



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ IR GAISRINĖS SAUGOS KATEDRA

Aušrinė Tičkaite

**GAISRO SUKELIAMO SLĖGINIŲ INDŲ IRIMO PROGNOZAVIMAS
TAIKANT BAJESO STATISTIKOS METODUS
PREDICTING THE FIRE INDUCED FRAGMENTATION OF PRESSURE
VESSELS BY MEANS OF BAYESIAN STATISTICS**

Baigiamasis magistro darbas

Studijų dalyko kodas STGSM17119

Saugos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX031

Gaisrinės ir gelbėjimo darbų saugos ir valdymo specializacija

Saugos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Statybinių medžiagų ir gaisrinės saugos katedra		ISBN Egz. sk. Data*.....*.....	ISSN
---	--	---	------

Antrosios pakopos studijų Saugos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Gaisro sukeliama slėginių indų irimo prognozavimas taikant Bajeso statistikos metodus
Autorius	Aušrinė Tičkaitė
Vadovas	Egidijus Rytas Vaidogas

	Kalba: lietuvių
--	------------------------

Anotacija Nagrinėjama problema yra žalos, kurią gali sukelti cilindriniai slėginių indų sproginiai, vertinimas. Sprendžiamas uždavinys – kaip prognozuoti sproginį sukeliantį šių indų pleišėjimą. Pleišėjimo prognozė yra laikoma esmine informacija, kurios reikia numatant slėginio indo skeveldrų susidarymą, skriejimą ir atsitrekinimą į pažeidžiamus objektus. Nagrinėjamas slėginių indų sproginas, kai jie yra kaitinami išorinio gaisro. Matematiškai pleišėjimo schemų prognozavimas yra formuluojamas ir atliekamas vertinant tų schemų tikimybes. Pasiūlyta, kaip atlikti šį vertinimą remiantis ribotais duomenimis apie pleišėjimo schemų susidarymą praeityje vykusių slėginių indų avarių metu. Pleišėjimo schemų prognozėms atlikti pritaikytas jungtinis multinominis – Dirichlė tikimybių skirstinys. Taikant Dirichlė tikimybių skirstinį yra kiekybiškai išreiškiamas neapibrėžtumas pleišėjimo schemų tikimybių atžvilgiu. Šis skirstinys yra taikomas kaip apriorinis ir aposteriorinis modelis Bajeso statistinės teorijos prasme. Darbo rezultatus siūloma integruoti į rizikos, keliamos slėginių indų eksploatavimo, analizės procesą.

Prasminiai žodžiai: slėginis indas, sproginas, BLEVE, pleišėjimo schema, Bajeso statistika, apriorinis skirstinys, aposteriorinis skirstinys, multinominis modelis, Dirichlė skirstinys.

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Civil Engineering Department of Building Materials and Fire Safety		ISBN Copies No. Date-.....-.....	ISSN
Master Degree Studies Safety Engineering study programme Master Graduation Thesis			
Title	Predicting the Fire Induced Fragmentation of Pressure Vessels by Means of Bayesian Statistics		
Author	Aušrinė Tičkaitė		
Academic supervisor	Egidijus Rytas Vaidogas		
		Thesis language: Lithuanian	
Annotation The problem under consideration is the assessment of the damage that can be caused by explosions in cylindrical pressure vessels. The challenge is how to predict the explosion-causing cracking of these vessels. The crack prediction is considered to be the essential information needed to predict the formation, runoff and impact of pressure vessel fragments on vulnerable objects. The explosion of pressure vessels when they are heated by an external fire is considered. Mathematically, the prediction of cracking schemes is formulated and performed by estimating the probabilities of those schemes. It has been suggested that this assessment be made on the basis of limited data on the occurrence of cracking schemes during past pressure vessel accidents. A conjugate multinomial - Dirichlet probability distribution has been applied to predict cracking schemes. The Dirichlet distribution aid is a quantifiable uncertainty about the probabilities of cracking schemes. This distribution is applied as an a prior and a posterior model in the sense of Bayesian statistical theory. The results of the work are proposed to be integrated into the process of risk analysis of the operation of pressure vessels.			
Keywords: pressure vessel, explosion, BLEVE, failure pattern, Bayesian method, prior distribution, posterior distribution, multinomial model, Dirichlet distribution.			

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS	11
1. GAISRO SUKELIAMOS SLĖGINIŲ INDŲ AVARIJOS IR TŲ INDŲ IRIMO PROGNOZAVIMO PROBLEMA	13
1.1. Slėginių indų avarijos ir jų sukeltas indų skilimas į skeveldras	13
1.1.1. Bendras slėginių indų sprogo pobūdis	13
1.1.2. Išorinio gaisro kaitinamų indų sprogo BLEVE būdu	16
1.2. Nagrinėjamos gaisro kaitinamų slėginių indų skilimų avarijos	18
1.2.1. Sprogo su vienos skeveldros susidarymu	18
1.2.2. Sprogo su dviejų skeveldrų susidarymu	21
1.2.3. Sprogo su trijų arba keturių skeveldrų susidarymu	22
1.2.4. Sprogo su sunkiau prognozuojamomis pleišėjimo schemomis	25
1.3. Gaisro veikiamų slėginių indų irimo prognozavimo galimybės ir uždaviniai	27
1.4. Galimybės prognozuoti slėginių indų pleišėjimo schemas remiantis turimais matematiniais metodais ir sukauptais duomenimis	29
2. GAISRO SUKELIAMOS SLĖGINIŲ INDŲ AVARIJOS IR IRIMO PROGNOZAVIMO PROBLEMA	37
2.1. Rizikos vertinimo metodų taikymas prognozuojant slėginių indų irimo pobūdį	37
2.2. Slėginių indų irimo pobūdžio prognozavimas taikant Bajeso statistinės teorijos elementus 40	
2.2.1. Dirichlė multinominis pleišėjimo schemų modeliavimas	40
2.2.2. Aprioriniai Dirichlė modelio parametrais išreikšiamų pleišėjimo schemų tikimybių skirstiniai 42	
2.2.3. Bent vienos slėginio indo skeveldros išmetimo tikimybės vertinimas pagal Bajeso metodą 44	
2.3. Siūlomo slėginių indo irimo pobūdžio prognozavimo metodo taikymo pavyzdys	46
2.3.1. Apriorinio Dirichlė skirstinio sudarymas slėginio indo pleišėjimo schemų tikimybėms 46	

2.3.2. Aposteriorinio binominio parametro skirstinio parinkimas bent vienos skeveldros išmetimo atvejui	51
IŠVADOS	53
PAVEIKSLŲ ŠALTINIAI	55
LITERATŪRA	56

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Du kadrai iš videofilmo, vaizduojančio cilindrinio indo sprogimą: išorinio gaisro liepsnos kaitinamas indas ir suirusio indo skeveldros išmetimas [BLEVE Demonstration, You Tube, 2009]	17
1.2 pav. Tipinė įvykių grandinė su indo sprogimu BLEVE būdu (pagal Mannan, 2012).....	17
1.3 pav. Cisterninės puspriekabės gaisras Ispanijos provincijoje <i>Murcia</i> : gaisro pradžioje degė dyzelinis vilkiko kuras, vėliau padangos ir šiluminė cisternos izoliacija, sklido juodi dūmai; vėliau pagrindinis kuro šaltinis buvo nutekančios SGD, dūmų sumažėjo (Planas <i>et al.</i> , 2015).....	19
1.4 pav. Suskystintąsias gamtines dujas vežusios cisternos skeveldros, susidariusios po BLEVE sprogimo (Planas-Cuchi <i>et al.</i> , 2015).....	19
1.5 pav. Cisterninės puspriekabės avarija, gaisras ir sprogimas, įvykę 2018 m. Bolonijos mieste Italijoje (The New York Times, 2019).....	20
1.6 pav. Dujinės cisternos sprogimo metu susiformavusi indo korpuso liekana, nuo kurios neatplyšo ir nebuvo išmestos jo dalys (Puerto Lumbrero ir Granados SND autocisternos avarija, 2012 m.)...	21
1.7 pav. Propano cisternos po BLEVE sprogimo Bozemano grafystėje, Montanoje (Big Sky Fire Department, 2021).....	22
1.8 pav. Deganti automobilinė cisterna, nufotografuota 2 min po kelio avarijos ir maždaug 18 min iki sprogimo (Planas-Cuchi <i>et al.</i> , 2004).....	23
1.9 pav. Sprogimo išmėtytos priekinė, vidurinė ir galinė cisternos dalys (iš viršaus į apačią) (Planas-Cuchi <i>et al.</i> , 2004).....	24
1.10 pav. Automobilinės cisternos dalių išsidėstymas po sprogimo (Planas-Cuchi <i>et al.</i> , 2004).....	25
1.11 pav. Rezervuaro suirimo į skeveldras pavyzdžiai: a – žaliais sunumeruotais taškais pažymėtos skeveldrų išmetimo vietos po rezervuaro 27V-16 sprogimo, b – rezervuaro 27V-16 pleišėjimo schema (Piccinini & Demichela, 2006).....	26
1.12 pav. Dalis rezervuaro skeveldrų po sprogimo naftos perdirbimo gamykloje Milazzo mieste, Sicilijoje (Tugnoli <i>et al.</i> , 2014).....	27
1.13 pav. Keturi cilindriniai slėginių indų irimo į skeveldras pavyzdžiai: a ir c – stacionarių indų su atramomis irimas, b ir d – nepritvirtintų ir ant grunto gulinčių indų irimas (pvz., įvykus eismo avarijai automobilių kelyje arba geležinkelyje).....	31
2.1 pav. Įvykių medis, vaizduojantis įvykių seką, kuri baigiasi skeveldrų išmetimu slėginiam indui sprogstant BLEVE būdu.....	38
2.2 pav. Pleišėjimo schemų grupės, sprendžiamame pavyzdyje ir susietos su išsišakojimo įvykiais E_{41} , E_{42} ir E_{43} ($m = 3$).....	46

2.3 pav. Trikampė tikslo funkcijos $f(\theta)$, išreikštos (2.10a) lygtimi, diagrama (funkcijos parametrai $\mu_{spec, k}$ ir $\sigma_{spec, k}^2$ pateikti 2.2 lentelėje).....	48
2.4 pav. Neapibrėžtų pleišėjimų schemų tikimybių p_k marginalieji beta tankiai: marginalieji aprioriniai skirstiniai Be(0.999, 0.614), Be(0.438, 1.175) ir Be(0.176, 1.437) parodyti viršutiniame grafike, marginalieji aposterioriniai skirstiniai Be(4.0, 2.62), Be(2.44, 4.18) ir Be(0.176, 6.44) pavaizduoti apatiname grafike.....	49
2.5 pav. Trikampės <i>Dirichlė</i> tankių diagramos: apriorinis tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 0.999, 0.438, 0.176)$ pavaizduotas kairiajame grafike, aposteriorinis tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 4.0, 2.44, 0.176)$ pavaizduotas dešiniajame grafike.....	50
2.6 pav. Neapibrėžtos bent vienos skeveldros išmetimo tikimybės p_{eject} beta skirstinio: apriorinių skirstinių tankiai Be(1.881, 0.5) ir Be(1.228, 0.326) bei aposteriorinio skirstinio tankis Be(3.88, 1.5)	52

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Cilindrinų slėginių indų avarių sąrašas, kuriame nurodytos avarių priežastys ir aplinkybės (Mosnier et al., 2014)	14
1.2 lentelė. Kai kurios BLEVE avarijos, nutikusios su cilindriniais indais per pastaruosius 70 metų (Mannan, 2012; T. Abbasi & S. A. Abbasi, 2007, interneto šaltiniai, įskaitant <i>Wikipedia</i>)	15
1.3 lentelė. Pagrindiniai avarių, sukėlusių BLEVE sprogimus, iniciatoriai (T. Abbasi & S. A. Abbasi, 2007)	16
1.4 lentelė. Avarijos metu susidariusių didesnių skeveldrų charakteristikos (Piccinini & Demichela, 2006).....	27
1.5 lentelė. Duomenys apie cilindrinų indų sprogimų BLEVE būdu metu susidarantį skeveldras (Sun et al., 2012)	33
1.6 lentelė. <i>Clopperio–Pearsono</i> 95 % pasikliautinieji intervalai (PI), apskaičiuoti vertinant išvardintų pleišėjimo schemų tikimybes (PI apskaičiuoti nagrinėjant 89 gaisro sukeltus indų sprogimus) *	34
2.1 lentelė. Pleišėjimo schemų skirstymas pagal indo irimo pavojingumą	39
2.2 lentelė. Skaičiavimo seka, taikyta <i>Dirichlė</i> modelio parametrų θ_k , išreiškiančių pleišėjimo schemų grupių tikimybes, reikšmėms apskaičiuoti (pleišėjimo schemų grupės pavaizduotos 2.2 pav.)	47

IVADAS

Nepaisant vis didėjančio skeptiškumo angliavandeniliais (iškastiniu kuru) gaunamos energijos atžvilgiu, dauguma Vakarų pasaulio šalių vis dar negali apsieiti be šio energijos šaltinio. Vienas iš energijos gavimo būdų yra suskystintųjų gamtos dujų deginimas bei suskystintųjų naftos dujų naudojimas. Šioms dujoms laikyti ir transportuoti naudojami slėginiai indai, kurie yra neatsiejama ir esminė šio energijos pasikeitimo proceso dalis. Normaliomis eksploatacijos sąlygomis slėginio rezervuaro ir vamzdynų naudojimas nekelia didesnių problemų. Tačiau retkarčiais tokių slėginių indų ūkį ištinka avarijos, kurios baigiasi nekontroliuojamu induose saugotų medžiagų nuotėkiu, uždegimu ir dėl to įvykstančiais sproginiais. Šie sproginiai neretai turi domino poveikį ir gali inicijuoti pramonines avarijas, sukeliančias katastrofiškas pasekmes.

Vienos iš skaudžiausių slėginių indų avarių yra jų sproginiai gaisro metu. Techninėje literatūroje tie sproginiai yra vadinami besiplečiančių verdančio skysčio garų sproginiais ir tarptautiniu mastu yra žymimi anglišku trumpiniu BLEVE (angl. *boiling vapour liquid explosion*). Šiame darbe atlikto tyrimo dėmesys buvo sutelktas į tokio tipo sproginus. Buvo siekta suformuoti matematinį modelį, kuris leistų prognozuoti šių indų pleišėjimo pobūdį, kuris darbe yra vadinamas pleišėjimo schemomis (angl. *failure patterns*). Tų schemų nuspėjimas turi didelės įtakos vertinant riziką, susijusią su slėginių indų sproginiais BLEVE būdu. Pleišėjimo schemas nulems skeveldrų, kurios galėtų būti išmetamos sproginio metu, formą ir dėl skriejimo padaromą žalą.

Šiame darbe nagrinėjama žalos, atsiradusios dėl cilindrinų slėginių indų sproginų, vertinimo problema. Dėmesys skiriamas sproginą sukeliančių indų sienelėse išsivysčiusių plyšių išsidėstymui. Atliekant tyrimus teigta, kad tokio išsidėstymo pobūdis gali turėti lemiamą įtaką indo irimui į didelių gabaritų skeveldras. Šio darbo uždaviniai – įvertinti slėginiams indams sprogius susidarantių skeveldrų formą ir su ja susijusias charakteristikas. Siekta BLEVE būdu sproginčių slėginių indų pleišėjimo schemas prognozuoti remiantis Bajeso statistine teorija bei jungtiniu multinominiu – Dirichlė skirstiniu.

Siekta ištirti, kaip Bajeso statistinės teorijos metodas leidžia apdoroti duomenis apie pleišėjimo schemas ir tų duomenų pagrindu vertinti schemų tikimybes. Siekiant šio tikslo pritaikytas multinominis – Dirichlė skirstinys tinka išreikšti episteminių neapibrėžtumų šių tikimybių atžvilgiu. Jis naudotas parenkant apriorinius ir aposteriorinius tikimybių skirstinius. Bajeso metodu atliekamas pleišėjimo schemų tikimybių vertinimas leidžia į formaliąją tikimybinę rizikos analizę įtraukti slėginio indo pleišėjimo schemų prognozę. Šiuo metu tikimybinis pleišėjimo schemų numatymas remiasi praeities avarių duomenimis ir yra vienintelis praktiškas būdas, kaip įvertinti slėginio indo sproginio metu susiformuosiančią pleišėjimo schemą. Įprastas (deterministinis) mechaninis ir metalurginis tyrimas iki šiol nepateikė patikimų modelių, leidžiančių nuspėti pleišėjimo schemas tiriamų sproginų atveju.

Pagrindinis tikslas, kurio siekta rašant šį darbą, buvo pasiūlyti, kaip prognozuoti slėginių indų sprogo metu susiformuojančias pleišėjimo schemas. Schemų prognozavimas atliktas taikant matematinius modelius ir pasitelkiant statistinius duomenis apie BLEVE sprogius, kurie įvyko per pastaruosius dešimtmečius. Matematinė prognozavimo išraiška buvo dažniausiai pasitaikančių slėginių indų irimo schemų tikimybės. Dėl negausių duomenų apie šių schemų pasireiškimo skaičių buvo siekta duomenų trūkumą kompensuoti ekspertų spėjimais, išreikštais su aprioriniais ir aposterioriniais tikimybių skirstiniais. Norint tai atlikti buvo pritaikyta indų skilimo į skeveldras modeliavimo schema, skirta skaičiuoti skilimo schemas nusakančias tikimybes. Darbo metu atliktų tyrimų rezultatai rėmėsi tokiomis mokslinės veiklos priemonėmis: tikimybių teorija, klasikine matematine statistika, statistiniu modeliavimu, grindžiamu ekspertų spėjimais, bei negausių duomenų atveju taikomu Bajeso teorijos įgyvendinimu.

1. GAISRO SUKELIAMOS SLĖGINIŲ INDŲ AVARIJOS IR TŲ INDŲ IRIMO PROGNOZAVIMO PROBLEMA

1.1. Slėginių indų avarijos ir jų sukeltas indų skilimas į skeveldras

1.1.1. Bendras slėginių indų sprogo pobūdis

Avariniai slėginių indų irimai yra įvairiai skirstomi. Skirtingą mechaninį irimo pobūdį gali turėti storasieniai indai ($r_{inner}/\delta_{wall} \geq 10$) ir plonasieniai indai ($r_{inner}/\delta_{wall} < 10$) (pvz., Anderson, 1995). Indas gali suirti trapijai į santykinai didelį skaičių skeveldrų, kai jis pagamintas iš tokių medžiagų, kaip aukšto stiprumo plienas, stiklas, betonas (pvz., Goran & Josip, 2011). Indo irimas gali būti plastiškas (angl. *ductile*), jei jis pagamintas iš įprastinio stiprumo plieno, nerūdijančiojo plieno bei kai kurių aliuminio lydinių ir polimerų. Plastiško irimo metu, indo medžiaga prieš suirdama pasiekia dideles plastines deformacijas. Suskystintųjų dujų cilindrai priklauso plonasienių indų grupei. Gaisrui veikiant tokie indai suyra plastiškai, skildami į santykinai nedidelį skaičių skeveldrų (pvz., Birk, 1996). Šis irimas sukelia BLEVE sprogo.

Pagrindinės slėginių indų sprogo priežastys yra dvi (Mosnier et al., 2014):

- Staigus slėgio inde kilimas, kurį gali nulemti indo perpildymas arba perkaitinimas. Perkaitinimą gali sukelti išorinis gaisras, nekontroliuojama reakcija arba vidinis sprogo inde. Šie reiškiniai sukelia slėgio kilimą inde ir šis slėgis viršija dinaminio indo trūkimo slėgį.
- Slėginio indo stiprio sumažėjimas dėl korozijos, perkaitinimo, medžiagos defekto arba išorinio smūgio.

Staigus slėgio kilimas, kuris suardo indą, gali būti nulemtas žmogaus klaidos, nekontroliuojamos cheminės reakcijos, fizinio BLEVE reiškinio, laikomos medžiagos masės padidėjimo, išorinio sprogo ir kitų reiškinų. Kai kurios indų sprogo priežastys yra aprašytos 1.1 lentelėje.

Indų sprogo (angl. *vessel explosion*) ir besiplečiančių verdančio skysčio garų sprogo (angl. *boiling-liquid expanding-vapour explosion, BLEVE*) yra fiziniai sprogo, vykstantys staigiai suyrant indui, kuriame yra suslėgtosios dujos arba perkaitintas skystis, esantis pusiausvirosios būsenos jo garų atžvilgiu. Perkaitinto skysčio temperatūra yra daug aukštesnė už jo virimo temperatūrą atmosferiniame slėgyje. Toliau toks sprogo bus vadinamas angliška santrumpa BLEVE, prigijusia daugelio kalbų saugos terminijoje.

