VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Romas RASIULIS

STATINIO INFORMACINIO MODELIAVIMO TECHNOLOGIJOMIS GRĮSTAS MODELIS ADMINISTRACINIŲ PASTATŲ ATNAUJINIMUI VERTINTI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)

VGTU
LEIDYKLA
TECHNIKA
Vilnius 2017

Disertacija rengta 2011–2017 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

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

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

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

Nariai

doc. dr. Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),
dr. Tomas BALEŽENTIS (Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas, informatikos inžinerija – 07T),
prof. dr. Marija BURINSKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),
prof. habil. dr. Joanicjusz NAZARKO (Balstogės technologijos universitetas, vadyba – 03S).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2017 m. kovo 3 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.
Tel. (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2017 m. vasario 2 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje http://dspace.vgtu.lt ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2017-005-M mokslo literatūros knyga
http://leidykla.vgtu.lt

ISBN 978-609-476-001-3
© VGTU leidykla TECHNIKA, 2017
© Romas RASIULIS, 2017
r.rasiulis@me.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Romas RASIULIS

BUILDING INFORMATION MODELING TECHNOLOGY BASED MODEL FOR RENOVATION OF ADMINISTRATIVE BUILDINGS ASSESSMENT

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)

VGTU
LEIDYKLA
TECHNIKA
Vilnius 2017

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2017.

Supervisor

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

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

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

Members:

Assoc. Prof. Dr Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Dr Tomas BALEŽENTIS (Lithuanian Institute of Agrarian Economics, Informatics Engineering – 07T),

Prof. Dr Marija BURINSKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Prof. Dr Habil. Joanicjusz NAZARKO (Bialystok University of Technology, Management – 03S).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 3 March 2017**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.
Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 2 February 2017.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository http://dspace.vgtu.lt and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Europos Sąjungos direktyvos 2010/31/ES dėl pastatų energinio naudingumo (EPBD 2010) nauja redakcija įveda apibrėžimą „beveik nulinės energijos pastatai“ ir nustato, kad nauji pastatai nuo 2020 m. gruodžio 31 d. turės būti beveik nulinės energijos visoje Europos Sąjungoje. Visuomeniniams pastatams ši direktyva įsigalioja dvejais metais anksčiau. Tyrimo objektas yra administracinių pastatų atnaujinimo variantų bei sprendimų efektyvumo vertinimas taikant pastato informacinio modeliavimo (angl. *Building Informatikon Modeling – BIM*) technologiją.

Pagrindinis darbo tikslas – sukurti administracinių pastatų atnaujinimo variantų daugiakriterinį modelį ir metodiką sprendimų efektyvumo tyrimui ir vertinimui, taikant BIM technologiją. Sukurta metodika gali būti taikoma praktikoje projektuojant statinių atnaujinimo projektus.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros sąrašas, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir du priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojami darbo tikslai ir uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomi autoriaus pranešimai konferencijose ir publikacijos, pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje aptariama administracinių pastatų atnaujinimo galimybių analizė taikant BIM technologiją. Šiam tikslui pasiekti analizuojamos energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės. Nustatyta komfortinių sąlygų ir termoizoliacijos sąsaja, aptariami pastato informacinio modeliavimo privalumai ir trūkumai.

Antrajame skyriuje pateikiamas sukurtas energijos vartojimo efektyvumo administracinių pastatų modernizacijos ir rekonstrukcijos bazinis modelis, naudojantis pasyvių namų ir BIM technologijas. Skyriuje suformuotas efektyvios modernizacijos sprendimų priėmimo modelis bei sprendimų sintezės medis, naudojantis alternatyvių modernizavimo priemonių atrankos derinį, bei suformuotas taikomų efektyvumo rodiklių kompleksas.

Trečiajame skyriuje patikrinta sukurta metodika ir administracinių pastatų atnaujinimo technologijų daugiakriteris modelis sprendimų efektyvumui tirti ir vertinti taikant BIM technologiją. Algoritmas pritaikytas Vaidotų geležinkelio stoties pastatui. Įvertinus inžinerinius įrenginius, suprojektuotas pastatas dar kartą patikrintas pasyvaus namo planavimo paketu (angl. *Passive House Planning Package – PHPP*) programa.

Abstract

Directive 2010/31/EU of the European Parliament on the energy performance of buildings (EPBD 2010) recast determines the definition of „nearly zero energy buildings" and stipulates that new buildings should be nearly zero energy throughout the European Union by 31st of December 2020. This Directive shall enter into force two years earlier for Public buildings. Dissertation evaluates modernization technology and carries out the decision efficiency research in BIM environment. The subject of the research ir efficiency evaluation of renovation options using BIM technologies for the administration buildings.

The main goal is to create a methodology and multiple criteria model for administrative buildings' modernization technologies and decision efficiency research and evaluation in BIM environment. This methodology can also be put into practice for the real building renovation project design.

Dissertation consists of introduction, three chapters, general conclusions, references, list of author's scientific publications on the topic and two annexes.

In the introduction, the investigated problem, importance of the thesis are discussed, the object of research is described, the aims and objectives of the thesis are formulated, scientific novelty of the thesis and defendant assertions are described. Author's conference reports and publications as well the thesis structure are presented at the end of the introduction.

In the first chapter the administrative building renovation feasibility analysis in BIM environment is discussed. Interface between comfort conditions and thermal insulation is determined, advantages and disadvantages of the building information modelling are discussed.

In the second chapter the base model for energy efficiency of administrative building modernization and reconstruction, using the passive house and BIM technologies, is provided. Applicable performance indicators complex are formed.

In the third chapter developed methodology and multiple criteria model for administrative buildings' modernization technologies and decision efficiency research and evaluation in BIM environment are examined. The algorithm is applied in practice for Vaidotai railway station example. The designed building examined once more by PHPP (Passive House Planning Package) program assessing the engineering facilities.

Žymėjimai

Santrumpos

2D – dvimatė erdvė (plokštuma), naudojama grafiniams primityviems objektams kurti ir iš jų projektuoti kreives bei figūras (angl. *Two Dimensions*).

3D – trimatė erdvė, naudojama kuriant taškų rinkinius, sujungiamus į linijas, kreives, plokštumas ir pan., kurias naudojant gaunami tūriniai kūnai (angl. *Three Dimensions*).

4D – keturmatė erdvė, kurioje trimatis kūnas dažniausiai atvaizduojamas laiko atžvilgiu (angl. *Four Dimensions*).

5D – penkiamatė erdvė, kuri apima tiksliai išlaidų sąmatą.

6D – šešiamatė erdvė, darnaus statinio vystymas (pvz., saulės energijos vartojimas).

7D – septynmatė erdvė – naujausia kryptis, apimanti pastatų ūkio valdymo koncepcija.

bar – baras (matavimo vienetas, naudojamas slėgiui matuoti), $1\ \text{bar} = 10^5\ \text{Pa}$.

BIM – statinio informacinis modeliavimas (angl. *Building Information Modelling*).

BLM – statinio gyvavimo ciklo valdymas (angl. *Building Lifecycle Management*).

CAD – virtualių arba realių objektų projektavimo būdas naudojant kompiuterines technologijas (angl. *Computer-Aided Design*).

CIFE – Integruotos pramonės inžinerijos centras Stenfordo universitete (angl. *Center for Integrated Facility Engineering from Stanford University*).

CM – statybos valdymas (angl. *Construction management*).

CO_2 – anglies dioksidas.

DB – projekto įgyvendinimo metodas, kai statybos darbai perkami kartu su projektavimo darbais (angl. *Design-build*).

DBB – projekto įgyvendinimo metodas, kai statybos darbai perkama atskirai (angl. *Design Bid Build*).

ES – Europos Sąjunga.

HN – higienos norma.

IPD – integruotas projekto įgyvendinimo metodas (angl. *Integrated project delivery*).

IT – informacinės technologijos.

JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos.

JK – Jungtinė Karalystė.

LR – Lietuvos Respublika.

LST – Lietuvos standartas.

LST EN – Europos standartas.

LST EN ISO – tarptautinis standartas.

PDM – projekto įgyvendinimo metodas (angl. *project delivery method*).

PENG – prioritetai paremti komercine nauda (šved. *Prioritering efer Nytto Grunder*).

PHPP – pasyvaus namo planavimo programa (angl. *Passive House Planning Package*).

PLM – produkto viso gyvavimo ciklo valdymas (angl. *Product (Project) Lifecycle Management*).

RFI – informacijos poreikis (angl. *Request for Information*).

ROI – investicijų grąža (angl. *Return of Investment*).

STR – statybos techninis reglamentas.

TEI – bendra ekonominė nauda (*Total Economic Impact*).

VDC – virtualus projektavimas ir konstravimas (*Virtual Design and Construction*).

