



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Andžej Denkovski

**TEMPERATŪRŲ PASISKIRSTYMO GELŽBETONINĖSE PLOKŠTĖSE
NUSTATYMAS, TAIKANT SLUOKSNIŲ MODELĮ**

**LAYERED MODEL FOR ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN REINFORCED CONCRETE SLABS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 62402T107

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

G. Kaklauskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

Andžej Denkovski

**TEMPERATŪRŲ PASISKIRSTYMO GELŽBETONINĖSE PLOKŠTĖSE
NUSTATYMAS, TAIKANT SLUOKSNIŲ MODELĮ**

**LAYERED MODEL FOR ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN REINFORCED CONCRETE SLABS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6240T107

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Technologijos mokslo sritis

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 62402T107

Tiltų ir viadukų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei)

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

Temperatūros pėsčiųjų lygties galimybės.
viena plokštose nustatymo, taikant stochastinį
modelį

patvirtinta 2011 m. vasario 2 d. dekanų potvarkiu Nr. 14-st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2011 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti ankstesnės temperatūros vertinimo
galimybių ir betoninių elementų įtempimų
deformacijų būvio analizę, apibūdinti medžiagų
fizinis modelis ir skaičiavimo metodus.
Išvesti skaičiavimo algoritmus temperatūros pėsčiųjų lygties
nustatymui. Pasirinkti metodinius algoritmus mechaninio atspario
algoritmams. Atlikti skaičiavimus ir eksperimentinius rezultatus palyginti

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas

(Parašas)

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Tiltų ir specialiųjų statinių katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **Temperatūrų pasiskirstymo gelžbetoninėse plokštėse nustatymas, taikant sluoksnių modelį**

Autorius **Andžej Denkovski**

Vadovas **doc. dr. Darius Bačinskas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Šiame magistriniame darbe nagrinėjamas temperatūrų pasiskirstymas gelžbetoninėse plokštėse gaisro metu. Darbe sluoksnių modelis pritaikytas aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūros pasiskirstymo nustatymui, įvertinant netiesines šiluminės medžiagų savybes.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: modelių, apibūdinančių medžiagų šiluminės ir fizines mechanines charakteristikas, analizės atlikimas; gelžbetoninių plokščių, veikiamų aukštos temperatūros, temperatūros pasiskirstymo skaičiavimo sluoksnių metodu algoritmo sukūrimas; temperatūros pasiskirstymų ir įlinkių, apskaičiuotų sluoksnių modeliu ir baigtinių elementų metodu, palyginimas su eksperimentinėmis reikšmėmis.

Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, darbo pabaigoje pateikiami pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados, literatūros sąrašas. Taip pat yra keturi priedai.

Įvadiniamame skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas darbo naujumas, struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame aprašomas šilumos perdavimo procesas, pateikti gaisrų scenarijai, pateikta betono ir armatūros modelių analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Antrajame skyriuje aprašytas temperatūrinio uždavinio sluoksnių modelis. Pateikti skaitiniai sluoksnių modelio taikymo pavyzdžiai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Trečiajame skyriuje pateiktas eksperimentinių bei sluoksnių ir baigtinių elementų metodais apskaičiuotų gelžbetoninių plokščių temperatūros pasiskirstymų ir įlinkių palyginimas. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Ketvirtame skyriuje pateikta aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūros pasiskirstymui įtakančių faktorių parametrinė analizė, atlikta su baigtinių elementų programa ATENA. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Darbo gale pateikiami pagrindiniai rezultatai ir išvados.

Prasminiai žodžiai

šilumos perdavimas, konvekcija, radiacija, gaisro kreivės, savitoji šiluminė talpa, šilumos laidumo koeficientas, sluoksnių modelis, temperatūra.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Bridges and Special Structures

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

Master Degree Studies **Building Structures** study programme Master's Thesis

Title **Layered model for analysis of temperature distribution in reinforced concrete slabs**
Author **Andžej Denkovski**
Academic supervisor **Assoc Prof Dr Darius Bačinskas**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

High temperature distribution in reinforced concrete slabs is considered in this master's paper. Layered model was applied for calculations of elevated temperature distribution in reinforced concrete slabs taking into account non-linear thermal properties of materials.

The following main tasks were solved in this work: to perform analysis of models which characterize material thermal and physical-mechanical properties; to develop temperature calculating algorithm based on layered model for reinforced concrete slabs subjected to high temperatures; to compare temperature and deflection results calculated using FE packages and layered model with experimentally obtained data.

Work consists of introduction, four chapters and in the end of the work general results and a conclusion is given. Four annexes are also enclosed.

Topicality of the problem, aims and tasks of the work, scientific novelty are considered in the introduction.

The first chapter presents literature review on different fire scenarios, heat transfer process and presents analysis of concrete and steel models in high temperatures. Conclusions are formulated at the end of the chapter.

The second chapter describes layered model for reinforced concrete slabs under high temperature. A numerical examples of layered model applications is given. Conclusions are formulated at the end of the chapter.

The third chapter presents comparison of temperature distribution and deflection results calculated using FE packages, layered model and experimentally obtained data. Conclusions are formulated at the end of the chapter.

The fourth chapter presents parametric analysis of factors which can influence temperature distribution in reinforced concrete slabs at high temperatures. Analysis is performed with the FE program ATENA. Conclusions are formulated at the end of the chapter.

Results and conclusions are presented at the end of the research.

Keywords

heat transfer, convection, radiation, fire curve, heat capacity, thermal conductivity, layered model, temperature.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2010–2011 m. m.
6 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Andžej Denkovski, 20053921
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos
(Fakultetas)

statinių konstrukcijų, TILfm-09
(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2011 m. birželio 1 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema Temperatūrų
pasiskirstymo gelžbetoninėse plokštėse nustatymas, taikant
sluoksnių modelį
patvirtintas 20 11 m. vasario 2 d. dekanų potvarkiu Nr. 14-st, yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: E. Geda, V. Gribniak, doc. dr. A. J. Kothkus

Mano darbo (projekto) vadovas doc. dr. D. Bačinskas

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

[Parašas]
(Parašas)

Andžej Denkovski
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. AUKŠTŲ TEMPERATŪRŲ POVEIKIS BETONUI IR PLIENUI, JŲ VERTINIMAS	15
1.1 Temperatūros sklidimas konstrukcijose	15
1.2 Gaisrų scenarijai	17
1.2.1 Standartinės gaisro kreivės	18
1.2.2 Natūralus gaisrai, parametrinės gaisrų kreivės pastatuose.....	20
1.2.3 Daugiazoniai gaisro modeliai	20
1.3 Šiluminės medžiagų savybės.....	20
1.3.1 Plienas.....	21
1.3.2 Betonas.....	22
1.4 Fizikinės - mechaninės betono ir armatūros savybės.....	27
1.4.1 Betonas.....	27
1.4.2 Plienas.....	41
1.5 Pirmojo skyriaus išvados ir rezultatai	46
2. TEMPERATŪRINIO UŽDAVINIO SLUOKSNIŲ MODELIS	47
2.1 Paviršiaus temperatūros skaičiavimas.....	47
2.2 Temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje skaičiavimas.....	49
2.3 Šiluminio uždavinio sluoksnių modelis	51
2.4 Šiluminio uždavinio sluoksnių modelio skaitinis pavyzdys	56
2.5 Mechaninio uždavinio sluoksnių modelis	58
2.6 Mechaninio uždavinio sluoksnių modelio skaitinis pavyzdys	60
2.7 Antrojo skyriaus išvados ir rezultatai	64
3. EKSPERIMENTINIŲ IR SKAITINIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS.....	65
3.1 Palyginimui naudotų eksperimentinių duomenų aprašymas.....	65
3.2 Temperatūros pasiskirstymo eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas	69

3.3	Įlinkių eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas.....	72
3.5	Trečiojo skyriaus išvados ir rezultatai	73
4.	ĮVAIRIŲ FAKTORIŲ ĮTAKOS TEMPERATŪROS PASISKIRSTYMU GELŽBETONINĖSE PLOKŠTĖSE PARAMETRINĖ ANALIZĖ	75
4.1	Betono šilumos laidumo koeficiento įtaka.....	75
4.2	Betono savitosios šiluminės talpos įtaka.....	76
4.3	Betono tankio įtaka	77
4.4	Pradinės betono temperatūros įtaka	78
4.5	Šilumos perdavimo konvekcija koeficiento įtaka.....	79
4.6	Ugnies spinduliuotės koeficiento įtaka	80
4.7	Gaisro kreivių įtaka.....	81
4.8	Plokštės skerspjūvio aukščio įtaka.....	82
4.9	Ketvirtojo skyriaus išvados ir rezultatai.....	83
	PAGRINDINIAI DARBO REZULTATAI IR IŠVADOS	85
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	87
	PRIEDAI	91

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Sudėtingi šilumos mainai – šilumos perdavimas.....	15
1.2 pav. Standartiniai gaisro scenarijai (kreivės) tuneliams	18
1.3 pav. Temperatūrinis anglingojo plieno savitosios šiluminės talpos sąryšis.....	21
1.4 pav. Temperatūrinis anglingojo plieno šilumos laidumo sąryšis	22
1.5 pav. Kvarcinio betono savitoji šiluminė talpa c kaip temperatūros funkcija (pagal skirtingus autorius).....	24
1.6 pav. Betono tankio priklausomybė nuo temperatūros, kai betono tankis $2300 \text{ kg} / \text{m}^3$	24
1.7 pav. Betono šilumos laidumo λ_c priklausomybė nuo temperatūros.....	26
1.8 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono gniuždomojo stiprio reikšmių kitimas aukštose temperatūrose (teoriniai rezultatai žymimi nespaltvotomis linijomis, eksperimentiniai – spalvotomis)	31
1.9 pav. Betono gniuždomojo stiprio kitimas aukštose temperatūrose pagal Iljino (Iljin 1979) (raudonos linijos) ir Ambramso (Ambrams 1971) gautuosius eksperimentinius rezultatus	32
1.10 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono tempiamojo stiprio reikšmių kitimas aukštose temperatūrose (teoriniai rezultatai žymimi nespaltvotomis linijomis, eksperimentiniai – spalvotomis)	34
1.11 pav. Iš anksto apkrauto betono pradinio tamprumo modulio priklausomybė nuo temperatūros	36
1.12 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono pradinio tamprumo modulio reikšmių kitimas aukštose temperatūrose (teoriniai rezultatai žymimi nespaltvotomis linijomis, eksperimentiniai – spalvotomis)	37
1.13 pav. Betono deformacijos $\varepsilon_{co}(\theta)$ priklausomybė nuo temperatūros	38
1.14 pav. Betono temperatūrinės deformacijos $\varepsilon_{th}(T, 0)$ priklausomybė nuo temperatūros	40
1.15 pav. Armatūros takumo ribos $f_{sy,\theta}$ priklausomybė nuo temperatūros	43
1.16 pav. Plieno tamprumo modulio $E_{a\theta}$ priklausomybė nuo temperatūros	44
1.17 pav. Plieno šiluminis pailgėjimas	45
2.1 pav. Tinklas (2.9) lygties sprendimui	50
2.2 pav. (2.16) lygties sprendimo schema	51
2.3 pav. Temperatūros pasiskirstymo g/b plokštėse skaičiavimo algoritmo tinklas	52
2.4 pav. Temperatūros pasiskirstymo g/b plokštėse skaičiavimo algoritmo schema	55
2.5 pav. EC2 ir apskaičiuotos paviršiaus temperatūros priklausomybės nuo laiko	56

2.6 pav. EC2 ir apskaičiuotas temperatūrų pasiskirstymas skerspjūvyje įvairiais kaitinimo laikotarpiais	57
2.7 pav. Plokštės konstrukcinė schema ir skerspjūvis (Bačinskas ir kt. 2007).....	61
2.8 pav. Taikytos diagramos: a) temperatūros ir laiko kreivė; b) temperatūrų pasiskirstymas gelžbetoninės plokštės skerspjūvyje (Bačinskas ir kt. 2007)	61
2.9 pav. Gelžbetoninės plokštės temperatūriniai laukai (Geda 2010)	62
2.10 pav. Koeficientų, kuriais įvertinami medžiagų savybių sumažėjimai veikiant temperatūrai, kitimai: a) betono stiprio gniuždant, stiprio tempiant ir tamprumo modulio; b) armatūros takumo ribos ir tamprumo modulio (Bačinskas ir kt. 2007)	62
2.11 pav. Deformacijų kitimas bėgant laikui esant skirtingiems apkrovimams: a) betono viršutinio krašto (gniuždymo deformacija priimta teigiama); b) armatūros (Bačinskas ir kt. 2007)	63
2.12 pav. Deformacijų pasiskirstymas išilgai plokštės per skerspjūvio aukštį esant skirtingiems laikams ir lenkimo momentams (Bačinskas ir kt. 2007)	63
2.13 pav. a) plokštės skerspjūvio vidurio pjūvio kreivio kitimas bėgant laikui esant skirtingiems apkrovimams; b) armatūros ir betono viršutinio krašto įtempių kitimas bėgant laikui, kai išorinis lenkimo momentas 96 kNm (Bačinskas ir kt. 2007)	64
3.1 pav. Plokščių konstrukcinė schema ir skerspjūvis: a) neapkrautos plokštės b) išorine apkrova paveiktos plokštės c) 150 mm skerspjūvio aukščio plokštės d) 250 mm skerspjūvio aukščio plokštės	65
3.2 pav. Eksperimentuose naudotos gaisro kreivės (Cooke 2001)	66
3.3 pav. Eksperimentinių plokščių bandymo skerspjūvis (Cooke 2001).....	67
3.4 pav. Išilginis eksperimentinių plokščių pjūvis, krosnies ir bandymo įrangos tvirtinimo schema (Cooke 2001).....	67
3.5 pav. Eksperimentinių plokščių apkrovimo schema (Cooke 2001).....	68
3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas skerspjūvio aukštyje: a) 150 mm skerspjūvio aukščio plokštės; b) 250 mm skerspjūvio aukščio plokštės (Cooke 2001).....	68
3.7 pav. Eksperimentinių plokščių įlinkiai (Cooke 2001).....	68
3.8 pav. Baigtinių elementų tinklas naudotas plokštės analizei.....	69
3.9 pav. Temperatūros laukų pasiskirstymas plokštėje	69
3.10 pav. Kaitinamos ISO-834 gaisro kreivė 250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių paviršiaus temperatūrų priklausomybių nuo kaitinimo laiko palyginimas	70
3.11 pav. Kaitinamos ISO-834 gaisro kreivė 250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių temperatūrų pasiskirstymo skerspjūvyje palyginimas	70

3.12 Kaitinamos ISO-834 gaisro kreive 150 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių paviršiaus temperatūrų priklausomybių nuo kaitinimo laiko palyginimas	71
3.13 pav. Kaitinamos ISO-834 gaisro kreive 150 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių temperatūrų pasiskirstymo skerspjūvyje palyginimas	71
3.14 pav. Neapkrautų plokščių eksperimentinių įlinkių palyginimas su skaitiniais rezultatais	72
3.15 pav. Apkrautų plokščių eksperimentinių įlinkių palyginimas su skaitiniais rezultatais	72
4.1 pav. $T - t$ diagrama, kintant šilumos laidumo koeficientui $\lambda(T)$	75
4.2 pav. $T - h$ diagramos, kintant šilumos laidumo koeficientui $\lambda(T)$	75
4.3 pav. $T - t$ diagrama, kintant savitajai šiluminei talpai $c(T)$	76
4.4 pav. $T - h$ diagramos, kintant savitajai šiluminei talpai $c(T)$	76
4.5 pav. $T - t$ diagrama, kintant betono tankiui $\rho(T)$	77
4.6 pav. $T - h$ diagramos, kintant betono tankiui $\rho(T)$	78
4.7 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingai pradinei betono temperatūrai	78
4.8 pav. $T - h$ diagramos, esant skirtingai pradinei betono temperatūrai	79
4.9 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingoms šilumos perdavimo konvekcijs koeficiento reikšmėms α_c	79
4.10 pav. $T - h$ diagramos, esant skirtingoms šilumos perdavimo konvekcijs koeficiento reikšmėms	80
4.11 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingoms ugnies spinduliuotės koeficiento reikšmėms ε_f	80
4.12 pav. $T - h$ diagramos, esant skirtingoms ugnies spinduliuotės koeficiento reikšmėms ε_f	81
4.13 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingoms gaisro kreivėms	81
4.14 pav. $T - h$ diagrama, esant skirtingoms gaisro kreivėms	82
4.15 pav. $T - t$ diagrama prie skirtingo plokštės skerspjūvio aukščio	83
4.16 pav. $T - h$ diagrama prie skirtingo plokštės skerspjūvio aukščio	83

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Aukštose temperatūrose, gniuždomojo betono stiprio koeficiento $m_{c,\theta}^0$ reikšmės (Iljin 1979)	29
2 lentelė. Koeficiento β_c , nusakančio betono tamprumo modulio mažėjimą priklausomai nuo kaitinimo temperatūros, reikšmės (Iljin 1979)	35
3 lentelė. Betono temperatūrinio plėtimosi koeficiento α reikšmės (Milovanov 1998)	39
4 lentelė. Plieno, aukštose temperatūrose, stiprio koeficiento reikšmės (Milovanov 1998).....	42
5 lentelė. Koeficiento β_s kitimas, nusakančio plieno tamprumo modulio mažėjimai priklausomai nuo kaitinimo temperatūros (Milovanov 1998).....	43
6 lentelė. Armatūros temperatūrinio plėtimosi koeficiento α_a reikšmės (Milovanov 1998).....	45
7 lentelė. Pradiniai medžiagų parametrai (Bačinskas ir kt. 2007).....	61
8 lentelė. Eksperimentinių plokščių medžiagų parametrai	66
9 lentelė. Parametrinėje analizėje nagrinėtos skerspjūvio bazinės charakteristikos.....	74

IVADAS

Darbo aktualumas. Kasmet Žemėje kyla vidutiniškai apie 8 mln. gaisrų. Nelaimingų atvejų pavyzdžiai gali būti gaisrai AB „Mažeikių nafta“, Ukmergės gelžbetonio gamykloje, Madrido prekybos centre (Ispanijoje), Pasaulio prekybos centre (Niujorke), Ostankino televizijos bokšte (Maskvoje), Mont Blanc tunelyje (Prancūzijos ir Italijos pasienyje) ir kiti. Konstrukciniu požiūriu pastatai ir statiniai gaisro metu turi tam tikrą laiką atlaikyti mechanines apkrovas ir taip užtikrinti saugią žmonių evakuaciją (gelbėjimą) bei saugų ugniagesių darbą. Kad įvertinti gaisro poveikį konstrukcijoms, pirmiausia reikia apskaičiuoti temperatūrų pasiskirstymą jose.

Temperatūrų pasiskirstymui gelžbetoninėse konstrukcijose gaisro metu nustatyti dažniausiai taikomi nesudėtingi analiziniai – empiriniai metodai, kuriais labai sunku įvertinti šiluminių savybių kitimą. Inžinieriai naudoja temperatūrines kreives, pateiktas normatyviniuose statybos techniniuose dokumentuose, tačiau jos skirtos tik tam tikriems atvejams. Taikant šiuolaikines baigtinių elementų programas (DIANA, ATENA, COSMOS ir kt.), teoriškai galima nustatyti daugelio svarbių šiluminių reiškinių įtaką. Deja, įvairiomis programomis apskaičiuoti rezultatai gali skirtis. Taip yra todėl, kad šiuo metu taikomi medžiagų šiluminiai ir fizikiniai modeliai dėl eksperimentinių ir teorinių tyrimų stokos nėra universalūs ir tikslūs. Kitas skaitinių metodų trūkumas yra didelės kompiuterinių išteklių sąnaudos.

Šiame darbe, taikant sluoksnių modelį, siekiama sukurti paprastą (kompiuterinių išteklių prasme) ir tikslų skaičiavimo algoritmą, skirtą temperatūrų pasiskirstymo gelžbetoninėse plokštėse nustatymui aukštose temperatūrose.

Tyrimų objektas ir metodai. Darbe išnagrinėta aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo apskaičiavimo problema. Pasiūlytas skaičiavimo algoritmas, pagrįstas sluoksnių metodu. Modeliuojant įvertintos netiesinės šiluminės medžiagų savybės.

Tyrimų metodika. Darbe taikyti eksperimentiniai, analitiniai ir skaitiniai metodai.

Pagrindinis darbo tikslas. Pritaikyti sluoksnių modelį aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo skerspjūvyje nustatymui.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti aukšta temperatūra ir mechanine apkrova veikiamų gelžbetoninių plokščių šiluminių ir fizikinių - mechaninių savybių bei skaičiavimo metodų apžvalgą.
2. Pritaikyti sluoksnių modelį temperatūrų pasiskirstymui apskaičiuoti.
3. Siūlomo sluoksnių modelio pagalba atlikti šiluminio ir mechaninio uždavinio skaičiavimus.
4. Atlikti eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimo statistinę analizę.
5. Atlikti įvairių faktorių įtakos gelžbetoninių plokščių elgsenai parametrinę analizę.

Naujumas ir originalumas

1. Pasiūlytas aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūros pasiskirstymo apskaičiavimo modelis, kuris rezultatus pateikia kiekvieno sluoksnio, kiekviename laiko žingsnyje. Modelį sudaro paviršiaus temperatūros ir temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje skaičiavimas, įvertinant netiesines šilumines savybes.
2. Eksperimentinių gelžbetoninių plokščių skaičiui atlikti palyginamieji statistiniai temperatūrų pasiskirstymo apskaičiavimai, taikant pasiūlytąjį modelį bei baigtinių elementų programas.
3. Kiekybiškai įvertinta įvairių faktorių, lemiančių aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūrų pokyčius, įtaka.

Darbo struktūra ir apimtis

Darbą sudaro šeši skyriai, iš kurių pirmasis yra įvadas, o paskutinis – rezultatų apibendrinimas. Taip pat yra 4 priedai.

Darbo apimtis (be priedų) yra 90 puslapiai, tekste panaudotos 173 numeruotos formulės, 61 paveikslai ir 9 lentelės. Rašant darbą buvo panaudoti 56 literatūros šaltiniai.

Padėka

Darbo autorius išreikia didelę padėką dr. E. Gedai ir dr. V. Gribniak už suteiktą pagalbą ir konsultacijas rengiant baigiamąjį magistro darbą.

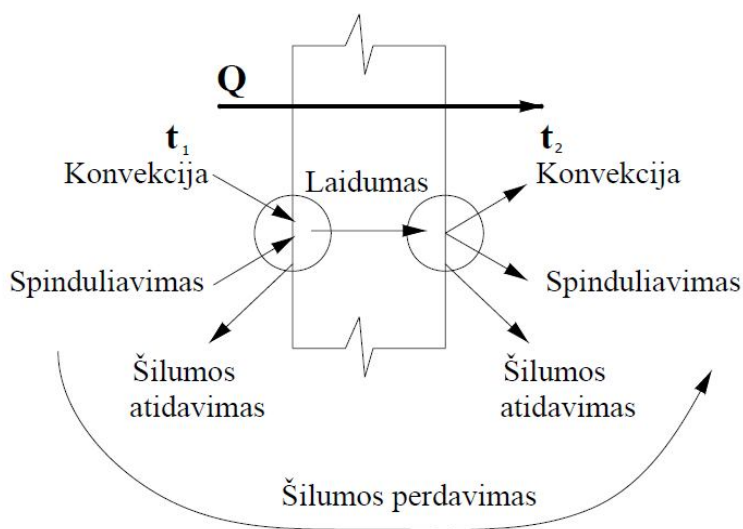
1. AUKŠTŲ TEMPERATŪRŲ POVEIKIS BETONUI IR PLIENUI, JŲ VERTINIMAS

Skyriuje apžvelgiami gaisrų scenarijai, temperatūros sklidimas konstrukcijoje, šiluminės ir mechaninės - fizinės betono ir plieno savybės aukštoje temperatūroje.

Šio skyriaus tikslas – aptarti šilumos perdavimo būdus, išnagrinėti aukštos temperatūros poveikį šiluminėms ir mechaninėms - fizikinėms betono ir plieno savybėms.

1.1 Temperatūros sklidimas konstrukcijose

Šiluma gali sklisti trimis būdais: laidumu, konvekcija, spinduliavimu. Laidumas - tai šilumos plitimas per tiesiogiai besiliečiančias kūno medžiagos daleles, kurių temperatūra skirtinga. Konvekcija - tai reiškinys, kai šilumą perneša judantis skystis ar dujos. Spinduliavimas - tai šilumos pernešimas elektromagnetinėmis bangomis, sklindančiomis nuo energiją spinduliuojančio kūno. Atskirai vienas šilumos sklidimo būdas būna retai. Dažniausiai visi būdai vyksta kartu, ir turime sudėtingus šilumos mainus.



1.1 pav. Sudėtingi šilumos mainai – šilumos perdavimas

Paviršiaus temperatūros skaičiavimuose vertinami šie šilumos srauto perdavimo būdai: spinduliavimo ir konvekcijos. Nustatant šilumos srauto perdavimą spinduliavimo būdu, įvertinama: aplinkos spinduliuojama temperatūra (dujų, liepsnos temperatūra); elemento paviršiaus temperatūra; spinduliuojančio elemento emisija ir adsorbcija; krypties tarp šilumos šaltinio ir kaitinamo objekto veiksnys. Nustatant šilumos srauto perdavimą konvekcijos būdu, įvertinama: konvekcijos koeficientas; gaisro dujų temperatūra aplink elementą; kaitinamo elemento paviršiaus temperatūra. Daugeliu atvejų konservatyviai imama, kad kaitinamo elemento paviršiaus temperatūra lygi degančių dujų temperatūrai.

Šilumos srauto tankis, perduodamas gaisro dujų konstrukcijai spinduliavimo ir konvekcijos būdu, išreiškiamas (LST EN 1991-1-2:2004) taip:

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad [W / m^2]. \quad (1.1)$$

Konvekcinis šilumos srauto tankis:

$$h_{net,c} = \alpha_c (T_g - T_m) \quad [W / m^2], \quad (1.2)$$

čia: α_c - šilumos perdavimo konvekcija koeficientas $[W / m^2 K]$, pagal naudojamą gaisro kreivę, kai standartinė gaisro kreivė $\alpha_c = 25 \text{ W / m}^2 K$; T_g - dujų temperatūra arti ugnies veikiamo elemento $[K]$; T_m - elemento paviršiaus temperatūra $[K]$.

Spinduliavimo šilumos srauto tankis:

$$h_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_m^4) \quad [W / m^2], \quad (1.3)$$

čia: ϕ - formos koeficientas, $\phi = 1$; ε_m - paviršiaus spinduliavimo koeficientas, $\varepsilon_m = 0,8$; ε_f - ugnies spinduliavimo koeficientas, $\varepsilon_f = 1$; σ - Stefano Boltcmano konstanta $[= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 K^4]$; T_r - efektyvioji gaisro aplinkos spinduliavimo temperatūra $[K]$; T_m - elemento paviršiaus temperatūra $[K]$; visiškai ugnies apimtiems elementams: $T_g = T_r$.

Šilumos laidumas medžiagoje yra apibūdinamas tokia diferencialine lygtimi (vadinamąja Furje diferencialine lygtimi), kuri derinama su atitinkamomis kraštinėmis ir pradinėmis sąlygomis:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla q, \quad (1.4)$$

čia: q - šilumos srauto tankis $[W / m^2]$; ρ - medžiagos tankis $[kg / m^3]$; c - savitoji šiluminė talpa $[J / kgK]$; t - laikas $[s]$.

Pagal Furje dėsni šilumos srauto tankis yra tiesiogiai proporcingas temperatūros gradientui:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1.5)$$

čia: λ - šilumos laidumo koeficientas $[W / m^2 K]$; T - absoliutinė temperatūra $[K]$.

Temperatūros sklidimas konstrukcijoje priklauso nuo statybinių medžiagų šiluminių savybių, konstrukcijų geometrijos, gaisro apkrovos ir kt. Žinomus temperatūros nustatymo metodus (bet kuriame statybinės konstrukcijos taške) galima suskirstyti į keturias grupes:

- eksperimentiniai tyrimai;
- empiriniai metodai;
- supaprastinti skaitiniai šilumos sklidimo įvertinimo metodai;

- skaitiniai šilumos sklidimo įvertinimo metodai;
- temperatūrinės kreivės, pateiktos normatyviniuose statybos techniniuose dokumentuose.

Eksperimentų metu gautų duomenų apdorojimo ir naudojimo metodai gana dažnai taikomi praktikoje (kai naudojamos statybinės medžiagos būna pakankamai ištirtos), tačiau tokie metodai paprastai tinka tik konkrečioms išbandytoms konstrukcijoms temperatūros laukams prognozuoti. Be to, tokio tipo metodikos reikalauja milžiniškų darbo bei medžiagų sąnaudų, nes natūralaus dydžio konstrukcijos tiriamos daug kartų, keičiant kurį nors veiksni (geometriją, sudėtį, apkrovą ir pan.). Be abejo, taikant šio tipo metodus, negalima spręsti apie temperatūros pasiskirstymą konstrukcijoje (esant skirtingoms gaisro poveikio sąlygoms) ir juo labiau modeliuoti konstrukcijų darbą gaisro sąlygomis.

Kiti temperatūros pasiskirstymo konstrukcijoje skaičiavimai pagrįsti temperatūros laidumo procesu (Drysedale 2002; Šakmanas 1996). Šios grupės metodų esmė yra tokia: kaitinant tariamos medžiagos paviršių tolygiu šilumos srautu pusiau apribotame kūne, galima rasti tokią plokštumą, kurioje temperatūra kyla pagal standartinę gaisro temperatūros kreivę. Iš čia kilo *fiktyvus sluoksniu* metodo pavadinimas, kai atstumas nuo pusiau apriboto kūno paviršiaus iki nagrinėjamo taško buvo pavadintas *fiktyviu sluoksniu*.

Vykstant temperatūros laidumo procesui medžiagoje, kai dalis šilumos srauto yra sunaudojama temperatūrai pakelti įvairiuose medžiagos taškuose, medžiagos storyje atsiranda temperatūros gradientas, kurio kaita nustatoma ((1.4) ir (1.5) lygtys).

Pastaruoju metu vis labiau populiarėja kompiuterinių programų naudojimas, nustatant temperatūrų pasiskirstymą gaisro metu. Temperatūros laukų pasiskirstymui statybinės konstrukcijos skerspjūvyje nustatyti yra naudojami įvairūs specializuoti programiniai paketai, kurie padeda per gana trumpą laiką atlikti nestacionarių šilumos mainų sudėtingus skaičiavimus. Tokiuose programiniuose paketuose temperatūros sklidimui prognozuoti dažniausiai naudojami baigtinių elementų ir baigtinių skirtumų metodai (Drysedale 2002).

Inžinieriai dažniausiai naudoja temperatūrines kreives, pateiktas normatyviniuose statybos techniniuose dokumentuose, kurios yra sudarytos tik konkrečioms konstrukcijoms, atitinkamai geometrijai ir atitinkamoms betono savybėms.

1.2 Gaisrų scenarijai

Skaičiuojant gelžbetoninių konstrukcijų atsparumą ugniai, neatsižvelgiant į taikomą metodą, pirmiausia pasirenkamas gaisro scenarijaus tipas: standartinis ar realus. Šie scenarijai dar skirstomi į tris kategorijas:

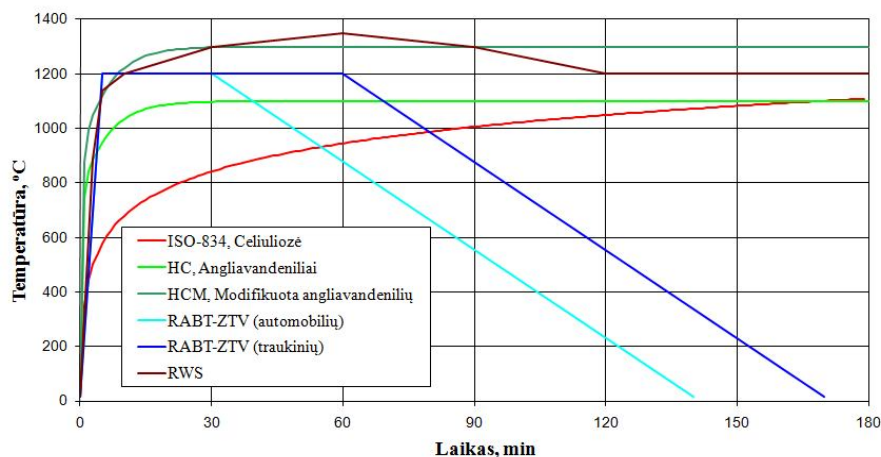
- standartinės gaisro kreivės;

- parametrinės gaisro kreivės;
- zonų modelis.

1.2.1 Standartinės gaisro kreivės

Paskutiniaisiais metais tarptautiniu mastu buvo daug tyrinėta nustatant gaisro, kuris galėtų vykti tuneliuose ir požeminiuose statiniuose, tipą. Šie tyrimai vyko apleistuose tuneliuose ir laboratorijose.

Pagal gautus rezultatus, atsižvelgiant į galimas degiąsias medžiagas, nustatytos laiko ir temperatūros kreivės (1.2 pav.), dar vadinamos standartinėmis gaisro kreivėmis.



1.2 pav. Standartiniai gaisro scenarijai (kreivės) tuneliams

Standartinė gaisro kreivė reglamentuota Lietuvos standarte (LST ISO 834:1997), taip pat ir kitų valstybių standartuose (BS 476: part 20, DIN 4102, AS 1530 ir kt.). Dauguma bandymų ir skaičiavimo metodų pagrįsti šia gaisro kreive. Lietuvos standarte ISO-834 kreivė paremta celiuliozės gaisro modeliu, kuriame kaip kuras yra naudojamas medis, popierius, audekiai ir kt. Nominali temperatūros laiko priklausomybė, nustatant konstrukcijų atsparumą ugniai:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20, \quad (1.6)$$

čia: T - bandymo temperatūra krosnyje ($^{\circ}\text{C}$); t - šiluminio poveikio trukmė gaisrinio bandymo metu (min).

Celiuliozės kreivė (ISO-834) buvo naudojama daugelį metų, kol nustatyta, kad tam tikrų medžiagų degimo tempas, pavyzdžiui, benzino, dujų, chemikalų ir kt. buvo gerokai didesnis nei celiuliozės kreivės degimo medžiagų.

Atlikus angliavandenilių gaisro režimo eksperimentinius tyrimus, buvo nustatyta nauja laiko/temperatūros kreivė. Angliavandenilio kreivė (HC) taikoma naftos pramonėje, bet ji tinka ir tuneliams, kadangi tunelyje gali įvykti naftos produktų degimas, pavyzdžiui, gali užsidegti automobilių degalų bakai, naftovežis ir kt.

Angliavandenilio gaisro kreivė (HC) yra reglamentuota Europos sąjungos standarte (LST EN 1991-1-2:2004) ir apibūdina laiko ir temperatūros priklausomybę:

$$T = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20. \quad (1.7)$$

Gauta iš anksčiau minėtos angliavandenilio kreivės, pagal Prancūzijos prašymą, padidinta angliavandenilio kreivės versija, taip vadinama angliavandenilio modifikuota kreivė (HCM). Maksimali HCM kreivės temperatūra yra 1300 °C, vietoj 1100 °C standartinės HC kreivės. Temperatūrinis gradientas po pirmų kelių HCM ugnies minučių yra didesnis nei angliavandenilio gaisro.