1.1 lentelė. Cilindrinų slėginių indų avarių sąrašas, kuriame nurodytos avarių priežastys ir aplinkybės (Mosnier et al., 2014)							
Metai	Vieta	Indo rūšis ir talpa	Laikoma medžiaga	Avarijos priežastis	Sukeltas reiškinys	Materialinė žala	Žuvo/ sužeista
1958	<i>Alma</i> , JAV	80 m ³ cilindrinis indas	SND (butanas)	Viršslėgis	Debesies sproginimas	^a	1 ž/4s
1959	<i>Brinkley</i> , JAV	Trys cisterninės priekabos, $V < 60$ m ³	SND (butanas)	Žmogaus klaida	BLEVE	^a	^a
1970	<i>Crescent City</i> , JAV	Geležinkelio cisternos	SND	Kibirkštys, kilusios traukinio avarijos metu	BLEVE	Cisternų skeveldros skriejo iki 500 m	60s
1973	<i>Saint-Amand</i> , Pranc.	Cisterninė puspriekabė	SND (propanas)	Eismo įvykio sukeltas nuotėkis	BLEVE	Skeveldra trenkėsi į pastatą, plito gaisras	13 ž
1973	<i>Kingman</i> , JAV	75 m ³ geležinkelio cisterna	SND	Žmogaus klaida	Dujų užsidegimas ir BLEVE	Cisternos dalys išmestos 365 m atstumu, uždegti penki pastatai	13 ž/95s
1977	<i>Kurtkoy</i> , Turkija	10 t cilindrinis indas	SND (butanas)	Kibirkštys, kilusios atnaujintus elektros tiekimą	BLEVE	Cilindro galai išmesti 80 m atstumu, 500 m spinduliu išdužo langai	^a
1977	Kataras	23 000 t kriogeninis indas	SND	Nekokybiškos virintinės siūlės ir nepakankama priežiūra	Garų debesies sproginimas	Visiškai sugriauta gamykla, pažaidos 2 km spinduliu	7 ž
1984	Meksika	48 cilindriniai indai	SND	Vamzdžio suirimas esant 2 barų slėgiui	BLEVE ir domino poveikiai	Skeveldros išmėtytos apie 1200 m	650 ž/6400s
1988	<i>Asahikawa</i> , Japonija	Cilindrinis indas	SND	Procedūros nesilaikymas, sukėlęs nuotėkį	Sproginimas ir gaisras	Suardyta 1207 cilindrinų indų	3 ž/2s
1990	<i>Sydney</i> , Australija	Cisterninės priekabos, įvairūs cilindriniai indai	SND	Elektros kibirkštis ir smulkus indo sproginimas	BLEVE sproginų grandinė	Sprogimo banga justa už 3 km, išmėtyti šimtai smulkių cilindrių	^a
1990	<i>Ulsan</i> , P. Korėja	^a	SND (butanas)	Statinės elektros iškrova	Gaisras ir indo sproginimas	^a	^a
2001	<i>Sainte Sophie</i> , Kan.	Dujų cilindrai, $m < 180$ kg	SND (propanas)	Trumpas jungimas	BLEVE	Sunaikinta 200 – 300 indų ir vilkikas	nėra

^a Informacijos nerasta.

1.2 lentelė. Kai kurios BLEVE avarijos, nutikusias su cilindriniais indais per pastaruosius 70 metų (Mannan, 2012; T. Abbasi & S. A. Abbasi, 2007, interneto šaltiniai, įskaitant *Wikipedia*)

Metai	Vieta	Avarijos priežastis	Laikoma medžiaga	Cilindrinis indas	Žuvo/sužeista	Nuotekio
1999	<i>Athens–Lamia</i> kel, Graikija	Eismo avarija	SND ¹	Automobilinė cisterna	4ž/13s	^a
1999	<i>Toronto</i> , Kanada	Nuvažiavimas nuo bėgių	SND	Geležinkelio cisterna	^a	> 60
1999	<i>Quebec</i> , Kanada	Nuvažiavimas nuo bėgių	Angliavandeniliai	Geležinkelio cisternos	2s	2700
2000	<i>Eunice</i> , JAV	Nuvažiavimas nuo bėgių	SND arba SGD ²	Geležinkelio cisterna	^a	^d
2001	<i>Kanpur</i> , Indija	Eismo avarija	SND	Automobilinė cisterna	^a	12ž/6s
2002	<i>Tivissa</i> , Ispanija	Eismo avarija (apvirtimas)	SGD	Automobilinė cisterna	1ž/2s	48 m ³
2003	<i>Louisville</i> , JAV	Perkaitimas	Maltodreksinas	Technologinis indas	1ž	^a
2004	<i>Baltimore</i> , JAV	Eismo avarija	Propanas	Automobilinė cisterna	10ž	^a
2010	<i>Bialystok</i> , Lenkija	Traukinių susidūrimas	Naftos distiliatas	Geležinkelio cisterna	nėra	^a
2011	<i>Zarzalico</i> , Ispanija	Eismo avarija	SGD	Automobilinė cisterna	1ž	19,6
2018	<i>Bologna</i> , Italija	Eismo avarija	SND	Automobilinė cisterna	3ž/67s	^a
2019	<i>Yancheng</i> , Kinija	Gaisras	Tarpinė medžiaga	Technologinis indas	78ž/94s	^a
2020	<i>Zhejiang</i> , Kinija	Eismo avarija	SND	Automobilinė cisterna	19ž/170s	^a

^a Informacijos nerasta.

^d 2000 žmonių evakuota.

¹ Suskystintos naftos dujos.

² Suskystintos gamtinės dujos.

1.1.2. Išorinio gaisro kaitinamų indų sprogimai BLEVE būdu

BLEVE sproginimas paprastai būna nepalankių įvykių grandinės dalis. Avarijų scenarijai, kurių grandis būdavo BLEVE įvykiai, turėdavo įvairius iniciatorius. Jų pasireiškimo dažniai pateikti 1.3 lentelėje. Šių iniciatorių nereikia painioti su tiesioginiu BLEVE sprogimą sukeliančiu įvykiu, t. y. išoriniu sprogsiančio indo kaitinimu.

1.3 lentelė. Pagrindiniai avarijų, sukėlusių BLEVE sprogimus, iniciatoriai (T. Abbasi & S. A. Abbasi, 2007)

Iniciatorius	Nuošimtis
Gaisras	36 %
Mechaninė pažaida	22 %
Perpildymas	20 %
Nekontroliuojama reakcija	12 %
Perkaitinimas	6 %
Garų erdvės užteršimas	2 %
Mechaninis gedimas	2 %

Cilindrinio indo su degiomis suskystintosiomis dujomis sproginimas BLEVE būdu sukelia stiprią šiluminę spinduliuotę ir santykinai silpną viršslėgio bangą, sklindančią nuo sprogimo epicentro. Tačiau toliausiai siekiantis BLEVE pavojus yra to indo skeveldros (pvz., Birk, 1996). Gaisro, provokuojančio skeveldros susidarymą, ir skeveldros išmetimo momento nuotraukos pateiktos 1.1 pav.



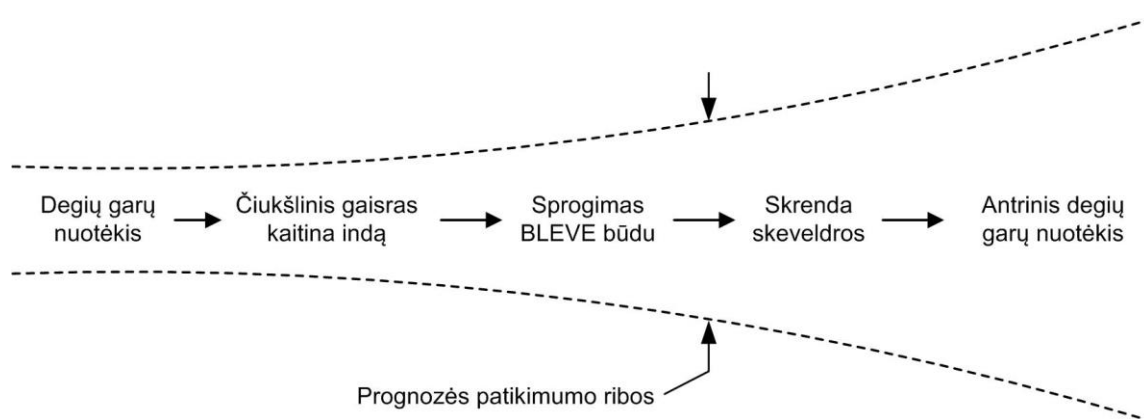


1.1 pav. Du kadrai iš videofilmo, vaizduojančio cilindrinio indo sprogimą: išorinio gaisro liepsnos kaitinamas indas ir suirusio indo skeveldros išmetimas [BLEVE Demonstration, You Tube, 2009]

Skeveldros gali sukelti „domino“ poveikį (1.2 pav.). Žinomiausias tokio poveikio pavyzdys yra 1.1 ir 1.2 lentelėse minėta 1984 m. įvykusi dujų saugyklos avarija Mechiko mieste (pvz., Mannan, 2012).

Indo sprogimo BLEVE būdu metu susidaro dviejų rūšių skeveldros:

- pirminės skeveldros, kurios yra didelės suyrančio indo korpuso dalys;
- antrinės skeveldros, kurios yra greta indo buvusių arba su indu sujungtų objektų fragmentai (prie indo prijungti vamzdžiai ir kitos armatūros bei įrangos dalys, indo atramos, šalia stovėję objektai, žr. 1.6, 1.8 ir 1.12 pav.).



1.2 pav. Tipinė įvykių grandinė su indo sprogimu BLEVE būdu (pagal Mannan, 2012)

Šiame darbe bus nagrinėjamos tik pirminės skeveldros, nes jų kinetinė energija būna daug didesnė už antrinių skeveldrų energiją. BLEVE metu plastiškai yrantys indai skyla į santykinai nedidelį skaičių skeveldrų.

1.2. Nagrinėjamos gaisro kaitinamų slėginių indų skilimų avarijos

1.2.1. Sprogimai su vienos skeveldros susidarymu

2011 m. spalio 20 d. Ispanijos provincijoje *Murcia* cisterninė puspriekabė, vežusi SGD, susidūrė su sugedusiu ir kietosios dangos kelkraštyje stovėjusiu vilkiku, kuris ant puspriekabės vežė gelžbetonines konstrukcijas (Planas *et al.*, 2015). Cisterninė puspriekabė nuvirto į šalikelės griovį ir liko gulėti pasvirusi į dešinę. Eismo avarijos metu galėjo būti pažeisti ir netekti sandarumo cisternos vamzdžiai ir vožtuvai. Tik sustojus, cisterna iš karto užsidegė ir skleidė dideles liepsnas. Gaisro pradžioje dūmai buvo tamsūs, nes degti galėjo dyzelinis vilkiko kuras, o vėliau – cisternos izoliacija iš poliuretano (1.3 pav.). Dyzelinio kuro uždegimo šaltinis nenurodomas, tačiau kurą padegti galėjo pažeista vilkiko elektros įranga. Vėliau, vykstant nuotėkiui iš pažeistos cisternos indo, pagrindiniu kuru tapo SGD. Dūmų sumažėjo, gaisro liepsnos tapo šviesesnės. Maždaug 70 min po eismo avarijos cisternos indas sprogo BLEVE būdu (1.4 pav.).



1.3 pav. Cisterninės puspriekabės gaisras Ispanijos provincijoje *Murcia*: gaisro pradžioje degė dyzelinis vilkiko kuras, vėliau padangos ir šiluminė cisternos izoliacija, sklido juodi dūmai; vėliau pagrindinis kuro šaltinis buvo nutekančios SGD, dūmų sumažėjo (Planas *et al.*, 2015)



1.4 pav. Suskystintąsias gamtines dujas vežusios cisternos skeveldros, susidariusios po BLEVE sprogimo (Planas-Cuchi *et al.*, 2015)

2018 m. rugpjūčio 6 d. A1-A14 greitkelio sankryžoje autocisterna trenkėsi į tirpiklius gabenusį sunkvežimį Bolonijoje, Italijoje. Buvo pramušti vilkilo bakai, užsidegė iš jų išsipylęs kuras ir abu sunkvežimius apsupo liepsnos, padidinusios suskystintos naftos dujų temperatūrą (SND) autocisternoje. Kelias minutes kilus juodiems dūmams po pradinio susidūrimo dėl aukštos SND temperatūros ir indo plyšimo kilo BLEVE sprogimas (Gamberini *et al.*, 2020).

Sprogimo banga apgadino pastatus 250 metrų atstumu, taip pat ir greitkelio tilto sijos konstrukciją (1.5 pav.). Todėl tiltas įgriuvo ant apatinio miesto kelio. Uždegiminių skysčių dispersija nuo sulūžusio tilto uždegė 50 transporto priemonių po tiltu, priklausančių dviem automobilių pardavėjams, sukeldama gaisro išplitimą.

Avarinių operacijų centras pirmuosius skambučius apie įvykį gavo 13.45 val. Į įvykio vietą buvo išsiųsti 25 greitosios medicinos pagalbos automobiliai, keturi medicininiai automobiliai, malūnsparnis ir du maršrutiniai autobusai. Įvykio vietoje intervencijos veiksmus pasiskirstė ugniagesių brigada, greitosios pagalbos pajėgos ir policija. Autocisterną vairavęs vairuotojas žuvo sunkvežimių susidūrimo metu, iš viso buvo gydomi 158 pacientai. Didžiąją dalį nukentėjusiųjų sudarė praeiviai, dėl intensyvios sprogimo metu susidariusios karščio bangos patyrę įvairaus laipsnio nudegimus. Keletas žmonių žuvo dėl įgriuvusio tilto.



1.5 pav. Cisterninės puspriekabės avarija, gaisras ir sproginimas, įvykę 2018 m. Bolonijos mieste Italijoje (The New York Times, 2019)

2012 m. sausio 14 d. apie 8.00 val. tarp Puerto Lumbrero ir Granados (Ispanijoje) SND vežusi autocisterna trenkėsi į pakelėje įstrižai sustojusį sunkvežimį, vežusį dvi dideles betono plokštes. Autocisterna išlaužė apsauginį greitkelio turėklą ir už 20 metrų nuo stovinčio sunkvežimio nuvirto į griovį šalia greitkelio. Autocisterna pasviro dešinėn, o vairuotojo kabina įstrigo tarp priekabos ir kelio šlaito. Kai autocisterna nustojo judėti po susidūrimo su sunkvežimiu, ji staigiai užsidegė (Planas et al., 2015). Greitosios medicininės pagalbos įstaigos, gavusios pranešimą apie įvykį 8.21 val., pasiuntė ugniagesių brigadą į avarijos vietą.

Atvykus ugniagesiams, ugnis buvo pasiglemžusi didelę cisternos apvalkalo ir izoliacijos dalį. Degimo metu išsiskyrė šviesesni dūmai, nurodantys, kad degė tik cisternos turinys. Todėl ugniagesiai nutraukė eismą greitkelyje abejomis kryptimis ir užtvėrė įvykio zoną 600 m spinduliu. Aplink susibūrę praeiviai buvo evakuoti siekiant išvengti sprogimo bangos sukelsiančios žalos. Prieš sprogstant cisternai, pasigirdo veriamas švilpimas ir liepsna suintensyvėjo. Ugniagesiai atsitraukė 200 m nuo cisternos ir ši sprogo. Sprogimo metu cisternos indas suiro formuojantis išilginiam plyšiui, tačiau nuo indo korpuso neatitrūko ir nebuvo išmestos jo dalys (1.6 pav.).



1.6 pav. Dujinės cisternos sproginimo metu susiformavusi indo korpuso liekana, nuo kurios neatplyšo ir nebuvo išmestos jo dalys (Puerto Lumbrero ir Granados SND autocisternos avarija, 2012 m.)

1.2.2. Sprogimai su dviejų skeveldrų susidarymu

2021 metų sausio 6 d., 14.30 val., Bozeman grafystėje, Montanoje (JAV) avarijos metu užsidegė propano dujas vežęs sunkvežimis. Sunkvežimio vairuotojas nesuvaldė automobilio apledėjusiame kelyje ir rėžėsi į parduotuvės „Kenyon Noble“ fasadą, nutraukdamas dujų pripildymo stotelės liniją. Išiplieskus gaisrui vairuotojas išpėjo apie avariją netoliese buvusius žmones ir juos evakavo 0,8 km atstumu nuo likusių propano cisternų prieš pirmąjį sprogimą. Atvykus ugniagesiams sunkvežimio 3,80 m³ tūrio propano cisternos degė atvira liepsna, o kita to paties tūrio cisterna įplyšo ir sprogo BLEVE būdu (1.7 pav.). Naudodami didelius antžeminius monitorius ugniagesiai užgesino

gaisrą bei rezervuarus. Avarijos metu nebuvo sužeistųjų. Gaisro gesinimo metu šalia esantis greitkelis buvo uždarytas į abi puses 45-ioms minutėms.



1.7 pav. Propano cisternos po BLEVE sprogimo Bozemano grafystėje, Montanoje (Big Sky Fire Department, 2021).

1.2.3. Sprogimai su trijų arba keturių skeveldrų susidarymu

2002 m. birželio 22 d. 13.30 val. sprogo automobilinė cisterna kelyje ties Ispanijos Tivisos miestu Katalonijos provincijoje. Automobilis, vežęs SGD, neteko valdymo kelio nuokalnėje. Tai tikriausiai įvyko dėl per didelio greičio. Cisterna apvirto ant kairio šono, slydo ir sustojo ant smėlėto šlaito. Iš karto po to tarp vairuotojo kabinos ir cisternos pasirodė liepsnos, iš pradžių degusios be dūmų. Netrukus užsidegė ir sprogo automobilio vilkiko padangos. Joms degant išsiskyrė juodi dūmai. Gaisro liepsnos pasiekė didelį aukštį. Tai liudija nuotrauka, daryta 2 min po kelio avarijos (1.8 pav.). Šį gaisrą galėjo sukelti degantis dyzelinis cisternos vilkiko kuras arba suskystintosios dujos, tekančios iš trūkusio vamzdžio, jungusio cisterną su antiavariniu vožtuvu. Degti galėjo ir kuras, ir dujos. Balti dūmai, matomi 1.8 pav., galėjo būti skysčio, tekančio iš antiavarinio vožtuvo, garai. Maždaug 20 min po kelio avarijos cisterna sprogo. Iš pradžių įvyko silpnas sprogimas. Tada pasigirdo stiprus šnypštimas ir po to – stiprus sprogimas. Po jo gaisras staigiai užgeso ir virš cisternos susidarė baltas debesis. Labai greitai jis užsidegė ir liepsna buvo ugnies kamuolio pavidalo. Žuvo vairuotojas, buvo sužeisti du žmonės, stovėję maždaug 200 m nuo avarijos vietos.

Automobilinė cisterna buvo pagaminta 28 mėnesius prieš avariją. Cisterna buvo 2,33 m skersmens cilindras, jo ilgis – 13,5 m. Cisternos indas buvo pagamintas iš nerūdijančio plieno.

Cisterna buvo izoliuota 130 mm storio poliuretano sluoksniu, dengtu apsaugine 2 mm storio aliuminio plokšte. Cisternos tūris buvo 56 m³. Cisternos viduje buvo pertvaros, dalinančios ją į 7,5 m³ erdves. Cisternos darbinis slėgis buvo 7 barai (700 kPa), o hidraulinio bandymo slėgis – 9,1 baro (910 kPa). 85 % cisternos būdavo užpildoma skysčiu. Joje buvo maždaug 47,6 m³ skysčio 8,4 m³ dujų. Taigi, cisterna vežė maždaug 19 tonų SGD. Aliumininis cisternos vilkiko dyzelinio kuro bakas buvo 0,5 m³ talpos.