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 3
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 4
Tyrimų metodika 4
Darbo mokslinis naujumas 5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 5
Ginamieji teiginiai 5
Darbo rezultatų aprobavimas 6
Disertacijos struktūra 6

1. ADMINISTRACINIŲ PASTATŲ ATNAUJINIMO GALIMYBIŲ ANALIZĖ TAIKANT PASTATO INFORMACINIO MODELIAVIMO TECHNOLOGIJĄ 7
1.1. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo būtinumas 8
1.2. Administracinių pastatų atnaujinimo galimybės 13
1.2.1. Komforto sąlygų ir termoizoliacijos sąsajos analizė 15
1.2.2. Energiją taupančios statybinės sistemos (energetiškai efektyvūs namai) 16
1.3. Pastato informacinio modeliavimo technologijų nauda projektavimo įmonėse 22
1.4. Statybų informacijos modeliavimo efektyvumas statybos metu 28
1.5. Pastato informacinio modeliavimo evoliucija 32
1.6. Daugiakriterių metodų taikymas sprendžiant energoefektyvių pastatų konstrukcijų ir inžinerinių sistemų parinkimo problemas 34
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 38

2. ADMINISTRACINIO PASTATO RENOVACIJOS IR REKONSTRUKCIJOS ENERGIJOS EFEKTYVUMAS NAUDOJANT PASYVAUS NAMO MODELĮ IR PASTATO INFORMACINIO MODELIAVIMO TECHNOLOGIJĄ 41
2.1. Energinio efektyvumo užtikrinimo priemonės 42
2.2. Komforto sąlygos ir termoizoliacijos užtikrinimo priemonės 43
2.3. Šilumos tilteliai 46
2.4. Pastato sandarumas 48
2.5. Pasyvių namų konstrukcijos 50
2.5.1. Pasyvių namų pamatai ir rūsio grindys 50
2.5.2. Pasyvių namų sienos 55
2.5.3. Pasyviems namas naudojami langai 57
2.5.4. Pasyvių namų stogas 59
2.5.5. Vėdinimo sistema 62
2.6. Sprendimų modelis 63
2.7. Efektyvumo rodiklių rinkiniai 65
2.8. Rodiklių reikšmingumų nustatymas 66
2.9. Pastato konstrukcijų modernizavimo sprendimų sintezės metodas SyMAD-*3* 67
2.10. Antrojo skyriaus išvados 72

3. VISUOMENINIŲ PASTATŲ MODERNIZAVIMO PRIEMONIŲ ATRANKOS SPRENDIMŲ MODELIS 75
3.1. Administracinio pastato tyrimo modelis 76
3.2. Šilumos perdavimo koeficientų rodiklių nustatymas 78
3.3. Eksperimentiniai tiriamieji skaičiavimai 80
3.4. Konstrukcijų daugiatikslio sprendimų sintezės modelio formavimas 88
3.5. Duomenų analizė ir optimizavimas 90
3.6. Pastato energijos poreikio analizė 94
3.7. Statinio informacinio modeliavimo technologija 95
3.8. Trečiojo skyriaus išvados 99

BENDROSIOS IŠVADOS 101

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 103

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS 117

SUMMARY IN ENGLISH 119

PRIEDAI[1] 135
A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje 136
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos 148

[1] Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION 1
Problem formulation 1
Relevance of thesis 2
Object of research 3
Aim of thesis 3
Objectives of thesis 3
Research methodology 4
Scientific novelty of thesis 4
Practical value of research findings 5
Defended statements 5
Approval of research findings 6
Structure of the dissertation 6

1. ANALYSIS OF RENOVATION FACILITIES FOR ADMINISTRATIVE BUILDINGS USING BUILDING INFORMATION MODELING TECHNOLOGY ... 7
1.1 Necessity of energy efficiency improvement 8
1.2. Opportunities of administrative building refurbishment 13
1.2.1. Analysis of the interface between comfort conditions and thermal insulation 15
1.2.2. Energy saving building systems (energy-efficient houses) 16
1.3. Building information modeling technology benefits for design companies 22
1.4. Building information modeling efficiency during construction work 28
1.5. Building information modeling evolution 32
1.6. Multi-criteria methods aiming energy efficient building structure and engineering system selection problems 34
1.7. Conclusions of the first chapter and formulation of objectives of the thesis 38

2. ENERGY EFFICIENCY OF ADMINISTRATIVE BUILDING RENOVATION AND RECONSTRUCTION USING PASSIVE HOUSE MODEL AND BUILDING INFORMATION MODELING TECHNOLOGY 41
2.1. Energy efficiency collateral 42
2.2. Collateral for comfort conditions and thermal insulation 43
2.3. Thermal bridges 46
2.4. Building air tightness 48
2.5. Constructions of the passive houses 50
2.5.1. Foundations and basement floors of the passive houses 50
2.5.2. Passive house walls 55
2.5.3. Windows for the passive houses 57
2.5.4. Passive house roof 59
2.5.5. Ventilation systems 62
2.6. Decision making model 63
2.7. Efficiency indicators 65
2.8. Identification of significance of indicators 66
2.9. Synthesis of Multiple Attribute Decisions by three method *SyMAD-3* 67
2.10. Conclusions of the second chapter 72

3. DECISION MAKING MODEL FOR MODERNIZATION MEASURES SELECTION FOR PUBLIC BUILDINGS 75
3.1. Administrative building research model 76
3.2. Heat transfer ratio indicators identification 78
3.3. Experimental research calculations 80
3.4. Synthesis model for multipurpose solutions for constructions formation 88
3.5. Data analysis and optimization 90
3.6. Building energy demand analysis 94
3.7. Building information modeling technology 95
3.8. Conclusions of the third chapter 99

GENERAL CONCLUSIONS 101

LITERATURE AND SOURCES 103

LIST OF AUTHORS' SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION 117

SUMMARY IN ENGLISH 119

ANNEXES[2] 135
Annex A. Consents of the Co-authors to provide the publications in the thesis 136
Annex B. Copies of scientific publications by the author 148

[2] The annexes are supplied in the enclosed compact disk

Įvadas

Problemos formulavimas

Statinio informacijos modeliavimo sistema (BIM) – tai procesas, kai sprendimai priimami bendradarbiaujant visiems statybos dalyviams. Sprendimai grindžiami skaitmeninėmis technologijomis, kurios atskleidžia efektyvesnius projekto kūrimo metodus (Bryde *et al.* 2013). Kompiuterinis modelis, turintis keletą lygių, gali būti naudojamas efektyviam informacijos apdorojimui visą statinio gyvavimo ciklą – nuo koncepcijos sukūrimo iki statinio valdymo ir nugriovimo (Jung, Joo 2011). BIM paremti procesai yra naujų pastatų ir jos infrastruktūros pagrindas. Atnaujinimo projektuose BIM turi didelį potencialą, taip pat galimos papildomos priemonės, tokios kaip skenavimas lazeriais, energinė analizė, taip pat ir ekonomiškumo analizė (Barlish, Sullivan 2012; Lee *et al.* 2012). Nors BIM procesai yra daugiausia taikomi naujiems pastatams ir dar nėra plačiai paplitę esamų administracinių pastatų priežiūrai ar rekonstrukcijai vykdyti (Merschbrock, Figueres-Munoz 2015), tačiau Volk *et al.* (2014) jau pristato 180 neseniai išleistų publikacijų apžvalgą šia tema. Kitų tyrimų rezultatai rodo menką BIM sistemos panaudojimą esamiems administraciniams pastatams (Gu, London 2010).

Šiame kontekste BIM technologija sukuria galimybes konstruktyviai sinergijai, energijos sumažinimui ir programinių įrangų industrijoms (Fan *et al.*

2014). Šiuo metu BIM sistemoje diegiami įvairūs posistemiai, pavyzdžiui, konstrukcijos kaina gali būti apskaičiuojama naudojant sukurto pastato modelį, ta pati sistema gali būti pritaikyta kuriant kalendorinius grafikus, skaičiuojant naudojamas medžiagas ir t. t. (Popov *et al.* 2010; Migilinskas *et al.* 2013).

Nepaisant greitų vystymosi procesų ir vis aukštesnių standartų, BIM sistemos pritaikymo prie esamų pastatų reikalavimams yra neišnaudota tyrimų sritis (Volk *et al.* 2014).

Disertacijos mokslinė problema formuluojama klausimu – kaip turėtų būti vertinami atnaujinimo (modernizavimo) variantai ir kaip atliekamas sprendimų efektyvumo tyrimas taikant BIM technologiją? Todėl šiai problemai spręsti siūloma disertacijoje parengta medžio sintezės metodika ir daugiakriteris modelis. Metodika yra pritaikyta BIM technologijų plėtrai statybos rinkoje, taip pat ji gali būti praktiškai taikoma rengiant pastatų atnaujinimo projektus.

Disertacijos problemos sprendimas ir praktinis gautų rezultatų pritaikomumas turėtų teigiamą įtaką Lietuvos statybų sektoriaus technologiniam vystymuisi, įgyvendinant BIM diegimą Lietuvoje. Siūloma medžio sintezės metodika bei daugiakriterio modelio universalumas, kintant sąlygoms ir modeliavimo prielaidoms, gali būti įvairiai taikomas, o prireikus ir koreguojamas kintančioms aplinkos sąlygoms vertinti.

