



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

## **Plieninės santvaros ugniaatsparumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Aurimas Dermauskas**

Projekto autorius

**Lekt. dr. Nerijus Adamukaitis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

## **Plieninės santvaros ugniaatsparumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6121EX008)

---

**Aurimas Dermauskas**

Projekto autorius

**Lekt. dr. Nerijus Adamukaitis**

Vadovas

**Prof. dr. Tadas Zingaila**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Aurimas Dermauskas

## **Plieninės santvaros ugniaatsparumo tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Aurimo Dermausko, baigiamasis projektas tema „Plieninės santvaros ugniaatsparumo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

**Kaunas, 2021**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistro baigiamojo projekto užduotis**

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):  
PLIENINĖS SANTVAROS UGNIAATSPARUMO TYRIMAS

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: 2020 m. lapkričio 30 d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):  
Plieninės santvaros ugniaatsparumo tyrimas

(anglų k.):  
Fire Protection Investigation for Steel Truss

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

**IŠSIRINKTI TYRIMŲ OBJEKTĄ.**

**Baigiamojo projekto dalys:**

	<b>Atlikti</b>
Įvadas	<b>x</b>
Literatūros apžvalga	<b>x</b>
Metodologija	<b>x</b>
Eksperimentiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Analitiniai tyrimai	<b>x</b>
Skaitiniai tyrimai	<b>x</b>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	<b>x</b>

**Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:**

**Vadovas:** Lekt. Nerijus Adamukaitis parašas  
*pareigos, vardas, pavardė*

**Studentas:** Aurimas Dermauskas parašas  
*vardas, pavardė*

Dermauskas Aurimas. Plieninės santvaros ugniaatsparumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovas lekt. dr. Nerijus Adamukaitis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: plieninė santvara, plieno ugniaatsparumas, bendrieji gaisrų modeliai.

Kaunas, 2021. 48 p.

### **Santrauka**

Baigiamajame magistro darbe analizuojami esamo vieno aukšto sandėliavimo paskirties statinio, kuriame yra atliekami rekonstrukcijos darbai, plieninės stogą laikančiosios santvaros ugniaatsparumo skaičiavimo ypatumai, remiantis teisinių dokumentų ir šiai dienai atliktų, su magistrinio darbo tema susijusių, tyrimų nuostatomis. Atliktas plieninės santvaros ugniaatsparumo analitinis ir skaitinis tyrimai remiantis vardinėmis temperatūros ir laiko kreivėmis bei bendroju gaisrų modeliu, nustatyta temperatūros augimo sparta gaisriniame skyriuje remiantis natūralaus gaisro modeliu. Atlikus tyrimą buvo išnagrinėti rezultatai bei suformuotos magistrinio darbo išvados.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, kuri susideda iš 6 skyrių, tyrimo analizė, išvados, literatūros sąrašas, priedai. Darbo apimtis – 48 psl. teksto be priedų, 15 lentelių, 21 paveikslų.

Dermauskas Aurimas. Fire Protection Investigation for Steel Truss. Master's Final Degree Project, supervisor lect. Doc. Adamukaitis Nerijus. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: steel truss, steel fire resistance, advanced fire models.

Kaunas, 2021. 48 p.

### **Summary**

The final Master's thesis analyzes the peculiarities of the calculation of the fire resistance of the steel roof truss of the existing one-storey storage building (which is in reconstruction progress) in accordance with the provisions of legal documents and research on the topic of the Master's thesis. Analytical and numerical investigation of the fire resistance of a steel truss were performed based on the nominal temperature and time curves and the advanced fire model as well as the rate of temperature increase in the fire compartment was determined based on the advanced fire model. After the investigation, the results were examined and the conclusions of the Master's thesis were formed.

The thesis consists of 6 parts: introduction, literature review, which consists of 6 chapters, research analysis, conclusions, references, annexes. The thesis consists of: 48 pages of text without annexes, 15 tables, 21 figures.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>ĮVADAS.....</b>	<b>11</b>
<b>1. GAISRO PARAMETRAI.....</b>	<b>12</b>
1.1. Bendroji informacija.....	12
1.2. Ugnies plitimas.....	12
1.2.1. Ugnies augimo fazė .....	13
1.2.2. Gaisro fazė.....	13
1.2.3. Gaisro gesimo fazė .....	13
1.3. Degumo klasės ir atsparumas ugniai .....	13
<b>2. GAISRINĖ SAUGA .....</b>	<b>14</b>
2.1. Bendrieji gaisrinės saugos reikalavimai .....	14
2.2. Konstrukcijoms keliami reikalavimai.....	14
<b>3. PROJEKTAVIMO NORMOS .....</b>	<b>16</b>
3.1. Projektavimo eiga .....	16
3.1.1. Gaisro scenarijaus parinkimas bei skaičiuotinio gaisro nustatymas.....	16
3.1.2. Konstrukcijų terminė analizė.....	16
3.1.3. Konstrukcijų mechaninė analizė.....	16
<b>4. UGNIES POVEIKIS .....</b>	<b>18</b>
4.1. Vardinės temperatūros ir laiko kreivės.....	18
4.2. Natūraliųjų gaisrų modeliai .....	19
4.2.1. Parametrinės temperatūros ir laiko kreivės .....	19
4.2.2. Bendrieji gaisro modeliai .....	20
4.2.3. Lokalieji gaisrai .....	21
<b>5. TERMINĖ ANALIZĖ.....</b>	<b>24</b>
5.1. Ugnies poveikis santvaroms .....	24
5.2. Temperatūrinių laukų nustatymas naudojant baigtinių elementų metodą.....	25
5.3. Masyvumo koeficientas.....	26
5.4. Ugnies veikiamo neapsaugoto plieninio profilio temperatūra.....	26
5.5. Ugnies veikiamo apsaugoto plieninio profilio temperatūra .....	29
<b>6. MECHANINĖ ANALIZĖ.....</b>	<b>31</b>
6.1. Mechaninė apkrova konstrukcijoms gaisro metu .....	31
6.2. Apkrovų supaprastinimas .....	31
6.3. Skerspjuvių klasifikavimas.....	32
6.4. Mechaninės plieno savybės .....	33
6.5. Elemento skerspjuvio kritinė temperatūra.....	36
<b>7. TYRIMO ANALIZĖ.....</b>	<b>37</b>
7.1. Bendra informacija .....	37
7.2. Apkrovos ir deriniai.....	38
7.3. Ugnies poveikis remiantis vardinėmis temperatūros ir laiko kreivėmis.....	39
7.3.1. Temperatūriniai poveikiai .....	39

7.3.2. Konstrukcijų skaičiavimas.....	40
7.4. Ugnies poveikis remiantis natūralaus gaisro kreivėmis .....	42
7.4.1. Temperatūriniai poveikiai .....	42
7.4.2. Konstrukcijų skaičiavimas.....	43
<b>IŠVADOS .....</b>	<b>46</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>47</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>49</b>
1 priedas. Santvaros skaičiuojamoji schema bei ją sudarantys profiliai .....	49
2 priedas. Santvaros elementų temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa <i>SCIA Engineering</i> .....	51
3 priedas. Santvaros viršutinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal vardines temperatūros ir laiko kreives .....	57
4 priedas. Santvaros apatinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal vardines temperatūros ir laiko kreives .....	66
5 priedas. Santvaros viršutinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę .....	75
6 priedas. Santvaros apatinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę .....	78



## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Šilumos perdavimo konvekcijos būdu ir formos koeficientų reikšmės .....	27
2 lentelė. Dežinio masyvumo koeficiento reikšmės .....	28
3 lentelė. Anglingojo plieno įtempių ir deformacijų sąryšio aukštesnėje temperatūroje pataisos koeficientai [LST_EN 1993-1-2, E3.1 lentelė] .....	35
4 lentelė. Stogo santvarą veikiančios apkrovos. ....	38
5 lentelė. Įrašos santvaros elementuose („-“ – gniuždomas elementas).....	39
6 lentelė. Santvarą sudarančių plieninių profilių temperatūrinių poveikių reikšmės gautos skaičiuojant kompiuterine programa .....	40
7 lentelė. Santvarą sudarančių plieninių profilių temperatūrinių poveikių reikšmės gautos skaičiuojant rankiniu būdu .....	40
8 lentelė. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę .....	40
9 lentelė. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę .....	41
10 lentelė. Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę .....	41
11 lentelė. Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę.....	42
12 lentelė. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę.....	44
13 lentelė. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę .....	44
14 lentelė. Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys atlikti naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę.....	45
15 lentelė. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę .....	45

## Paveikslų sąrašas

1 pav.	Ugnies plitimo fazės, priklausomai nuo temperatūros ir laiko [23] .....	12
2 pav.	Konstrukcijoms keliamų reikalavimų vizualizacija [23].....	14
3 pav.	Skirtingi ugnies plitimo keliai [23].....	15
4 pav.	Angliavandenilio kreivės ir standartinės temperatūros ir laiko kreivės palyginimas .....	19
5 pav.	Dvizonio (A) ir vienazonio (B) modelių schematinis vaizdavimas [23].....	20
6 pav.	Tėkmių dinamikos skaičiuojamojo modelio pavyzdys [24].....	21
7 pav.	Skaičiavimo atvejis, kai ugnies šaltinis yra ant grindų, o ugnis nesiekia lubų [4] .....	21
8 pav.	Skaičiavimo atvejis, kai ugnies šaltinis yra ant grindų, o ugnis apima lubų [4] .....	22
11 pav.	Temperatūriniai laukai, susidarę plieninėje sijoje HEB400, dėl ugnies poveikio [22] .....	25
12 pav.	Masyvumo koeficiento įtaka ugnies veikiamam elementui .....	26
13 pav.	Skerspjuvio įtaka šešėlio efekto susidarymui .....	28
14 pav.	Pataisos koeficiento $\eta_{fi}$ ir apkrovų santykio $Q_k, 1/G_k$ sąryšis [4] .....	32
15 pav.	Plieno S235 įtempių ir deformacijų priklausomybės grafikas, priklausomai nuo jo temperatūros [22].....	33
16 pav.	Anglingojo plieno įtempių ir santykinų deformacijų sąryšis aukštesnėje temperatūroje [22]	34
17 pav.	Anglingojo plieno įtempių ir deformacijų sąryšio aukštesnėje temperatūroje pataisos koeficientai [LST_EN 1993-1-2, 3.2 pav.].....	35
18 pav.	Analizuojamos santvaros konstrukcinė schema .....	37
19 pav.	Ašinių jėgų pasiskirstymas santvaros elementuose, kN .....	38
20 pav.	Lenkimo momentų pasiskirstymas santvaros elementuose, kNm.....	39
21 pav.	Natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivė.....	43

## ĮVADAS

### **Darbo tikslas:**

Magistrinio darbo metu analizuojamas esamas vieno aukšto sandėliavimo paskirties statinys, kuriame yra atliekami rekonstrukcijos darbai. Pastato sienos – gelžbetoninės surenkamos, grindys bei kolonos – gelžbetoninės, stogo laikanti konstrukcija – plieninės santvaros, ant santvarų remiamos gelžbetoninės stogo plokštės ant kurių įrengtas stogo apšiltinimas bei prilydyta stogo danga. Rekonstrukcijos metu, dėl prastos fizinės būklės, stogo danga bei gelžbetoninės stogo plokštės numontuojamos. Numatoma nauja stogo danga – daugiasluoksnės stogo plokštės.

Šio darbo tikslas – atlikti rekonstruojamo statinio gaisro veikiamos plieninės santvaros analizę ir pasiūlyti optimalius sprendinius užtikrinančius šios konstrukcijos laikomąją galią.

### **Darbo uždaviniai:**

1. Nustatyti temperatūros augimo spartą gaisriniame skyriuje naudojant natūralaus gaisro modelį;
2. Apskaičiuoti santvaros laikomąją galią, 45min po gaisro pradžios, pagal vardines temperatūros ir laiko kreives;
3. Apskaičiuoti santvaros laikomąją galią, 60min po gaisro pradžios, remiantis natūraliuoju gaisro modeliu.

### **Darbo metodai:**

- Teisinių dokumentų ir šiai dienai atliktų, su magistrinio darbo tema susijusių, tyrimų analizė;
- Skaičiavimai remiantis projektavimo normatyviniais dokumentais bei programomis „OZone“ ir „SCIA Engineering“;
- Atliktų skaičiavimo rezultatų apdorojimas.

# 1. GAISRO PARAMETRAI

## 1.1. Bendroji informacija

Kiekvienais metais visame pasaulyje kyla daugybė gaisrų, kurie turi didelį ekonominį ir socialinį poveikį visuomenei [1]. Pagal 2017 metų gaisrų statistiką, pateiktą „World Fire Statistics: Report 24“, Lietuvoje kasmet vidutiniškai kyla daugiau kaip 11 tūkst. gaisrų, iš kurių daugiau nei 1,2 tūkst. yra statinių gaisrai, o tai yra apie 13 % visų registruotų gaisrų atvejų. Nors statinių gaisrai sudaro sąlyginai mažą dalį visų Lietuvoje registruotų gaisrų, tačiau būtent šie turi skaudžias pasekmes tiek susijusias su žmonių gyvybėmis, tiek su finansinėmis problemomis. Todėl būtina užtikrinti priešgaisrinės saugos strategiją pastatams, kuriuose gaisras gali būti viena iš esminių problemų (aukšti pastatai; statiniai, kuriuose lankosi daug žmonių; didelį plotą turintys pastatai).

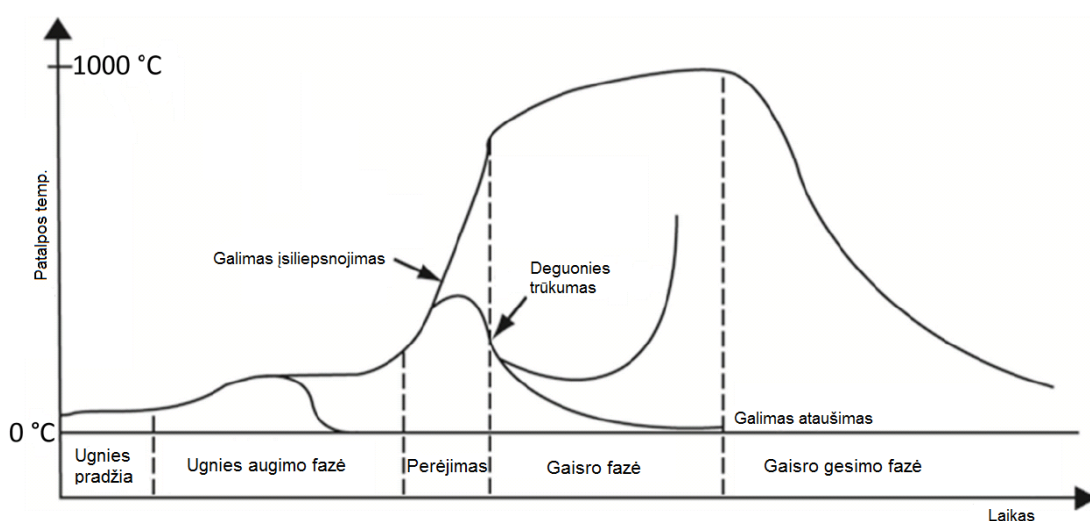
Nors plieninių konstrukcijų panaudojimas statiniams, aukštesniems nei 200 m, užima 54 % pasaulio rinkos [1], tačiau ugnies veikiamas plienas, kaip ir visos medžiagos, praranda savo stiprumą. Pagal LST\_EN1993-1-2:2005+AC:2006 Europos standarto [4] 3.1 lentelę, iki 600 °C įkaitęs anglingasis plienas praranda 53% stiprumo pagal takumo ribą ir 69 % sumažėja tamprumo modulio reikšmė. Taip pat, plienas pasižymi aukštu šilumos laidumu, todėl temperatūra plieninėse konstrukcijose gaisro metu sparčiai kyla [1], pasiekus aukštą temperatūrą ir praradus laikomąją galią, konstrukcijos gali griūti.

## 1.2. Ugnies plitimas

Uždaroje patalpoje, ugnies plitimas gali būti skirstomas į tris fazes:

- ugnies augimo fazė;
- gaisro fazė;
- gaisro gesimo fazė.

Kiekviena iš šių fazių yra asocijuojama su atitinkamu temperatūros intervalu, kurie pateikiami 1 pav. Šiame skyriuje aprašomos visos trys gaisro plitimo fazės.



1 pav. Ugnies plitimo fazės, priklausomai nuo temperatūros ir laiko [23]

### **1.2.1. Ugnies augimo fazė**

Įsižiebus ugniai pasirodo pirmieji dūmai bei dujos. Karštiesiems garams kylant aukštyn ir gaisrui plečiantis patalpoje, užsiliepsnoja vis daugiau patalpoje esančių degių daiktų. Temperatūrai pasiekus 200 °C – 300 °C, patalpoje susikaupia tiek degiųjų dujų, kad gali susidaryti degus dujų ir oro mišinys. Tuomet, priklausomai nuo patalpoje esančių degių daiktų ir ar deguonies kiekis yra pakankamas, ugnis gali „uždusti“ arba visiškai įsiliepsnoti. Didžiausią įtaką tam turi patalpoje esantys langai, durys ar kitos angos, per kurias gali patekti oras vidun.

### **1.2.2. Gaisro fazė**

Gaisro fazėje ugnis pasiekia temperatūros piką. Vietiniai gaisrai susijungia ir pereina į visiškai įsivysčiusį gaisrą. Perėjimo laikotarpiu temperatūra dūmų sluoksnyje palubėje yra tokia aukšta, kad įžiebia visus degančius objektus patalpoje. Šis įsižiebigimas yra būdingas uždarams patalpoms, tačiau net ir esant atvirai patalpai, temperatūra pasiekia tokį pat piką, tačiau lėčiau. Net ir tada, temperatūra gali pakilti iki 900 °C per 15 min, priklausomai nuo aplinkybių [23].

### **1.2.3. Gaisro gesimo fazė**

Gaisro temperatūra ir intensyvumas mažėja, kai ugnis sunaudojama apie 75 – 80 % kuro. Šiuo metu prasideda gesimo fazė. Ugnies gesimui taip pat turi įtakos ir deguonies trūkumas. Esant tokiai situacijai, degios medžiagos nebūtinai turi baigtis, tačiau ugnis pradeda gesti dėl cheminei reakcijai trūkstančio deguonies. Nors temperatūra krenta, tačiau ji išlieka pakankamai aukšta, kad kartu su likusiomis dujomis sudarytų antrinę gaisrą. Todėl būtina užtikrinti, kad dujų temperatūra kristų ir ugnis būtų visiškai užgesinta.

## **1.3. Degumo klasės ir atsparumas ugniai**

Degumo klasė ir atsparumas ugniai yra dvi skirtingos ugnies veikiamos konstrukcijos charakteristinės savybės:

- Degumo klasė – medžiagos savybės, susijusios su šios medžiagos užsidegimu ir gaisro palaikymu. Tai gali būti degumas, liepsnos sklidimu medžiagos paviršiumi, energijos bei dūmų išskyrimu gaisro metu.
- Atsparumas ugniai – konstrukcijos gebėjimas išlaikyti savo funkciją gaisro metu, t. y. ugnį atskiriančios konstrukcijos gebėjimas sustabdyti ugnies plitimą ar laikančiosios konstrukcijos gebėjimas atlaikyti apkrovas gaisro metu.

Šio darbo metu nagrinėjami priešgaisrinės saugos reikalavimai ir skaičiavimo metodai, skirti statinio laikančiųjų konstrukcijų elgsenai gaisro metu, todėl visas dėmesys bus skiriamas konstrukcijų atsparumui ugniai bei medžiagų mechaninėms savybėms aukštoje temperatūroje.

## 2. GAISRINĖ SAUGA

### 2.1. Bendrieji gaisrinės saugos reikalavimai

Sauga gaisro atveju – vienas iš esminių statinio reikalavimų. Pagrindinis priešgaisrinės saugos tikslas – užsakovo ir projektuotojo priimama strategija, sušvelninanti gaisro pasekmes. Statybos projektų direktyvoje 89/106/EEC [7] pateikiami esminiai gaisro saugos reikalavimai. Šie reikalavimai yra minimi ir Eurokode „LST EN 1991-1-2:2004“ [6]. Esminiai reikalavimai, pateikti direktyvoje 89/106/EEC [7]:

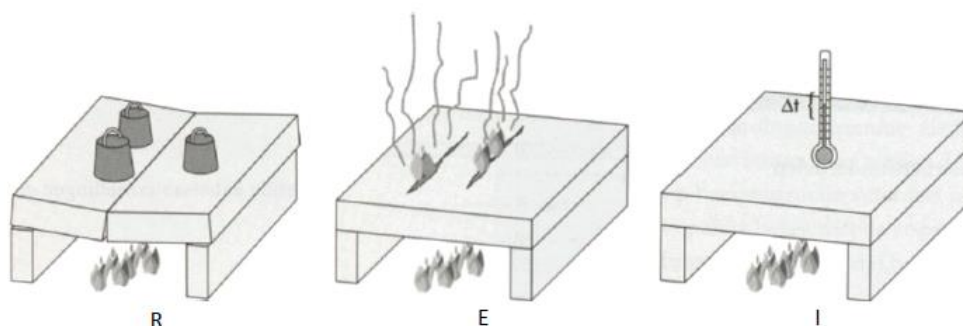
„Statiniai turi būti taip suprojektuoti ir statomi taip, kad kilus gaisrui:

- statinį laikančios konstrukcijos tam tikrą laiką išlaikytų apkrovas,
- būtų ribojamas ugnies bei dūmų susidarymas ir plitimas statinyje,
- būtų ribojamas gaisro plitimas į gretimus statinius,
- ugniagesiai gelbėtojai galėtų saugiai dirbti.“

### 2.2. Konstrukcijoms keliami reikalavimai

Lietuvos Respublikoje galiojančiuose gaisrinės saugos reikalavimuose išskiriamos trys skirtingi konstrukcijoms keliami reikalavimai: konstrukcijos laikomoji geba (R), vientisumas (E), šiluminė izoliacija (I).

- Laikomoji galia (R) – konstrukcijos elemento gebėjimas, atitinkamą laiko tarpą, atlaikyti šilumos sukiamas apkrovas, neprarandant stabilumo.
- Vientisumas (E) – konstrukcijos elemento gebėjimas, atitinkamą laiko tarpą, atlaikyti ugnies sukiamas apkrovas ir sulaikyti ugnies plitimą į kitas patalpas.
- Šiluminė izoliacija (I) – konstrukcijos elemento gebėjimas, atitinkamą laiko tarpą, atlaikyti ugnies sukiamas apkrovas, sulaikyti ugnies plitimą statinyje bei užtikrinti leistiną žemą temperatūrą kitoje, saugančios konstrukcijos, pusėje. Šios konstrukcijos riboja evakuacijos kelius nuo patalpų, kuriuose galimai gali kilti gaisras.



**2 pav.** Konstrukcijoms keliamų reikalavimų vizualizacija [23]

Laikomosios galios kriterijus (R) naudojamas, kai būtina įvertinti laikančiųjų konstrukcijų mechaninį stiprį gaisro metu. Šios konstrukcijos turi būti suprojektuotos taip, kad konstrukcija atlaikytų apkrovas užsiduoto laiko intervalui.

Kriterijai (E) ir (I) naudojami konstrukcijoms, kurių tikslas suskirstyti statinį į gaisrines sekcijas, taip siekiant užkirsti kelią gaisro plitimui visame statinyje bei užtikrinant evakuacijos kelių

saugumą gaisro metu. Didžiausi gaisrinių sekcijų plotų apribojimai pateikti gaisrinės saugos taisyklėse ir kinta priklausomai nuo statinio paskirties ir funkcijos.

Būtina užtikrinti, kad gaisro plitimas būtų stabdomas ne tik pastato viduje, tačiau ir išorėje. Tai gali turėti įtakos ne tik nagrinėjamo statinio saugai, kuomet ugnis pasiekia aukščiau esančias konstrukcijas, tačiau ir aplinkiniams statiniams (3 pav.) Šiomis dienomis ši problema nebėra tokia aktuali, dėl reikalavimų keliamų atstumui tarp greta esančių statinių bei ugniai atsparių durų, langų ar stogo.



**3 pav.** Skirtingi ugnies plitimo keliai [23]

Visi ankščiau minėti kriterijai apibrėžia laiką (minutėmis), kurį konstrukcija privalo atlaikyti pagal projektavimo sąlygas. Pavyzdžiui, R60, R90, E60, E90, I60 ir I90 nurodo, kad konstrukcija, gaisro sąlygomis, turi išlaikyti atitinkamą kriterijų (R, E, I) 60min ar 90min. Kriterijus REI60 nurodo, kad konstrukcijos elementas privalo išlaikyti visus tris kriterijus 60min.

Prieš pradėdant projektuoti laikančias statinio konstrukcijas, būtina žinoti, koks yra pastato atsparumo ugniai laipsnis. Lietuvos reglamentuose [8-10] pateikiami trys laipsniai:

- I atsparumo laipsnis – priklauso aukšti ir labai aukšti statiniai, pastatai, kuriuose vienu metu gali būti didelis žmonių susibūrimas. Šiems statiniams privaloma skaičiuoti gaisro apkrovą. Jei skaičiavimai nėra atliekami, laikoma, kad statinys yra 1 gaisro apkrovos kategorijos [8].
- II atsparumo laipsnis – žmonių skaičius pastate neturi viršyti 1200 žmonių. Gaisro apkrovos skaičiuoti nereikia.
- III atsparumo laipsnis – žmonių skaičius pastate neturi viršyti 600 žmonių. Gaisro apkrovos skaičiuoti nereikia. Taikomi minimalūs laikančių konstrukcijų atsparumo ugniai reikalavimai.

### **3. PROJEKTAVIMO NORMOS**

#### **3.1. Projektavimo eiga**

Žinant pastato atsparumo ugniai laipsnį projektavimas gali būti pradėtas. Lietuvos statybų teisiniai reglamentai (toliau STR) ugnies veikiamų plieninių konstrukcijų projektavimo nedetalizuoja, o nukreipia į Europos statybos standartus. Standarte LST EN 1991-1-2:2004 lt [6] išskiriami keturi gaisro veikiamų konstrukcijų projektavimo etapai:

1. pasirinkti projektavimo metodą bei gaisro plitimo scenarijų.
2. nustatomas skaičiuotinis gaisras;
3. atlikti plieninių konstrukcijų terminę analizę;
4. atlikti plieninių konstrukcijų mechaninę analizę.

##### **3.1.1. Gaisro scenarijaus parinkimas bei skaičiuotinio gaisro nustatymas**

Gaisro scenarijus – projektuotojo pasirinktas ar užsakovo pareikalautas gaisro plitimo scenarijus, kuriuo remiantis temperatūros augimo sparta bus analizuojama projekto metu.

Gaisro scenarijus aprašomas kaip gaisro raidos priklausomybė nuo laiko, nurodant tam tikras gaisro fazes, tokias kaip augimo fazė, gaisro fazė ir gesimo fazė. Atitinkamo gaisro scenarijaus parinkimas turi būti paremtas gaisro rizikos įvertinimu, įvertinant galimus užsidegimo šaltinius bei gaisro gesinimo sistemą. Gaisro scenarijų turi apibrėžti tos srities ekspertas arba projektuotojas, remiantis LST EN 1991-1-2:2004 [6] normomis. Dėl daugybės veiksnių, lemiančių gaisro plitimą, įmanoma apibrėžti tiek pat gaisro scenarijų, tačiau būtina numatyti didžiausias pasekmes turintį scenarijų.

Nustačius gaisro plitimo scenarijų, pasirenkamas vienas iš 4 skyriuje minimų gaisro plitimo metodų, t.y. vardinės gaisro kreivės, parametrinės gaisro kreivės ir lokaliųjų gaisrų kreivės.