Angliavandenilio modifikuotos gaisro kreivės temperatūros augimas yra apibūdinamas tokia priklausomybe:

$$T = 1280 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20. \quad (1.8)$$

RABT-ZTV kreivė buvo sukurta Vokietijoje, atlikus seriją bandomųjų programų. RABT-ZTV kreivėje temperatūrinis kilimas yra labai greitas - iki 1200 °C per 5 minutes. Aukščiausia temperatūra (1200 °C) išlieka neilgai, palyginus su kitomis kreivėmis. Automobilių gaisrams temperatūros mažėjimas prasideda po 30 minučių gaisro, o traukinių gaisrams - po 60 minučių. Aušinimo periodas abiem gaisro kreivėms sudaro 110 minučių.

RABT-ZTV gaisro kreivės temperatūros augimas yra apibūdinamas sekančiomis koordinatėmis:

RABT-ZTV (traukinys)		RABT-ZTV (automobilis)	
Laikas (min)	Temperatūra (°C)	Laikas (min)	Temperatūra (°C)
0	15	0	15
5	1200	5	1200
60	1200	30	1200
170	15	140	15

RWS kreivė sudaryta Olandijos transporto ministerijoje. Ši kreivė pasižymi pavojingiausiu gaisro scenarijumi, t.y sunkvežimio su 50 m³ naftos ar benzino degimas su gaisro apkrova 300 MW, degimo trukmė - iki 120 minučių. RWS kreivė buvo pagrįsta bandymo rezultatais, atliktais Olandijoje 1979 m.

Skirtumas tarp RWS ir angliavandenilio kreivės (HC) toks, kad HC kreivė pagrįsta temperatūra, kuri būtų laukta nuo ugnies, įvykstančios atviros erdvės viduje, kur įvyksta karščio eikvojimas, o RWS kreivė yra pagrįsta temperatūra, kai ugnis kyla uždaroje patalpoje (pvz., tunelyje), kurioje beveik nėra jokios galimybės karščio išsisklaidymui į supančią atmosferą.

RWS kreivė imituoja pradinį greitą ugnies vystymąsi, remdamasi naftos tanklaiviu kaip šaltiniu, kai temperatūros kritimas įvyksta naftai sudegant.

1.2.2 Natūralūs gaisrai, parametrinės gaisrų kreivės pastatuose

Natūralių gaisrų kreivės, dar kitaip vadinamos parametrinėmis kreivėmis, nustatomos atsižvelgiant į skirtingą galimą pastato gaisro apkrovą ir angų dydį. Gaisro režimas patalpoje priklauso nuo tokių pagrindinių parametrų: degių medžiagų kiekio ir tipo, ventiliacijos, atitvarinių sienų ir perdangų šiluminių charakteristikų ir kt. Parametrinės kreivės sudaro kylančią ir krentančią dalys. Tačiau šios kreivės beveik nenaudojamos gaisrinių bandymų praktikoje. Viena esminių to priežasčių – standartinės krosnys neužtikrina tikslaus krentančios kreivės dalies aušinimo režimo. Nepaisant to, natūralios (parametrinės) kreivės yra dažnai naudojamos skaičiavimuose, nes jos tiksliau nei standartinės kreivės atspindi realų gaisro poveikį konstrukcijoms.

1.2.3 Daugiazoniniai gaisro modeliai

Dar pažangesni už natūralias (parametrinės) gaisro kreives yra daugiazoniniai, kitaip vadinami skaičiuojamosios skysčių dinamikos, modeliai. Šie modeliai skirti spręsti kiekvienos zonos energijos ir masės tvermės lygtims, tačiau kol kas naudojami daugiau tyrimo tikslams. Paprastinant skaičiavimo modelius, buvo pasiūlytas zonų modelis, kai patalpos tūris padalijamas į atskiras zonas su joms būdingomis savybėmis. Paprasčiausias pavyzdys yra dviejų zonų (karštos ir šaltos) modelis, kai patalpa neutraliąja linija padalijama į du tūrius. Karštosios zonos temperatūrą lemia gaisro židinio šiluma kylanti aukštyn, degimo produktų pernešama šilumos energija. Į šaltąją zoną iš supančios aplinkos patenka degimo reakcijai reikalingas deguonis, kuris atvėsina apatinę gaisro patalpos zoną. Taip kiekvienai zonai galima sudaryti šiluminio balanso lygtį.

1.3 Šiluminės medžiagų savybės

Medžiagų šiluminės savybės – savitoji šiluminė talpa ir šilumos laidumas yra svarbiausios medžiagų savybės, naudojamos skaičiuojant temperatūros pasiskirstymą. Pagrindinės šiluminių savybių priklausomybės pateiktos Lietuvos standartuose (LST EN 1992-1-2:2005; LST EN 1993-1-2:2005; LST EN 1994-1-2:2005).

1.3.1 Plienai

Savitoji šiluminė talpa

Plieno savitoji šiluminė talpa priklauso nuo aplinkos temperatūros ir plieno sudėties (LST EN 1993-1-2:2005). Plieno savitosios šiluminės talpos vertės skirtingoje aplinkos temperatūroje nustatomos pagal šias priklausomybes:

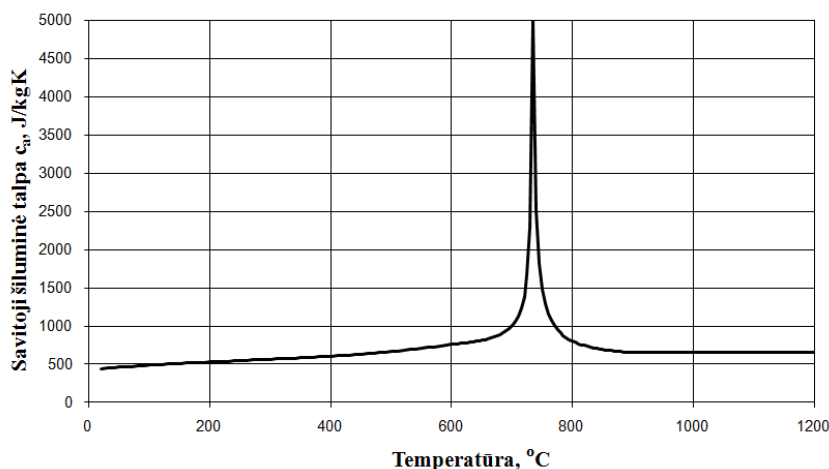
$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3 \quad [J / kgK], \quad \text{kai } 20^\circ C \leq \theta_a < 600^\circ C; \quad (1.9)$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [J / kgK], \quad \text{kai } 600^\circ C \leq \theta_a < 735^\circ C; \quad (1.10)$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [J / kgK], \quad \text{kai } 735^\circ C \leq \theta_a < 900^\circ C; \quad (1.11)$$

$$c_a = 650 \quad [J / kgK], \quad \text{kai } 900^\circ C \leq \theta_a \leq 1200^\circ C. \quad (1.12)$$

Atskirais atvejais, kai naudojama supaprastinta skaičiavimo procedūra, plieno šiluminė talpa gali būti priimama pastovi, neatsižvelgiant į aplinkos temperatūrą ir lygį $c_a = 600 \quad J / kgK$.



1.3 pav. Temperatūrinis anglingojo plieno savitosios šiluminės talpos sąryšis

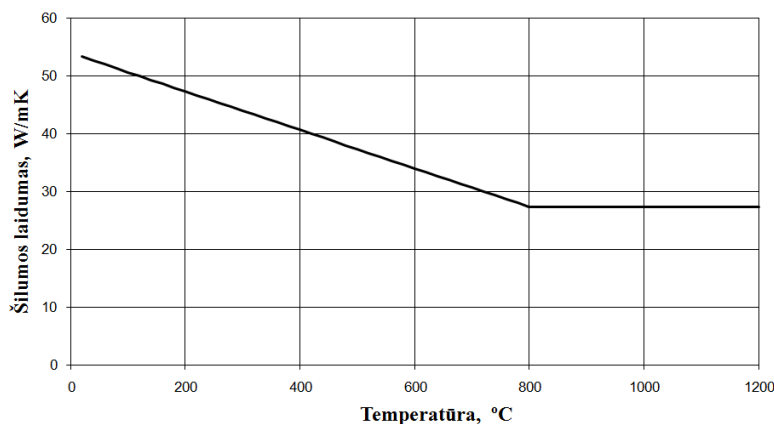
Šilumos laidumas

Plieno šilumos laidumas priklauso nuo aplinkos temperatūros ir plieno sudėties (LST EN 1993-1-2:2005). Plieno šilumos laidumas nuo 54 W/mK prie 20 °C iki 27,3 W/mK esant 800 °C kinta tiesiškai. Plieno šiluminės talpos vertės skirtingoje aplinkos temperatūroje nustatomos pagal šias priklausomybes:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a \quad [W / mK], \quad \text{kai } 20^\circ C \leq \theta_a < 800^\circ C; \quad (1.13)$$

$$\lambda_a = 27,3 \quad [W / mK], \quad \text{kai } 800^\circ C \leq \theta_a \leq 1200^\circ C. \quad (1.14)$$

Tam tikrais atvejis, kai naudojama supaprastinta skaičiavimo procedūra, plieno šilumos laidumas gali būti imamas nepriklausomai nuo aplinkos temperatūros ir lygus $\lambda_a = 45 \quad W / mK$.



1.4 pav. Temperatūrinis anglingojo plieno šilumos laidumo sąryšis

1.3.2 Betonas

Savitoji šiluminė talpa

Betono savitoji šiluminė talpa priklauso nuo jo drėgnumo. Nuo $100^\circ C$ iki $200^\circ C$ temperatūros intervale betone dėl vandens išgaravimo pasiekama savitosios šiluminės talpos kritinė riba. Sauso betono ($u = 0\%$) savitoji šiluminė talpa $c_p(\theta)$ gali būti nustatoma pagal šias priklausomybes (LST EN 1992-1-2:2005):

- su silikatiniais ir kalkiniais užpildais:

$$c_p(\theta) = 900 \quad (J / kgK), \quad \text{kai } 20^\circ C \leq \theta \leq 100^\circ C; \quad (1.15)$$

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \quad (J / kgK), \quad \text{kai } 100^\circ C < \theta \leq 200^\circ C; \quad (1.16)$$

$$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200) / 2 \quad (J / kgK), \quad \text{kai } 200^\circ C < \theta \leq 400^\circ C; \quad (1.17)$$

$$c_p(\theta) = 1100 \quad (J / kgK), \quad \text{kai } 400^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C. \quad (1.18)$$

Savitosios šiluminės talpos $c_p(\theta)$ kitimas augant temperatūrai ir esant skirtingoms drėgnio vėrtėms, yra pavaizduotas 1.5 paveiksle.

Kai betono su silikatiniais ar kalkiniais užpildais drėgnis skaičiavimo metodu tiesiogiai nevertinamas, savitosios šiluminės talpos funkcija gali būti modeliuojama taikant konstantos $c_{p,peak}$ vėrtę, atitinkančią temperatūrą nuo $100^\circ C$ iki $115^\circ C$, o po to tiesiškai mažėjančią nuo $115^\circ C$ iki $200^\circ C$.

$$c_{p,peak} = 900 \text{ J / kgK}, \quad \text{kai drėgnis sudaro 0 \% betono masės;} \quad (1.19)$$

$$c_{p,peak} = 1470 \text{ J / kgK}, \quad \text{kai drėgnis sudaro 1,5 \% betono masės;} \quad (1.20)$$

$$c_{p,peak} = 2020 \text{ J / kgK}, \quad \text{kai drėgnis sudaro 3 \% betono masės.} \quad (1.21)$$

Taškai tarp ($115 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $c_{p,peak}$) ir ($200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1000 J / kgK) gaunami iš tiesinės priklausomybės.

Kitoms drėgnio vertėms taikytina tiesinė interpoliacija.

Milovanovas (Milovanov 1998) nustatė tokias priklausomybes:

- (1) paprastas sunkusis betonas su silikatiniais, kalkiniais užpildais ir didelio stiprio betonai (tankis $\rho = 2250 - 2350 \text{ kg / m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 1,2 - 3,3 \text{ \%}$):

$$C = 0,72 + 0,0002 \cdot \theta \text{ [kJ / kgK]}, \quad (1.22)$$

- (2) lengvas betonai (tankis $\rho = 1236 - 1530 \text{ kg / m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 2,5 - 4,7 \text{ \%}$):

$$C = 0,842 + 0,000114 \cdot \theta \text{ [kJ / kgK]}. \quad (1.23)$$

Iljino (Iljin 1979) priklausomybės:

- (1) betonai su kalkiniais arba silikatiniais užpildais (tankis $\rho = 2250 - 2350 \text{ kg / m}^3$):

$$c_i = 0,712 + 0,0002 \cdot \theta \text{ [kJ / kgK]}, \quad (1.24)$$

- (2) betonai su kalkiniais arba silikatiniais užpildais (tankis $\rho = 2190 - 2220 \text{ kg / m}^3$):

$$c_i = 0,754 + 0,00015 \cdot \theta \text{ [kJ / kgK]}, \quad (1.25)$$

- (3) lengvas betonai (tankis $\rho = 950 \text{ kg / m}^3$):

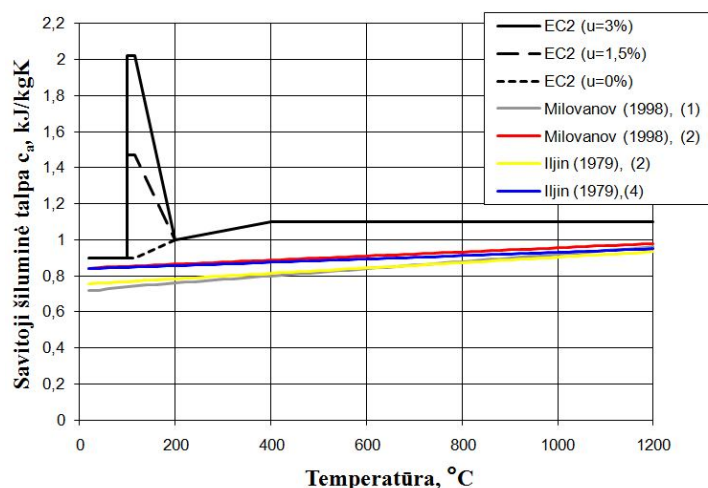
$$c_i = 0,838 + 0,00014 \cdot \theta \text{ [kJ / kgK]}, \quad (1.26)$$

- (4) lengvas betonai (tankis $\rho = 1030 \text{ kg / m}^3$):

$$c_i = 0,838 + 0,000093 \cdot \theta \text{ [kJ / kgK]}, \quad (1.27)$$

- (5) lengvas betonai (tankis $\rho = 1380 \text{ kg / m}^3$):

$$c_i = 0,838 + 0,00011 \cdot \theta \text{ [kJ / kgK]}. \quad (1.28)$$



1.5 pav. Kvarcinio betono savitoji šiluminė talpa c kaip temperatūros funkcija (pagal skirtingus autorius)

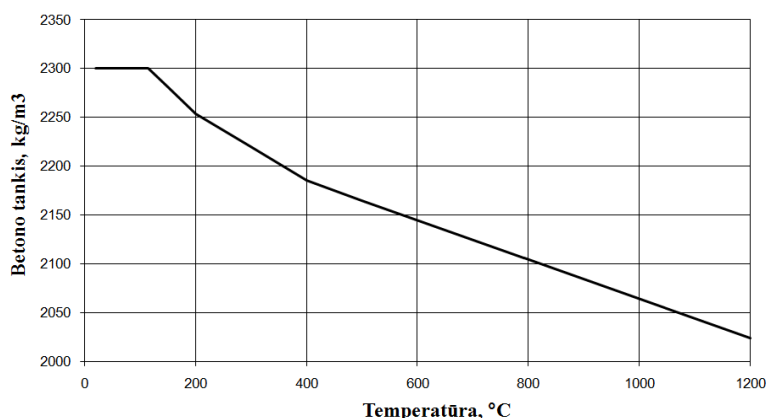
Betono tankio kaitą, kintant temperatūrai, sąlygoja vandens netekimas (LST EN 1992-1-2:2005):

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}), \quad \text{kai } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}; \quad (1.29)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \left(1 - 0,02(\theta - 115)/85\right), \quad \text{kai } 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}; \quad (1.30)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \left(0,98 - 0,03(\theta - 200)/200\right), \quad \text{kai } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}; \quad (1.31)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \left(0,95 - 0,07(\theta - 400)/800\right), \quad \text{kai } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}. \quad (1.32)$$



1.6 pav. Betono tankio priklausomybė nuo temperatūros, kai betono tankis 2300 kg/m^3

Šilumos laidumas

Betono šilumos laidumas λ_c priklauso nuo betono sudėties bei temperatūros (LST EN 1992-1-2:2005). Jis gali būti nustatomas tarp toliau nurodytų apatinės ir viršutinės verčių. Viršutinė normaliojo betono šilumos laidumo λ_c riba gali būti nustatoma taip:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451(\theta/100) + 0,0107 \cdot (\theta/100)^2 \quad [W/mK], \text{ kai } 20^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C. \quad (1.33)$$

Apatinės normaliojo betono šilumos laidumo λ_c riba gali būti apskaičiuojama taip:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(\theta/100) + 0,0057 \cdot (\theta/100)^2 \quad [W/mK], \text{ kai } 20^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C. \quad (1.34)$$

Milovanovas (Milovanov 1998) gavo tokias priklausomybes:

- (1) paprastas sunkusis betonas su silikatiniais užpildais (tankis $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 1,2 - 2,5 \%$):

$$\lambda = 1,2 - 0,0003 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.35)$$

- (2) paprastas sunkusis betonas su kalkiniais užpildais (tankis $\rho = 2250 \text{ kg/m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 1,3 - 2,5 \%$):

$$\lambda = 1,14 - 0,00047 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.36)$$

- (3) didelio stiprio betonas B55 (tankis $\rho = 2310 \text{ kg/m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 3 - 3,3 \%$):

$$\lambda = 1,17 - 0,00015 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.37)$$

- (4) didelio stiprio betonas B60 (tankis $\rho = 2340 \text{ kg/m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 2,9 - 3,2 \%$):

$$\lambda = 1,33 - 0,00015 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.38)$$

- (5) lengvas betonas B20 (tankis $\rho = 1530 \text{ kg/m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 4,4 - 4,7 \%$):

$$\lambda = 0,36 - 0,0002 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.39)$$

- (6) lengvas betonas B25 (tankis $\rho = 1236 \text{ kg/m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 2,5 \%$):

$$\lambda = 0,174 - 0,00005 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.40)$$

- (7) lengvas betonas B30 (tankis $\rho = 1276 \text{ kg/m}^3$ ir betono masės drėgmė $u = 3,9 \%$):

$$\lambda = 0,174 - 0,00007 \cdot \theta \quad [W/mK]. \quad (1.41)$$

Iljino (Iljin 1979) priklausomybės:

- (1) betonas su kalkiniais užpildais (tankis $\rho = 2190 \text{ kg/m}^3$):

$$\lambda_t = 1,244 - 0,00083 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.42)$$

- (2) betonas su kalkiniais užpildais (tankis $\rho = 2250 \text{ kg/m}^3$):

$$\lambda_t = 1,14 - 0,00047 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.43)$$

- (3) betonas su silikatiniais užpildais (tankis $\rho = 2220 \text{ kg/m}^3$):

$$\lambda_t = 1,42 - 0,00095 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.44)$$

- (4) betonas su silikatiniais užpildais (tankis $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$):

$$\lambda_t = 1,2 - 0,0003 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.45)$$

- (5) lengvas betonas (tankis $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$):

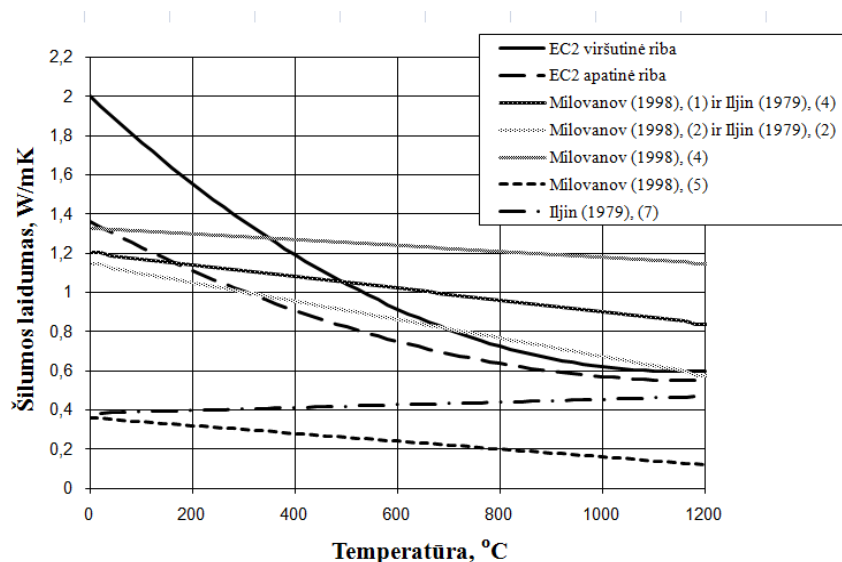
$$\lambda_t = 0,233 + 0,00011 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.46)$$

- (6) lengvas betonas (tankis $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$):

$$\lambda_t = 0,256 + 0,000064 \cdot \theta \quad [W/mK], \quad (1.47)$$

- (7) lengvas betonas (tankis $\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$):

$$\lambda_t = 0,384 + 0,00007 \cdot \theta \quad [W/mK]. \quad (1.48)$$



1.7 pav. Betono šilumos laidumo λ_t priklausomybė nuo temperatūros

1.4 Fizikinės - mechaninės betono ir armatūros savybės

Šiame poskyryje aprašytos standartine gaisro kreive (ISO-834) veikiamų betono ir armatūros savybės. Pateikta betono ir armatūros aukštoje temperatūroje modelių apžvalga. Aptarti betono gniuždomasis stipris, tempiamasis stipris, tamprumo modulis, deformacija, atitinkanti maksimalius gniuždymo įtempius, temperatūrinė deformacija. Taip pat aptarti armatūros stipris, tamprumo modulis bei temperatūrinė deformacija.

1.4.1 Betonas

Aukštos temperatūros daro įtaką gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagramos formai. Veikiant aukštai temperatūrai, sumažėja gniuždomasis betono stipris f_c , tačiau padidėja maksimalius įtempius atitinkanti deformacija ε_0 . Abramsas (Abrams 1971) parodė, kad apkrauto ir neapkrauto betono savybės prieš kaitinimą skiriasi. Apkrauto betono stipris f_c yra didesnis, o deformacija ε_0 mažesnė.

Gniuždomojo betono stipris

Toliau aptariamieji gniuždomojo betono, veikiamo aukšta temperatūra, stiprio modeliai. Pateikiami modeliai gauti su bandiniais, kurie iš pradžių buvo paveikti aukšta temperatūra, o po to apkrauti.

Lie ir kt. (Lie et al. 1986) modelis:

$$f_c(\theta) = f_c \cdot (1 - 0,001 \cdot \theta), \text{ kai } \theta \leq 500^\circ\text{C}, \quad (1.49)$$

$$f_c(\theta) = f_c \cdot (1,375 - 0,00175 \cdot \theta), \text{ kai } 500^\circ\text{C} < \theta \leq 700^\circ\text{C}, \quad (1.50)$$

$$f_c(\theta) = 0, \text{ kai } \theta \geq 700^\circ\text{C}. \quad (1.51)$$

LST EN 1992-1-2:2005 modelis pateiktas skaitinėmis reikšmėmis duotuose temperatūros intervaluose, atskirai betonui su silikatiniais, kalkiniais užpildais ir lengvajam betonui (žiūrėti A priedą). E. Gedo (Geda 2010) daktaro darbe gautos tokios tiesinės priklausomybės atitinkančios Euronormų modelį:

- betonui su silikatiniais užpildais:

$$f_c(\theta) = f_c, \text{ kai } \theta \leq 100^\circ\text{C}, \quad (1.52)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,05 - 0,005 \cdot \theta), \text{ kai } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}, \quad (1.53)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,15 - 0,001 \cdot \theta), \text{ kai } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}, \quad (1.54)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,35 - 0,0015 \cdot \theta), \text{ kai } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 800^\circ\text{C}, \quad (1.55)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,71 - 0,0007 \cdot \theta), \text{ kai } 800^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C}, \quad (1.56)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,44 - 0,0004 \cdot \theta), \text{ kai } 900^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C}, \quad (1.57)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,34 - 0,0003 \cdot \theta), \text{ kai } 1000^\circ\text{C} < \theta \leq 1100^\circ\text{C}, \quad (1.58)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,12 - 0,0001 \cdot \theta), \text{ kai } 1100^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}, \quad (1.59)$$

- betonui su kalkiniais užpildais:

$$f_c(\theta) = f_c, \text{ kai } \theta \leq 100^\circ\text{C}, \quad (1.60)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,03 - 0,0003 \cdot \theta), \text{ kai } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}, \quad (1.61)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,09 - 0,0006 \cdot \theta), \text{ kai } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}, \quad (1.62)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,29 - 0,0011 \cdot \theta), \text{ kai } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 500^\circ\text{C}, \quad (1.63)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,44 - 0,0014 \cdot \theta), \text{ kai } 500^\circ\text{C} < \theta \leq 600^\circ\text{C}, \quad (1.64)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,62 - 0,0017 \cdot \theta), \text{ kai } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 700^\circ\text{C}, \quad (1.65)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,55 - 0,0016 \cdot \theta), \text{ kai } 700^\circ\text{C} < \theta \leq 800^\circ\text{C}, \quad (1.66)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,23 - 0,0012 \cdot \theta), \text{ kai } 800^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C}, \quad (1.67)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,96 - 0,0009 \cdot \theta), \text{ kai } 900^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C}, \quad (1.68)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,46 - 0,0004 \cdot \theta), \text{ kai } 1000^\circ\text{C} < \theta \leq 1100^\circ\text{C}, \quad (1.69)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,24 - 0,0002 \cdot \theta), \text{ kai } 1100^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}, \quad (1.70)$$

- lengvajam betonui:

$$f_c(\theta) = f_c, \text{ kai } \theta \leq 300^\circ\text{C}, \quad (1.71)$$

$$f_c(\theta) = f_c(1,36 - 0,0012 \cdot \theta), \text{ kai } 300^\circ\text{C} < \theta \leq 1100^\circ\text{C}, \quad (1.72)$$

$$f_c(\theta) = f_c(0,48 - 0,0004 \cdot \theta), \text{ kai } 1100^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}. \quad (1.73)$$

STR 2.05.11:2005 modelis:

$$f_c(\theta) = k_c(\theta) \cdot f_c(20^\circ\text{C}), \quad (1.74)$$

$$k_c(\theta) = 1,0, \text{ kai } 20^\circ\text{C} < \theta \leq 100^\circ\text{C}, \quad (1.75)$$

$$k_c(\theta) = (1600 - \theta) / 1500, \text{ kai } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}, \quad (1.76)$$

$$k_c(\theta) = (900 - \theta) / 625, \text{ kai } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C}, \quad (1.77)$$

$$k_c(\theta) = 0, \text{ kai } 900^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}. \quad (1.78)$$

Lie ir Lino (Lie ir Lin 1985) modelis:

$$f_c(\theta) = f_c \cdot \left(2,011 - 2,353 \cdot \frac{\theta - 20}{1000} \right) \leq f_c. \quad (1.79)$$

Li ir Purkisso (Li ir Purkiss 2005) modelis:

$$f_c(\theta) = f_c \cdot \left(0,00165 \left(\frac{\theta}{100} \right)^3 - 0,03 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 + 0,025 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 1,002 \right). \quad (1.80)$$

Iljino (Iljin 1979) modelis:

$$f_c(\theta) = f_c \cdot m_{c,\theta}^0, \quad (1.81)$$

čia $m_{c,\theta}^0$ - betono, aukštose temperatūrose, gniuždomojo stiprio koeficientas, jo reikšmės pateiktos 1 lentelėje

1 lentelė. Aukštose temperatūrose, gniuždomojo betono stiprio koeficiento $m_{c,\theta}^0$ reikšmės (Iljin 1979)

Betono tipas	Apkrovimas	Koeficientu $m_{c,\theta}$ ir $m_{c,\theta}^0$ reikšmės, kai temperatūra, °C							
		100	200	300	400	500	600	700	800
Sunkusis betonas su silikatiniais užpildais	-	$\frac{0,95}{0,88}$	$\frac{0,88}{0,8}$	$\frac{0,8}{0,8}$	$\frac{0,7}{0,78}$	$\frac{0,6}{0,7}$	$\frac{0,45}{0,5}$	$\frac{0,25}{0,15}$	$\frac{0,1}{0,005}$
	$0,3f'_c$	$\frac{0,93}{0,98}$	$\frac{0,85}{0,95}$	$\frac{0,85}{0,92}$	$\frac{0,8}{0,85}$	$\frac{0,74}{0,77}$	$\frac{0,55}{0,6}$	$\frac{0,3}{0,2}$	$\frac{0,1}{0,05}$
Sunkusis betonas su kalkiniais užpildais	-	$\frac{0,98}{0,9}$	$\frac{0,97}{0,84}$	$\frac{0,96}{0,78}$	$\frac{0,9}{0,74}$	$\frac{0,8}{0,64}$	$\frac{0,65}{0,44}$	$\frac{0,4}{0,24}$	$\frac{0,15}{0,005}$
	$0,3f'_c$	$\frac{1}{0,95}$	$\frac{1}{0,9}$	$\frac{1}{0,85}$	$\frac{0,98}{0,78}$	$\frac{0,94}{0,68}$	$\frac{0,84}{0,54}$	$\frac{0,54}{0,32}$	$\frac{0,2}{0,1}$
Lengvasis betonas	-	$\frac{1,04}{1}$	$\frac{1,06}{1}$	$\frac{0,98}{1}$	$\frac{0,9}{0,95}$	$\frac{0,75}{0,7}$	$\frac{0,64}{0,6}$	$\frac{0,54}{0,5}$	$\frac{0,25}{0,15}$
	$0,3f'_c$	$\frac{1,02}{1,05}$	$\frac{1,06}{1,1}$	$\frac{1,08}{1,15}$	$\frac{1,06}{1,1}$	$\frac{0,94}{1}$	$\frac{0,88}{0,85}$	$\frac{0,7}{0,65}$	$\frac{0,33}{0,2}$

Pastaba: skaitiklyje pateikta koeficiento $m_{c,\theta}$ reikšmė, kai betonas yra įkaitęs; vardiklyje - $m_{c,\theta}^0$ reikšmė, kai betonas atvėsintas

Hertzo (Hertz 2005) modelis:

$$f_c(\theta) = f_c \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\theta}{\theta_1} + \left(\frac{\theta}{\theta_2}\right)^2 + \left(\frac{\theta}{\theta_8}\right)^8 + \left(\frac{\theta}{\theta_{64}}\right)^{64}} \right), \quad (1.82)$$

- siliciniams užpildams - $\theta_1 = 15000$, $\theta_2 = 800$, $\theta_8 = 570$, $\theta_{64} = 100000$;
- kitiems užpildams - $\theta_1 = 100000$, $\theta_2 = 1080$, $\theta_8 = 690$, $\theta_{64} = 1000$;
- lengvajam betonui - $\theta_1 = 100000$, $\theta_2 = 1100$, $\theta_8 = 800$, $\theta_{64} = 940$.

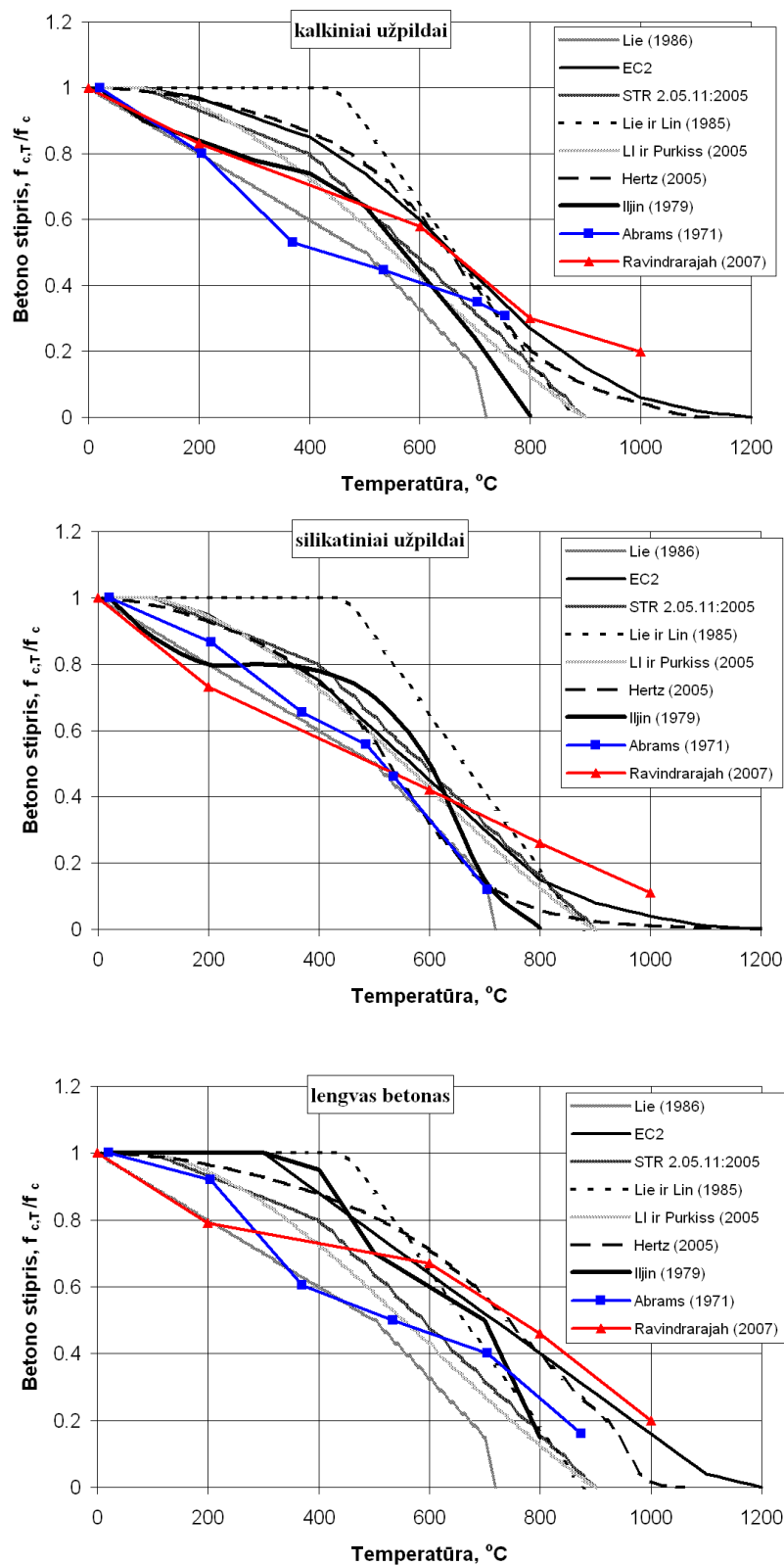
Hertzo (Hertz 2005) modelyje įvertinta ne tik užpildų tipo, bet ir išankstinio apkrovimo ($0,25 f_c$ išankstinių įtempių) įtaka betono stiprio mažėjimui.