Darbo aktualumas

Statybos sektorius – vienas iš reikšmingiausių sektorių, darančių įtaką šalies ekonomikos augimui. Šio sektoriaus įtaka didelė dėl sukuriamos didelės pridėtinės vertės ir darbo vietų skaičiaus. Tai sektorius, generuojantis didžiąją dalį materialinių investicijų bei sudarantis apie pusę energijos išteklių paklausos. Statybų sektoriaus reikšmingumą pagrindžia ir statybos paslaugų pirkimų dominavimas viešųjų pirkimų sektoriuje. Lietuvos statistikos departamento duomenimis, 2015 m. Lietuvoje atlikta statybos darbų beveik už 2,5 mlrd. eurų, taigi šis sektorius yra labai svarbus šalies ekonomikai. Taip pat reikėtų pažymėti ir statybos sektoriaus sąryšį ir įtaką kitiems sektoriams, tokiems kaip transporto, energetikos, tekstilės, informacinių technologijų ir kt.

Šiuo metu yra labai aktualus energijos efektyvumo, efektyviausio šaltinio alternatyvos pasirinkimo galimybių tyrimas. Kol kas nėra metodikos, kaip palyginti skirtingų alternatyvų efektyvumą ir kokybę (Kreiner *et al.* 2015). Taip pat nėra sąsajos su galiojančiais techniniais reikalavimais, naudojančiais posistemius, leidžiančius optimizuoti ir kurti sąsajas su duomenimis, atitinkančiais galiojančius reikalavimus. Būtina, kad parenkant sprendinius, būtų galimybė pasirinkti tą variantą, kuris yra aukščiausios kokybės, efektyviausias,

ekonomiškiausias ir tausojantis energiją, o tai atitinka teisinius šių dienų reikalavimus (Sun *et al.* 2015).

Reikalavimas statyti ir renovuoti pastatus, beveik nenaudojančius energijos, reiškia, kad statybų sektoriui reikia labai pagerinti darbų kokybę. Reikia pabrėžti, kad yra tam tikrų kliūčių, kurios trukdo įgyvendinti šias nuostatas. Statybų pramonės nevienalytiškumas, statybos įmonių gausa ir atitinkamas kokybės standartų trūkumas, taip pat audito protokolų ir rekomendacijų trūkumai riboja investicijas į priemones energijos efektyvumui didinti ir atsinaujinančių energijos šaltinių integraciją.

Tiekėjai, pirkėjai ir visuomenės įgaliotieji turi bendradarbiauti ir rasti sprendimus, kurie kurtų pastatų savininkams patrauklius pasiūlymus.

Senų pastatų modernizavimas naudojant BIM technologijas gali turėti didelę įtaką priimtiems įsipareigojimams mažinti CO_2 emisiją. BIM sistema yra paremta energijos valdymo modeliu ankstyvuosiuose pastato kūrimo etapuose, ji užtikrina efektyviausią energijos šaltinio pasirinkimo sprendimą. Šiuo metu pastatų savininkai nepakankamai reikalauja, kad būtų pagerintas energijos efektyvumas esamuose pastatuose. Norint tinkamai modernizuoti pastatus reikėtų reikšmingai kilstelti kartelę, turi būti užtikrintas garso nepralaidumas, apšviestumas, tai galima būtų apibūdinti kaip aukštos kokybės renovavimo procesas ir iš to ateityje naudos turėtų visi.

Šis darbas turėtų būti geras pavyzdys, kuris turėtų paskatinti renovavimą plačiąja prasme. Sukurtos priemonės su tam tikromis modifikacijomis lengvai pritaikomos skirtingose klimato zonose.

Tyrimų objektas

Administracinių pastatų atnaujinimo variantų ir sprendimų efektyvumo vertinimas taikant BIM technologiją.

Darbo tikslas

Sukurti administracinių pastatų atnaujinimo variantų daugiakriterį modelį ir metodiką sprendimų efektyvumui tirti ir vertinti, taikant BIM technologiją ir jo praktinio taikymo algoritmą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliami uždaviniai:

1. Išnagrinėti literatūroje pastatų atnaujinimo variantus ir sprendimų efektyvumo tyrimus, kurie buvo atlikti taikant BIM technologijas.
2. Nustatyti administracinių pastatų atnaujinimo galimybes ir energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemones.
3. Suformuluoti evoliucijos ir plėtros apibrėžimą taikant BIM technologiją investicijų atsiperkamumui (ROI).
4. Sukurti administracinių pastatų modernizavimo ir rekonstrukcijos energijos vartojimo efektyvumo bazinį modelį, naudojant pasyvių namų ir BIM technologijas.
5. Suformuluoti pasyviųjų namų atitvarinių konstrukcijų variantus, kuri leistų nustatyti efektyviausią modernizavimo variantą.
6. Sukurti administracinių pastatų atnaujinimo technologijų daugiakriterį modelį ir variantų medžio sintezės metodiką.
7. Sukurti modernizavimo priemonių atrankos sprendimų modelį, kuris leistų nustatyti efektyviausią modernizavimo variantą.
8. Patikrinti daugiakriterinį modelį ir sukurtą metodiką. Praktiškai pritaikyti algoritmą administracinių pastatų atnaujinimo technologijų bei sprendimų efektyvumo tyrimui ir vertinimui, naudojant BIM technologiją.

Tyrimų metodika

Rengiant darbą remtasi užsienio ir Lietuvos mokslininkų publikacijomis, tyrimais, statybos įmonių duomenimis, įstatymais, reglamentuojančiais statybą ir projektavimą, statybos techniniais reglamentais, statybos įstatymu, BIM standartais. Atliktas eksperimentinis vertinimas, duomenys susisteminti ir pavaizduoti grafiškai. Vertinant modernizacijos efektyvumą taikomas sprendimų priėmimo metodas, modernizacijos variantų sintezės sprendimo metodas, daugiakriterė analizė. Naudoti įvairių statybos pramonės institucijų informaciniai leidiniai, ataskaitos, Lietuvos ir užsienio įstaigų statistiniai duomenys. Nagrinėta BIM programų gamintojų techninė informacija, įvairios ataskaitos, atsiperkamumo skaičiavimo metodika.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurtas bazinis modelis, skirtas administracinių pastatų modernizacijos ir rekonstrukcijos energijos vartojimo efektyvumui vertinti, naudojantis pasyvių namų ir BIM technologijas.
2. Parengta administracinių pastatų atnaujinimo technologijų medžio sintezės metodika ir daugiakriteris modelis, leidžiantis sukurti algoritmą administracinių pastatų atnaujinimo projektui rengti, taikant BIM technologiją.
3. Sukurtas modernizavimo priemonių sprendimų atrankos modelis, leidžiantis, atnaujinant pastatus, nustatyti efektyviausią konstrukcijų ir inžinerinių įrenginių sprendinių kombinaciją.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimo rezultatai naudingi įmonėms priimant mikrolygmens, mezolygmens ir makrolygmens sprendimus, susijusius su administracinių pastatų atnaujinimo technologijomis bei sprendimų efektyvumo nustatymu ir vertinimu, taikant BIM technologiją įmonių veiklose. Disertacijos tyrimo rezultatų taikymas makrolygmeniu naudingas vieningai BIM sistemai formuoti ir diegti, statybų sektoriui skaitmeninti atskirose šalyse. Atlikto tyrimo rezultatai turi reikšmingą įtaką priimant tiek mikrolygmens, tiek makrolygmens sprendimus, susijusius su inovacijų diegimu statybų sektoriuje, kurios tiesiogiai ir netiesiogiai turės įtakos technologijos, socialinių, humanitarių mokslo sričių raidai.

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlytas administracinių pastatų modernizavimo ir rekonstrukcijos bazinis modelis leidžia įvertinti energijos vartojimo efektyvumą, kiekvieno veiksnio vaidmenį projektavimo įmonėse diegiant BIM ir naudojant pasyvių namų BIM technologijas.
2. Sukurta administracinių pastatų atnaujinimo technologijų medžio sintezės metodika ir daugiakriteris modelis yra algoritmo pagrindas, kuris palengvina administracinių pastatų atnaujinimo projektų, taikant BIM technologiją, rengimą.

3. Sukurtas modernizavimo atrankos priemonių sprendimų modelis, leidžiantis, atnaujinant pastatus, nustatyti efektyviausią konstrukcijų ir inžinerinių įrenginių sprendinių kombinaciją.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 9 moksliniai straipsniai, iš kurių trys įtraukti į *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)* sąrašą (Reizgevičius *et al.* 2014; Ustinovichius *et al.* 2012; Rasiulis *et al.* 2016); trys – konferencijos straipsnių rinkinyje *ISI Proceedings* (Reizgevičius *et al.* 2013; Ustinovičius *et al.* 2015; Ustinovičius *et al.* 2013); du – kituose recenzuojamuose užsienio ir Lietuvos mokslo leidiniuose (Ustinovichius *et al.* 2015; Rasiulis *et al.* 2015), vienas straipsnis – recenzuojamame Lietuvos konferencijos straipsnių rinkinyje (Ustinovichius, Rasiulis 2015).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose (keturiose tarptautinėse):

- VGTU 11-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ 2013 m. Vilniuje;
- 15-asis Vokietijos, Lietuvos ir Lenkijos koliokviumas „Innovative solutions in Construction Engineering and Management“ 2015 m., Poznanė, Lenkija;
- *Creative Construction Conference* 2013 m. Budapest, Hungary;
- 6-ojoje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Jaunųjų mokslininkų darbai“ 2013 m. Vilniuje;
- *Analizy problemów statyki i dynamiki konstrukcji budowlanych* 2015 m. Balstogėje.