1.8 pav. Deganti automobilinė cisterna, nufotografuota 2 min po kelio avarijos ir maždaug 18 min iki sprogo (Planas-Cuchi et al., 2004)

Pirmasis sprogoimas, po jo girdėtas šnypštimas ir stiprus antrasis sprogoimas leidžia teigti, kad cisternos indo atsakas buvo dviejų žingsnių. Pirmiausiai labai įkaitintoje cisternos sienos dalyje susidarė pradinis plyšys. Jam plisti trukdė aplinkui esantis vėsesnis ir stipresnis cisternos sienos plotas. Iš plyšio pradėjo veržtis ir degti skystis bei garai. Taip toliau buvo kaitinami plotai plyšio galuose, jis plito ir šis procesas baigėsi staigiu ir visišku cisternos suirimu. Cisterna suiro susidarant dviems plyšiams skersai indo ir vienam – išilgai indo. Manoma, kad cisterna sprogo BLEVE būdu (Planas-Cuchi et al., 2004).

Cisterna suiro į kelias pagrindines dalis. Didžiausios buvo cisternos priekinė ir galinė dalys (1.9 pav.). Priekinė maždaug 4 m ilgio cisternos dalis buvo nusviesta 125 m ir pataikė į namą. Galinė dalis kartu su automobilio rėmo dalimi nuskrido 80 m. Vilikio variklis ir kabina buvo nusviesti 257 m atstumu. Pertvaros ir šiluminę izoliaciją sauganti aliuminio plokštė buvo išmėtytos aplink sprogoimo vietą. Automobilio rėmas buvo stipriai iškraipytas. Dešinioji cisternos pusė, gaisro metu buvusi viršuje, apdegė, o kairioji, gulėjusi ant žemės nebuvo paliesta liepsnų. Galinės cisternos dalys, kai kurios automobilio rėmo dalys, variklis ir vidurinė cisternos dalis nukrito beveik vienoje tiesėje

(1.10 pav.). Tai liudija, kad, sprogstant cilindriniams indams, pagrindinės skeveldros dažniausiai išmėtomos išilginės ašies kryptimi.



1.9 pav. Sprogimo išmėtytos priekinė, vidurinė ir galinė cisternos dalys (iš viršaus į apačią) (Planas-Cuchi et al., 2004)



1.10 pav. Automobilinės cisternos dalių išsidėstymas po sprogimo (Planas-Cuchi et al., 2004)

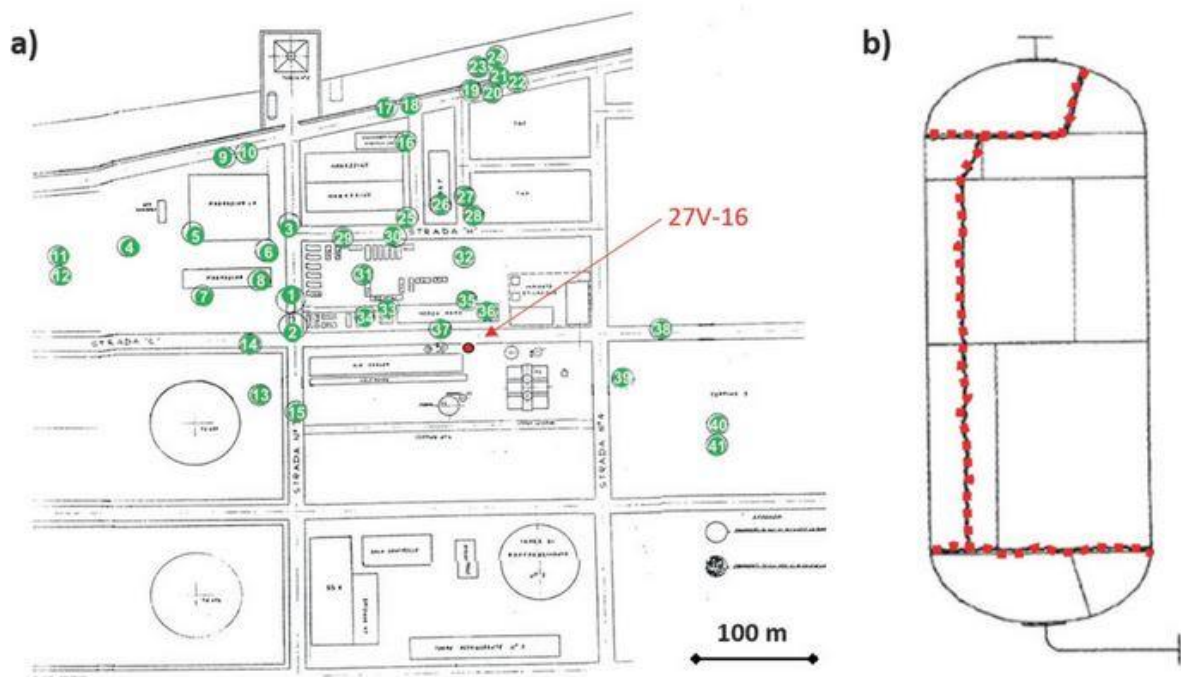
Cisternos sprogimo metu susidaręs ugnies kamuolys buvo maždaug 150 m skersmens ir egzistavo apie 12 sekundžių. Jo centro aukštis nuo žemės paviršiaus buvo apie 110 m (Planas-Cuchi et al., 2004). Ugnies kamuolio šiluminė spinduliuotė buvo stipri. Du žmonės, stovėję 200 m nuo sprogimo vietos patyrė pirmojo ir antrojo laipsnio nudegimus. Juos veikianti spinduliuotė buvo maždaug 16 kW/m^2 . Nukentėję žmonės buvo lengvai apsirengę, nes avarijos dieną buvo karšta. Sprogimo banga, sukelta yrant cisternai, buvo santykinai silpna. Tokią bangą galėtų sukelti maždaug 75 kg trotilo sprogimas.

Avarija ties Tivisos miestu parodė, kad izoliuoti suskystintųjų dujų cisternas degiu poliuretanu nepravartu saugos požiūriu. Jį reikėtų pakeisti nedegia izoliacija, pavyzdžiui, mineraline vata. Sauga taip pat padidėtų, aliumininę izoliacijos dangą pakeitus plienine. Plačiau žiūrint galima teigti, kad suskystintųjų dujų vežimas automobilių cisternomis išlieka santykinai pavojinga veikla. Rimtesnė tokios cisternos avarija kelyje nesunkiai gali išsivystyti į sprogimą BLEVE būdu.

1.2.4. Sprogimai su sunkiau prognozuojamomis pleišėjimo schemomis

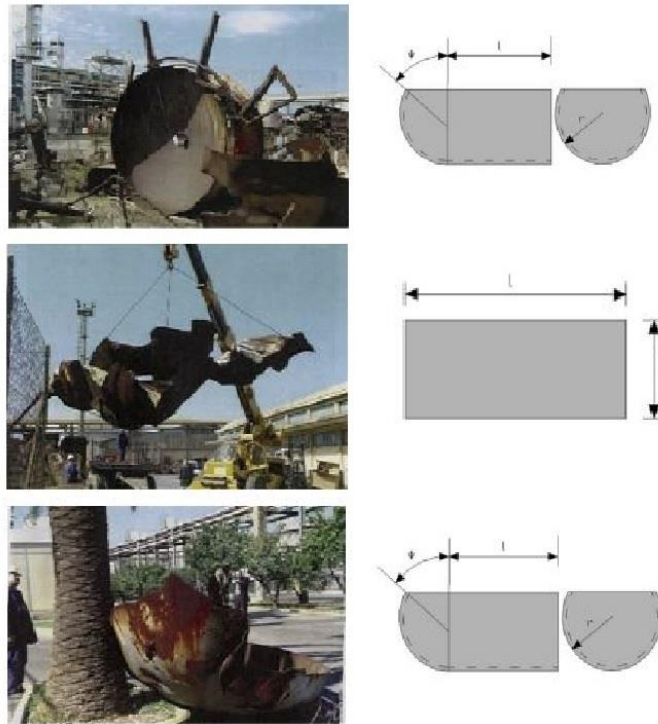
Piccinini ir Demichelos (2006) aprašomas 1993 m. birželio 3 d. įvykęs sprogimas naftos perdirbimo gamykloje Milazzo mieste, Sicilijoje. Naftos perdirbimo sistema buvo pritaikyta diaterminei alyvai. Tačiau dėl didelės kainos ir sunkumų pašalinant degimo produktus, diaterminė alyva buvo pakeista sunkiuoju benzinu. Slėgis rezervuare 27V-16 buvo valdomas azotu, tačiau, atnaujinus sistemą, jį pakeitė kuro dujomis, sudarytomis iš vandenilio, metano, etano, butano ir propano mišinių. Azoto tirpumas alyvoje yra ribotas, o kuro dujų sprogaus mišinio tirpumas alyvoje – daug didesnis nei azoto. Avariją sukėlė rezervuaro 27V-16 gedimas paleidimo metu (Piccinini & Demichela, 2006). Dėl techninės priežiūros ar vamzdynų valymo operacijų klaidų karštos alyvos

kontūre atsirado vandens. Vanduo, kontaktavęs su alyva, staigiai išgaravo pasiekęs iki 250°C įkaitusį rezervuarą 27V-16. Apsauginis rezervuaro vožtuvas nebuvo nustatytas susidariusiems garams išleisti, todėl rezervuaras sprogo dėl padidėjusio vidinio slėgio (Tugnoli et al., 2014) (1.11 pav.).



1.11 pav. Rezervuaro suirimo į skeveldras pavyzdžiai: a – žaliais sunumeruotais taškais pažymėtos skeveldrų išmetimo vietos po rezervuaro 27V-16 sprogimo, b – rezervuaro 27V-16 pleišėjimo schema (Piccinini & Demichela, 2006)

Rezervuaras 27V-16 suskilo į 41 skeveldrą (penki didžiausi indo fragmentai, purkštukai, rezervuaro konstrukciją laikančios sijos). Už 100 m nuo sprogimo vietos buvo rastas suplotas rezervuaro apvalkalas (1.12 pav.). Dalis susidariusių skeveldrų pateikta 1.4 lentelėje (Piccinini & Demichela, 2006).



1.12 pav. Dalis rezervuaro skeveldrų po sprogimo naftos perdirbimo gamykloje Milazzo mieste, Sicilijoje (Tugnoli et al., 2014)

1.4 lentelė. Avarijos metu susidariusių didesnių skeveldrų charakteristikos (Piccinini & Demichela, 2006).

Nr.	Skeveldra	Svoris, kg	Rezervuaro dalies svoris, %	Atstumas, m	Kryptis
1	Apvalkalas (cilindrinė dalis)	3860	55.14	100	70°ŠV
B	Apatinis antgalis ir apsauginis gaubtas	1000	14.28	0	0°
4	Viršutinis sferinis antgalis	970	13.86	190	70°ŠV
19	Skeveldra (liukas)	230	3.28	150	0°
3	Skeveldra (apvalkalo dalis)	130	1.86	120	50°ŠV
5	Skeveldra (apvalkalo dalis)	60	0.86	130	60°ŠV
41	Skeveldra (atraminė sija)	31	0.44	140	250°PR
14	Skeveldra (purkštuvai)	23	0.33	115	90°V
40	Skeveldra (juosta)	15	0.21	140	250°SE
Bendra rezervuaro masė:		≈7000	100		

1.3. Gaisro veikiamų slėginių indų irimo prognozavimo galimybės ir uždaviniai

Cilindriniai plieniniai indai yra plačiai naudojami įvairiose pramonės srityse pavojingų medžiagų laikymui ir transportavimui. Didžioji tokių medžiagų dalis yra komerciniai angliavandeniliai. Degių medžiagų laikymas ir gabenimas kelia didelę indų sprogimų riziką. Indai su angliavandeniliais dažniausiai sukelia tokias avarijas (Casal, 2018; CCPS, 2010; Mannan, 2012). Pavojingiausia avarija, kurią sukelia cilindriniai plieniniai indai, yra sproginimas BLEVE būdu (T. Abbaasi & S. A. Abbasi, 2007). Šis sproginimas įvyksta, kai indas suvėrimas kaitinamas iš išorės. Susidaro skeveldros, galinčios padaryti didelę žalą po BLEVE sproginimo (Birk, 1996). Šis sproginimas sukuria viršslėgio bangą ir ugnies kamuolį, sklaidžiantį intensyvią šiluminę spinduliuotę. Kiti pagrindiniai slėginių indų sproginimo tipai yra sproginimai dėl per didelio slėgio arba per didelės temperatūros, sproginimai dėl

perpildymo, dėl korozijos, dėl nutekėjusių skysčių reakcijos, dėl stipraus smūgio į slėginio indo korpusą arba dėl slėginio indo korpuso defektų (Baker et al., 1983). Šiame darbe nagrinėjami cilindrinio slėginių indų sproginiai BLEVE būdu. Kiti sproginio tipai yra nesusiję su gaisrinės saugos problemomis ir nagrinėjami nebus. BLEVE sproginiai paprastai ištinka paprasto, plastinio plieno indus, kurie suyra į kelias dideles skeveldras. Jos yra indo korpuso dalys ir vadinamos pirminėmis skeveldromis. Šios skeveldros gali padaryti didelės žalos. Įvairūs indo sistemos komponentai, prijungti prie jo technologinio eksploatavimo tikslu, taip pat gali būti išmesti skeveldrų pavidalu. Tačiau šių skeveldrų kinetinė energija bus mažesnė ir jos vertinant BLEVE riziką paprastai yra ignoruojamos. Tokios skeveldros yra vamzdžiai, vožtuvai, korpuso atrėmimo dalys ir kiti elementai, dar vadinami antrinėmis skeveldromis.

Beveik visais atvejais, slėginiai indai projektuojami taikant tradicinius metodus, nurodytus standartuose (AMSE, 2017; CEN, 2014; ISO, 2007). Šie metodai yra deterministiniai patikimumo analizės požiūriu. Tačiau tradiciniu projektavimu siekiama, kad saugos priemonės būtų svarbi slėginės įrangos dalis (CCPS, 2017; Li et al., 2019). Slėginiai indai projektuojami taip, kad būtų išvengta avarijų. Tradiciniame projekte paprastai neatsižvelgiama į slėginio indo sproginio galimybę, laikant, kad saugos priemonės šią galimybę maksimaliai sumažina. Tačiau atsitiktiniai ir dažnai katastrofiški slėginių indų sproginiai neturėtų būti ignoruojami ir juos reikia vertinti kaip potencialius, nors ir mažai tikėtinius, įvykius. Todėl išorinio gaisro sukeltų slėginių indų sproginų mechaninio ir, jei reikia, šiluminio poveikio prognozė galėtų papildyti tradicinį projektavimą. Tai liečia atvejus, kai indo sproginas gali sukelti domino poveikį ir eskaluoti grandininės avarijos eigą. Štai 1984 metais Meksikos dujų terminale įvykusi nelaimė yra gerai žinomas tokios avarijos pavyzdys (Mannan, 2014).

Indo sproginas įvyksta plyšus indo sienelei ir plyšiams besivystant susidarančioms skeveldroms. Rimta saugos problema iškyla tais atvejais, kai skeveldros skrieja į galimus taikinius. Duomenys apie slėginių indų sproginus, įskaitant BLEVE sproginus, rodo, kad skeveldros išmetamos ne visų avarijų metu (Holden & Reeves, 1985). Iki šiol skeveldrų susidarymas, išsviedimas ir skriejimas buvo modeliuojami deterministiškai (Baker et al., 1977; Baker et al., 1983; Baum, 1988; Baum, 1998; Tugnoli et al., 2013). Pastaruoju metu šie modeliai buvo derinami su stochastiniu (Monte Karlo) modeliavimu siekiant įvertinti neapibrėžtumus, susijusius su skeveldrų išsviedimo greičiais ir smūgio sukeltos žalos galimybe (Bradley et al., 2021; Pula et al., 2006). Anksčiau minėti deterministiniai metodai yra pagrįsti supaprastinančiomis ir idealizuojančiomis prielaidomis, susijusiomis su skeveldrų kiekiu ir forma. Supaprastinimas taikomas ir skaičiuojant indo dalių išsviedimo greičius ir skrydžio trajektorijas. Pagrindinis šių prielaidų elementas – indo pleišėjimo schemų idealizavimas. Pleišėjimo schemas yra plyšių išsidėstymas slėginio indo sienelėje, suformuojantis indo skeveldras.

Kiek mums žinoma, praktinių tyrimo rezultatų, leidžiančių prognozuoti pleišėjimo schemas vien tik deterministine mechanine ar metalurgine analize, nėra. Literatūros apie cilindrinį slėginių indų irimą yra daug. Tačiau patikimų matematinių modelių, tinkamų prognozuoti plyšių išsidėstymą indui sprogstant BLEVE būdu, nėra. Mechaninę ir metalurginę analizę apsunkina tai, kad pleišėjimo schemas gali priklausyti nuo slėginio indo ir išorinio gaisro sąveikos scenarijaus. Taigi, ir nuo gaisro plitimo už indo ribų (žr. grafinę iliustraciją, pateiktą Landucci et al. tyrime (2009)). Pavyzdžiui, pilnai gaisro apimtas indas gali suirti skirtingai, nei indas, kurio tik dalis paviršiaus yra kaitinama.

Šiame darbe siekiama atsakyti į klausimą, kaip prognozuoti pleišėjimo schemas, taikant Bajeso statistinės teorijos priemones. Iki šiol neapibrėžtumai, susiję su pleišėjimo schemomis, buvo išreiškiami empiriniais dažniais (proporcijomis), apskaičiuotiems gana nedideliu skilusių indų avarių skaičiui (Gubinelli & Cozzani, 2009a; Tugnoli et al., 2013).

Pleišėjimo schemų prognozavimas taikant Bajeso teoriją šiame darbe yra siūlomas dėl to, kad šiuo metu net pasauliniu mastu surinktų duomenų apie slėginių indų irimą yra santykinai nedaug. Skirtingai nuo klasikinės (Fisherio) statistinės analizės, Bajeso pleišėjimo schemų tikimybių įvertinimas yra naudingas tuo, kad leidžia įvertinimo procesą įtraukti ekspertų nuomonę. Šiame darbe siūlomi pleišėjimo schemų tikimybių įverčiai yra išreiškiami Bajeso aprioriniu ir aposterioriniu skirstiniais. Jie kiekybiškai įvertina episteminių šių tikimybių neapibrėžtumą. Šie įverčiai tinka tikimybinei rizikos analizei (TRA), kuria siekiama įvertinti galimą žalą dėl slėginių indų sproginų. TRA metodika iš esmės pagrįsta Bajeso statistikos teorija (pvz., Kelly & Smith, 2011; Siu & Kelly, 1998). Neapibrėžtumų, išreiktų Bajeso pleišėjimo schemų tikimybių įverčiais, propagavimas naudojant tokius TRA modelius kaip įvykių medžiai yra gana paprastas. Kita vertus, neapibrėžtumus, išreiškiamus klasikiniiais statistiniais pasikliautinaisiais intervalais, propaguoti (transformuoti į aukštesnį lygį) yra sudėtinga. Todėl ši statistinio vertinimo priemonė nelabai tinka apdorojant duomenis apie slėginių indų irimą.

Sutinkamai šiame darbe nustatyta metodika, pleišėjimo schemų įvykiai yra laikomi įvykio medžio diagramos išsišakojimo simbolių įvykiais. Kartu šie įvykiai yra traktuojami kaip bendrosios priežasties įvykiai (angl. *common cause events*), kurių prognozavimas plačiai paplitęs sprendžiant TRA uždavinius. Tokiems įvykiams prognozuoti paprastai taikomas Dirichlė tikimybių skirstinys, kuris yra daugiamatis beta tikimybių skirstinio analogas. Bajeso analizės taikymas prognozuojant pleišėjimo schemas gali būti laikomas pagrindine šio darbo naujove.