##### **3.1.2. Konstrukcijų terminė analizė**

Temperatūros augimas plieniniuose elementuose priklauso nuo gaisrinio skyriaus oro temperatūros, plieninių elementų paviršiaus ploto veikiamo ugnies bei įrengto apsauginio sluoksnio nuo ugnies. Praktikoje naudojamos kelios apsaugos nuo gaisro sistemos, kurios sulėtina temperatūros augimą plieniniuose elementuose.

Šilumos mainai tarp karštų dujų ir plieninių elementų paviršių, vykstančių konvekcijos ir radiacijos būdais, paprastai laikomi ribine sąlyga [22]. Šilumos perdavimas konstrukcijos elemente vyksta pagal Furjė šilumos perdavimo lygtį. Šių lygčių sprendimas rankiniu būdu, net ir paprasčiausioms konstrukcijoms, yra beveik neįmanomas, todėl dažnai pasitelkiamas baigtinių elementų metodas, siekiant išspręsti šias lygtis. Taip pat Eurokodas 3 [4] pateikia supaprastintus skaičiavimo metodus ugnies veikiamų, apsaugotų ir neapsaugotų nuo gaisro, plieninių konstrukcijų projektavimui.

##### **3.1.3. Konstrukcijų mechaninė analizė**

Atliekant medžiagos mechaninių charakteristikų skaičiavimus, nustatomas bendras visų mechaninių apkrovų poveikis konstrukcijai gaisro metu. Mechaninių charakteristikų skaičiavimų rezultatai naudojami tikrinant konstrukcijų laikomąją galią gaisro metu. Kaip ir įprastame projektavime, tai atliekama pavojingiausiuose elementų skerspjūviuose ir turi vieną iš pasirinktų sąlygų:



1. laiko, kurį konstrukcija turi atlaikyti apkrovas, sąlyga:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} ; \quad (3.1)$$

2. laikomosios galios sąlyga:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} ; \quad (3.2)$$

3. kritinės temperatūros sąlyga:

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} ; \quad (3.3)$$

čia:  $t_{fi,d}$  – skaičiuotinė laiko vertė, kurią konstrukcija turi atlaikyti (viršijus – konstrukcija grius) ;  $t_{fi,requ}$  – laikas, kurį konstrukcija privalo atlaikyti apkrovas;  $E_{fi,d,t}$  – skaičiuotinė apkrova, tenkanti konstrukcijai, gaisro scenarijaus metu;  $R_{fi,d,t}$  – skaičiuotinis konstrukcijos atsparumas, gaisro scenarijaus metu;  $\theta_d$  – skaičiuotinė plieninio elemento temperatūra;  $\theta_{cr,d}$  – skaičiuotinė kritinė plieninio elemento temperatūra, kurią pasiekus konstrukcija grius.

Konstrukcijų mechaninė analizė, kaip ir terminė analizė, gali būti atliekama keliais skirtingais priartėjimo metodais:

- supaprastintas skaičiavimo modelis – paprastomis analitinėmis formulėmis apskaičiuojamas izoliuoto elemento mechaninis atsparumas;
- sudėtingi skaičiavimo modeliai – tikroviškai išanalizuojamos gaisro veikiamos konstrukcijos. Šie skaičiavimai turi būti pagrįsti esmine fizine elgsena, kad būtų galima numatyti atitinkamos konstrukcijos elgseną [4].

## 4. UGNIES POVEIKIS

Realiomis aplinkybėmis gaisro plitimo sparta ir temperatūros augimas priklauso nuo daugybės veiksnių, kaip ventiliacijos sąlygų, patalpoje esančių degimą palaikančių medžiagų kiekio bei šių medžiagų šiluminės izoliacijos dydžio. Siekiant suprojektuoti statinio konstrukcijas, būtina įvertinti temperatūros augimo spartą patalpose, o šiam tikslui pasiekti, dažnai naudojamos supaprastintos ugnies plitimo kreivės.

Eurokodas 1 [6] apibrėžia kelis skirtingus temperatūros augimo įvertinimo būdus. Vienas iš galimų būdų – vardinės temperatūros ir laiko priklausomybės kreivės. Šios priklausomybių kreivės nurodo atitinkamą temperatūrą tam tikru laiko momentu, kuri atitinka aplinkos temperatūrą gaisro metu. Šios kreivės gali būti naudojamos apskaičiuojant šilumos srauto perdavimą iš aplinkos į plienines konstrukcijas. Vardinės temperatūros ir laiko priklausomybės kreivės skirstomos į standartines temperatūros ir laiko kreives, išorines gaisro kreives bei angliavandenilio kreives

Kitas gaisro įvertinimo būdas – natūraliųjų gaisrų modeliai. Naudojant šį metodą, pagal tam tikras sąlygas, tiesiogiai apskaičiuojamas šilumos srautas tenkantis konstrukcijoms. Šis šilumos srautas derinamas su pašalinamu šilumos srautu, kurį išspinduliuoja plieninė konstrukcija, taip tiksliau įvertinant temperatūrų pasiskirstymą plieniniuose elementuose.

### 4.1. Vardinės temperatūros ir laiko kreivės

Vardinės temperatūros kreivės neapibrėžia realaus gaisro scenarijaus, o yra sutartinės ir gaunamos iš standartinių formulių. Dėl to, kad kreivės yra standartinės, jomis leidžiama naudotis taip pat tik apibrėžtoje gaisro aplinkoje. Taip pat, statinio atsparumas vardiniam gaisrui neturi būti lyginamas su evakuacijos laiku, nes šios sąlygos neatitinka realaus gaisro.

Kaip ir minima aukščiau, Eurokodas 1 išskiria tris vardines temperatūros kreives.

*Standartinė temperatūros ir laiko kreivė* – naudojama apibūdinti pilnai susiformavusį gaisrą pastato sekcijoje. Literatūroje randama ir ISO kreivės pavadinimu (angl. ISO curve) Šios kreivės formulė pateikiama žemiau:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (4.1)$$

čia:  $\theta_g$  – dujų temperatūra, °C;  $t$  – laikas, min.

Pagal gaisrinės saugos standartus [8] nustačius atitinkamą konstrukcijų atsparumo ugniai laiką ( $RE_{xx}$ , kur  $xx$  – laikas, kurį konstrukcijos turi atlaikyti projektuojamas apkrovas), šis laikas naudojamas temperatūros ir laiko kreivėje, nustatyti temperatūrą statinio sekcijoje ir projektuoti konstrukcijų atsparumą ugniai.

*Išorinio gaisro kreivė* – naudojama projektuojant išorinių pastato sienų išorinio paviršiaus atsparumą ugniai, kurios apimamos liepsnų dėl gaisro, kilusio pastato išorėje arba liepsnų, išsiveržusių pro pastato langus.

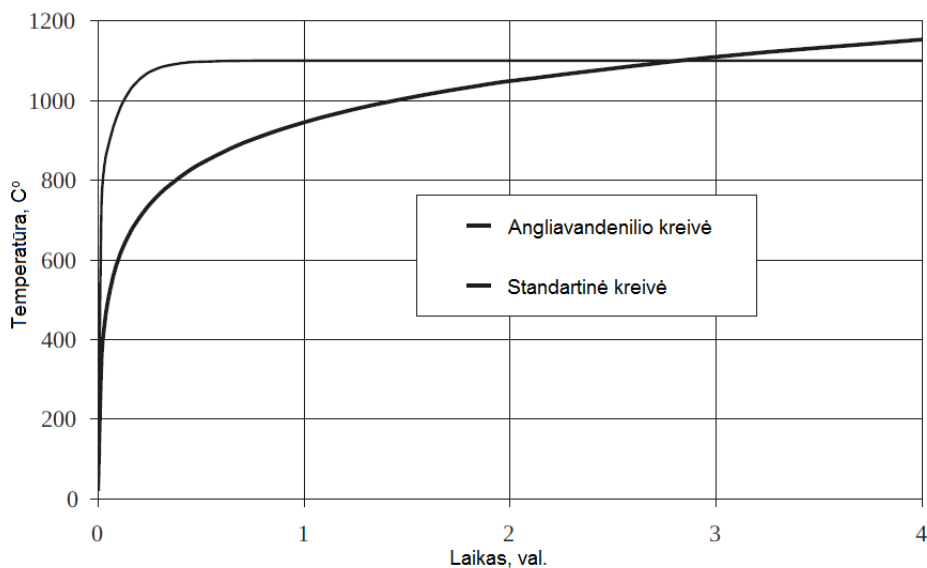
Išorinio gaisro kreivės formulė:

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) \quad (4.2)$$

*Angliavandenilio kreivė* – apibūdina angliavandenilinio gaisro temperatūros ir laiko priklausomybę. Šios kreivės formulė:

$$\Theta_g = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (4.3)$$

Angliavandenilio kreivės ir standartinės temperatūros ir laiko kreivės palyginimas pateikiamas 4 pav. Iš šios diagramos matoma, kad angliavandeniliniai gaisrai pasižymi kur kas didesniu temperatūros šuoliu nuo pat gaisro pradžios, o tuomet išlaiko pastovią 1100 °C temperatūra. Tuo tarpu standartinė kreivė nurodo mažesnę temperatūros šuolį gaisro pradžioje, tačiau temperatūra nuolat kyla.



**4 pav.** Angliavandenilio kreivės ir standartinės temperatūros ir laiko kreivės palyginimas

## 4.2. Natūraliųjų gaisrų modeliai

Išskiriami du natūraliųjų gaisrų projektavimo būdai ir modeliai:

- supaprastintieji (parametriniai) gaisro modeliai, kurie skirstomi į sekcijų gaisrus ir lokaliuosius gaisrus;
- bendrieji gaisro modeliai, kurie gali būti vienazoniai modeliai, dvizoniai modeliai, tėkmių dinamikos skaičiavimo modeliai.

### 4.2.1. Parametrinės temperatūros ir laiko kreivės

*Parametrinės temperatūros ir laiko kreivės* – analitinės funkcijos, vaizduojančios statinio gaisrinio skyriaus dujų temperatūros kitimo ir laiko funkciją, atsižvelgiant į atitinkamus parametrus, kurie atstoja esminius fizinius veiksnius lemiančius gaisro vystymąsi tame skyriuje. Šį skaičiavimo būdą galima naudoti gaisriniams skyriams, kurių plotas neviršija 500 m<sup>2</sup>, nėra angų stoge, o skyriaus aukštis neviršija 4m. Šios kreivės naudojimas aprašytas Eurokodo 1 [6] A priede.

Išskiriami trys parametrai, apibūdinantys šią kreivę:

- parametras  $b$  – apibūdinantis, gaisrinį skyrių ribojančių konstrukcijų, temperatūrinės charakteristikas, t.y. kokią dalį šilumos gaisro metu sugeria gaisrinio skyriaus sienos, lubos, grindys.
- parametras  $O$  – įvertinantis sienose (vertikaliuose paviršiuose) esančias angas. Kuo didesnis yra šis parametras, tuo labiau patalpa yra ventiliuojama. Šio parametro vertė, pagal Eurokodą 1, turi būti režiuose nuo 0,02 iki 0,20.
- $q_{t,d}$  – skaičiuotinis ugnies apkrovos tankis viso gaisrinio skyriaus aptvaro paviršiaus  $A_t$  atžvilgiu.

Projektavimas, naudojant parametrines temperatūros ir laiko kreives, pateikiamas Eurokodo 1 [6] priede A.

#### 4.2.2. Bendrieji gaisro modeliai

Bendrieji gaisro modeliai skirstomi į vienazonius, dvizonius modelius (arba zoninius modelius) ir tėkmių dinamikos skaičiavimo modelį.

*Zoniniai modeliai* – naudojami apskaičiuoti temperatūros pokyčius gaisro sekcijoje, remiantis diferencialinėmis lygtimis, išreiškiančiomis masės ir energijos pusiausvyros lygtimis.

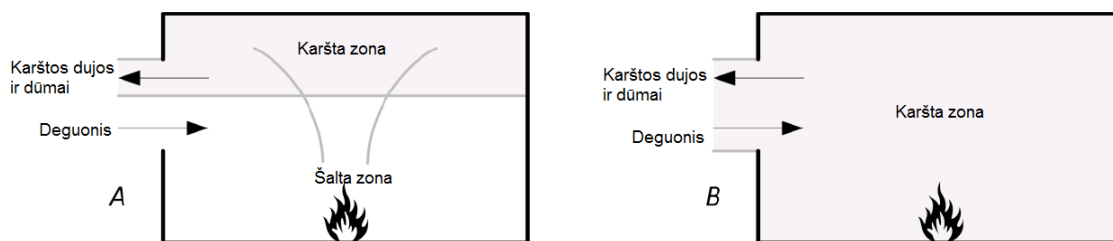
Zoninių modelių pagrindiniai parametrai nesiskiria nuo parametrinių gaisro modelių.

Eurokodas 1 suteikia labai mažai informacijos gaisrų projektavimui naudojant zoninius modelius. Šiame standarte nurodoma tik tai, kad temperatūra gaisro metu turi būti apskaičiuota atsižvelgiant į:

- masės tvermės ir energijos tvermės lygčių sprendimą;
- masės mainus tarp vidinių dujų, išorinių dujų ir ugnies;
- energijos mainus tarp ugnies, vidinių dujų, sienų ir angų.

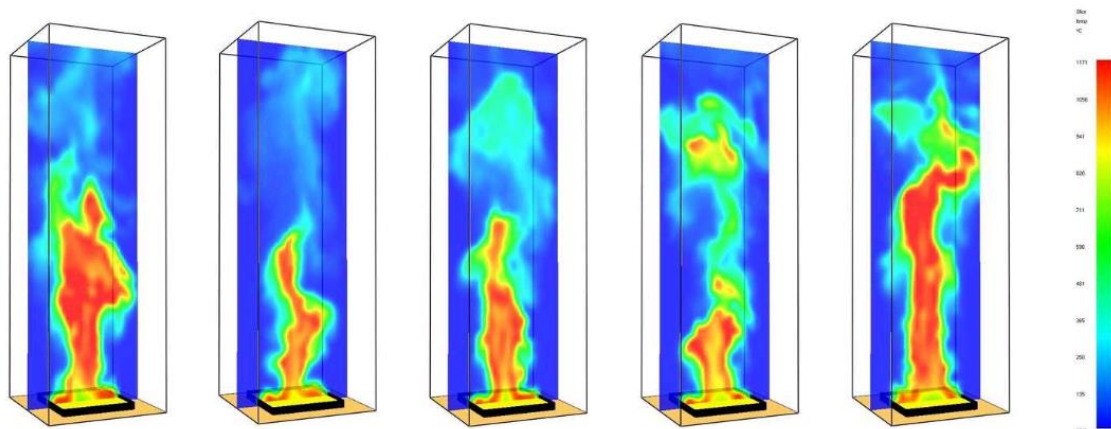
Šių skaičiavimų atlikti ranka yra neįmanoma, todėl naudojamos kompiuterinės programos.

Projektuojant pagal bendruosius gaisro modelius, konvekcijos šilumos perdavimo koeficientas priimamas lygus  $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



5 pav. Dvizonio (A) ir vienazonio (B) modelių schematinis vaizdavimas [23]

*Tėkmių dinamikos skaičiavimo modeliai* – apskaičiuojama patalpos temperatūros plitimas visiškai atsižvelgiant į laiką ir erdvę. Šio modelio skaičiavimai pateikia gausybę labai tikslių rezultatų, gautų per atitinkamą laiko vienetą. Reikalingos specifinės kompiuterinės programos, galingas kompiuteris ir didelė patirtis, siekiant tiksliai apskaičiuoti ugnies poveikius pastate.



6 pav. Tėkmių dinamikos skaičiuojamojo modelio pavyzdys [24]

### 4.2.3. Lokalieji gaisrai

Išskyrus tam tikrus, visi pastatuose kylantys gaisrai, ugnies plitimo pradžioje, gali būti traktuojami kaip lokalieji gaisrai. Gaisras nebėra lokalusis po to, kai įvyksta pirmasis ugnies „pliūpsnis“. Nors šis gaisras įvardinamas kaip mažas, tačiau gali turėti ženklų poveikį laikančioms konstrukcijoms, atsižvelgiant į lokaliajo gaisro vietą pastate.

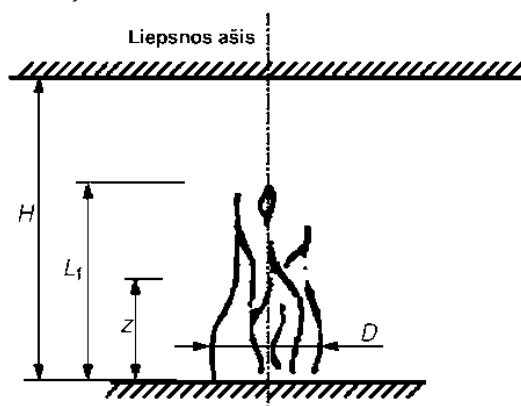
Eurokode 1 [6] priede C pateikiami du skaičiavimo atvejai įvertinantys lokaliajo gaisro poveikį. Pasirinkimas tarp skaičiavimo atvejų priklauso nuo ugnies aukščio, kurį liepsna gali išvystyti, kai lubos nevaržo ugnies aukščio. Šis aukštis  $L_f$  išreiškiamas formule:

$$L_f = 0.0148Q^{0.4} - 1.02D \quad (4.4)$$

čia:  $Q$  – šilumos išskyrimo sparta gaisro metu, W ;  $D$  – gaisro skersmuo, m.

#### 4. Lokaliajo gaisro skaičiavimas, kai ugnies liepsnos nesiekia gaisro skyriaus lubų.

Eurokode 1 pateiktas pav.2 nurodo liepsnos aukštį, kai gaisro šaltinis yra ant grindų, o lubos nevaržo ugnies aukščio, t.y.  $H < L_f$ .



7 pav. Skaičiavimo atvejis, kai ugnies šaltinis yra ant grindų, o ugnis nesiekia lubų [4]

Skaičiuojant šiuo atveju, liepsnos temperatūra, išilgai liepsnos simetrijos ašiai, yra lygi:

$$\Theta_{(z)} = 20 + 0.25Q_c^{\frac{2}{3}}(z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad (4.5)$$

čia:  $Q_c$  – konvekcinė šilumos išskyrimo spartos dalis, tariant iš anksto, kad  $Q_c = 0.8Q$ , [W] ;  $z$  – aukštis išilgai liepsnos ašies, [m] ;  $z_0$  skaičiuojamas pagal formulę:

$$z_0 = 0.00524Q^{0.4} - 1.02D \quad (4.6)$$

čia:  $Q$  – šilumos išskyrimo sparta gaisro metu, W ;  $D$  – gaisro skersmuo, m.

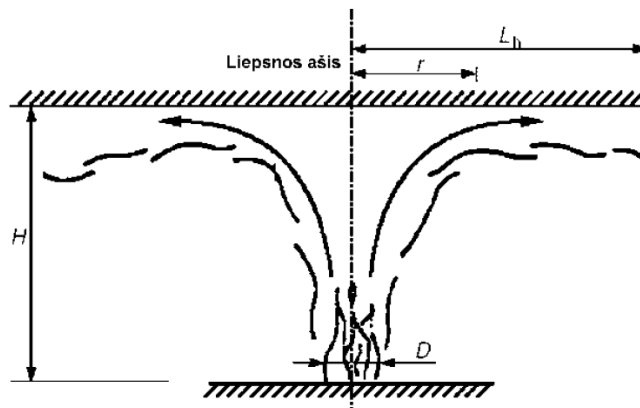
Šilumos neto srautas, kurį gauna veikiamo paviršiaus ploto vienetas lubų lygyje, pagal Eurokodą 1, skaičiuojamas pagal formulę:

$$h_{net} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m) + \phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (4.7)$$

čia:  $\alpha_c$  – konvekcijos koeficientas, priimamas  $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;  $\theta_g$  – dujų temperatūra arti konstrukcijos elemento [ $^{\circ}\text{C}$ ] ;  $\theta_m$  – elemento paviršiaus temperatūra [ $^{\circ}\text{C}$ ] ;  $\phi$  – formos koeficientas ;  $\varepsilon_m$  – paviršiaus spinduliavimo koeficientas ;  $\varepsilon_f$  – ugnies spinduliavimo koeficientas ;  $\sigma$  – Stefano Boltmano konstanta, kuri lygi  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  ;  $\theta_r$  – efektyvioji gaisro aplinkos spinduliavimo temperatūra [ $^{\circ}\text{C}$ ].

#### 5. Lokalojo gaisro skaičiavimas, kai ugnies liepsnos pasiekia gaisro skyriaus lubas.

Šis skaičiavimo modelis, pagal Eurokodą 1, naudojamas kai gaisro skersmuo  $D \leq 10\text{m}$  ir šilumos išskyrimo sparta  $Q \leq 50\text{MW}$ . Šio modelio vaizdavimas pateikiamas 3pav.



**8 pav.** Skaičiavimo atvejis, kai ugnies šaltinis yra ant grindų, o ugnis apima lubų [4]

Šio modelio skaičiavimuose išskiriamos dvi bedimensinės šilumos išskyrimo spartos:

$$Q_H^* = Q / (1.11 \cdot 10^6 \cdot H^{2.5}) \quad (4.8)$$

$$Q_D^* = Q / (1.11 \cdot 10^6 \cdot D^{2.5}) \quad (4.9)$$

Horizontalus ugnies liepsnos ilgis  $L_h$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_h = (2.9H(Q_H^*)^{0.33}) - H \quad (4.10)$$

Tariamoji šilumos šaltinio vertikalioji padėtis  $z^1$  skaičiuojama:

$$z^1 = 2.4D(Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}), \text{ kai } Q_D^* < 1.0 \quad (4.11)$$

$$z^1 = 2.4D(1.0 - Q_D^{*2/5}), \text{ kai } Q_D^* \geq 1.0 \quad (4.12)$$

Jei priimama, kad  $r$  yra horizontalus atstumas nuo vertikalios liepsnos ašies iki nagrinėjamo taško lubų srityje, kuriame skaičiuojamas šiluminis srautas, tuomet bedimensinis dydis  $y$  yra santykinis atstumas, nuo tariamosios šilumos šaltinio vietos  $z^1$  iki to nagrinėjamo taško. Nagrinėjamas taškas yra veikiamas liepsnos, kai  $y < 1.0$ . Parametras  $y$  skaičiuojamas pagal formulę:

$$y = \frac{r + H + z^1}{L_h + H + z^1} \quad (4.13)$$

Galiausiai, šilumos srautas  $h$ , gaunamas lubų srityje nagrinėjamame taške skaičiuojamas taip:

$$\begin{aligned} h &= 100\,000, \text{ kai } y \leq 0.30 \\ h &= 136\,300 - 121\,000 \cdot y, \text{ kai } 0.30 < y \leq 1.0 \\ h &= 15\,000 \cdot y^{-3.7}, \text{ kai } y \geq 1.0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Pilnutinis šilumos neto srautas lubų srityje apskaičiuojamas pagal formulę:

$$h_{net} = h - \alpha_c(\theta_m - 20) + \phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_m + 273)^4 - (293)^4] \quad (4.15)$$

Formulės dedamųjų paaiškinimą žiūrėti formulėje (4.7)

## 5. TERMINĖ ANALIZĖ

### 5.1. Ugnies poveikis santvaroms

Siekiant sumažinti lakančiųjų konstrukcijų užimamą plotą ir padidinti naudingą pastato plotą, dažnai projektuojami didelių tarpatramių pastatai. Dėl savo paprastumo, laikomosios galios ir kainos santykio, plieninės santvaros turi platų panaudojimą didelių tarpatramių statiniuose, tokiuose kaip sandėliai, sporto arenos ar tiltai. Nors mažesniems statiniams dažnai naudojamos plokščiosios santvaros, tačiau dideli statiniai, tokie kaip sporto arenos, yra neišvairduojami be erdviųjų santvarų. Dažniausiai abiejų tipų santvarose naudojami vamzdinio profilio elementai, kurie pasižymi mažu savuoju svoriu, ekonomišku, atsparumu klupumui abejomis kryptimis.

Projektuojant santvaras tiek normalioje temperatūroje (20 °C), tiek gaisro scenarijaus metu, atitinkamas dėmesys turi būti skiriamas santvaros gniuždomiems spyriams, juostų elementams bei elementų jungimo mazgams, kuriuose dėl geometrinio nevientisumo, susidaro sudėtingas įtempių pasiskirstymas [11].

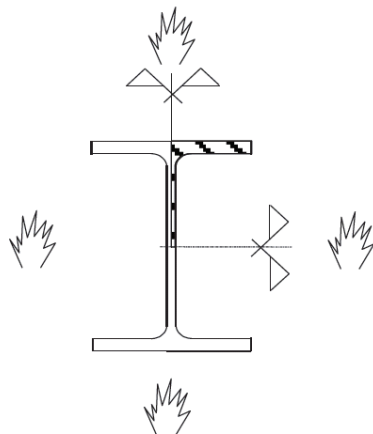
Eksperimentai su plieninėmis santvaromis, esančiomis normalioje temperatūroje, tačiau veikiamomis skirtingų seisminių, dinaminių ar kitų ypatingųjų poveikių, yra atliekami jau gana ilgą laiką. Siekiant ištirti pastato, su erdvine santvara, stogo griūtį, O. Caglayan`o ir E. Yuksel`io [12] atliktas eksperimentas parodė, kad dėl per didelės sniego apkrovos viršijusios projektuojamąją, santvaros mazgas buvo esminė griūties priežastis. Tuo tarpu A. Fülöp`o ir M. Iváno, [13] plataus masto santvarų stabilumo ir elastingumo tyrimo duomenys leidžia suprasti santvaros elgseną apkrovoms artėjant prie konstrukcijų saugos ribiniam būviui numatytų ribinių apkrovų ir jas viršijus. Šie tyrimai, ir daugelis kitų, turėjo teigiamą įtaką plieninių santvaros konstrukcijų projektavimui normaliomis temperatūros sąlygomis, leisdami įsigilinti į konstrukcijų mechanines savybes, veikiant skirtingiems veiksniams [14].

Vis dėlto mechaninės plieno savybės normalioje temperatūroje ir gaisro temperatūroje skiriasi kardinaliai. Todėl ugnies veikiamų santvarų tyrimai yra būtini ir ši problema šiomis dienomis yra vis labiau detalizuojama ir tiriama mokslininkų. Vienas pirmųjų realaus mastelio bandymų buvo Kardingtono (angl. Cardington) gaisro bandymas [15], kurio tikslas buvo ištirti visų statinio konstrukcijų elgesį realiomis gaisro sąlygomis. Šio eksperimento informaciją papildė A. S. Usmano, Y. C. Chungo ir J. L. Torero tyrimas [16], kuriuo buvo analizuojamos pasaulio prekybos centro (angl. *World Trade Centre*) griūties priežastys. J. C. Zhao ir Z. Y. Shen`o [17] atlikti trys plieninių rėmų veikiamų ugnies bandymai, esant skirtingoms temperatūrinėms apkrovoms, leido ištirti plieninių konstrukcijų atsparumą ugniai, tačiau šis, kaip ir daugelis kitų ankstyvųjų eksperimentų, buvo atlikti ugnies bandymų krosnyje, kurioje temperatūros pasiskirstymas gali skirtis nuo realaus gaisro. Tikslūs eksperimentai buvo atlikti praėjo dešimtmečio pradžioje [18 – 19], kuriais ištirta būtent santvarų elgsena gaisro metu. Taip pat E. Ozyurt`o ir Y. C. Wang`o atlikto bandymo [20] rezultatai parodė, kad siekiant nustatyti ugnies veikiamos plieninės santvaros elementų kritinę temperatūrą pagal Europos projektavimo normas, ši temperatūra realybėje gali būti mažesnė dėl atsirandančių deformacijų. Šie, ir daugybė kitų, gaisro eksperimentai ir tyrimai, sudarė patikimą duomenų bazę Europos projektavimo normoms ir šiandien statybos inžinieriams leidžia pasirinkti kiekvienai situacijai tinkamą ugnies veikiamų konstrukcijų projektavimo būdą.