2015 m. buvo atlikta stažuotė pagal *Erasmus* programą Lenkijoje, Balstogės technologijos universitete. Stažuotės metu surinkta informacija apie BIM diegimą Lenkijoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados. Taip pat yra 2 priedai.

Darbo apimtis yra 134 puslapiai, neskaitant priedų, tekste yra 46 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 186 literatūros šaltiniai.

1

Administracinių pastatų atnaujinimo galimybių analizė taikant pastato informacinio modeliavimo technologiją

Skyriuje aptariama administracinių pastatų atnaujinimo galimybių analizė taikant BIM technologiją. Šiam tikslui pasiekti kruopščiai analizuojamos energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės. Nustatyta komforto sąlygų ir termoizoliacijos sąsaja. Energijos vartojimo pastatuose tendencijos yra tiesiogiai susijusios su energijos tiekimo infrastruktūros modernizacija ir nauja statyba, senų pastatų renovacija, šildymo, vėdinimo ir vėsinimo įrangos priežiūra, jos pakeitimu ir atnaujinimu. Tačiau iki šiol didžiausias energijos kiekis suvartojamas ne statyboms, o pastatų eksploatacijai. Pastato atitvarų šiluminės charakteristikos lemia energijos kiekį, reikalingą pastatui šildyti ir vėsinti, taigi pastato šiluminės charakteristikos turi būti tokios, kad šildymo ir aušinimo našta būtų optimizuota iki minimumo. Apibrėžiama BIM technologijų reikšmė statybos sektoriuje. Analizuojama užsienio autorių literatūra, tyrimai. BIM (*Building Information Modeling*) projektavimas yra dažnai analizuojama sritis statybos inžinerijos ir vadybos moksliniuose leidiniuose. Pirmame skyriuje

aptariami pastato informacinio modeliavimo privalumai ir trūkumai. Darbo efektyvumui daro įtaką visi analizuojami kriterijai.

Įvertinus administracinių pastatų atnaujinimo poreikį ir BIM reikšmę statybos sektoriuje, suformuluojami disertacijos uždaviniai.

Skyriaus tematika paskelbtos penkios publikacijos: Ustinovichius *et al.* 2012; Reizgevičius *et al.* 2014; Rasiulis 2011; Ustinovichius *et al.* 2013; Ustinovichius, Rasiulis 2015.

1.1. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo būtinumas

Europos Sąjungos direktyvos 2010/31/ES dėl pastatų energinio naudingumo (EPBD 2010) nauja redakcija įveda apibrėžimą „beveik nulinės energijos pastatai“ ir nustato, kad nauji pastatai nuo 2020 m. gruodžio 31 d. turės būti beveik nulinės energijos visos Europos Sąjungos mastu. Visuomeniniams pastatams ši direktyva įsigalioja dvejais metais anksčiau. Pagal pastatų energinį naudingumą beveik nulinės energijos pastatai dabar apibrėžiami kaip statiniai, turintys „labai aukštą energijos efektyvumą“. Direktyva skatina architektus ir planuotojus tinkamai atsižvelgti į optimalų energijos vartojimą, efektyvumo didinimą ir ieškoti daugiau tvarių sprendimų. Tvaraus pastato vizija buvo aptarta per pastarąjį dešimtmetį (Gimenez *et al.* 2012; Wang, Adeli 2014; Žėkas *et al.* 2014; Medineckiene *et al.* 2015 ir kt.) pažymint tai, kad sėkmingos tvarios infrastruktūros ir ekologiškai sąmoningų sistemų kūrimas reikalauja holistinio, integruoto ir įvairias sritis apimančio požiūrio.

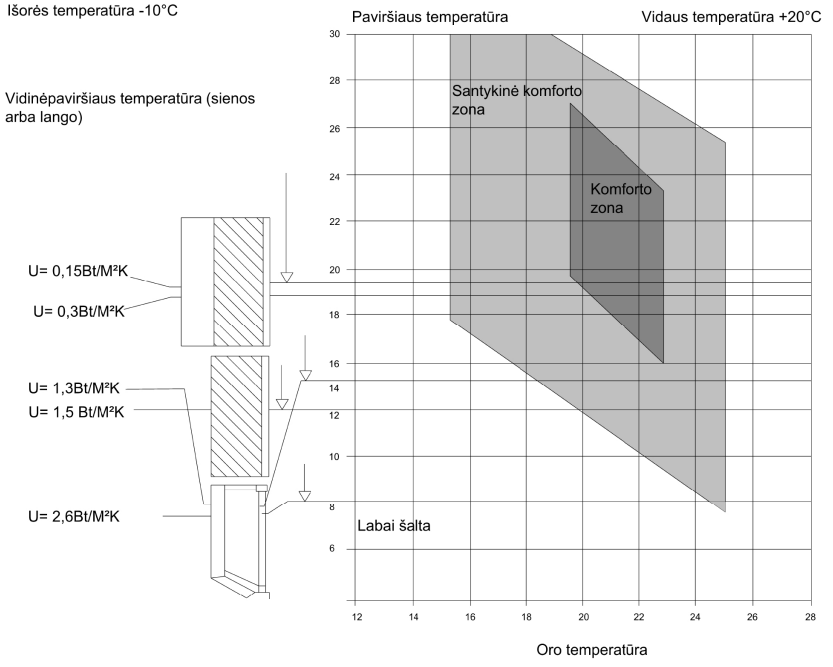
Pastatų sektorius yra daugiausia energijos reikalaujantis sektorius – jame galutinės energijos suvartojama daugiau nei trečdalis viso pasaulinio kiekio, jis yra vienodai svarbus CO_2 (anglies dioksido) emisijos šaltinis (IEA 2013). Energijos vartojimo pastatuose tendencijos yra tiesiogiai susijusios su energijos tiekimo infrastruktūros renovacija ir nauja statyba, senų pastatų modernizavimu, šildymo, vėdinimo ir vėsinimo įrangos priežiūra, jos pakeitimu ir atnaujinimu. Tačiau iki šiol didžiausias energijos kiekis suvartojamas ne statyboms, o pastatų eksploatacijai. Šiuo metu patalpoms šildyti ir vėsinti, kartu su vandeniui ruošti, manoma, suvartojama beveik 60 % pasaulio energijos kiekio. Todėl tai sudaro didžiausią galimybę sumažinti pastatų energijos vartojimą ir sumažinti išmetamo CO_2 kiekį.

Dėl prastų pastato atitvarų šiluminių savybių labai daug energijos suvartojama šildyti, o tai didina šildymo išlaidas. Pastato atitvarų šiluminės charakteristikos lemia energijos kiekį, reikalingą pastatui šildyti ir vėsinti, taigi pastato šiluminės charakteristikos turi būti tokios, kad šildymo ir aušinimo našta būtų optimizuota iki minimumo.

Tarptautinė energetikos agentūra (IEA 2013) apskaičiavo, kad aukštos kokybės pastato atitvaros šalto klimato zonoje reikalauja tik nuo 20 % iki 30 % energijos, reikalingos dabartiniam vidutiniam pastatui šildyti. Pagal mažo kiekio anglies dioksido scenarijų daugiau nei 40 % šildymo ir aušinimo energijos poreikio tikimasi sutaupyti, tiesiogiai gerinant pastato atitvarų šilumines charakteristikas.

Naujausi tyrimai (Mahdavi, Tahmasebi 2015; Martinaitis *et al.* 2015) atskleidė, kad okupantiškas elgesys labai paveikia pastato energijos vartojimą ir, prognozuojant pastatų suvartojamos energijos mastą, į tai reikia atsižvelgti net rengiant projektą.

Pagrindinis tikslas modernizuojant pastatus – užtikrinti mikroklimatą ir komforto sąlygas (1.1 pav.) (Dzeng *et al.* 2015; Hernandez *et al.* 2015; Friege, Chappin 2014; Mjoernell *et al.* 2015). Kad mikroklimatas patalpose būtų patrauklus, būtina sąlyga – užtikrinti tam tikrą komforto temperatūrą, oro judėjimo reikšmės. Oro greičio judėjimą užtikrina vėdinimo sistema. Vėdinimas taip pat panaikina nemalonius kvapus ir mažina susikaupusią drėgmę. Labai svarbu panaikinti įvairių konstrukcijų paviršių temperatūros svyravimus. Dideli temperatūrų skirtumai sudaro mažus skersvėjus, o kartu sukelia peršalimo ligas.