1.4. Galimybės prognozuoti slėginių indų pleišėjimo schemas remiantis turimais matematiniais metodais ir sukauptais duomenimis

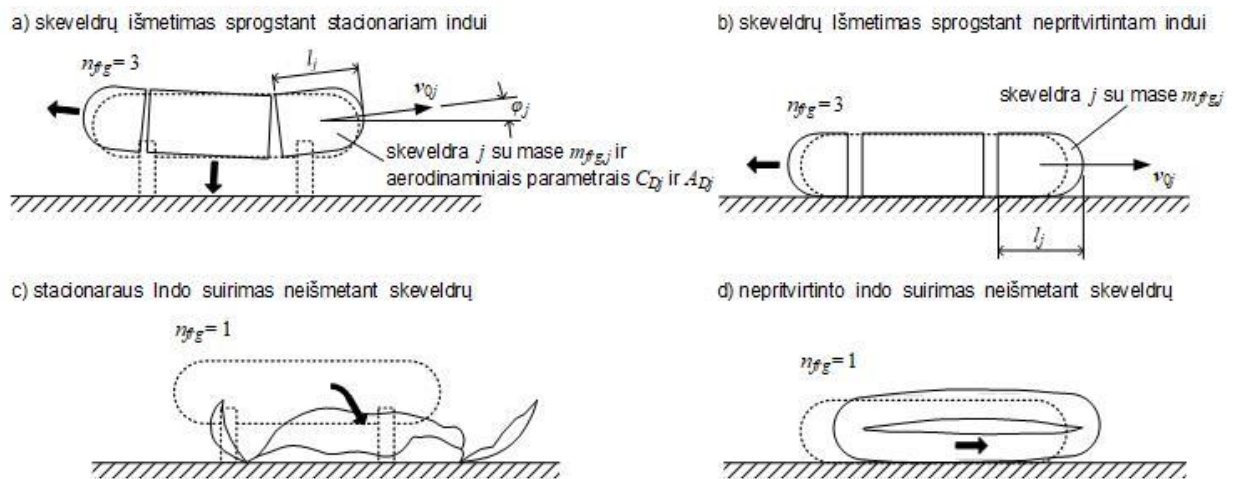
Pleišėjimo schema nustato skeveldrų, kurios gali būti išmestos dideliais atstumais, charakteristikas. Šios charakteristikos yra skeveldrų skaičius n_{fg} , skeveldrų forma, skeveldrų masės

$m_{fg,j}$, išmetimo greičiai v_{0j} ir aerodinaminiai parametrai C_{Dj} ir A_{Dj} (1.13 pav.). Vertikalūs skeveldrų išmetimo kampai φ_j ir azimutai taip pat yra skeveldrų charakteristikos, kurias priimta laikyti nepriklausančiomis nuo kitų anksčiau minėtų charakteristikų (Holden & Reeves, 1985; Mébarki et al., 2009). 1.13 pav. a ir b dalyse parodyti dviejų pleišėjimo schemų pavyzdžiai, vaizduojantys dviejų perimetrinių plyšių susidarymą cilindrinėse pritvirtinto ir nepritvirtinto indo dalyse. Nepritvirtinti indai gali sprogti įvykus automobilio arba geležinkelio eismo avarijai.

1.13 pav. b dalyje parodytą pleišėjimo schemą galima nesunkiai nustatyti gaisro sukulto autocisternos sprogimo atveju, įvykusi 2002 m. Ispanijoje (Planas-Cuchi et al., 2004). Pleišėjimo schemos taip pat susidaro ir indams sprogstant be skeveldrų išmetimo. Tokių avarių metu jokia indo dalis neatsiskiria nuo jo korpuso, o pleišėjimo liekanos nenuskrieja toli nuo pradinės indo padėties (1.13 pav. c ir d dalys). Tokių pleišėjimo schemų pavyzdžiai yra Zarzalico avarijoje (2011 m., Ispanija) ir Bolonijos avarijoje (2018 m., Italija) suirusios autocisternos (Gamberini et al., 2021; Planas et al., 2015).

Kiek mums žinoma, iki šiol sisteminga pleišėjimo schemų analizė apsiribojo tik vienu tyrimu. Jame nagrinėti 120 slėginių indų sprogimai, kuriuos tiriant buvo užfiksuotos pleišėjimo schemos (Gubinelli & Cozzani, 2009a; Gubinelli & Cozzani, 2009b; Tugnoli et al., 2013). Pagrindiniai šio tyrimo rezultatai – santykiniai ir absoliutiniai pleišėjimo schemų, užregistruotų tiriant praeityje įvykusias avarijas, dažniai. Šiuos išeitinius duomenis galima analizuoti taikant klasikinę ir Bajeso statistiką. Deja, minėtas tyrimas apsiribojo paprastu pleišėjimo schemų dažnių skaičiavimu ir šie dažniai buvo laikomi tų schemų tikimybių įverčiais. Tyrimo metu gauti duomenys nebuvo panaudoti, tarkime, vertinant skeveldrų smūgio sukeltą žalą TRA metodais.

Atsitiktinio gaisro veikiamų slėginių indų sprogimus sukelia karščio sukelta deformacija ir korpuso įtempimų lemiamas trūkimas. Po jo įvyksta nestabilus indo skilimas (Casal, 2018; CCPS, 2010). Tačiau, vis dar reikia išsiaiškinti, kas lemia nestabilaus skilimo pradžią ir vėlesnį viso indo irimą (Birk & VanderSteen, 2006; Roberts et al., 2001; Susan et al., 2005). Iki šiol neįmanoma tiksliai numatyti skilimo proceso ir susidarancios pleišėjimo schemos pasitelkiant vien tik mechaninę arba metalurginę analizę. Tačiau tokia analizė buvo naudojama po gaisro tiriant suirusius indus (Abo-Elkhier & Muhammad, 2020; Susan et al., 2005). Pastaruoju metu buvo atlikti mažų slėginių indų sprogimo BLEVE būdu tyrimai (Birk et al., 2019; Laboureur et al., 2012; Li et al., 2021). Jie suteikė vertingos informacijos apie skilimo reiškinį. Tačiau norint įvertinti šios informacijos naudą prognozuojant pramonėje naudojamų didelių slėginių indų pleišėjimo schemas, būtina atlikti specialų tyrimą.



1.13 pav. Keturi cilindrinų slėginių indų irimo į skeveldras pavyzdžiai: a ir c – stacionarių indų su atramomis irimas, b ir d – nepritvirtintų ir ant grunto gulinčių indų irimas (pvz., įvykus eismo avarijai automobilių kelyje arba geležinkelyje)

Baigtinių elementų analizė (FEA) buvo taikoma slėginių indų pleišėjimo modeliavimui siekiant bent dviejų tikslų:

- Nustatyti gaisro neveikiamų mažų slėginių indų sprogimo slėgį (Aksoley et al., 2008; Kartal, 2020; Kingklang et al., 2019).
- Nustatyti dalinai arba pilnai gaisro apimtų slėginių indų korpuso temperatūrą ir laiką iki sprogimo (Birk, 2012; Landucci et al., 2009a; Landucci et al., 2009b; Manu et al., 2009).

Daugeliu atvejų FEA (angl. *finite element analysis*) analizė buvo atliekama lygiagrečiai su slėginių indų sprogimų eksperimentais arba po šių eksperimentų. FEA analizė apsiribojo indo korpuso įtempimu prieš jam plystant nustatymu arba vietinio irimo, kuris nesibaigia skeveldrų susidarymu ir išmetimu, tyrimu. Atrodo, kad nėra jokio išsamaus FEA modeliavimo, leidžiančio pakankamai tiksliai nustatyti indo pleišėjimo schemas prieš išskriejant skeveldroms. Pastaruoju metu gaisro veikiami slėginiai indai buvo tirti taikant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (CFD, angl. *computational fluid dynamics*) metodą. Jis taikytas prognozuoti indo vidaus temperatūrą ir slėgio indo viduje augimą (Iannaccone et al., 2021; Scarponi et al., 2018; Scarponi et al., 2019; Scarponi et al., 2021). Nors temperatūros ir slėgio didėjimas inde yra proceso, vedančio prie indo skilimo, pagrindas, CFD modeliavimo rezultatai mažai tinkami prognozuoti indo skilimo schemas.

Deterministinis indo skilimo prognozavimas taip pat gali pareikalauti vertinti neapibrėžtumus, susijusius su įvykiais ir procesais, kurie sukelia indo pleišėjimą (Bubbico & Mazzarotta, 2018). Į šiuos neapibrėžtumus paprastai neatsižvelgiama atliekant teorinę analizę. Neapibrėžtumai gali būti susiję su tokiais reiškiniais:

- Gaisro apkrovos intensyvumu ir trukme liepsnoms apimant visą indo korpusą arba kaitinant tik jo dalį. Pastaruoju atveju gaisro apkrovos pasiskirstymas indo paviršiuje gali būti ypač nenuspėjamas.

- Cisternos pripildymo lygiu gaisro pradžioje ir gaisro metu indo viduje kintančia garų bei skysčio stratifikacija.
- Temperatūra ir slėgis indo suirimo momentu.
- Galimų indo korpuso susilpnėjimų dėl korozijos, varginimo, virinimo defektų, smūgių sukeliama vietinių pažaidų (įlenkimų, pradūrimų, nedidelių įplyšimų) vieta ir pobūdis.

Teoriškai dalis šių neapibrėžtumų gali būti modeliuojama stochastinės mechanikos metodais (Guedri, 2013; Roos et al., 2011; Qian et al., 2013; Wang et al., 2019; Xiao et al., 2018). Šie metodai remiasi deterministiniais mechaniniais modeliais, skirtais prognozuoti indo irimus. Procesas, prasidedantis gaisro sukulto pradinio indo plyšimu ir pasibaigiantis katastrofišku jo pleišėjimu (visišku sandarumo praradimu), yra aprašytas J. Casalio (Casal, 2018), organizacijos CCPS (CCPS, 2010), S. Mannano (Mannan, 2012). Tačiau iki šiol nėra tikslaus deterministinio matematinio modelio, leidžiančio numatyti įtrūkimų atsiradimo, plitimo ir indo pleišėjimo mechanizmą. Be to, nėra tinkamai apdorotų statistinių duomenų, reikalingų atsitiktinių dydžių, išreiškiančių gaisro sukulto pleišėjimo proceso neapibrėžtumus, skirstiniams parinkti. Eksperimentiniai duomenys apie BLEVE sprogimus buvo gauti daugiausia kaitinant nedaug mažo ir vidutinio dydžio indų (Birk, 1996; Birk et al., 2006a; Birk et al., 2006b; Heymes et al., 2013; Laboureur et al., 2015). Didelių indų, kaip antai automobilinių ir geležinkelio cisternos, bandyta labai nedaug (Droste et al., 1999; Townsend et al., 1974). Duomenys, gauti tokiuose eksperimentuose, neleidžia sudaryti statistines imtis, tinkančias parinkti tikimybių teorijos modelius, kurie leistų prognozuoti gaisro sukeltą slėginio indo sproginimą.

Šiuo metu galima daryti išvadą, kad metalurginiai, mechaniniai ir naujausi CFD tyrimai dar neleidžia sudaryti matematinį modelį, kuris leistų pakankamai tiksliai prognozuoti pleišėjimo schemas. Alternatyva pleišėjimo schemoms prognozuoti matematiškai modeliuojant gali būti prognozavimas, pagrįstas tikimybine pleišėjimo schemų interpretacija. Natūralu į pleišėjimo schemas susidarymus žiūrėti kaip į kas du nesutaikomus ir pilną įvykių grupę sudarančius atsitiktinius įvykius. Tokių įvykių tikimybes galima vertinti naudojant *post mortem* duomenis (duomenis, surinktus tiriant praėityje vykusius cilindrinų indų sprogimus). Eksperimentiniai duomenys, gauti imituojant tikras BLEVE avarijas, taip pat gali būti duomenų apie pleišėjimo schemas šaltinis (Birk, 1996). Istorškai pirmąjį dažnai cituojamą duomenų rinkinį sudarė P. L. Holdenas ir A. B. Reevesas, kurie, be kitų duomenų, pateikia informaciją apie 113 gaisrų sukeltų cilindrinų horizontalių slėginių indų sprogimus (Holden & Reeves, 1985). Šie duomenys apima informaciją apie indų sproginimų metu susidariusių skeveldrų skaičių, prognozuojamą 89 atvejais. Tačiau autoriai nebandė susieti skeveldrų skaičių su pleišėjimo schemomis. Tris naujausius duomenų apie slėginių indų sprogimus šaltinius, minimus mokslo žurnaluose, galima apibūdinti taip:

- 2009 m. G. Gubinelli ir V. Cozzani paskelbė, kad egzistuoja duomenų rinkinys, apimantis 143 indų skilimo įvykius (Gubinelli & Cozzani, 2009a). Atrodo, kad pagrindinis informacijos šaltinis, naudotas kuriant šį duomenų rinkinį, buvo 1973 m. JAV paskelbta ataskaita apie geležinkelio cisternų saugos tyrimą. Duomenų rinkinys apima 119 sprogimų BLEVE būdu ir fizinius cilindrinų horizontalių slėginių indų sprogius. Duomenų rinkinys buvo naudojamas septynių pleišėjimo schemų dažniams skaičiuoti. Galima spėti, kad G. Gubinelli ir V. Cozzani straipsnyje pateiktos pleišėjimo schemos yra realių sprogimo metu susidariusių schemų idealizacija. Keturios pleišėjimo schemos buvo nustatytos 100 horizontalių cilindrinų slėginių indų sprogimų BLEVE būdu.
- Tais pačiais metais G. Gubinelli ir V. Cozzani (2009b) paskelbė informaciją apie dar vieną duomenų rinkinį, apimantį 121 slėginio indo pleišėjimą (Gubinelli & Cozzani, 2009b). Autoriai teigia, kad 68 įvykiai šiame duomenų rinkinyje aprašyti dviejose ataskaitose, paskelbtose 1971 ir 1985 m. Informacija apie likusiuosius įvykius buvo gauta iš mokslinių žurnalų, vienos duomenų bazės ir vienos internetinės tyrimo ataskaitų sistemos. Autoriai nustatė devynias pleišėjimo schemas, kurios buvo aptiktos bent vienos avarijos metu. Sprogimų BLEVE būdu atveju septynios schemos buvo susijusios su 89 horizontalių ir vertikalų slėginių indų sprogiams.
- 2012 m. D. Sunas et al pateikė duomenis apie 259 horizontalių indų sprogius BLEVE būdu, suskaičiuodami kiek skeveldrų susidarė jų metu (Sun et al., 2012). Šie skaičiai pateikti antrame 1.5 lentelės stulpelyje. Duomenys surinkti iš mokslo žurnalų ir knygų. Kai kurie šaltiniai cituojami šiame darbe. Tačiau autoriai nesusiejo skeveldrų skaičiaus su pleišėjimo schemomis.

1.5 lentelė. Duomenys apie cilindrinų indų sprogius BLEVE būdu metu susidarantį skeveldras (Sun et al., 2012)

Skeveldrų skaičius	Atvejų skaičius	Atvejų su bent dvejomis skeveldromis skaičius	Pasikliautinas intervalas (PI)**	PI plotis
1	2	4	5	6
1	50 (19.3 %)	—	—	—
2	98 (37.8 %)	98 (46.9 %)	(0.400, 0.5390)	0.139
3	78 (30.1 %)	78 (37.3 %)	(0.307, 0.443)	0.136
4	24 (9.27 %)	24 (11.5 %)	(0.0750, 0.1660)	0.091
5	3 (1.16 %)	3 (1.44 %)	(0.00297, 0.0414)	0.038
6	2 (0.77 %)	2 (0.96 %)	(0.00116, 0.0341)	0.033
7	3 (1.16 %)	3 (1.44 %)	(0.00297, 0.0414)	0.038
8	0	0	—	—
9	1 (0.39 %)	1 (0.48 %)	(0.00012, 0.0264)	0.026
Iš viso:	259 (100 %)	209 (100 %)	—	—

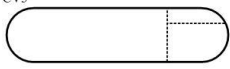
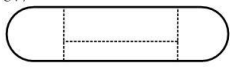
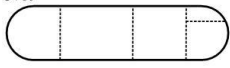
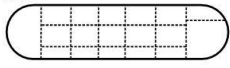
* PI žymi 95 % *Clopperio–Pearsono* pasikliautinąjį intervalą.

Pagrindinė informacija, kurią galima gauti iš pirmų dviejų anksčiau minėtų duomenų rinkinių, yra išreikšta idealizuotų pleišėjimo schemų ir jas atitinkančių santykinių dažnių pavidalu (1.6 lentelė). Šie dažniai interpretuojami kaip tikimybės (Tugnoli et al., 2013). Tokia interpretacija, mūsų nuomone, yra neteisinga griežtu matematinės statistikos požiūriu. Absoliutusias konkrečios pleišėjimo schemos, tarkime, schemos k dažnis yra šios schemos pasireiškimų skaičius n_k iš visų n indų

sprogimų (1.6 lentelė). Konkrečios pleišėjimo schemos pasireiškimai gali būti laikomi „sėkmingais bandymais“ n Bernoullio bandymų schemeje. Šios schemos tikimybę galima interpretuoti kaip nežinomą santykinę populiacijos dalį (proporciją) p_k . Vadinasi, n_k ir n gali būti naudojami binominės proporcijos tikimybės p_k pasikliautinajam intervalui skaičiuoti. BLEVE įvykių, sugrupuotų į anksčiau minėtus duomenų rinkinius, skaičius yra palyginti mažas. Todėl imčių dydžiai n_k bus nedideli. Šiuo atveju populiacijos parametro p_k vertinimui turi būti naudojamas Clopperio–Pearsono pasikliautinis intervalas (Agresti & Coull, 1998).

1.6 lentelėje pateikti duomenys apie 89 sprogimus BLEVE būdu, kuriuose užfiksuotos septynios pleišėjimo schemos. Duomenys buvo gauti iš antrojo anksčiau minėto duomenų rinkinio. Pirmosios keturios vyraujančios pleišėjimo schemos pasireiškė 93 % atvejų. Clopperio–Pearsono pasikliautinis intervalas buvo apskaičiuotas šioms septynioms pleišėjimo schemoms ir jų reikšmės pateiktos 1.6 lentelėje. Intervalo plotis sudaro nuo 11 iki 22 % visų tikimybės reikšmių. Taigi, 89 elementų (teiginių apie pleišėjimo schemų tipą) imtis neleidžia vertinti tikimybės p_k su dideliu statistiniu tikslumu.

1.6 lentelė. Clopperio–Pearsono 95 % pasikliautiniai intervalai (PI), apskaičiuoti vertinant išvardintų pleišėjimo schemų tikimybes (PI apskaičiuoti nagrinėjant 89 gaisro sukeltus indų sprogimus) *

Schemos skaičius k	Idealizuota pleišėjimo schema*	Skeveldrų skaičius k	Pasireiškimų skaičius n_k per $n = 89$ avarijas	PI	PI plotis
1	CV1 	1 ar 2	5 (5.62 %)	(0.0185, 0.1263)	0.1078
2	CV2 	2	46 (51.7 %)	(0.408, 0.624)	0.216
3	CV3 	3	9 (10.1 %)	(0.0473, 0.1833)	0.136
4	CV7 	3	23 (25.8 %)	(0.1714, 0.362)	0.1906
5	CV10 	5**	1 (1.12 %)	(0.00028, 0.0610)	0.0607
6	CV18 	> 3	2 (2.25 %)	(0.00273, 0.0788)	0.0761
7	CV21 	> 4	3 (3.37 %)	(0.00701, 0.0954)	0.0884

* Pradinė informacija, naudota skaičiuojant PI, pateikta straipsnyje (Gubinelli & Cozzani, 2009b).