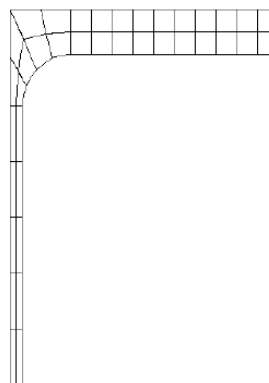


## 5.2. Temperatūrinių laukų nustatymas naudojant baigtinių elementų metodą

Franssen`as Jean-Marc ir Vila Real`is, P. knygoje [22] pateikiamas šilumos pasiskirstymo, profilyje HEB400, skaitmeninis modelis, kuriam pritaikyta ugnies apkrova pagal standartinę ugnies kreivę (pagal ISO 834). Ugnis veikia iš visų keturių pusių. Apkrovos schema ir baigtinių elementų tinklelis pateikiami 9-10 pav.

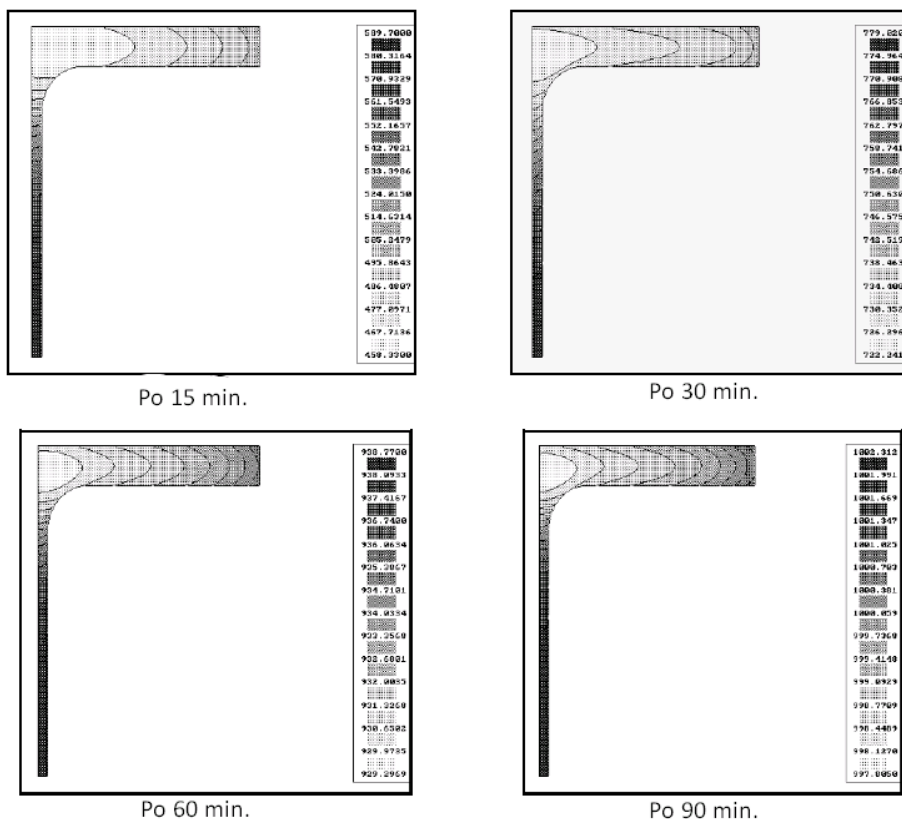


9 pav. Plieninė sija veikiama ugnies iš visų pusių [22]



10 pav. Baigtinių elementų tinklelis elemente [22]

Temperatūrinių laukų susidarymas po 15,30,60,90 minučių pateikiamas 11 pav.



11 pav. Temperatūriniai laukai, susidarę plieninėje sijoje HEB400, dėl ugnies poveikio [22]

Iš gautų rezultatų matoma, kad visose laiko atkarpose temperatūra plieniniame elemente pasiskirsčiusi beveik tolygiai. Didžiausias temperatūrų skirtumas yra 57 °C, tačiau galima teigti, kad šis skirtumas atsiranda dėl nevienodo elemento storio skerspjūvyje, o ne dėl netolygaus temperatūrų pasiskirstymo jame.

### 5.3. Masyvumo koeficientas

Temperatūros augimas, konstrukcijų elementuose, priklauso nuo elemento, veikiamo ugnies, masės ir paviršiaus ploto santykio. Lengvos konstrukcijos įkaista žymiai greičiau, lyginant su sunkiomis, tokiomis kaip kolonos sijos. Todėl, temperatūros augimo greitis elemente yra apibūdinamas kaip masyvumo koeficientas ( $A/V$  koeficientas), kuris apibrėžiamas, kaip elemento išorės ploto, veikiamo ugnies, santykis su elemento tūriu visame jo ilgyje.

Neapsaugotoms nuo ugnies konstrukcijoms, šis santykis gali būti užrašomas taip:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P \cdot l}{A \cdot l} = \frac{P}{A} [m^{-1}] \quad (5.1)$$

čia:  $P$  – element skerspjūvio perimetras;  $A$  – element skerspjūvio plotas;  $l$  – element ilgis.

Principiniai masyvumo koeficiento taikymai, neapsaugotiems ir apsaugotiems plieniniams elementas, pateikiami Eurokodo 3 [4] atitinkamai 4.2 ir 4.3 lentelėse.

Skerspjūvio plotas  $A$  visada yra priimamas plieninio elemento skerspjūvio plotui. Įkaistantis elemento perimetras  $A_m$  neapsaugotoje konstrukcijoje priklauso nuo skaičiaus plokštumų, kurios yra veikiamos ugnies. Perimetras  $A_p$ , naudojamas apsaugotosioms konstrukcijoms, priklauso taip pat nuo plokštumų pusių, veikiamų ugnies, bei nuo naudojamos apsauginės sistemos.

Taigi, gaisro metu, konstrukcijų elementai turintys žemą masyvumo koeficientą įkaista ženkliai lėčiau, nei turintys aukštą masyvumo koeficientą. Tai vaizduojama 12 pav.



12 pav. Masyvumo koeficiento įtaka ugnies veikiamam elementui

### 5.4. Ugnies veikiamo neapsaugoto plieninio profilio temperatūra

Projektuojant konstrukcijas supaprastintu metodu, LST EN 1993-1-2 pateikia plieninio elemento temperatūros pokyčio formulę. Priimant, kad temperatūros pasiskirstymas elemento ilgyje yra vienodas, tuomet neapsaugoto elemento temperatūros pokytis  $\Delta\theta_{a,t}$  laiko intervale  $\Delta t$  yra:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.2)$$

čia:  $k_{sh}$  - šešėlio poveikio pataisos koeficientas;  $A_m/V$  – masyvumo koeficientas;  $c_a$  – plieno savitoji šiluminė talpa pagal LST EN 1993-1-2 3 skyrių, [J/kgK];  $\rho_a$  – plieno tankis pagal LST EN 1993-1-2 3 skyrių, [kg/m<sup>3</sup>];  $h_{net,d}$  – skaičiuotinė grynojo šilumos srauto per ploto vienetą reikšmė, [W/m<sup>2</sup>];  $\Delta t$  – laiko intervalas, [s].

Skaičiuotinis grynasis šilumos srautas susideda iš konvekcinio ir spinduliavimo šilumos srautų:

$$h_{net,d} = h_{net,c} + h_{net,r} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5.3)$$

kai:

$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5.4)$$

čia:

$\alpha_c$  – šilumos perdavimo konvekcija koeficientas pagal LST EN 1991-1-2 arba 1 lentelę, [W/m<sup>2</sup>];

$\theta_g$  – dujų temperatūra arti ugnies veikiamo elemento pagal LST EN 1991-1-2 3 skyrių, [°C];

$\theta_m$  – elemento paviršiaus temperatūra, [°C].

$$h_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5.5)$$

čia:

$\Phi$  – formos koeficientas;

$\varepsilon_f$  – ugnies spinduliavimo koeficientas (dažniausiai  $\varepsilon_f = 1.0$ );

$\varepsilon_m$  – paviršiaus spinduliavimo koeficientas;

$\theta_r$  – efektyvioji gaisro aplinkos spinduliavimo temperatūra, [°C];

**1 lentelė.** Šilumos perdavimo konvekcijos būdu ir formos koeficientų reikšmės

Skiriančių elementų neveikiamų pusių koeficientai	$\alpha_c$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\Phi$
Spinduliavimo efektas įvertinamas atskirai	4	≠ 0
Spinduliavimo efektas įvertinamas kartu su konvekcija	9	= 0
<b>Paviršiai veikiami ugnies</b>		
Pagal vardinę ugnies kreivę (ISO 834)	25	≠ 0
Angliavandenilinio kreivė	50	≠ 0
Parametrinės kreivės, zoniniai ugnies modeliai	35	≠ 0

Formos koeficientas  $\Phi$  dažniausiai priimamas lygus 1, kai grynasis šilumos srautas skaičiuojamas visiškai ugnies apimtam elementui. Šis koeficientas gali būti priimamas mažesnis nei 1, kai ugnies židiny yra lokalizuotas, ugnis neapima skaičiuojamo elemento, o šiluma perduodama tik spinduliuojamu šilumos srautu. Tokiu atveju, jei skaičiuojamasis elementas yra įgaubtos formos, turi būti įvertinamas šešėlio efektas (13 pav.)



**13 pav.** Skerspjūvio įtaka šešėlio efekto susidarymui

Išgaubto skerspjūvio elementams (kvadratinio ar stačiakampio profilio elementams) pilnai apimtiems ugnies, šešėlio efektas neturi jokios įtakos, todėl pataisos koeficientas  $k_{sh} = 1.0$ .

Projektuojant dvitėjo profilio skerspjūvio elementus veikiamus ugnies, šešėlio efekto pataisos koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$k_{sh} = 0.9 \cdot [A_m/V]_b / [A_m/V] \quad (5.6)$$

čia:  $[A_m/V]_b$  – dėžinio masyvumo koeficiento reikšmė, pateikiama 2 lentelėje.

Visų kitų skerspjūvių elementams veikiamiems ugnies, šešėlio efekto pataisos koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$k_{sh} = [A_m/V]_b / [A_m/V] \quad (5.7)$$

Ignoruoiant šešėlio efektą, t.y.  $k_{sh} = 1.0$ , projektavimas atliekamas su didesne atsarga.

**2 lentelė.** Dėžinio masyvumo koeficiento reikšmės

Schema	Dėžinio masyvumo koeficiento $[A_m/V]_b$ vertės
	$2(b+h)$ Elemento skerspjūvio plotas

	$2h+b$ <hr/> Elemento skerspjūvio plotas
	$a+b+c \text{ (dėžinis perimetras)}$ <hr/> Elemento skerspjūvio plotas

### 5.5. Ugnies veikiamo apsaugoto plieninio profilio temperatūra

Plieninių konstrukcijų apsauga nuo ugnies yra neatsiejama projektuojant konstrukcijas, kurių atsparumas ugniai yra aukštesnis nei 30 minučių. Praktikoje naudojamos kelios apsaugos nuo ugnies sistemos:

- purškiamą apsauga (angl. sprays);
- plokštės (angl. boards);
- išsiplečiantys dažai (angl. intumescent paint).

Eurokode LST EN 1993-1-2 pateikiamas skaičiavimas įvertinantis temperatūros augimą nuo ugnies apsaugoto plieninio elemento skerspjūvyje. Priimant tolygų temperatūros pasiskirstymą elemente, temperatūros prieaugis  $\Delta\theta_{a,t}$  nuo ugnies apsaugoto elemento skerspjūvyje, laiko intervale  $\Delta t$  skaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\frac{\phi}{3}} - 1) \Delta\theta_{g,t} \text{ [} ^\circ\text{C]} \quad (5.8)$$

taip pat, turi tenkinti sąlygą:

$$\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ jeigu } \Delta\theta_{g,t} > 0$$

čia:

$$\phi = \frac{d_p c_p \rho_p}{c_a \rho_a} * \frac{A_p}{V} \quad (5.9)$$

$A_p/V$  – apsaugos nuo gaisro medžiaga izoliuotų plieninių konstrukcijų masyvumo koeficientas, pagal LST EN 1993-1-2 4.3 lentelę;

$\lambda_p$  – apsaugos nuo gaisro sistemos šilumos laidis, [W/mK];

$d_p$  – apsaugos nuo gaisro medžiagos storis, [m];

$c_p$  – nuo temperatūros nepriklausanti apsaugos nuo gaisro medžiagos savitoji šiluminė talpa, [J/kgK];

$c_a$  – nuo temperatūros priklausanti plieno savitoji šiluminė talpa, pagal LST EN 1993-1-2 3 skyrių, [J/kgK];

$\rho_a$  – plieno tankis, 7850 [kg/m<sup>3</sup>];

$\rho_p$  – apsaugos nuo gaisro medžiagos tankis, [kg/m<sup>3</sup>];

$\theta_{a,t}$  – plieno temperatūra laiko momentu  $t$ , [°C];

$\theta_{g,t}$  – supančiųjų dujų temperatūra laiko momentu  $t$ , [°C];

$\Delta\theta_{g,t}$  – supančiųjų dujų temperatūros pakilimas per laiko tarpą  $\Delta t$ , [K];

$\Delta t$  – laiko intervalas, [s].

Lygtis (5.5.1) yra apytikslė ir gali būti naudojama tik su žemomis  $\phi$  vertėmis. Remiantis Jean-Marc, F., Vila Real, P. (2015) šis koeficientas neturi būti didesnis nei 1.5.

Apsaugos nuo gaisro medžiagų terminės savybės yra nustatomos eksperimentiškai. Pagal Europos standartus, bandymai turi būti atliekami su apkrautomis ir neapkrautomis sijomis bei neapkrautomis kolonomis. Eksperimentuose naudojami bandiniai su įvairiais masyvumo koeficientais bei skirtingais apsauginės medžiagos storiais. Šie bandiniai veikiami ugnies pagal standartinę gaisro kreivę. Apsaugos nuo gaisro medžiagos šilumos laidumas apskaičiuojama remiantis bandymų metu gautais plieninio elemento temperatūros rezultatais. Apsauginės medžiagos tankis ir savitoji šiluminė talpa turi būti pateikiama gamintojo šios medžiagos techninėse specifikacijose. Medžiagos savitoji šiluminė talpa gali būti priimama 1000 J/kgK, jei ji yra nežinoma.

## 6. MECHANINĖ ANALIZĖ

### 6.1. Mechaninė apkrova konstrukcijoms gaisro metu

Projektuojant konstrukcijas normalioje temperatūroje privaloma įvertinti skirtingas apkrovų kombinacijas, kurios gali veikti vienu metu. Skirtingos kombinacijos yra įvertinamos saugos ir tinkamumo ribiniams būviams. Atsiradus gaisro tikimybei, kombinacijose privalo įvertinti ir ši dedamąjį. Kadangi gaisro tikimybė yra sąlyginai maža, o griūtis tikimybė aukštesnė nei norminėje temperatūroje, todėl gaisro apkrovoms sudaromos atskiros kombinacijos, su žemesniais atsargos koeficientais.

Gaisras, pagal Eurokodą LST EN 1990 [21], yra kvalifikuojamas kaip ypatingasis poveikis, o kombinacija išreiškiama pagal vieną iš formulių žemiau:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.1)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.2)$$

čia:  $G_{k,j}$  – nuolatinė apkrova;  $P$  – išankstinio įtempimo apkrova;  $A_d$  – ypatingasis poveikis (smūgis, gaisro metu atsirandantys įtempiai dėl konstrukcijos plėtimosi);  $Q$  – kintančios apkrovos (vyraujantis ir antraeilė);  $\Psi$  – daliniai apkrovų koeficientai (pagal [21] A1.1 lentelę).

Skirtumas tarp formulių (6.1) ir (6.2) glūdi daliniuose apkrovų koeficientuose, kurie taikomi kintamoms apkrovoms. Koeficientas  $\Psi_1$  naudojamas dažniam deriniui, o  $\Psi_2$  – tariamai nuolatiniam. Viena iš kombinacijų pasirenkama atsižvelgiant į ypatingąją situaciją, t.y. smūgis, gaisras, konstrukcijų išlikimas po ypatingojo įvykio. Kai vyraujanti apkrova yra vėjas, rekomenduojama rinktis dažninį derinį ( formulė (6.2)), nes tariamai nuolatinio derinio vėjo dalinis koeficientas – 0, todėl vėjas yra nevertinamas visiškai.

Kintamos apkrovos, atsirandančios vykdant pramonines operacijas, neturi būti vertinami ypatingajame derinyje, nes gaisro metu jos privalo būti nutrauktos. Atskirais atvejais, kuomet šių operacijų neįmanoma nutraukti tam tikrą laiką, kombinacijose jos turi būti įvertinamos.

### 6.2. Apkrovų supaprastinimas

Franssen`o J.M. ir Vila Real`io, P. knygoje [22] teigiama, kad atvejais, kuomet konstrukcijose dėl gaisro scenarijaus neatsiranda netiesioginių ugnies poveikių, mechaninė apkrova pagal formulę (6.1) ar (6.2.) yra pastovi viso gaisro metu. Tai reiškia, kad priimta derinio apkrova laiko momentu  $t = 0$  nekinta gaisro metu ir išlieka pastovi.

Šioje knygoje [22] taip pat pateikiamas Eurokodo 1 [6] supaprastinimas, kuris leidžia įvertinti ugnies sukiamą poveikį konstrukcijoms, jį įtraukiant į kiekvieną kombinaciją, skirtą skaičiuoti normalioje temperatūroje. Gaisro scenarijaus apkrova, kiekvienos kombinacijos metu, gaunama padauginus kombinacijos apkrovą ir pataisos koeficientą:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d \quad (6.3)$$

čia:  $E_{fi,d,t}$  – apkrova gaisro scenarijaus metu;  $\eta_{fi}$  – pataisos koeficientas;  $E_d$  – apkrova normalioje temperatūroje.

Pagal Eurokodą 3 [4] pataisos koeficientas  $\eta_{fi}$  gali būti išreikštas taip:

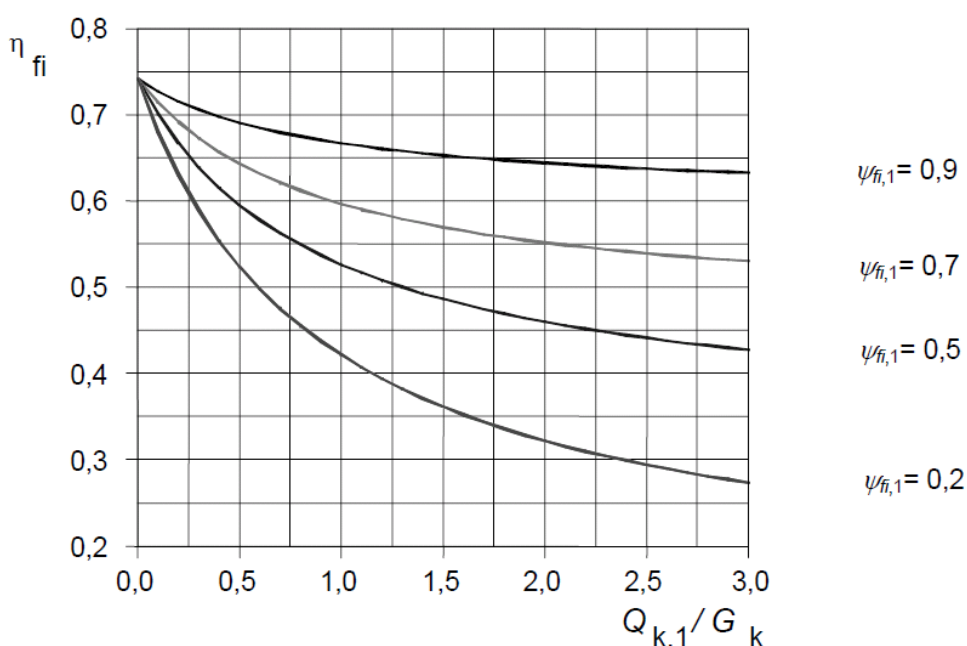
$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (6.4)$$

čia:  $G_k$  – nuolatinųjų apkrovų suma;  $\gamma_G$  ir  $\gamma_{Q,1}$  – daliniai saugos koeficientai;  $\Psi_{fi}$  – dalinis apkrovų koeficientas, priimamas  $\Psi_1$  arba  $\Psi_2$ , atitinkamai pagal pasirinktą kombinaciją.

Pataisos koeficientą  $\eta_{fi}$  galima naudoti tik tuo atveju, kai konstrukciją veikia viena kintanti apkrova, o kintančios apkrovos ir nuolatinės apkrovos kryptis sutampa, t.y. abi apkrovos yra nepalankios.

Gaisro poveikį galima dar labiau supaprastinti priimant, kad konstrukcijas veikia tik nuolatinės apkrovos. Tuomet pataisos koeficientą, kai  $\gamma_G = 1,35$  (Eurokodas 1), galima skaičiuoti  $\eta_{fi} = 1/1,35 = 0,74$ . Siekiant užtikrinti didesnę patikimumą, Eurokodas 3 [4] rekomenduoja priimti  $\eta_{fi} = 0,65$ .

Priklausomai nuo dalinio apkrovų koeficiento  $\Psi_{fi}$ , pataisos koeficientas  $\eta_{fi}$  gali būti priimamas pagal LST EN 1993-1-2 (2.1 paveikslą) [4], kuri pateikiamas žemiau.



14 pav. Pataisos koeficiento  $\eta_{fi}$  ir apkrovų santykio  $Q_{k,1}/G_k$  sąryšis [4]

### 6.3. Skerspjūvių klasifikavimas

Šio klasifikavimo tikslas, pagal LST EN 1993-1-1, yra nustatyti, kiek skerspjūvių laikomąją ir sukamąją galią riboja jų vienetinė klumpamoji galia.

Skerspjūvių klasifikavimas normalioje kambario temperatūroje pateikiamas LST EN 1993-1-1 5.5 ir 5.6 skyriuose.



Skerspjūvių klasifikavimas aukštesnėje temperatūroje pagal supaprastintas taisykles gali būti klasifikuojamas kaip ir projektuojant normaliajai temperatūrai, kai sumažintoji  $\varepsilon$  reikšmė apskaičiuojama pagal (6.5) formulę [4]:

$$\varepsilon = 0.85[235/f_y]^{0.5} \quad (6.5)$$

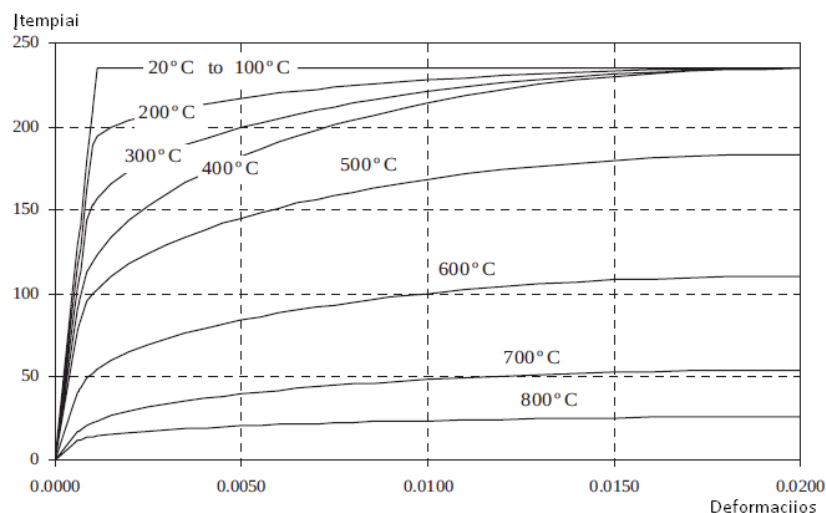
čia:

$f_y$  – stipris pagal takumo ribą 20 °C temperatūroje;

0.85 – pataisos koeficientas, įvertinantis kylančios temperatūros poveikį.

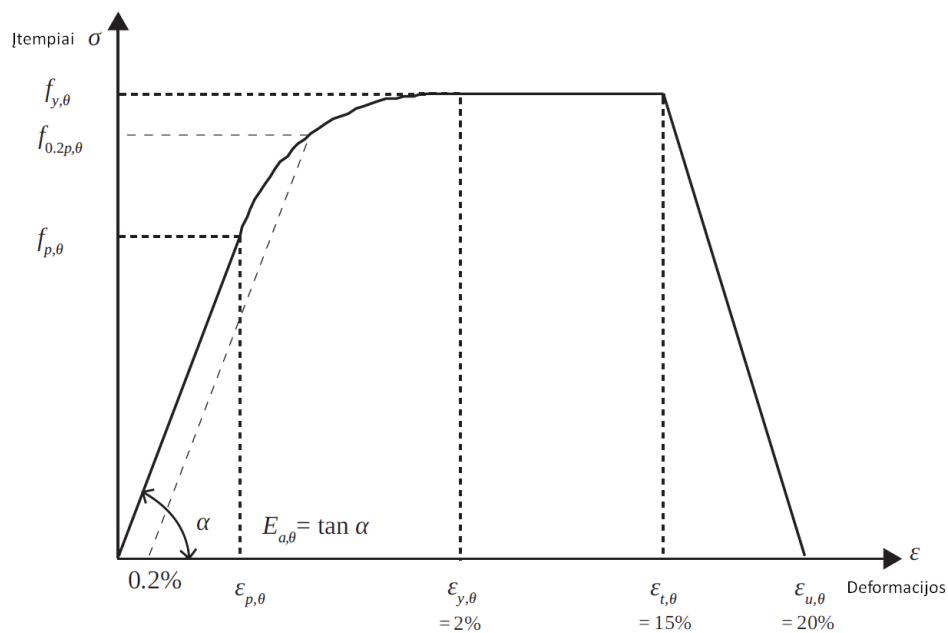
#### 6.4. Mechaninės plieno savybės

Plieno stipris ženkliai sumažėja pasiekus 400 °C temperatūrą. Pav. 15 pateikiamas plieno, kurio klasė S235, stipris, kuris nurodomas kaip įtempių ir deformacijų priklausomybė atitinkamoje aukštoje temperatūroje. Ši diagrama taip pat rodo, kad didėjant temperatūrai plieno standumas mažėja. Esant aukštai plieno temperatūrai, įtempių ir deformacijų diagramos forma keičiasi lyginant su plieno, esančio kambario temperatūroje. Vietoje įprasto tiesiškai plastiško elgesio plieniui esant kambario temperatūroje, esant aukštai temperatūrai Eurokode EN 1993-1-2 rekomenduojama priimti elastiškai plastinę elgseną, kuri pasižymi elipsės forma. Išsamesni šios elgsenos aspektai pateikti 16 pav. Daugiau informacijos apie S235, S275 ir S355 plieno įtempių ir deformacijų priklausomybę pateikiama Eurokodo EN 1993-1-2 C priede.



**15 pav.** Plieno S235 įtempių ir deformacijų priklausomybės grafikas, priklausomai nuo jo temperatūros [22]

Vyraujant ypatingiesiems poveikiams, tokiems kaip gaisras, atsirandantys didesni įtempiai elementų viduje yra priimtini. Dėl šios priežasties Eurokode 3 rekomenduojama priimti plieno stiprį pagal takumo ribą atitinkančią 2% santykinės deformacijos, vietoj konservatyvesnės 0,2% santykinės deformacijos (16 pav.) Tačiau, reikia pabrėžti, kad elementams, kurių skerspjūvio klasė – 4, EN 1993-1-2 rekomenduojama plieno stiprį pagal takumo ribą priimti remiantis 0,2% santykinės deformacijos.



**16 pav.** Anglinojo plieno įtempių ir santykinų deformacijų sąryšis aukštesnėje temperatūroje [22]

Plieno įtempių ir santykinų deformacijų sąryšis aukštesnėje temperatūroje (16p pav.) yra apibrėžiamas trim parametrais:

- $f_{p,\theta}$  – proporcingumo riba;
- $f_{y,\theta}$  – efektyvusis stipris pagal takumo ribą;
- $E_{a,\theta}$  – tamprumo modulis.