Gniuždomojo betono aukštose temperatūrose stiprio modelių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas, naudojant silikatinis ir kalkinius užpildus bei lengvąjį betoną, pateiktas 1.8 paveiksle.

Ravindrarajah ir kt. (Ravindrarajah et al. 2002) atliekant eksperimentinius bandymus - betoniniai bandiniai po 24 valandų nuo jų paruošimo buvo panardinti į vandenį, kurio temperatūra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po 28 dienų bandiniai išimti ir džiovinami per dvi dienas patalpoje, kurios temperatūra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir santykinė drėgmė 65 %. Bandinio kaitinimas iki reikiamos temperatūros vyko 7 valandas. Po to bandiniai buvo panardinti į vandenį, kad būtų išvengta terminio šoko atvėsavimo metu. Bandinys apkraunamas.

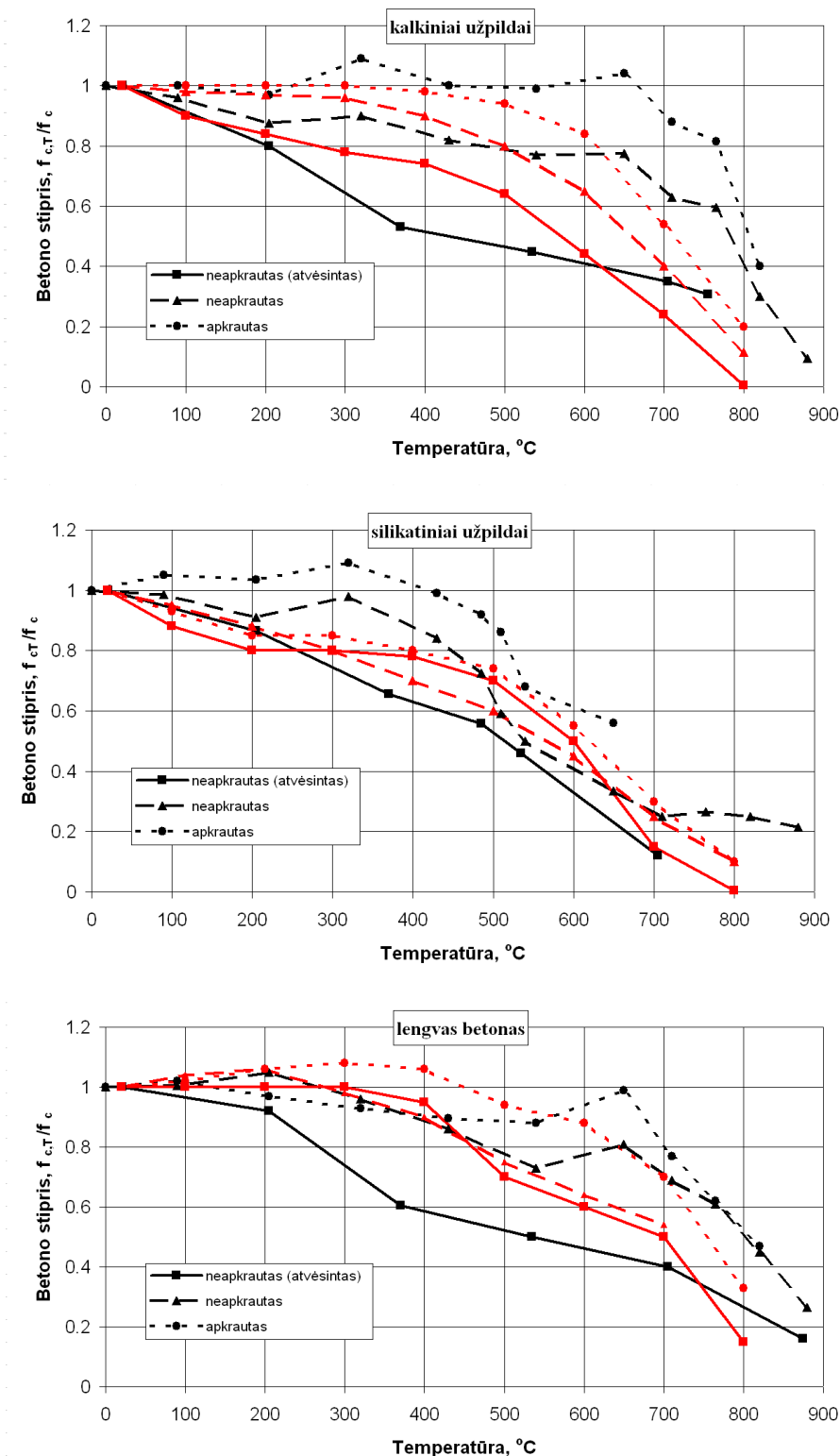
Abrams (Abrams 1971) eksperimentiniai bandymai buvo atlikti, įvertinant elemento apkrovimą ir atvėsimą:

- *neapkrautas-atvėsintas* – neapkrautas bandinys įkaitinamas iki reikiamos temperatūros, tada per naktį patalpoje ($21\text{ }^{\circ}\text{C}$) atvėsinamas ir apkraunamas iki suirimo.
- *neapkrautas* – bandinys įkaitinamas iki reikiamos temperatūros ir apkraunamas iki suirimo.
- *apkrautas* – bandinys apkraunamas ir kaitinamas. Kai pasiekama reikiama temperatūra, apkrova didinama iki bandinio suirimo.



1.8 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono gniuždomojo stiprio reikšmių kitimas aukštose temperatūrose (teoriniai rezultatai žymimi nespaltvotomis linijomis, eksperimentiniai – spalvotomis)

Šie eksperimentiniai tyrimai parodė, kad iš anksto apkrautų betoninių elementų stipris didėja. Stiprio didėjimas aiškinamas mikroplyšių betone suvaržymu. Abramso (Abrams 1971) eksperimentinių tyrimų rezultatai priklausomai nuo užpildų tipo ir apkrovimo pateikti 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Betono gniuždomojo stiprio kitimas aukštose temperatūrose pagal Iljino (Iljin 1979) (raudonos linijos) ir Amramso (Amrams 1971) gautuosius eksperimentinius rezultatus

Betono tempiamasis stipris

Modelių tempiamajam stipriui skaičiuoti yra nedaug. Tempiamasis betono stipris $f_{t\theta}$ skaičiuojamas pagal šią priklausomybę (Li Guo 1998):

$$f_{t\theta} = f_t \cdot (1 - 0,001 \cdot \theta), \text{ kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1000^\circ\text{C}. \quad (1.83)$$

Bažanto ir Chernio (Bažant ir Chern 1987) modelis betono tempiamajam stipriui aukštose temperatūrose sukurtas naudojant Anderbergo ir Thelanderssono (Anderberg ir Thelandersson 1976) eksperimentinių tyrimų rezultatus:

$$f_{t\theta} = f_t \cdot (-0,000526 \cdot \theta + 1,02052), \text{ kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}; \quad (1.84)$$

$$f_{t\theta} = f_t \cdot (-0,0025 \cdot \theta + 1,8), \text{ kai } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 600^\circ\text{C}; \quad (1.85)$$

$$f_{t\theta} = f_t \cdot (-0,0005 \cdot \theta + 0,6), \text{ kai } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C}; \quad (1.86)$$

LST EN 1992-1-2:2005 modelis:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}; \quad (1.87)$$

$$k_{c,t}(\theta) = 1, \text{ kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}; \quad (1.88)$$

$$k_{c,t}(\theta) = 1,0 - (\theta - 100) / 500, \text{ kai } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 600^\circ\text{C}. \quad (1.89)$$

Iljino (Iljin 1979) modelis:

$$f_t(\theta) = f_t \cdot m_{t,\theta}^0; \quad (1.90)$$

$$m_{t,\theta}^0 = m_{c,\theta}^0 - 0,2(1 + 0,1 \cdot \theta), \quad (1.91)$$

čia $m_{c,\theta}^0$ - aukštose temperatūrose gniuždomojo betono stiprio koeficientas, jo reikšmės pateiktos 1 lentelėje.

Betono tempiamojo stiprio modelių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas pateiktas 1.10 paveiksle. Visi modeliai numato betono tempiamojo stiprio mažėjimą aukštose temperatūrose.

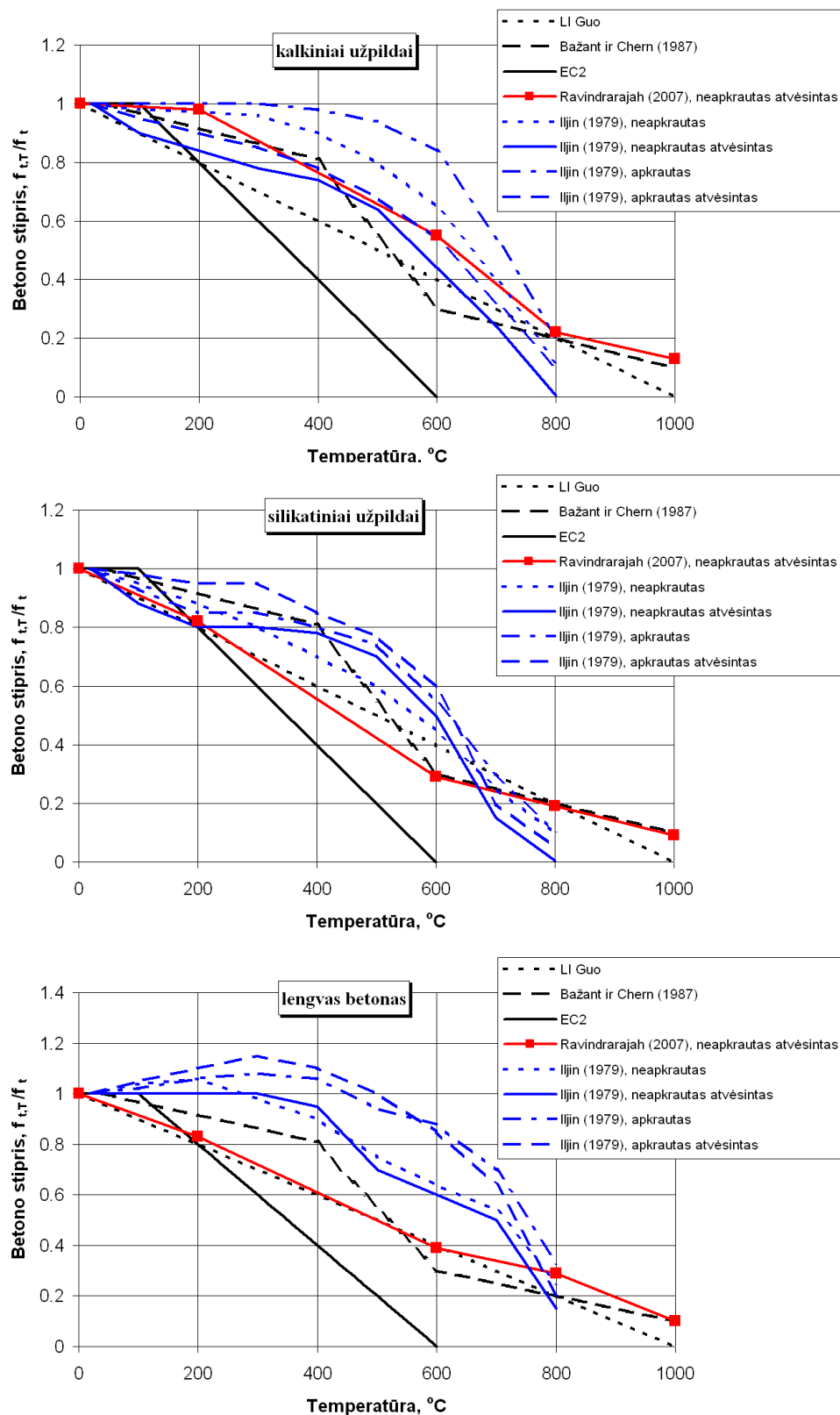
Pradinis betono tamprumo modulis aukštoje temperatūroje

Pradinis betono tamprumo modulis, kaip ir gniuždomasis ir tempiamasis stipris, kylant temperatūrai mažėja, nes tada auga betono deformacijos (Milovanov 1998). Toliau pateikiami įvairių autorių modeliai.

Iljino (Iljin 1979) modelis:

$$E_{c\theta} = \beta_c \cdot E_c, \quad (1.92)$$

čia: β_c - betono tamprumo modulio mažinimo koeficientas, jis priklauso nuo kaitinimo temperatūros. Jo reikšmės pateiktos 2 lentelėje.



1.10 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono tempiamojo stiprio reikšmių kitimas aukštose temperatūrose (teoriniai rezultatai žymimi nespaltvotomis linijomis, eksperimentiniai – spalvotomis)

2 lentelė. Koeficiento β_c , nusakančio betono tamprumo modulio mažėjimą priklausomai nuo kaitinimo temperatūros, reikšmės (Iljin 1979)

Betono tipas	Išankstiniai įtempiai kaitinimo metu	Koeficiento β_c reikšmės, esant temperatūrai ($^{\circ}\text{C}$)					
		100	200	300	400	500	600
Lengvas betonas	-	0,92	0,78	0,68	0,6	0,5	0,38
Lengvas betonas	$0,2f_c$	0,96	0,83	0,77	0,64	0,53	0,43
Lengvas betonas	$0,3f_c$	0,98	0,88	0,8	0,65	0,6	0,5
Lengvas betonas	$0,5f_c$	0,97	0,93	0,78	0,64	0,5	-
Kalkiniai užpildai	-	0,9	0,7	0,55	0,4	0,25	0,1
Silikatiniai užpildai	-	0,8	0,65	0,45	0,3	0,15	0,05

Milovanovo (Milovanov 1998) modelis:

$$E_{c\theta} = (1 - 0,0025 \cdot \theta + 0,5 \cdot 0,00000326 \cdot \theta^2) \cdot E_c, \text{ kai } 20^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800^{\circ}\text{C}. \quad (1.93)$$

Milovanovo (Milovanov 1998) modelis lengvajam betonui:

$$E_{c\theta} = (1 - 0,00104 \cdot \theta) \cdot E_c, \text{ kai } 20^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800^{\circ}\text{C}. \quad (1.94)$$

Khennano ir Bakerio (Khennan ir Baker 1993) modelis prieš kaitinimą neapkrautam betonui:

$$E_{c\theta} = (-0,001282 \cdot \theta + 1,025641) \cdot E_c, \text{ kai } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800^{\circ}\text{C}. \quad (1.95)$$

Khennano ir Bakerio (Khennan ir Baker 1993) modelis prieš kaitinimą apkrautam betonui:

$$E_{c\theta} = (-0,000634 \cdot \theta + 1,012673) \cdot E_c, \text{ kai } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 525^{\circ}\text{C}; \quad (1.96)$$

$$E_{c\theta} = (-0,002036 \cdot \theta + 1,749091) \cdot E_c, \text{ kai } 525^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800^{\circ}\text{C}. \quad (1.97)$$

Li ir Purkisso (Li ir Purkiss 2005) modelis:

$$E_{c\theta} = \frac{800 - \theta}{740} \cdot E_c \leq E_c. \quad (1.98)$$

Lu ir Guo (paskelbta Geda 2010) :

$$E_{c\theta} = E_c, \text{ kai } 20^{\circ}\text{C} < \theta \leq 60^{\circ}\text{C}; \quad (1.99)$$

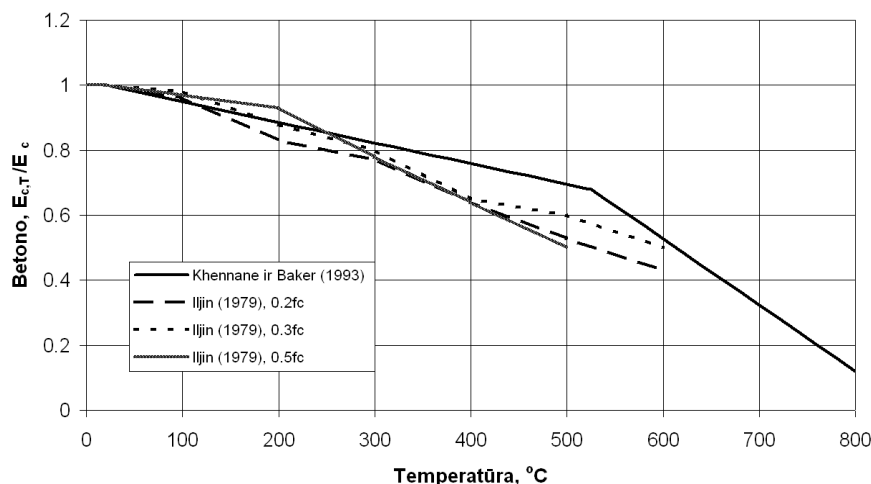
$$E_{c\theta} = (0,83 - 0,0011 \cdot \theta) \cdot E_c, \text{ kai } 60^{\circ}\text{C} < \theta \leq 700^{\circ}\text{C}. \quad (1.100)$$

Lu (paskelbta Geda 2010):

$$E_{c\theta} = (1 - 0,0015 \cdot \theta) \cdot E_c, \text{ kai } 20^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}; \quad (1.101)$$

$$E_{c\theta} = (0,87 - 0,00084 \cdot \theta) \cdot E_c \geq 0,28 \cdot E_c, \text{ kai } \theta > 200^\circ\text{C}. \quad (1.103)$$

Anksčiau aprašytų $E_{c\theta}$ modelių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas pateiktas 1.11 ir 1.12 paveiksluose.



1.11 pav. Iš anksto apkrauto betono pradinio tamprumo modulio priklausomybė nuo temperatūros

Betono deformacijos aukštoje temperatūroje

Trumpalaikės apkrovos veikiamo betono aukštoje temperatūroje suminę deformaciją $\varepsilon_{tot}(T, \sigma)$ sudaro trys komponentės:

$$\varepsilon_{tot}(T, \sigma) = \varepsilon_{\sigma}(T, \sigma) + \varepsilon_{th}(T, 0) + \varepsilon_{tc}(T, \sigma), \quad (1.104)$$

čia $\varepsilon_{\sigma}(T, \sigma)$ - trumpalaikės apkrovos sukelta deformacija; $\varepsilon_{th}(T, 0)$ - temperatūrinė deformacija ir $\varepsilon_{tc}(T, \sigma)$ - trumpalaikė temperatūrinė valkšnumo deformacija.

Trumpalaikės apkrovos sukelta deformacija $\varepsilon_{\sigma}(T, \sigma)$ priklauso nuo įtempių lygio ir temperatūros. Ją sudaro tamprioji $\varepsilon_{el}(T, \sigma)$ ir valkšnioji $\varepsilon_{pl}(T, \sigma)$ deformacijos dedamosios.

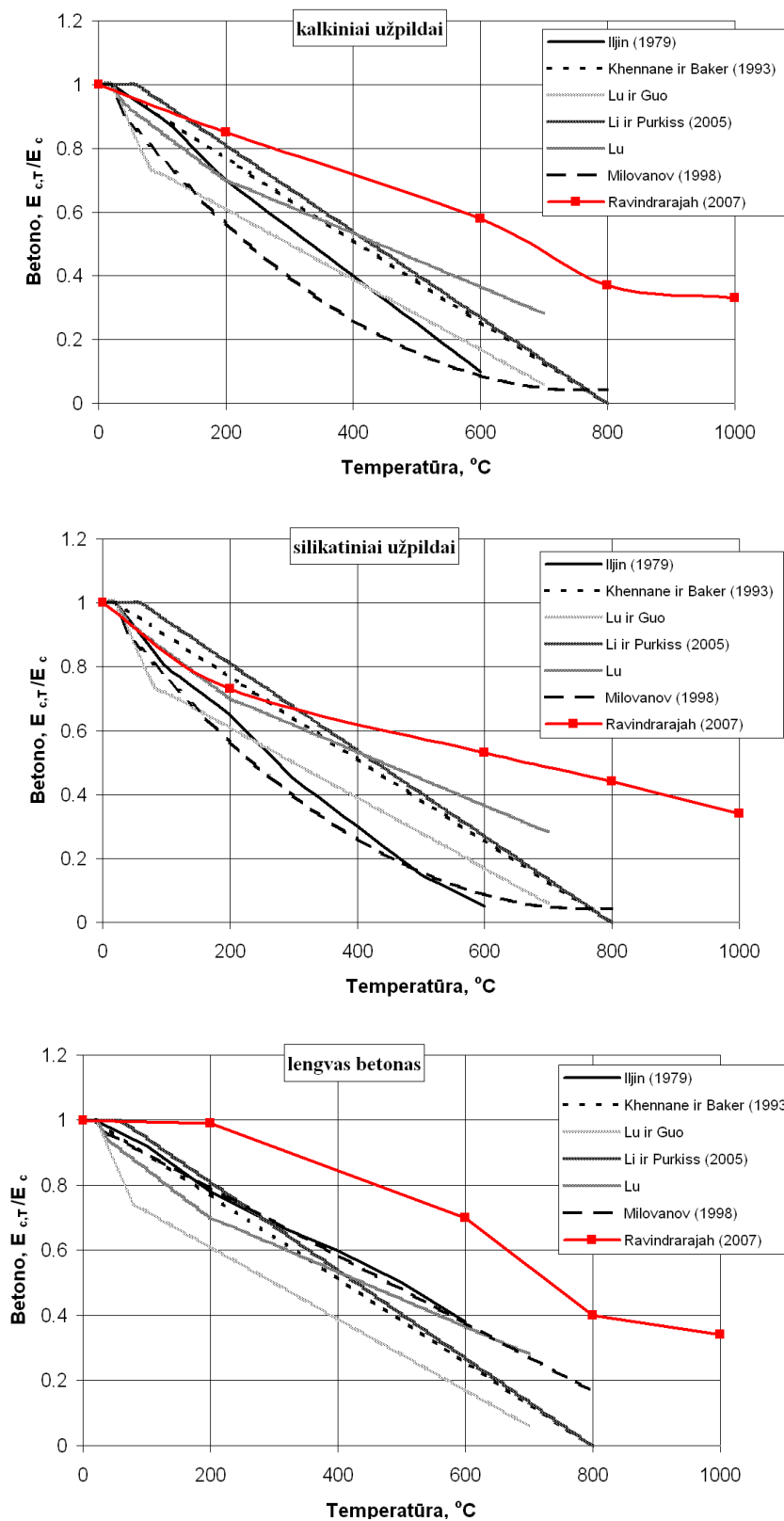
Trumpalaikės apkrovos sukeltos deformacijos $\varepsilon_{\sigma}(T, \sigma)$ viršutinė riba, atitinkanti maksimalius įtempimus, yra $\varepsilon_{co}(T, \sigma)$. Deformacijos $\varepsilon_{co}(T, \sigma)$ modeliai pateikiami toliau:

Lie (1992):

$$\varepsilon_{co}(\theta) = 0,0025 + (6,0 \cdot \theta + 0,04 \cdot \theta^2) \cdot 10^{-6}. \quad (1.105)$$

Li ir Purkisso (Li ir Purkiss 2005):

$$\varepsilon_{co}(\theta) = \frac{2 \cdot f_c}{E_c} + 0,21 \cdot 10^{-4} \cdot (\theta - 20) - 0,9 \cdot 10^{-8} \cdot (\theta - 20)^2. \quad (1.106)$$



1.12 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono pradinio tamprumo modulio reikšmių kitimas aukštose temperatūrose (teoriniai rezultatai žymimi nespalvotomis linijomis, eksperimentiniai – spalvotomis)

Lu ir Yao (paskelbta Geda 2010):

$$\varepsilon_{co}(\theta) = \varepsilon_0 (0,0019 \cdot \theta + 0,9615). \quad (1.107)$$

Khennano ir Bakerio (Khennan ir Baker 1993):

$$\varepsilon_c(\theta) = 0,003, \quad \text{kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C}; \quad (1.108)$$

$$\varepsilon_c(\theta) = 0,00001156 \cdot \theta + 0,000686 \leq 0,0082, \quad \text{kai } \theta > 200^\circ\text{C}. \quad (1.109)$$

Bažanto ir Chernio (Bažant ir Chern 1987):

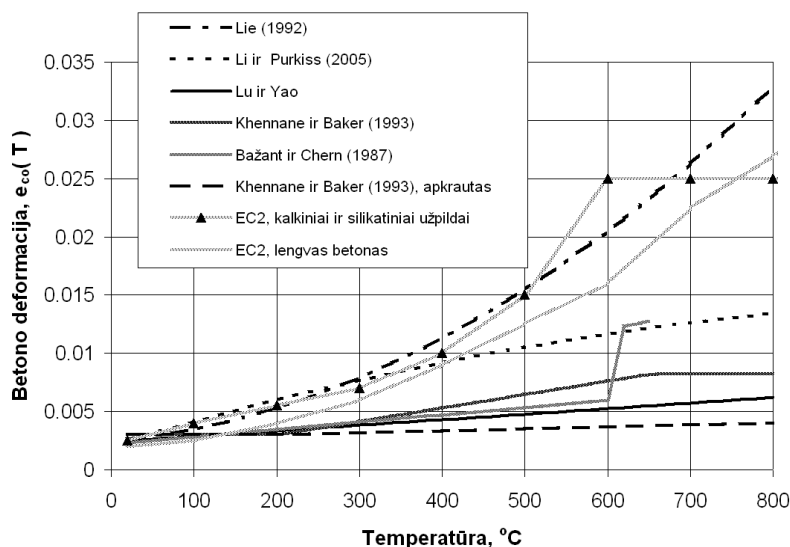
$$\varepsilon_c(\theta) = 0,0000064 \cdot \theta + 0,00216, \quad \text{kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}; \quad (1.110)$$

$$\varepsilon_c(\theta) = 0,000015 \cdot \theta + 0,003, \quad \text{kai } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 650^\circ\text{C}. \quad (1.111)$$

LST EN 1992-1-2:2005 modelis pateiktas skaitinėmis reikšmėmis duotuose temperatūros intervaluose, skirtingos betonui su silikatiniais ir kalkiniais užpildais bei lengvajam betonui (žiūrėti A priedą).

Nustatyta, kad pradiniai gniuždymo įtempiai sumažina aukštų temperatūrų įtaką $\varepsilon_{co}(\theta)$ reikšmei (Terro 1998). Khennanas ir Bakeris (Khennan ir Baker 1993) pasiūlė $\varepsilon_{co}(\theta)$ skaičiavimo modelį betonui su išankstine apkrova:

$$\varepsilon_{co}(\theta) = 0,00000167 \cdot \theta + 0,002666 \geq 0,003, \quad \text{kai } \theta \leq 800^\circ\text{C}. \quad (1.112)$$



1.13 pav. Betono deformacijos $\varepsilon_{co}(\theta)$ priklausomybė nuo temperatūros

Betono temperatūrinė deformacija

Temperatūrinė deformacija $\varepsilon_{th}(T, 0)$ priklauso nuo betono užpildų ir drėgmės, paprastai išreiškiama tiesine priklausomybe, naudojant temperatūrinį plėtimosi koeficientą α :

$$\varepsilon_{th} = \alpha \cdot (\theta - 20^\circ C). \quad (1.113)$$

Ilginas (Iljin 1979) siūlo tokias α priklausomybes, kai temperatūra $50^\circ C \leq \theta \leq 550^\circ C$:

- lengvas betonas

$$\alpha = 4,4 \cdot 10^{-6} (1 - 0,06 \cdot 10^{-2} \cdot \theta), \quad (1.114)$$

- kalkiniai užpildai

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6} (1 - 0,12 \cdot 10^{-2} \cdot \theta), \quad (1.115)$$

- kvarciniai užpildai

$$\alpha = 11 \cdot 10^{-6} (1 - 0,11 \cdot 10^{-2} \cdot \theta). \quad (1.116)$$

Milovanovo (Milovanov 1998) siūlomos temperatūrinio plėtimosi koeficiento α reikšmės pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Betono temperatūrinio plėtimosi koeficiento α reikšmės (Milovanov 1998)

Betono tipas	Betono tankis, kg / m^3	$\alpha (\cdot 10^{-6} / ^\circ C)$ reikšmės, esant temperatūrai:				
		50	100	300	500	700
kalkiniai užpildai	2230-2250	10	10	9	12	15,5
kvarciniai užpildai	2310-2340	10	10	9,6	16	22,5
lengvas betonas	1330-1350	8	8	5,7	6	

LST EN 1992-1-2:2005 siūlomos netiesinės $\varepsilon_{th}(\theta)$ priklausomybės:

- kai užpildai kvarciniai:

$$\varepsilon_{th}(\theta) = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \theta^3, \quad \text{kai } 20^\circ C \leq \theta \leq 700^\circ C; \quad (1.117)$$

$$\varepsilon_{th}(\theta) = 14 \cdot 10^{-3}, \quad \text{kai } 700^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C; \quad (1.118)$$

- kai užpildai silikatiniai:

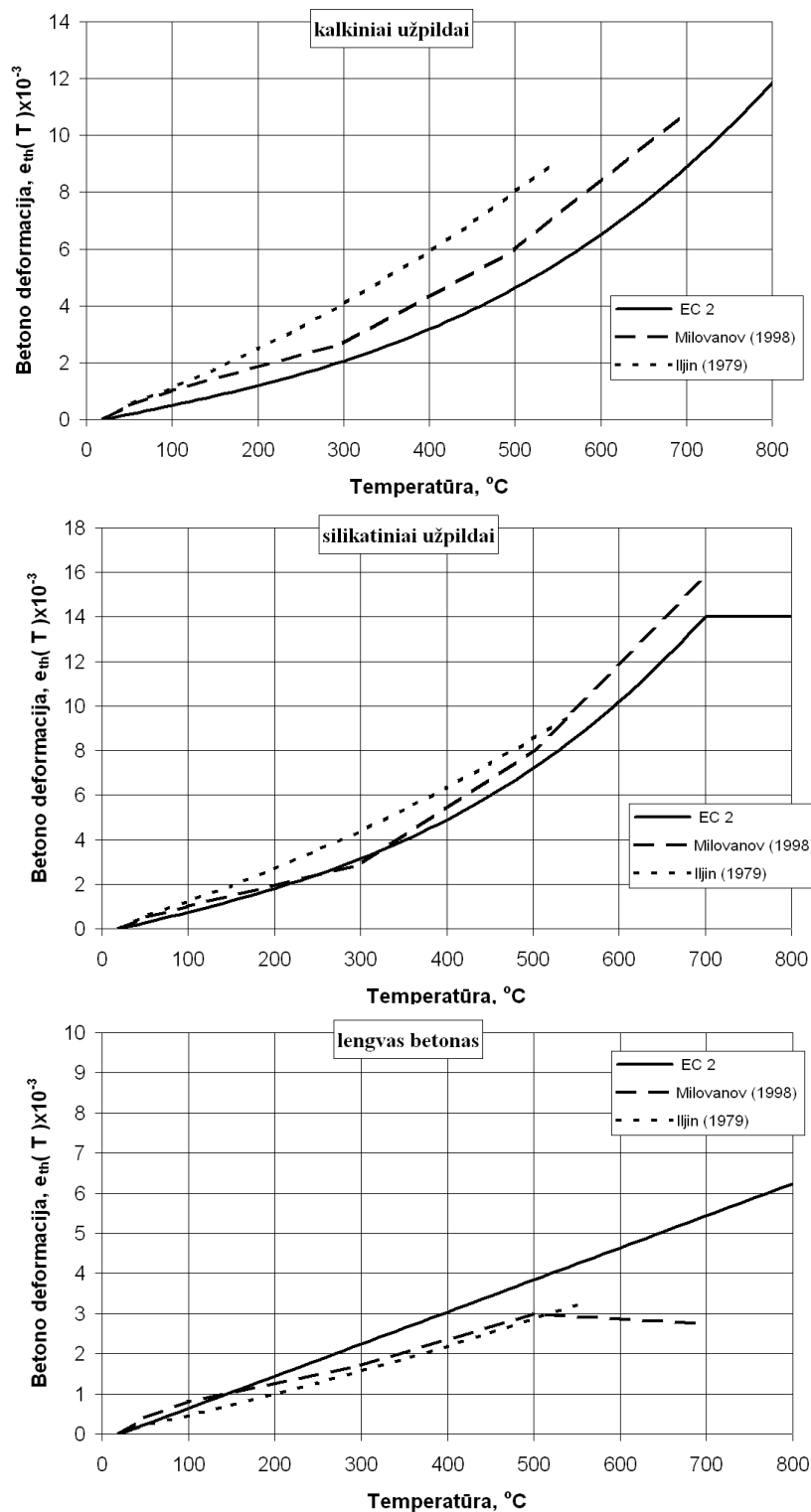
$$\varepsilon_{th}(\theta) = -1,2 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-6} \theta + 1,4 \cdot 10^{-11} \theta^3, \quad \text{kai } 20^\circ C \leq \theta \leq 805^\circ C; \quad (1.119)$$

$$\varepsilon_{th}(\theta) = 12 \cdot 10^{-3}, \quad \text{kai } 805^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C; \quad (1.120)$$

- lengvajam betonui:

$$\varepsilon_{th}(\theta) = 8 \cdot 10^{-6} (\theta - 20), \quad \text{kai } 20^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C. \quad (1.121)$$

Anksčiau aprašytų $\varepsilon_{th}(T, 0)$ modelių palyginimas pateiktas 1.14 paveiksle.



1.14 pav. Betono temperatūrinės deformacijos $\epsilon_{th}(T, 0)$ priklausomybė nuo temperatūros

Betono trumpalaikė temperatūrinė valkšnumo deformacija

Pirmą kartą gniuždant betoną aukštose temperatūrose, jame atsiranda trumpalaikės temperatūrinės valkšniosios deformacijos ϵ_{tr} . Šios deformacijos dydis priklauso nuo kaitinimo greičio, betono tipo, užpildų rūšies ir apkrovimo lygio. Trumpalaikės temperatūrinės valkšniosios deformacijos ϵ_{tr} yra liekamosios, t.y. jos išlieka, nuėmus apkrovą ir atvėsus bandiniui. Iš naujo tuo

pačiu įtempių lygiu apkrovus bandinį trumpalaikės temperatūrinės valkšniosios deformacijos neatsiras tol, kol nebus viršyta anksčiau pasiekta temperatūra (Khoury 2000).

Aukštose temperatūrose gniuždomo betono ribinė deformacija

Tyrimai šioje srityje yra riboti. Manoma, kad ribinė betono deformacija $\varepsilon_{cu\theta}$ kylant temperatūrai didėja. Terris (Terro 1998) pasiūlė $\varepsilon_{cu\theta}$ skaičiuoti kaip stiprio $f_{c\theta}$ funkciją:

$$\varepsilon_{cu\theta} = 4,942 \cdot 10^{-3} - 6,995 \cdot 10^{-5} \cdot f_{c\theta} + 3,993 \cdot 10^{-7} \cdot f_{c\theta}^2, \quad (1.122)$$

čia $f_{c\theta}$ - gniuždomo betono stipris veikiant temperatūrai θ , MPa.