1.1 pav. Komforto sąlygų užtikrinimas (Humm 1998)
Fig. 1.1. Comfort level ensurance (Humm 1998)

Standartiniai patalpos mikroklimato rodikliai, užtikrinantys komfortišką žmogaus savijautą, pateikti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Komfortišką žmogaus savijautą teikiantys aplinkos parametrai
Table 1.1. Environmental parameters for human comfort wellness

Pastato tipas		Patalpos oro temperatūra t_i, °C	Suminė temperatūra t_S, °C	Santykinis drėgnumas φ, %	Oro judėjimo greitis, m/s
Gyvenamieji ir visuomeniniai		20–22	38	40–60	<0,1
Gamybiniai (priklausomai nuo atliekamo darbo tipo)	Sėdimas	18–20	36	50–60	<0,15
	Lengvas	16–18	32–36	50–60	<0,15
	Vidutinis	14–16	26–32	50	<0,2
	Sunkus	12–14	20–26	45	<0,2

Suminė patalpų temperatūra t_S yra oro temperatūros patalpoje t_i ir vidinių supančių paviršių patalpoje vidutinės temperatūros t_p suma:

$$t_p = \frac{t_{p1}S_1 + t_{p2}S_2 + ... + t_{pn}S_n}{S_1 + S_2 + ... _ S_n}. \quad (1.1)$$

čia t_{p1}, $t_{p\,p2}$, ..., t_{pn} – atskirų vidinių statybinių konstrukcijų paviršių temperatūra; S_1, S_2, …, S_n – šių konstrukcijų plotai; n – atskirų tipų statybinių konstrukcijų kiekis.

$$t_s = t_i + t_p. \quad (1.2)$$

Analizuojant 1.1 lentelę galima teigti, kad komforto sąlygos yra užtikrintos, kai oro temperatūra yra 20–22 °C, o oro drėgnumas – nuo 40 iki 60 %. 1.1 paveiksle matoma, kad kai sienų temperatūra didesnė kaip 18 °C mikroklimato komfortinės sąlygos galima pasiekti su gerokai mažesne patalpos oro temperatūra. Pastatams apšiltinti būtina taikyti veiksmingus statybos ir energijos taupymo technologinius būdus. 1.1 lentelėje pateiktos sąlygos yra būtinos, bet nepakankamos komfortiškam mikroklimatui. Svarbūs ne tik šie parametrai, bet ir kambario temperatūros ir sienų vidinių paviršių temperatūros skirtumas. Taip pat nereikėtų pamiršti ir angokraščių, kurie dažnai išlieka šalti. Šios vertės, priklausomai nuo konstrukcijos ir naudojimo tipo, pateiktos 1.2 lentelėje.

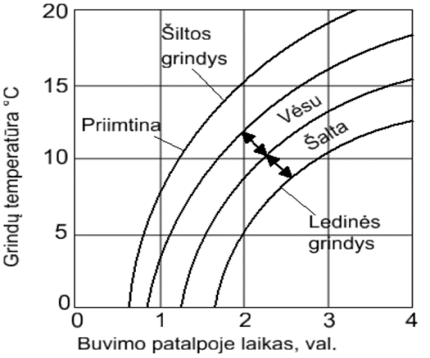
1.2 lentelė. Leidžiamieji temperatūros skirtumai tarp patalpų oro ir statybinių konstrukcijų paviršių
Table 1.2. Permissible temperature differences between indoor air and construction surfaces

Pastato tipas		Konstrukcija					
		išoriniai			vidiniai		
		vertikalūs	horizontalūs		vertikalūs	horizontalūs	
Gyvenamieji ir visuomeniniai		4	2,2	3	4	4	3
Gamybiniai (priklausomai nuo atliekamo darbo tipo)	Sėdimas	6	4	3	6	6	3
	Lengvas	6	5	3	6	6	3

Taigi vasarą ir žiemą žmogus gerai jaučiasi patalpoje, kurioje oro temperatūra yra nuo 20 iki 22 °C, santykinė drėgmė – nuo 40 iki 60 %, o sienų ir lubų temperatūra žiemą ne žemesnė kaip 4–6 °C, o vasarą – ne aukštesnė kaip 4–6 °C negu kambario temperatūra.

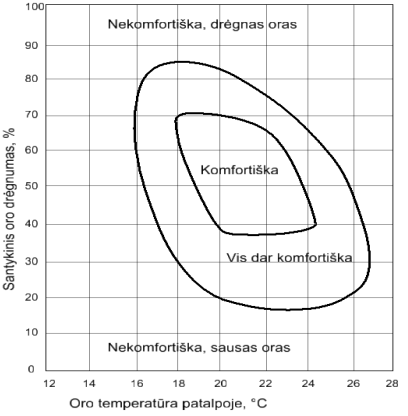
Grindų temperatūrai galioja kitos reikšmės – taip yra dėl tiesioginio žmogaus organizmą kontakto per pėdos padą. Grindų temperatūra turi būti ne žemesnė kaip 15–20 °C, o optimali ir maloni grindų temperatūra yra nuo 22 iki 24 °C. 1.2 paveiksle pateikta, kaip grindų paviršiaus temperatūra daro įtaką žmogaus organizmui. Grindų temperatūra 15 °C yra vis dar priimtina, jei asmuo yra kambaryje ne daugiau kai tris valandas, vėliau grindys pradeda atrodyti vėsios, o po 3,8 val. – jau šaltos.

Kita vertus, jei grindys yra šildomos, jų temperatūra turi neviršyti 30 °C.



1.2 pav. Komforto ir grindų temperatūros grafikas priklausomai nuo žmogaus buvimo patalpoje trukmės
Fig. 1.2. Timetable of comfort level and floor temperature depending on human presence time in the room

Santykinė oro drėgmė patalpoje. Santykinės oro drėgmės įtaka žmogui pateikta 1.3 paveiksle. Iš jo matome, kad asmuo jaučiasi nemaloniai, kai oro temperatūra nukrenta žemiau 16 °C arba pakyla aukščiau 26 °C, nepriklausomai nuo santykinio oro drėgnio.



1.3 pav. Santykinė oro drėgmė ir komforto sąlygos
Fig. 1.3. Relative air humidity and comfort conditions

Oro cirkuliacija patalpose. Oro judėjimas patalpose gali atsirasti per angas, įtrūkius ir spragas pastato konstrukcijose (stogas, plyšiai languose, nesandarios durys) ir dėl konvekcijos pastato viduje (Irshad *et al.* 2015). Jei vidaus sienos paviršius yra žemos temperatūros, dėl didelio skirtumo tarp kambario oro temperatūros ir sienų paviršiaus temperatūros šalia sienų vyksta konvekcija, kuri žmogaus jaučiama kaip skersvėjis.

Pastato (jo dalies) energinis naudingumas. Pastato (jo dalies) energinio naudingumo klasė nustatoma pagal mėnesinį skaičiavimo metodą, įvertinant pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklio C_1 vertę ir pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklio C_2 vertę. C_1 vertę apibūdina pirminės neatsinaujinančiosios energijos vartojimo šildymui, vėdinimui, vėsinimui ir apšvietimui efektyvumas. C_2 vertę apibūdina pirminės neatsinaujinančios energijos vartojimo karštam buitiniam vandeniui ruošti efektyvumas (Suo *et al.* 2015). Pastato energinio naudingumo nustatymą reglamentuoja statybos techninis reglamentas (STR 2.01.09:2012 Pastatų energinis naudingumas).

Pastatai klasifikuojami į 9 klases: A++, A+, A, B, C, D, E, F, G. A++ klasė laikoma aukščiausia, ji nurodo beveik nulinės energijos pastatą. Buvo numatoma, kad nuo 2014 m. sausio 1 d. bus projektuojami pastatai, kurių žemiausia klasė yra B, nuo 2016 m. lapkričio 1 d. – žemiausia klasė A. Nuo 2021 m. sausio 1 d. numatoma pereiti prie A++ klasės pastatų projektavimo.

Energijos taupymas ir patalpų mikroklimato užtikrinimas tapo viena iš aktualiausių problemų (Wang *et al.* 2011). Senos statybos pastatų mikroklimatas neatitinka Lietuvos higienos normų, t. y. neatitinka šiluminio komforto parametrų. Todėl pastatus būtina modernizuoti.

Pagrindiniai modernizavimo tikslai – tai pakankamos termoizoliacijos įrengimas ir vėdinimo užtikrinimas, o tai leis išsaugoti energiją ir padidinti komfortą (Ham, Golparvar-Fard 2015; Kim *et al.* 2009; San-Jose Lombera, Cuadrado Rojo 2010; Wong, Fan 2012).

Nors mokslo bendruomenė aptarė ekologinės modernizacijos koncepciją (Bayulken, Huisingh 2015), besivystančios šalys su sparčiai augančia ekonomika dėl didelio ekonominio spaudimo priverstos vykdyti trumparegišką miestų plėtros politiką. Kaip įprasta, senuose daugiabučiuose namuose gyvenančių gyventojų pajamos yra beveik lygios išlaidoms už šildymą, o kai kuriais atvejais mokama už šildymą suma viršija nuomos kainą. Tada socialiai remtiniems gyventojams, turintiems mažas pajamas, valstybė privalo padengti šildymo išlaidas. Tokioje situacijoje vyriausybės labiau linkusios nuolaidžiauti ekologiniams padariniams ir linkusios suteikti mažesnę reikšmę energetikos, socialiniams ir ekonominiams modernizavimo aspektams (Stankevičius *et al.* 2014.). Todėl tyrimai, skirti modernizavimo ekonominiams aspektams, vis dar aktualūs. Turėdami omenyje finansinius suvaržymus, Bucoń ir Sobotka (2015) parengė sprendimų priėmimo modelį, pasirenkant remonto sprendimus, ekonomiškai naudingiausią variantą, remtis sprendimų priėmimu atliekant daugiakriterį pastato įvertinimą ir optimalaus remonto sprendinio pasirinkimu. Atsižvelgę į regioninę specifiką, autoriai iškėlė tikslą – rasti tinkamiausią sprendimų modelį, įvertinant energijos taupymo, ekonominius aspektus ir modernizavimo alternatyvas. Straipsnyje pateikiamas modernizavimo priemonių sprendimų modelis, įvertinant atrankos alternatyvų derinius, ir konkretaus atvejo tyrimas, atspindintis pasiūlyto modelio taikymą.