** Skeveldrų skaičius įvertintas remiantis idealizuotos pleišėjimo schemos grafiku.

Nagrinėjant duomenis, pateiktus 1.6 lentelėje, galima padaryti keturias pastabas apie skeveldrų skaičius:

1. Duomenų rinkinio aprašyme nėra informacijos apie atskirų skeveldrų išmetimo atstumus ir matmenis (Gubinelli & Cozzani, 2009b). Todėl sunku įvertinti tam tikrų tipų skeveldras pagal

- poveikio pavojų. Galima spėti, kad pailgi sferiniai antgaliai yra pavojingiausios skeveldros dėl aerodinaminių savybių, palankių laisvam skeveldrų skrydžiui (žr. 1.6 lentelėje parodytus pailgus sferinius antgalius atvejais $k = 2$ iki 7). Pailgų sferinių antgalių dalys yra mažiau pavojingos skeveldros dėl palyginti prastų aerodinaminių savybių ir mažesnės masės (žr. atvejus $k = 3, 5, 6$ ir 7). Cilindrinio žiedo dalys yra mažiausiai pavojingos skeveldros, nes jos neskrieja toli nuo sprogo epicentro (žr. atvejus $k = 4, 5, 6$ ir 7 bei Planas-Cuchi et al (2004) pateiktą avarijos aprašymą).
2. Ypatingas indo skilimo atvejis yra tik vieno didelio fragmento susidarymas (žr. iliustraciją, pateiktą 1.13 pav. c ir d dalyse). Šiuo atveju jokia indo dalis neatsiskiria nuo korpuso. Galima spėti, kad tokio tipo skeveldros pavaizduotos pirmuoju 1.6 lentelės modeliu. Deja, nerašoma, kiek sprogo su vienos skeveldros išmetimu įvyko per penkias 1.6 lentelėje nurodytas avarijas. Informacija apie autocisternų avarijas Zarzalico provincijoje (2014 m., Ispanija) ir Bolonijoje (2018 m., Italija) leidžia daryti išvadą, kad skeveldros, susidedančios iš viso arba beveik viso indo korpuso lieka netoli sprogo vietos (Gamberini et al., 2021; Planas et al., 2015). Todėl tokio tipo skeveldros vargu ar gali būti klasifikuojamos kaip pavojingi objektai.
 3. Indo skilimas išilgai pagrindinės ašies ir dviejų pusiau cilindrinų skeveldrų susidarymas įvyko per mažiau nei penkias avarijas (žr. atvejį $k = 1$ 1.6 lentelėje). Kadangi tikslios informacijos apie šių puscilindrinių išmetimą ir skriejimą nėra, galima spėti, kad tokio tipo indo skilimas nelabai pavojingas. Labai tikėtina, kad viršutinis cilindras bus išmestas daugiau ar mažiau vertikalia kryptimi, o apatinis cilindras bus išmetamas link žemės.
 4. 1.6 lentelėje pateiktus skeveldrų skaičiaus procentus galima palyginti su atitinkamais procentais, nurodytais 1.5 lentelėje. Abu rodo, kad indo sprogo avarijose vyrauja dviejų ar trijų skeveldrų atvejai. Tokių avarių procentas, parodytas 1.5 ir 1.6 lentelėse, yra, atitinkamai, 84 % ir 88 %. Jie susiję su visomis avarijomis, turinčiomis bent dvi skeveldras. Atvejų, kuriuose yra penkios ar daugiau skeveldrų, skaičius yra palyginti mažas. Praktiniu požiūriu tokių atvejų galima nepaisyti. Tačiau, lyginant procentus, išsiskiria keturių skeveldrų susidarymo atvejis. Pagal 1.5 lentelę, keturios skeveldros susidarė 11,5 % avarių su dviem ar daugiau susidariusių skeveldrų, o keturių skeveldrų susidarymo atvejo 1.6 lentelėje nėra. Tikėtina, kad šis skirtumas atsirado dėl skirtingų informacijos šaltinių, naudojamų duomenims kaupti 1.5 ir 1.6 lentelėse.

Šiame skyriuje aprašyti duomenų rinkiniai tikriausiai nėra vienintelis informacijos apie cilindrinų indų pleišėjimo schemas šaltinis. Galima įsivaizduoti, kad duomenų apie pleišėjimo schemas yra viešai neprieinamuose šaltiniuose, kurie ilgainiui gali būti atskleisti. Kitas galimas informacijos apie pleišėjimo schemas šaltinis yra ataskaitos apie praeityje įvykusias avarijas, į kurias nebuvo atsižvelgta rengiant šiuo metu turimus ir prieinamus duomenų rinkinius. Tai galioja per

pastarąjį dešimtmetį įvykusiems sprogimams, nes minėti duomenų rinkiniai buvo paskelbti žurnalų publikacijose maždaug prieš dešimt metų. Taigi, tikėtina, kad duomenų apie pleišėjimo schemas kiekis gali būti tam tikru mastu padidintas. Tačiau nauja informacija duomenų situacijos iš esmės nepakeis, nes sprogimai BLEVE būdu yra reti įvykiai pasauliniu mastu. Kalbant apie duomenų rinkinius, apibendrintus pagal 1.6 lentelę, avarijų skaičiaus n ir pleišėjimo schemų skaičiaus n_k minimaliai pakako motyvuoti ir iliustruoti vėlesniame tekste pasiūlytą pleišėjimo schemų tikimybių p_k vertinimo procedūrą.

Taikant klasikinius statistikos metodus galima suskaičiuoti tikimybės p_k pasikliautinuosius intervalus. Jų plotis priklauso nuo skaičių n ir n_k ir subjektyviai pasirinkto pasikliautinio lygmens (1.6 lentelė). Akivaizdu, kad šie intervalai išreiškia neapibrėžtumą tikrųjų p_k reikšmių atžvilgiu. TRA ir patikimumo analizėje šis neapibrėžtumas vadinamas episteminiu (sumažinamu) neapibrėžtumu (pvz., Der Kiureghian & Ditlevsen, 2009). Tačiau klasikiniai pasikliautinieji intervalai yra paprastai naudojami kaip galutinis statistinio vertinimo rezultatas. Jų išreikštas neapibrėžtumas negali būti sklandžiai propaguojamas naudojant kitus modelius, sukurtus, pavyzdžiui, vertinti neapibrėžtumą, susijusį su skeveldrų išmetimu ir skriejimu.

Dar viena kliūtis, kylanti klasikiniam intervaliniam tikimybių p_k vertinimui, yra negausūs duomenys apie pleišėjimo schemas. Šie duomenys leidžia suformuoti tik mažas dydžio n imtis ir jas atitinkančius pleišėjimo schemų dažnius n_k . Pavyzdžiui, antrajame anksčiau aprašytame duomenų rinkinyje yra 133 įrašai apie horizontalių cilindrinų indų pleišėjimo schemas, susidariusias per penkių tipų sprogimus: 89 gaisro sukeltus indų sprogimus BLEVE būdu, 17 BLEVE sprogimų, įvykusių be gaisro, 9 fizinius sprogimus, 10 sprogimų uždaroje erdvėje ir 8 sprogimus, kuriuos sukėlė nekontroliuojamos cheminės reakcijos (žr. G. Gubinelli ir V. Cozzani darbe pateiktą 8 lentelę (Gubinelli & Cozzani, 2009b)). Taigi, tik dydžio $n = 89$ imtis atrodo gana didelė. Tačiau ši imtis išreiškia informaciją apie cilindrinų indų sprogimus, kurie skiriasi dydžiu, sienelės storium, projekciniu slėgiu ir kitomis charakteristikomis. Bet koks bandymas dalyti 89 skilusių indų populiaciją į vienesnes subpopuliacijas sumažins imties dydį n .

Kai imčių dydžiai n yra maži, pleišėjimo schemų tikimybės p_k reikėtų vertinti taikant Bajeso statistinės teorijos priemones. Nors šios teorijos metodai nėra panacėja, jie leidžia spręsti negausių duomenų ir neapibrėžtumų propagavimo problemas nuosekliau nei klasikinės statistikos metodai (Apostolatis, 1983). Pavyzdžiui, Bajeso teorijos metodai leidžia modeliuoti ir propaguoti episteminių (sumažinamą) ir aleatorinių (nesumažinamą) neapibrėžtumus atskirai, taikant stochastinį (Monte Karlo) lizdinio ciklo modeliavimą (angl. *nested loop Monte Carlo simulation*) (Meng et al., 2020). Nagrinėjamu atveju, pleišėjimo schemų tikimybės p_k išreiškia aleatorinį neapibrėžtumą. Aprioriniai

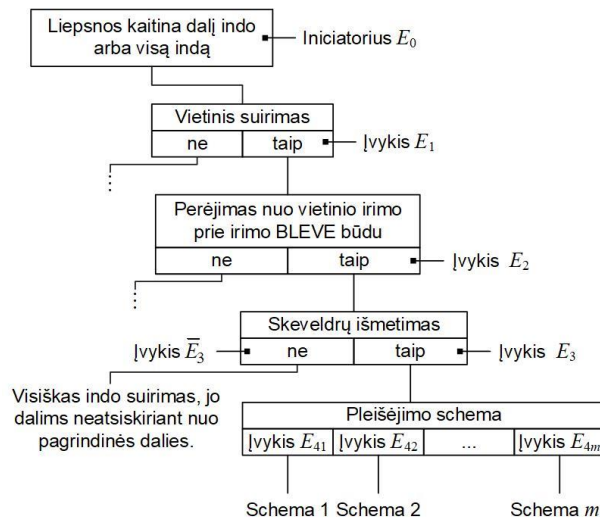
ir aposterioriniai skirstiniai, kurių modeliavimas nagrinėjamas šiame darbe, išreiškia episteminių neapibrėžtumų tų tikimybių atžvilgiu. Antrajame skyriuje yra aprašyta, kaip įtraukti pleišėjimo schemas į loginį įvykių medžio modelį, kuriame pleišėjimo schemų tikimybės p_k yra to medžio išsišakojimo simbolių tikimybės. Parodyta, kaip skaičiuoti tų tikimybių įverčius remiantis Bajeso teorijos metodais.

2. GAISRO SUKELIAMOS SLĖGINIŲ INDŲ AVARIJOS IR IRIMO PROGNOZAVIMO PROBLEMA

2.1. Rizikos vertinimo metodų taikymas prognozuojant slėginių indų irimo pobūdį

Pleišėjimo schemų numatymo problema susidaro dėl pavojaus, kurį kelia pleišėjimo nulemiamas skeveldrų susidarymas ir išmetimas (žr. 2.1 pav.). Paprastai egzistuoja keletas alternatyvių scenarijų, kurie susiję su slėginį indą apėmusiu gaisru ir jo nulemiamu pleišėjimu. Šių scenarijų pasireiškimai yra labai neapibrėžti. Šis neapibrėžtumas gali būti išreikštas įvykių medžio modeliu. Avarijos scenarijus, dėl kurio slėginis indas skyla dėl gaisro apkrovos, gali būti išreikštas įvykių medžio diagramos atšaka. Ji pavaizduota 2.1 pav. ir išreikšta atsitiktinių įvykių seka E_0 , E_1 , E_2 ir E_3 . Su šiais įvykiais susiję išsišakojimo taškai išreiškia šiuos neapibrėžtumus:

1. Eksperimentai leidžia teigti, kad ne visi slėginiai indai, kaitinami gaisro, patiria vietinį suirimą, kuris išreikštas įvykiu E_1 (pvz., Birk, 1996). Pavyzdžiui, indas gali patirti tik vietinį plastinį išsipūtimą.
2. Eksperimentiniai rezultatai taip pat leidžia teigti, kad gaisro veikiamas indas gali suirti lokaliai ir šis suirimas nebūtinai išsivystys į suirimą, sukeliantį BLEVE sprogimą. Pastarasis suirimas yra išreikštas įvykiu E_2 (Birk et al., 2006a, Birk et al., 2006b).
3. Kai kurie indų sprogimai BLEVE būdu įvyksta be skeveldrų išmetimo. Tai reiškia, kad įvykis E_3 nepasireiškia. Sprogusio indo liekaną sudaro smarkiai deformuotas indo korpusas, kurio dalys yra išskleista cilindrinė dalis ir nuo jos nenuplyšę sferiniai antgaliai. Indo liekana gali būti ir jo korpusas su „prasižiojusi“ santykinai ilgu plyšiu, sukeliamu plastiniu irimu (Birk et al., 2006a). Tokia suirusio indo liekana nenutolsta nuo pradinės indo padėties (2.1 pav.).



2.1 pav. Įvykių medis, vaizduojantis įvykių seką, kuri baigiasi skeveldrų išmetimu slėginiam indui sprogdant BLEVE būdu

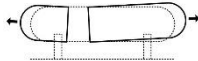
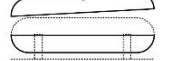
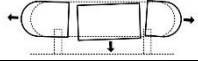
Įvykis E_3 gali būti išskaidytas į įvykius $E_{41}, E_{42}, \dots, E_{4m}$, kurie išreiškia galimų pleišėjimo schemų visumą. Remiantis įvykių medžio analizės principais, įvykiai $E_{41}, E_{42}, \dots, E_{4m}$ turi sudaryti pilnąją kas du nesutaikomų įvykių grupę. Informacija, pateikta 1.5 ir 1.6 lentelėse ir joms sudaryti naudotuose moksliniuose straipsniuose, leidžia teigti, kad galimų pleišėjimo schemų įvairovė ir atitinkamas jų skaičius $E_{41}, E_{42}, \dots, E_{4m}$ nėra labai didelis. Tačiau įvykių aibės $E_{41}, E_{42}, \dots, E_{4m}$ sudarymą apsunkina tai, kad kai kurios pleišėjimo schemas nebuvo stebėtos praeityje vykusiuose sprogimuose ir jas yra sunku numatyti. Mūsų idėja išspręsti šią problemą yra ta, kad pleišėjimo schemas galima skirstyti į dvi grupes: lengvai numatomas schemas, kurios yra pavojingos skeveldrų išmetimo požiūriu ir schemas, kurios yra mažiau pavojingos arba kurių neįmanoma numatyti remiantis dabar turima informacija. Ši idėja tinka pagrįsti tokias supaprastinančias prielaidas:

1. Tik vienos skeveldros susidarymo įvykį galima atmesti, nes slėginio indo dalis neatsiskiria nuo korpuso ir nėra išmetama dideliu atstumu (žr. įvykį $\bar{E}_3$ 2.1 pav.)
2. 1.5 ir 1.6 lentelėse pateikti slėginių indų skilimo metu susidariusių skeveldrų procentiniai dažniai. Jie nurodo, kad skilimo statistikoje dažniausiai vyrauja dviejų, trijų ir keturių skeveldrų susidarymo atvejai. Todėl pirmieji trys aibės įvykiai $E_{41}, E_{42}, \dots, E_{4m}$ gali būti išreikšti kaip $E_{41} = (N_{frg} = 2)$, $E_{42} = (N_{frg} = 3)$ ir $E_{43} = (N_{frg} = 4)$, kur N_{frg} žymi atsitiktinį skeveldrų skaičių. Paskutinis pilnosios aibės įvykis gali būti E_{44} . Jis gali nurodyti visas skilimo konfigūracijas, kai slėginis indas suskyla į daugiau nei keturias skeveldras.
3. Pailgi ir paprasti sferiniai antgaliai skrieja toliausiai po BLEVE sprogdimo (Birk, 1996). Todėl įvykiai E_{4k} ($k = 1, 2, 3, 4$) gali būti susieti su pleišėjimo schemomis, kuriose vaizduojamas sferinių antgalių susidarymas ir išmetimas. Šios pleišėjimo schemas, pateiktos 2.1 lentelės

antrame stulpelyje, kuris vadinasi „pavoingosios pleišėjimo schemas“. Jos yra priešingos „mažiau pavojingoms pleišėjimo schemoms“, pateiktoms tos pačios lentelės trečiame stulpelyje. Pastarosios schemas turi tiek pat skilimo metu susidarančių skeveldrų, kaip ir pavoingosios pleišėjimo schemas, tačiau neapima sferinių antgalių.

4. Mažiau pavojingos pleišėjimo schemas, pateiktos 2.1 lentelėje, gali būti susietos su įvykiu E_{44} . Pleišėjimo schemas, kuriose skeveldrų skaičius viršija keturias, taip pat gali būti laikomos mažiau pavojingomis ir žymimos E_{44} . Didelis skeveldrų skaičius reiškia, kad mažesnių skeveldrų masės $m_{frg,j}$ bus mažesnės nei dviejų, trijų ar keturių skeveldrų susidarymo atveju. Todėl mažesnių skeveldrų kinetinė energija $0.5 m_{frg,j} v_0^2$ bus santykinai mažesnė, atsižvelgiant į tai, kad slėginio indo skilimo metu susidariusios skeveldros skrieja tuo pačiu greičiu v_0 . Vienodas visų skeveldrų išmetimo greitis, v_0 , yra vyraujanti skeveldrų judėjimo modeliavimo prielaida (pvz.: Mannan, 2012).
5. Įvykis E_{44} taip pat gali reikšti pleišėjimo schemas, kurias sunku numatyti ir kurios nebuvo pastebėtos ankstesnėse avarijose.

2.1 lentelė. Pleišėjimo schemų skirstymas pagal indo irimo pavojingumą

Skeveldrų skaičius ir įvykių medžio* įvykis	Pavoingosios pleišėjimo schemas	Mažiau pavojingos pleišėjimo schemas (įvykių medžio diagramos įvykio E_{44} pavyzdžiai)
2, įvykis E_{41}		
3, įvykis E_{42}		
4, įvykis E_{43}		

* ET = įvykių medžio diagrama pavaizduota 2.1 pav.

Remiantis įvykių medžio analize, sąlyginių įvykių E_{4k} tikimybių suma turi būti lygi vienetui. Tai reiškia, kad pakanka įvertinti pirmųjų trijų įvykių E_{41} , E_{42} ir E_{43} tikimybes. Slėginio indo skilimai, kurių neapima šie trys įvykiai, gali būti išreikšti įvykiu E_{44} , kuris turi būti laikomas papildančiuoju įvykiu:

$$P(E_{44} | E_0 \cap E_1 \cap E_2 \cap E_3) = 1 - \sum_{k=1}^3 P(E_{4k} | E_0 \cap E_1 \cap E_2 \cap E_3). \quad (2.1)$$

Siekiant supaprastinti tolesnį dėstymą, sąlyginės tikimybės $P(E_{4k} | E_0 \cap E_1 \cap E_2 \cap E_3)$ bus žymimos simboliu p_k :

$$p_k \equiv P(E_{4k} | E_0 \cap E_1 \cap E_2 \cap E_3) \quad (k = 1, 2, 3, 4). \quad (2.2)$$

Ypatingo aptarimo reikalauja išsišakojimo tikimybės įvykių medžio mazge, sudarytame iš įvykių E_3 („skeveldros išmetamos“) ir $\bar{E}_3$ („skeveldros neišmetamos“) (2.1 pav.). Šis mazgas yra paprastesnis nei mazgas, sudarytas iš keturių pleišėjimo schemų įvykių E_{4k} . Išsišakojimo tikimybių $P(E_3|E_0 \cap E_1 \cap E_2)$ ir $P(\bar{E}_3|E_0 \cap E_1 \cap E_2)$ vertinimas yra analogiškas pleišėjimo schemų tikimybių p_k vertinimui. Negausi informacija apie įvykius E_3 (arba $\bar{E}_3$) pateikiama pasireišimo skaičių (absoliučiuųjų dažnių) arba proporcijų (santykinių dažnių) pavidalu. Šias proporcijas straipsnių autoriai vadina „tikimybėmis“ (Gubinelli & Cozzani, 2009b; Holden & Reeves, 1985; Mannan, 2012, p. 1574). Šie duomenys apima BLEVE avarijas, kai plyšus slėginiam indui skeveldros išmetamos šalin nuo įrangos, ir avarijas, kuriose slėginio indo korpusui supleišėjus skeveldros nesusidaro. Apytikslė BLEVE sprogimo tikimybė $P(E_3|E_0 \cap E_1 \cap E_2)$ yra lygi 0.8 ... 0.9. Žemesnioji tikimybės vertė 0.8 gauta iš Holden ir Reeves (1985) tyrime pateiktų duomenų, o aukštesnioji vertė 0.9 – iš duomenų, kuriuos surinko Gubinellis ir Cozzanis (Gubinelli & Cozzani, 2009b).

Bajeso statistinė teorija interpretuoja tikimybes p_k kaip tikras, nors ir nežinomas objektyvios tikrovės vertes. Remiantis šia teorija, p_k reikšmė turėtų būti įvertinta episteminiais atsitiktiniais dydžiais, tarkime P_k ($k = 1, 2, 3, 4$). Jų tikimybių skirstiniai turi būti atnaujinami gavus naujų duomenų. Tiriamu atveju nauji duomenys bus pleišėjimo schemų susidarymo skaičiai, kuriuos atitiks įvykiai nuo E_{41} iki E_{44} .

2.2. Slėginių indų irimo pobūdžio prognozavimas taikant Bajeso statistinės teorijos elementus

2.2.1. Dirichlė multinominis pleišėjimo schemų modeliavimas

Indų skilimai į skeveldras, išreikšti atsitiktiniais įvykiais E_{4k} , gali būti laikomi tikimybių teorijos požiūriu nepriklausomų bandymų rezultatais. Kiekvienas bandymas yra indo sprogimas BLEVE būdu, kurio metu yra išmetamos skeveldros ir pasireiškia viena iš keturių pleišėjimo schemų. Pagal tikimybių teorijos apibrėžimą, pleišėjimo schemų pasireiškimas yra kas du nesutaikomi įvykiai. Pleišėjimo schemų susidarymas gali būti modeliuojamas taikant multinominę tikimybių skirstinį, kurio tikimybinių masių funkcija turi tokį pavidalą:

$$p(n_1, n_2, n_3, n_4 | n, p_1, p_2, p_3, p_4) = P\left(\bigcap_{k=1}^4 (N_k = n_k)\right) \propto \prod_{k=1}^4 p_k^{n_k} \text{ su } \sum_{k=1}^4 p_k = 1, \quad (2.3)$$

čia N_k – yra atsitiktinis pleišėjimo schemas k pasireiškimų skaičius, įvykus n sprogimų. Galioja sąlyga, kad $\sum_{k=1}^4 n_k = n$.