LST EN 1992-1-2:2005 modelis pateiktas skaitinėmis reikšmėmis duotuose temperatūros intervaluose, kurios yra duotos atskirai betonui su silikatiniais, kalkiniais užpildais ir lengvajam betonui (žiūrėti A priedą).

Betono ir armatūros mechaninės savybės, kurios daro įtaką suvaržyto betono įtempių ir deformacijų priklausomybei, yra šios: betono stipris, pradinis betono tamprumo modulis, betono deformacija esant maksimaliems įtempiams, temperatūrinė deformacija, trumpalaikė temperatūrinė valkšnumo deformacija, armatūros takumo riba ir armatūros ir betono sukibimo stipris. Šios savybės keičiasi aukštose temperatūrose. Betono stipris, pradinis betono tamprumo modulis, armatūros takumo riba ir armatūros ir betono sukibimo stipris kylant temperatūrai mažėja, o absoliuti deformacija didėja. Pradiniai gniuždymo įtempiai sumažina aukštų temperatūrų įtaką betono stipriui ir betono deformacijai, bet padidina trumpalaikę temperatūrinę valkšnumo deformaciją.

1.4.2 Plienas

Stiprumas

Plieno stiprumas kylant temperatūrai mažėja. Armatūros stiprumas priklauso nuo klasės ir plieno tipo. Esant didesnei nei 350 °C temperatūrai, stiprumas nepriklauso nuo plieno tipo (Geda 2010). Toliau pateikiami plieno takumo $f_{sy,\theta}$ ir proporcingumo $f_{sp,\theta}$ ribų modeliai.

LST EN 1992-1-2:2005 modelis takumo $f_{sy,\theta}$ ir proporcingumo $f_{sp,\theta}$ riboms pateiktas skaitinėmis reikšmėmis duotuose temperatūros intervaluose, priklausomai nuo paruošimo būdo (žiūrėti B (paprasta armatūra) ir C (įtempta armatūra) priedus).

Lie (1992):

$$f_{sy,\theta} = \left[1 + \frac{\theta}{900 \cdot \ln\left(\frac{\theta}{1750}\right)} \right] \cdot f_y, \quad \text{kai } \theta \leq 600^\circ\text{C}, \quad (1.123)$$

$$f_{sy,\theta} = \left[\frac{340 - 0,34 \cdot \theta}{\theta - 240} \right] \cdot f_y, \quad \text{kai } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C}. \quad (1.124)$$

Milovanovo (Milovanov 1998) modelis:

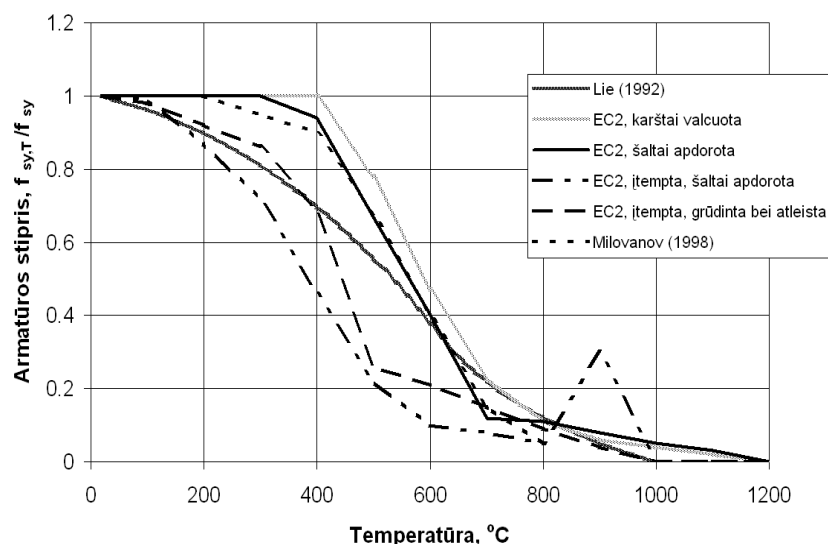
$$f_{sy,\theta} = f_y \cdot \gamma_s, \quad (1.125)$$

čia γ_s - plieno, esančio aukštose temperatūrose, stiprio koeficientas. Jo reikšmės pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Plieno, aukštose temperatūrose, stiprio koeficiento reikšmės (Milovanov 1998)

Armatūros klasė ir plieno tipas	$f_{sy,t}$, MPa	$f_{sy,c}$, MPa	E_s , MPa	Koeficiento γ_s reikšmės, kai temperatūra $^\circ\text{C}$							
				20-100	200	300	400	500	600	700	800
Strypinė, karštai valcuota, lygi, A-I klasė, plienas CT3	235	235	210000	1	0.95	0.9	0.85	0.6	0.3	0.15	-
A-III klasė, plienas CT 35TC	390	390	200000	1	1	0.95	0.9	0.68	0.4	0.15	0.05
A-IV klasė, plienas CT 80C	590	400	190000	1	0.95	0.9	0.85	0.6	0.3	0.15	-
A-IV klasė, plienas CT 23X2T	785	400	190000	1	1	0.95	0.85	0.55	0.2	0.05	-
A-VI klasė, plienas 22X2AIO	980	400	190000	1	0.85	0.75	0.65	0.45	0.2	-	-
Strypinė, termiškai pastiprinta, AT-V klasė	785	400	190000	1	1	0.9	0.8	0.45	0.2	0.05	-
Vielinė, Bp-I klasė, Ø5 mm	395	395	170000	1	0.9	0.85	0.6	0.25	0.05	-	-
Vielinė, didelio stiprumo, Bp-II klasė, Ø5 mm	1255	400	200000	1	0.85	0.7	0.5	0.25	0.1	-	-

Anksčiau aprašytų $f_{sy,\theta}$ modelių palyginimas pateiktas 1.15 paveiksle.



1.15 pav. Armatūros takumo ribos $f_{sy,\theta}$ priklausomybė nuo temperatūros

Plieno tamprumo modulis aukštoje temperatūroje

Plieno tamprumo modulis, kaip ir stipris, kylant temperatūrai mažėja, nes kylant temperatūrai auga plieno deformacijos. Toliau pateikiami įvairių autorių modeliai.

Milovanovo (Milovanov 1998) modelis:

$$E_{s\theta} = \beta_s \cdot E_s, \quad (1.126)$$

čia: β_s - plieno tamprumo modulio mažinimo koeficientas, jis priklauso nuo kaitinimo temperatūros, pateiktas 5 lentelėje.

5 lentelė. Koeficiento β_s kitimas, nusakancio plieno tamprumo modulio mažėjimui priklausomai nuo kaitinimo temperatūros (Milovanov 1998)

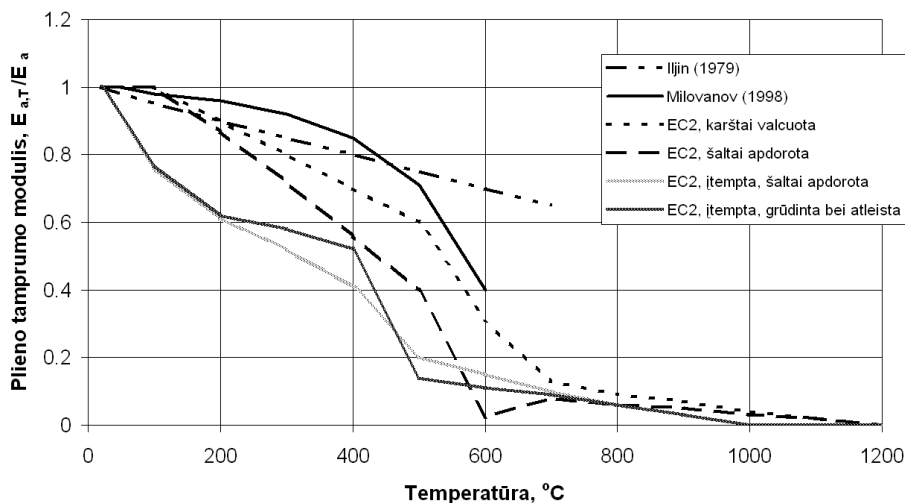
Armatūros klasė ir plieno tipas	Koeficiento β_s reikšmės, esant temperatūrai ($^{\circ}\text{C}$)						
	20-50	100	200	300	400	500	600
A-I (Ct. 3) A-III (35 $^{\circ}\text{C}$) A-IV (80 $^{\circ}\text{C}$) A-V (23X2 Γ 2T) Bp-I, Bp-II	1	0.96	0.92	0.88	0.83	0.78	0.73
At-V, At-VI	1	0.98	0.96	0.92	0.85	0.71	0.4
A-VI (22X2 Γ 2AIO)	1	0.96	0.9	0.8	0.68	0.55	0.28

Iljinas (Iljin 1979) siūlo tokią plieno tamprumo modulio mažinimo koeficiento β_s priklausomybę:

$$\beta_s = 1 - 0,05 \cdot 10^{-2} \cdot \theta, \quad \text{kai } 20^{\circ}\text{C} < \theta \leq 700^{\circ}\text{C}. \quad (1.127)$$

LST EN 1992-1-2:2005 modelis pateiktas skaitinėmis reikšmėmis duotuose temperatūros intervaluose, priklausomai nuo paruošimo būdo (žiūrėti B (paprasa armatūra) ir C (įtempta armatūra) priedus).

Anksčiau aprašytų $E_{a\theta}$ modelių palyginimas pateiktas 1.16 paveiksle.



1.16 pav. Plieno tamprumo modulio $E_{a\theta}$ priklausomybė nuo temperatūros

Deformacijos

Esant aukštomis temperatūroms, suminė plieno deformacija lygi:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th}(\theta) + \varepsilon_{\sigma}(\bar{\sigma}, \sigma, \theta) + \varepsilon_{cr}(\sigma, \theta, t), \quad (1.128)$$

čia $\varepsilon_{th}(\theta)$ - temperatūrinė deformacija; $\varepsilon_{\sigma}(\bar{\sigma}, \sigma, \theta)$ - trumpalaikė apkrovos sukelta deformacija; $\varepsilon_{cr}(\sigma, \theta, t)$ - trumpalaikė valkšnumo deformacija.

Valkšnumu vadinama medžiagos savybė deformuotis laikui bėgant esant tai pačiai pastoviai apkrovai. Valkšnumo deformacijos plieniniuose elementuose tampa reikšmingos, kai temperatūra yra daugiau nei 400 °C. Plieno valkšnumas ypač priklauso nuo temperatūros ir įtempimo lygio. Kai plienas pasiekia tam tikrą temperatūrą, valkšnumo deformacijų kreivė tampa vertikali. Todėl, jei plienas tam tikrame įtempimo lygyje pasiekia tam tikrą temperatūrą, jis tampa plastiškas ir įvyksta trūkimas (Geda 2010).

Plieno temperatūrinė deformacija

Temperatūrinė deformacija $\varepsilon_{th}(\theta)$ priklauso nuo plieno klasės ir tipo, paprastai išreiškiama tiesine priklausomybe, naudojant temperatūrinį plėtimosi koeficientą α_a :

$$\varepsilon_{th} = \alpha_a \cdot (\theta - 20^\circ\text{C}). \quad (1.129)$$

Iljinas (Iljin 1979) siūlo tokią α_a priklausomybę, kai temperatūra $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$:

$$\alpha_a = 11,4 \cdot 10^{-6} (1 + 0,05 \cdot 10^{-2} \cdot \theta). \quad (1.130)$$

Milovanovo (Milovanov 1998) siūlomos temperatūrinio plėtimosi koeficiento α_a reikšmės pateiktos 6 lentelėje.

6 lentelė. Armatūros temperatūrinio plėtimosi koeficiento α_a reikšmės (Milovanov 1998)

Armatūros klasė	Plieno temperatūrinio plėtimosi koeficiento reikšmės $\alpha_a \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}$, kai temperatūra, $^\circ\text{C}$						
	20-50	100	200	300	400	500	600
A-I, A-II, B-I, Bp-I, B-II, Bp-II, K-7, K-9	11.5	11.7	12	12.5	13	13.5	14
A-III, A-IV, A-V, At-IV, At-V, At-VI, A-VI	11.5	12	13	13.5	14	14.5	15

LST EN 1993-1-2:2005 modelis ($\varepsilon_{th} = \Delta l / l$) anglingiems plienams:

- paprasta armatūra:

$$\Delta l / l = 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4}, \quad \text{kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}; \quad (1.131)$$

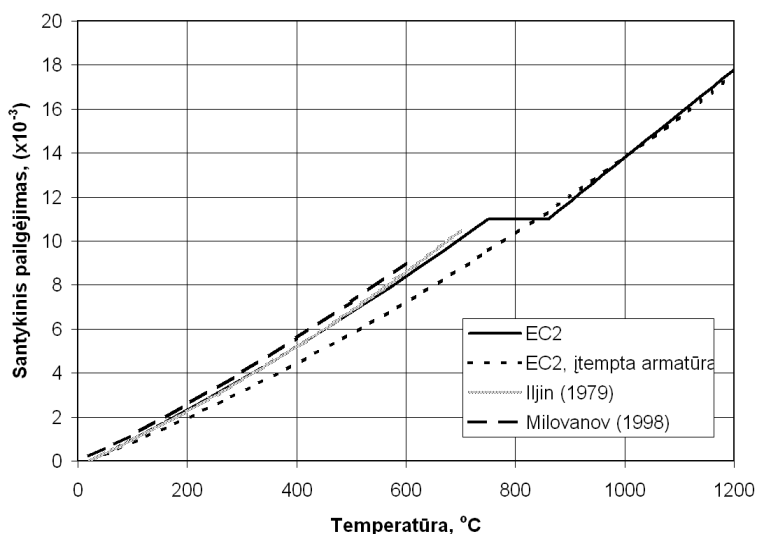
$$\Delta l / l = 1,1 \cdot 10^{-2}, \quad \text{kai } 750^\circ\text{C} \leq \theta_a < 860^\circ\text{C}; \quad (1.132)$$

$$\Delta l / l = 2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 6,2 \cdot 10^{-3}, \quad \text{kai } 860^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}; \quad (1.133)$$

- įtempta armatūra:

$$\Delta l / l = 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2,016 \cdot 10^{-4}, \quad \text{kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}; \quad (1.134)$$

čia: l - ilgis 20°C temperatūroje; Δl - šiluminis pailgėjimas; θ_a - plieno temperatūra $[^\circ\text{C}]$.



1.17 pav. Plieno šiluminis pailgėjimas

1.5 Pirmojo skyriaus išvados ir rezultatai

1. Kasmet Žemėje kyla vidutiniškai apie 8 mln. gaisrų. Konstrukciniu požiūriu pastatai ir statiniai gaisro metu turi tam tikrą laiką atlaikyti mechanines apkrovas ir taip užtikrinti saugią žmonių evakuaciją (gelbėjimą) bei saugų ugniagesių darbą. Kad įvertinti gaisro poveikį konstrukcijoms, pirmiausia reikia apskaičiuoti temperatūrų pasiskirstymą jose.
2. Šiluma gali sklirti trimis būdais: laidumu, konvekcija, spinduliavimu. Temperatūros sklidimas konstrukcijoje priklauso nuo statybinių medžiagų šiluminių savybių, konstrukcijų geometrijos, gaisro apkrovos. Šilumos laidumas medžiagoje apibūdinamas Furje diferencialine lygtimi.
3. Atlikta skirtingų modelių, apibūdinančių betono ir armatūros šilumines (šilumos laidumas, šiluminė talpa, betono tankis) bei fizikines ir mechanines charakteristikas (betono gniuždomasis stipris, tempiamasis stipris, tamprumo modulis, deformacija, atitinkanti maksimalius gniuždymo įtempius, temperatūrinė deformacija, armatūros stipris, tamprumo modulis bei temperatūrinė deformacija), analizė. Dauguma šiluminių ir fizikinių - mechaninių charakteristikų tiksliausiai modeliuojama, remiantis LST EN 1992-1-2:2005 nuostatomis.
4. Temperatūrų pasiskirstymui gelžbetoninėse konstrukcijose gaisro metu nustatyti taikomi nesudėtingi analiziniai – empiriniai metodai, kuriais sunku įvertinti šiluminių savybių kitimą. Inžinieriai naudoja temperatūrines kreives, pateiktas normatyviniuose statybos techniniuose dokumentuose, tačiau jos skirtos tik tam tikriems atvejams. Baigtinių elementų programos smarkiai progresuoja, yra universalus ir gali nustatyti visus galimus poveikius, tačiau skaičiavimas su jais reikalauja pernelyg daug kompiuterio išteklių. Eksperimentiniai metodai paprastai tinka tik konkrečioms išbandytoms konstrukcijoms temperatūros laukams prognozuoti, be to, tokio tipo metodikos reikalauja milžiniškų darbo bei medžiagų sąnaudų.
5. Remiantis šiomis išvadomis, suformuluotas toks darbo tikslas: *taikant sluoksnių modelį, pasiūlyti aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo skerspjūvyje apskaičiavimo algoritmą, įvertinantį netiesines šilumines medžiagų savybes.*

2. TEMPERATŪRINIO UŽDAVINIO SLUOKSNIŲ MODELIS

Šiame skyriuje aprašomi aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių elementų paviršiaus temperatūros ir jos pasiskirstymo skerspjūvyje apskaičiavimo metodai. Pateikiamas netiesinis skaičiavimo algoritmas, taikant sluoksnių modelį ir baigtinių skirtumų metodą, aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo nustatymui. Sprendžiamas skaitinis temperatūros pasiskirstymo apskaičiavimo pavyzdys. Taip pat pateikiamas E. Gedo (Geda 2010) mechaninio uždavinio sluoksnių modelis ir jo skaitinis pavyzdys.

2.1 Paviršiaus temperatūros skaičiavimas

Šiame poskyryje aprašomi paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdai (Furje lygties sprendiniai), kurie bus panaudoti sudarant sluoksnių modelio skaičiavimo algoritmą.

Pagal nustatytą laiko temperatūros priklausomybę, paviršiaus temperatūros apskaičiavimo formulė (Drysdale 1990):

$$T_b(t) = T_0 + (T_\infty - T_0) \left\{ 1 - e^{-\frac{h^2 t}{60 \cdot k \rho c}} \left[1 - \operatorname{erf} \left(h \sqrt{\frac{t}{60 \cdot k \rho c}} \right) \right] \right\} \quad [^\circ\text{C}] , \quad (2.1)$$

čia: T_0 - pradinė elemento temperatūra $[^\circ\text{C}]$; T_∞ - dujų temperatūra arti ugnies veikiamo elemento $[^\circ\text{C}]$; h - šilumos perdavimo konvekcijs koeficientas $[W / m^2 K]$; ρ - medžiagos tankis $[kg / m^3]$; k - šilumos laidumo koeficientas $[W / m^2 K]$; t - laikas $[s]$; c - savitoji šiluminė talpa $[J / kg K]$; $\operatorname{erf}(x)$ - klaidų funkcija.

Formulė (2.1) yra Furje lygties analitinis sprendinys. Joje tiesiogiai nevertinamas šilumos perdavimas radiacijos būdu ir nevertinama medžiagos sluoksnių, esančių prie elemento paviršiaus, temperatūros įtaka. Sprendžiant netiesinį temperatūros uždavinį, šioje formulėje yra trys parametrai priklausantys nuo apskaičiuojamos temperatūros - tai medžiagos tankis ρ , šilumos laidumo koeficientas k ir savitoji šiluminė talpa c .

Skaitinis Furje lygties sprendinys paviršiaus temperatūros nustatymui (Kudalenkin 1985):

$$t_{o,n,\Delta\tau} = t_{o,n} + \frac{a_{o,n}(t_{o,c} - t_{o,n})\Delta\tau - \lambda(t_{o,n} - t_1)\frac{\Delta\tau}{\Delta x}}{0,5\Delta x \rho c} \quad [^\circ\text{C}] ; \quad (2.2)$$

$$a_{o,n} = 29 + c_{np} \frac{\left(\frac{t_{o,c}}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{o,n}}{100}\right)^4}{t_{ct} - t_{o,n}} ; \quad (2.3)$$

$$c_{np} = 3,26 - 0,0023t_{o,n}; \quad (2.4)$$

čia: ρ - medžiagos tankis $[kg/m^3]$; c - savitoji šiluminė talpa $[J/kgK]$; λ - šilumos laidumo koeficientas $[W/mK]$; $\Delta\tau$ - laiko tarpas $[s]$; Δx - sluoksnio storis $[s]$; $t_{o,c}$ - dujų temperatūra arti ugnies veikiamo elemento $[^{\circ}C]$; $a_{o,n}$ - šilumos perdavimo koeficientas; c_{np} - spinduliavimo koeficientas.

Formulėje (2.2) šilumos perdavimas radiacijos ir konvekcijos būdu vertinamas pagal šilumos perdavimo koeficientą $a_{o,n}$, kur konvekcijos koeficientas standartinei gaisro kreivei LST ISO:834 lygus 29 $[W/m^2K]$. Spinduliavimo koeficientas c_{np} gelžbetoninėms konstrukcijoms yra gautas iš eksperimentinių tyrimų. Kitoms medžiagoms jis nustatomas pagal atitinkamą formulę (Kudalenkin 1985). Paviršiaus temperatūra tiesiogiai priklauso nuo medžiagos vidinės temperatūros, kas leidžia tiksliau įvertinti šilumos perdavimo procesą. Šioje formulėje yra keturi parametrai priklausantys nuo apskaičiuojamos temperatūros - tai medžiagos tankis ρ , šilumos laidumo koeficientas λ , savitoji šiluminė talpa c ir šilumos perdavimo koeficientas $a_{o,n}$.

Antras skaitinis Furje lygties sprendinys paviršiaus temperatūros nustatymui (Drysedale 2002):

$$T_s(t + \Delta t) = T_s(t) + \frac{h\Delta t}{\rho c \Delta x} (T_h - 2T_s(t) + T_0) \quad [^{\circ}C], \quad (2.5)$$

čia: ρ - medžiagos tankis $[kg/m^3]$; c - savitoji šiluminė talpa $[J/kgK]$; h - šilumos perdavimo konvekcija koeficientas $[W/m^2K]$; Δt - laiko tarpas $[s]$; Δx - sluoksnio storis $[s]$; T_0 - pradinė elemento temperatūra $[^{\circ}C]$; T_h - dujų temperatūra arti ugnies veikiamo elemento $[^{\circ}C]$.

Formulė (2.5) vertina tik šilumos perdavimą konvekcijos būdu. Tam, kad būtų įvertintas šilumos perdavimas radiacija, įvedamas šilumos perdavimo konvekcija ir radiacija koeficientas:

$$h_{tot} = h_c + h_r \quad [W/m^2K]; \quad (2.6)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (2T_m)^2 \left[2T_m^2 + (T_1 + T_2)^2 / 2 \right] \quad [W/m^2K]; \quad (2.7)$$

$$T_m = (T_1 + T_2) / 2 \quad [^{\circ}C]; \quad (2.8)$$

čia: h_c - šilumos perdavimo konvekcija koeficientas $[W/m^2K]$; h_r - šilumos perdavimo radiacija koeficientas $[W/m^2K]$; ε - paviršiaus spinduliavimo koeficientas; σ - Stefano Boltcmano

konstanta $\left[= 5,67 \cdot 10^{-8} W / m^2 K^4 \right]$; T_1 - dujų temperatūra arti ugnies veikiamo elemento $[K]$; T_2 - paviršiaus temperatūra $[K]$.

Formulėje (2.5) pakeitus šilumos perdavimo konvekcija koeficientą h šilumos perdavimo konvekcija ir radiacija koeficientu h_{tot} gausime formulę, kuri įvertina du šilumos perdavimo būdus. Be to, šioje formulėje paviršiaus temperatūra tiesiogiai priklauso nuo medžiagos vidinės temperatūros, kas leidžia tiksliau įvertinti šilumos perdavimo procesą. Sprendžiant netiesinį temperatūros uždavinį, formulėje yra trys parametrai priklausantys nuo apskaičiuojamos temperatūros - tai medžiagos tankis ρ , savitoji šiluminė talpa c ir šilumos perdavimo radiacija koeficientas h_r .

Iš pateiktų literatūroje paskelbtų paviršiaus temperatūros apskaičiavimo formulių sunku išrinkti vieną, kadangi visos jos vertina šiluminio proceso veiksnius. Draizdeilo (Draizdeil 1990) formulė tiesiogiai nevertina medžiagos vidinės temperatūros, bet joje yra įvestas šilumos laidumo koeficientas, kuris įvertina šilumos laidumo procesą medžiagoje. Šios formulės trūkumas toks, kad joje nėra parametru, vertinančių šilumos perdavimą radiacija. Kitos dvi paviršiaus apskaičiavimo formulės tiesiogiai vertina medžiagos vidinę temperatūrą ir šilumos perdavimą radiacija, bet tam naudojami skirtingi parametrai.

Tam, kad įvertinti šių formulių privalumus ir trūkumus, visos jos bus panaudotos sluoksnių modelyje.

2.2 Temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje skaičiavimas

Šiame poskyryje aprašomas Mathewso ir Finko (Mathews ir Fink 2001) šilumos laidumo lygties sprendimas. Lygties sprendinys bus naudojamas sluoksnių modelyje aprašant šilumos sklaidimą medžiagos skerspjūvyje, tai yra nustatant temperatūros pasiskirstymą skerspjūvio aukštyje.

Nagrinėjama vienos krypties šilumos laidumo lygtis kaip parabolinė diferencialinė lygtis:

$$T_t(x, t) = c^2 T_{xx}(x, t), \quad \text{kai } 0 \leq x < a \quad \text{ir} \quad 0 < t < b; \quad (2.9)$$

pradinė sąlyga:

$$T(x, 0) = T_p, \quad \text{kai } t = 0 \quad \text{ir} \quad 0 < x < a; \quad (2.10)$$

kraštinė sąlyga:

$$T(0, t) = f(t), \quad \text{kai } x = 0 \quad \text{ir} \quad 0 \leq t \leq b; \quad (2.11)$$

čia: T_p - pradinė medžiagos temperatūra; $f(t)$ - medžiagos paviršiaus temperatūros kitimo funkcija nuo laiko; c^2 - koeficientas:

$$c^2 = \frac{\lambda}{\rho c}. \quad (2.12)$$

Šilumos laidumo lygtis – tai temperatūros modelis izoliuotoje plokštėje, kuri turi kintamą paviršiaus temperatūrą $f(t)$ ir pradinę pastovią temperatūrą visoje plokštėje T_p . Ieškomas šios lygties skaitinis sprendimas.

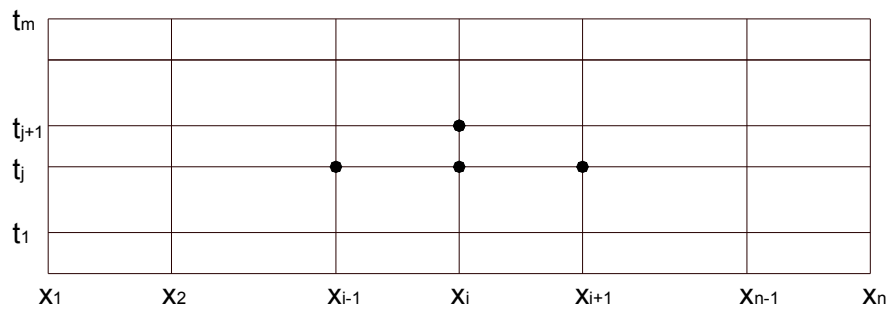
Stačiakampis $R = \{(x, t) : 0 \leq x \leq a, 0 \leq t \leq b\}$ padalintas į $(n-1) \times (m-1)$ stačiakampių su kraštinėmis lygiomis $\Delta x = h$ ir $\Delta t = k$, kaip parodyta 1 pav. Pirmos eilės, kur $t = t_1 = 0$, sprendimas lygus $T(x_i, t_1) = T_p$. Sprendimo metodas pritaikomas $T(x, t)$ tinklo taškams kitose eilėse: $\{T(x_i, t_j) : i = 1, 2, \dots, n, j = 2, 3, \dots, m\}$.

$T_t(x, t)$ ir $T_{xx}(x, t)$ išraiškos:

$$T_t(x, t) = \frac{T(x, t+k) - T(x, t)}{k}; \quad (2.13)$$

$$T_{xx}(x, t) = \frac{T(x-h, t) - 2T(x, t) + T(x+h, t)}{h^2}. \quad (2.14)$$

Tinklas susideda iš tolygiai išdėstytų kiekvienoje eilėje $x_{i+1} = x_i + h$ ($x_{i-1} = x_i - h$) ir kiekviename stulpelyje $t_{j+1} = t_j + k$ taškų. Panaudojant priartėjimą $T_{i,j}$ prie $T(x_i, t_j)$ lygtyse (2.13) ir (2.14), kurios paeiliui įstatomos į lygtį (2.9), kad gautųsi:



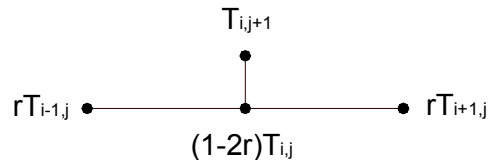
2.1 pav. Tinklas (2.9) lygties sprendimui

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{k} = c^2 \frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{h^2}, \quad (2.15)$$

apytikslis (2.9) lygties sprendimas. Patogumo dėlei $r = c^2 k / h^2$ įstatomas į (2.15) ir rezultate gaunasi:

$$T_{i,j+1} = (1-2r)T_{i,j} + r(T_{i-1,j} + T_{i+1,j}). \quad (2.16)$$

Ši lygtis skirta rasti (j+1)-ąją eilę tinkle, kai reikšmės j-oje eilėje žinomos. Pabrėžiama, kad $T_{i-1,j}$, $T_{i,j}$ ir $T_{i+1,j}$ ribose šita formulė duoda tikslią $T_{i,j+1}$ reikšmę. (2.16) lygties sprendimo schema parodyta 2.2 pav.



2.2 pav. (2.16) lygties sprendimo schema

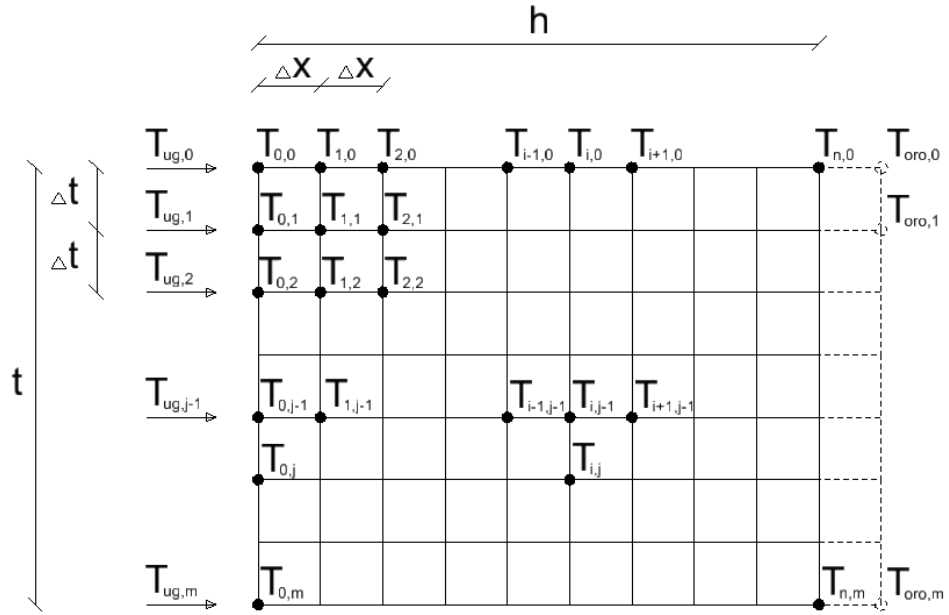
Šios formulės paprastumas daro ją patrauklią naudojimui. Be to, svarbu naudoti stabilią skaičiavimo techniką. Jeigu kiekviena klaida, gauta viename skaičiavimo etape, galų gale mažėja, tai metodas vadinamas stabiliu. (2.16) lygtis stabili tik tada, kai r yra intervale $0 \leq r \leq 0,5$. Tai reiškia, kad žingsnio k reikšmė turi tenkinti nelygybę $k \leq h^2 / (2c^2)$. Jei šita sąlyga netenkinama, tai klaidos, fiksuotos vienoje eilėje, gali didėti kitose eilėse.

2.3 Šiluminio uždavinio sluoksnių modelis

Šiame poskyryje pateikiamas skaičiavimo algoritmas, pritaikant integralinį sluoksnių modelį, aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo nustatymui. Anksčiau aprašytos formulės, paviršiaus temperatūros ir temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje apskaičiavimo, kartu su pradinėmis ir kraštinėmis sąlygomis bus apjungtos vienu skaičiavimo algoritmu, kuris leis nustatyti kiekvieno sluoksnio temperatūrą kiekviename laiko žingsnyje. Algoritmas pritaikytas netiesiniam temperatūros uždavinio skaičiavimui.

Plokštės skerspjūvis suskirstomas į k sluoksnių skaičių, kur kiekvieno sluoksnio storis Δx . Bendras kaitinimo laikas t , laiko žingsnis Δt lygus 60 sekundžių. Kuriama viena pradinė ir dvi kraštinės sąlygos.

Pradinė sąlyga aprašo pradinę medžiagos temperatūrą (kiekvieno sluoksnio), kai kaitinimo laikas t lygus nuliui. Pradinė temperatūra 20°C . Kraštinė sąlyga (2.18) aprašo gaisro poveikį iš kaitinamos pusės. Gaisro poveikis išreiškiamas standartine gaisro kreive, tai yra temperatūros priklausomybe nuo laiko. Kraštinė sąlyga (2.19) aprašo poveikį plokštei iš nekaitinamos pusės. Dėl skaičiavimo supaprastinimo šis poveikis laikomas pastovia oro temperatūra.



2.3 pav. Temperatūros pasiskirstymo g/b plokštėse skaičiavimo algoritmo tinklas

Pradinė sąlyga:

$$T_{n,0} = 20^{\circ}\text{C}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, k-1, k, \quad k = \frac{x}{\Delta x}. \quad (2.17)$$

Kraštinės sąlygos:

$$T_{ug,m} = f(t), \quad m = 0, 1, 2, \dots, t-1, t; \quad (2.18)$$

$$T_{oro,m} = 20^{\circ}\text{C}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, t-1, t; \quad (2.19)$$

čia: $f(t)$ - gaisro kreivės, temperatūros priklausomybė nuo laiko; t - kaitinimo laikas [s]; x - skerspjūvio aukštis [m]; Δx - sluoksnio storis [m].

Apibudintas plokštės skerspjūvis, kurio pradiniu laiko žingsniu kiekvieno sluoksnio temperatūra lygi 20°C , kaitinamą paviršių veikia standartinė gaisro kreivė, o nekaitinamą paviršių veikia pastovi oro temperatūra lygi 20°C . Kitas žingsnis - tai paviršiaus temperatūros apskaičiavimas. Bus naudojamos trys anksčiau aprašytos paviršiaus skaičiavimo formulės. Parametrų žymėjimai formulėse bus pritaikyti autoriaus siūlomam algoritmui.