Skaičiuotinės mechaninės plieno savybės (stiprumas ir deformacijos), veikiant ugnies apkrovoms, vadovaujantis EN 1993-1-2 nustatomos pagal šią formulę:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} X_k / \gamma_{M,fi} \quad (6.6)$$

čia:

$k_{\theta}$  – plieno mechanines savybes mažinantis koeficientas, priklausantis nuo medžiagos vidinės temperatūros ( $X_{k,\theta}/X_k$ );

$X_k$  – skaičiuotinės plieno mechaninės savybės ( $f_k$  arba  $E_k$ ), priimamos pagal EN 1993-1-1 normalioje kambario temperatūroje;

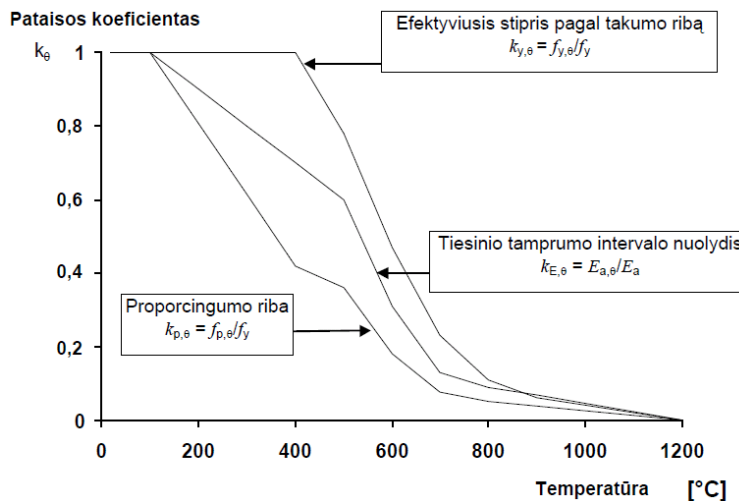
$\gamma_{M,fi}$  – dalinis atitinkamos medžiagos savybės saugos koeficientas, naudojamas gaisro scenarijaus metu.

3 lentelėje pateikiami anglinojo plieno įtempių ir deformacijų sąryšio aukštesnėje temperatūroje pataisos koeficientai, o 17 pav. šie koeficientai pavaizduojami grafiškai.

**3 lentelė.** Anglingojo plieno įtempių ir deformacijų sąryšio aukštesnėje temperatūroje pataisos koeficientai [LST\_EN 1993-1-2, E3.1 lentelė]

Plieno temperatūra $\theta_a$	Pataisos koeficientai temperatūroje $\theta_a$ , palyginti su $f_y$ arba $E_a$ reikšmėmis 20 °C temperatūroje		
	Efektinio stiprio pagal takumo ribą pataisos koeficientas (palyginti su $f_y$ ) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Proporcingumo ribos pataisos koeficientas (palyginti su $f_y$ ) $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Tamprumo modulio (tiesinio tamprumo intervalo nuolydžio) pataisos koeficientas (palyginti su $E_a$ ) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

PASTABA Koeficientams pagal tarpines plieno temperatūros reikšmes nustatyti gali būti taikoma tiesinė interpoliacija.



**17 pav.** Anglingojo plieno įtempių ir deformacijų sąryšio aukštesnėje temperatūroje pataisos koeficientai [LST\_EN 1993-1-2, 3.2 pav.]

Iš 3 lentelėje pateiktų duomenų matoma, kad anglingasis plienas pradeda prarasti savo stiprį pasiekus 400 °C. Pasiekus 700 °C, plieno liekamasis stipris yra tik 23% lyginant su kambario temperatūros plienu, o pasiekus 800 °C – liekamasis stipris siekia vos 11%. Tamprumo modulis pradeda mažėti dar anksčiau – pasiekus 100 °C.

## 6.5. Elemento skerspjūvio kritinė temperatūra

Žinant  $k_{y,\theta}$  mažinančio koeficiento vertę, kritinė elemento skerspjūvio temperatūra  $\theta_{a,cr}$  gali būti nustatoma interpoliuojant 3 lentelėje pateiktus duomenis arba panaudojant formulę:

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 k_{y,\theta}^{3.833}} - 1 \right] + 482 \quad (6.7)$$

Eurokode 3 [4] pateikiama tokia pat formulė, bet vietoje mažinančio koeficiento  $k_{y,\theta}$ , formulėje pateikiamas išnaudojimo koeficientas  $\mu_0$ . Ši formulė pateikiama žemiau:

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 \quad (6.8)$$

čia  $\mu_0$  negali būti mažesnis nei 0,013.

Elementams, kurių skerspjūvio klasės yra 1, 2,3 ir visiems elementams kurie yra tempiami, išnaudojimo koeficientas  $\mu_0$  laiko momentu  $t = 0$ , t.y. normalioje temperatūroje, yra lygus:

$$\mu_0 = \frac{E_{f,i,d}}{R_{f,i,d,0}} \quad (6.9)$$

Šis skaičiavimas gali būti naudojamas tik tais atvejais, kai skerspjūvio laikomoji galia gaisro atveju tiesiogiai priklauso nuo efektyviojo stiprio pagal takumo ribą, t.y. skaičiuojant tempiamus elementus arba elementus, kurių skersinis sukamasis klupumas nėra galimas irties pobūdis [4].

## 7. TYRIMO ANALIZĖ

### 7.1. Bendra informacija

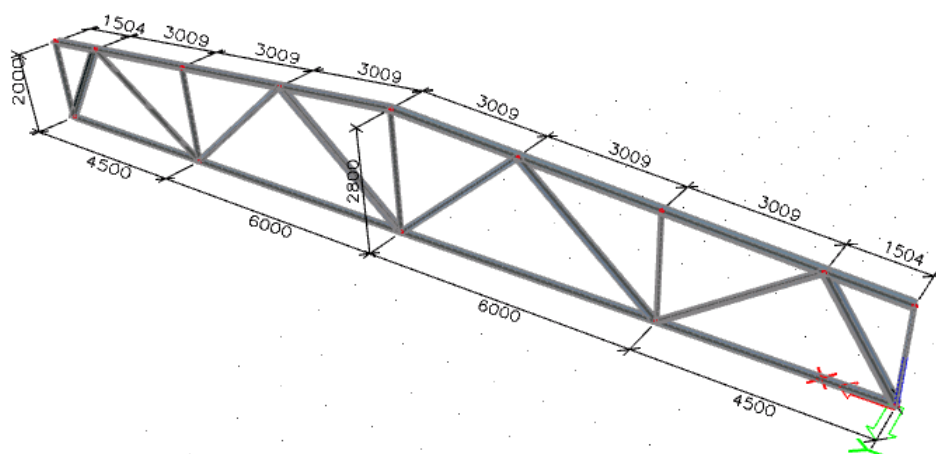
Šiame skyriuje pristatoma statinio konstrukcijos tiriamoji analizė atliekama plieninėms stogo laikančiosioms konstrukcijoms.

Analizuojamas esamas vieno aukšto sandėliavimo paskirties statinys, kuriame yra atliekami rekonstrukcijos darbai. Esamo pastato gabaritiniai matmenys tarp ašių – 42 m x 21 m. Aukščiausia pastato altitudė - +10.000 m nuo nulinės altitudės. Pastato sienos – gelžbetoninės surenkamos, grindys bei kolonos – gelžbetoninės, stogo laikanti konstrukcija – plieninės santvaros, ant santvarų remiamos gelžbetoninės stogo plokštės ant kurių įrengtas stogo apšiltinimas bei prilydyta stogo danga.

Rekonstrukcijos metu, dėl prastos fizinės būklės, stogo danga bei gelžbetoninės stogo plokštės numontuojamos. Numatoma nauja stogo danga – daugiasluoksnės stogo plokštės. Atliekant esamų santvarų ekspertizę, nustatyta, kad sniego apkrovų sukeltos įrašos, pagal šiandienines projektavimo normas – Eurokodą ir STR, ženkliai viršija esamų santvarų laikomąją gebą. Projektavimo metu numatomas esamų santvarų sustiprinimas privirinant papildomus L formos skerspjūvio profilius. Pagrindinės silpnosios vietos – gniuždomieji santvaros spyriai.

Rekonstruoto statinio schema nekinta. Santvaros tarpatramis – 21 metras. Santvaros išdėstomos kas 6m, tarp santvarų paliekami esami ryšiai. Santvara prie ant kolonų remiama šarnyriškai, santvaros ryšiai prie juosto tvirtinami šarnyriškai. Ant santvaros įrengiami plieniniai ilginiai, kurie, kaip ir anksčiau, perduoda taškinę apkrovą į santvaros viršutinės juostos mazgus. Ant stogo ilginių montuojamos stogo daugiasluoksnės plokštės. Santvaros skaičiuojamoji schema pateikiama 1 priede.

Rekonstruojamo pastato dalyje numatoma sandėliuoti degias medžiagas, tokias kaip popierius, kartonas bei smulkinta mediena. Numatomas degių medžiagų kiekis – 20 t ugniasiene atskirtoje statinio dalyje. Užsakovo pageidavimu, konstrukcijos turi išlaikyti apkrovas gaisro metu ilgiau nei 45min pagal vardines temperatūros ir laiko kreives arba ilgiau nei 60 min pagal parametrines temperatūros ir laiko kreives ar natūralų gaisro scenarijų.



18 pav. Analizuojamos santvaros konstrukcinė schema

## 7.2. Apkrovos ir deriniai

Stogo santvara apkraunama dvejų tipų apkrovomis – nuolatinė (plieniniai ilginiai, daugiasluoksnės stogo plokštės) ir kintanti sniego apkrova. Vėjo sukelta apkrova nevertinama, dėl teigiamo poveikio konstrukcijoms. Apkrovos pateikiamos 4 lentelėje.

**4 lentelė.** Stogo santvarą veikiančios apkrovos.

Nr.	Pavadinimas	Svoris, kg/m <sup>2</sup> arba kg/m	Charakteristinė apkrova, kN/m <sup>2</sup>	Charakteristinė apkrova į santvaros viršutinės juostos mazgą, kN
1	Daugiasluoksnės stogo plokštės, h=100mm	18,80	0,188	3,384
2	Stogo ilginiai, UPN140	16,00	-	0,960
3	Technologinė apkrova luboms	12,00	0,120	2,160
	<b>Nuolatinė charakteristinė apkrova, G<sub>k</sub></b>			<b>6,504</b>
4	Sniego apkrova (I sniego rajonas)	-	1,200	21,600
	<b>Kintama charakteristinė apkrova, Q<sub>k</sub></b>			<b>21,600</b>

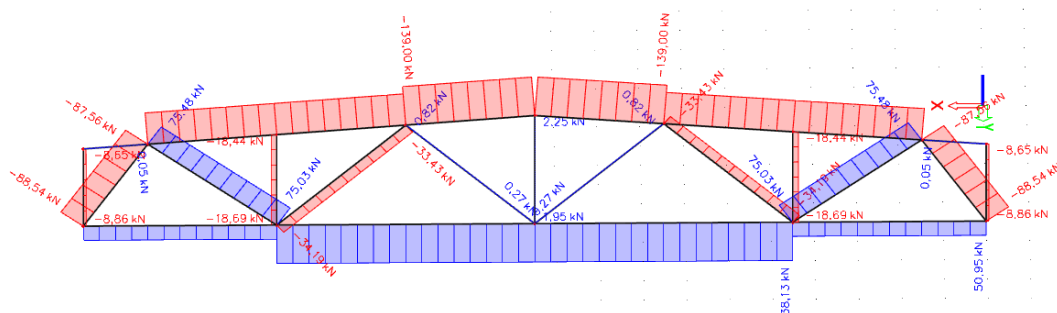
Apkrovų derinys gaisro scenarijui sudaromas naudojant (6.1) formulę. Pritaikius šią formulę nagrinėjamam statiniui, apkrovų derinys pateikiamas žemiau:

$$G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1} \quad (7.1)$$

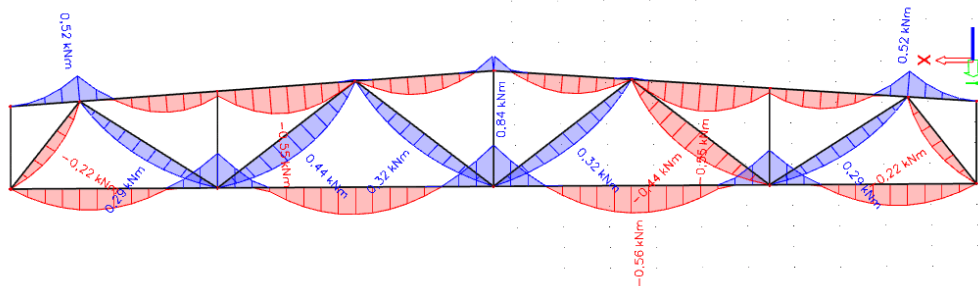
čia:  $G_k$  – nuolatinė charakteristinė apkrova;  $Q_{k,1}$  – kintama charakteristinė apkrova (šio tyrimo metu – sniegas);  $\Psi_{1,1}$  – apkrovos pataisos koeficientas (sniego apkrovai – 0,5).

Analizė atliekama 2D santvaros rėmui, kurį pirmiausia apkraunama nuolatinėmis apkrovomis, o tada nuolatinėmis ir kintamomis. Atvejis, kuomet vėjas pastatą veikia statmenai rėmo plokštumai neanalizuojamas, nes vėjo sukeltas deformacijas perima gelžbetoninės kolonos bei stogo plokštumoje esantys horizontalūs ryšiai.

Skaičiavimai atliekami *SCIA Engineering* kompiuterine programa. 16 pav. vaizduojamas ašinių jėgų pasiskirstymas santvaros elementuose, o 17 pav. – lenkimo momentų pasiskirstymas.



**19 pav.** Ašinių jėgų pasiskirstymas santvaros elementuose, kN



20 pav. Lenkimo momentų pasiskirstymas santvaros elementuose, kNm

Didžiausios atsirandančios įrašos santvaros elementuose, priklausomai nuo elemento skerspjūvio, pateikiamos 5 lentelėje.

5 lentelė. Įrašos santvaros elementuose („-“ – gniuždomas elementas)

Elemento profilis	Įrašos		
	Ašinė jėga N, kN	Lenkimo momentas M, kNm	Skersinė jėga V, kN
2*L130x12	-139,00	0,04	0,61
	-112,86	0,52	0,90
2*L100x10	138,13	0,84	-0,91
4*L60x6 – I formos	0,82	0,00	-0,32
	0,55	0,32	0,00
4*L60x6 – X formos	75,48	0,00	-0,32
	75,23	0,29	0,04
2*L60x6	-18,69	0,00	0,00
	-18,44	0,00	0,00

### 7.3. Ugnies poveikis remiantis vardinėmis temperatūros ir laiko kreivėmis

#### 7.3.1. Temperatūriniai poveikiai

Norit apskaičiuoti plieno temperatūra, privaloma įvertinti profilių masyvumo koeficientą. Kadangi santvara sudaryta iš L skerspjūvio profilių, kuriuose gali atsirasti šešėlio poveikis. Šis poveikis gali būti įvertinamas pataisos koeficientu pagal (5.7) formulę, kuomet ugnis pilnai neapima plieninių elementų.

Plieninių elementų masyvumo koeficientai, šešėlio poveikio pataisos koeficientai bei temperatūros praėjus 45 minutėms po gaisro pradžios, projektuojant pagal vardinę temperatūros ir laiko kreivę, apskaičiuotos SCIA Engineering kompiuterine programa (pateikiama 6 lentelėje).

**6 lentelė.** Santvarą sudarančių plieninių profilių temperatūrinių poveikių reikšmės gautos skaičiuojant kompiuterine programa

Profilis	Masyvumo koeficientas [m <sup>-1</sup> ]	Šešėlio poveikio pataisos koeficientas	Elementų vidaus temperatūra po 45min. [°C]
(1)	(2)	(3)	(4)
2*L130x12	169,45	0,78	893,85
2*L100x10	203,39	0,78	895,55
4*L60x6 – I formos	337,34	0,56	896,70
4*L60x6 – X formos	337,34	0,55	896,58
2*L60x6	337,34	0,79	898,49

Plieninių elementų masyvumo koeficientai, šešėlio poveikio pataisos koeficientai bei temperatūros praėjus 45 minutėms po gaisro pradžios, projektuojant pagal vardinę temperatūros ir laiko kreivę, apskaičiuotos *rankiniu būdu* (pateikiama 7 lentelėje). Rankiniu būdu apskaičiuojamos tik pagrindinių santvaros elementų (viršutinės ir apatinės juostų) charakteristikos.

**7 lentelė.** Santvarą sudarančių plieninių profilių temperatūrinių poveikių reikšmės gautos skaičiuojant rankiniu būdu

Profilis	Masyvumo koeficientas [m <sup>-1</sup> ]	Šešėlio poveikio pataisos koeficientas	Elementų vidaus temperatūra po 45min. [°C]
(1)	(2)	(3)	(4)
2*L130x12	166,667	0,775	893,856
2*L100x10	200	0,756	895,346

### 7.3.2. Konstrukcijų skaičiavimas

*7.3.2.1. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų atsparumas ugniai naudojant vardines temperatūros ir laiko kreives*

Turint santvaros elementų vidaus temperatūrą (6 ir 7 lentelės) atitinkamu laiko momentu, plieno stiprį pagal takumo ribą ir tamprumo modulį atitinkamoje aukštoje temperatūroje nesunkiai galima apskaičiuoti pagal EN 1993-1-2 3.1 lentelę.

Tyrimo metu kompiuterine programa atliktos, nuo ugnies neapsaugotų santvaros elementų, mechaninės analizės duomenys pateikti 8 lentelėje.

**8 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>p</sub> , min
2*L130x12	-138,96	643,42	15,85
2*L100x10	138,13	729,84	20,53
4*L60x6 – I formos	0,55	1090,53	159,37
4*L60x6 – X formos	75,28	777,09	25,25
2*L60x6	-18,69	683,75	13,67



Tyrimo metu rankiniu būdu atliktos, nuo ugnies neapsaugotų santvaros elementų, mechaninės analizės duomenys pateikti 9 lentelėje.

**9 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>f</sub> , min
2*L130x12	-138,96	594,76	14,05
2*L100x10	138,13	764,87	25,80

Iš gautų rezultatų galima teigti, kad kompiuterine programa ir rankiniu būdu apskaičiuoti elementų mechaninės analizės duomenys skiriasi, tačiau neženkiai. Atlikus skaičiavimus abiem atvejais, remiantis vardinėmis temperatūros ir laiko kreivėmis, paaiškėjo, kad nuo ugnies neapsaugota santvara netenkina jai keliamų reikalavimų. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros atsparumas ugniai išlieka 14 min nuo gaisro pradžios, kuomet spyriai, kurių skerspjūvis 2vnt. L60x6, ir viršutinė juosta, kurių skerspjūvis 2vnt. L130x12, praranda laikomąją galia.

Konstrukcija turi būti stiprinama papildomais plieniniais profiliais, padengiama priešgaisrine danga arba atskiriama priešgaisrine užtvara nuo galimų ugnies šaltinių. Siekiant sutaupyti patalpos tūrį, priimama santvarą padengti priešgaisrine danga.

*7.3.2.2. Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų atsparumas ugniai naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreives*

Konstrukcijoms apsaugoti nuo ugnies naudojamas purškiamasis priešgaisrinis sluoksnis – PROMASPRAY-P300. Ši priešgaisrinė danga yra gaminama iš vermikulito ir gipso.

Priešgaisrinės dangos charakteristikos:

- tankis:  $\rho = 310 \text{ kg/m}^3$ ;
- šilumos laidumas:  $0,078 \text{ W/mK}$ ;
- specifinė šiluma:  $1,0 \text{ J/gK}$ ;
- priešgaisrinės medžiagos padengiamas storis:  $8,0 \text{ mm}$  – minimalus leistinas storis.

Tyrimo metu kompiuterine programa atliktos, nuo ugnies apsaugotų santvaros elementų, mechaninės analizės duomenys pateikti 10 lentelėje.

**10 lentelė.** Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Elementų vidaus temperatūra po 45min [°C]	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>f</sub> , min
2*L130x12	-138,96	494,73	643,42	69,30
2*L100x10	138,13	539,78	729,84	82,63
4*L60x6 – I formos	0,55	655,84	1090,53	191,42
4*L60x6 – X formos	75,28	655,84	777,09	75,27
2*L60x6	-18,69	655,84	683,75	49,17

Tyrimo metu rankiniu būdu atliktos, nuo ugnies apsaugotų santvaros elementų, mechaninės analizės duomenys pateikti 11 lentelėje.

**11 lentelė.** Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant vardinę temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Elementų vidaus temperatūra po 45min [°C]	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>f</sub> , min
2*L130x12	-138,96	488,25	594,76	61,50
2*L100x10	138,13	532,56	764,87	103,70

Atlikus skaičiavimus abiem atvejais, apsaugojus konstrukciją minimaliu apsauginiu sluoksniu (8mm), santvaros elementai tenkina jai keliamus reikalavimus. Mažiausią laikomąją galią turi santvaros spyriai 2vnt. L60x6, tačiau atsparumas ugniai viršija 45 min.

## 7.4. Ugnies poveikis remiantis natūralaus gaisro kreivėmis

### 7.4.1. Temperatūriniai poveikiai

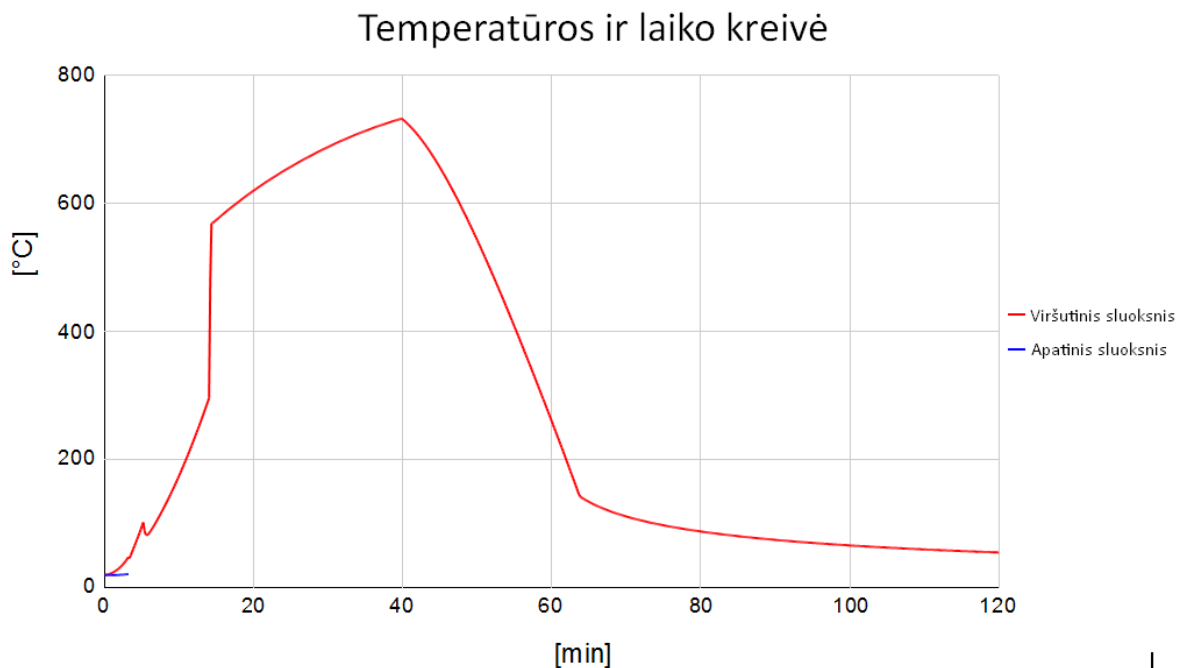
Pastatas klasifikuojamas kaip sandėliavimo paskirties, kuriame bus sandėliuojamos degios medžiagos, tokios kaip popierius, kartonas bei smulkinta mediena. Apskaičiuavus charakteristinę gaisro apkrovą, gautas rezultatas yra artimas LST\_EN 1991-1-2 E.4 lentelėje pateiktai tipinei bibliotekos patalpų gaisro apkrovai, todėl skaičiavimai bus atliekami naudojant būtent šių patalpų gaisro apkrovas bei gaisro augimo spartą (remiantis LST\_EN 1991-1-2 E.5 lentele).

Siekiant suprojektuoti konstrukcijas remiantis natūralaus gaisro kreivėmis, priimami tokie pastato parametrai:

- Grindys: Gelžbetoninės.
- Stogo danga: Daugiasluoksnės stogo plokštės.
- Sienos: Gelžbetoninės.
- Gaisro charakteristikos:
  - Charakteristinis gaisro apkrovos tankis:  $q_{f,k} = 1824 \text{ MJ}/\text{m}^2$ , (LST\_EN 1991-1-2 E.4 lentelė, biblioteka);
  - Gaisro augimo sparta: Didelė, (LST\_EN 1991-1-2 E.5 lentelė, biblioteka);
  - $RHR_f = 500 \text{ kW}/\text{m}^2$ , (LST\_EN 1991-1-2 E.5 lentelė, biblioteka);
  - Grindų plotas:  $A_f = 12,4 * 12,4 = 153,76\text{m}^2$ ;
  - Gaisro kilimo pavojau koeficientai:
    - $\delta_{q1} = 1,43$  (LST\_EN 1991-1-2 E.1 lentelė);
    - $\delta_{q2} = 1,00$  (LST\_EN 1991-1-2 E.1 lentelė);
  - Aktyviųjų priešgaisrinių priemonių koeficientai:
    - Automatinis gaisro aptikimo ir pavojaus signalas paremtas gaisro dūmais -  $\delta_{n4} = 0,73$  (LST\_EN 1991-1-2 E.2 lentelė);
    - Ne statinio gaisrininkai -  $\delta_{n7} = 0,78$  (LST\_EN 1991-1-2 E.2 lentelė);
  - Sudegimo koeficientas:  $m = 0,80$ ;

- Angos:
  - o Durys: dvejios durys 3 m x 3 m, atidaromos gaisro pradžioje.
  - o Angos stoge: 6 angos – 2 m diametro, atidaroma, pasiekus 100 °C temperatūrą.

Temperatūros augimas gaisriniame skyriuje modeliuojamas kompiuterine programa OZone. Temperatūros augimas apskaičiuojamas naudojant dvizonį gaisro modelį. 18 pav. pateikiamas gaisrinio skyriaus temperatūros augimas atitinkamai viršutiniame sluoksnyje (karštoje zonoje – raudona linija) ir apatiniame sluoksnyje (šalta zona – mėlyna linija). Perėjimas iš dvizonio modelio į vienazonį įvyksta ties 4 min nuo gaisro pradžios, kuomet viršutinis sluoksnis pasidaro toks didelis, kad apima degias medžiagas. Nuo šios laiko žymos, gaisro modelis tampa vienazonis. Gaisras pilnai išsivysto ties 14min nuo gaisro pradžios, kuomet temperatūra patalpoje pasiekia 300 °C.



**21 pav.** Natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivė

## 7.4.2. Konstrukcijų skaičiavimas

### 7.4.2.1. Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų atsparumas ugniai naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreives

Konstrukcijai tenkančios apkrovas ir apkrovų derinius priimami pagal 7.2. skyrių.

Kaip ir šio darbo 7.3.1. skyriuje nurodoma, turint santvaros elementų vidaus temperatūrą (3 lentelė) atitinkamu laiko momentu, plieno stiprį pagal takumo ribą ir tamprumo modulį atitinkamoje aukštoje temperatūroje nesunkiai galima apskaičiuoti pagal EN 1993-1-2 3.1 lentelę. Natūralaus gaisro modelio metu (pagal temperatūros ir laiko kreivę – 18 pav.), santvaros elementų vidaus temperatūra, kritinė temperatūra bei atsparumas ugniai apskaičiuojami SCIA Engineering kompiuterine programa. Rezultatai pateikiami 12 lentelėje.