Jungtinis apriorinis multinominio skirstinio parametrų p_k tankis vadinamas Dirichlė tankiu (Congdon, 2007). Nagrinėjamu atveju, tai yra pleišėjimo schemų tikimybių p_k tankis ir jis turi tokį pavidalą:

$$\pi(p_1, p_2, p_3, p_4 | \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) \propto \prod_{k=1}^4 p_k^{\theta_k - 1} \text{ su } \theta_k > 0 \text{ kiekvienam } k, \quad (2.4)$$

čia θ_k yra parametrai, atitinkantys episteminio požiūriu neapibrėžtas pleišėjimo schemų tikimybes P_k . Kalbant rizikos vertinimo terminais, Dirichlė tankis išreiškia episteminį neapibrėžtumą tikimybių p_k atžvilgiu. Marginalieji neapibrėžtų tikimybių P_k skirstiniai yra beta skirstiniai su parametrais θ_k ir $\theta_{tot} - \theta_k$, kur $\theta_{tot} = \sum_{k=1}^4 \theta_k$. Marginalieji atsitiktinių dydžių P_k vidurkiai ir dispersijos skaičiuojami pagal formules

$$E[P_k] = \frac{\theta_k}{\theta_{tot}}, \quad (2.5a)$$

$$V[P_k] = \frac{\theta_k(\theta_{tot} - \theta_k)}{\theta_{tot}^2(\theta_{tot} + 1)}. \quad (2.5b)$$

Dydis θ_{tot} yra laikomas tikimybių vertinimo tikslumo rodikliu. Kai θ_{tot} yra didelis, vertinamos tikimybės P_k skirstinys bus netoli vidurkio $E[P_k]$, o kai θ_{tot} yra mažas, neapibrėžtumas, išreiškiamas tikimybėmis P_k , yra didesnis. Šie teiginiai išplaukia iš (2.5b) formulės, kurioje θ_{tot} yra atvirkščiai proporcingas dispersijai $V[P_k]$.

Bajeso statistinės teorijos požiūriu, nauja informacija turi būti surinkta tiriant būsimas BLEVE avarijas. Jų skaičių žymėsime simboliu n' . Nauja informacija turės pavidalą $\{n'_1, n'_2, n'_3, n'_4\}$, kur n'_k yra pleišėjimo schemos k pasireiškimų skaičius per n' avarijų. Skaičius n' lygus sumai $\sum_{k=1}^4 n'_k$. Aposteriorinis tikimybių P_k skirstinys taip pat yra Dirichlė skirstinys su parametrais, atnaujinamais pagal formulę

$$\theta'_k = \theta_k + n'_k \quad (k = 1, 2, 3, 4). \quad (2.6)$$

Kadangi n'_k yra įvykio E_{4k} pasireiškimų skaičius, dydis θ_k gali būti laikomas aprioriniu menamų įvykių (pseudoįvykių) skaičiumi. Kitaip tariant, θ_k yra menamas pleišėjimo schemos k pasireiškimų skaičius. Kuo didesnė θ_{tot} suma, tuo informatyvesnis yra apriorinis skirstinys.

Apriorinis marginalusis vidurkis $E[P_k]$, išreikštas santykiu θ_k/θ_{tot} , gali būti traktuojamas kaip apriorinė numatoma pleišėjimo schemos k tikimybė. Naudojant santykį θ_k/θ_{tot} , aposteriorinis marginalusis P_k vidurkis gali būti išreikštas per atnaujintus parametrus θ'_k :

$$E[P_k|n'_1, n'_2, n'_3, n'_4] = \frac{\theta'_k}{\sum_k \theta'_k} = \frac{\theta_k + n'_k}{\theta_{tot} + n'} = \frac{\theta_{tot}}{\theta_{tot} + n'} \frac{\theta_k}{\theta_{tot}} + \frac{n'}{\theta_{tot} + n'} \frac{n'_k}{n'}. \quad (2.7)$$

Dydis $E[P_k|n'_1, n'_2, n'_3, n'_4]$ yra svertinis pleišėjimo schemos k laukiamos galimybės ir empirinių, iš duomenų išplaukiančio dažnio n'_k/n' vidurkis. Šio vidurkio svertiniai koeficientai yra, atitinkamai $\theta_{tot}/(\theta_{tot} + n')$ ir $n'/(\theta_{tot} + n')$. Todėl parametras θ_{tot} yra vadinamas mokymosi greičiu ir lemia, kiek duomenų reikia, kad aposteriorinis tankis $\pi(p_1, p_2, p_3, p_4 | \theta'_1, \theta'_2, \theta'_3, \theta'_4)$ nutoltų nuo apriorinio $\pi(p_1, p_2, p_3, p_4 | \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ (Troffaes et al., 2014; Walley, 1996). Jei $\theta_{tot} = n'$, tada apriorinio tankio ir duomenų įtaka bus vienoda. Jei n' yra daug didesnis nei θ_{tot} , duomenys turės daugiau įtakos negu pradinis subjektyvus spėjimas. Jei n' yra daug mažesnis už θ_{tot} , apriorinis tankis bus svaresnis.

Iki šiol sukaupiti duomenys apie cilindrinį slėginių indų, patyrusių BLEVE spogimus, verčia teigti, kad parametro θ_{tot} reikšmės nebus didelės (1.4 poskyris). Taip pat galima tikėtis, kad naujų duomenų kiekis n' ilgainiui didės iš lėto. Indų sprogimai BLEVE būdu nutinka nedažnai, o ankstesnių šio tipo sprogimų tyrimų metu sudarytų ataskaitų apie pleišėjimo schemas informacija gaunama ne kasdien. Todėl sunku tiksliai numatyti, kaip kintamųjų θ_{tot} ir n' reikšmės keisis ateityje.

2.2.2. Aprioriniai Dirichlė modelio parametrais išreiškiamų pleišėjimo schemų tikimybių skirstiniai

Dirichlė apriorinių skirstinių parinkimo problema ilgą laiką gvildenta statistinėje literatūroje (Bernard, 2005; Elfadaly & Garthwaite, 2017; Wilson, 2018). Rizikos analizės srityje aprioriniai Dirichlė skirstiniai buvo taikomi modeliuojant episteminių neapibrėžtumą, susijusį su techninių sistemų bendrosios priežasties atsakais (Troffaes et al., 2014). Tokių atsakų atveju, dydis n_k yra bendras įvykių su k atsakų skaičius, o n yra bendras įvykių su bet koku atsakų skaičiumi kiekis. Mes norėjome pritaikyti bendrosios priežasties atsakų prognozavimo priemones vertinant episteminių pleišėjimo schemų tikimybių p_k neapibrėžtumą.

Apriorinio Dirichlė skirstinio parinkimas yra įspraustas tarp dviejų kraštutinių galimybių, kurios apriboja visų apriorinių skirstinių, taikomų vertinant riziką, parinkimą. Galima formuoti informatyvius ir neinformatyvius apriorinius skirstinius (Siu & Kelly, 1998). Neinformatyvių ar mažai informatyvių skirstinių taikymas remiasi spėjimu, kad ateityje bus gaunama vis daugiau naujų duomenų ir didėjantis jų kiekis „paskandins“ pradinį aprioriniais skirstiniais išreikštą įvertį. Tačiau

tokie skirstiniai bus nejautrūs atnaujinimui naudojant negausius duomenis apie pleišėjimo schemas, išreikštus vektoriumi $\{n'_1, n'_2, n'_3, n'_4\}$. Tarpinė apriorinių skirstinių šeima, leidžianti atnaujinimą su negausiais duomenimis, yra minimaliai informatyvūs skirstiniai (Atwood, 1996; Bush, 2010; Evans et al., 2017). Anksčiau minėtas panašumas tarp pleišėjimo schemų ir bendrosios priežasties atsakų pasireiškimų leidžia pritaikyti Dirichlė parametrų θ_k skirstinio parinkimą vertinant pleišėjimo schemų tikimybes p_k . Šis metodas yra vadinamas minimaliai informatyvaus apriorinio skirstinio (MIAS) metodu (Kelly & Atwood, 2011; Zubair & Amjad, 2016). MIAS metodas yra daugiamatis minimaliai informatyvių apriorinių skirstinių parinkimo metodų apibendrinimas. Tie metodai yra skirti parinkti vienmačius apriorinius tikimybių skirstinius, naudojamus vertinant pavienius populiacijos parametrus, tarkime binominį parametą p arba Puasono parametą λ (Atwood, 1996). Minimaliai informatyvių apriorinių skirstinių parinkimo pavyzdys yra pateiktas 2.3.2 skyrelyje, kur iliustruotas išsišakojimo tikimybės $P(E_3|E_0 \cap E_1 \cap E_2)$ vertinimas.

Nagrinėjamu atveju terminas „minimaliai informatyvus“ reiškia:

1. MIAS metodas leidžia pritaikyti tiek apriorinius duomenis, tiek inžinerinį spėjimą. Aprioriniai duomenys yra pavienių pleišėjimo schemų pasireiškimų skaičiai n_{0k} , kuriuos galima naudoti parenkant Dirichlė apriorinį skirstinį.
2. Pirmasis žingsnis taikant MIAS metodą yra parinkti atsitiktinių tikimybių P_k vidurkius. Šie vidurkiai ir išreiškia minimalų apriorinio Dirichlė skirstinio informatyvumą.
3. Galiausiai, MIAS metodas turi būti laikomas ne per daug informatyviu (marginaliniai P_k skirstiniai ne per daug siaurais). MIAS metodu parinktas apriorinis skirstinys leidžia atlikti Bajeso atnaujinimą turint ribotus duomenis $\{n'_1, n'_2, n'_3, n'_4\}$.

Pirmasis žingsnis formuojant apriorinį skirstinį MIAS metodu yra kiekvienos tikimybės P_k vidurkio $\mu_{spec, k}$ parinkimas. MIAS metodas išreiškia nežinojimą apie P_k reikšmes, išskyrus apribojimą, kad šių tikimybių vidurkis $V[P_k]$ yra lygus $\mu_{spec, k}$. Parametro $\mu_{spec, k}$ reikšmės laikomos episteminių atsitiktinių tikimybių P_k marginaliųjų beta skirstinių $Be(a_k, b_k)$ vidurkiais. Pasirenkami vidurkiai $\mu_{spec, k}$ gali būti proporcingi nenuliniams n_{0k}/n_0 dažniams arba parenkami analitiko, jei dažniai n_{0k}/n_0 labai maži arba lygūs nuliui (kategorijoje k nėra jokių stebėjimų) (žr. skyrių „Išvados“ Kelly ir Atwood straipsnyje (2011)). Parinkus $\mu_{spec, k}$ reikšmes, skirstinio $Be(a_k, b_k)$ parametrai apskaičiuojami pagal tokias formules:

$$a_k = 0.5 \text{ ir } b_k = \frac{0.5(1 - \mu_{spec, k})}{\mu_{spec, k}}, \text{ kai } \mu_{spec, k} < 0.5. \quad (2.8a)$$

arba

$$a_k = \frac{0.5\mu_{spec,k}}{1 - \mu_{spec,k}} \text{ ir } b_k = 0.5, \text{ kai } \mu_{spec,k} > 0.5. \quad (2.8b)$$

Apskaičiavus a_k ir b_k reikšmes pagal (2.8) formules, marginalioji tikimybės P_k dispersija apskaičiuojama taikant formulę

$$\sigma_{spec,k}^2 = \frac{\mu_{spec,k}(1 - \mu_{spec,k})}{a_k + b_k + 1}. \quad (2.9)$$

Pagal MIAS metodą aprioriniai parametrai θ_k gaunami sprendžiant kvadratinės tikslo funkcijos minimizavimo uždavinį su paprastu θ_k reikšmių apribojimu:

$$\text{minimizuoti } f(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^4 \left(\mu_{spec,k} - \frac{\theta_k}{\sum_{l=1}^4 \theta_l} \right)^2 + \left(\sigma_{spec,k}^2 - \frac{\theta_k \left(\sum_{l=1}^4 \theta_l - \theta_k \right)}{\left(\sum_{l=1}^4 \theta_l \right)^2 \left(\sum_{l=1}^4 \theta_l + 1 \right)} \right)^2 \quad (2.10a)$$

$$\text{su apribojimu } \theta_k > 0 \text{ kiekvienam } k, \quad (2.10b)$$

čia $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_4)$ yra optimizavimo kintamųjų vektorius. Pradinės šių kintamųjų reikšmės sprendžiant kvadratinio minimizavimo uždavinį gali būti θ_k reikšmės, apskaičiuotos pagal (2.8) lygtis, tai yra $(\theta_1, \dots, \theta_4) = (a_1, \dots, a_4)$.

2.2.3. Bent vienos slėginio indo skeveldros išmetimo tikimybės vertinimas pagal Bajeso metodą

Ankstesniame poskyryje aprašytas MIAS metodas, skirtas pleišėjimo schemų tikimybių p_k aprioriniam skirstiniui parinkti, turi savo vienmatę versiją, kuri yra tinkama išsišakojimo tikimybei $P(E_3 | E_0 \cap E_1 \cap E_2)$ vertinti. Tai yra tikimybė, kad slėginį indą apėmus gaisrui ir jam suirus bus išmesta bent viena skeveldra (2.1 pav.). MIAS metodas ir jo vienmatė versija naudojami, kai norima įtraukti ribotą informaciją į neinformatyvų apriorinį skirstinį, kuris yra jautrus atnaujinimui su ribotais duomenimis (Atwood, 1996; Kelly & Atwood, 2011).

Šiame darbe tikimybė $P(E_3 | E_0 \cap E_1 \cap E_2)$ bus vadinama išmetimo tikimybe ir žymima simboliu p_{eject} . Tikimybę p_{eject} galima interpretuoti kaip reikminio poreikio sėkmės tikimybę, kuri yra binominio skirstinio parametras. Episteminis tikimybės p_{eject} neapibrėžtumas bus modeliuojamas su atsitiktiniu kintamuoju P_{eject} . Vienmatis MIAS metodo variantas remiasi vidurkio reikšmės

$\mu_{spec} = E[P_{eject}]$ uždavimu. Šiuo požiūriu, vienmatis metodas yra minimaliai informatyvus, tai yra mes konkretizuojame atsitiktinės tikimybės P_{eject} vidurkį. Vidurkis gali būti įvertintas pagal surinktus BLEVE sprogimų duomenis, pavyzdžiui pagal Holden ir Reeves (1985) tyrime pateikiamus duomenis. Šiems duomenims apriorinis p_{eject} skirstinys yra beta skirstinys su parametrais a ir b , tai yra $P_{eject} \sim \text{Be}(a,b)$. Vienmačiame MIAS metodo variante pirmasis parametras a (antrasis parametras b) apytiksliai lygus 0.5, kai apriorinio skirstinio vidurkis μ_{spec} mažesnis už 0.5 (didesnis už 0.5). Skirstinio $\text{Be}(a,b)$ parametrai nagrinėjamu atveju yra apskaičiuojami panašiai, kaip ir daugiamačiu atveju:

$$a = 0.5 \text{ ir } b = \frac{0.5(1 - \mu_{spec})}{\mu_{spec}}, \text{ kai } \mu_{spec} < 0.5 \quad (2.11a)$$

arba

$$a = \frac{0.5\mu_{spec}}{1 - \mu_{spec}} \text{ ir } b = 0.5, \text{ kai } \mu_{spec} > 0.5. \quad (2.11b)$$

C. L. Atwood savo tyrime pateikia kiek kitokį nagrinėjamo metodo variantą. Jame parametro a reikšmės svyruoja tarp 0.321 ir 0.5 bei priklauso nuo apriorinio skirstinio vidurkio μ_{spec} , kurio reikšmės kinta intervale (0, 0.5) (Atwood, 1996). Tačiau mūsų darbe apytikriai pakanka apriorinį tikimybės p_{eject} skirstinį parinkti imant, kad kintamasis $a = 0.5$.

Nauji duomenys, skirti atnaujinti apriorinį skirstinį $\text{Be}(a,b)$, turi pavidalą (n', r') . Šioje išraiškoje n' reiškia slėginių indų sprogimų su ir be skeveldrų išmetimo skaičių, o r' žymi sprogimų su skeveldrų išmetimu skaičių. Aposteriorinis skirstinys p_{eject} yra beta tipo su parametrais $a' = a + r'$ ir $b' = b + n - r'$ (pvz.: Siu & Kelly, 1998).

Mokymosi greičio, gaunant naujus duomenis, vertinimas daugiamačiam atvejui, aprašytam 2.2.1 skyrelyje, gali būti pritaikytas ir vienmačiam tikimybės P_{eject} vertinimo atvejui. Aposteriorinis neapibrėžtos tikimybės P_{eject} vidurkis gali būti išreikštas taip:

$$E[P_{eject}|n', r'] = \frac{a'}{a' + b'} = \frac{a + r'}{a + b + n'} = \frac{a + b}{a + b + n'} \frac{a}{a + b} + \frac{n'}{a + b + n'} \frac{r'}{n'} \quad (2.12)$$

čia santykis $a/(a+b)$ yra apriorinio skirstinio vidurkis $E[P_{eject}]$ ir žymi tikėtiną skeveldrų išmetimo tikimybę, o r'/n' yra empirinė proporcija. Aposteriorinis vidurkis $E[P_{eject}|n', r']$ yra $a/(a+b)$ ir r'/n'

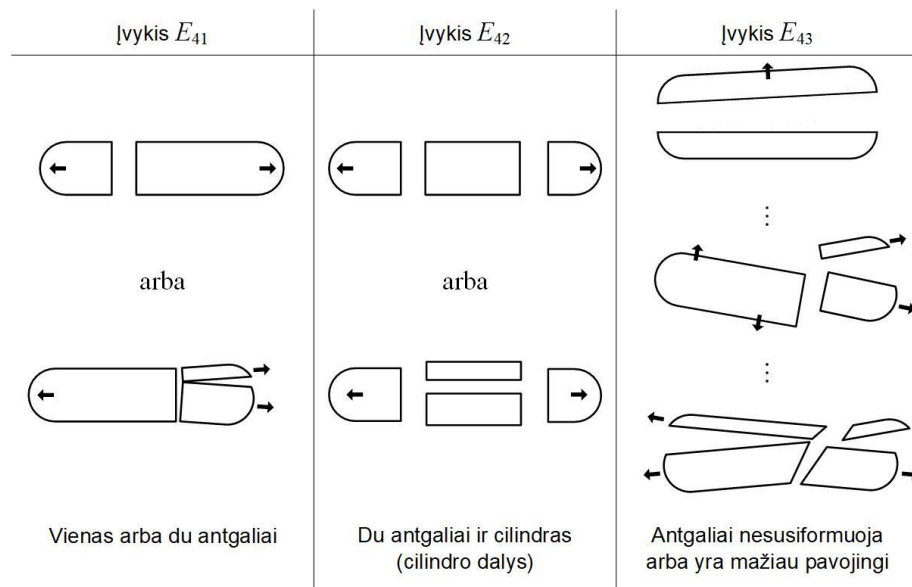
svertinis vidurkis, kurio dėmenys yra, atitinkamai, $(a+b)/(a+b+n')$ ir $n'/(a+b+n')$. Jei $(a+b) \gg n'$, tai apriorinis skirstinys $Be(a,b)$ turės daugiau įtakos. Tuo atveju, kai $(a+b) = n'$, apriorinis skirstinys $Be(a,b)$ ir nauji duomenys (n', r') turės tiek pat įtakos. Taigi, $a+b$ suma lemia, kiek laiko reikia atlikti slėginių indų sprogimų stebėjimus, kol aposteriorinis skirstinys $Be(a',b')$ pradeda tolti nuo apriorinio skirstinio $Be(a,b)$.

Bent vienos skeveldros išmetimo tikimybės p_{eject} apriorinio skirstinio parinkimo ir atnaujinimo uždavinio sprendimas yra aprašytas 2.3.2 skyrelyje pateiktame pavyzdyje.