Paviršiaus temperatūra:

- (Drysedale 1990):

$$T_{0,j} = T_{0,j-1} + (T_{ug,j-1} - T_{0,j-1}) \left\{ 1 - e^{\frac{h^2 \Delta t}{60 \cdot \lambda(T) \cdot \rho(T) \cdot c(T)}} \left[1 - \operatorname{erf} \left(h \sqrt{\frac{\Delta t}{60 \cdot \lambda(T) \cdot \rho(T) \cdot c(T)}} \right) \right] \right\} \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad (2.20)$$

Formulės (2.20) ypatumas, kad paviršiaus temperatūra apskaičiuojama nepriklausomai nuo temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje. Tai reiškia, kad naudojant sluoksnių modelį paviršiaus temperatūros skaičiavimas atliekamas atskirai nuo temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje skaičiavimo. (2.21) ir (2.24) formulės tiesiogiai priklauso nuo temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje ir skaičiavime jos naudojamos kartu su (2.28) formule.

- (Kudalenkin 1985):

$$T_{0,j} = T_{0,j-1} + \frac{a_{o,n}(T) \cdot (T_{ug,j-1} - T_{0,j-1}) \Delta t - \lambda(t) \cdot (T_{ug,j-1} - T_{l,j-1}) \frac{\Delta t}{\Delta x}}{0,5 \Delta x \cdot \rho(t) \cdot c(t)} \quad [^{\circ}\text{C}]; \quad (2.21)$$

$$a_{o,n}(T) = 29 + c_{np}(T) \cdot \frac{\left(\frac{T_{ug,j}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{0,j}}{100} \right)^4}{T_{ug,j} - T_{0,j}}; \quad (2.22)$$

$$c_{np}(T) = 3,26 - 0,0023 \cdot T_{0,j}; \quad (2.23)$$

- (Drysedale 2002):

$$T_{0,j} = T_{0,j-1} + \frac{h_{tot}(T) \cdot \Delta t}{\rho(T) \cdot c(T) \cdot \Delta x} (T_{ug,j-1} - 2T_{0,j-1} + T_{l,j-1}) \quad [^{\circ}\text{C}]; \quad (2.24)$$

$$h_{tot}(T) = h_c + h_r(T) \quad [W / m^2 K]; \quad (2.25)$$

$$h_r(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (2T_m)^2 \left[2T_m^2 + (T_{ug,j} + T_{0,j})^2 / 2 \right] \quad [W / m^2 K]; \quad (2.26)$$

$$T_m = (T_{ug,j} + T_{0,j}) / 2 \quad [^{\circ}\text{C}]; \quad (2.27)$$

čia: h_c - šilumos perdavimo konvekcija koeficientas $[W / m^2 K]$; Δt - laiko tarpas $[s]$; $\rho(T)$ - betono tankio priklausomybė nuo temperatūros $[kg / m^3]$; $\lambda(T)$ - šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros $[W / m^2 K]$; $c(T)$ - savitosios šiluminės talpos priklausomybė nuo temperatūros $[J / kg K]$; $a_{o,n}(T)$ - šilumos perdavimo koeficientas; $c_{np}(T)$ - spinduliavimo

koeficientas; h_{tot} - šilumos perdavimo konvekcija ir radiacija koeficientas $[W / m^2 K]$; h_r - šilumos perdavimo radiacija koeficientas $[W / m^2 K]$; ε - paviršiaus spinduliavimo koeficientas; σ - Stefano Boltcmano konstanta $[= 5,67 \cdot 10^{-8} W / m^2 K^4]$.

Pritaikytos paviršiaus temperatūros apskaičiavimo formulės turi daug kintamųjų parametrų, priklausančių nuo apskaičiuojamos temperatūros, taigi skaičiavimas atliekamas iteraciniu būdu.

Kitas žingsnis - tai temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje nustatymas.

Temperatūra skerspjūvyje (Mathews 2001):

$$T_{i,j} = (1 - 2r(T)) \cdot T_{i,j-1} + r(T) \cdot (T_{i-1,j-1} + T_{i+1,j-1}) \quad [^{\circ}C]; \quad (2.28)$$

$$r(T) = \frac{\lambda(T) \cdot \Delta t}{\rho(T) \cdot c(T) \cdot (\Delta x)^2}, \quad 0 \leq r(T) \leq 0,5. \quad (2.29)$$

Temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje skaičiavime naudojami keturi parametrai. Trys iš jų - tai sluoksnių temperatūros jau apskaičiuotame laiko žingsnyje, ketvirtas parametras $r(T)$ priklauso nuo trijų šiluminių savybių ir pasirinkto laiko žingsnio bei sluoksnio storio. Būtina sąlyga, kad parametras $r(T)$ būtų intervale tarp nulio ir 0,5 tam, kad formulė (2.28) būtų stabili. Jei šita sąlyga netenkinama, tai klaidos, fiksuotos vienoje eilėje, gali didėti kitose eilėse. Ši sąlyga išlaikoma pagal laiko žingsnio ir sluoksnio storio parinkimą.

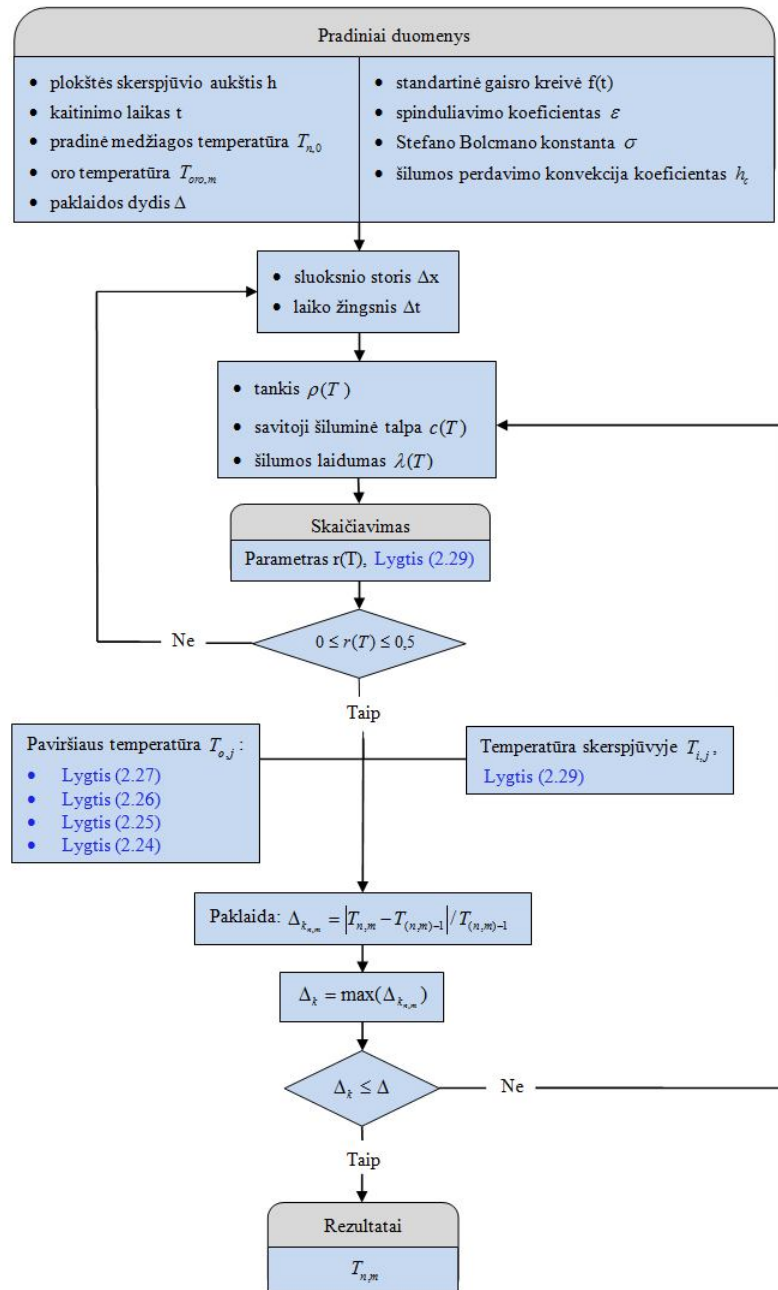
Pritaikyta temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje apskaičiavimo formulė, kaip ir paviršiaus temperatūros apskaičiavimo formulės, turi daug kintamųjų parametrų, priklausančių nuo apskaičiuojamos temperatūros, tai lemia, kad skaičiavimas turi būti atliekamas iteraciniu būdu. Pirmoje iteracijoje taikomos šiluminės savybės esant 20 °C temperatūrai.

Toliau pateikiama trumpa sluoksnių modelio algoritmo skaičiavimo seka (žr. 2.3 pav.). Nuo $T_{0,0}$ iki $T_{n,0}$ temperatūros taškams priskiriama pradinė medžiagos temperatūra, o $T_{oro,0} - T_{oro,m}$ taškams - oro temperatūra. $T_{ug,m}$ poveikis (taškai) yra žinomi, jie nustatomi pagal standartinės gaisro kreivės išraišką. $T_{0,m}$ taškams priskiriama viena iš pateiktų paviršiaus temperatūros apskaičiavimo formulių. Visiems likusiems taškams priskiriama (2.28) formulė. Taigi skaičiavimas prasideda nuo $T_{0,1}$ taško, kurio reikšmė apskaičiuojama nuo $T_{ug,0}$, $T_{0,0}$ ir $T_{1,0}$ taškų reikšmių. Po to $T_{1,1}$ taško reikšmė apskaičiuojama nuo $T_{0,0}$, $T_{1,0}$ ir $T_{2,0}$ taškų, ir toliau taip pat apskaičiuojamos visos $T_{n,1}$ reikšmės, tai yra kiekvieno sluoksnio temperatūros reikšmės. Atliekami sekančio laiko žingsnio (sekančios eilutės) skaičiavimai, čia $T_{0,2}$ apskaičiuojamas nuo $T_{ug,1}$, $T_{0,1}$ ir $T_{1,1}$ reikšmių; $T_{1,2}$ - nuo $T_{0,1}$, $T_{1,1}$ ir $T_{2,1}$ reikšmių ir taip toliau visų laiko žingsnių. Be to, kiekvieno taško apskaičiavimas dar priklauso

nuo to taško šiluminių savybių, kuria lemia to taško temperatūra. Taigi baigus vieno tinklo (2.3 pav.) skaičiavimą, atliekamas kito, tokio paties tinklo skaičiavimas, kai kiekvieno taško šiluminės savybės skaičiuojamos pagal anksčiau apskaičiuoto tinklo taškų temperatūras, tai yra atliekamas netiesinis skaičiavimas iteraciniu būdu.

Kai visų skerspjūvio sluoksnių temperatūros $T_{n,m}$ reikšmės iteruoja, nustatomos galutinės temperatūros reikšmės.

Temperatūros pasiskirstymo g/b plokštėse skaičiavimo algoritmo schema pateikiama 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Temperatūros pasiskirstymo g/b plokštėse skaičiavimo algoritmo schema

2.4 Šiluminio uždavinio sluoksnių modelio skaitinis pavyzdys

Skaičiavimo pavyzdyje temperatūrų pasiskirstymo analizė atlikta taikant baigtinių elementų programą ATENA ir sluoksnių modelį. Rezultatai palyginti su pateiktomis EC2 plokščių temperatūros kreivėmis.

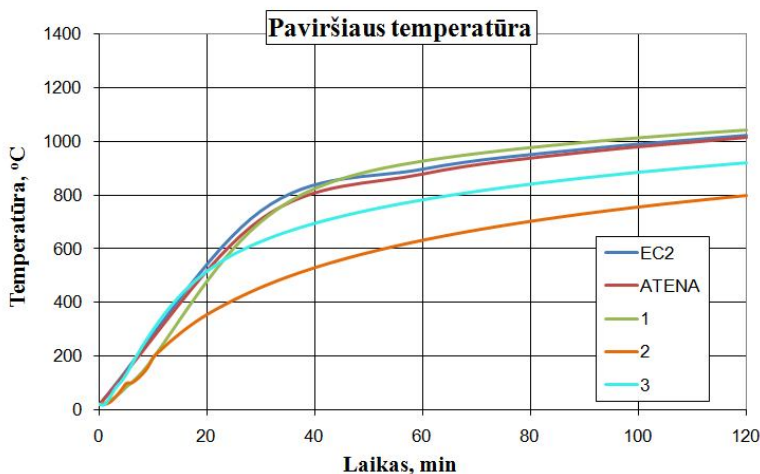
Sluoksnių modelio skaičiavimai atlikti su Microsoft Office Excel terpėje sukurta programa. Temperatūrų pasiskirstymas plokščių skerspjūvyje buvo apskaičiuotas, taikant sluoksnių modelyje tris paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdus:

- [1] – paviršiaus temperatūra (Drysedale 1990);
- [2] – paviršiaus temperatūra (Kudalenkin 1985);
- [3] – paviršiaus temperatūra (Drysedale 2002);

EC2 pateiktos temperatūros kreivės sudarytos 200 mm skerspjūvio aukščio plokštei, kuri kaitinama ISO-834 gaisro kreive. Plokštės savybės:

- 1,5 % drėgnio betono savitosios šiluminės talpos priklausomybė pagal EC2;
- betono šilumos laidumas pagal apatinę EC2 ribą;
- spinduliavimo geba, atitinkančia 0,7 betono paviršiaus;
- konvekcijos koeficientas, lygus $25 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$.

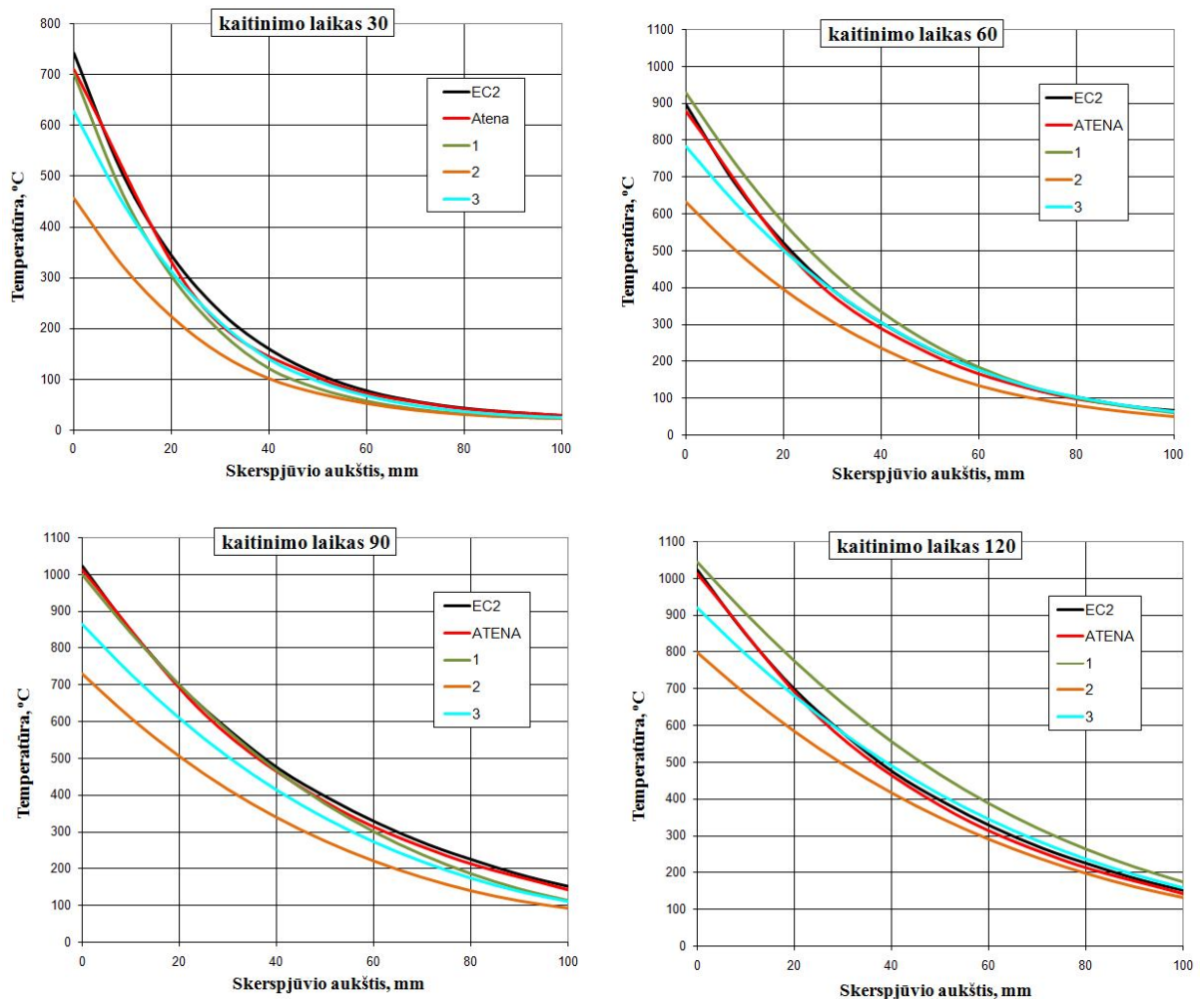
EC2 ir apskaičiuoti paviršiaus temperatūros rezultatai įvairiais kaitinimo laikotarpiais pateikti 2.5 paveiksle.



2.5 pav. EC2 ir apskaičiuotos paviršiaus temperatūros priklausomybės nuo laiko

Sluoksnių modeliu apskaičiuotos paviršiaus temperatūros priklausomybės nuo laiko žymiai tarpusavyje skiriasi. Didžiausia paviršiaus temperatūra nustatyta su 1-uoju sluoksnių modeliu, mažiausia – su 2-uoju sluoksnių modeliu. ATENA ir EC2 paviršiaus temperatūros priklausomybės beveik idealiai sutampa, jas geriausiai atitinka 1-asis sluoksnių modelis.

EC2 ir apskaičiuotų temperatūrų pasiskirstymo skerspjūvyje rezultatai įvairiais kaitinimo laikotarpiais pateikti 2.6 paveiksle.



2.6 pav. EC2 ir apskaičiuotas temperatūrų pasiskirstymas skerspjūvyje įvairiais kaitinimo laikotarpiais

Temperatūros pasiskirstyme skerspjūvyje gautas pakankamas teorinių (apskaičiuotų sluoksnių ir baigtinių elementų metodais) ir EC2 temperatūros kreivių atitikimas. Baigtinių elementų programos ATENA rezultatai beveik idealiai sutampa su EC2 pateiktomis temperatūros kreivėmis, didžiausias skirtumas siekia 10,0 %, esant 30 minučių kaitinimo trukmei. Sluoksnių modelių rezultatų pasiskirstymas panašus į EC2 rezultatų pasiskirstymą. Priklausomai nuo pasirinktojo sluoksnių modelyje paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdo, didžiausi skirtumai siekia: 1-ojo sluoksnių modelio - 15 %; 2-ojo - 38 %; 3-ojo - 22 %.

2.5 Mechaninio uždavinio sluoksnių modelis

Konstrukcijų, paveiktų aukšta temperatūra, analizę sudaro du etapai:

1) temperatūros pasiskirstymo elemento skerspjūvyje nustatymo; 2) mechaninio atsparumo nustatymo, įvertinant kintančias šilumines ir mechanines apkrovas. Bendruoju atveju šiluminė ir mechaninė analizės nėra integruotos, t. y. šiluminis poveikis įvertinamas pirmiausia visą gaisro laikotarpį ir tuomet jo rezultatai perkeliama į mechaninės analizės programą. Šiame poskyryje aprašomas antrasis analizės etapas (pirmasis etapas aprašytas 3.2 poskyryje). Mechaninis poveikis nustatomas, naudojant E. Gedo (Geda 2010) sukurta programinę įrangą, pagrįstą sluoksnių modeliu.

E. Gedo (Geda 2010) pasiūlytas gelžbetoninių elementų veikiamų aukšta temperatūra sluoksnių modelis pagrįstas šiomis prielaidomis:

- 1) skaičiavimams taikomi vidutiniai įtempiai bei vidutinės deformacijos, t. y. modelis pagrįstas vidutinių plyšių (angl. smeared cracking) koncepcija;
- 2) deformacijos skerspjūvio aukštyje kinta tiesiškai, t. y. galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė;
- 3) armatūros ir betono sukibimas laikomas idealiu; armatūros praslydimas betone įvertinamas tempiamojo betono fizikine priklausomybe;
- 4) darbe nagrinėjamas tik augančios temperatūros atvejis, t. y. vėsimo stadija nenagrinėjama;
- 5) temperatūros pokyčių sukeltos deformacijos įvertinamos ekvivalentinėmis įrašomis: ašine jėga ir lenkimo momentu.

Elemento skerspjūvis suskaidomas į horizontalius armatūros ir betono sluoksnius. Skaičiuojant gali būti įvertintos dėl apkrovos ir temperatūros poveikio kintančios kiekvieno sluoksnio fizikinės mechaninės savybės. Gelžbetoninio elemento skerspjūvis pakeičiamas redukuotu betoniniu skerspjūviu. Tai atliekama, i -ojo sluoksnio plotą padauginus iš tamprumo modulių santykio $\bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma) / E_c(20^\circ C)$, čia $\bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma)$ – i -ojo sluoksnio kirstinis deformacijų modulis, $E_c(20^\circ C)$ – betono tamprumo modulis normalioje temperatūroje.

Geometriniai redukuoto skerspjūvio rodikliai (plotas $A_{c,eff}$, statinis momentas $S_{c,eff}$ ir inercijos momentas $I_{c,eff}$) nustatomi elemento viršutiniojo sluoksnio atžvilgiu. Nustatoma suminė deformacija $\varepsilon_\sigma(T, \sigma)$, temperatūrinė deformacija $\varepsilon_{th,i}(\theta)$. Tempiamo betono sluoksniams trumpalaikė temperatūrinė valkšnumo deformacija nevertinama. Gniuždomo betono sluoksniams nustatoma trumpalaikė temperatūrinė valkšnumo deformacija.

Deformacijų $\varepsilon_{th,i}(\theta)$ ir $\varepsilon_{tc,i}(T, \sigma)$ įtaka įtempių deformacijų būviui įvertinama prie gelžbetoninio elemento pridendant ekvivalentines ašines jėgas ΔN_{th} ir ΔN_{tc} bei lenkimo momentus

ΔM_{th} ir ΔM_{ttc} . Ekvivalentinės ašinės jėgos ΔN_{th} ir ΔN_{ttc} nustatomos sumuojant vidinius įtempius $\Delta \sigma_{th}$, $\Delta \sigma_{ttc}$ skerspjūvio aukštyje.

Ekvivalentinės jėgos, atsirandančios dėl temperatūros įtakos, pridedamos prie išorinių jėgų poveikio.

$$N = \Delta N_{th} + N_{ttc}, \quad (2.30)$$

$$M = M_{ext} + \Delta M_{th} + \Delta M_{ttc}, \quad (2.31)$$

Skerspjūvio viršutiniojo sluoksnio deformacija $\varepsilon_1(\theta)$ ir elemento kreivis $\kappa(\theta)$, esant temperatūrai θ , nustatomi remiantis vidinių ir išorinių jėgų pusiausvyros lygtimis:

$$\begin{aligned} N &= N_{cc} + N_{ct} + N_{sc} + N_{st}, \\ M &= M_{cc} + M_{ct} + M_{sc} + M_{st}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

čia N_{cc} , N_{ct} ir M_{cc} , M_{ct} – gniuždomo bei tempiamo betono vidinės atstojamosios jėgos ir jų sukelti lenkimo momentai skerspjūvio viršutiniojo krašto atžvilgiu; N_{cs} , N_{st} ir M_{sc} , M_{st} – gniuždomosios bei tempiamosios armatūros vidinės atstojamosios jėgos ir jų sukelti lenkimo momentai skerspjūvio viršutiniojo krašto atžvilgiu.

Suminė pradinė ašinė jėga nustatoma, integruojant įtempius skerspjūvio aukštyje. Dėl temperatūros įtakos gelžbetoniniame lenkiamame elemente, armuoto neįtemptąja armatūra, atsiranda ašinė jėga. Ji apskaičiuojama taip:

$$N = \Delta N_{th} + \Delta N_{ttc} = \begin{cases} -\int \sigma_i dA, \\ -\left[\varepsilon_{c1}(\sigma, \theta) \int \bar{E}(\sigma, \theta) dA + \kappa(\sigma, \theta) \int \bar{E}(\sigma, \theta) y dA \right], \\ -E_c(20^\circ C) \left[\varepsilon_{c1}(\sigma, \theta) A_{c, eff} + \kappa(\sigma, \theta) S_{c, eff} \right]. \end{cases} \quad (2.33)$$

Integruojant redukuoto skerspjūvio statinį momentą skerspjūvio aukštyje, gaunamas suminis lenkimo momentas M :

$$\begin{aligned} M &= M_{ext} + \Delta M_{th} + \Delta M_{ttc} = \\ &= \begin{cases} \int \sigma_i y dA; \\ \left[\varepsilon_{c1}(\theta) \int \bar{E}(\sigma, \theta) y dA + \kappa(\theta) \int \bar{E}(\sigma, \theta) y^2 dA \right]; \\ E_c(20^\circ C) \left[\varepsilon_{c1}(\theta) S_{c, eff} + \kappa(\theta) I_{c, eff} \right], \end{cases} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Nagrinėjamo skerspjūvio viršutinio krašto deformacija $\varepsilon_1(\theta)$ bei kreivis $\kappa(\theta)$ išreiškiami tokiomis formulėmis:

$$\varepsilon_1(\theta) = -\frac{I_{c, eff} N + S_{c, eff} M}{E_c(20^\circ C) (A_{c, eff} I_{c, eff} - S_{c, eff}^2)}. \quad (2.35)$$

$$\kappa(\theta) = \frac{S_{c,eff}N + A_{c,eff}M}{E_c(20^\circ C)(A_{c,eff}I_{c,eff} - S_{c,eff}^2)}. \quad (2.36)$$

Suminės deformacijos sluoksnyje i nuo skerspjūvio viršutinio krašto nutolusiame atstumu y_i , apskaičiuojamos pagal viršutinio krašto deformacijas $\varepsilon_1(\theta)$ ir kreivį $\kappa(\theta)$:

$$\varepsilon_{tot,i}(\theta) = \varepsilon_1(\theta) + y_i\kappa(\theta). \quad (2.37)$$

Pagal formulę (3.3) išreiškiame įtempių sukeltą deformaciją:

$$\varepsilon_{\sigma,i}(\theta, \sigma) = \varepsilon_{tot,i}(\theta, \sigma) - \varepsilon_{th,i}(T, 0) - \varepsilon_{tc,i}(T, \sigma). \quad (2.38)$$

Formulės (3.28) narys $\varepsilon_{tc,i}(T, \sigma)$ armatūros ir tempiamojo betono sluoksniams imamas lygus nuliui. Tuomet įtempiai sluoksnyje i apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_i(\theta) = \varepsilon_{\sigma,i}(\theta, \sigma) \bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma). \quad (2.39)$$

Šiam skaičiavimo modeliui sukurta kompiuterinė programa (Kaklauskas 2001), skirta elementų kreiviams, įlinkiams bei įtempių deformacijų būviui apskaičiuoti. Skaičiavimas atliekamas iteracijomis.

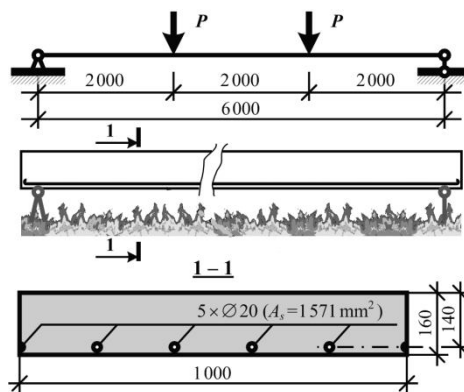
Kai visų skerspjūvio sluoksnių kirstinių deformacijų modulių $\bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma)$ reikšmės iteruoja, nustatomos galutinės nagrinėjamo pjūvio įtempių deformacijų bei kreivių reikšmės. Ta pati procedūra taikoma visiems elemento pjūviams, o lenkiamojo elemento įlinkiai nuo trumpalaikio apkrovos poveikio apskaičiuojami taikant Moro integralą.

Mechaninio uždavinio skaičiavimo algoritmo schema pateikta D priede.

Detaliau sluoksnių modelio taikymo ypatumai aprašyti E. Gedo (Geda 2010) disertacijoje.

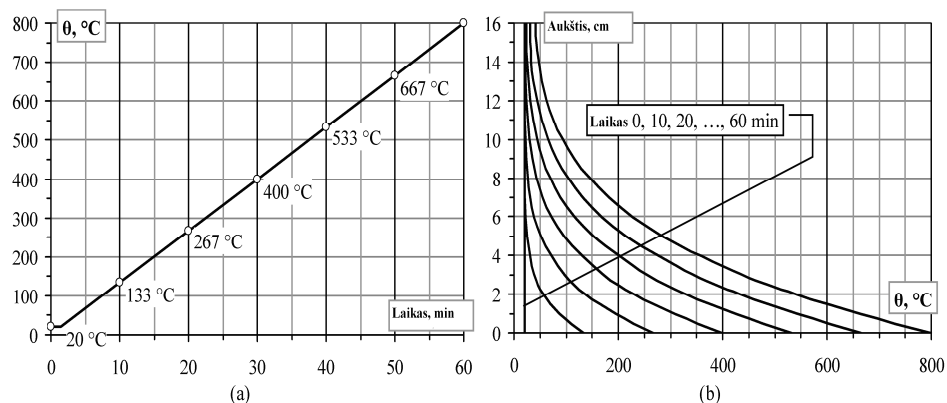
2.6 Mechaninio uždavinio sluoksnių modelio skaitinis pavyzdys

E. Gedo (Geda 2010) mechaninio uždavinio skaičiavimo pavyzdyje nagrinėta 6,0 m ilgio ir 0,16 m skerspjūvio aukščio laisvai atremta gelžbetoninė plokštė (2.7 pav.). Ji veikiama aukštos temperatūros apatiniame plokštės paviršiuje. Plokštė armuojama 20 mm skersmens armatūros strypais, išdėstytais 200 mm žingsniu. Apsauginis betono sluoksnis yra 10 mm. Gelžbetoninė plokštė veikiama dviejų sutelktųjų apkrovų (2.7 pav.), kurios nuo atramų nutolusios 2 m. Temperatūrinei apkrovai naudota idealizuota tiesinė temperatūros ir laiko kreivė (2.8 pav., a) su 800 °C temperatūra, kuri pasiekama per 60 minučių laiką. Temperatūrų pasiskirstymo analizė atlikta taikant baigtinių elementų programą DIANA. Temperatūrų pasiskirstymas gelžbetoninės plokštės skerspjūvyje pavaizduotas 2.8 paveiksle, b.



2.7 pav. Plokštės konstrukcinė schema ir skerspjūvis (Bačinskas ir kt. 2007)

Kartu su temperatūriniu apkrova buvo nustatyti keturi išoriniai lenkimo momentai: 1) $M = 0$; 2) $M = 20$ kNm; 3) $M = 50$ kNm; 4) $M = 96$ kNm. Esant $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai buvo apytiksliai apskaičiuoti pleišėjimo momentas 23 kNm ir maksimalus atlaikomasis momentas 127 kNm.



2.8 pav. Taikytos diagramos: a) temperatūros ir laiko kreivė; b) temperatūrų pasiskirstymas gelžbetoninės plokštės skerspjūvyje (Bačinskas ir kt. 2007)

Plokštė nuo pirmųjų išorinių lenkimo momentų, veikiančių kartu su temperatūriniu apkrova, nesuiro. Kai išorinis lenkimo momentas 96 kNm, gelžbetoninė plokštė suiro. Temperatūros poveikis gelžbetoninės plokštės laikomajai galiai turi didelę reikšmę, nes plokštė veikiama šiluminės-mechaninės apkrovos atlaiko net 32,2% mažesnę lenkimo momentą (Geda 2010).

Idealizuotos tampriai plastinės medžiagų diagramos buvo taikomos plienui ir betonui. Tempiamam betonui buvo taikyta trapi elgsena. Mechaninės ir šiluminės betono ir armatūros savybės, kurios priklausomos nuo temperatūros, pateikiamos 7 lentelėje.

7 lentelė. Pradiniai medžiagų parametrai (Bačinskas ir kt. 2007)

Betono parametrai		Reikšmė	Temperatūros įtaka (taip/ne)
E	Tamprumo modulis, GPa	42	Taip
f_t	Stiprumas tempiant, MPa	4,8	Taip
f_c	Stiprumas gniuždant, MPa	88	Taip

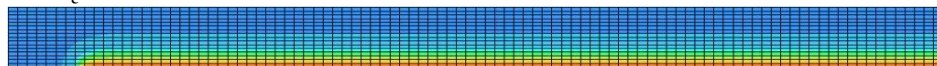
Betono parametrai		Reikšmė	Temperatūros įtaka (taip/ne)
α_c	Temperatūrinis plėtimosi koeficientas	$1,2 \times 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$	Taip
C_c	Savitoji šiluminė talpa, $\text{J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$	1,333	Taip
λ_c	Šilumos laidumas, $\text{W/m } ^\circ\text{C}$	$2,07 \times 10^{-6}$	Taip
Armatūros parametrai		Reikšmė	Temperatūros įtaka (taip/ne)
E_s	Tamprumo modulis, GPa	215	Taip
f_s	Takumo riba, MPa	600	Taip
α	Temperatūrinis plėtimosi koeficientas	$1,2 \times 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$	Ne

Atliekant temperatūrinę analizę su baigtinių elementų programa DIANA, dėl simetrijos sąlygų buvo modeliuojama pusė plokštės. Toliau esančiame paveiksle pateikiami plokštės temperatūriniai laukai tam tikrais laiko etapais.