**12 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Elementų vidaus temperatūra, °C	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>f</sub> , min
2*L130x12	-138,96	711,21	643,42	30,77
2*L100x10	138,13	715,62	729,84	∞
4*L60x6 – I formos	0,55	718,38	1090,53	∞
4*L60x6 – X formos	75,28	718,10	777,09	∞
2*L60x6	-18,69	722,31	683,75	31,73

Tyrimo metu, naudojant natūralaus gaisro modelio temperatūros ir laiko kreives, rankiniu būdu atliktos, nuo ugnies neapsaugotų santvaros elementų, mechaninės analizės duomenys pateikti 13 lentelėje.

**13 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Elementų vidaus temperatūra, °C	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>f</sub> , min
2*L130x12	-138,96	595,63	594,76	27,00
2*L100x10	138,13	713,94	764,87	∞

Iš gautų rezultatų galima teigti, kad kompiuterine programa ir rankiniu būdu apskaičiuoti elementų mechaninės analizės duomenys skiriasi, tačiau neženkliai. Atlikus skaičiavimus abiem atvejais, remiantis natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivėmis nustatyta, kad santvara netenkina jai keliamų priešgaisrinių reikalavimų.

Nuo ugnies neapsaugotos santvaros atsparumas ugniai išlieka 27-31 min nuo gaisro pradžios, kuomet spyriai, kurių skerspjūvis 2vnt. L60x6, ir viršutinė juosta, kurių skerspjūvis 2vnt. L130x12, praranda laikomąją galia.

Konstrukcija turi būti stiprinama papildomais plieniniais profiliais, padengiama priešgaisrine danga arba atskiriama priešgaisrine užtvara nuo galimų ugnies šaltinių. Siekiant sutaupyti patalpos tūrį, priimama santvarą padengti priešgaisrine danga. Santvaros viršutinė juosta bei spyriai privalo būti padengiami priešgaisrine danga.

*7.4.2.2. Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų atsparumas ugniai naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreives*

Konstrukcijoms apsaugoti nuo ugnies naudojamas purškiamasis priešgaisrinis sluoksnis – PROMASPRAY-P300. Ši priešgaisrinė danga yra gaminama iš vermikulito ir gipso.

Priešgaisrinės dangos charakteristikos:

- tankis:  $\rho = 310 \text{ kg/m}^3$ ;
- šilumos laidumas:  $0,078 \text{ W/mK}$ ;
- specifinė šiluma:  $1,0 \text{ J/gK}$ ;

- Priešgaisrinės medžiagos padengiamas storis: 8,0 mm – minimalus leistinas storis.

Tyrimo metu kompiuterine programa atliktos, nuo ugnies apsaugotų santvaros elementų, mechaninės analizės duomenys pateikti 14 lentelėje.

**14 lentelė.** Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys atlikti naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Elementų vidaus temperatūra, °C	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>t</sub> , min
2*L130x12	-138,96	399,38	643,42	∞
2*L100x10	138,13	433,82	729,84	∞
4*L60x6 – I formos	0,55	524,78	1090,53	∞
4*L60x6 – X formos	75,28	524,78	777,09	∞
2*L60x6	-18,69	524,78	683,75	∞

Tyrimo metu, naudojant natūralaus gaisro modelio temperatūros ir laiko kreivę, rankiniu būdu atliktos, nuo ugnies apsaugotų santvaros elementų, mechaninės analizės duomenys pateikti 15 lentelėje.

**15 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros elementų mechaninės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę

Elemento profilis	Ašinė jėga N, kN	Elementų vidaus temperatūra, °C	Kritinė temperatūra, °C	Atsparumas ugniai R <sub>t</sub> , min
2*L130x12	-138,96	266,61	594,76	∞
2*L100x10	138,13	296,23	764,87	∞

Apsaugojus konstrukciją minimaliu apsauginiu sluoksniu (8mm), santvaros elementai tenkina jai keliamus reikalavimus, t.y. visų santvaros elementų laikomoji galia viso gaisro metu yra pakankama, o statinys nesugriūna.

## IŠVADOS

1. Temperatūros augimo sparta gaisriniame skyriuje naudojant natūralaus gaisro modelį modeliuojama kompiuterine programa OZone. Temperatūros augimas apskaičiuojamas naudojant dvizonį gaisro modelį. Perėjimas iš dvizonio modelio į vienazonį įvyksta ties 4min nuo gaisro pradžios, kuomet viršutinis sluoksnis pasidaro toks didelis, kad apima degias medžiagas. Nuo šios laiko žymos, gaisro modelis tampa vienazonis. Gaisras pilnai išsivysto ties 14 min nuo gaisro pradžios, kuomet temperatūra patalpoje pasiekia 300 °C. Didžiausia temperatūra gaisriniame skyriuje yra 735 °C, kuri pasiekama praėjus 40 min po gaisro pradžios. Nuo šios laiko žymos gaisras pereina į gesimo fazę, t.y. temperatūra pradeda mažėti kol galiausiai gaisras yra užgesinamas.
2. Apskaičiavus santvaros laikomąją galią, 45 min po gaisro pradžios, pagal vardinę temperatūros ir laiko kreivę nustatyta, kad jai keliami reikalavimai yra netenkinami ir santvara turi būti apsaugota nuo ugnies. Pavojingiausia santvaros vieta – gniuždoma viršutinė juosta bei gniuždomi spyriai, kurie sudaryti iš kampuočių 2vnt. L60x6. Elementų atsparumas ugniai atitinkamai gautas: viršutinė juosta – 14 – 16 min (priklausomai ar skaičiuota kompiuterine programa, ar rankiniu būdu); gniuždomi spyriai – 14 min. Apsaugojus santvarą minimaliu leidžiamu purškiamuoju priešgaisrinio sluoksniu PROMASPRAY-P300 atsparumas ugniai ženkliai padidėja ir atitinka keliamus jai reikalavimus. Pavojingiausia vieta vis dar išlieka viršutinė juosta ir gniuždomieji spyriai, tačiau jų atsparumas ugniai atitinkamai siekia 62 – 69 min (priklausomai ar skaičiuota kompiuterine programa, ar rankiniu būdu) ir 49 min.
3. Apskaičiavus santvaros laikomąją galią, 60 min po gaisro pradžios, remiantis natūraliuoju gaisro modeliu nustatyta, kad jai keliami reikalavimai yra netenkinami ir santvara turi būti apsaugota nuo ugnies. Pavojingiausia santvaros vieta – viršutinė juosta bei gniuždomi spyriai, kurie sudaryti iš kampuočių 2vnt. L60x6. Likę santvaros elementai tenkina priešgaisrinius reikalavimus ir viso gaisro metu nepraranda laikomosios galios. Elementų atsparumas ugniai atitinkamai gautas: viršutinė juosta – 27 – 31 min (priklausomai ar skaičiuota kompiuterine programa, ar rankiniu būdu); gniuždomi spyriai – 32 min. Apsaugojus santvarą minimaliu leidžiamu purškiamuoju priešgaisrinio sluoksniu PROMASPRAY-P300, visų santvaros elementų atsparumas ugniai atitinka jai keliamus reikalavimus, t.y. santvara gaisro metu nesugriūna.

## Literatūros sąrašas

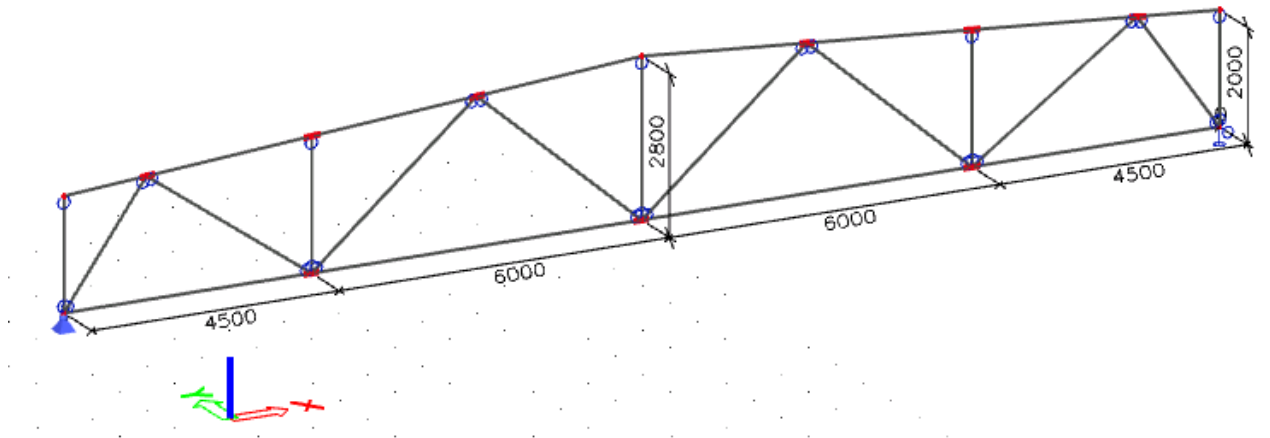
1. LUCHERINI, A., MALUK, C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105712 [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020-02-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>
2. World Fire Statistics: Report No.24. Center of Fire Statistics of CTIF, 2019.
3. MALUK, C., WOODROW, M. and TORERO, J. L. The potential impotent of integrating fire safety in modern building design. *Fire Safety Journal* [interaktyvus]. 2017, **88**, 104–112 [žiūrėta 2020-02-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.12.006>
4. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1993-1-2:2005+AC:2006], *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-2 dalis. Išorės taisyklės. Konstrukcijų elgsenos ugnyje skaičiavimas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
5. BUCHANAN, Andrew, H., Anthony K. ABU. *Structural Design for Fire Safety, Second Edition* [interaktyvus]. John Wiley and Sons, Ltd., 2017 [žiūrėta 2020-02-10]. ISBN 9781118700402. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/9781118700402>
6. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1991-1-2:2004 lt], *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-2 dalis. Bendrieji poveikiai. Gaisro poveikiai konstrukcijoms*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
7. EUROPOS SAJUNGOS OFICIALUS LEIDINYS. *Tarybos direktyva dėl valstybių narių įstatymų ir kitų teisės aktų, susijusių su statybos produktais, derinimo (89/106/EEB)*, [interaktyvus] 1989-02-11 (296-310psl.) Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/ALL/?uri=CELEX:31989L0106>
8. PRIEŠGAISRINĖS APSAUGOS IR GELBĖJIMO DEPARTAMENTAS PRIE VIDAUS REIKALŲ MINISTERIJOS. *Įsakymas dėl gaisrinės saugos pagrindinių reikalavimų patvirtinimo*. Valstybės žinios, 2010-12-14, Nr. 146-7510 [interaktyvus]. Galiojanti suvestinė redakcija: 2016-03-03 - 2020-04-30 [žiūrėta 2020-02-15]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.388658/asr>
9. PRIEŠGAISRINĖS APSAUGOS IR GELBĖJIMO DEPARTAMENTAS PRIE VIDAUS REIKALŲ MINISTERIJOS. *Įsakymas dėl gyvenamųjų pastatų gaisrinės saugos taisyklių patvirtinimo*. Valstybės žinios, 2011-02-24, Nr. 23-1138 [interaktyvus]. Galiojanti suvestinė redakcija nuo 2018-11-01 [žiūrėta 2020-02-15]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.393013/asr>
10. PRIEŠGAISRINĖS APSAUGOS IR GELBĖJIMO DEPARTAMENTAS PRIE VIDAUS REIKALŲ MINISTERIJOS. *Įsakymas dėl visuomeninių statinių gaisrinės saugos taisyklių patvirtinimo*. Valstybės žinios, 2011-01-20, Nr. 8-378 [interaktyvus]. Galiojanti suvestinė redakcija nuo 2018-11-09 [žiūrėta 2020-02-15]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.391196/asr>
11. TAN, K. H., FUNG, T. C., and NGUYEN, M. P. Structural Behavior of CHS T-Joints Subjected to Brace Axial Compression in Fire Conditions. *Journal of Structural Engineering* [interaktyvus]. 2013, **139**(1), 73–84 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
12. CAGLAYAN, O., YUKSEL, E. Experimental and finite element investigations on the collapse of a Mero space truss roof structure – A case study. *Engineering Failure Analysis* [interaktyvus]. 2008, **15**(5), 458–470 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>

13. FÜLÖP, A., IVÁNYI, M. Experimentally analyzed stability and ductility behaviour of a space-truss roof system. *Thin-Walled Structures* [interaktyvus]. 2004, **42**(2), 309–320 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
14. CHEN, C., ZHANG, W. Structural behaviors of steel roof truss exposed to pool fire. *Journal of Central South University* [interaktyvus]. 2012, 19(7), 2054–2060 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1244-6>
15. WANG, Y. An analysis of the global structural behaviour of the Cardington steel-framed building during the two BRE fire tests. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2000, 22(5), 401–412 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
16. USMANI, A. S., CHUNG, Y. C. and TORERO, J. How did the WTC towers collapse: a new theory. *Fire Safety Journal* [interaktyvus]. 2003, 38(6), 501–533 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
17. ZHAO, J. C., SHEN, Z. Y. Experimental studies of the behaviour of unprotected steel frames in fire. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 1999, 50(2), 137–150 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
18. CHEN, C., ZHANG, W. Experimental study of the mechanical behavior of steel staggered truss system under pool fire conditions. *Thin-Walled Structures* [interaktyvus]. 2011, 49(11), 1442–1451 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
19. CHEN, C., ZHANG, D., ZHANG, W. and SHEN, B. Experimental behaviors of steel staggered-truss system exposed to fire under lateral force. *International Journal of Steel Structures* [interaktyvus]. 2012, 12(1), 59–70 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
20. OZYURT, E., WANG, Y. C. Effects of truss behaviour on critical temperatures of welded steel tubular truss members exposed to uniform fire. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2015, 88, 225–240 [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
21. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1990], *Eurokodas. Konstrukcijų projektavimo pagrindai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
22. FRANSSEN, Jean-Marc, VILA REAL, P. *Fire Design of Steel Structure*. 2nd ed. ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 2016 [žiūrėta 2020-02-10]. ISBN 9783433607008. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/9783433607008>
23. ZANDBERGEN, Thomas. *Fire resistance of existing building. Assessing the fire resistance of existing concrete building: Master`s thesis* [interaktyvus]. Delft University of Technology, 2016 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:5637b420-d8b5-4321-b0c4-7f556a7e69ed/datastream/OBJ/download>
24. *SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE: Computational Fluid Dynamics (CFD) and Fire Modeling*. © 2020 Southwest research institute [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://www.swri.org/industry/fire-research-engineering/computational-fluid-dynamics-cfd-and-fire-modeling>

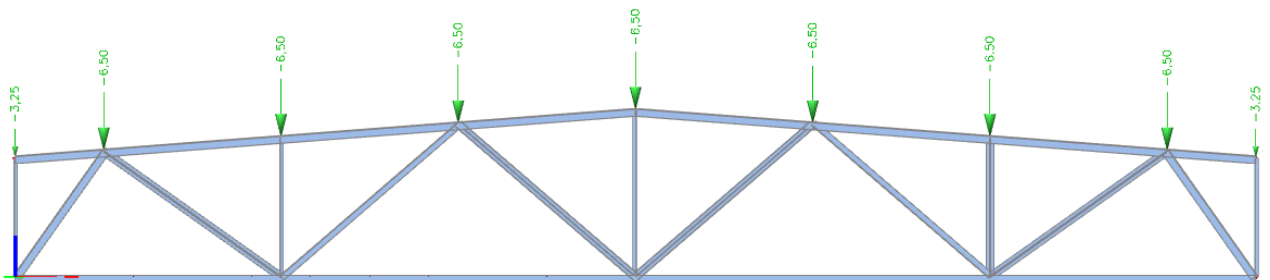


## Priedai

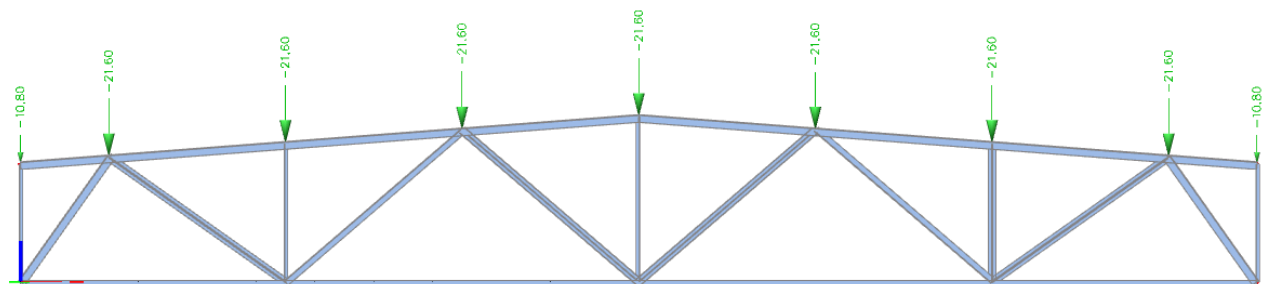
### 1 priedas. Santvaros skaičiuojamoji schema bei ją sudarantys profiliai



1 priedo 1 pav. Santvaros skaičiuojamoji schema

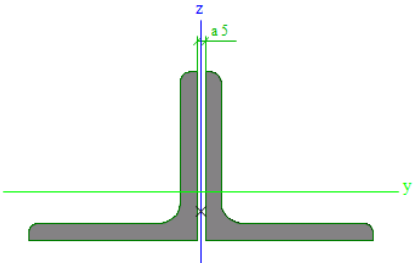
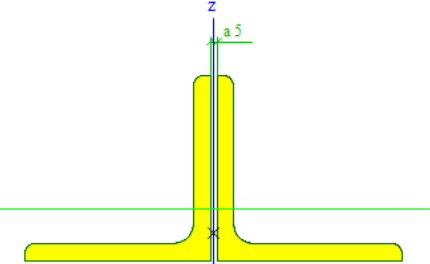
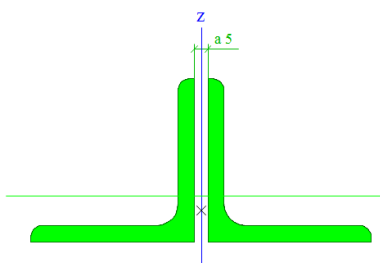
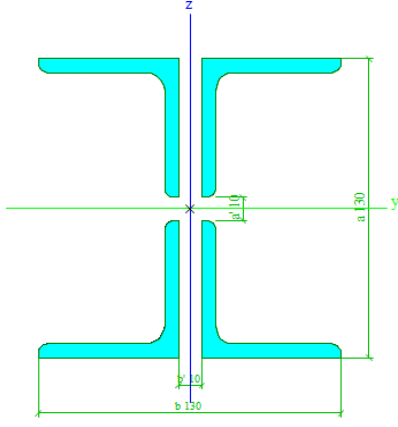
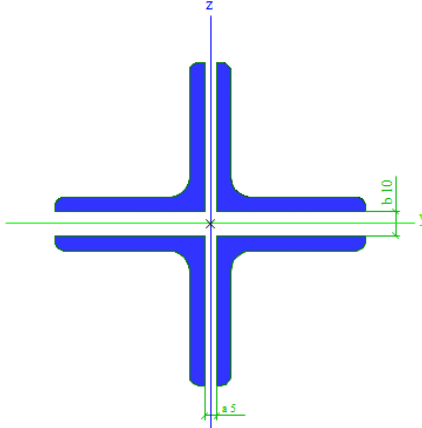


1 priedo 2 pav. Nuolatinės apkrovos, kN



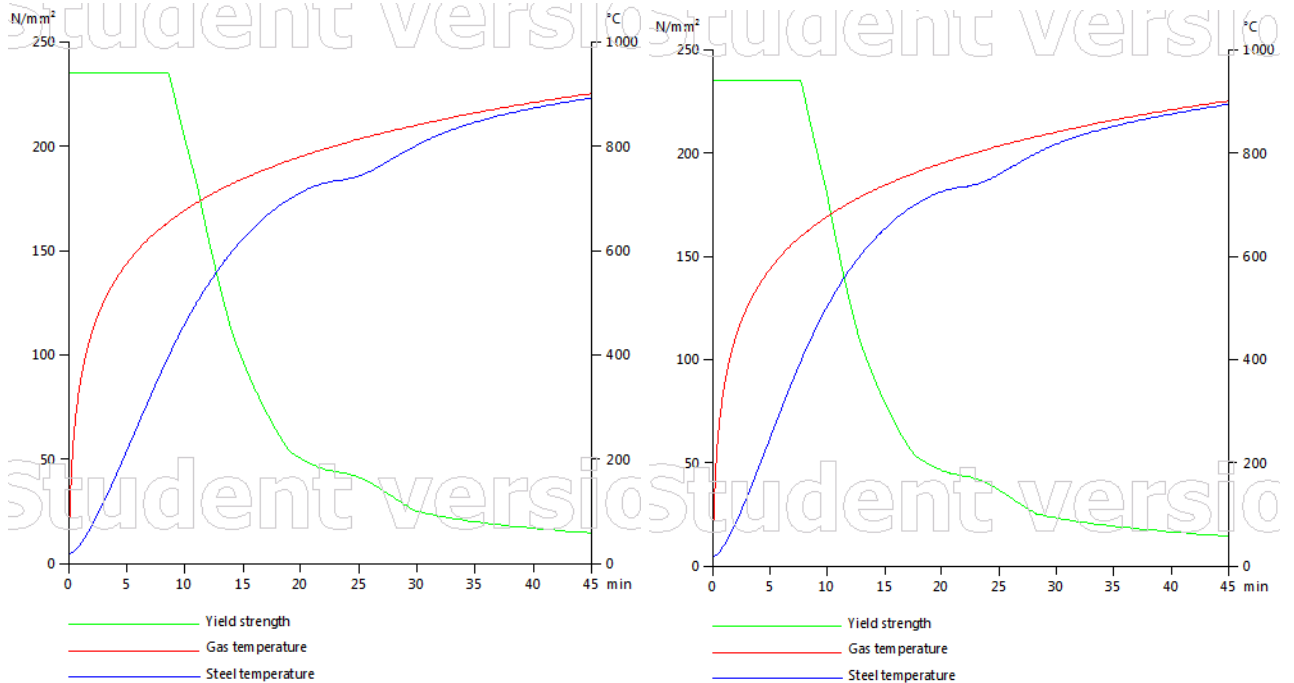
1 priedo 3 pav. Kintamos sniego apkrovos, kN

**1 priedo 1 lentelė. Santvarą sudarantys profiliai**

Apatinė juosta – 2*L100x10	Viršutinė juosta – 2*L130x12	Spyriai – 2*L60x6
		
<p><b>Spyriai – 4*L60x6 – I formos</b></p>		<p><b>Spyriai – 4*L60x6 – X formos</b></p>
		

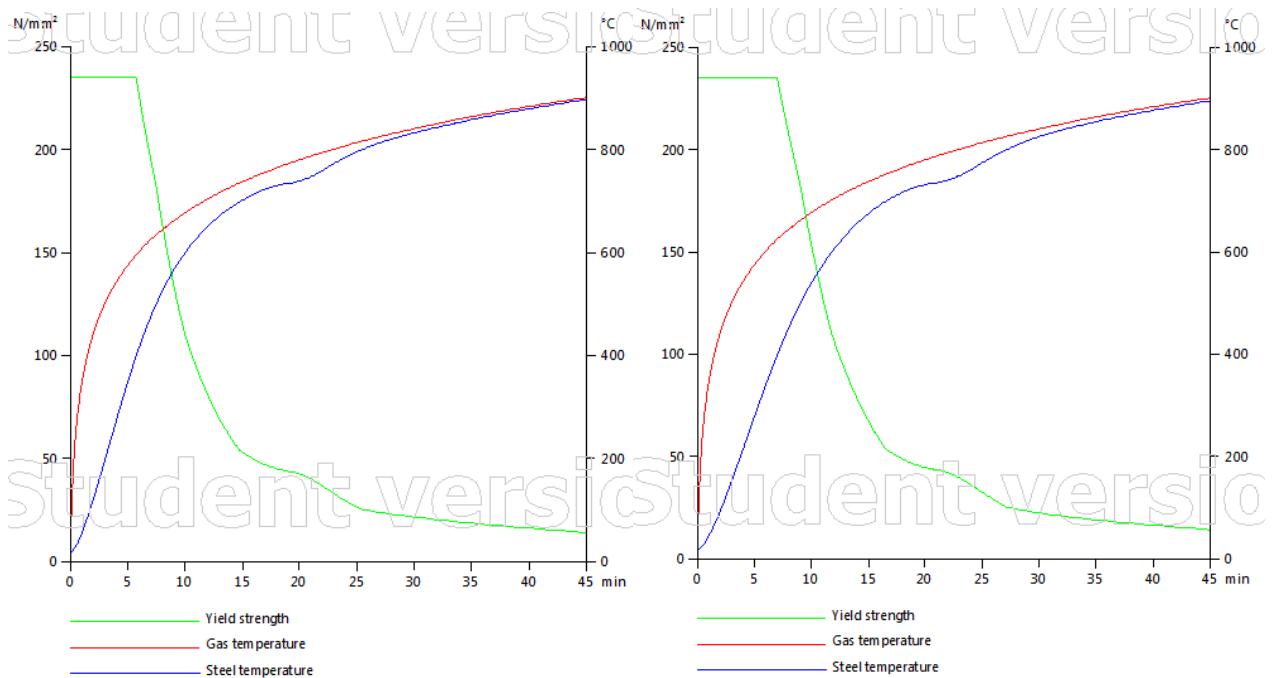
## 2 priedas. Santvaros elementų temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti kompiuterine programa SCIA Engineering

1. Nuo ugnies neapsaugotų santvaros elementų vidinės temperatūros augimo bei stiprio pagal takumo ribą mažėjimo reikšmės, apskaičiuotos naudojant kompiuterinę programą SCIA Engineering pagal vardines temperatūros ir laiko kreives.