1.2. Administracinių pastatų atnaujinimo galimybės

Svarbiausias XXI a. iššūkis – gamtiškai, ekonomiškai ir visuomeniškai palaikyti kaimus, miestelius ir didmiesčius. (Jarrar, Al-Zoabi 2008). Pastatai turi tiesioginį poveikį gamtai, pradedant medžiagomis ir ištekliais iš gamtos, naudojamais statyboms bei renovacijoms, ir baigiant natūralių išteklių suvartojimu bei atliekų žala gamtai (Balaras *et al.* 2005). Kuriant pastatų projektus, turėtų būti apsvarstyta ilgalaikė gamtinė bei ekonominė nauda (Wang *et al.* 2011).

Ekonominis, socialinis ir gamtinis balansas skatinamas praktikuojant statybas ir įgyvendinant statybų projektus. Ši praktika siejama su įvairiais metodais įgyvendinant statybų projektus, kurie sukelia mažiau žalos gamtai. Pastato energijos eksploatacinės savybės – tai apytikriai apskaičiuotas energijos

kiekis, išreikštas pastato energijos galios klase, reikalinga naudojant pastatą pagal jo paskirtį (STR 2.01.09: 2012).

Pasyvus namas – tai pastatas, kuriame šilumos komfortas (LST EN ISO 7730:2006) gali būti pasiekiamas šildant arba šaldant šviežio oro masę, kuri reikalinga pakankamos vidinės oro kokybės sąlygoms pasiekti be papildomos oro cirkuliacijos (Bayir *et al.* 2013). Energijos efektyvumas pritraukia visuomenės dėmesį, nes išlaidos už šildymą sudaro nemažą gyventojų mokesčių dalį. Šios išlaidos gali būti mažinamos keliais būdais: sumažinant energijos kainas, statant naujus pastatus ir renovuojant senus, kurie suvartotų mažiau energijos, taip sumažinant suvartojamos energijos kiekį (Volvačiovas *et al.* 2013).

Pagal STR 1.01.09:2003 apibrėžimą administracinės paskirties pastatai – pastatai (ar jų grupės) (bankai, paštas, valstybės ir savivaldybės įstaigos, ambasados, teismai, biurai, kontoros, kiti įstaigų ir organizacijų administraciniai pastatai), skirti administravimo veiklai, kuria užtikrinamas valstybės, vietos savivaldos ar įmonės konkrečios institucijos, įstaigos, tarnybos ar organizacijos savarankiškas funkcionavimas (struktūros tvarkymas, personalo valdymas, turimų materialinių ir finansinių išteklių valdymas bei naudojimas, projektų rengimas, raštvedybos tvarkymas ir pan.), kad jos galėtų tinkamai vykdyti joms priskirtus administravimo ar kitos veiklos uždavinius. Gamybiniame, prekybos ar kitos paskirties pastate gali būti įrengtos administracinės ar kitos paskirties patalpos, nekeičiant pastato pagrindinės paskirties.

Daugumos administracinių pastatų vidaus klimato sąlygos neatitinka Lietuvos higienos standartų, t. y. jie neatitinka šilumos komforto parametrų, todėl turėtų būti renovuojami pagal Lietuvos higienos standartus (HN 42:2009).

Tam tikromis sąlygomis efektyvus energijos poreikis gali būti pasiektas pritaikant pastato projekto pokyčius. Technologijų pažanga, naujai išrastos medžiagos bei statybos technikos industrija leidžia panaudoti naujus sprendimus kiekviename pastato elemente (San-José Lombera, Cuadrado Rojo 2014).

BIM technologija (ateities statybų technologija, Harris 2013) padėtų išspręsti didelių išlaidų problemą, laiko, statybų proceso sąlygas, ilgaamžiškumo ir modelio projekto atkūrimą rekonstruojant visuomeninius pastatus, pasirenkant alternatyvias statybų baigtis. Tai nauja industrijos sąlyga, siejama su 3D vizualizacijos parametrų technologija ir industrijos procesais (Taylor, Bernstein 2009; Popov *et al.* 2010). BIM yra viena iš naujausių ir daugiausia žadančių programų industrijoje (Azhar 2011). BIM programą numato ilgaamžiškumo fazės, integruoti programos valdymo įrankiai ir standartizuotas informacijos valdymas taip, kad sprendiniai yra aiškūs ir pastovūs (Талапов 2015).

Tai yra papildomas modelis projektų inžinerijos informacijos duomenų bazėje, kurioje laikomi architektūros projekto geometrijos informacija ir atitinkama visų darbų techninė informacija (Ding *et al.* 2012).

Galimybė perkelti pastatų duomenis iš BIM sumažina laiką ir neužtikrintumą pastato energijos modeliavimo procese. BIM technologija reikalauja kur kas mažiau darbo išteklių nei tradiciškai kuriant pastato projektą. Darbo jėgai reikia prasilaužimo skyrių, aukštų, specifinių dalių (šildymo, ventiliacijos ir elektros) paruošimui (Wong, Fan 2012).

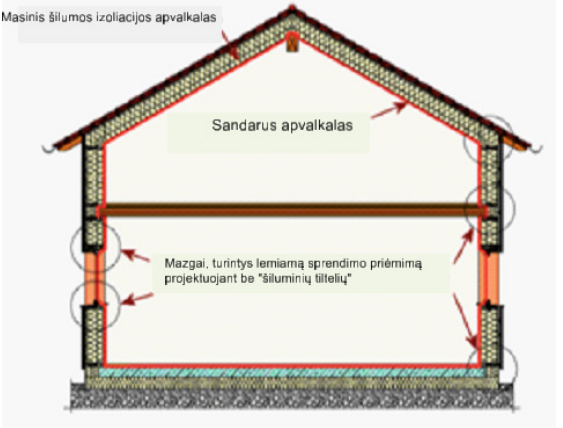
4D technologijos naudojimas leidžia statybų planuotojui pagaminti tikslesnius brėžinius (Heesom, Mahdjoubi 2004; Migilinskas *et al.* 2013).

1.2.1. Komforto sąlygų ir termoizoliacijos sąsajos analizė

Esamų pastatų, pastatytų iki energiją taupančių ir pasyvių namų atsiradimo, daugiau nei 70 % visų šilumos nuostolių sudaro šilumos nuostoliai per išorines sienas ir stogus. Todėl šilumos izoliacijos gerinimas yra svarbiausia priemonė energijai taupyti. Tai suteikia gerokai didesnį komfortą ir geresnę apsaugą nuo atmosferos poveikio (Van Treeck 2009).

Pasyvus namas tiesiog negalėtų funkcionuoti, jeigu šilumos nuostoliai per išorės sienas nebūtų sumažintos iki minimumo (Syed, Abdou 2016; Humphries 2016). Tik tokiomis sąlygomis, net šalčiausiomis dienomis šildymo apkrovos būtų sumažintos taip, kad taptų įmanoma namus šildyti tik pritekančiu šviežiu oru (arba su mažais šildytuvais). Norint tai pasiekti praktiškai, reikia pastate subalansuoti energijos vartojimą (Zhang 2010).

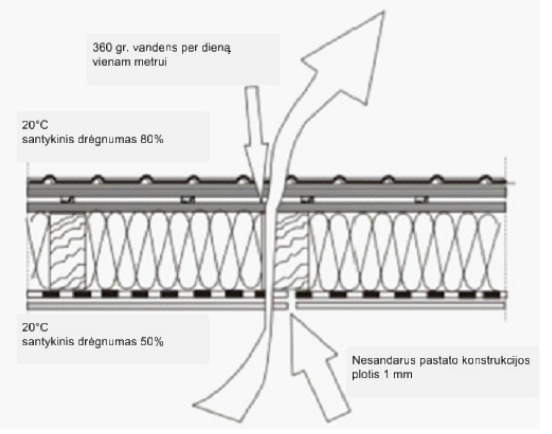
Energetiškai efektyvaus pastato izoliacijos principinė schema pateikia 1.4 paveiksle. Pagrindinis energiją taupančių pastatų principas tas, kad šilumos izoliacijos apvalkalas, išdėstytas aplink visą pastatą, turi būti be pertrūkių. Tai sumažina šilumos nuostolius tuo pačiu būdu kaip, pavyzdžiui, šiltas paltas, kurį žmogus dėvi šaltą žiemą.



1.4 pav. Energetiškai efektyvaus pastato izoliacijos schema
Fig. 1.4. Diagram of the energy-efficient building insulation

Kadangi dauguma termoizoliacinių medžiagų yra nehermetiškos, tai, be šiluminės izoliacijos, turi būti įrengtas ir sandarus viso pastato apvalkas aplink visą pastato vidinį paviršių.