2.3. Siūlomo slėginių indo irimo pobūdžio prognozavimo metodo taikymo pavyzdys

2.3.1. Apriorinio Dirichlė skirstinio sudarymas slėginio indo pleišėjimo schemų tikimybėms

Pasiūlytas pleišėjimo tikimybių $p_k \equiv P(E_{4k} | E_0 \cap E_1 \cap E_2 \cap E_3)$ vertinimas taikant Bajeso teorijos principus bus iliustruotas darant supaprastinančią prielaidą, kuri leidžia vizualizuoti vertinimo rezultatus naudojant trikampes diagramas. Keturis įvykius E_{4k} , parodytus 2.1 pav., galima sumažinti iki trijų ($m = 3$). Tai atliekama susiejant išsišakojimo įvykius E_{41} , E_{42} ir E_{43} su pleišėjimo schemų grupėmis, pavaizduotomis 2.2 pav. Trijų įvykių E_{41} , E_{42} ir E_{43} pasirinkimas pagrįstas 2.2 lentelėje pateiktais duomenimis.

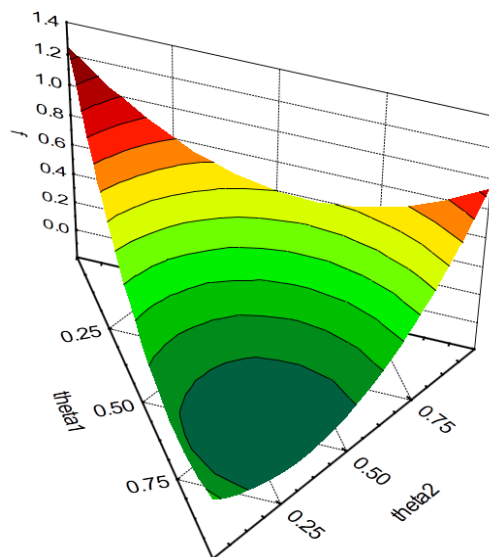


2.2 pav. Pleišėjimo schemų grupės, sprendžiamame pavyzdyje ir susietos su išsišakojimo įvykiais E_{41} , E_{42} ir E_{43} ($m = 3$)

2.2 lentelė. Skaičiavimo seka, taikyta *Dirichlė* modelio parametrų θ_k , išreiškiančių pleišėjimo schemų grupių tikimybes, reikšmėms apskaičiuoti (pleišėjimo schemų grupės pavaizduotos 2.2 pav.)

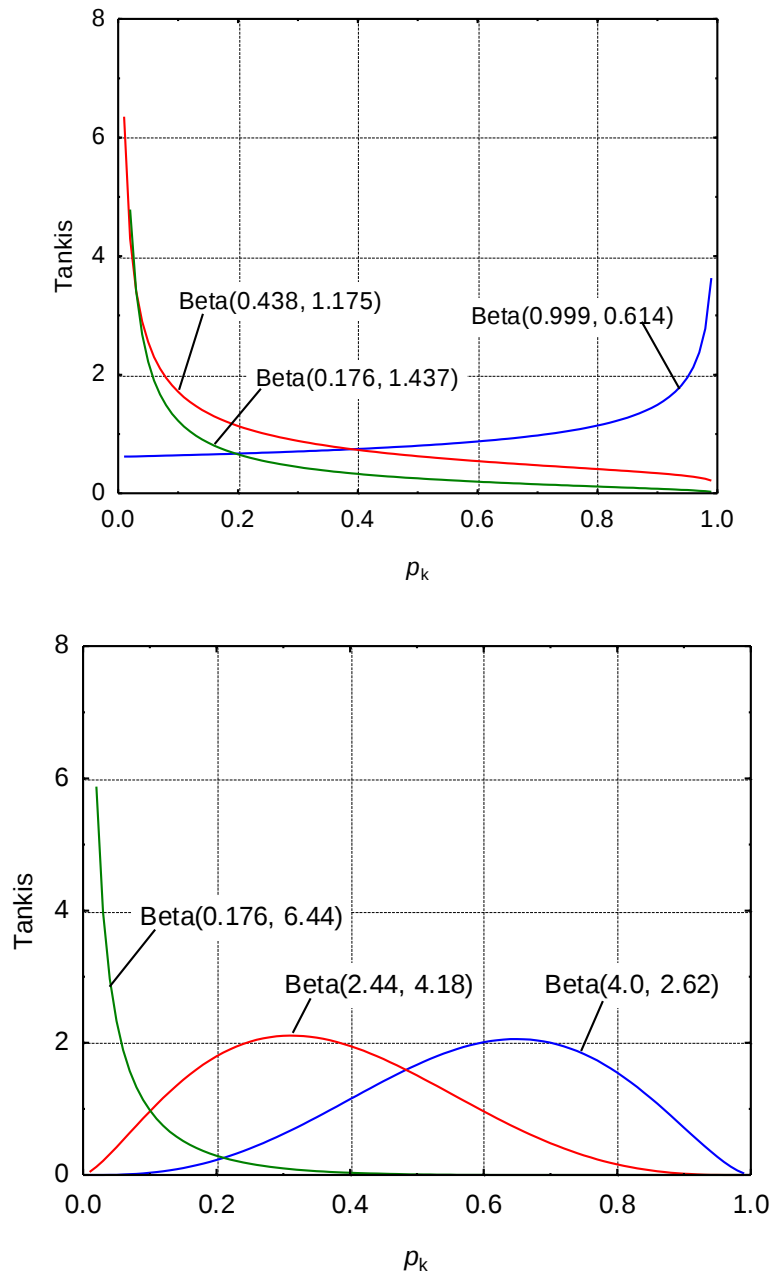
Pleišėjimo schemų grupė k , pavaizduota 2.2 pav.	1	2	3
Skilimo į skeveldras įvykis E_{4k}	E_{41}	E_{42}	E_{43}
Vertinama tikimybė $p_k = P(E_{4k} \cdot)$	p_1	p_2	p_3
Apriorinė informacija n_{0k} (1.2 lentelėje išvardintų įvykių E_{4k} pasireiškimų skaičius)	46 + 9 = 55	23 + 1 = 24	10
Bendras apriorinę informaciją sudarančių įvykių skaičius n_{0a}	89		
n_{0k}/n_{0a}	0.618	0.270	0.112
Marginalusis vidurkis $\mu_{spec,k}$ apskaičiuotas tikimybei P_k	0.618	0.270	0.112
Parametras a_k iš (2.8a) ir (2.8b) lygčių	0.809	0.5	0.5
Parametras b_k iš (2.8a) ir (2.8b) lygčių	0.5	1.352	3.96
Marginalioji tikimybės P_k dispersija $\sigma_{spec,k}^2$, apskaičiuota pagal (2.9) lygtį	0.1022	0.0691	0.01822
Pradinės parametrų θ_k reikšmės, naudotos sprendžiant minimizavimo uždavinį (2.10)	0.809	0.5	0.5
Aprioriniai parametrai $\theta_k = \theta_k^*$, gauti išsprendus minimizavimo uždavinį (2.10))	0.999	0.438	0.176
θ_{tot}	1.613		
$\theta_{tot} - \theta_k$	0.614	1.175	1.437

Vektorius $(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = (a_1, a_2, a_3) = (0.809, 0.5, 0.5)$ buvo pradinė reikšmė, minimizuojanti tikslo funkciją $f(\theta)$, išreikštą (2.10a) formulėje. Optimizavimo sritis, ieškant funkcijos $f(\theta)$ minimumo, buvo $D = \{\theta_k \in (0.01, 0.99), k = 1, 2, 3\}$. Šios funkcijos $f(\theta)$ reikšmės D srityje yra pavaizduotos 2.3 pav. pateiktoje diagramoje. *Dirichlė* skirstinio parametrų vektorius, minimizuojantis funkciją $f(\theta)$, yra užrašomas $\theta^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*) = (0.999, 0.438, 0.176)$. Jis atitinka reikšmę $f(\theta^*) = 0.560 \times 10^{-3}$. Apriorinių parametrų reikšmių suma θ_{tot} lygi 1.613. Ši reikšmė apytikriai lygi dviems menamiems įvykiams. Tai reiškia, kad apriorinis skirstinys atspindi palyginti nedidelį pirminės informacijos kiekį. Taigi, apriorinio skirstinio tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 | 0.999, 0.438, 0.176)$ yra gana išsisklaidęs (neinformatyvus). Atsitiktinių tikimybių P_k aprioriniai marginaliniai vidurkiai yra (0.612, 0.272, 0.1090). Aprioriniai marginalieji tankiai $Be(0.999, 0.614)$, $Be(0.438, 1.175)$ ir $Be(0.176, 1.437)$ pavaizduoti 2.4 pav., o *Dirichlė* apriorinio skirstinio tankis pateiktas 2.5 pav.

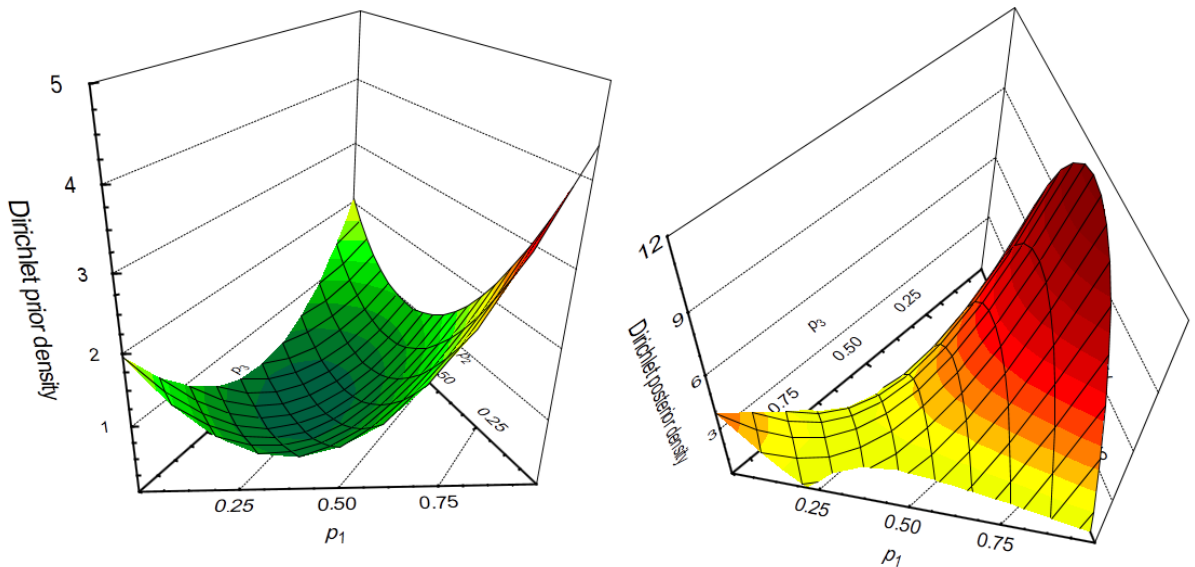


2.3 pav. Trikampė tikslo funkcijos $f(\theta)$, išreikštos (2.10a) lygtimi, diagrama (funkcijos parametrai

$\mu_{spec, k}$ ir $\sigma_{spec, k}^2$ pateikti 2.2 lentelėje)



2.4 pav. Neapibrėžtų pleišėjimų schemų tikimybių p_k marginalieji beta tankiai: marginalieji aprioriniai skirstiniai $\text{Be}(0.999, 0.614)$, $\text{Be}(0.438, 1.175)$ ir $\text{Be}(0.176, 1.437)$ parodyti viršutiniame grafike, marginalieji aposterioriniai skirstiniai $\text{Be}(4.0, 2.62)$, $\text{Be}(2.44, 4.18)$ ir $\text{Be}(0.176, 6.44)$ pavaizduoti apatiniame grafike



2.5 pav. Trikampės *Dirichlė* tankių diagramos: apriorinis tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 | 0.999, 0.438, 0.176)$ pavaizduotas kairiajame grafike, aposteriorinis tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 | 4.0, 2.44, 0.176)$ pavaizduotas dešiniajame grafike

Nauji duomenys apie pleišėjimo schemas sudaro skeveldrų schemų skaičiai n'_k , teoriškai apibrėžti 2.2.1 skyrelyje. Apriorinis *Dirichlė* skirstinys yra jungtinis su multinominiu skirstiniu susijęs tikimybių skirstinys. Todėl aposteriorinis skirstinys taip pat yra *Dirichlė* skirstinys su parametrais $\theta_k + n'_k$. Tegul nauji duomenys, nagrinėjami šiame pavyzdyje, būna $\{3, 2, 0\}$. Šie duomenys reiškia, kad vektoriaus $\{n'_1, n'_2, n'_3\}$ komponentų reikšmės buvo suskaičiuotos tiriant penkis slėginių indų sprogimus. Jų pleišėjimo schemų kategorijos pavaizduotos 2.2 pav.

Taikant naujus duomenis $\{n'_1, n'_2, n'_3\}$ buvo atnaujintas minimaliai informatyvus apriorinis *Dirichlė* skirstinys ir gautas aposteriorinis skirstinys, kurio parametrai yra $(4.0, 2.44, 0.176)$. Marginalieji aposterioriniai vidurkiai yra $(0.605, 0.369, 0.0266)$. Marginalieji atsitiktinių tikimybių p_k beta skirstiniai yra $\text{Be}(4.0, 2.62)$, $\text{Be}(2.44, 4.18)$ ir $\text{Be}(0.176, 6.44)$. Jų tankiai pavaizduoti 2.4 pav.

Aposteriorinių skirstinio kintamųjų suma θ_{tot} yra lygi 6.616. Jei atnaujinant skaičiavimus aposteriorinio *Dirichlė* skirstinio tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 | 4.0, 2.44, 0.176)$ bus naudojamas kaip apriorinis, jo parametrų reikšmės apytikriai išreikš septynis menamus įvykius. Taigi, aposteriorinio skirstinio tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 | 4.0, 2.44, 0.176)$ beveik tris kartus informatyvesnis (mažiau išsisklaidęs) nei apriorinis tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 | 0.999, 0.438, 0.176)$. Aposteriorinio skirstinio tankis $\pi(p_1, p_2, p_3 | 4.0, 2.44, 0.176)$ pavaizduotas 2.5 pav. grafike.

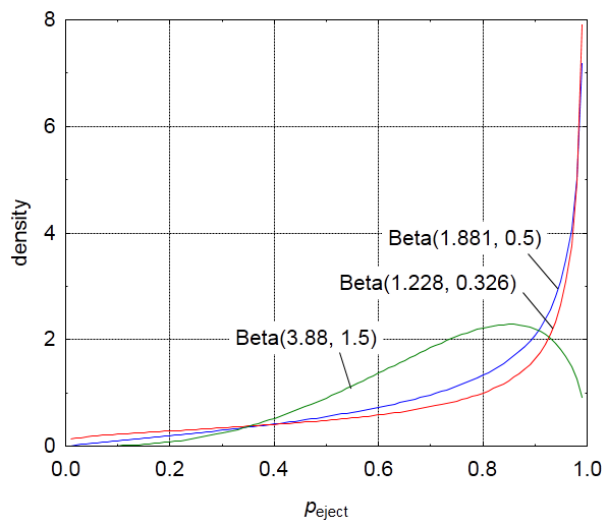
Šiame pavyzdyje naudojami duomenys leidžia iliustruoti mokymosi greičio sampratą, pateiktą 2.2.1 skyrelyje. Bendras naujų stebėjimų skaičius n' pavyzdyje lygus 5, o apriorinių kintamųjų θ_{tot} reikšmių suma yra 1.613. Remiantis šiais duomenimis galima pastebėti, kad skaičius n' viršija sumą

θ_{tot} daugiau nei tris kartus. Todėl nauji duomenys $\{3, 2, 0\}$ turi daugiau įtakos nei pradinis spėjimas ir dėl šios priežasties apriorinis tankis stipriai pasislenka aposteriorinio tankio atžvilgiu.

2.3.2. Aposteriorinio binominio parametro skirstinio parinkimas bent vienos skeveldros išmetimo atvejui

Šiame skyrelyje tikimybė, kad bent viena skeveldra bus išmesta, tai yra tikimybės $p_{eject} \equiv P(E_3 | E_0 \cap E_1 \cap E_2)$ vertinimas Bajeso metodu bus iliustruota taikant duomenis apie 89 skeveldrų išmetimo atvejus, užregistruotus 113 gaisrų sukeltų BLEVE avarių metu (Holden & Reeves, 1985). Santykis 89/113 bus naudojamas kaip nurodytas apriorinio skirstinio $Be(a, b)$ vidurkio reikšmė. Tai reiškia, kad $\mu_{spec} = 89/113 = 0.79$. Parametrai a ir b buvo apskaičiuoti remiantis (2.11b) formule. Gauta, kad $a = 1.881$ ir $b = 0.5$. Apriorinio skirstinio $Be(1.881, 0.5)$ vidurkis lygus 0.79.

Apriorinis papildančiojo įvykio $\bar{E}_3$ tikimybės $1 - p_{eject}$ skirstinys $Be(\bar{a}, \bar{b})$ gali būti parinktas naudojant tikslesnį metodą, pristatytą J. Atwoodo straipsnyje (Atwood, 1996). Nurodytas apriorinio skirstinio $Be(\bar{a}, \bar{b})$ vidurkis μ_{spec} yra santykis $(113 - 89)/113$, lygus 0.21. Kai $\mu_{spec} < 0.5$, pirmojo kintamojo $\bar{a}$ reikšmę galima pasirinkti iš minėto straipsnio 1-os lentelės, t.y. $\bar{a} = 0.3264$. Naudojant šią reikšmę, antrasis kintamasis $\bar{b}$ gaunamas iš beta skirstinio vidurkio išraiškos: $\bar{b} = \bar{a}(1 - \mu_{spec})/\mu_{spec} = 1.228$. Beta skirstinys su sukeistais parametrais $Be(1.228, 0.3264)$ yra apriorinis p_{eject} skirstinys su vidurkiu 0.79 (žr. 2.6 pav.). Skirtumas tarp apriorinių skirstinių $Be(1.881, 0.5)$ ir $Be(1.228, 0.3264)$ yra santykinai mažas, jei lygintume šių skirstinių tankius, pavaizduotus 2.6 pav.



2.6 pav. Neapibrėžtos bent vienos skeveldros išmetimo tikimybės p_{eject} beta skirstinio: apriorinių skirstinių tankiai $Be(1.881, 0.5)$ ir $Be(1.228, 0.326)$ bei aposteriorinio skirstinio tankis $Be(3.88, 1.5)$

Tegul nauji šios analizės duomenys būna $(n', r') = (3, 2)$ (t.y. dvi išmestos skeveldros per tris stebėtus slėginių indų sprogius). Taikant šiuos duomenis galima atnaujinti apriorinį išmetimo tikimybės p_{eject} skirstinį $Be(1.881, 0.5)$. Naudojant naujus įvesties duomenis gaunama, kad $a' = 1.881 + 2 = 3.88$ ir $b' = 0.5 + 3 - 2 = 1.5$ (2.2.3 skyrelis). Aposteriorinio skirstinio vidurkis lygus 0.721. Skirstinio $Be(3.88, 1.5)$ tankis pavaizduotas 2.6 pav.

Galiausiai, 2.2.3 skyrelyje pateiktą mokymosi greičio sampratą galima iliustruoti šio pavyzdžio duomenimis. Apriorinio skirstinio vidurkis $E[p_{eject}]$ lygus $a/(a+b) = 1.881/(1.881 + 0.5) = 0.79$, kai stebimas santykis r'/n' yra didesnis nei 0.667. Santykis $a/(a+b)$ yra 20 % didesnis už santykį r'/n' . Todėl mokymosi greitis, lemiamas duomenų (3, 2), gali būti laikomas itin mažu.