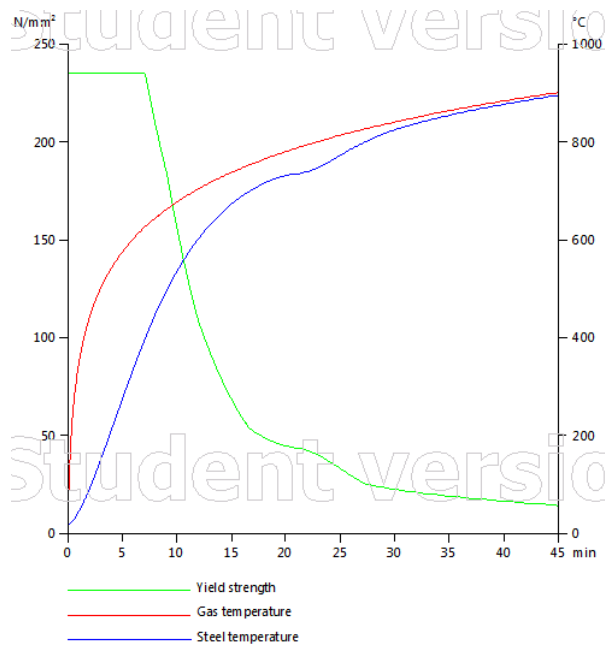
2 priedo 1 pav. Viršutinė juosta – 2\*L130x12

2 priedo 2 pav. Apatinė juosta – 2\*L100x12



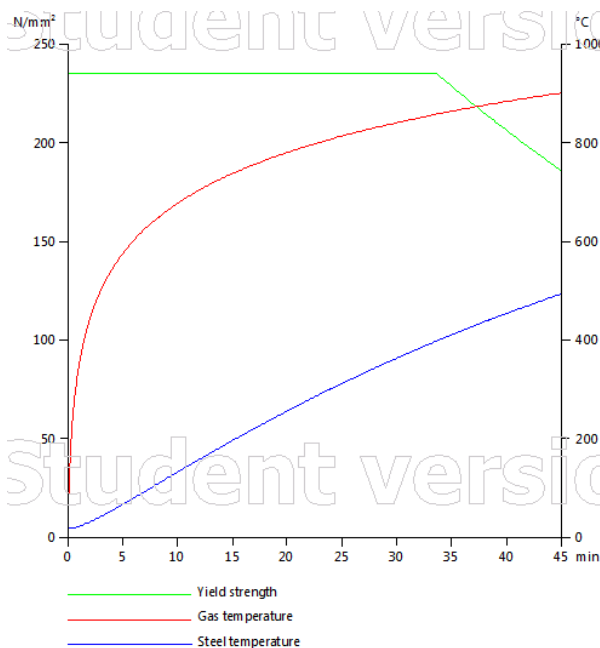
2 priedo 3 pav. Spyriai – 2\*L60x6

2 priedo 4 pav. Spyriai – 4\*L60x6 – I formos

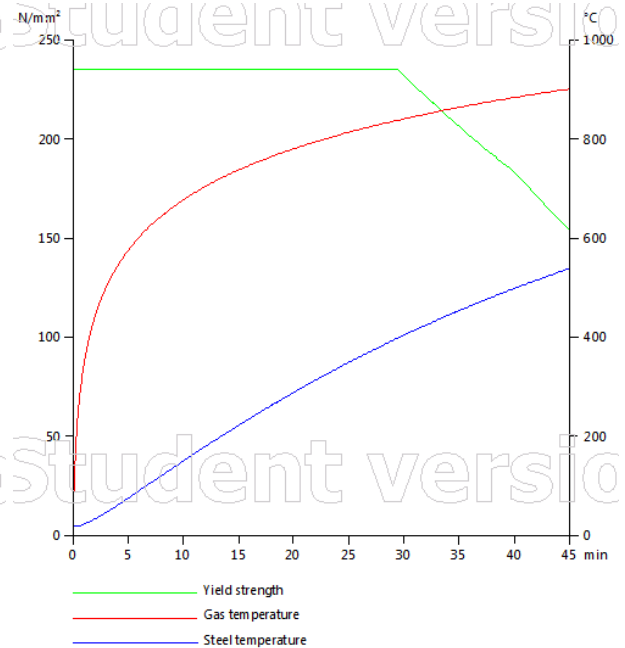


2 priedo 5 pav. Spyriai – 4\*L60x6 – X formos

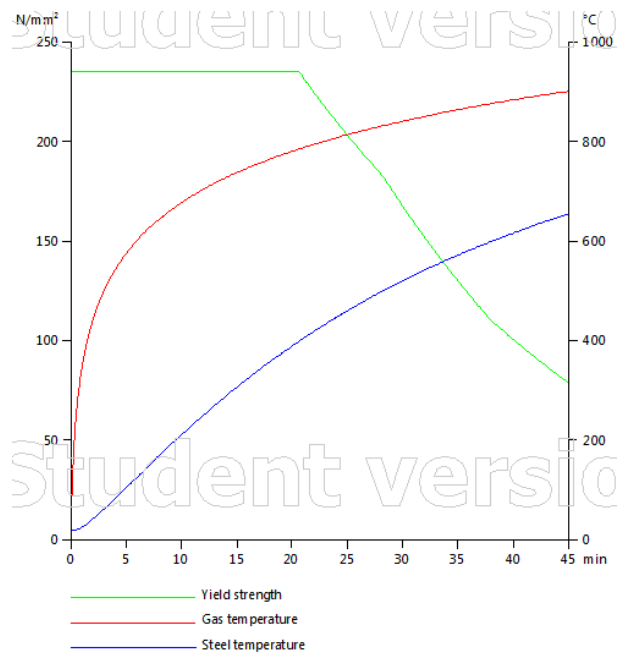
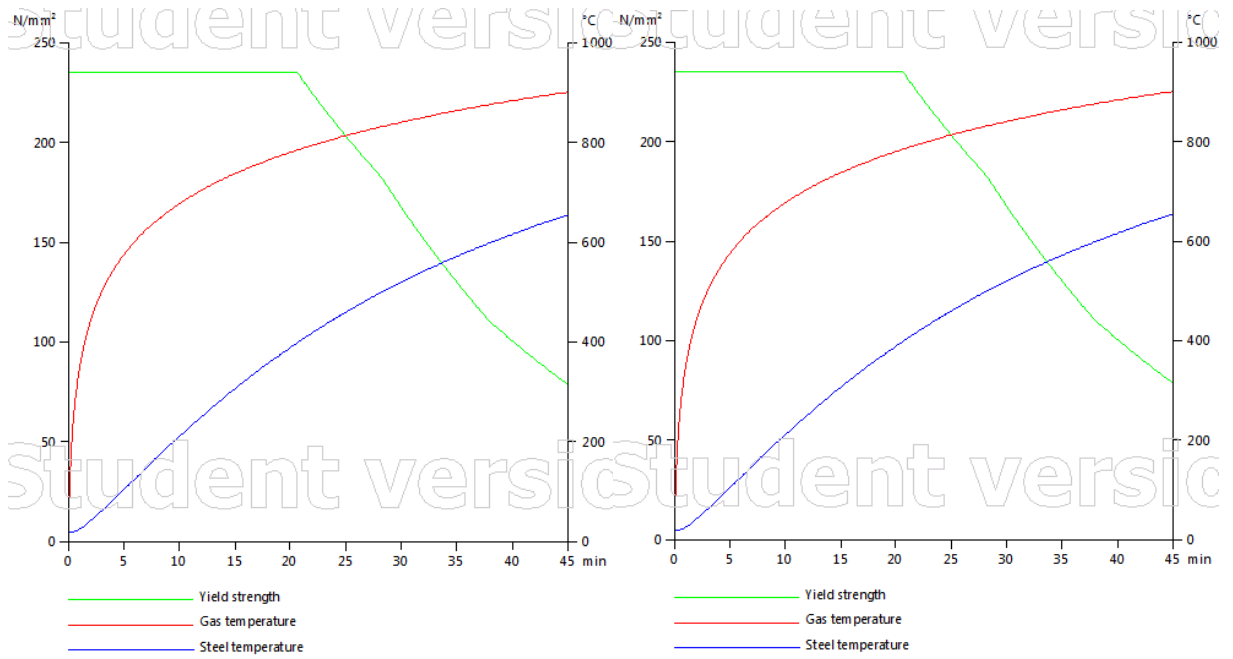
2. Nuo ugnies apsaugotos santvaros elementų vidinės temperatūros augimo bei stiprio pagal takumo ribą mažėjimo reikšmės, apskaičiuotos naudojant kompiuterinę programą *SCIA Engineering* pagal vardines temperatūros ir laiko kreives.



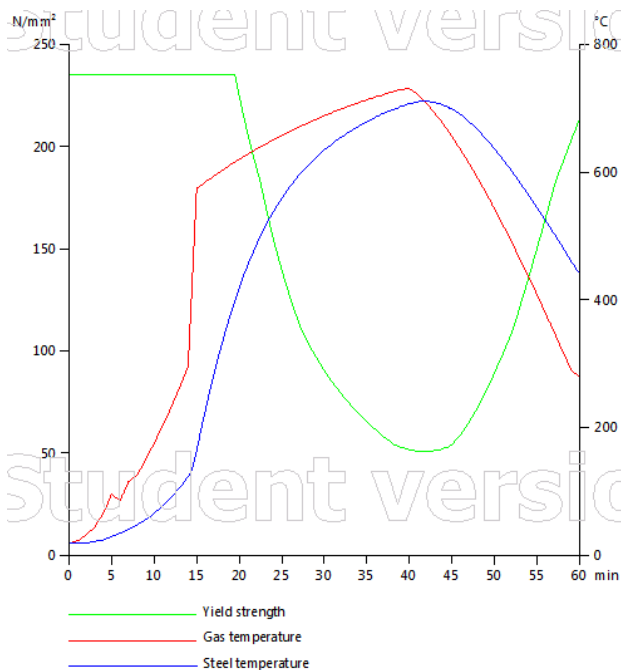
2 priedo 6 pav. Viršutinė juosta – 2\*L130x12



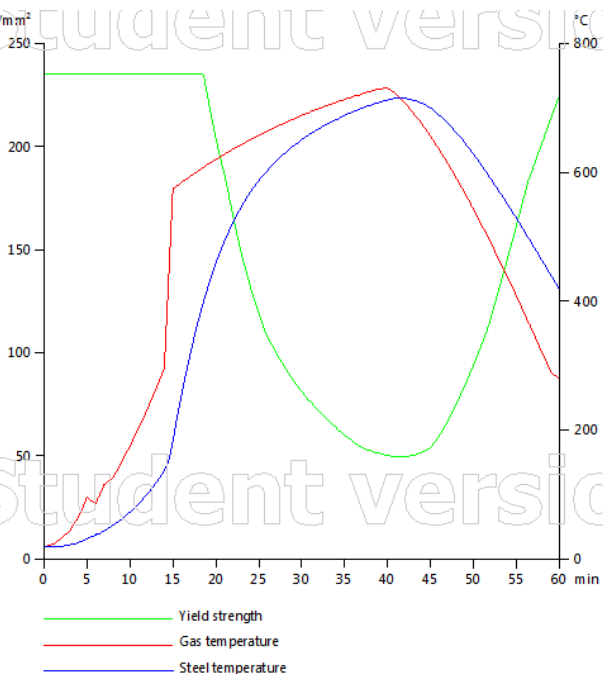
2 priedo 7 pav. Apatinė juosta – 2\*L100x12



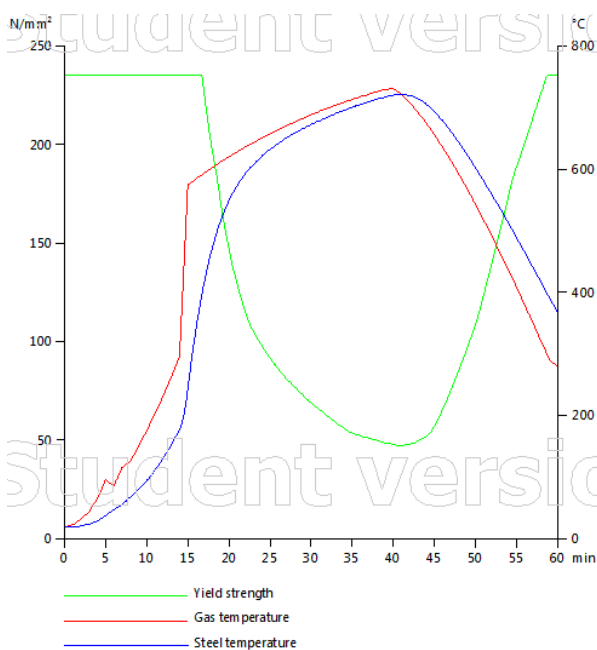
3. Nuo ugnies neapsaugotų santvaros elementų vidinės temperatūros augimo bei stiprio pagal takumo ribą mažėjimo reikšmės, apskaičiuotos naudojant kompiuterinę programą *SCIA Engineering* pagal natūralaus gaisro modelio temperatūros ir laiko kreivę.



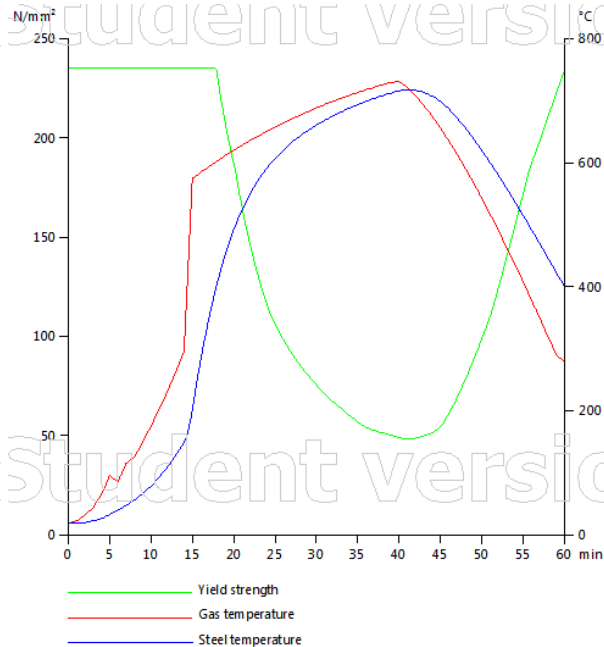
2 priedo 11 pav. Viršutinė juosta – 2\*L130x12



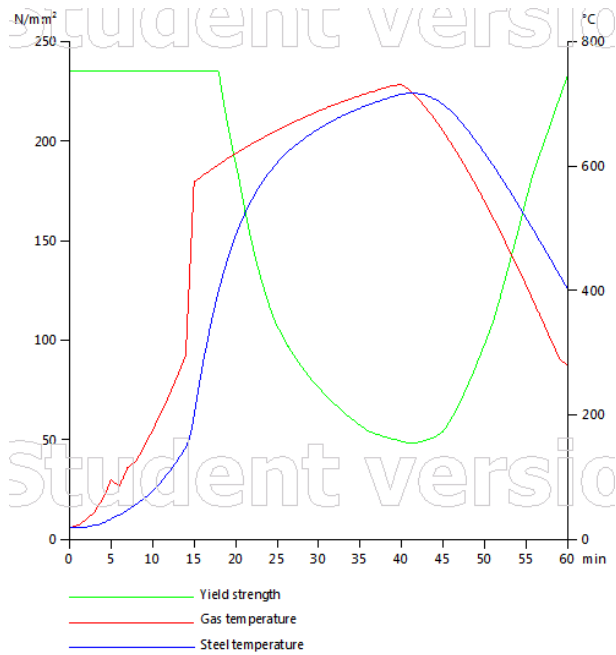
2 priedo 12 pav. Apatinė juosta – 2\*L100x12



2 priedo 13 pav. Spyriai – 2\*L60x6

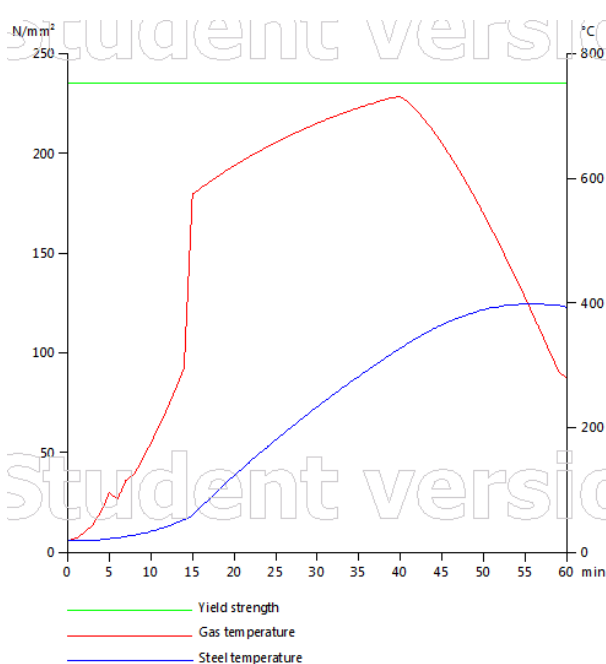


2 priedo 14 pav. Spyriai – 4\*L60x6 – I formos

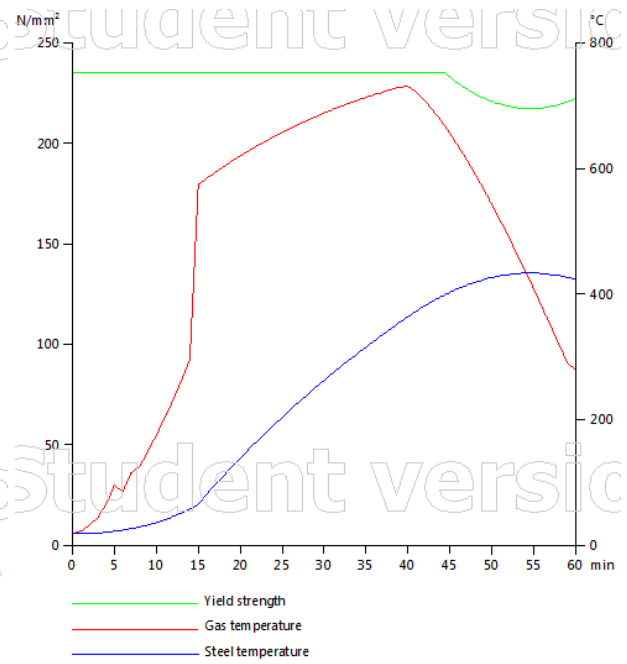


2 priedo 15 pav. Spyriai – 4\*L60x6 – X formos

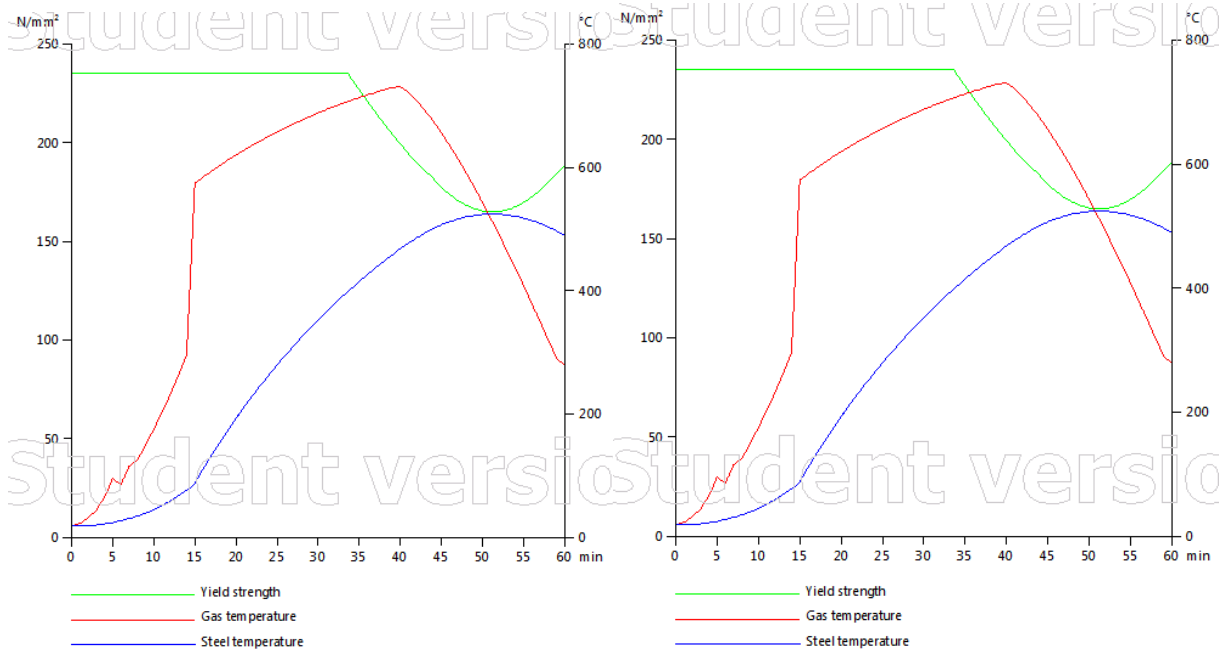
4. Nuo ugnies apsaugotų santvaros elementų vidinės temperatūros augimo bei stiprio pagal takumo ribą mažėjimo reikšmės, apskaičiuotos naudojant kompiuterinę programą *SCIA Engineering* pagal natūralaus gaisro modelio temperatūros ir laiko kreivę.



2 priedo 16 pav. Viršutinė juosta – 2\*L130x12

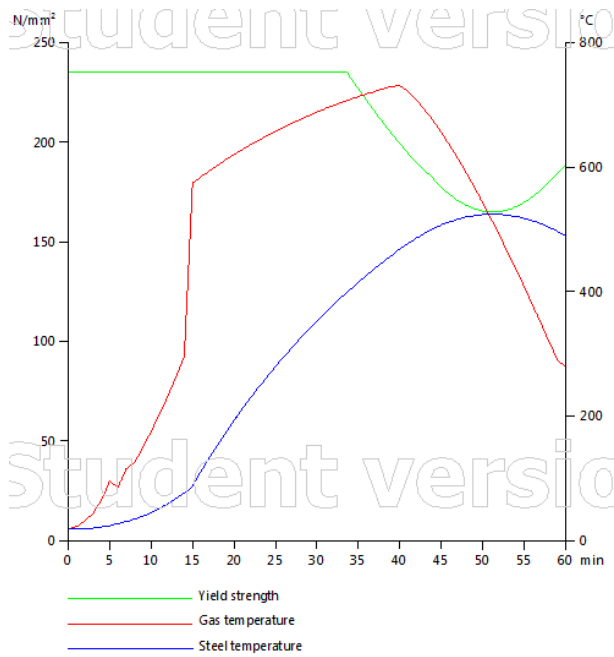


2 priedo 17 pav. Apatinė juosta – 2\*L100x12



**2 priedo 18 pav. Spyriai – 2\*L60x6**

**2 priedo 19 pav. Spyriai – 4\*L60x6 – I formos**



**2 priedo 20 pav. Spyriai – 4\*L60x6 – X formos**



**3 priedas. Santvaros viršutinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal vardines temperatūros ir laiko kreives**

**Santvaros viršutinė juosta - 2\*L130x12mm**

Nuo ugnies neapsaugoto elemento skaičiavimas pagal vardinę temperatūros ir laiko kreivę

**$b := 130 \text{ mm}$**

**$h := 130 \text{ mm}$**

**$t_w := 12 \text{ mm}$**

$\gamma_{M0} := 1$

$\gamma_{M,fi} := 1$

Skerspjūvio klasė:

**$f_y := 235 \text{ MPa}$**  - plieno stipris pagal takumo ribą

$$\varepsilon := 0.85 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0.85$$

$$\frac{h}{t_w} = 10.833$$

- gniuždymo veikiamas skerspjūvis, 5.2 lentelė EN 1993-1-1

<p>if <math>\frac{h}{t_w} \leq 15 \cdot \varepsilon</math></p> <p style="padding-left: 20px;">   "Skerspjūvio klasė - 3"</p> <p>else</p> <p style="padding-left: 20px;">   "Skerspjūvio klasė - 4"</p>	<p>= "Skerspjūvio klasė - 3"</p>
--	----------------------------------

Profilio charakteristikos:

<b><math>A := 5.9948 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2</math></b>	<b><math>W_{el,y} := 1.0084 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3</math></b>
<b><math>I_y := 9.4406 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4</math></b>	<b><math>W_{el,z} := 1.3966 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3</math></b>
<b><math>I_z := 1.8505 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4</math></b>	<b><math>W_{pl,y} := 1.8351 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3</math></b>
	<b><math>W_{el,z} := 2.3310 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3</math></b>

Veikiančios jėgos:

<b><math>G_k := 6.5 \text{ kN}</math></b>	Daliniai koeficientai:
	$\psi_G := 1.35$
	$\psi_{Q,1} := 1.3$
<b><math>Q_k := 21.60 \text{ kN}</math></b>	$\psi_{0,1} := 0.5$ - sniego koeficientas
	$\psi_{fi} := \psi_{0,1} = 0.5$

Apkrovos:

$$G_{Ed} := G_k \cdot \psi_G = 8.775 \text{ kN}$$

$$Q_{Ed} := Q_k \cdot \psi_{Q,1} = 28.08 \text{ kN}$$

$$\eta_{fi} := \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_k}{\psi_G \cdot G_k + \psi_{Q,1} \cdot Q_k} = 0.469$$

## **1. Kritinė plieninio elemento temperatūra**

Supaprastintasis išnaudojimo koeficientas apskaičiuojamas:

$$\mu_0 := \eta_{fi} \cdot \left( \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right) = 0.469$$

Turint išnaudojimo koeficientą, apskaičiuojama kritinė elemento temperatūra  $\Theta_{cr}$ :

$$\Theta_{cr} := 39.19 \cdot \ln \left( \frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 594.758$$

Naudojant supaprastita išnaudojimo koeficientą, gaunamas konservatyvesnis rezultatas.