Išorinis pastato sluoksnis taip pat turi būti kaip įmanoma sandaresnis. Tai taikoma ne tik pasyviems pastatams. Tik išorinio gaubto sandarumas gali užtikrinti statybinių konstrukcijų apsaugą. Svarbu, kad iš vidaus į išorę su vandens garais neištekėtų šilto oro srautas (1.5 pav.). Nesandarūs, nehermetiški pastatai yra šiandienos problema. Reikalavimas pastatų sandarumui yra labai svarbus, reikia laikytis atitinkamų statybos darbų technologijos. Pasyviems pastatams šie reikalavimai turi būti taikomi dar griežčiau. Oro pralaidumas (nehermetiškumas), neturėtų būti painiojamas su šilumine izoliacija. Abu šie rodikliai yra svarbūs pastato apvalkalui ir turi atitikti keliamus reikalavimus nepriklausomai vienas nuo kito.

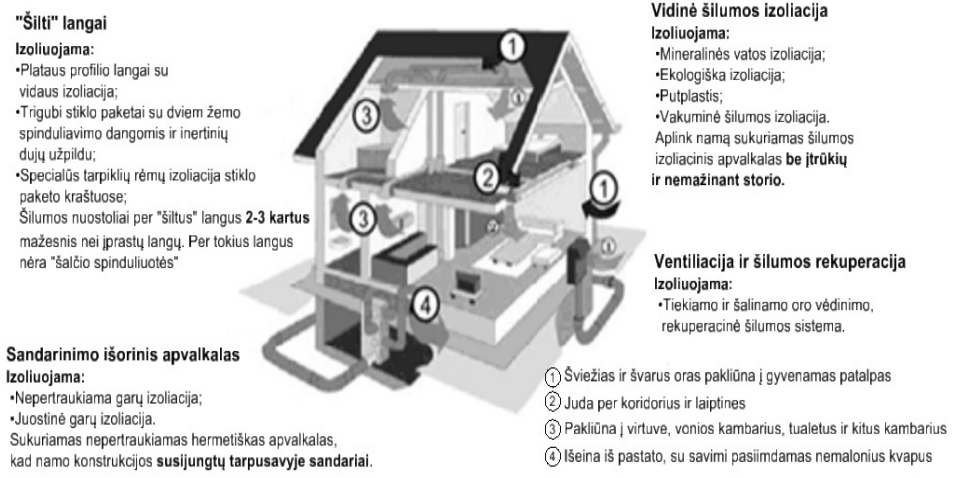


1.5 pav. Probleminis atvejis: šilto oro srauto su vandens garais ištekėjimas iš pastato vidaus į išorę per nehermetišką konstrukciją
Fig. 1.5. Problem case: the inside hot air flow with water vapor leaking out through the non air-tight

1.2.2. Energiją taupančios statybinės sistemos (energetiškai efektyvūs namai)

Energiją taupantis namas – tai pastatas, kuris energijos vartoja minimaliai ir maksimaliai išnaudojant natūralų apšvietimą ir šildymą. Daug kas priklauso nuo to, kur namas yra pastatytas, kaip jis orientuotas pasaulio šalių atžvilgiu, įvertinant vietovės reljefą. Žinoma, didžiausi langai turi būti pietinėje namo pusėje tam, kad surinktų kuo daugiau šilumos. Kitas svarbus kriterijus – pastatas neturėtų praleisti šilumos per sienas, stogą ir langų angas, kas pasiekiama tinkamai naudojant izoliacines medžiagas.

Energiją taupantys namai turi naudoti alternatyvių energijos šaltinių sistemas (Syed, Abdou 2016), kurios tiektų elektros energiją, šilumą į namus ir būtų prijungtos prie išmanaus namo sistemos, kas leistų kontroliuoti energijos vartojimą, siekiant ją sumažinti (1.6 pav.).



1.6 pav. Pagrindiniai energetiškai efektyvaus namo elementai
Fig. 1.6. Key elements of the energy-efficient house

Inovacijų taikymas turi būti suderintas su gamta ir žmogumi, nekenkti aplinkai (Zhang 2010). Ekologinio namo sąvoka apima švarios ir atsinaujinančiosios energijos, vandens išsaugojimo ir statybinių medžiagų, gautų iš perdirbtų žaliavų ar lengvai perdirbamos žaliavų, naudojimą. Tikslas – ne tik gerinti aplinkos kokybę, bet ir sumažina gamtai daromą žalą.

Energiją taupančių namų vystymo kryptys. Taupymas nuo pamatų iki lemputės – tai brangios energijos taupymas (Syed, Abdou 2016). Kaip suprojektuoti namus, kurie būtų ekonomiški, ekologiški ir efektyvūs? Toliau pateikiami dalykai turi būti numatyti projekte (Mishra, Ramgopal 2013):

- ekologiškai švarios ir modernios statybinės medžiagos;
- ergonomiškos sienų ir stogo konstrukcijos;
- kompleksinė namų šiltinimo izoliacija;
- specialūs langų konstrukcijų elementai;
- ekonomiškos šildymo ir elektros vartojimo sistema;
- įranga, naudojanti energiją iš atsinaujinančių šaltinių;
- ventiliacijos sistema su šilumos rekuperacija;
- visų inžinerinių sistemų autonominio darbo užtikrinimo galimybė.

Energiją taupančio namo statybos kaina yra tik 10–20 % didesnė nei įprastinių namų.

Eksploatacijos metu visa inžinerinė sistema ne tik visiškai atsiperka, bet ir pradeda atnešti apčiuopiamą naudą netolimoje ateityje. Pinigai, investuoti į energiją taupančius namus, – tai pinigai, investuoti į saugumą ir komfortą, kuris per 4–5 metus grįžta atgal dėl mažesnių sąnaudų. Komfortiškas ir patogus būstas nepraras vertės daugiau nei 30 metų.

Pasyvus namas. Pasyvus namas, energiją taupantis namas, ekologinis namas (vok. *passivhaus*, angl. *passive house*) – tai pastatas, kuriam nereikalinga šildymo sistema ar reikalingas labai mažas elektros energijos kiekis – vidutiniškai apie 10 % energijos, kurią sunaudoja nemodernūs pastatai. Kaip parodyta, tokių projektų sąnaudų padidėjimas iki 8–15 % yra tikrai ne toks didelis, palyginti su įprastiniais pastatais. Atsipirkimo laikotarpis priklauso nuo klimatinių sąlygų ir energijos šaltinio naudojimo ir tam tikroje srityje varijuoja nuo 8 iki 50 metų.

Pasyvaus namo koncepcija yra išsamus požiūris į ekonominę, ekologišką ir energiją taupančią pastatų statybą įvairiems tikslams (nuo privačių namų iki viešųjų pastatų) (Kinnane 2016).

Energiją taupančių pastatų tipai:

- mažai energijos suvartojantis namas (nuo 2002 m. Europoje neleidžiama statyti namų blogesnio standarto) – ne daugiau kaip 60 kWh/m^2 per metus;
- pasyvus namas – ne daugiau kaip 15 kWh/m^2 per metus;
- nulinės energijos namas – tai pastatas, turintis tą patį standartą, kaip ir pasyvus namas, bet inžinerinė įranga suvartoja tik tiek energijos, kiek pagamina pati – 0 kWh/m^2 per metus;
- pliusinės energijos namas – pastatas, kuris dėl įdiegtos, energiją taupančios įrangos (saulės baterijų, kolektorių, šilumos siurblių, šilumokaičių, žemės šilumokaičių ir t. t.) duoda daugiau energijos nei sunaudoja pats.

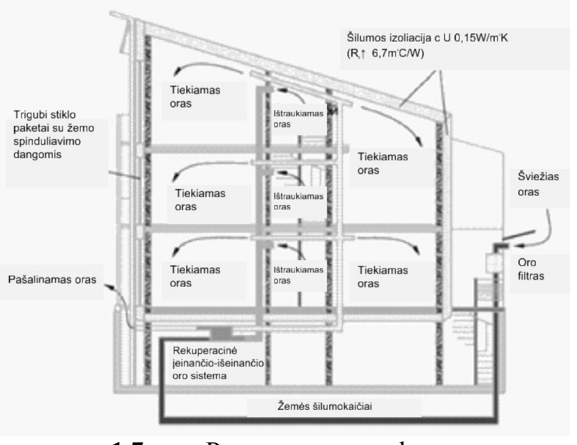
Energine pasyvaus namo koncepcija siekiama sumažinti suvartojamos energijos kiekį naujuose pastatuose 8–10 kartų.

Pasyvaus namo statyba numato būtinų priemonių įgyvendinimą. Pagrindinis pasyvaus namo kriterijus – sandarus namo kevalas iš šilumos izoliacijos ir šilumos laidumas <0,15 W/(m^2·K). Taip pat jis turi atitikti toliau nurodytus reikalavimus:

- pasyvaus namo konstrukcija yra iš aplinkai nekenksmingų medžiagų, dažnai tradicinių, tokių kaip medis, akmuo, plytos. Dažnai naudojamos betono, stiklo ir metalo atliekos;
- šalčio tiltų prevencija yra svarbiausia, t. y. vietų, kur per prastai izoliuotas sienas, stogą, senus langus, susidaro šilumos nuotėkis;

- kompaktiška konstrukcija;
- pasyvus saulės energijos naudojimas, pastato orientacija į pietus ir nepatekimas į šešėlinę zona;
- labai efektyvūs elektros naudojimo prietaisai;
- vandens šildymas naudojant saulės kolektorius arba šilumos siurblius.