IŠVADOS

1. Įvairių pramonės šakų įmonėse eksploatuojama daug slėginių indų. Jie yra laikomi pavojingais įrenginiais, kurie gali sprogti suirdami į skeveldras. Viena iš slėginių indų sprogimų priežasčių yra išorinis gaisras, inicijuojantis indo irimą ir sprogimą. Literatūroje tokie gaisro sukelti sprogimai yra vadinami sprogimais BLEVE būdu. Rašant šį darbą nustatyta, kad BLEVE reiškinys yra nepakankamai ištirtas slėginių indų pleišėjimo schemų prognozavimo požiūriu.
2. Gaisro sukelti BLEVE sprogimai mechaniniu požiūriu įvyksta dėl indo korpuso suirimo į skeveldras. Plyšiai sprogo akimirksniu išsivysto visu arba beveik visu korpuso perimetru. Pleišėjimo schema nulemia skeveldrų formą, masę, aerodinamines charakteristikas ir galiausiai galimą žalą, kurią gali sukelti skeveldrų smūgiai į pažeidžiamus objektus. Todėl pleišėjimo schemų prognozavimas yra esminis uždavinys vertinant BLEVE incidentų keliamą riziką.
3. Duomenys apie BLEVE būdu sprogstančių indų pleišėjimo schemas yra negausūs. Literatūroje šiuo metu galima rasti tik du giminingus duomenų rinkinius, kuriuose konkrečios pleišėjimo schemas yra apibūdinamos jų susidarymo dažniais. Šie duomenys surinkti iš įvairių šaltinių, kuriuose pateikiami įvykusių BLEVE avarių tyrimo rezultatai. Jie suteikia informacijos apie septynias 89 cilindrinį horizontaliai išdėstytų slėginių indų pleišėjimo schemas.
4. Pleišėjimo schemų susidarymui būdingas didelis neapibrėžtumas. Iš anksto, kol slėginis indas nesprogo, negalima tiksliai pasakyti, kokia pleišėjimo schema susidarys. Todėl prognozuoti indų pleišėjimą BLEVE atveju būtina taikant tikimybių teorijos metodus. Šiais metodais yra grindžiama tikimybinė rizikos analizė (TRA). BLEVE avarijos yra natūralus TRA objektas. Todėl pleišėjimo schemų prognozavimui pravartu taikyti TRA metodus.
5. Pleišėjimo schemas prognozuoti galima laikant tų schemų susidarymą loginės įvykių medžio diagramos išsišakojimo simbolių įvykiais. Įvykio medžio analizė yra standartinis TRA metodas. Pleišėjimo schemų prognozavimą galima atlikti vertinant išsišakojimo simbolių įvykių tikimybes. Kadangi duomenys apie pleišėjimo schemas negausūs, pleišėjimo schemų tikimybes reikia vertinti taikant Bajeso statistinės teorijos metodus. Jie yra TRA metodologijos pagrindas.
6. Pagrindinis šio darbo naujumo elementas yra tas, kad pleišėjimo schemų susidarymas gali būti modeliuojamas taikant multinominį tikimybių skirstinį, kurio parametrai yra neapibrėžtos (tiksliai nežinomos) pleišėjimo schemų tikimybės. Multinominis modelis leidžia taikyti Dirichlė tikimybių skirstinį išreiškiant episteminį neapibrėžtumą, susijusį su pleišėjimo schemų tikimybėmis.
7. Dirichlė modelis gali būti naudojamas kaip apriorinis arba aposteriorinis pleišėjimo schemų tikimybių galimų reikšmių skirstinys. Paskata taikyti Dirichlė modelį buvo statistine prasme nepakankamas duomenų apie pleišėjimo schemas kiekis. Apriorinis Dirichlė skirstinys yra informacijos požiūriu tarpinis modelis tarp neinformatyvaus ir informatyvaus skirstinio.

8. Apriorinį Dirichlė skirstinį galima lengvai atnaujinti (perskaičiuoti į aposteriorinį skirstinį), taikant negausius naujus duomenis apie slėginių indų pleišėjimo schemas. Dirichlė skirstinys yra jungtinis, nes jo pavidalas nesikeičia perskaičiuojant apriorinį tankį į aposteriorinį tankį. Pats perskaičiavimas yra triviali matematinė operacija.
9. Pleišėjimo schemų tikimybių vertinimą taikant Bajeso statistinės teorijos metodus galima taikyti skaičiuojant riziką, kurią kelia slėginių indų sprogimai BLEVE būdu. Šis tikimybių vertinimas yra tik pirmasis žingsnis atliekant TRA skaičiavimus. Tačiau pleišėjimo schemų prognozė turės didelės įtakos TRA rezultatams. Šie rezultatai, savo ruožtu, gali būti panaudoti projektuojant tokias BLEVE riziką mažinančias priemones, kaip saugos barjerai, įrengiami ties sprogti galinčiais indais.

PAVEIKSLŲ ŠALTINIAI

Elsevier (2021). Prieiga per internetą:

<https://books.google.lt/books?id=gRExEAAAQBAJ&pg=PA164&lpg=PA164&d>

Journal of Loss Prevention (2004). Prieiga per internetą:

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fecosakh.ru%2Fwp-content%2Fuploads%2F2004%2F02%2F62_vzryv_avtocisterny_original_na_angl_1.pdf

Mail Online (2018). Prieiga per internetą:

<https://www.dailymail.co.uk/news/article-6034921/Moment-petrol-tanker-explosion-left-two-dead-scores-injured-Italy.html>

MY 103.5 (2021). Prieiga per internetą:

<https://my1035.com/pictures-of-propane-tank-explosion-near-big-sky/>

Science Direct (2015). Prieiga per internetą:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423015000418>

YouTube (2009). Prieiga per internetą:

https://www.youtube.com/watch?v=UM0jtD_OWLU

LITERATŪRA

- Abbasi, T, Abbasi, S.A., 2007. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. *J. Hazard. Mater.* 141, 489–519. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.056>.
- Abo-Elkhier M, Muhammad, K., 2020. Failure analysis of an exploded large-capacity liquid storage tank using finite element analysis. *Eng. Fail. Anal.* 110, 104401.
- Agresti, A., Coull, B.A., 1998. Approximate is better than 'exact' for interval estimation of binomial proportions. *Am Statistician* 52,119–126.
- Aksoley, M.E., Ozcelik, B., Bican, I., 2008. Comparison of bursting pressure results of LPG tank using experimental and finite element method. *J. Hazard. Mater.* 151, 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104401>.
- AMSE, 2017. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII – Rules for Construction of Pressure Vessels. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- Anderson, T. L. 1995. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Atwood, C.L., 1996. Constrained noninformative priors in risk assessment. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 53, 37–46.
- Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J, Strehlow, R.A., 1983. *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier, Amsterdam.
- Baker, W.E., Kulesz, J.J., Ricker, R.E., Bessey, R.L., Westine, P.S., Parr, V.B., Oldham, G.A., 1977. Workbook for Predicting Pressure Wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels. NASA Contractor Report 134906. NASA, Cleveland.
- Baum, M.R., 1988. Disruptive failure of pressure vessels: preliminary design guidelines for fragment velocity and the extent of the hazard zone. *J. Press. Vessel Technol.* 110, 168–176. <https://doi.org/10.1115/1.3265582>.
- Baum, M.R., 1998. Rocket missiles generated by failure of a high pressure liquid storage vessel. *J. Loss Prev. Process Ind.* 11, 11–24. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(97\)00035-1](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(97)00035-1).
- Bernard, J.M., 2005. An introduction to the imprecise Dirichlet model for multinomial data. *Int. J. Approx. Reason.* 39, 123–150. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2008.03.011>.
- Birk, A.M., 1996. Hazards from propane BLEVES: An update and proposal for emergency responders. *J Loss Prev Process Ind.* 9, 173–181. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0950-4230(95)00046-1).
- Birk, A.M., 2012. Scale considerations for fire testing of pressure vessels used for dangerous goods transportation. *J. Loss Prev. Process Ind.* 25, 623–630. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.01.007>.
- Birk, A.M., Davidson, C., Cunningham, M., 2007. Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. *J. Loss Prev. Process Ind.* 20, 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.03.001>.
- Birk, A.M., Eyssette, R., Heymes, F. 2019. Early moments of BLEVE: From vessel opening to liquid flashing release. *Process Saf. Environ. Prot.* 132, 35–46, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.028>.
- Birk, A.M., Poirier, D., Davison, C., 2006a. On the response of 500 gal propane tanks to a 25 % engulfing fire. *J. Loss Prev. Process Ind.* 19, 527–541. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.12.008>.
- Birk, A.M., Poirier, D., Davison, C. 2006b. On the thermal rupture of 1.9 m³ propane pressure vessels with defects in their thermal protection system. *J. Loss Prev. Process Ind.* 19, 582–597. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2006.02.006>.
- Birk, A.M., VanderSteen, J.D.J., 2006. On the transition from non-BLEVE to BLEVE failure for a 1.8m³ propane tank. *J. Pressure Vessel Technol.* 128, 648–655. <https://doi.org/10.1002/prs.680210308>.
- Bradley, I., Scarponi, G.E., Otremba, F., Birk, A.M., 2021. An overview of test standards and regulations relevant to the fire testing of pressure vessels. *Process Saf. Environ. Prot.* 145, 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.047>.
- Bubbico, R., Mazzarotta, R., 2018. Dynamic response of a tank containing liquefied gas under pressure exposed to a fire: A simplified model. *Process Saf. Environ. Prot.* 113, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.016>.

- Bush, C.A., 2010. Minimally informative prior distributions for non-parametric Bayesian analysis. *J. R Statist Soc B.* 72, 253–268. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2009.00735.x>.
- Casal, J., 2018. *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam.
- CCPS, 2010. *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE, and Flash Fire Hazards*. 2nd ed. Center for Chemical Process Safety, New York.
- CCPS, 2017. *Guidelines for Pressure Relief and Effluent Handling Systems*. 2nd ed. Center for Chemical Process Safety, New York.
- CEN, 2014. EN 13445-1:2014 E. Unfired Pressure Vessels – Part 1: General. CEN, Brussels.
- Congdon, P., 2007. *Bayesian Statistical Modelling*. Wiley, Chichester.
- Der Kiureghian, A., Ditlevsen, O. 2009. Aleatory or epistemic? Does it matter. *Struct Saf.* 31, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>.
- Droste, B., Probst, U., Heller, W., 1999. Impact of an exploding LPG rail tank car onto a CASTOR spent fuel cask. *Ramtrans* 10, 231–240. <https://doi.org/10.1179/rmt.1999.10.4.231>.
- Elfadaly, F.G., Garthwaite, P.H., 2017. Eliciting Dirichlet and Gaussian copula prior distributions for multinomial models. *Stat Comput.* 27, 449–467.
- Evans, M., Guttman, I., Li, P., 2017. Prior elicitation, assessment and inference with a Dirichlet prior. *Entropy*. <https://doi.org/10.3390/e19100564>.
- Gamberini, L., Imbriaco, G., Flauto, A., Monesi, A., Mazzoli, C.A., Lupi, C., Costa, D.M.R., Mora, F., Dell’Arciprete, O., Cordenons, F., Picoco, C., Gordini, G., 2021. Mass casualty management after a boiling liquid expanding vapor explosion in an urban area. *J. Emerg. Med.* 60, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2020.11.029>.
- Goran, V., & Josip, B. (2011). J-integral as possible criterion in material fracture toughness assessment. *Engineering Review*, 31(2), 91–96.
- Gubinelli, G., Cozzani, V., 2009a. Assessment of missile hazards: Evaluation of the fragment number and drag factors. *J. Hazard. Mater.* 161, 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.116>.
- Gubinelli, G., Cozzani, V., 2009b. Assessment of missile hazards: Identification of reference fragmentation patterns, *J. Hazard. Mater.* 163, 1008–1018. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.056>.
- Guedri, A., 2013. Reliability analysis of stainless steel piping using a single stress corrosion cracking damage parameter. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 111–112, 1–11.
- Heymes, F., Aprin, L., Birk, A.M., Slangen, P., Jarry, J.B., François, H., Dusserre, G., 2013. An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall fire. *J. Loss Prev. Process Ind.* 26, 1484–1491. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.09.015>.
- Holden, P.L., Reeves, A.B., 1985. Fragment hazards from failures of pressurized liquefied gas vessels. IChemE Symp. Ser. 93, 205–217.
- Iannaccone, T., Scarponi, G.E., Landucci, G., Cozzani, V., 2021. Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire. *Process Saf. Environ. Prot.* 149, 735–749. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.027>.
- ISO, 2007. ISO 16528-1:2007. Boilers and Pressure Vessels – Part 1: Performance Requirements. <https://www.iso.org/standard/41079.html>. Accessed 22 March 2021.
- Kartal, F., 2020. Evaluation of explosion pressure of portable small liquefied petroleum gas cylinder. *Process Saf. Prog.* 39, e12081.
- Kelly, D., Atwood, C., 2011. Finding a minimally informative Dirichlet prior distribution using least squares. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 96, 398–402. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.11.008>.
- Kelly, D., Smith C., 2011. *Bayesian Inference for Probabilistic Risk Assessment: A Practitioner's Guidebook*. Springer, London.
- Kingklang, S., Daodon, W., Uthaisangsk, V., 2019. Failure investigation of liquefied petroleum gas cylinder using FAD and XFEM. *Int. J. Press. Vessel Pip.* 171, 69–78.

- Laboureur, D., Birk, A.M., Buchlina, J.M., Rambaudo, P., Aprinc, L., Heymes, F., Osmont, A., 2015. A closer look at BLEVE overpressure. *Process Saf. Environ. Prot.* 95,159–171. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.03.004>.
- Laboureur, D., Buchlin, J.M., Rambaudo, P., 2012. Small scale experiments on boiling liquid expanding vapor explosions: supercritical bleve. In: Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2012, pp. 51–60. <https://doi.org/10.1115/PVP2012-78283>.
- Landucci, G., Molag, M., Cozzani, V., 2009a. Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires. *J. Hazard. Mater.* 172, 447–456.
- Landucci, G., Molag, M., Reinders, J., Cozzani, V., 2009b. Experimental and analytical investigation of thermal coating effectiveness for 3 m³ LPG tanks engulfed by fire. *J. Hazard. Mater.*, 161, 1182–1192.
- Li, H., Yang, P., Huang, X., Yang, H., 2019. Reliability assessment of pressure vessel design methods. *Int. J. Reliab. Saf.* 13, 31–43. <https://doi.org/10.1504/IJRS.2019.097014>.
- Li, X., Liu, Zh., Li, M., Li, P., Zhao, Y., Wan, S., 2021. Experiments on burst pressure and fragment dispersion effects of small-sized pressure vessel BLEVE. *Fuel*, 277, 118145. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118145>.
- Mannan, S. (Ed.), 2012. *Lees's Loss Prevention in the Process Industries*. 4th ed. Elsevier, Amsterdam.
- Mannan, S. (Ed.), 2014. *Lees's Process Safety Essentials. Hazard Identification, Assessment and Control*. Elsevier, Amsterdam.
- Manu, C.C., Birk, A.M., Kim, I.Y., 2009. Stress rupture predictions of pressure vessels exposed to fully engulfing and local impingement accidental fire heat loads. *Eng. Fail. Anal.* 16, 1141–1152. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.07.018>.
- Mébarki, A., Mercier, F., Nguyen, Q.B., Ami Saada, R., 2009. Structural fragments and explosions in industrial facilities. Part I: Probabilistic description of the source terms. *J. Loss Prev. Process Ind.* 22, 408–416. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jlp.2009.02.006>.
- Meng, Z., Pang, Y., Pu, Y., Wang, X., 2020. New hybrid reliability-based topology optimization method combining fuzzy and probabilistic models for handling epistemic and aleatory uncertainties. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112886>.
- Mosnier, M., Daudonnet, B., Renard, J., Mavrothalassitis, G., & Mercier, F. (2003). Metallic pressure vessels failures. In: A. Lannoy, G. G. M. Cojazzi (Eds.), *Lifetime Management of Structures, 25th ESReDA Seminar* (pp. 129–141). Paris: ESREDA.
- Narayanan, A., 1990. Computer generation of Dirichlet random vectors. *J. Stat. Comp. Simul.* 36, 19–30. <https://doi.org/10.1080/00949659008811250>.
- Planas, E., Pastor, E., Casal, J., Bonilla, J.M., 2015. Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident. *J. Loss Prev. Process Ind.* 34, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.026>.
- Planas-Cuchi, E., Gasulla, N., Ventosa, A., Casal, J., 2004. Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas. *J. Loss Prev. Process Ind.* 17, 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2004.05.005>.
- Piccinini, N., Demichela, M., 2006. Explosion of a hot-oil circuit as a consequence of process, plant engineering and management shortcomings. *Process safety progress*, 25(1), 21–32. <https://doi.org/10.1002/prs.10108>.
- Pula, R., Khan, F.I., Veitch, B., Amyotte, P.R., 2006. A model for estimating the probability of missile impact: missiles originating from bursting horizontal cylindrical vessels. *Process Saf. Prog.* 26, 129–139. <https://doi.org/10.1002/prs.10178>.
- Qian, G., Niffenegger, M., Zhou, W., Li, S., 2013. Effect of correlated input parameters on the failure probability of pipelines with corrosion defects by using FITNET FFS procedure. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 105–106, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.02.004>.
- Roberts, T., Buckland, I., Beckett, H., Hare, J., Royle, M., 2001. Consequences of jet-fire interaction with vessels containing pressurised, reactive chemicals. *ICChemE Symp. Ser.* 148, 147–166.
- Roos, E., Wackenhut, G., Lammert, R., Schuler, X., 2011. Probabilistic safety assessment of components. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 88, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.11.005>.

- Scarponi, G.E., Landucci, G., Birk, A.M., Cozzani, V., 2018. LPG vessels exposed to fire: Scale effects on pressure build-up. *J. Loss Prev. Process Ind.* 56, 342–358. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.09.015>.
- Scarponi, G.E., Landucci, G., Birk, A.M., Cozzani, V., 2019. An innovative three-dimensional approach for the simulation of pressure vessels exposed to fire. *J. Loss Prev. Process Ind.* 61, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.06.008>.
- Scarponi, G.E., Landucci, G., Birk, A.M., Cozzani, V. 2021. Three dimensional CFD simulation of LPG tanks exposed to partially engulfing pool fires. *Process Saf. Environ. Prot.* 150, 385–399.
- Siu, N.O., Kelly, D.L., 1998. Bayesian parameter estimation in probabilistic risk assessment. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 62, 89–116. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.07.002>.
- Sun, D., Jiang, J., Zhang, M., Wang, Z., Huang, G., Qiao, J., 2012. Parametric approach of the domino effect for structural fragments. *J. Loss Prev. Process Ind.* 25, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.06.029>.
- Susan, D.F., Eckelmeyer, K.H., Kilgo, A.C., 2005. Metallurgical failure analysis of a propane tank boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE). *J. Fail. Anal. Preven.* 5, 65–74. <https://doi.org/10.1361/154770205X65918>.
- Townsend, W., Anderson, C., Zook, J., Cowgill, G., 1974. Comparison of Thermally Coated and Uninsulated Rail Tank Cars Filled with LPG Subjected to a Fire Environment. US Department of Transport Report No. FRA-OR&D 75–32. Department of Transport, Washington.
- Troffaes, M.C.M., Walter, G., Kelly, D., 2014. A robust Bayesian approach to modeling epistemic uncertainty in common-cause failure models. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 125, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.05.022>.
- Tugnoli, A., Cozzani, V., Khan, F., Amyotte, P., 2013. *Missile Projection Effects*. In: Reniers, G., Cozzani, V. (Eds.), *Domino Effects in the Process Industries. Modelling, Prevention and Managing*. Elsevier, Amsterdam, pp. 116–153.
- Tugnoli, A., Milazzo, M.F., Landucci, G., Cozzani, V., Maschio, G., 2014. Assessment of the hazard due to fragment projection: A case study. *J. Loss Prev. Process Ind.* 28, 36–46.
- Vaidogas, E.R., 2006. First step towards preventing losses due to mechanical damage from abnormal actions: Knowledge-based forecasting the actions. *J. Loss Prev. Process Ind.* 19, 375–385. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.10.002>.
- Vaidogas, E.R., 2021. Predicting the ejection velocities of fragments from explosions cylindrical pressure vessels: Uncertainty and sensitivity analysis. *J. Loss Prev. Process Ind.* 71, 104450. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104450>.
- Walley, P., 1996. Inferences from multinomial data: Learning about a bag of marbles. *J. R. Statist. Soc. B.* 58, 3–57.
- Wang, H., Yajima, A., Castaneda, A., 2019. A stochastic defect growth model for reliability assessment of corroded underground pipelines. *Process Saf. Environ. Prot.* 123, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.005>.
- Wilson, K.J., 2018. Specification of informative prior distributions for multinomial models using vine copulas. *Bayesian Anal.* 13, 749–766. <https://doi.org/10.1214/17-BA1068>.
- Xiao, Z., Shi, J., Cao, X., Xu, Y., Hu, Y., 2018. Failure probability analysis of pressure vessels that contain defects under the coupling of inertial force and internal pressure. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 168, 59–65. <https://doi.org/10.1016/J.IJPVP.2018.09.005>.
- Zubair, M., Amjad, Q.M.N., 2016. Calculation and updating of common cause failure unavailability by using alpha factor model. *Ann. Nucl. Energ.* <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.12.004>.