## **2. Plieninio elemento masyvumo koeficientas ir šėšelio poveikio koeficientas**

Elemento masyvumo koeficientas (kampuotis, ugnies veikiamas iš visų pusių) :

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2}{t_w} \quad , \text{ kai } t_w \text{ yra kampuočio sienutės storis}$$

$$t_w = 12 \text{ mm}$$

$$MK := \frac{2}{t_w} = 166.667 \frac{1}{m}$$

Dėžinis masyvumo koeficientas  $MK_{box}$ :

$$A_m := 50.793 \text{ cm} \quad - \text{ skerspjūvio L130x12 perimetras}$$

$$P := 29.27 \text{ cm}^2 \quad - \text{ skerspjūvio L130x12 plotas}$$

$$MK_{box} := \frac{(A_m - 13 \text{ cm}) \cdot 2}{2 \cdot P} = 129.119 \frac{1}{m}$$

$$k_{sh} := \frac{MK_{box}}{MK} = 0.775$$

$$\Theta_{cr} = 594.758$$

$$MK := 166.667$$

### 3. Plieninio elemento vidaus temperatūra po 45min

```

Unpr_Vid_temp_θai :=
  t0 ← 0
  θg,t.0 ← 20 + 345 · log(8 · t0 + 1)
  Δt ← 3
  ca ← 489
  ρa ← 7850
  t ← t0 +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
  θa,i.0 ← 20
  θg,t.1 ← (20 + 345 · log(8 · t + 1))
  hnet,r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\theta_{g,t.0} + 273)^4 + (\theta_{g,t.1} + 273)^4}{2} - (\theta_{a,i.0} + 273)^4 \right)$ 
  hnet,c ← 25 ·  $\left( \frac{\theta_{g,t.0} + \theta_{g,t.1}}{2} - \theta_{a,i.0} \right)$ 
  hnet,d ← hnet,r + hnet,c
  Δθa,t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t$ 
  θa,i ← θa,i.0 + Δθa,t
  while t < 45
    ca ← if 20 ≤ θa,i ≤ 600
      425 + 7.73 · 10-1 · θa,i - 1.69 · 10-3 · θa,i2 + 2.22 · 10-6 · θa,i3
    else if 600 < θa,i ≤ 735
      666 +  $\frac{13002}{738 - \theta_{a,i}}$ 
    else if 735 < θa,i ≤ 900
      545 +  $\frac{17820}{\theta_{a,i} - 731}$ 
    else if 900 < θa,i ≤ 1200
      650
    θg,t.1 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    t ← t +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
    θg,t.2 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    hnet,r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\theta_{g,t.1} + 273)^4 + (\theta_{g,t.2} + 273)^4}{2} - (\theta_{a,i} + 273)^4 \right)$ 
    hnet,c ← 25 ·  $\left( \frac{\theta_{g,t.1} + \theta_{g,t.2}}{2} - \theta_{a,i} \right)$ 
    hnet,d ← hnet,r + hnet,c
    Δθa,t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t$ 
    θa,i ← θa,i + Δθa,t
  θa,i

```

Unpr\_Vid\_temp\_θ<sub>ai</sub> = 893.856

#### 4. Plieninio elemento atsparumas ugniai minutėmis

```

Unpr_Atsp_ugn_Rf :=
  t0 ← 0
  Θg.t.0 ← 20 + 345 · log(8 · t0 + 1)
  Δt ← 3
  ca ← 489
  ρa ← 7850
  t ← t0 + Δt / 60
  Θa.i.0 ← 20
  Θg.t.1 ← (20 + 345 · log(8 · t + 1))
  hnet.r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\Theta_{g.t.0} + 273)^4 + (\Theta_{g.t.1} + 273)^4}{2} - (\Theta_{a.i.0} + 273)^4 \right)$ 
  hnet.c ← 25 ·  $\left( \frac{\Theta_{g.t.0} + \Theta_{g.t.1}}{2} - \Theta_{a.i.0} \right)$ 
  hnet.d ← hnet.r + hnet.c
  ΔΘa.t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net.d} \cdot \Delta t$ 
  Θa.i ← Θa.i.0 + ΔΘa.t
  while Θa.i < Θcr
  |
  | ca ← if 20 ≤ Θa.i ≤ 600
  | | 425 + 7.73 · 10-1 · Θa.i - 1.69 · 10-3 · Θa.i2 + 2.22 · 10-6 · Θa.i3
  | | else if 600 < Θa.i ≤ 735
  | | | 666 +  $\frac{13002}{738 - \Theta_{a.i}}$ 
  | | | else if 735 < Θa.i ≤ 900
  | | | | 545 +  $\frac{17820}{\Theta_{a.i} - 731}$ 
  | | | | else if 900 < Θa.i ≤ 1200
  | | | | | 650
  | | Θg.t.1 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
  | | t ← t + Δt / 60
  | | Θg.t.2 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
  | | hnet.r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\Theta_{g.t.1} + 273)^4 + (\Theta_{g.t.2} + 273)^4}{2} - (\Theta_{a.i} + 273)^4 \right)$ 
  | | hnet.c ← 25 ·  $\left( \frac{\Theta_{g.t.1} + \Theta_{g.t.2}}{2} - \Theta_{a.i} \right)$ 
  | | hnet.d ← hnet.r + hnet.c
  | | ΔΘa.t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net.d} \cdot \Delta t$ 
  | | Θa.i ← Θa.i + ΔΘa.t
  |
  t

```

Unpr\_Atsp\_ugn\_Rf = 14.05 min

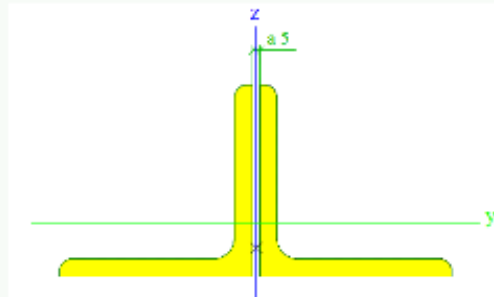
## Santvaros viršutinė juosta - 2\*L130x12mm

Nuo ugnies apsaugoto elemento skaičiavimas pagal vardinę temperatūros ir laiko krivę

$$b := 130 \text{ mm}$$

$$h := 130 \text{ mm}$$

$$t_w := 12 \text{ mm}$$



Skerspjūvio klasė:

$$f_y := 235 \text{ MPa}$$

- plieno stipris pagal takumo ribą

$$\epsilon := 0.85 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0.85$$

$$\frac{h}{t_w} = 10.833$$

- gniuždymo veikiamas skerspjūvis, 5.2 lentelė EN 1993-1-1

$$\begin{aligned} &\text{if } \frac{h}{t_w} \leq 15 \cdot \epsilon &&= \text{"Skerspjūvio klasė - 3"} \\ &\quad \parallel \text{"Skerspjūvio klasė - 3"} \\ &\text{else} \\ &\quad \parallel \text{"Skerspjūvio klasė - 4"} \end{aligned}$$

Profilio charakteristikos:

$$A := 5.9948 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$W_{el,y} := 1.0084 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_y := 9.4406 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_{el,z} := 1.3966 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_z := 1.8505 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$W_{pl,y} := 1.8351 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W_{el,z} := 2.3310 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Veikiančios jėgos:

$$G_k := 6.5 \text{ kN}$$

$$Q_k := 21.60 \text{ kN}$$

Daliniai koeficientai:

$$\psi_G := 1.35$$

$$\psi_{Q,1} := 1.3$$

$$\psi_{0,1} := 0.5$$

$$\psi_{fi} := \psi_{0,1} = 0.5$$

Apkrovos:

$$G_{Ed} := G_k \cdot \psi_G = 8.775 \text{ kN}$$

$$Q_{Ed} := Q_k \cdot \psi_{Q,1} = 28.08 \text{ kN}$$

$$\eta_{fi} := \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_k}{\psi_G \cdot G_k + \psi_{Q,1} \cdot Q_k} = 0.469$$

### **1. Kritinė plieninio elemento temperatūra**

Supaprastintasis išnaudojimo koeficientas apskaičiuojamas:

$$\mu_0 := \eta_{fi} \cdot \left( \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right) = 0.469$$

Turint išnaudojimo koeficientą, apskaičiuojama kritinė elemento temperatūra  $\theta_{cr}$ :

$$\theta_{cr} := 39.19 \cdot \ln \left( \frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 594.758$$

*Naudojant supaprastita išnaudojimo koeficienta, gaunamas konservatyvesnis rezultatas.*

### **2. Nuo ugnies apsaugoto plieninio elemento masyvumo koeficientas**

Apsaugos nuo gaisro izoliuotų plieninių elementų masyvumo koeficientas (kampuotis, ugnies veikiamas iš visų pusių) :

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2}{t_w} \quad , \text{ kai } t_w \text{ yra kampuočio sienutės storis}$$

$$t_w = 12 \text{ mm}$$

$$MK_p := \frac{2}{t_w} = 166.667 \frac{1}{m} \quad MK_p := MK_p \cdot 1 \text{ m} = 166.667$$

### **3. Apsaugos nuo gaisro mechaninės charakteristikos**

Apsaugai nuo gaisro naudojamas purškiamasis priešgaisrinis sluoksnis - PROMOSPRAY-P300. Charakteristikos:

Tūris:

$$\rho_p := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Šilumos laidumas:

$$\lambda_p := 0.078 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Specifinė šiluma:

$$c_p := 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Storis:

$$d_p := 8 \text{ mm}$$

#### 4. Plieninio elemento vidaus temperatūra po 45min

```

Pr_Vid_temp_θa,i := t0 ← 0
θg,t,0 ← 20 + 345 · log(8 · t0 + 1)
Δt ← 3
ρp ← 350
cp ← 1000
λp ← 0.078
dp ← 0.008
ca ← 489
ρa ← 7850
t ← t0 +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
θa,i,0 ← 20
θg,t,1 ← (20 + 345 · log(8 · t + 1))
Δθg,t ← θg,t,1 - θg,t,0
φ ←  $\frac{c_p \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot MK_p}{c_a \cdot \rho_a}$ 
Δθa,t ←  $\frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t,1} - \theta_{a,i,0}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta \theta_{g,t}$ 
Δθa,t ← if Δθa,t > 0
    || Δθa,t
    else
    || 0
θa,i ← θa,i,0 + Δθa,t
while t < 45
    ca ← if 20 ≤ θa,i ≤ 600
        || 425 + 7.73 · 10-1 · θa,i - 1.69 · 10-3 · θa,i2 + 2.22 · 10-6 · θa,i3
        else if 600 < θa,i ≤ 735
        || 666 +  $\frac{13002}{738 - \theta_{a,i}}$ 
        else if 735 < θa,i ≤ 900
        || 545 +  $\frac{17820}{\theta_{a,i} - 731}$ 
        else if 900 < θa,i ≤ 1200
        || 650
    θg,t,1 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    t ← t +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
    θg,t,2 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    Δθg,t ← θg,t,2 - θg,t,1
    Δθa,t ←  $\frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t,1} + \theta_{g,t,2} - \theta_{a,i}}{2} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta \theta_{g,t}$ 

```

```

|||  $\Delta\theta_{a,t} \leftarrow \text{if } \Delta\theta_{a,t} > 0$ 
|||   |||  $\Delta\theta_{a,t}$ 
|||   ||| else
|||   ||| 0
|||  $\theta_{a,i} \leftarrow \theta_{a,i} + \Delta\theta_{a,t}$ 
|||  $\theta_{a,i}$ 

```

$Pr\_Vid\_temp\__{\theta_{a,i}} = 488.253$

### 5. Plieninio elemento atsparumas ugniai minutėmis

```

Pr_Atsp_ugn_Rf := |  $t_0 \leftarrow 0$ 
|  $\theta_{g,t,0} \leftarrow 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t_0 + 1)$ 
|  $\Delta t \leftarrow 3$ 
|  $\rho_p \leftarrow 350$ 
|  $c_p \leftarrow 1000$ 
|  $\lambda_p \leftarrow 0.078$ 
|  $d_p \leftarrow 0.008$ 
|  $c_a \leftarrow 489$ 
|  $\rho_a \leftarrow 7850$ 
|  $t \leftarrow t_0 + \frac{\Delta t}{60}$ 
|  $\theta_{a,i,0} \leftarrow 20$ 
|  $\theta_{g,t,1} \leftarrow (20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1))$ 
|  $\Delta\theta_{g,t} \leftarrow \theta_{g,t,1} - \theta_{g,t,0}$ 
|  $\phi \leftarrow \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot MK_p$ 
|  $\Delta\theta_{a,t} \leftarrow \frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t,1} - \theta_{a,i,0}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta\theta_{g,t}$ 
|  $\Delta\theta_{a,t} \leftarrow \text{if } \Delta\theta_{a,t} > 0$ 
|   |||  $\Delta\theta_{a,t}$ 
|   ||| else
|   ||| 0
|  $\theta_{a,i} \leftarrow \theta_{a,i,0} + \Delta\theta_{a,t}$ 
| while  $\theta_{a,i} < \theta_{cr}$ 
|   |  $c_a \leftarrow \text{if } 20 \leq \theta_{a,i} \leq 600$ 
|   |   |||  $425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_{a,i} - 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{a,i}^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{a,i}^3$ 
|   |   ||| else if  $600 < \theta_{a,i} \leq 735$ 
|   |   |||  $666 + \frac{13002}{738 - \theta_{a,i}}$ 
|   |   ||| else if  $735 < \theta_{a,i} \leq 900$ 
|   |   |||  $545 + \frac{17820}{\theta_{a,i} - 731}$ 
|   |   ||| else if  $900 < \theta_{a,i} \leq 1200$ 
|   |   ||| 650

```



$$\begin{aligned}
 & \Theta_{g,t,1} \leftarrow 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \\
 & t \leftarrow t + \frac{\Delta t}{60} \\
 & \Theta_{g,t,2} \leftarrow 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \\
 & \Delta\Theta_{g,t} \leftarrow \Theta_{g,t,2} - \Theta_{g,t,1} \\
 & \Delta\Theta_{a,t} \leftarrow \frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\Theta_{g,t,1} + \Theta_{g,t,2} - \Theta_{a,i}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta\Theta_{g,t} \\
 & \Delta\Theta_{a,t} \leftarrow \begin{cases} \Delta\Theta_{a,t} & \text{if } \Delta\Theta_{a,t} > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \\
 & \Theta_{a,i} \leftarrow \Theta_{a,i} + \Delta\Theta_{a,t} \\
 & t
 \end{aligned}$$

$Pr\_Atsp\_ugn\_R_f = 61.5 \text{ min}$

4 priedas. Santvaros apatinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal vardines temperatūros ir laiko kreives

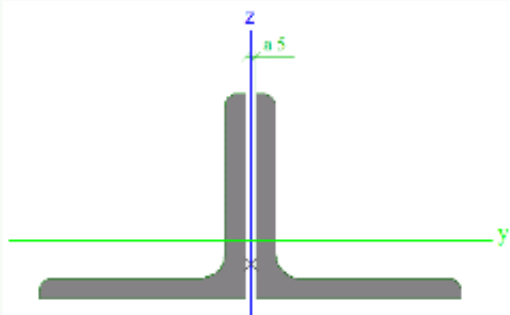
### Santvaros apatinė juosta - 2\*L100x10mm

Nuo ugnies neapsaugoto elemento skaičiavimas pagal vardinę temperatūros ir laiko kreivę

**$b := 100 \text{ mm}$**

**$h := 100 \text{ mm}$**

**$t_w := 10 \text{ mm}$**



$\gamma_{M0} := 1$

$\gamma_{M,fi} := 1$

Skerspjūvio klasė:

**$f_y := 235 \text{ MPa}$**  - plieno stipris pagal takumo ribą

Elementas yra tempiamas - skerspjūvio klasė 1

Profilio charakteristikos:

<b><math>A := 3.8315 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2</math></b>	<b><math>W_{el,y} := 4.9207 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3</math></b>
<b><math>I_y := 3.5323 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4</math></b>	<b><math>W_{el,z} := 6.9730 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3</math></b>
<b><math>I_z := 7.1473 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4</math></b>	<b><math>W_{pl,y} := 8.9730 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3</math></b>
	<b><math>W_{pl,z} := 1.1769 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3</math></b>

Veikiančios jėgos:

**$G_k := 6.5 \text{ kN}$**

**$Q_k := 21.60 \text{ kN}$**

Daliniai koeficientai:

$\psi_G := 1.35$

$\psi_{Q,1} := 1.3$

$\psi_{0,1} := 0.5$  - sniego koeficientas

$\psi_{fi} := \psi_{0,1} = 0.5$

Įrašos:

**$N_{fi,Ed} := 138.13 \text{ kN}$**

**$M_{fi,Ed} := 0.84 \text{ kN} \cdot \text{m}$**

Laikomoji galia normalioje temperatūroje:

**$N_{Rd} := f_y \cdot A = 900.403 \text{ kN}$**

**$M_{Rd} := W_{pl,z} \cdot f_y = 27.657 \text{ kN} \cdot \text{m}$**

Išnaudojimo koeficientai:

$$\mu_{0,N} := \frac{N_{f_i,Ed}}{N_{Rd}} = 0.153$$

$$\mu_{0,M} := \frac{M_{f_i,Ed}}{M_{Rd}} = 0.03$$

$$\mu_0 := \max(\mu_{0,N}, \mu_{0,M}) = 0.153$$

### **1. Kritinė plieninio elemento temperatūra**

Išnaudojimo koeficientas tempiamam elementui priimamas mažiau konservatyvus, nei gniuždomam elementui:

$$\mu_0 = 0.153$$

Turint išnaudojimo koeficientą, apskaičiuojama kritinė elemento temperatūra  $\Theta_{cr}$ :

$$\Theta_{cr} := 39.19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1\right) + 482 = 764.871$$

### **2. Plieninio elemento masyvumo koeficientas ir šėšėlio poveikio koeficientas**

Elemento masyvumo koeficientas (kampuotis, ugnies veikiamas iš visų pusių) :

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2}{t_w} \quad , \text{ kai } t_w \text{ yra kampuočio sienutės storis}$$

$$t_w = 10 \text{ mm}$$

$$MK := \frac{2}{t_w} = 200 \frac{1}{m}$$

Dėžinis masyvumo koeficientas  $MK_{box}$ :

$$A_m := 38.95 \text{ cm} \quad - \text{ skerspjūvio L100x10 perimetras}$$

$$P := \frac{A}{2} = 19.158 \text{ cm}^2 \quad - \text{ skerspjūvio L100x10 plotas}$$

$$MK_{box} := \frac{(A_m - 10 \text{ cm}) \cdot 2}{2 \cdot P} = 151.116 \frac{1}{m}$$

$$k_{sh} := \frac{MK_{box}}{MK} = 0.756$$

$$\Theta_{cr} = 764.871$$

$$MK := MK \cdot 1 \text{ m} = 200$$

### 3. Plieninio elemento vidaus temperatūra po 45min

```

Vid_temp_θai :=
  t0 ← 0
  θg,t,0 ← 20 + 345 · log(8 · t0 + 1)
  Δt ← 3
  ca ← 489
  ρa ← 7850
  t ← t0 +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
  θa,i,0 ← 20
  θg,t,1 ← (20 + 345 · log(8 · t + 1))
  hnet,r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\theta_{g,t,0} + 273)^4 + (\theta_{g,t,1} + 273)^4}{2} - (\theta_{a,i,0} + 273)^4 \right)$ 
  hnet,c ← 25 ·  $\left( \frac{\theta_{g,t,0} + \theta_{g,t,1}}{2} - \theta_{a,i,0} \right)$ 
  hnet,d ← hnet,r + hnet,c
  Δθa,t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t$ 
  θa,i ← θa,i,0 + Δθa,t
  while t < 45
    ca ← if 20 ≤ θa,i ≤ 600
      | 425 + 7.73 · 10-1 · θa,i - 1.69 · 10-3 · θa,i2 + 2.22 · 10-6 · θa,i3
    else if 600 < θa,i ≤ 735
      | 666 +  $\frac{13002}{738 - \theta_{a,i}}$ 
    else if 735 < θa,i ≤ 900
      | 545 +  $\frac{17820}{\theta_{a,i} - 731}$ 
    else if 900 < θa,i ≤ 1200
      | 650
    θg,t,1 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    t ← t +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
    θg,t,2 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    hnet,r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\theta_{g,t,1} + 273)^4 + (\theta_{g,t,2} + 273)^4}{2} - (\theta_{a,i} + 273)^4 \right)$ 
    hnet,c ← 25 ·  $\left( \frac{\theta_{g,t,1} + \theta_{g,t,2}}{2} - \theta_{a,i} \right)$ 
    hnet,d ← hnet,r + hnet,c
    Δθa,t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t$ 
    θa,i ← θa,i + Δθa,t
  θa,i

```

Vid\_temp\_θ<sub>ai</sub> = 895.346

#### 4. Plieninio elemento atsparumas ugniai minutėmis

```

Atsp_ugn_Rf :=
|
| t0 ← 0
| Θg.t.0 ← 20 + 345 · log(8 · t0 + 1)
| Δt ← 3
| ca ← 489
| ρa ← 7850
| t ← t0 +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
| Θa.i.0 ← 20
| Θg.t.1 ← (20 + 345 · log(8 · t + 1))
| hnet.r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\Theta_{g.t.0} + 273)^4 + (\Theta_{g.t.1} + 273)^4}{2} - (\Theta_{a.i.0} + 273)^4 \right)$ 
| hnet.c ← 25 ·  $\left( \frac{\Theta_{g.t.0} + \Theta_{g.t.1}}{2} - \Theta_{a.i.0} \right)$ 
| hnet.d ← hnet.r + hnet.c
| ΔΘa.t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net.d} \cdot \Delta t$ 
| Θa.i ← Θa.i.0 + ΔΘa.t
| while Θa.i < Θcr
|   | ca ← if 20 ≤ Θa.i ≤ 600
|     | 425 + 7.73 · 10-1 · Θa.i - 1.69 · 10-3 · Θa.i2 + 2.22 · 10-6 · Θa.i3
|     | else if 600 < Θa.i ≤ 735
|     |   | 666 +  $\frac{13002}{738 - \Theta_{a.i}}$ 
|     |   | else if 735 < Θa.i ≤ 900
|     |   |   | 545 +  $\frac{17820}{\Theta_{a.i} - 731}$ 
|     |   |   | else if 900 < Θa.i ≤ 1200
|     |   |   |   | 650
|     |   |   |   | Θg.t.1 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
|     |   |   |   | t ← t +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
|     |   |   |   | Θg.t.2 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
|     |   |   |   | hnet.r ← 3.969 · 10-8 ·  $\left( \frac{(\Theta_{g.t.1} + 273)^4 + (\Theta_{g.t.2} + 273)^4}{2} - (\Theta_{a.i} + 273)^4 \right)$ 
|     |   |   |   | hnet.c ← 25 ·  $\left( \frac{\Theta_{g.t.1} + \Theta_{g.t.2}}{2} - \Theta_{a.i} \right)$ 
|     |   |   |   | hnet.d ← hnet.r + hnet.c
|     |   |   |   | ΔΘa.t ←  $\frac{k_{sh}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot MK \cdot h_{net.d} \cdot \Delta t$ 
|     |   |   |   | Θa.i ← Θa.i + ΔΘa.t
|     |   |   |   | t
|

```

Atsp\_ugn\_Rf = 25.8 min

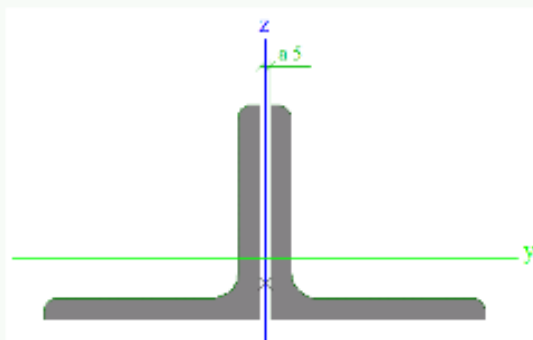
## Santvaros apatinė juosta - 2\*L100x10mm

Nuo ugnies apsaugoto elemento skaičiavimas pagal  
vardinę temperatūros ir laiko krivę

$$b := 100 \text{ mm}$$

$$h := 100 \text{ mm}$$

$$t_w := 10 \text{ mm}$$



$$\gamma_{M0} := 1$$

$$\gamma_{M,fi} := 1$$

Skerspjūvio klasė:

$$f_y := 235 \text{ MPa}$$

- plieno stipris pagal takumo ribą

Elementas yra tempiamas - skerspjūvio klasė 1

Profilio charakteristikos:

$$A := 3.8315 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$W_{el,y} := 4.9207 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$I_y := 3.5323 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_{el,z} := 6.9730 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$I_z := 7.1473 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_{pl,y} := 8.9730 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{pl,z} := 1.1769 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Veikiančios jėgos:

$$G_k := 6.5 \text{ kN}$$

Daliniai koeficientai:

$$\psi_G := 1.35$$

$$Q_k := 21.60 \text{ kN}$$

$$\psi_{Q,1} := 1.3$$

$$\psi_{0,1} := 0.5 \quad \text{- sniego koeficientas}$$

$$\psi_{fi} := \psi_{0,1} = 0.5$$

Įrašos:

$$N_{fi,Ed} := 138.13 \text{ kN}$$

$$M_{fi,Ed} := 0.84 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Laikomoji galia normalioje temperatūroje:

$$N_{Rd} := f_y \cdot A = 900.403 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} := W_{pl,z} \cdot f_y = 27.657 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Išnaudojimo koeficientai:

$$\mu_{0,N} := \frac{N_{fi,Ed}}{N_{Rd}} = 0.153$$

$$\mu_{0,M} := \frac{M_{fi,Ed}}{M_{Rd}} = 0.03$$

$$\mu_0 := \max(\mu_{0,N}, \mu_{0,M}) = 0.153$$

### **1. Kritinė plieninio elemento temperatūra**

Išnaudojimo koeficientas tempiamam elementui priimamas mažiau konservatyvus, nei gniuždomam elementui:

$$\mu_0 = 0.153$$

Turint išnaudojimo koeficientą, apskaičiuojama kritinė elemento temperatūra  $\Theta_{cr}$ :

$$\Theta_{cr} := 39.19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1\right) + 482 = 764.871$$

### **2. Nuo ugnies apsaugoto plieninio elemento masyvumo koeficientas**

Apsaugos nuo gaisro izoliuotų plieninių elementų masyvumo koeficientas (kampuotis, ugnies veikiamas iš visų pusių):

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2}{t_w}, \text{ kai } t_w \text{ yra kampuočio sienutės storis}$$

$$t_w = 10 \text{ mm}$$

$$MK_p := \frac{2}{t_w} = 200 \frac{1}{m} \quad MK_p := MK_p \cdot 1 \text{ m} = 200$$

### **3. Apsaugos nuo gaisro mechaninės charakteristikos**

Apsaugai nuo gaisro naudojamas purškiamasis priešgaisrinis sluoksnis - PROMOSPRAY-P300. Charakteristikos:

Tūris:

$$\rho_p := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Šilumos laidumas:

$$\lambda_p := 0.078 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Specifinė šiluma:

$$c_p := 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Storis:

$$d_p := 8 \text{ mm}$$

#### 4. Plieninio elemento vidaus temperatūra po 45min

```

Aps_vid_temp_θa,i :=
  t0 ← 0
  θg,t,0 ← 20 + 345 · log(8 · t0 + 1)
  Δt ← 3
  ρp ← 350
  cp ← 1000
  λp ← 0.078
  dp ← 0.008
  ca ← 489
  ρa ← 7850
  t ← t0 +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
  θa,i,0 ← 20
  θg,t,1 ← (20 + 345 · log(8 · t + 1))
  Δθg,t ← θg,t,1 - θg,t,0
  φ ←  $\frac{c_p \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot MK_p}{c_a \cdot \rho_a}$ 
  Δθa,t ←  $\frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t,1} - \theta_{a,i,0}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta \theta_{g,t}$ 
  Δθa,t ← if Δθa,t > 0
    || Δθa,t
    else
    || 0
  θa,i ← θa,i,0 + Δθa,t
  while t < 45
    ca ← if 20 ≤ θa,i ≤ 600
      || 425 + 7.73 · 10-1 · θa,i - 1.69 · 10-3 · θa,i2 + 2.22 · 10-6 · θa,i3
      else if 600 < θa,i ≤ 735
      || 666 +  $\frac{13002}{738 - \theta_{a,i}}$ 
      else if 735 < θa,i ≤ 900
      || 545 +  $\frac{17820}{\theta_{a,i} - 731}$ 
      else if 900 < θa,i ≤ 1200
      || 650
    θg,t,1 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    t ← t +  $\frac{\Delta t}{60}$ 
    θg,t,2 ← 20 + 345 · log(8 · t + 1)
    Δθg,t ← θg,t,2 - θg,t,1
    Δθa,t ←  $\frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t,1} + \theta_{g,t,2} - \theta_{a,i}}{2} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta \theta_{g,t}$ 

```



```

|||  $\Delta\theta_{a,t} \leftarrow \text{if } \Delta\theta_{a,t} > 0$ 
|||   ||  $\Delta\theta_{a,t}$ 
|||   || else
|||   || 0
|||  $\theta_{a,i} \leftarrow \theta_{a,i} + \Delta\theta_{a,t}$ 
|||  $\theta_{a,i}$ 

```

*Aps\_vid\_temp\_* $\theta_{a,i}$  = 532.561

### **5. Plieninio elemento atsparumas ugniai minutėmis**

```

Atsp_ugn_Rf :=  $t_0 \leftarrow 0$ 
 $\theta_{g,t,0} \leftarrow 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t_0 + 1)$ 
 $\Delta t \leftarrow 3$ 
 $\rho_p \leftarrow 350$ 
 $c_p \leftarrow 1000$ 
 $\lambda_p \leftarrow 0.078$ 
 $d_p \leftarrow 0.008$ 
 $c_a \leftarrow 489$ 
 $\rho_a \leftarrow 7850$ 
 $t \leftarrow t_0 + \frac{\Delta t}{60}$ 
 $\theta_{a,i,0} \leftarrow 20$ 
 $\theta_{g,t,1} \leftarrow (20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1))$ 
 $\Delta\theta_{g,t} \leftarrow \theta_{g,t,1} - \theta_{g,t,0}$ 
 $\phi \leftarrow \frac{c_p \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot MK_p}{c_a \cdot \rho_a}$ 
 $\Delta\theta_{a,t} \leftarrow \frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t,1} - \theta_{a,i,0}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta\theta_{g,t}$ 
|||  $\Delta\theta_{a,t} \leftarrow \text{if } \Delta\theta_{a,t} > 0$ 
|||   ||  $\Delta\theta_{a,t}$ 
|||   || else
|||   || 0
|||  $\theta_{a,i} \leftarrow \theta_{a,i,0} + \Delta\theta_{a,t}$ 
while  $\theta_{a,i} < \theta_{cr}$ 
|||  $c_a \leftarrow \text{if } 20 \leq \theta_{a,i} \leq 600$ 
|||   ||  $425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_{a,i} - 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{a,i}^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{a,i}^3$ 
|||   || else if  $600 < \theta_{a,i} \leq 735$ 
|||   ||  $666 + \frac{13002}{738 - \theta_{a,i}}$ 
|||   || else if  $735 < \theta_{a,i} \leq 900$ 
|||   ||  $545 + \frac{17820}{\theta_{a,i} - 731}$ 
|||   || else if  $900 < \theta_{a,i} \leq 1200$ 
|||   || 650