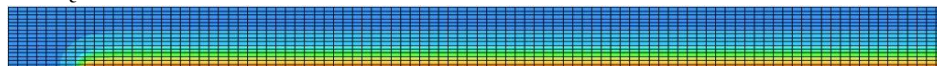
a) 10-ąją minutę



b) 50-ąją minutę

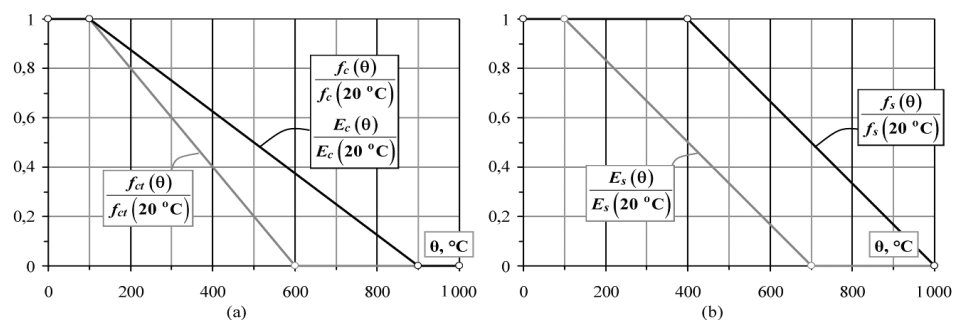


c) 60-ąją minutę



2.9 pav. Gelžbetoninės plokštės temperatūriniai laukai (Geda 2010)

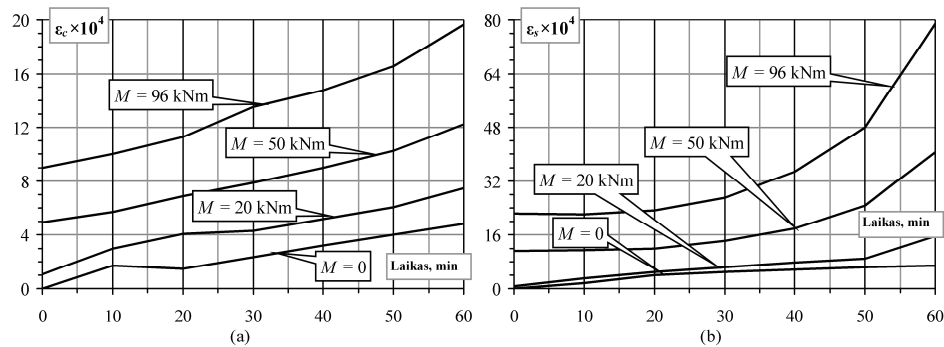
Koeficientų, kuriais įvertinami medžiagų stiprio ir tamprumo modulio sumažėjimai veikiant temperatūrai, reikšmės pateikiamos grafiškai 2.10 a) paveiksle ir 2.10 b) paveiksle.



2.10 pav. Koeficientų, kuriais įvertinami medžiagų savybių sumažėjimai veikiant temperatūrai, kitimai: a) betono stiprio gniuždant, stiprio tempiant ir tamprumo modulio; b) armatūros takumo ribos ir tamprumo modulio (Bačinskas ir kt. 2007)

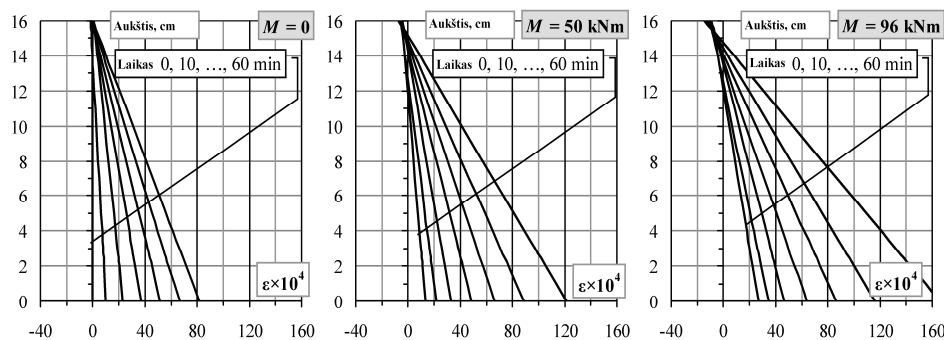
2.10 paveiksle pateikti koeficientų, kuriais įvertinami medžiagų savybių sumažėjimai veikiant temperatūrai, kitimai priimti vadovaujantis LST EN 1992-1-2:2005. Patogumo dėlei, E. Gedos (Geda 2010) darbe gautos tokios Euronormų modelį atitinkančios tiesinės priklausomybės, skirtingos betonui su silikatiniais ir kalkiniais užpildais bei lengvajam betonui. LST EN 1992-1-2:2005 naudojamos koeficientų, kuriais įvertinami betono savybių sumažėjimai veikiant temperatūrai, kitimai atlikti betonui, kuris apkrautas po kaitinimo. Abramso (Abrams 1971) ir kitų mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad iš anksto apkrautų betoninių elementų stipris padidėja.

Betono ir armatūros deformacijų kitimas, bėgant laikui, esant skirtingiems apkrovimams, pateikiamos grafiškai 2.11 a) paveiksle ir 2.11 b) paveiksle.

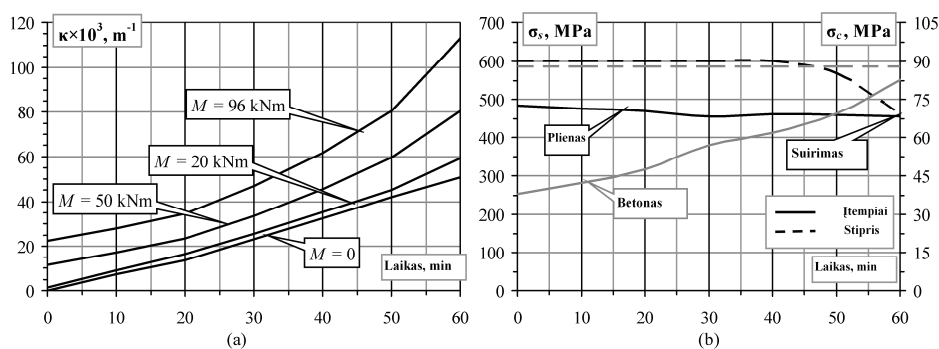


2.11 pav. Deformacijų kitimas bėgant laikui esant skirtingiems apkrovimams: a) betono viršutinio krašto (gniuždymo deformacija priimta teigiama); b) armatūros (Bačinskas ir kt. 2007)

Deformacijų pasiskirstymas išilgai plokštės per skerspjūvio aukštį, esant skirtingiems laikams ir lenkimo momentams, pateikiamos grafiškai 2.12 a) paveiksle ir 2.13 b) paveiksle.



2.12 pav. Deformacijų pasiskirstymas išilgai plokštės per skerspjūvio aukštį esant skirtingiems laikams ir lenkimo momentams (Bačinskas ir kt. 2007)



2.13 pav. a) plokštės skerspjūvio vidurio pjūvio kreivio kitimas, bėgant laikui, esant skirtingiems apkrovimams; b) armatūros ir betono viršutinio krašto įtempių kitimas bėgant laikui, kai išorinis lenkimo momentas 96 kNm (Bačinskas ir kt. 2007)

Analizės parodė, kad plokštė nesuiro pirmais apkrovimo atvejais gaisro metu. Suirimo laikas ketvirtojo apkrovimo atveju matomas 2.13 paveiksle b).

Iš 2.13 b) paveikslo matyti, kad punktyrinės linijos atitinkamai žymi betono stiprio gniuždant ir armatūros takumo ribos kitimus laike, o vientisos linijos – betono ir armatūros įtempių kitimus laike. Kai medžiagų stiprių ir įtempių kreivės susikerta, tai susikirtimo taškas nurodo gelžbetoninės plokštės suirimą (Geda 2010).

2.7 Antrojo skyriaus išvados ir rezultatai

1. Pateiktas netiesinio temperatūrų pasiskirstymo skaičiavimo algoritmas, taikant sluoksnių modelį ir baigtinių skirtumų metodą. Algoritme panaudoti trys paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdai. Pagal pateiktą skaičiavimo algoritmą sukurta netiesinio temperatūros pasiskirstymo skaičiavimo programa. Skaičiuojama paviršiaus temperatūra ir temperatūros pasiskirstymas skerspjūvyje, nustatoma kiekvieno sluoksnio temperatūra kiekviename laiko žingsnyje.
2. Taikant pasiūlytąjį algoritmą, atlikta skaitinė aukšta temperatūra veikiamos gelžbetoninės plokštės temperatūrų pasiskirstymo analizė. Gautieji rezultatai palyginti su baigtinių elementų programa ATENA rezultatais ir EC2 pateiktomis temperatūros kreivėmis. Baigtinių elementų programos ATENA rezultatai beveik idealiai sutampa su EC2 pateiktomis temperatūros kreivėmis, didžiausias skirtumas siekia 10,0 %. Sluoksnių modelių rezultatų pasiskirstymas panašus į EC2 kreivių pasiskirstymą. Priklausomai nuo pasirinktojo sluoksnių modelyje paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdo, didžiausi skirtumai siekia: 1-ojo sluoksnių modelio - 15 %; 2-ojo - 38 %; 3-ojo - 22 %.
3. Pasiūlytas modelis pritaikytas mechaninio uždavinio skaičiavimo algoritme.

3. EKSPERIMENTINIŲ IR SKAITINIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS

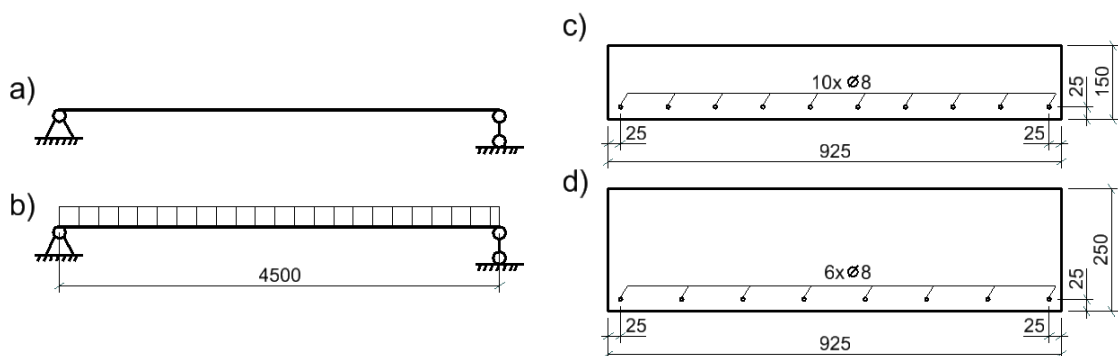
Šiame skyriuje pateikiami literatūroje paskelbtų (Cooke 2001) eksperimentinių gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo rezultatai, jie lyginami su apskaičiuotais rezultatais, taikant sluoksnių modelį ir baigtinių elementų programas ATENA ir COSMOSN. Šiame darbe panaudoti keturių aukšta temperatūra paveiktų gelžbetoninių plokščių, pagamintų iš normalaus stiprio betono, eksperimentiniai duomenys. Taip pat pateikiamas eksperimentinių ir teorinių gelžbetoninių plokščių įlinkių palyginimas.

3.1 Palyginimui naudotų eksperimentinių duomenų aprašymas

Šiame poskyryje aprašytos aukšta temperatūra paveiktos gelžbetoninės plokštės, kurias išbandė Cookas (Cooke 2001). Trumpai apibūdintos bandymo sąlygos bei gautieji eksperimentiniai rezultatai.

Eksperimentiniai bandiniai buvo pagaminti ir išbandyti Didžiosios Britanijos pastatų tyrimų centro civilinės inžinerijos laboratorijoje Kardingtone. Šiuose tyrimuose buvo nagrinėjami aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių plokščių įlinkiai, analizuojami jų pasiskirstymo dėsningumai.

Analizei atlikti buvo panaudoti keturių plokščių eksperimentiniai duomenys. Svarbiausios plokščių charakteristikos pateiktos 3.1 paveiksle ir 8 lentelėje.



3.1 pav. Plokščių konstrukcinė schema ir skerspjūvis: a) neapkrautos plokštės b) išorine apkrova paveiktos plokštės c) 150 mm skerspjūvio aukščio plokštės d) 250 mm skerspjūvio aukščio plokštės

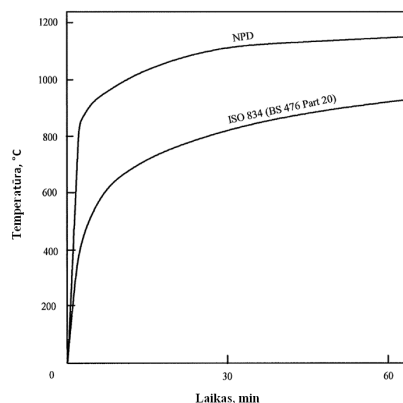
Laisvai atremtos plokštės buvo 4,7 m ilgio (tarpatramis 4.5 m) bei 0,925 m pločio. 4,0 m ilgio ir 0,90 m pločio plokštės plotas buvo veikiamas vienu iš dviejų gaisro režimu: standartinio ISO-834 ir Norvegijos naftos valdybos (toliau - NPD) režimo (3.2 pav.). Plokštės buvo stačiakampio skerspjūvio - 150 ir 250 mm aukščio. Plokščių skerspjūviai parodyti 3.1 paveiksle c, d.

8 lentelė. Eksperimentinių plokščių medžiagų parametrai

Betono parametrai		Reikšmė	Temperatūros įtaka (taip/ne)
f_c	Kubinis stipris, MPa	24,0	Taip
f_t	Tempiamasis stipris, MPa	1,9	Taip
E_c	Tamprumo modulis, GPa	31	Taip
G_{ft}	Irimo energija tempiant, MN/m	$4,5 \times 10^{-5}$	Taip
μ	Puasono koeficientas	0,2	Ne
α_c	Temperatūrinis plėtimosi koeficientas	$1,2 \times 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$	Taip
	Cemento tūrinis svoris, MN/m ³	0,66	Ne
W/C	Vandens cemento santykis	0,5	Ne
	Drėgmės konstanta	0,9728	Ne
λ_c	Šilumos laidumas, W/m °C	1,333	Taip
C_c	Savitoji šiluminė talpa, J/m ³ °C	$2,07 \times 10^6$	Taip

Armatūros parametrai		Reikšmė	Temperatūros įtaka (taip/ne)
f_{sy}	Takumo riba, MPa	460	Taip
E_s	Tamprumo modulis, GPa	210	Taip
α	Temperatūrinis plėtimosi koeficientas	$1,2 \times 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$	Ne

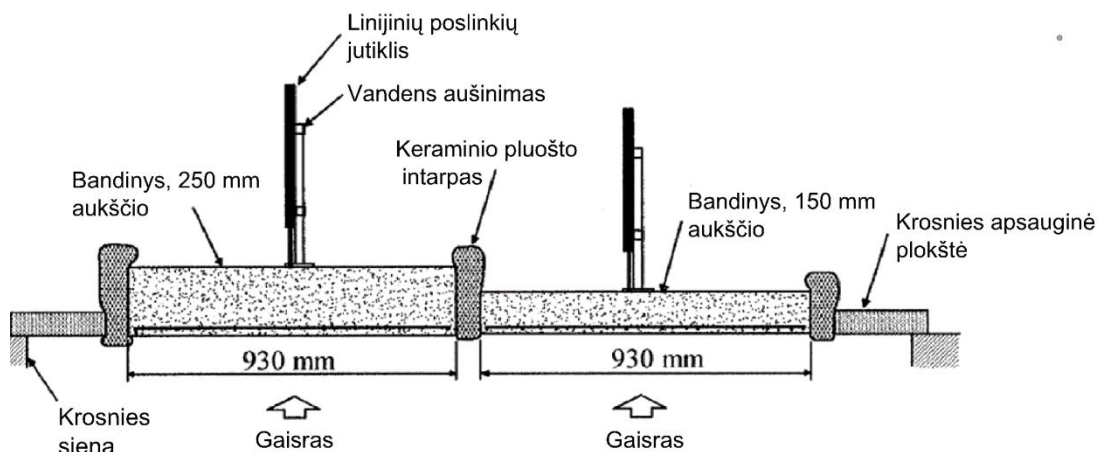
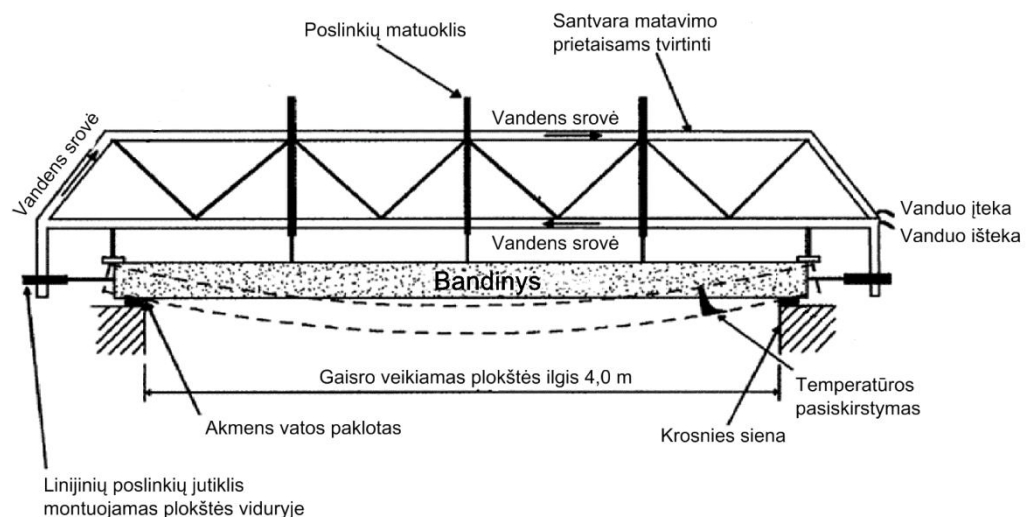
Betonui buvo panaudoti siliciniai užpildai (20 mm titnaginis žvyras) su natūraliu smėliu, kurių tūrinis svoris $2\,400\text{ kg/m}^3$. Medžiagų charakteristikos visoms plokštėms buvo vienodos: betono kubinis stipris $f_{cc} = 24\text{ MPa}$, betono tempiamasis stipris $f_{ct} = 1,9\text{ MPa}$, betono tamprumo modulis $E_c = 31\,500\text{ MPa}$, armatūros tamprumo modulis $E_s = 210\,000\text{ MPa}$, armatūros takumo riba $f_s = 460\text{ MPa}$. Betono drėgmė plokštės aukštyje kito nuo 3,5 iki 4,5 % (vertinant pagal svorį). Kaip matyti iš 3.1 paveikslo, kintamieji parametrai buvo šie: plokštės aukštis (150 ir 250 mm), išorinė apkrova (0 arba tolygiai išskirstyta $1,5\text{ kN/m}^2$), plokštės armavimo procentas bei gaisro kreivės.



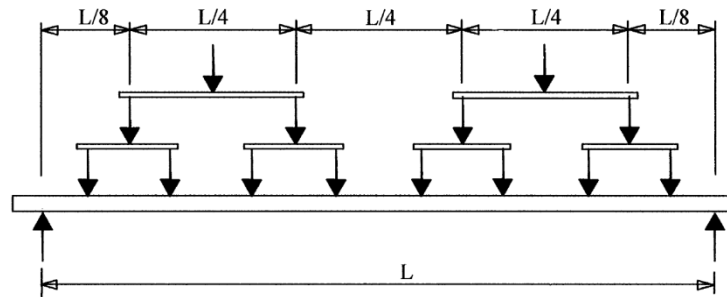
3.2 pav. Eksperimentuose naudotos gaisro kreivės (Cooke 2001)

Kaip parodyta 3.3 paveiksle, eksperimentinės plokštės buvo bandomos po dvi. Jos buvo sumontuotos taip, kad nedarytų įtakos viena kitos deformacijoms. Tai buvo pasiekta montuojant tarp jų keraminio pluošto intarpus (3.3 pav.).

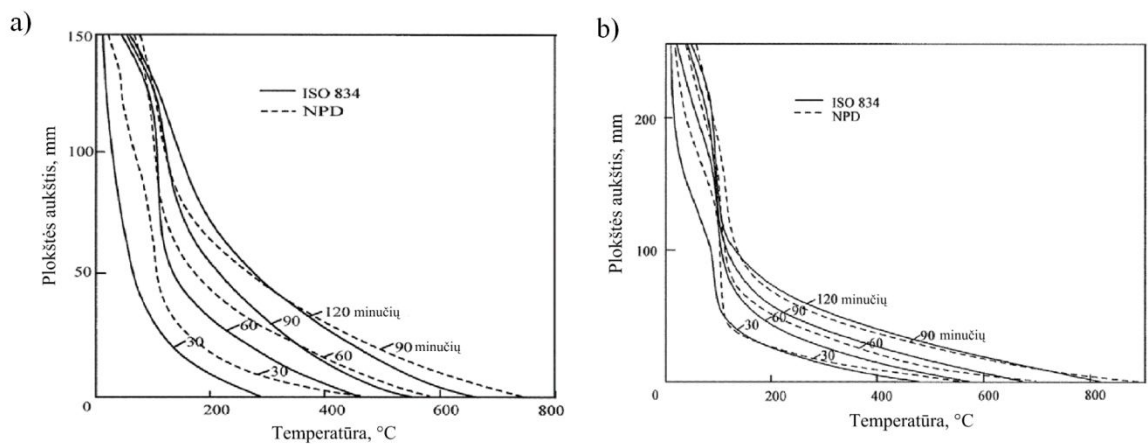
Plokštėse buvo įmontuotos termoporos, kurios registravo temperatūrą viso eksperimento metu. Deformacijų matavimo prietaisų išdėstymas ir bandinių atrėmimo schema parodyta 3.4 paveiksle. Įlinkių ir ašinių poslinkių jutikliai buvo pritvirtinti prie vamzdinio rėmo, kuris buvo nuolat aušinamas vandeniu (3.4 pav.), kad negalėtų deformuotis dėl pakitusios temperatūros. Linijinių poslinkių jutikliai buvo naudojami vertikaliam plokštės vidurio ir ketvirčio taškų įlinkiams nustatyti. Taip pat buvo matuojami ašiniai poslinkiai (3.4 pav.).

**3.3 pav.** Eksperimentinių plokščių bandymo skerspjūvis (Cooke 2001)**3.4 pav.** Išilginis eksperimentinių plokščių pjūvis, krosnies ir bandymo įrangos tvirtinimo schema (Cooke 2001)

Plokštės buvo apkrautos naudojant specialų rėmą, į kurį apkrova buvo perduota dviem hidrauliniams domkratais. Tolygiai išskirstyta apkrova buvo gauta, taikant apkrovimo schemą, parodytą 3.5 paveiksle. Skirtingose plokštėse įvairiais laiko tarpais eksperimentiškai išmatuotos temperatūros pasiskirstymas skerspjūvyje parodytas 3.6 paveiksluose.

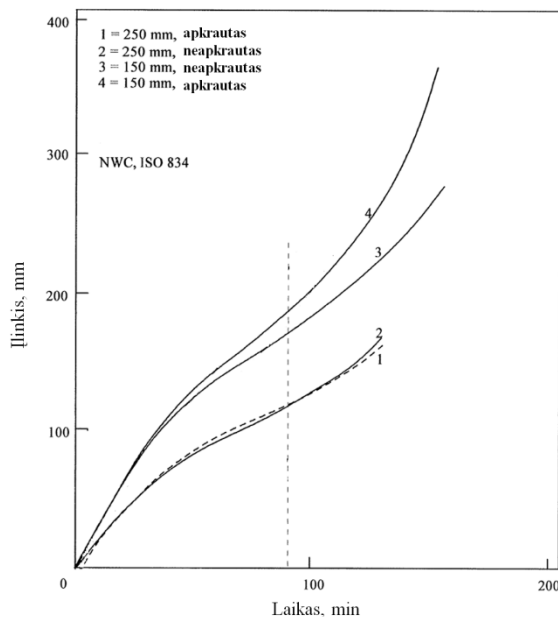


3.5 pav. Eksperimentinių plokščių apkrovimo schema (Cooke 2001)



3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas skerspjūvio aukštyje: a) 150 mm skerspjūvio aukščio plokštės; b) 250 mm skerspjūvio aukščio plokštės (Cooke 2001)

Eksperimentinių plokščių įlinkiai nuo bendro temperatūros ir apkrovos poveikio pateikti 3.7 paveiksle.

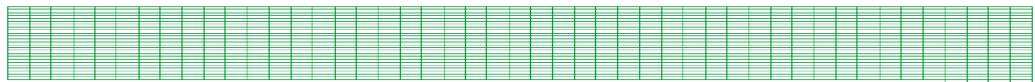


3.7 pav. Eksperimentinių plokščių įlinkiai (Cooke 2001)

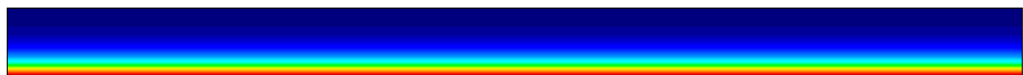
3.2 Temperatūros pasiskirstymo eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas

Temperatūrų pasiskirstymas skerspjūvyje sumodeliuotas, taikant baigtinių elementų programas ATENA ir COSMOSN ir apskaičiuotas, taikant sluoksnių modelį. Šie rezultatai buvo palyginti su eksperimentiškai gautais duomenimis. Nagrinėjamos neapkrautos ir apkrautos, normaliojo betono, kaitinamos ISO-834 gaisro kreive, 150 mm ir 250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės.

Baigtinių elementų tinklas, naudotas plokštės analizei, parodytas 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Baigtinių elementų tinklas naudotas plokštės analizei



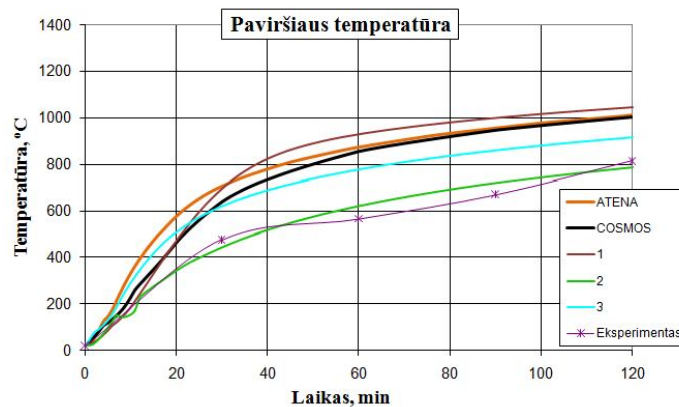
3.9 pav. Temperatūros laukų pasiskirstymas plokštėje

3.8 ir 3.9 paveiksluose pateikiama vaizdinė informacija apie baigtinių elementų programos ATENA ir COSMOSN darbo aplinką.

Temperatūrų pasiskirstymas plokščių skerspjūvyje buvo apskaičiuotas, taikant sluoksnių modelyje tris paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdus:

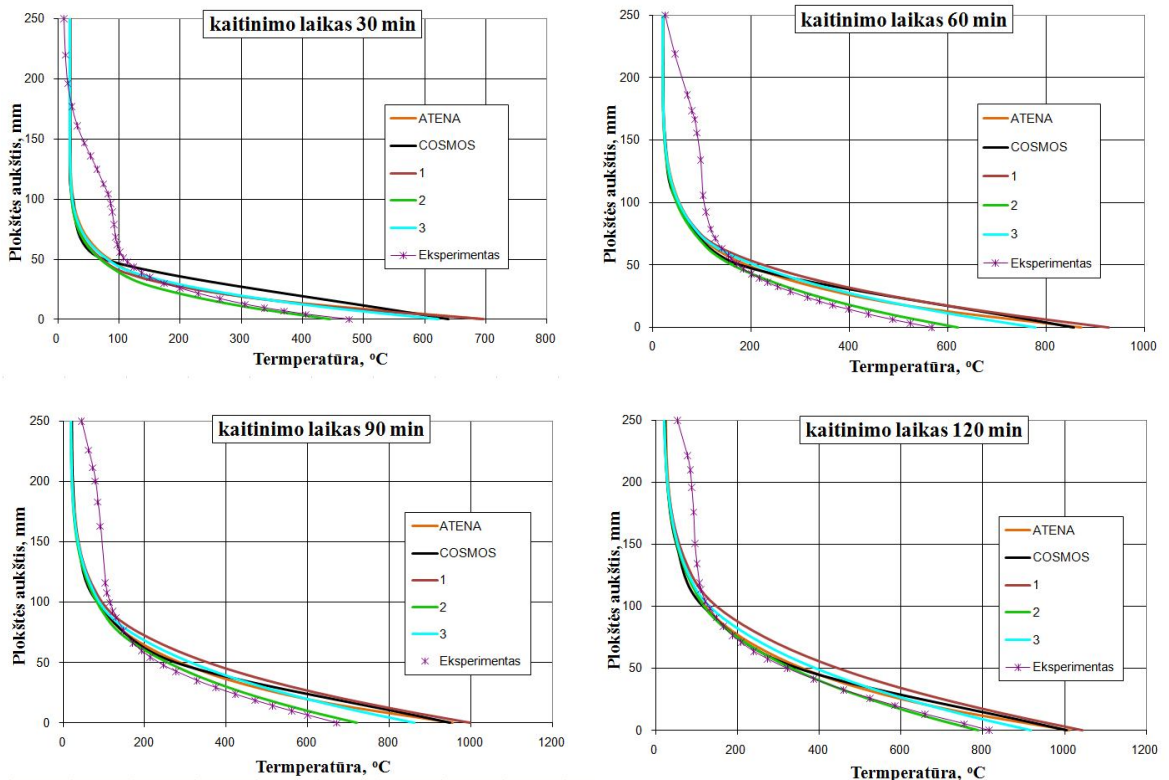
- [1] – paviršiaus temperatūra (Drysedale 1990);
- [2] – paviršiaus temperatūra (Kudalenkin 1985);
- [3] – paviršiaus temperatūra (Drysedale 2002);

Eksperimentiniai ir apskaičiuotų temperatūrų pasiskirstymo plokščių skerspjūvyje rezultatai pateikti 3.10 - 3.13 paveiksluose.



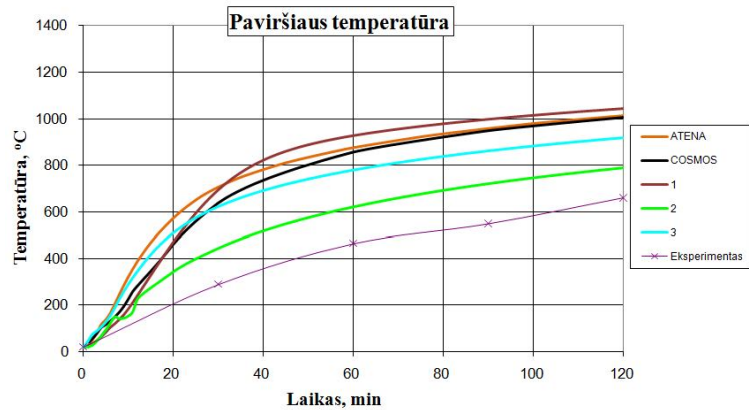
3.10 pav. Kaitinamos ISO-834 gaisro kreivės 250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių paviršiaus temperatūrų priklausomybių nuo kaitinimo laiko palyginimas

250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės apskaičiuotos baigtinių elementų programomis ir pagal 1-ąją ir 3-iąją sluoksnių modelį paviršiaus temperatūrų priklausomybės yra panašios - didžiausias skirtumas siekia 9,5 %. Paviršiaus temperatūra, pagal eksperimentą, geriausiai sutampa su apskaičiuota pagal 2-ąją sluoksnių modelį, bet žymiai skiriasi nuo apskaičiuotų baigtinių elementų programomis rezultatų - skirtumas siekia 35,2 % (3.10 pav.).

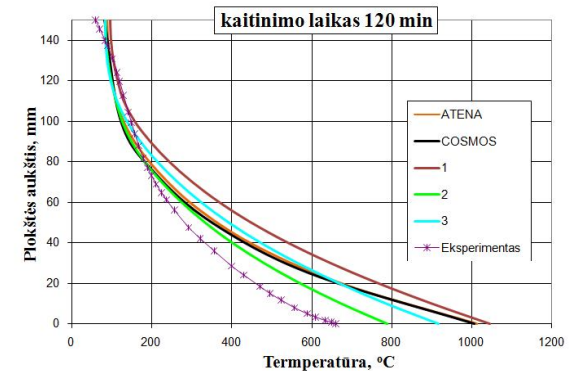
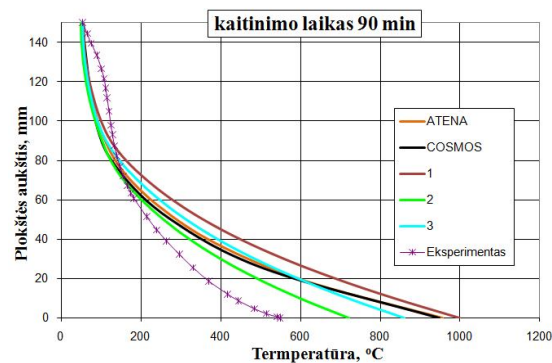
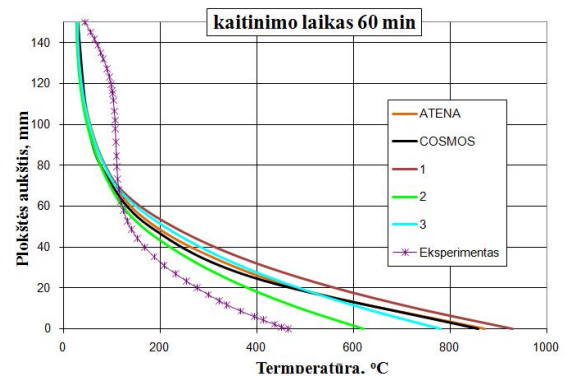
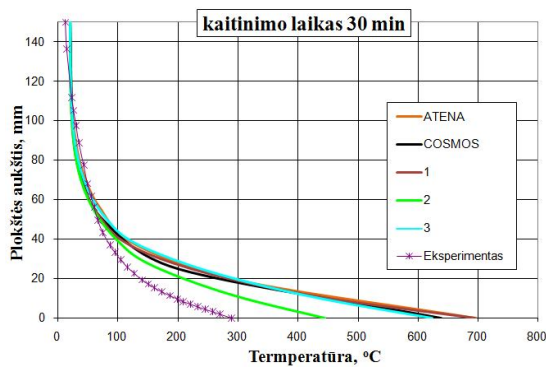


3.11 pav. Kaitinamos ISO-834 gaisro kreivės 250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių temperatūrų pasiskirstymo skerspjūvyje palyginimas

Temperatūrų skerspjūvyje pasiskirstymo rezultatų skirtumai gaunami panašūs kaip paviršiaus temperatūrų. Galima pastebėti, kad tas skirtumas mažėja plokštės skerspjūvio aukštyje, didėjant kaitinimo laikui (3.11 pav.).



3.12 pav. Kaitinamos ISO-834 gaisro kreivė 150 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių paviršiaus temperatūrų priklausomybių nuo kaitinimo laiko palyginimas



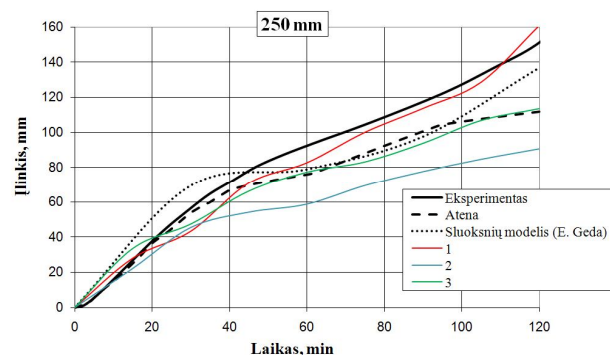
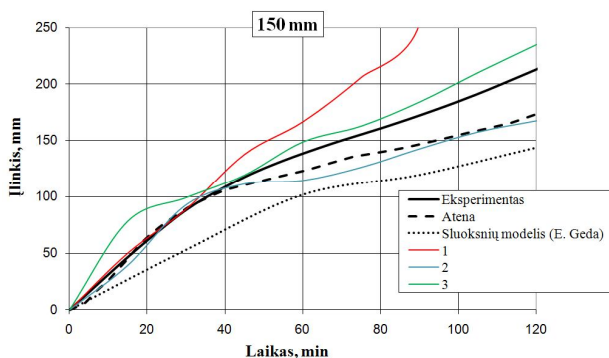
3.13 pav. Kaitinamos ISO-834 gaisro kreivė 150 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės eksperimentinių ir skaitinių temperatūrų pasiskirstymo skerspjūvyje palyginimas

150 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninių plokščių temperatūrinių laukų pasiskirstymas yra panašus kaip 250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninių plokščių. Skirtumas tarp skaitinių ir eksperimentinių rezultatų didesnis, jis siekia 100 % (3.12 - 3.13 pav.).

