until now fire safety measures were only sporadically included into building-related multi-attribute decision making.
2. An analysis of possibilities of a quantitative fire safety assessment led to the conclusion that fire safety indices and fire risk profile can be applied as attributes of a building-related multi-attribute selection problem. A decision making matrix of this problem can also include other attributes related to fire safety, namely, the distance from the building to the fire brigade, the response time of fire department, the effectiveness of fire extinguishment by fire units, time to the creation of untenable conditions inside building caught on fire.
3. An investigation of how to expand the building-related multi-attribute selection with attributes quantifying fire safety produced the result that fire risk indices calculated by means of deterministic methods can be incorporated with relative ease into the decision making matrix of the selection problem. However, the fire risk indices can sometimes be insufficiently sensitive to differences between fire safety of buildings compared in the selection problem or differences among alternative fire safety systems of an individual building.
4. An analysis of a possible combination of fire risk assessment and multi-attribute selection led to the result that elements of fire risk profile can be used for specifying attributes of the selection problem. Expected significances of fire consequences can be applied as selection attributes. The expected significances can express monetary losses, number of victims, the time of business interruption. A calculation of risk profile is relatively complicated and an incorporation of elements of this profile into the multi-attribute selection is advisable for buildings with increase fire risk.
5. An analysis of incorporating fire-related attributes into the multi-attribute selection led to the finding that elements of the decision making matrix containing such attributes can be random variables. They will be expressed by probability distributions quantifying aleatory and epistemic uncertainties in values of the fire-related

- attributes. The epistemic uncertainties will be characteristic of elements of fire risk profile, directly or indirectly included into the decision making matrix.
6. A method has been developed for solving the problem of multi-attribute selection with the decision making matrix, all or some elements of which are random variables. The main idea of the proposed method is to select the best alternative by applying stochastic simulation. The simulation is carried out by sampling realisations of the decision making matrix and solving the selection problem for each realisation by applying a conventional method of multi-attribute selection. The best alternative among ones considered in the problem is that with the highest frequency of selection in a simulation run.
  7. A collection of data on fires in healthcare facilities led to the conclusion that these occupancies are prone to an increased fire risk. It was found that methods of a building-related multi-attribute selection can be applied to the choice among alternative buildings for establishing a specific medical institution, the selection of fire safety system for an individual healthcare building, the architectural decision making concerning the layout of medical buildings.

### **About the author**

Jurgita Šakėnaitė was born in Švenčionys, on 19 of December 1982.

Bachelor degree in Business administration and management, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2005. Master of Science in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2007. From 2006 till now – as assistant in the Department of Labour Safety and Fire Protection of Vilnius Gediminas Technical University.