```

$$\begin{array}{l}
 \theta_{g,t.1} \leftarrow 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \\
 t \leftarrow t + \frac{\Delta t}{60} \\
 \theta_{g,t.2} \leftarrow 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \\
 \Delta\theta_{g,t} \leftarrow \theta_{g,t.2} - \theta_{g,t.1} \\
 \Delta\theta_{a,t} \leftarrow \frac{\lambda_p \cdot MK_p}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t.1} + \theta_{g,t.2} - \theta_{a,i}}{2} \cdot \Delta t - \left( e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta\theta_{g,t} \\
 \Delta\theta_{a,t} \leftarrow \begin{array}{l} \text{if } \Delta\theta_{a,t} > 0 \\ \quad \parallel \Delta\theta_{a,t} \\ \quad \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{array} \\
 \theta_{a,i} \leftarrow \theta_{a,i} + \Delta\theta_{a,t} \\
 t
 \end{array}$$

*Atsp\_ugn\_R<sub>f</sub>* = 103.7 min

**5 priedas. Santvaros viršutinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę**

**5 priedo 1 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros skaičiavimams naudoti dydžiai bei koeficientai

Simbolis formulėje	Vertės bei koeficientai
$k_{sh}$	0,775
$c_a$	Formulė
$\rho_a$	7850 kg/m <sup>3</sup>
MK	166,667
$Q_{cr}$	594,758 °C

**5 priedo 2 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros viršutinės juostos temp. analizės duomenys

Laikas, s	Laikas, min	Temperatūra patalpoje, °C	Temp. šalia plieno, °C	$h_{net,r}$	$h_{net,c}$	$h_{net,d}$	Temp. prieaugis, °C	$c_a$	Laikomoji galia
0	0	20,00	20,00	0,00	-	0,00	-	-	Užtektina
60	1	23,55	20,00	14,44	62,13	76,56	0,17	439,80	Užtektina
120	2	32,42	20,17	32,96	273,51	306,47	0,69	439,80	Užtektina
180	3	45,04	20,86	79,76	625,51	705,27	1,58	439,92	Užtektina
240	4	65,84	22,44	162,23	1154,88	1317,11	2,95	440,41	Užtektina
300	5	96,83	25,40	318,17	1957,86	2276,03	5,09	441,52	Užtektina
360	6	86,16	30,48	364,77	2135,35	2500,13	5,56	443,58	Užtektina
420	7	105,00	36,05	373,30	2083,57	2456,87	5,43	447,06	Užtektina
480	8	126,69	41,47	523,45	2602,98	3126,43	6,85	450,77	Užtektina
540	9	150,25	48,32	720,22	3155,20	3875,42	8,42	454,31	Užtektina
600	10	175,75	56,74	972,39	3718,97	4691,36	10,10	458,66	Užtektina
660	11	203,17	66,84	1295,59	4291,64	5587,23	11,89	463,83	Užtektina
720	12	232,47	78,73	1708,26	4868,05	6576,31	13,82	469,78	Užtektina
780	13	263,62	92,55	2232,35	5442,21	7674,56	15,90	476,47	Užtektina
840	14	296,52	108,46	2893,03	6006,48	8899,51	18,16	483,83	Užtektina
900	15	575,02	126,62	11338,66	10820,39	22159,06	44,48	491,79	Užtektina
960	16	584,89	171,10	19468,41	14309,91	33778,32	66,66	500,29	Užtektina
1020	17	594,38	237,76	19280,94	12315,68	31596,62	60,12	518,91	Užtektina
1080	18	603,49	297,87	18729,61	10537,15	29266,75	53,20	543,09	Užtektina
1140	19	612,25	351,08	17879,22	8987,77	26866,99	47,03	563,98	Užtektina
1200	20	620,67	398,11	16794,33	7642,32	24436,65	41,30	584,15	Užtektina
1260	21	628,73	439,41	15555,11	6485,21	22040,31	35,97	604,96	Užtektina
1320	22	636,47	475,38	14247,92	5502,81	19750,73	31,11	626,70	Užtektina
1380	23	643,90	506,49	13399,39	4679,30	18078,69	27,50	649,04	Užtektina

1440	24	651,09	533,99	12109,92	3972,66	16082,58	23,65	671,42	Užtektina
1500	25	657,99	557,64	10922,61	3391,57	14314,17	20,37	693,91	Užtektina
1560	26	664,64	578,00	9861,43	2915,89	12777,32	17,63	715,49	Užtektina
1620	27	671,05	595,63	8929,54	2527,37	11456,91	15,37	735,88	Viršija
1680	28	677,22	611,01	8119,50	2209,54	10329,04	13,51	754,98	Viršija
1740	29	683,16	624,51	7420,54	1948,72	9369,26	12,04	768,38	Viršija
1800	30	688,87	636,55	6810,33	1731,26	8541,59	10,80	780,57	Viršija
1860	31	694,34	647,35	6276,02	1548,79	7824,81	9,73	794,16	Viršija
1920	32	699,58	657,08	5812,03	1395,75	7207,78	8,79	809,44	Viršija
1980	33	704,59	665,87	5410,48	1267,43	6677,92	7,98	826,68	Viršija
2040	34	709,38	673,85	5064,92	1159,81	6224,72	7,26	846,26	Viršija
2100	35	713,94	681,11	4766,09	1069,27	5835,36	6,63	868,67	Viršija
2160	36	718,28	687,74	4508,78	992,90	5501,67	6,07	894,54	Viršija
2220	37	722,39	693,81	4285,34	928,25	5213,60	5,57	924,70	Viršija
2280	38	726,29	699,38	4094,04	873,61	4967,65	5,11	960,25	Viršija
2340	39	729,99	704,49	3932,07	827,85	4759,92	4,69	1002,66	Viršija
2400	40	731,62	709,17	3493,86	757,09	4250,94	3,98	1053,97	Viršija
2460	41	720,81	713,16	1179,04	457,07	1636,11	1,45	1117,05	Viršija
2520	42	707,61	714,60	-1057,95	-13,72	-1071,66	-0,89	1189,34	Viršija
2580	43	692,31	713,71	-3159,92	-481,38	-3641,31	-2,94	1221,69	Viršija
2640	44	675,14	710,77	-5100,01	-946,62	-6046,63	-4,97	1201,33	Viršija
2700	45	656,31	705,80	-6827,72	-1402,64	-8230,36	-7,11	1143,48	Viršija
2760	46	636,01	698,69	-8284,30	-1838,71	-10123,01	-9,34	1069,80	Viršija
2820	47	614,40	689,35	-9429,55	-2245,16	-11674,71	-11,56	996,79	Viršija
2880	48	591,61	677,79	-10255,31	-2617,46	-12872,77	-13,62	933,27	Viršija
2940	49	567,75	664,17	-10785,51	-2957,22	-13742,72	-15,38	881,94	Viršija
3000	50	542,95	648,79	-11062,52	-3270,33	-14332,85	-16,80	842,11	Viršija
3060	51	517,30	631,98	-11139,55	-3565,09	-14704,64	-17,88	811,74	Viršija
3120	52	490,88	614,10	-11065,54	-3850,37	-14915,91	-18,67	788,64	Viršija
3180	53	463,78	595,43	-10878,55	-4133,43	-15011,98	-19,09	776,50	Viršija
3240	54	436,06	576,34	-10621,69	-4424,75	-15046,44	-19,68	754,74	Užtektina
3300	55	407,79	556,66	-10279,54	-4715,70	-14995,24	-20,17	734,15	Užtektina
3360	56	379,04	536,49	-9868,34	-5007,77	-14876,11	-20,55	714,55	Užtektina
3420	57	349,85	515,94	-9403,22	-5302,34	-14705,56	-20,86	696,09	Užtektina
3480	58	320,27	495,08	-8896,97	-5600,83	-14497,80	-21,08	678,85	Užtektina
3540	59	290,33	474,00	-8361,40	-5904,47	-14265,87	-21,25	662,86	Užtektina
3600	60	260,04	452,75	-7806,96	-6214,84	-14021,80	-21,36	648,12	Užtektina

**5 priedo 3 lentelė.** Nuo ugnies apsaugotos santvaros skaičiavimams naudoti dydžiai bei koeficientai

Simbolis formulėje	Vertės bei koeficientai
$\rho_p$	350 kg/m <sup>3</sup>
$c_p$	1 J/mK
$\lambda_p$	0,078 W/mK
$d_p$	0,008 m
$c_a$	Formulė
$\rho_a$	7850 kg/m <sup>3</sup>
$MK_p$	166,667
$Q_{cr}$	594,758 °C

**5 priedo 4 lentelė.** Nuo ugnies apsaugotos santvaros viršutinės juostos temp. analizės duomenys

Laikas, min	Temperatūra patalpoje, °C	$Q_{a.i.0}$	$\Delta Q_{gt}$	$\varphi$	$\Delta Q_{at}$	$Q_{a.i.}$	$c_a$	Laikomoji galia
0	20,00	20,00	-	0,135	0,00	20,00	439,00	Užtektina
1	23,55	20,00	3,55	0,135	0,05	20,05	439,80	Užtektina
2	32,42	20,05	8,87	0,135	0,21	20,21	439,80	Užtektina
3	45,04	20,21	12,62	0,135	0,50	20,55	439,84	Užtektina
4	65,84	20,55	20,80	0,135	0,94	21,15	439,95	Užtektina
5	96,83	21,15	30,99	0,135	1,62	22,17	440,19	Užtektina
6	86,16	22,17	0,00	0,135	1,73	22,88	440,62	Užtektina
7	105,00	22,88	18,84	0,135	1,96	24,12	441,33	Užtektina
8	126,69	24,12	21,69	0,135	2,47	25,35	441,83	Užtektina
9	150,25	25,35	23,56	0,134	3,04	27,16	442,70	Užtektina
10	175,75	27,16	25,50	0,134	3,64	28,98	443,54	Užtektina
11	203,17	28,98	27,42	0,134	4,29	31,45	444,79	Užtektina
12	232,47	31,45	29,30	0,133	4,97	33,95	446,04	Užtektina
13	263,62	33,95	31,15	0,133	5,69	37,13	447,71	Užtektina
14	296,52	37,13	32,90	0,132	6,43	40,38	449,38	Užtektina
15	575,02	40,38	278,50	0,132	10,40	47,53	451,49	Užtektina
16	584,89	47,53	9,87	0,131	13,97	54,35	453,60	Užtektina
17	594,38	54,35	9,49	0,130	13,91	61,44	458,16	Užtektina
18	603,49	61,44	9,11	0,129	13,84	68,19	462,38	Užtektina
19	612,25	68,19	8,76	0,127	13,78	75,22	466,63	Užtektina
20	620,67	75,22	8,42	0,126	13,71	81,90	470,56	Užtektina
21	628,73	81,90	8,06	0,125	13,64	88,86	474,53	Užtektina
22	636,47	88,86	7,74	0,124	13,56	95,46	478,19	Užtektina
23	643,90	95,46	7,43	0,123	13,48	102,34	481,90	Užtektina
24	651,09	102,34	7,19	0,122	13,40	108,86	485,32	Užtektina

25	657,99	108,86	6,90	0,122	13,33	115,67	488,79	Užtektina
26	664,64	115,67	6,65	0,121	13,24	122,11	491,99	Užtektina
27	671,05	122,11	6,41	0,120	13,16	128,83	495,24	Užtektina
28	677,22	128,83	6,17	0,119	13,07	135,18	498,23	Užtektina
29	683,16	135,18	5,94	0,119	12,99	141,82	501,28	Užtektina
30	688,87	141,82	5,71	0,118	12,90	148,08	504,10	Užtektina
31	694,34	148,08	5,47	0,117	12,82	154,63	506,97	Užtektina
32	699,58	154,63	5,24	0,117	12,72	160,80	509,62	Užtektina
33	704,59	160,80	5,01	0,116	12,63	167,27	512,33	Užtektina
34	709,38	167,27	4,79	0,115	12,54	173,34	514,83	Užtektina
35	713,94	173,34	4,56	0,115	12,45	179,71	517,40	Užtektina
36	718,28	179,71	4,34	0,114	12,35	185,69	519,78	Užtektina
37	722,39	185,69	4,11	0,114	12,25	191,96	522,22	Užtektina
38	726,29	191,96	3,90	0,113	12,15	197,84	524,48	Užtektina
39	729,99	197,84	3,70	0,113	12,05	204,01	526,82	Užtektina
40	731,62	204,01	1,63	0,112	11,92	209,76	528,97	Užtektina
41	720,81	209,76	0,00	0,112	11,52	215,53	531,21	Užtektina
42	707,61	215,53	0,00	0,111	11,05	220,81	533,27	Užtektina
43	692,31	220,81	0,00	0,111	10,55	226,08	535,33	Užtektina
44	675,14	226,08	0,00	0,111	10,01	230,82	537,19	Užtektina
45	656,31	230,82	0,00	0,110	9,46	235,54	539,03	Užtektina
46	636,01	235,54	0,00	0,110	8,87	239,70	540,69	Užtektina
47	614,40	239,70	0,00	0,110	8,28	243,82	542,32	Užtektina
48	591,61	243,82	0,00	0,109	7,66	247,36	543,76	Užtektina
49	567,75	247,36	0,00	0,109	7,04	250,86	545,18	Užtektina
50	542,95	250,86	0,00	0,109	6,41	253,77	546,40	Užtektina
51	517,30	253,77	0,00	0,109	5,77	256,63	547,61	Užtektina
52	490,88	256,63	0,00	0,108	5,12	258,89	548,61	Užtektina
53	463,78	258,89	0,00	0,108	4,47	261,10	549,59	Užtektina
54	436,06	261,10	0,00	0,108	3,81	262,70	550,37	Užtektina
55	407,79	262,70	0,00	0,108	3,16	264,25	551,13	Užtektina
56	379,04	264,25	0,00	0,108	2,49	265,19	551,69	Užtektina
57	349,85	265,19	0,00	0,108	1,84	266,09	552,22	Užtektina
58	320,27	266,09	0,00	0,108	1,18	266,37	552,55	Užtektina
59	290,33	266,37	0,00	0,108	0,52	266,61	552,85	Užtektina
60	260,04	266,61	0,00	0,108	-0,14	266,23	552,95	Užtektina

**6 priedas. Santvaros apatinės juostos temperatūrinės analizės duomenys apskaičiuoti rankiniu būdu pagal natūralaus gaisro temperatūros ir laiko kreivę**

**6 priedo 1 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros skaičiavimams naudoti dydžiai bei koeficientai

Simbolis formulėje	Vertės bei koeficientai
$k_{sh}$	0,756
$c_a$	Formulė
$\rho_a$	7850 kg/m <sup>3</sup>
MK	200,0
$Q_{cr}$	764,87 °C

**6 priedo 2 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros apatinės juostos temp. analizės duomenys

Laikas, s	Laikas, min	Temperatūra patalpoje, °C	Temp. šalia plieno, °C	$h_{net,r}$	$h_{net,c}$	$h_{net,d}$	Temp. priaugis, °C	$c_a$	Laikomoji galia
0	0	20,00	20,00	0,00	-	0,00	-	-	Užtektina
60	1	23,55	20,00	14,44	62,13	76,56	0,20	439,80	Užtektina
120	2	32,42	20,20	32,84	272,49	305,33	0,80	439,80	Užtektina
180	3	45,04	21,00	79,18	620,48	699,66	1,84	439,94	Užtektina
240	4	65,84	22,84	160,60	1140,92	1301,51	3,41	440,51	Užtektina
300	5	96,83	26,26	314,52	1927,73	2242,26	5,87	441,80	Užtektina
360	6	86,16	32,12	357,45	2078,07	2435,52	6,34	444,17	Užtektina
420	7	105,00	38,46	361,88	1999,25	2361,13	6,09	448,16	Užtektina
480	8	126,69	44,55	508,05	2495,46	3003,51	7,67	452,35	Užtektina
540	9	150,25	52,22	699,31	3018,77	3718,08	9,42	456,28	Užtektina
600	10	175,75	61,64	943,91	3547,70	4491,60	11,26	461,07	Užtektina
660	11	203,17	72,90	1256,85	4079,76	5336,62	13,21	466,74	Užtektina
720	12	232,47	86,11	1655,69	4609,94	6265,63	15,30	473,23	Užtektina
780	13	263,62	101,41	2161,14	5132,27	7293,41	17,54	480,45	Užtektina
840	14	296,52	118,95	2796,64	5639,09	8435,73	19,96	488,33	Užtektina
900	15	575,02	138,92	11208,16	10389,85	21598,01	50,24	496,77	Užtektina
960	16	584,89	189,16	19201,51	13677,75	32879,26	75,14	505,72	Užtektina
1020	17	594,38	264,30	18674,24	11386,81	30061,06	66,07	525,78	Užtektina
1080	18	603,49	330,37	17684,58	9399,69	27084,28	56,68	552,24	Užtektina
1140	19	612,25	387,05	16366,28	7728,64	24094,92	48,35	575,97	Užtektina
1200	20	620,67	435,40	14850,20	6337,19	21187,39	40,83	599,74	Užtektina
1260	21	628,73	476,22	13272,23	5196,64	18468,87	34,18	624,42	Užtektina
1320	22	636,47	510,41	11748,13	4276,77	16024,90	28,51	649,61	Užtektina
1380	23	643,90	538,91	10804,95	3544,45	14349,40	24,59	674,46	Užtektina
1440	24	651,09	563,50	9509,22	2939,75	12448,98	20,61	698,22	Užtektina
1500	25	657,99	584,11	8396,71	2465,15	10861,86	17,41	721,18	Užtektina
1560	26	664,64	601,51	7464,12	2093,07	9557,19	14,88	742,33	Užtektina

1620	27	671,05	616,39	6691,07	1800,87	8491,94	12,88	761,65	Užtektina
1680	28	677,22	629,28	6052,63	1570,05	7622,68	11,30	779,28	Užtektina
1740	29	683,16	640,58	5526,08	1386,32	6912,40	10,17	785,59	Užtektina
1800	30	688,87	650,75	5073,97	1234,29	6308,26	9,12	799,46	Užtektina
1860	31	694,34	659,87	4695,23	1110,78	5806,01	8,23	815,02	Užtektina
1920	32	699,58	668,10	4379,20	1010,06	5389,25	7,48	832,41	Užtektina
1980	33	704,59	675,58	4114,65	927,56	5042,21	6,84	852,01	Užtektina
2040	34	709,38	682,42	3893,51	859,68	4753,19	6,28	874,31	Užtektina
2100	35	713,94	688,71	3706,11	803,41	4509,52	5,79	899,94	Užtektina
2160	36	718,28	694,50	3547,71	756,48	4304,19	5,35	929,76	Užtektina
2220	37	722,39	699,85	3411,65	717,10	4128,75	4,95	964,87	Užtektina
2280	38	726,29	704,79	3297,49	684,20	3981,69	4,57	1006,78	Užtektina
2340	39	729,99	709,36	3203,81	657,23	3861,04	4,22	1057,53	Užtektina
2400	40	731,62	713,58	2826,41	602,83	3429,23	3,54	1120,01	Užtektina
2460	41	720,81	717,12	571,85	318,33	890,18	0,86	1198,46	Užtektina
2520	42	707,61	717,98	-1576,94	-131,89	-1708,83	-1,53	1288,70	Užtektina
2580	43	692,31	716,45	-3578,56	-577,05	-4155,61	-3,65	1315,39	Užtektina
2640	44	675,14	712,79	-5407,06	-1017,49	-6424,55	-5,85	1269,22	Užtektina
2700	45	656,31	706,94	-6998,40	-1442,70	-8441,10	-8,25	1181,85	Užtektina
2760	46	636,01	698,69	-8283,76	-1838,58	-10122,34	-10,78	1084,68	Užtektina
2820	47	614,40	687,91	-9225,33	-2194,54	-11419,87	-13,24	996,76	Užtektina
2880	48	591,61	674,67	-9831,14	-2508,12	-12339,26	-15,41	925,55	Užtektina
2940	49	567,75	659,26	-10148,46	-2785,25	-12933,70	-17,16	871,29	Užtektina
3000	50	542,95	642,10	-10240,29	-3036,37	-13276,66	-18,46	831,12	Užtektina
3060	51	517,30	623,64	-10171,38	-3273,10	-13444,49	-19,38	801,58	Užtektina
3120	52	490,88	604,26	-9992,80	-3505,91	-13498,71	-20,01	779,70	Užtektina
3180	53	463,78	584,25	-9738,63	-3742,24	-13480,86	-20,37	764,83	Užtektina
3240	54	436,06	563,88	-9436,09	-3988,64	-13424,73	-20,90	742,49	Užtektina
3300	55	407,79	542,99	-9070,14	-4237,13	-13307,27	-21,31	721,55	Užtektina
3360	56	379,04	521,67	-8654,01	-4489,01	-13143,02	-21,64	701,86	Užtektina
3420	57	349,85	500,03	-8199,95	-4745,53	-12945,48	-21,89	683,50	Užtektina
3480	58	320,27	478,14	-7718,02	-5007,91	-12725,93	-22,07	666,52	Užtektina
3540	59	290,33	456,08	-7217,44	-5277,23	-12494,68	-22,18	650,91	Užtektina
3600	60	260,04	433,89	-6706,37	-5554,82	-12261,19	-22,26	636,62	Užtektina



**6 priedo 3 lentelė.** Nuo ugnies saugotos santvaros skaičiavimams naudoti dydžiai bei koeficientai

Simbolis formulėje	Vertės bei koeficientai
$\rho_p$	350 kg/m <sup>3</sup>
$c_p$	1 J/mK
$\lambda_p$	0,078 W/mK
$d_p$	0,008 m
$c_a$	Formulė
$\rho_a$	7850 kg/m <sup>3</sup>
$MK_p$	200
$Q_{cr}$	764,87 °C

**6 priedo 4 lentelė.** Nuo ugnies neapsaugotos santvaros apatinės juostos temp. analizės duomenys

Laikas, min	Temperatūra patalpoje, °C	$Q_{a,i,0}$	$\Delta Q_{g,t}$	$\phi$	$\Delta Q_{a,t}$	$Q_{a,i}$	$c_a$	Laikomoji galia	Laikas, min
0	0	20,00	20,00	-	0,163	0,00	20,00	439,00	Užtektina
60	1	23,55	20,00	3,55	0,162	0,06	20,06	439,80	Užtektina
120	2	32,42	20,06	8,87	0,162	0,25	20,25	439,80	Užtektina
180	3	45,04	20,25	12,62	0,162	0,59	20,65	439,84	Užtektina
240	4	65,84	20,65	20,80	0,162	1,11	21,36	439,98	Užtektina
300	5	96,83	21,36	30,99	0,162	1,92	22,56	440,26	Užtektina
360	6	86,16	22,56	0,00	0,162	2,04	23,41	440,77	Užtektina
420	7	105,00	23,41	18,84	0,162	2,31	24,87	441,61	Užtektina
480	8	126,69	24,87	21,69	0,161	2,90	26,31	442,19	Užtektina
540	9	150,25	26,31	23,56	0,161	3,57	28,44	443,21	Užtektina
600	10	175,75	28,44	25,50	0,161	4,28	30,59	444,21	Užtektina
660	11	203,17	30,59	27,42	0,160	5,04	33,48	445,67	Užtektina
720	12	232,47	33,48	29,30	0,160	5,83	36,41	447,13	Užtektina
780	13	263,62	36,41	31,15	0,159	6,66	40,14	449,07	Užtektina
840	14	296,52	40,14	32,90	0,158	7,52	43,94	451,01	Užtektina
900	15	575,02	43,94	278,50	0,157	12,17	52,31	453,45	Užtektina
960	16	584,89	52,31	9,87	0,156	16,39	60,33	455,89	Užtektina
1020	17	594,38	60,33	9,49	0,155	16,27	68,58	461,13	Užtektina
1080	18	603,49	68,58	9,11	0,153	16,14	76,47	465,97	Užtektina
1140	19	612,25	76,47	8,76	0,152	16,01	84,59	470,78	Užtektina
1200	20	620,67	84,59	8,42	0,150	15,88	92,35	475,22	Užtektina
1260	21	628,73	92,35	8,06	0,149	15,76	100,35	479,64	Užtektina
1320	22	636,47	100,35	7,74	0,147	15,63	107,98	483,72	Užtektina
1380	23	643,90	107,98	7,43	0,146	15,50	115,86	487,80	Užtektina
1440	24	651,09	115,86	7,19	0,145	15,37	123,36	491,56	Užtektina

1500	25	657,99	123,36	6,90	0,144	15,25	131,11	495,33	Užtektina
1560	26	664,64	131,11	6,65	0,143	15,12	138,48	498,81	Užtektina
1620	27	671,05	138,48	6,41	0,142	15,00	146,10	502,30	Užtektina
1680	28	677,22	146,10	6,17	0,141	14,87	153,35	505,53	Užtektina
1740	29	683,16	153,35	5,94	0,140	14,74	160,85	508,79	Užtektina
1800	30	688,87	160,85	5,71	0,139	14,61	167,96	511,80	Užtektina
1860	31	694,34	167,96	5,47	0,139	14,49	175,34	514,85	Užtektina
1920	32	699,58	175,34	5,24	0,138	14,36	182,32	517,68	Užtektina
1980	33	704,59	182,32	5,01	0,137	14,23	189,57	520,55	Užtektina
2040	34	709,38	189,57	4,79	0,136	14,10	196,42	523,21	Užtektina
2100	35	713,94	196,42	4,56	0,136	13,97	203,54	525,93	Užtektina
2160	36	718,28	203,54	4,34	0,135	13,83	210,25	528,45	Užtektina
2220	37	722,39	210,25	4,11	0,134	13,70	217,24	531,04	Užtektina
2280	38	726,29	217,24	3,90	0,134	13,56	223,81	533,45	Užtektina
2340	39	729,99	223,81	3,70	0,133	13,43	230,67	535,93	Užtektina
2400	40	731,62	230,67	1,63	0,133	13,26	237,08	538,24	Užtektina
2460	41	720,81	237,08	0,00	0,132	12,77	243,44	540,63	Užtektina
2520	42	707,61	243,44	0,00	0,131	12,21	249,29	542,85	Užtektina
2580	43	692,31	249,29	0,00	0,131	11,61	255,05	545,05	Užtektina
2640	44	675,14	255,05	0,00	0,130	10,97	260,25	547,07	Užtektina
2700	45	656,31	260,25	0,00	0,130	10,30	265,36	549,05	Užtektina
2760	46	636,01	265,36	0,00	0,130	9,61	269,87	550,84	Užtektina
2820	47	614,40	269,87	0,00	0,129	8,91	274,27	552,60	Užtektina
2880	48	591,61	274,27	0,00	0,129	8,18	278,05	554,16	Užtektina
2940	49	567,75	278,05	0,00	0,128	7,45	281,72	555,68	Užtektina
3000	50	542,95	281,72	0,00	0,128	6,70	284,76	557,00	Užtektina
3060	51	517,30	284,76	0,00	0,128	5,95	287,67	558,28	Užtektina
3120	52	490,88	287,67	0,00	0,128	5,19	289,95	559,34	Užtektina
3180	53	463,78	289,95	0,00	0,127	4,44	292,11	560,36	Užtektina
3240	54	436,06	292,11	0,00	0,127	3,67	293,62	561,17	Užtektina
3300	55	407,79	293,62	0,00	0,127	2,91	295,01	561,93	Užtektina
3360	56	379,04	295,01	0,00	0,127	2,14	295,75	562,46	Užtektina
3420	57	349,85	295,75	0,00	0,127	1,37	296,39	562,96	Užtektina
3480	58	320,27	296,39	0,00	0,127	0,61	296,36	563,22	Užtektina
3540	59	290,33	296,36	0,00	0,127	-0,15	296,23	563,45	Užtektina
3600	60	260,04	296,23	0,00	0,127	-0,92	295,44	563,44	Užtektina