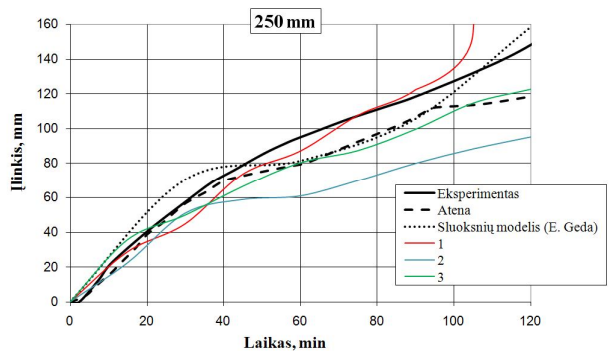
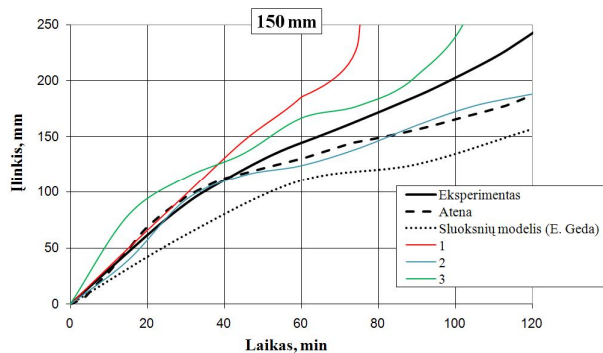
3.3 Įlinkių eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas

Eksperimentinių plokščių įlinkiai buvo palyginti su apskaičiuotais sluoksnių modeliu ir programa ATENA. Nagrinėjamos neapkrautos ir apkrautos, normaliojo betono, kaitinamos ISO-834 gaisro kreive, 150 mm ir 250 mm skerspjūvio aukščio gelžbetoninės plokštės.

Naudojant E. Gedo (Geda 2010) mechaninio uždavinio programą ir autoriaus šiluminio uždavinio programą, apskaičiuoti eksperimentinių plokščių įlinkiai. Atskiroms plokštėms šie įlinkiai parodyti 3.14 – 3.15 paveiksluose kartu su eksperimentiniais įlinkiais, baigtinių elementų programa gautais įlinkiais ir E. Gedo (Geda 2010) apskaičiuotais įlinkiais.



3.14 pav. Neapkrautų plokščių eksperimentinių įlinkių palyginimas su skaitiniais rezultatais



3.15 pav. Apkrautų plokščių eksperimentinių įlinkių palyginimas su skaitiniais rezultatais

Sluoksnių modeliu sumodeliavus literatūroje aprašytų eksperimentinių gelžbetoninių plokščių, paveiktų aukšta temperatūra, elgseną, gautas pakankamas apskaičiuotų ir eksperimentinių rezultatų sutapimas. 150 mm skerspjūvio aukščio apkrautos ir neapkrautos gelžbetoninės plokštės eksperimentinius įlinkius geriausiai atitinka 3-asis sluoksnių modelis - didžiausias skirtumas siekia 37 %. 250 mm skerspjūvio aukščio apkrautos ir neapkrautos gelžbetoninės plokštės eksperimentinius įlinkius geriausiai atitinka 1-asis sluoksnių modelis - didžiausias skirtumas siekia 16 %.

Baigtinių elementų programos ATENA įlinkius geriausiai atitinka: 150 mm skerspjūvio aukščio apkrautos ir neapkrautos gelžbetoninės plokštės – 2-asis sluoksnių modelis, didžiausias skirtumas

siekia 12 %; 250 mm skerspjūvio aukščio apkrautos ir neapkrautos gelžbetoninės plokštės – 3-asis sluoksnių modelis, didžiausias skirtumas siekia 15 %.

Temperatūros sukelti gelžbetoninių plokščių įlinkiai gali dešimtis kartų viršyti mechaninės apkrovos įlinkius.

3.4 Trečiojo skyriaus išvados ir rezultatai

1. Atliktas gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo eksperimentinių, pasiūlytojo sluoksnių modelio ir baigtinių elementų programų rezultatų palyginimas. Nustatyta, kad viršutinėje (mažiau įkaitusioje) plokščių dalyje baigtinių elementų programų apskaičiuoti temperatūriniai laukai pakankamai atitiko apskaičiuotus pagal sluoksnių modelius, bet jie turi žymų skirtumą su eksperimentiniais rezultatais. Žemutinėje (arčiau kaitinamo paviršiaus) plokščių dalyje skaitiniu būdu nustatyta temperatūra iki 100 % viršijo eksperimentinę temperatūrą. Temperatūrinių laukų rezultatų skirtumai mažėja link skerspjūvio viršaus ir didėjant kaitinimo trukmei. Baigtinių elementų programų rezultatai labiausiai atitinka 1-ojo ir 3-ojo sluoksnių modelių rezultatus, o eksperimentinius – 2-asis sluoksnių modelis.
2. Atliktas gelžbetoninių plokščių įlinkių eksperimentinių ir sluoksnių modelio rezultatų palyginimas. Nustatyta, kad eksperimentinius įlinkius geriausiai atitinka, priklausomai nuo plokštės skerspjūvio aukščio, 1-asis ir 3-asis sluoksnių modelis, o baigtinių elementų programos ATENA – 2-asis ir 3-asis sluoksnių modelis.
3. Nepaisant nemažų apskaičiuotų ir eksperimentinių rezultatų skirtumų, gautas pakankamas apskaičiuotų ir eksperimentinių gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo ir įlinkių atitikimas. Šie rezultatai rodo, kad pasiūlytas šiluminio uždavinio skaičiavimo algoritmas leidžia pakankamai tiksliai apskaičiuoti gelžbetoninių elementų, veikiamų aukšta temperatūra, temperatūrinius laukus ir yra pakankamai paprastas, universalus ir efektyvus kompiuterinių išteklių požiūriu.

4. ĮVAIRIŲ FAKTORIŲ ĮTAKOS TEMPERATŪROS PASISKIRSTYMOI GELŽBETONINĖSE PLOKŠTĖSE PARAMETRINĖ ANALIZĖ

Šiame skyriuje baigtinių elementų programa ATENA panaudota gaisro kreive veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūros pasiskirstymui įtaką darančių faktorių parametrinei analizei. Tyrimų objektų pasirinktas gelžbetoninės plokštės skerspjūvis, kuriam baigtinių elementų programa ATENA nustatytos temperatūros-laiko ($T - t$) ir temperatūros-skerspjūvio aukščio ($T - h$) diagramos, kintant šiems parametrams:

- šilumos laidumo koeficientui $\lambda(T)$;
- savitajai šiluminei talpai $c(T)$;
- betono tankiui $\rho(T)$;
- pradinei temperatūrai T_0 ;
- šilumos perdavimo konvekcijs koeficientui α_c ;
- ugnies spinduliavimo koeficientui ε_f ;
- plokštės skerspjūvio aukščiui h ;
- gaisro kreivei;

Nagrinėto skerspjūvio bazinės charakteristikos pateiktos 9 lentelėje.

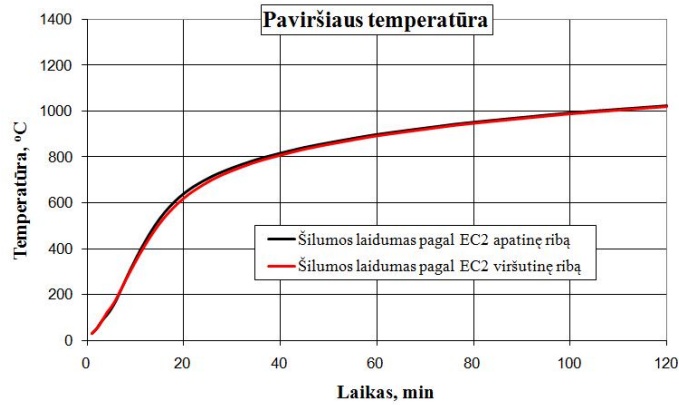
9 lentelė. Parametrinėje analizėje nagrinėtos skerspjūvio bazinės charakteristikos

Kintamasis parametras, kurio įtaka nagrinėjama	h , mm	$\lambda(T)$, W / mK	$c(T)$, J / kgK	$\rho(T)$, kg / m^3	T_0 , $^{\circ}C$	α_c , W / m^2K	ε_f	Gaisro kreivė
$\lambda(T); c(T);$ $\rho(T); T_0; \alpha_c;$ $\varepsilon_f; h$; gaisro kreivė	250	1,36 – pagal EC2 apatinę ribą	900 - 1,5% drėgnio betonui pagal EC2	2300	20	25	1,0	ISO-834

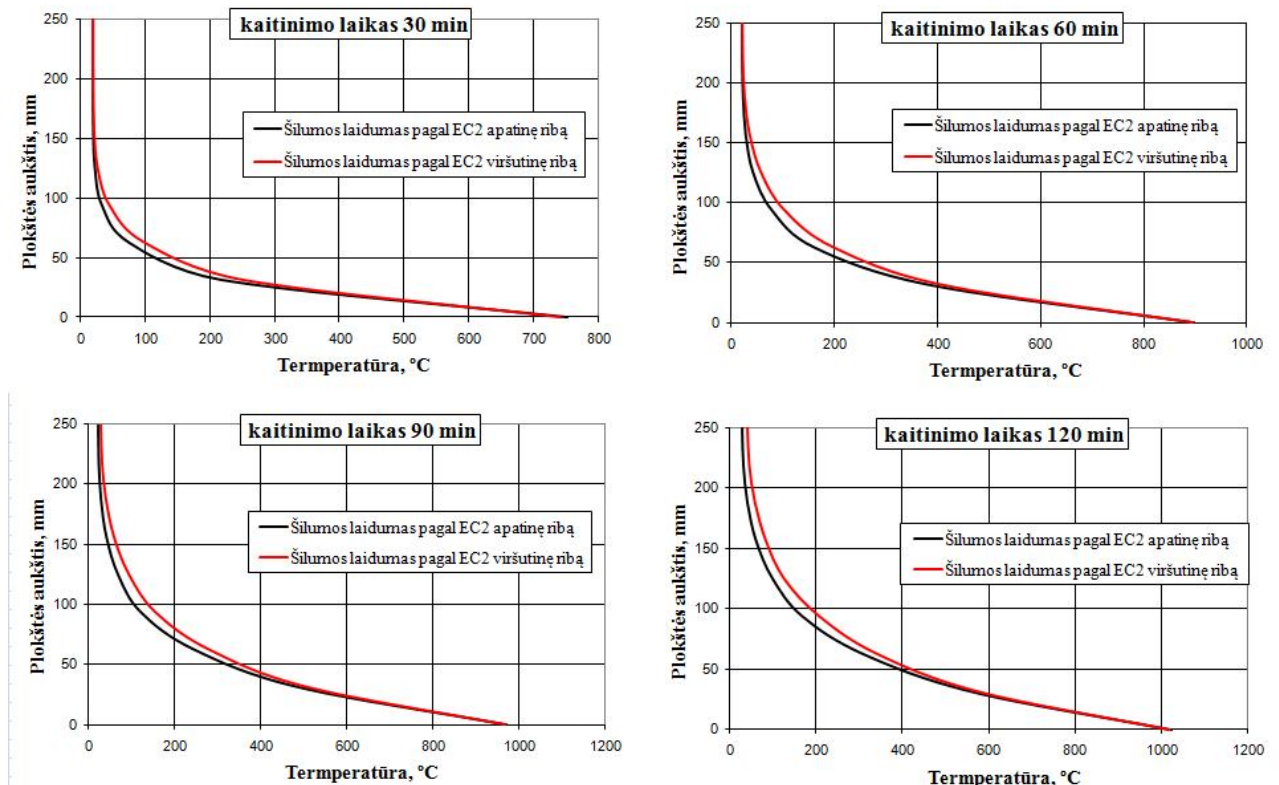
Toliau šiame skyriuje pateikiami parametrinės analizės rezultatai.

4.1 Betono šilumos laidumo koeficiento įtaka

Nagrinėjant šilumos laidumo koeficiento įtaką temperatūrų pasiskirstymui, pasirinktos dvi pastarojo parametro priklausomybės nuo temperatūros: 1,36 W / mK pagal LST EN 1992-1-2:2005 apatinę ribą ir 2,0 W / mK pagal LST EN 1992-1-2:2005 viršutinę ribą. Analizės rezultatai pateikti 4.1 ir 4.2 paveiksluose.



4.1 pav. $T - t$ diagrama, kintant šilumos laidumo koeficientui $\lambda(T)$



4.2 pav. $T - h$ diagramos, kintant šilumos laidumo koeficientui $\lambda(T)$

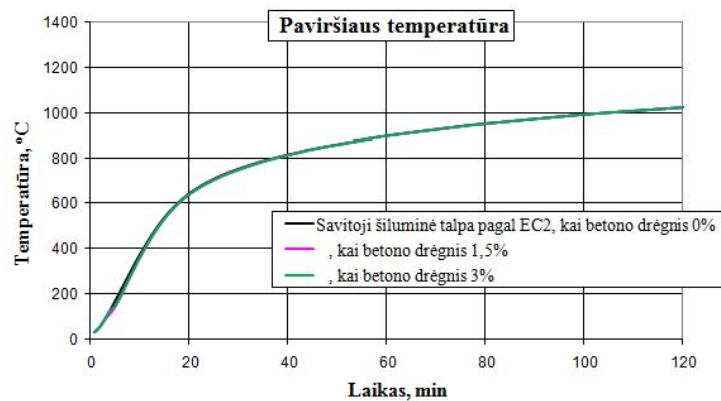
Šilumos laidumo koeficiento skirtingos priklausomybės paviršiaus temperatūrai didelės įtakos neturi (4.1 pav.). Didžiausias temperatūrų skirtumas apie (4 %) nustatytas esant 14 minučių kaitinimo trukmei. Tačiau pastebimas gana didelis skirtumas tarp temperatūrų pasiskirstymo plokštės skerspjūvyje (4.2 pav.). Priklausomai nuo kaitinimo laiko, tas skirtumas didėja nuo 25 % iki 32 %.

Atlikta parametrinė analizė rodo, kad betono šilumos laidumo koeficientas $\lambda(T)$ turi įtakos temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje: kuo didesnė šilumos laidumo koeficiento reikšmė, tuo didesnė temperatūra skerspjūvyje. Galima pastebėti ir tai, kad šilumos laidumo koeficiento įtaka yra

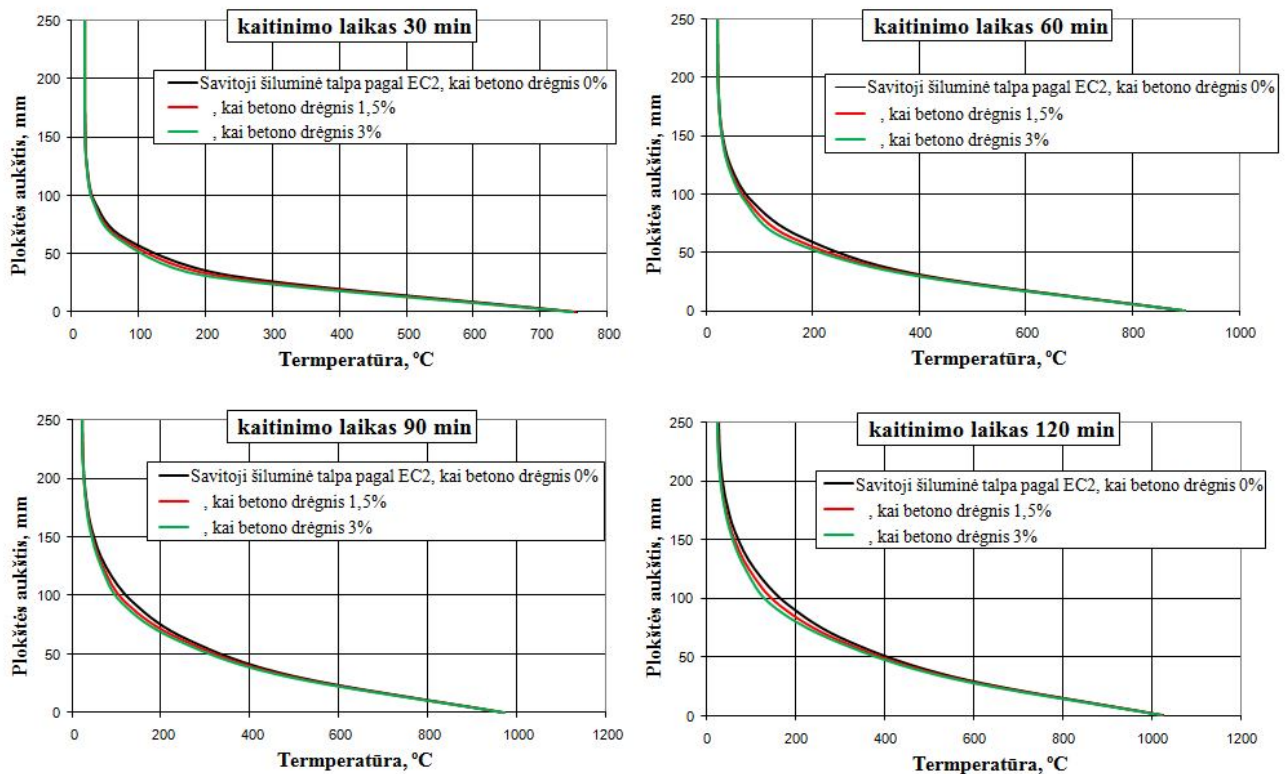
žymiai reikšmingesnė skerspjūvio viduryje ir esant ilgesnei kaitinimo trukmei. Tai akivaizdžiai įrodo 4.2 paveikslas, kuriame pateiktos temperatūros priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio esant įvairiems kaitinimo laikams.

4.2 Betono savitosios šiluminės talpos įtaka

Savitosios šiluminės talpos įtaka temperatūros pasiskirstymui buvo nagrinėta, priėmus tris šio parametro priklausomybes nuo temperatūros: kai betono drėgnis 0 %, 1,5 % ir 3 % pagal LST EN 1992-1-2:2005. Gauti analizės rezultatai pateikti 4.3 ir 4.4 paveiksluose.



4.3 pav. $T - t$ diagrama, kintant savitajai šiluminei talpai $c(T)$



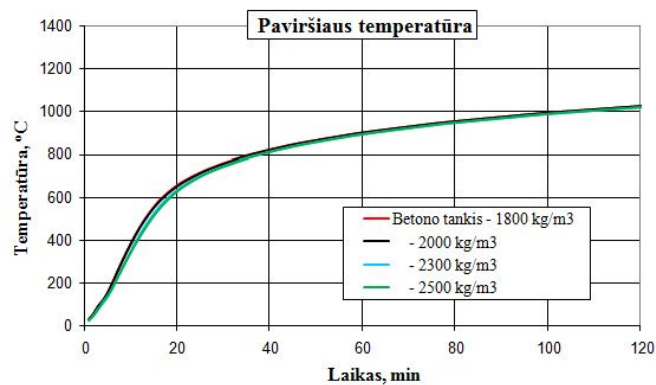
4.4 pav. $T - h$ diagramos, kintant savitajai šiluminei talpai $c(T)$

Paviršiaus temperatūrai savitosios šiluminės talpos skirtingos priklausomybės įtakos beveik neturi (4.3 pav.). Didžiausias temperatūrų skirtumas (apie 9 %) nustatytas esant 7 minučių kaitinimo trukmei. Tarp temperatūrų pasiskirstymo plokštės skerspjūvyje pastebimas didesnis skirtumas (4.4 pav.). Priklausomai nuo kaitinimo trukmės, tas skirtumas didėja nuo 20 % iki 24 %.

Atlikta parametrinė analizė rodo, kad betono savitojo šiluminė talpa $c(T)$ turi įtakos temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje: kuo betono drėgnis mažesnis, tuo didesnė temperatūra. Galima pastebėti ir tai, kad šilumos laidumo koeficiento įtaka yra žymiai reikšmingesnė 40-150 mm skerspjūvio aukštyje (4.4 pav.).

4.3 Betono tankio įtaka

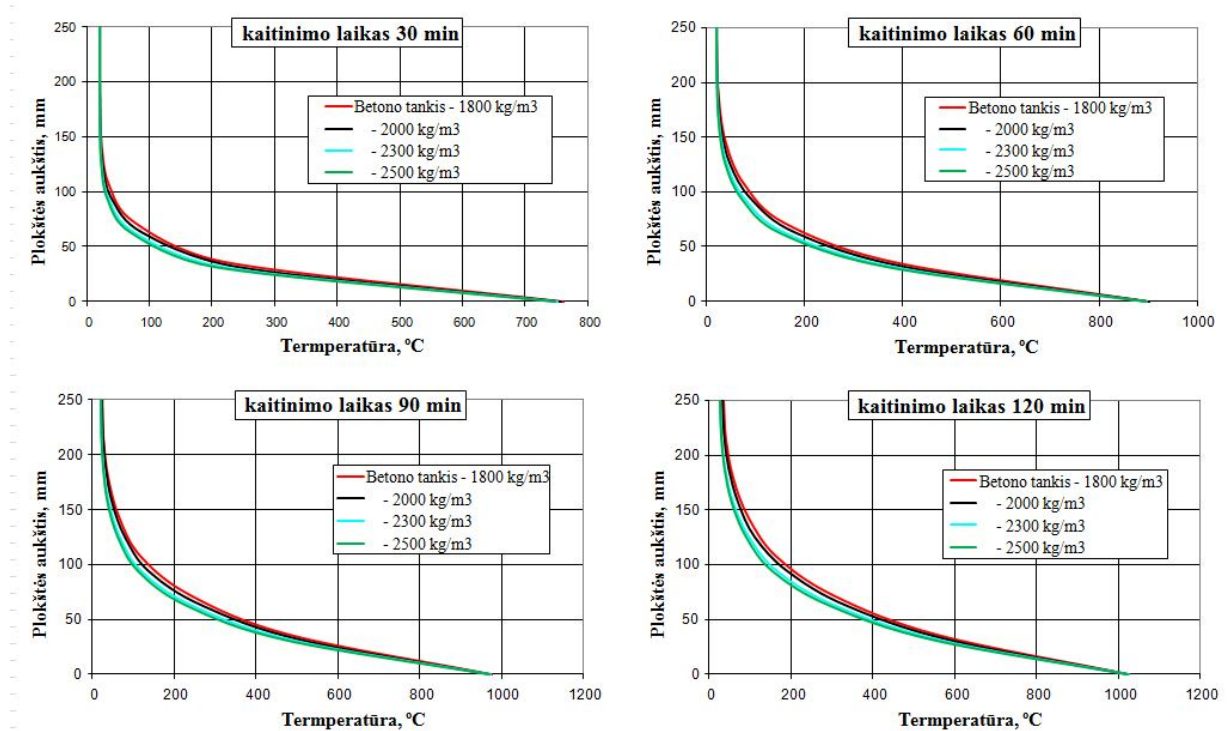
Betono tankio įtakos temperatūrų pasiskirstymui plokštėse pasirinktos keturios šio parametro priklausomybės nuo temperatūros: 2500 kg/m^3 , 2300 kg/m^3 , 2000 kg/m^3 ir 1800 kg/m^3 pagal LST EN 1992-1-2:2005. Apskaičiavimai atlikti, esant gelžbetoninės plokštės skerspjūvio aukščiui 250 mm. Gauti analizės rezultatai pateikti 4.5 ir 4.6 paveiksluose.



4.5 pav. $T - t$ diagrama, kintant betono tankiui $\rho(T)$

Paviršiaus temperatūrai betono tankio reikšmės dydis beveik įtakos neturi (4.5 pav.). Skirtumas tarp temperatūrų naudojant 2500 kg/m^3 ir 1800 kg/m^3 reikšmės vos siekia 1 %. Tarp temperatūrų pasiskirstymo plokštės skerspjūvyje pastebimas didesnis skirtumas (4.6 pav.). Priklausomai nuo kaitinimo trukmės, tas skirtumas didėja nuo 15 % iki 17 %.

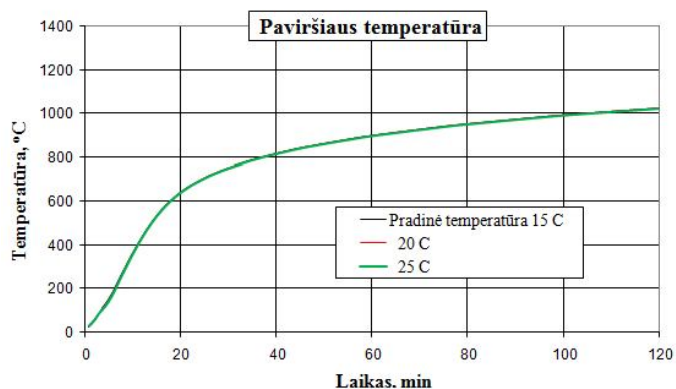
Atlikta parametrinė analizė rodo, kad betono tankis $\rho(T)$ turi nežymią įtaką temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje: kuo betono tankis mažesnis, tuo didesnė temperatūra skerspjūvyje. Galima pastebėti ir tai, kad betono tankio įtaka žymiai reikšmingesnė 40-150 mm skerspjūvio aukštyje (4.6 pav.).



4.6 pav. $T - h$ diagramos, kintant betono tankiui $\rho(T)$

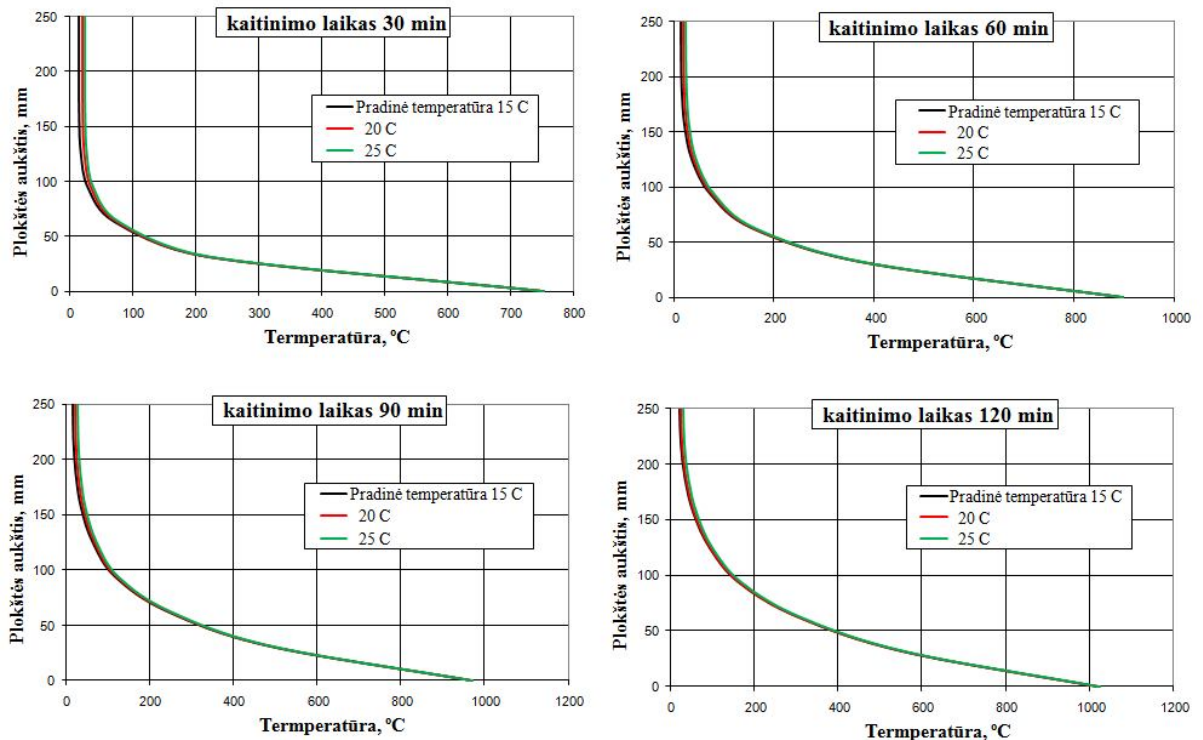
4.4 Pradinės betono temperatūros įtaka

Vertinant pradinės temperatūros įtaką temperatūros pasiskirstymui, pasirinktos trys šio parametro reikšmės: 15°C , 20°C ir 25°C . Gauti tokie apskaičiavimo rezultatai (4.7 ir 4.8 pav.): pradinių kaitinimo laikotarpių temperatūrų skirtumas paviršiaus temperatūrų pasiskirstyme siekia 27 %, po 9 kaitinimo minučių – 0 %. Didesnis temperatūrų skirtumas pastebimas temperatūros pasiskirstyme skerspjūvyje. Skerspjūvio viršutinėje dalyje, esant 30 ir 60 minučių kaitinimo trukmei, jis siekia 40 %.



4.7 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingai pradinei betono temperatūrai

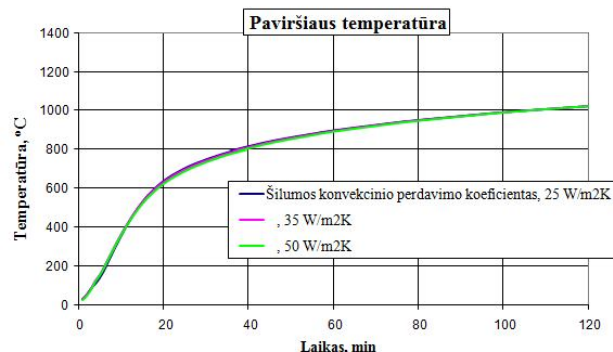
Atlikta parametrinė analizė rodo, kad pradinė temperatūra turi įtakos paviršiaus temperatūrų pasiskirstyme tik kaitinimo pradžioje ir temperatūrų pasiskirstyme skerspjūvyje prie nekaitinamo paviršiaus.



4.8 pav. $T - h$ diagramos, esant skirtingai pradinei betono temperatūrai

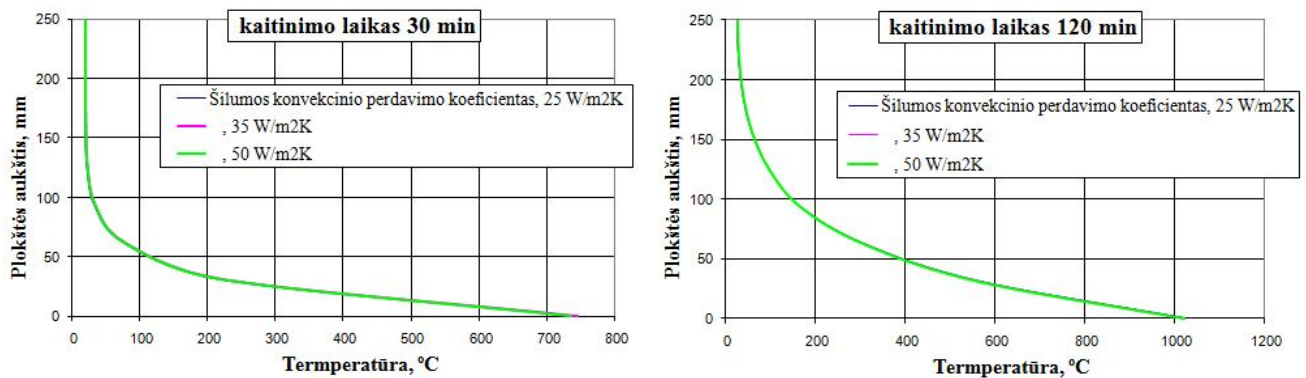
4.5 Šilumos perdavimo konvekcija koeficiento įtaka

Šilumos perdavimo konvekcija koeficiento įtakos temperatūrų pasiskirstymui analizei pasirinktos trys šio parametro reikšmės: $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, $35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ir $50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Gauti tokie analizės rezultatai (4.9 ir 4.10 pav.): temperatūrų skirtumas pastebimas tik kaitinimo pradžioje ir jis siekia 11 % - paviršiaus temperatūrų pasiskirstyme; 2 % - temperatūrų pasiskirstyme skerspjūvyje.



4.9 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingoms šilumos perdavimo konvekcija koeficiento reikšmėms α_c

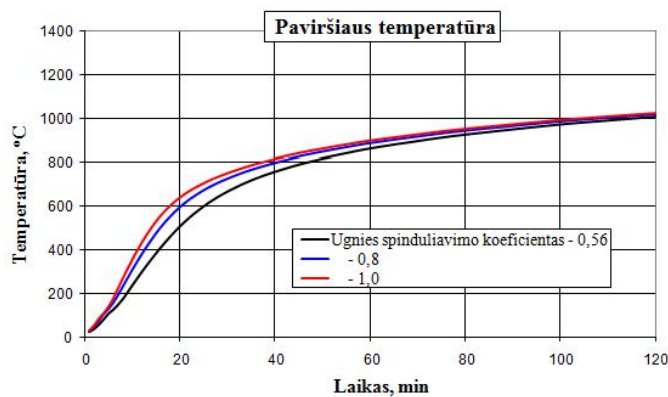
Atlikta parametrinė analizė rodo, kad šilumos perdavimo konvekcija koeficientas beveik neturi įtakos temperatūrų pasiskirstymui.



4.10 pav. $T - h$ diagramos, esant skirtingoms šilumos perdavimo konvekcija koeficiento reikšmėms

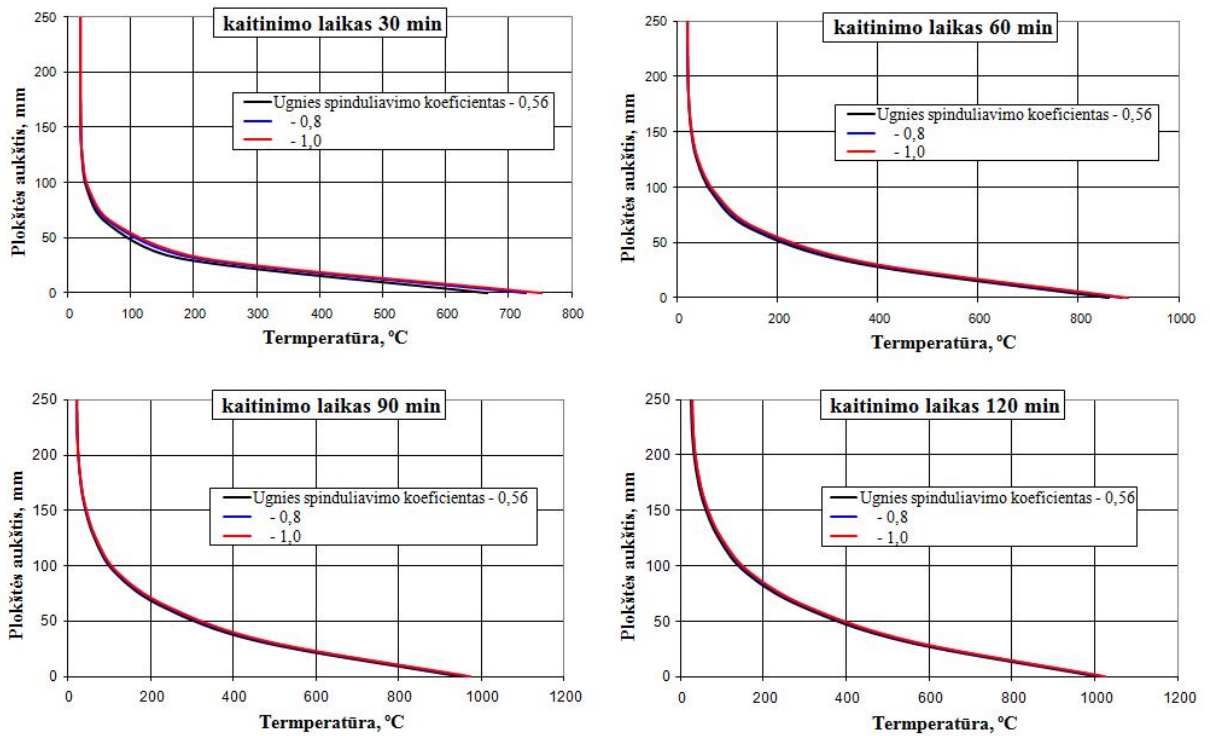
4.6 Ugnies spinduliuotės koeficiento įtaka

Ugnies spinduliuotės koeficiento įtakos temperatūrų pasiskirstymo analizei buvo pasirinktos trys šio parametro reikšmės: 0,56; 0,8 ir 1,0. Gauti tokie apskaičiavimo rezultatai (4.11 ir 4.12 pav.): kuo didesnis ugnies spinduliavimo koeficientas, tuo didesnė paviršiaus temperatūra. Tarp 0,56 ir 1,0 reikšmių didžiausias skirtumas siekia net 35 %. Temperatūros pasiskirstymui skerspjūvyje šis parametras turi mažesnę įtaką, didžiausias skirtumas esant 30 minučių kaitinimo trukmei – 17 %.



4.11 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingoms ugnies spinduliuotės koeficiento reikšmėms ε_f

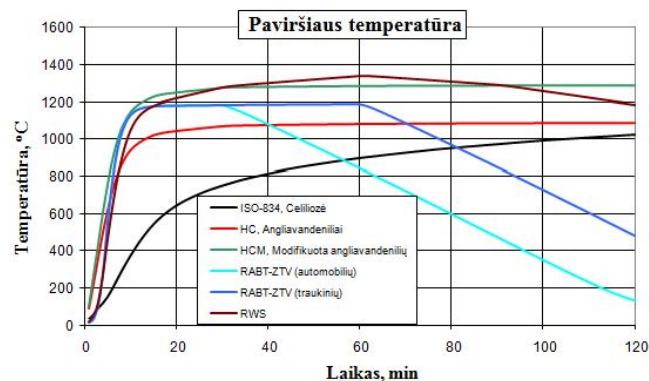
Atlikta parametrinė analizė rodo, kad ugnies spinduliuotės koeficientas turi gan žymią įtaką paviršiaus temperatūrų pasiskirstyme (4.11 pav.).



4.12 pav. $T - h$ diagramos, esant skirtingoms ugnies spinduliuotės koeficiento reikšmėms ε_f

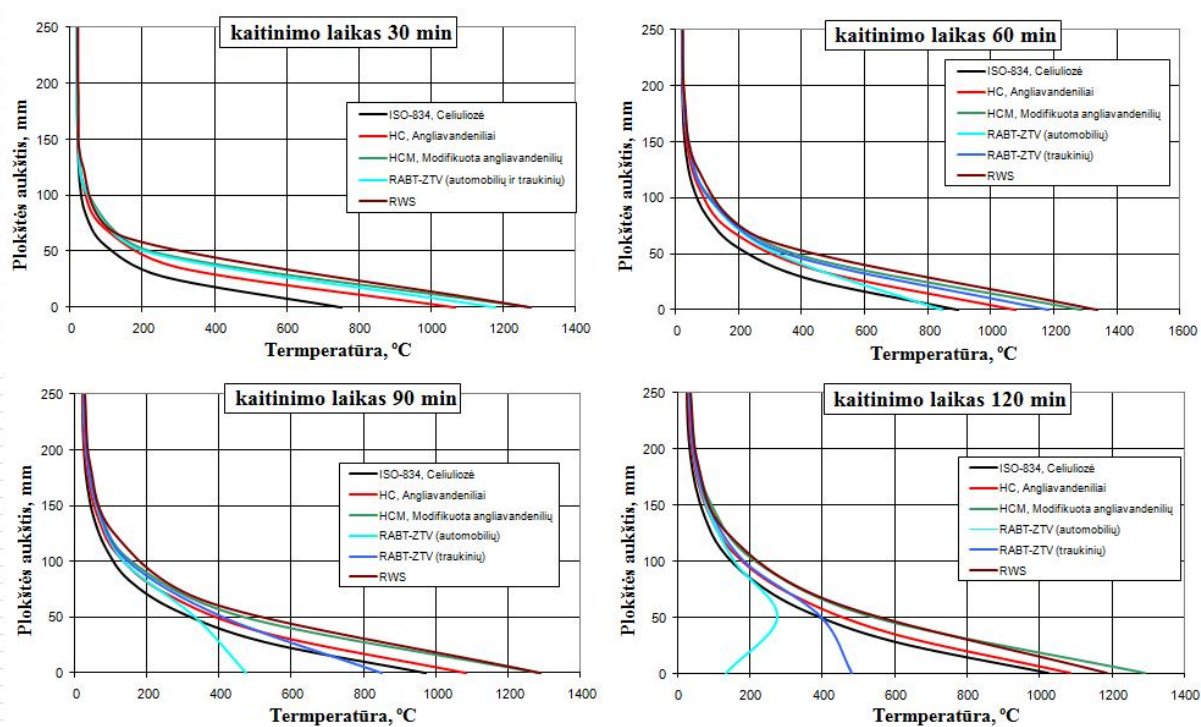
4.7 Gaisro kreivių įtaka

Gaisro kreivių įtakos temperatūrų pasiskirstymo analizei buvo pasirinktos šešios standartinės gaisro kreivės: ISO-834, HC, HCM, RABT-ZTV automobilių, RABT-ZTV traukinių ir RWS. Gautieji rezultatai pateikti 4.13 ir 4.14 pav. Plokštės paviršiaus temperatūros (4.13 pav.) pasiskirstė pagal gaisro kreivių temperatūros ir laiko priklausomybes (1.2 pav.). Paviršiaus temperatūros reikšmės skirtingais gaisro laikotarpiais yra mažesnės nei pačios gaisro kreivės. Šis fizikinis reiškinys modeliuojamas programa ATENA. RWS kreivė sukelia didžiausią paviršiaus ir skerspjūvio temperatūrą, ISO-834 - mažiausią, nevertinant RABT-ZTV kreivių, kurios turi aušinimo laikotarpį. Skirtingų gaisro kreivių temperatūra skerspjūvyje žymiai skiriasi iki 150 mm skerspjūvio aukščio, po to skirtumas mažėja.



4.13 pav. $T - t$ diagrama, esant skirtingoms gaisro kreivėms

Atlikta parametrinė analizė rodo, kad gaisro kreivių priklausomybės turi didelę įtaką paviršiaus temperatūrai, o pastaroji temperatūrą pasiskirstymui skerspjūvyje. Skirtingų gaisro kreivių $T-h$ kreivės pasiskirsto lygiagrečiai, o jų tarpusavio atstumą lemia paviršiaus temperatūrų skirtumas.

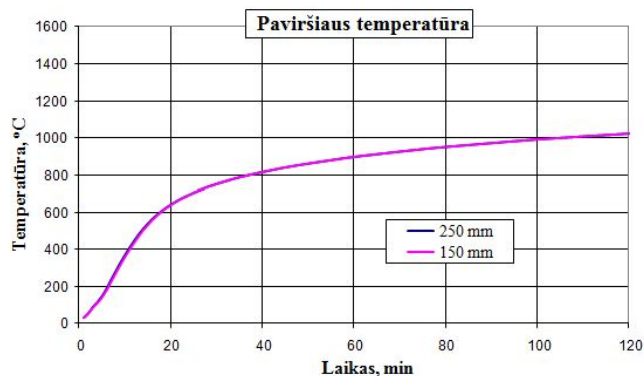


4.14 pav. $T-h$ diagrama, esant skirtingoms gaisro kreivėms

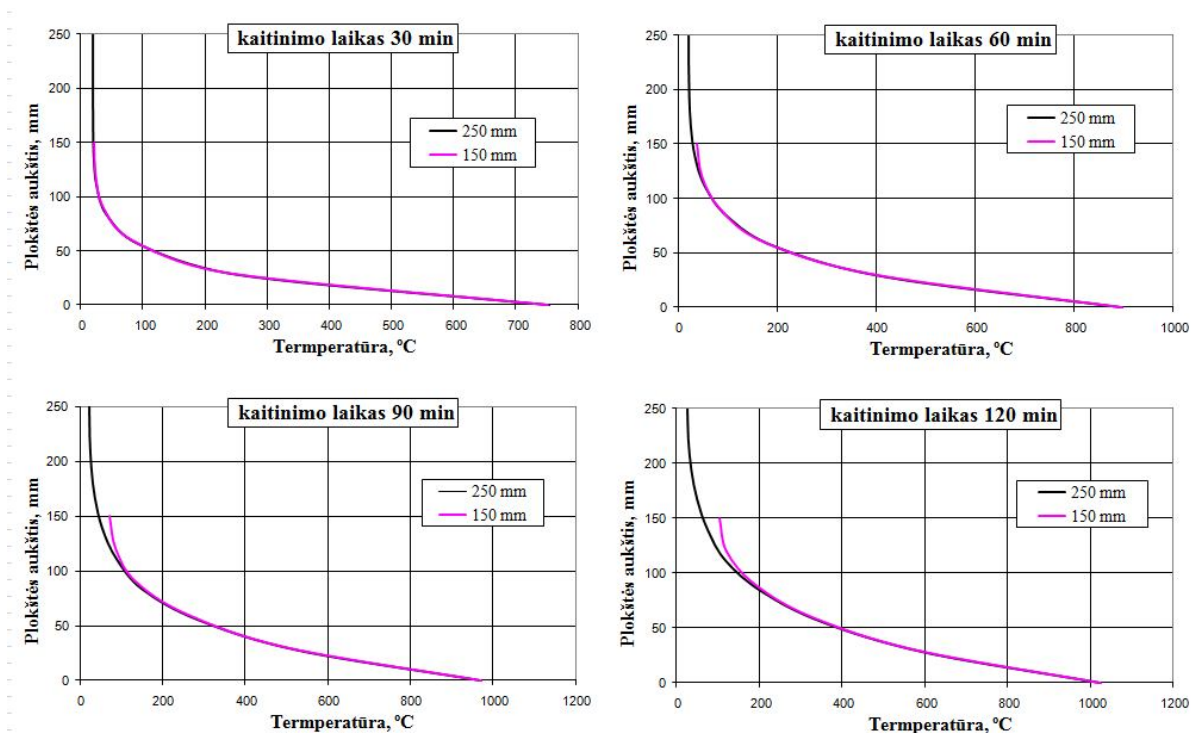
4.8 Plokštės skerspjūvio aukščio įtaka

Plokštės skerspjūvio aukščio įtakos temperatūrų pasiskirstymui analizė buvo atlikta tik su dviem šio parametro reikšmėmis, kadangi šio parametro įtaka pastebėta tik temperatūros pasiskirstyme skerspjūvyje prie nekaitinamo paviršiaus (4.16 pav.). Mažesnio skerspjūvio aukščio plokštės temperatūra prie nekaitinamo paviršiaus yra žymiai didesnė, kadangi nereikalingas papildomas šilumos kiekis medžiagos sušildymui, kas yra didesnio skerspjūvio plokštėje. Paviršiaus temperatūrai šis parametras neturi jokios įtakos (4.15 pav.).

Atlikta parametrinė analizė rodo, kad plokštės skerspjūvio aukštis turi įtakos tik temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje: kuo mažesnis skerspjūvio aukštis, tuo didesnė temperatūra prie nekaitinamo paviršiaus (4.16 pav.).



4.15 pav. $T - t$ diagrama prie skirtingo plokštės skerspjūvio aukščio



4.16 pav. $T - h$ diagrama prie skirtingo plokštės skerspjūvio aukščio

4.9 Ketvirtojo skyriaus rezultatai ir išvados

1. Baigtinių elementų programa ATENA panaudota gaisro kreivė veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūros pasiskirstymui įtaką darančių faktorių parametrinei analizei. Nustatyta, kad didžiausią įtaką paviršiaus temperatūrai turi ugnies spinduliuotės koeficientas, o temperatūros pasiskirstymui skerspjūvyje - betono šilumos laidumo koeficientas ir tankis.
2. Vertinant ugnies spinduliuotės koeficiento įtaką temperatūrų pasiskirstymui nustatyta, kad, kuo didesnis ugnies spinduliuotės koeficientas, tuo didesnė paviršiaus temperatūra. Tarp 0,56 ir 1,0

reikšmių didžiausias skirtumas siekia net 35 %. Temperatūroms skerspjūvyje šis parametras turi mažesnę įtaką.

3. Atlikta parametrinė analizė rodo, kad betono šilumos laidumo koeficientas $\lambda(T)$ turi įtakos temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje: kuo didesnė šilumos laidumo koeficiento reikšmė, tuo didesnė temperatūra skerspjūvyje. Galima pastebėti ir tai, kad šilumos laidumo koeficiento įtaka yra žymiai reikšmingesnė skerspjūvio viduryje ir esant ilgesnei kaitinimo trukmei, temperatūrų skirtumas siekia 32 %.
4. Vertinant betono tankio $\rho(T)$ įtaką temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje nustatyta, kad, kuo mažesnis betono tankis, tuo didesnė temperatūra skerspjūvyje. Priklausomai nuo kaitinimo laiko, temperatūrų skirtumas didėja nuo 15 % iki 17 %.
5. Betono savitoji šiluminė talpa, pradinė temperatūra ir šilumos perdavimo konvekcinis koeficientas įtakos temperatūrų pasiskirstymui beveik neturi.
6. Atlikta parametrinė analizė rodo, kad gaisro kreivių priklausomybės turi didelę įtaką paviršiaus temperatūrai, o ši temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje. Plokštės skerspjūvio aukštis turi įtakos tik temperatūrų pasiskirstymui skerspjūvyje: kuo mažesnis skerspjūvio aukštis, tuo didesnė temperatūra prie nekaitinamo paviršiaus.

PAGRINDINIAI DARBO REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Kasmet Žemėje kyla vidutiniškai apie 8 mln. gaisrų. Konstrukciniu požiūriu pastatai ir statiniai gaisro metu turi tam tikrą laiką atlaikyti mechanines apkrovas ir taip užtikrinti saugią žmonių evakuaciją (gelbėjimą) bei saugų ugniagesių darbą. Kad įvertinti gaisro poveikį konstrukcijoms, pirmiausia reikia apskaičiuoti temperatūrų pasiskirstymą jose.
2. Temperatūrų pasiskirstymui gelžbetoninėse konstrukcijose gaisro metu nustatyti taikomi nesudėtingi analiziniai – empiriniai metodai, kuriais sunku įvertinti šiluminių savybių kitimą. Inžinieriai naudoja temperatūrines kreives, pateiktas normatyviniuose statybos techniniuose dokumentuose, tačiau jos skirtos tik tam tikriems atvejams. Baigtinių elementų programos smarkiai progresuoja, yra universalus ir gali nustatyti visus galimus poveikius, tačiau skaičiavimas su jais reikalauja pernelyg daug kompiuterio išteklių. Eksperimentiniai metodai paprastai tinka tik konkrečioms išbandytoms konstrukcijoms temperatūros laukams prognozuoti, be to, tokio tipo metodikos reikalauja milžiniškų darbo bei medžiagų sąnaudų.
3. Atlikta skirtingų modelių, apibūdinančių betono ir armatūros šilumines (šilumos laidumas, šiluminė talpa, betono tankis) bei fizikines ir mechanines charakteristikas (betono gniuždomasis stipris, tempiamasis stipris, tamprumo modulis, deformacija, atitinkanti maksimalius gniuždymo įtempius, temperatūrinė deformacija, armatūros stipris, tamprumo modulis bei temperatūrinė deformacija), analizė. Dauguma šiluminių ir fizikinių - mechaninių charakteristikų tiksliausiai modeliuojama, remiantis LST EN 1992-1-2:2005 nuostatomis.
4. Pateiktas netiesinio temperatūrų pasiskirstymo skaičiavimo algoritmas, taikant sluoksnių modelį ir baigtinių skirtumų metodą. Algoritme panaudoti trys paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdai. Pagal pateiktą skaičiavimo algoritmą sukurta netiesinio temperatūros pasiskirstymo skaičiavimo programa.
5. Taikant pasiūlytąjį algoritmą, atlikta skaitinė aukšta temperatūra veikiamos gelžbetoninės plokštės temperatūrų pasiskirstymo analizė. Gautieji rezultatai palyginti su baigtinių elementų programa ATENA rezultatais ir EC2 pateiktomis temperatūros kreivėmis. Baigtinių elementų programos ATENA rezultatai beveik idealiai sutampa su EC2 pateiktomis temperatūros kreivėmis, didžiausias skirtumas siekia 10,0 %. Sluoksnių modelių rezultatų pasiskirstymas panašus į EC2 kreivių pasiskirstymą. Priklausomai nuo pasirinktojo sluoksnių modelyje paviršiaus temperatūros apskaičiavimo būdo, didžiausi skirtumai siekia: 1-ojo sluoksnių modelio - 15 %; 2-ojo - 38 %; 3-ojo - 22 %.
6. Pasiūlytas modelis pritaikytas mechaninio uždavinio skaičiavimo algoritme.

7. Atliktas gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo eksperimentinių, pasiūlytojo sluoksnių modelio ir baigtinių elementų programų rezultatų palyginimas. Nustatyta, kad viršutinėje (mažiau įkaitusioje) plokščių dalyje baigtinių elementų programų apskaičiuoti temperatūriniai laukai pakankamai atitiko apskaičiuotus pagal sluoksnių modelius, bet jie turi žymų skirtumą su eksperimentiniais rezultatais. Žemutinėje (arčiau kaitinamo paviršiaus) plokščių dalyje skaitiniu būdu nustatyta temperatūra iki 100 % viršijo eksperimentinę temperatūrą. Temperatūrinių laukų rezultatų skirtumai mažėja link skerspjūvio viršaus ir didėjant kaitinimo trukmei. Baigtinių elementų programų rezultatai labiausiai atitinka 1-ojo ir 3-ojo sluoksnių modelių rezultatus, o eksperimentinius – 2-asis sluoksnių modelis.
8. Atliktas gelžbetoninių plokščių įlinkių eksperimentinių ir sluoksnių modelio rezultatų palyginimas. Nustatyta, kad eksperimentinius įlinkius geriausiai atitinka, priklausomai nuo plokštės skerspjūvio aukščio, 1-asis ir 3-asis sluoksnių modelis, o baigtinių elementų - programos ATENA 2-asis ir 3-asis sluoksnių modelis.
9. Nepaisant nemažų apskaičiuotų ir eksperimentinių rezultatų skirtumų, gautas pakankamas apskaičiuotų ir eksperimentinių gelžbetoninių plokščių temperatūrų pasiskirstymo ir įlinkių atitikimas. Šie rezultatai rodo, kad pasiūlytas šiluminio uždavinio skaičiavimo algoritmas leidžia pakankamai tiksliai apskaičiuoti gelžbetoninių elementų, veikiamų aukšta temperatūra, temperatūrinius laukus ir yra pakankamai paprastas, universalus ir efektyvus kompiuterinių išteklių požiūriu.
10. Baigtinių elementų programa ATENA panaudota gaisro kreivę veikiamų gelžbetoninių plokščių temperatūros pasiskirstymui įtakančių faktorių parametrinėje analizėje. Nustatyta, kad didžiausią įtaką paviršiaus temperatūrai turi ugnies spinduliuotės koeficientas ir gaisro kreivės, o temperatūros pasiskirstymui skerspjūvyje - betono šilumos laidumo koeficientas, plokštės skerspjūvio aukštis ir tankis. Betono savitoji šiluminė talpa, pradinė temperatūra ir šilumos perdavimo konvekcija koeficientas žymios įtakos temperatūrų pasiskirstymui nedaro.
11. Siūloma integruoti autoriaus šiluminio uždavinio skaičiavimo algoritmą į E. Gedos (Geda 2010) mechaninio uždavinio skaičiavimo programą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Abrams, M. S. 1971. *Compressive Strength of Concrete At Temperatures to 1600 F*. In *Temperature and Concrete*, ACI Special Publications SP25, Detroit, USA, 33–58.
- Anderberg, Y.; Thelandersson, S. 1976. *Stress and Deformation Characteristic of Concrete at High Temperatures*. Part 2: Experimental Investigation and Material Behaviour Model. Lund: Lund University of Technology, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin 54. 84 p.
- Bilow, D. N.; Kamara, M. E. 2007. *Fire and Concrete Structures*. Portland Cement Association 5420 Old Orchard Road, Skokie, IL 60077. Structures: Crossing Borders.
- Bažant, Z.; Kaplan, M. F. 1996. *Concrete at high temperatures. Material properties and Mathematical Models*. Longman House, Burnt Mill, Harlow Essex CM20 2JE, England. 404 p.
- Bažant, Z.; Chern, J. C. 1987. *Stress induced thermal and shrinkage strains in concrete*. *Journal Engineering Mechanics–ASCE* 113(10): 1493–511.
- Bačinskas, D.; Kaklauskas, G.; Geda, E. 2004. *Baigtinių elementų programos ATENA pritaikymas aukšta temperatūra paveiktų gelžbetoninių sijų netiesinei analizei* // *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius: Technika, Vol X, Suppl 1, 11-18.
- Bačinskas, D.; Kaklauskas, G.; Geda, E.; Gribniak V. 2007. *Gelžbetoninių plokščių, veikiamų gaisro, modeliavimas*. Ūkio technologinis ir ekonominis vystymas – Vol XIII, No 4, 295-302.
- Bednarek, Z.; Kamočka, R. 2004. *Statybinių plienų temperatūrinių deformacijų analizė, veikiant kintantiems temperatūriniais laukams* // *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius: Technika, Vol X, Suppl 1, 19-22.
- Both, C. 1993. *Partial Fire Protection of Composite Slabs*. *J. Construct. Steel Research* 27: 143-158.
- Both, C. 1998. *The Fire Resistance of composite steel-concrete slabs*. Delft University Press, Mekelweg 4, 2628 CD Delft, The Netherlands. 191 p.
- Bounagui, A.; Kashef, A.; Bénichou, N. 2003. *Simulation of the dynamics of the fire for a section of the L.H. -La Fontaine Tunnel*. September 22.
- Bounagui, A.; Kashef, A.; Bénichou, N. 2004. *CFD simulation of the fire dynamic for a section of a tunnel in the event of fire*. CFD 2004, the 12th Annual Conference of the Computational Fluid Dynamics Society of Canada, Ottawa, May 9, 1-8.
- Buchanan, A. H. 2002. *Structural design for fire safety*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 417 p.
- Chang, J.; Buchanan, A. H.; Dhakal, R. P.; Moss, P. J. *Simple method for modelling hollowcore concrete slabs under fire*. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.

- Cooke, G. M. E. 2001. Behaviour of precast concrete floor slabs exposed to standardised fires, *Fire Safety Journal* 36(5): 459–475.
- Cooke, G. M. E. 2001. Deflections of concrete floor slabs exposed to standardised fires and some implications for design, *The Structural Engineer* 79(12): 26–34.
- Cooke, G. M. E.; Morgan, P. B. E. 1988. *Thermal bowing in fire and how it affects building design*. BRE Information Paper IP 21/88, Building Research Establishment, December. 4 p.
- Drysdale, D. 2002. *An Introduction to Fire Dynamics*. Second edition, John Wiley&Sons. 447 p.
- Драйздейл, Д. 1990. *Введение в динамику пожаров*. Москва: Стройиздат. 424 с.
- Fellinger, J. H. H. 2004. *Shear and anchorage behaviour of fire exposed hollow core slabs*. Delft University Press, PO Box 98, 2600 MG Delft, The Netherlands. 261 p.
- Geda, E. 2010. *Aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių elementų sluoksnių modelis*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 176 p.
- Harmathy, T. Z. 1993. *Fire safety design and concrete*. Longman House, Burnt Mill, Harlow Essex CM20 2JE, England. 404 p.
- Hertz, K. D. 2005. Concrete strength for fire safety design, *Magazine Concrete Research* 57(8): 445–453.
- Илjin, Н. А. 1979. *Outcomes of fire effect on reinforced concrete structures (Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции)*. Moscow: Stroizdat. 128 p.
- Jonaitis, B.; Papinigis, V. 2005. Effect of long-term loading and fire temperatures on mechanical properties of concrete, *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius, Vol XI, No 4. 283–288. Interneto prieiga: <http://www.tede.vgtu.lt>
- Jonaitis, B.; Papinigis, V. 2006. *Nauja Europos Sąjungos gaisro temperatūrų veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo metodika // Ūkio technologinis ir ekonominis vystymas*. Vilnius: Technika. ISSN 1392–8619. T. 12, nr. 2. 108–117. Interneto prieiga: <http://www.tede.vgtu.lt>
- Kaklauskas, G.; Ghaboussi, J. 2001. Stress-strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests, *ASCE Journal of Structural Engineering* 127(1): 64–73.
- Kaklauskas, G. 2001. *Integral Flexural Constitutive Model for Deformational Analysis of Concrete Structures*. Vilnius: Technika. 140 p.
- Kaklauskas, G. 2004. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members, *Magazine of Concrete Research* 56(10): 575–584.
- Khennane, A.; Baker, G. 1993. Uniaxial model for concrete under variable temperature and stress, *Journal Engineering Mechanics-ASCE* 119(8): 1507–1525.
- Khoury, G. A. 2000. Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures, *Progress in Structural Engineering and Materials* 2(4): 429–447.

- Кудаленкин, В. Ф. 1985. *Пожарная профилактика в строительстве*. Москва. 447 с.
- Levesque, A. 2006. *Fire performance of reinforced concrete slabs*. A thesis submitted to the faculty of the worcester polytechnic institute in partial fulfillment of the requirements for the degree of master science in civil engineering, May. 196 p.
- Li, L.; Purkiss, J. A. 2005. Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures. *Fire Safety Journal* 40: 669-686.
- Lie, T. T. 1992. *Structural fire protection*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Lie, T. T.; Lin, T. D. 1985. *Fire performance of reinforced concrete columns*. In: ASTM STP 882. Fire Safety: Science and Engineering, 176-205.
- Lie, T. T.; Rowe, T.J.; Lin, T.D. 1986. *Residual strength of fire exposed RC columns evaluation and repair of fire damage to concrete*. Detroit: American Concrete Institute, 153–174.
- Lietuvos standartas LST EN 1992-1-2:2005 „Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas“. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 97 p.
- Lietuvos standartas LST EN 1993-1-2:2005 „Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų elgsenos ugnyje skaičiavimas“. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 81 p.
- Lietuvos standartas LST EN 1994-1-2:2006 „Eurokodas 4. Kompozitinių plieninių betoninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų elgsenos ugnyje skaičiavimas“. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 106 p.
- Lim, L. C. S. 2000. *Stability of Precast Concrete Tilt Panels in Fire*. Fire Engineering Report 00/8. 350 p.
- Ma, Z. 2000. *Fire safety design of composite slim floor structures*. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology at Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 7th of December. 57 p.
- Милованов, А. Ф. 1998. *Стойкость железобетонных конструкций при пожаре*. Moscow: Stroizdat. 292 p.
- Mathews, J. H.; Fink K. D. 2001. *Numerical methods using MATLAB*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458. 552-579.
- Narang, V. A. 2005. *Heat transfer analysis in steel structures*. A thesis submitted to the faculty of the worcester polytechnic institute in partial fulfillment of the requirements for the degree of master science in civil engineering, May. 173 p.
- Petru, M. 2008. *Design of reinforced concrete elements under fire*. Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, I Tomul LIV (LVIII).
- Phan, L. T.; Carino N. J. 2001. Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures, *Materials and Structures Journal* 34 (236): 20.

Promat. Tunnel Fire Protection. Fire curves [žiūrėta 2010 m. sausio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx>

Purkiss, J. A. 2007. *Fire safety engineering design of structures*. Butterworth Heinemann, Oxford. 389 p.

Ravindrarajah, R. S.; Lopez, R.; Reslan, H. 2002. *Effect of elevated temperature on the properties of high-strength concrete containing cement supplementary materials*. 9th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Brisbane, Australia, 17-20th March. 9 p.

Sanders, P. T. *Advances in fire design for reinforced concrete structures-moving to more rational design methods*. Steel reinforcement institute of Australia.

Statybos techninis reglamentas STR 2.01.04:2004 „*Gaisrinė sauga. Pagrindiniai reikalavimai*“, patvirtintas Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2003 m. gruodžio 24 d. įsakymu Nr. 704 (Valstybės žinios, 2004, Nr. 23–720), 2003. 34 p.

Statybos techninis reglamentas STR 2.05.11:2005 „*Gaisro temperatūrų veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*“, patvirtintas Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2005 m. vasario 11 d. įsakymu Nr. D1–84 (Valstybės žinios, 2005, Nr. 24–788), 2005. 26 p.

Šakmanas, A. A. 1996. *Termodinamika ir šilumos mainai ugniagesyboje*. Vilnius: Technika. 44 p.

Terro, M. J. 1998. Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire, *ACI Structural Journal* 95(2): 183-193.

Wagsater, T.; Anderberg, Y.; Jeansson, S. 2004. *Load-bearing capacity and critical time to collapse, including the effect of thermal barriers for some typical reinforced concrete elements in existing tunnels*. Fire safety design AB, Sweden. 32 p.

PRIEDAI

A priedas. Įprastinio betono su silikatiniais arba kalkiniais užpildais ir lengvojo betono įtempių ir santykinų deformacijų sąryšių aukštesnėje temperatūroje pagrindinių parametrų reikšmės, pagal LST EN 1992-1-2:2005

B priedas. Karštai valcuotos ir šaltai apdorotos armatūros įtempių ir santykinų deformacijų sąryšių aukštoje temperatūroje parametrų reikšmės, pagal LST EN 1992-1-2:2005

C priedas. Šaltai apdorotos (ŠA) (vielos ir lynai) ir grūdintos bei atleistos (GA) (strypai) įtemptosios armatūros įtempių ir santykinų deformacijų sąryšių aukštose temperatūrose parametrų reikšmės, pagal LST EN 1992-1-2:2005

D priedas. Aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių elementų mechaninio uždavinio skaičiavimo algoritmo schema (Geda 2010)

PRIEDAI

A priedas. Įprastinio betono su silikatiniais arba kalkiniais užpildais ir lengvojo betono įtempių ir santykinų deformacijų sąryšių aukštesnėje temperatūroje pagrindinių parametų reikšmės, pagal LST EN 1992-1-2:2005

Betono temperatūra, θ	Silikatiniai užpildai			Kalkiniai užpildai			Lengvas betonas		
	$\frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}$	$\varepsilon_{cl,\theta}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$	$\frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}$	$\varepsilon_{cl,\theta}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$	$\frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}$	$\varepsilon_{cl,\theta}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$
$^{\circ}\text{C}$	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0020	0,0100
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225	0,75	0,0025	0,0105
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250	0,73	0,0040	0,0120
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275	0,73	0,0060	0,0140
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300	0,72	0,0090	0,0170
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325	0,70	0,0125	0,0205
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350	0,65	0,0160	0,0240
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375	0,55	0,0225	0,0305
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400	0,25	0,0270	0,0350
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425	0,10	0,0295	0,0375
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450	0,05	0,0305	0,0385
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475	0,02	0,0315	0,0395
1200	0,00	-	-	0,00	-	-	0,01	0,0320	0,040

PRIEDAI

B priedas. Karštai valcuotos ir šaltai apdorotos armatūros įtempių ir santykinų deformacijų sąryšių aukštoje temperatūroje parametrų reikšmės, pagal LST EN 1992-1-2:2005

Plieno temperatūra, $\theta [^{\circ}\text{C}]$	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	karštai valcuota	šaltai apdorota	karštai valcuota	šaltai apdorota	karštai valcuota	šaltai apdorota
1	2	3	4	5	6	7
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	1.00	1.00	1.00	0.96	1.00	1.00
200	1.00	1.00	0.81	0.92	0.90	0.87
300	1.00	1.00	0.61	0.81	0.80	0.72
400	1.00	0.94	0.42	0.63	0.70	0.56
500	0.78	0.67	0.36	0.44	0.60	0.40
600	0.47	0.40	0.18	0.26	0.31	0.24
700	0.23	0.12	0.07	0.08	0.13	0.08
800	0.11	0.11	0.05	0.06	0.09	0.06
900	0.06	0.08	0.04	0.05	0.07	0.05
1000	0.04	0.05	0.02	0.03	0.04	0.03
1100	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
1200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

PRIEDAI

C priedas. Šaltai apdorotos (ŠA) (vielos ir lynai) ir grūdintos bei atleistos (GA) (strypai) įtemptosios armatūros įtempių ir santykinų deformacijų sąryšių aukštose temperatūrose parametrų reikšmės, pagal LST EN 1992-1-2:2005

Plieno temperatūra , $\theta [^{\circ}\text{C}]$	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$		$\varepsilon_{pt,\theta} [-]$	$\varepsilon_{pu,\theta} [-]$
	ŠA	GA	ŠA	GA	ŠA	GA		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0050	0.0100
100	0.99	0.98	0.68	0.98	0.76	0.77	0.0050	0.0100
200	0.87	0.92	0.51	0.95	0.61	0.62	0.0050	0.0100
300	0.72	0.86	0.32	0.88	0.52	0.58	0.0055	0.0105
400	0.46	0.69	0.13	0.81	0.41	0.52	0.0060	0.0110
500	0.22	0.26	0.07	0.54	0.20	0.14	0.0065	0.0115
600	0.10	0.21	0.05	0.41	0.15	0.11	0.0070	0.0120
700	0.08	0.15	0.03	0.10	0.10	0.09	0.0075	0.0125
800	0.05	0.09	0.02	0.07	0.06	0.06	0.0080	0.0130
900	0.3	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03	0.0085	0.0135
1000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0090	0.0140
1100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0095	0.0145
1200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0100	0.0150

D priedas. Aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių elementų mechaninio uždavinio skaičiavimo algoritmo schema (Geda 2010)