Vienas iš svarbiausių pasyvaus namo elementų (1.7 pav.) yra šviežio oro tiekimas į patalpas (Kinnane 2016; Turner, Walker 2013). Pastatą šildyti, siekiant pašildyti šviežią orą, įmanoma, tik jei pastatas yra su didele šilumos izoliacija, o tai ir yra pasyvus namas. Čia šilumos turi būti sunaudojama mažiau nei 10 W/m^2, tai leidžia naudoti šviežią orą šildymui.



1.7 pav. Pasyvaus namo schema
Fig. 1.7. Scheme of the passive house

Pasyvaus namo technologijos privalumai:

- ekonomiškumas – nereikia išleisti pinigų centrinio šildymo tinklams ir dujoms, o pasyvių namų elektros sąnaudos ir šildymo išlaidos yra 7–12 kartų mažesnės nei tradicinės statybos namų iš plytų;
- energetinis saugumas – pasyviuose namuose nėra dujų ir centralizuoto šildymo tinklų. Reikia tik vandens ir 10 kW galios vienam namui ar butui;
- energinė nepriklausomybė – pasyvūs namai turi didžiules laikančiąsias sienas, grindų plokštes pirmame aukšte ir tarpaukštines perdangas, o tai gerai kaupia šilumą ir decentralizuoja energijos tiekimą;
- ekologiškumas – pastatai, pastatyti naudojant šią technologiją, yra iš modernių statybinių medžiagų ir modernios statybos, taip pat naudoja naujausią techninę įrangą. Pasyviuose namuose cirkuliuoja švarus, šiltas ir grynas oras, sienos ir grindys liks nuolat šiltos.

Pasyvaus namo technologijos sparčiai plinta dėl šildymo sąnaudų sumažinimo 7–10 kartų. Jau yra pastatyta antrosios kartos pasyvių namų, labai mažai suvartojančių energijos.

Aktyvus namas. Aktyvus namas (angl. *active house*) – tai sudėtingas sprendimas, kuris nustato tikslą sukurti maksimalų komfortą ir gyvenimo kokybę, veiksmingai naudojant gamtos energijos išteklius ir pažangiausias technologijas (Hugon *et al.* 2016).

Aktyvus namas Danijoje (*Home for Life*), sukurtas AART, pozicionuojamas kaip pirmasis aktyvus namas pasaulyje. Jis pagamina daugiau energijos nei reikia. Jis akumuliuoja ir kaupia energiją savarankiškai, reguliuoja šviesas ir šilumą, einančią pro langus ir pastato fasadą, keičia energijos vartojimą, atsižvelgiant į poreikius.

Ekonamai. Šiuo metu yra parengtas ekonamo projektas, kuris yra erdvinių formų apvalkalas, kontūrai išlenkti ir sustiprinti putų betonu, standžiai sujungtas su pagrindinės plokštėmis (Gupta, Kapsali 2016).

1.2.3. Energiją taupančios inžinerinės sistemos

Inovatyvios energiją taupančių šildymo sistemų technologijos. Naudojant inovatyvias technologijas galima pasiekti reikšmingą energijos vartojimo efektyvumą (Syed, Abdou 2016).

Išmanus namas. Išmanaus namo samprata buvo suformuluota išmanaus pastato institute Vašingtone: „Pastatas, užtikrinantis produktyvų ir efektyvų darbo vietos naudojimą ...“. Pagrindinis protingo pastato bruožas – sujungti atskirus posistemius iš skirtingų gamintojų į vieną valdomą kompleksą, kuriuo daugiausia siekiama taupyti išteklius.

Išmanių pastatų technologija apima kompleksinį inžinerinių sistemų, integruotų į vieną informacinę erdvę, kūrimą (1.8 pav.). Tokios sistemos paprastai sujungia apsaugos ir priešgaisrinę signalizaciją, relinius valdymo modulius, funkcinius ir sistemos valdiklius, ekranus, nepertraukiamo maitinimo šaltinius, elektroninius skaitytuvus ir sąsajas, sukurtas sistemai valdyti, kompiuterius, vietinius tinklus ir bevielio duomenų perdavimo tinklus (Mirpadiab, Bagheri 2016).

Bendra techninė ir programinė įranga, dispečerizacija ir inžinerinės įrangos kontrolė, įranga, tiekiama to paties gamintojo, sumažina montavimo konfigūravimo kaštus per visą veiklos laikotarpį. Taip pat užtikrina instaliuotų įrenginių ir programinės įrangos techninę paramą.

Šilumos siurblio naudojimas. Toliau apibūdinami pagrindiniai patalpų šildymo šilumos siurbliu principai, naudojant dirvožemio šilumą. Patalpų temperatūra išlaikoma balansuojant tarp šilumos, sukauptos grunte, ir šilumos nuostolių į aplinką.

Šilumos siurbliai yra labai ekonomiškas šilumos energijos taupymo prietaisas, leidžiantis sumažinti pirminių išteklių kuro poreikį iki 4 kartų.

Biokuras deginimui. Visame civilizuotame pasaulyje užmiesčiui šildyti vis dažniau naudojami tokie atsinaujinantys energijos šaltiniai, kaip medienos ir kitų augalų medžiagų briketai ar granulės.

Spindulinio šildymo sistema. Plėveliniai elektros šildytuvai naudojami kaip piko energijos šaltiniai šalia katilo arba šilumos siurblio. Šildytuvai montuojami ant lubų dangos, jie užima apie 70–80 % paviršiaus ploto.

Spindulinės lubų plokštės. Infraraudonosios lubų plokštės konvertuoja energiją į šilumos spinduliuotę, kuri perkeliama į ribotą erdvę. Tai leidžia tiksliau sufokusuoti šiluminę energiją. Šios plokštės ypač gerai tinka tais atvejais, kai būtina šildyti tam tikrą erdvę.

Novatoriškas namo šildymas folija ALSON (Suomija). Plėvelinis infraraudonųjų spindulių šildytuvas ALSON naudojamas kaip pagrindinė lubų šildymo ir papildoma grindų šildymo patalpose sistema.



1.8 pav. Intelektualaus namo schema
Fig. 1.8. Scheme of the intellectual house

1.3. Pastato informacinio modeliavimo technologijų nauda projektavimo įmonėse

Yan ir Damian (2008) atliko tyrimą, norėdami įvertinti pastato informacinio modelio įdiegimo privalumus ir barjerus. Siekta įvertinti BIM panaudojimo santykį AEC (architektūros, inžinerijos, statybos) kompanijose Jungtinėje Karalystėje, Jungtinėse Amerikos Valstijose ir kitose šalyse. Buvo apklaustos kompanijos, kuriose nenaudojamas BIM. Kompanijoms pateiktas klausimynas apie BIM diegimo barjerus. Klausimynai buvo išsiųsti AEC pramonės praktikams ir akademinei visuomenei.

Žinoma, kad JAV lyderiauja pagal BIM naudojimą. Jungtinėje Karalystėje BIM technologijų galimybių vertinimo tyrimai vis dar vyksta ir nedaug kompanijų yra įsidiegusios BIM. Tačiau vietos valdžia pareiškė, kad nuo 2016 m. visi viešojo sektoriaus statybos projektų pirkimai turės būti atlikti naudojant 2-ą BIM kompetentingumo lygį (Tulenheimo 2015).

Yan ir Damian (2008) atliktoje apklausoje iš 67-ių respondentų 21 buvo iš Jungtinės Karalystės, 23 – iš JAV ir 23 – iš kitų šalių. 25 % respondentų iš JAV ir JK pažymėjo, kad didžiausias BIM privalumas – trumpesnis projektavimo laikas.

25 % apklaustų respondentų Jungtinėje Karalystėje mano, kad sumažėja išlaidų ir žmogiškųjų išteklių. Daugiau nei 10 % abiejų šalių apklaustųjų mano, kad BIM technologijų privalumai yra kūrybiškumas, tvarumas, padidėjusi kokybė. Pagal tyrimo rezultatus apie 40 % JAV respondentų ir 20 % JK respondentų mano, kad jų įmonės turės išnaudoti daug laiko ir žmogiškųjų išteklių mokymų procesui. Pabrėžiama, kad sprendimai organizacijose priimami remiantis verslo perspektyvomis (gauti pelno). AEC pramonė nesiryžta investuoti į BIM, nes trūksta informacijos apie BIM diegimo finansinę naudą. Be to, reikia įvertinti ir architektų bei projektuotojų socialinius ir asmeninius darbo įpročius. Projektuotojai yra patenkinti savo darbų kokybe, todėl dažnai pokyčiai jiems nepriimtini. Tyrime minimos ir kitos kliūtys: nepakankamai naudojamos technologijos (programinės įrangos, įgūdžių); darbuotojai atsisako kelti kvalifikaciją; BIM nėra tinkamas visiems projektams; daug kainuoja personalo mokymai.

Pagal „McGraw Hill Construction“ atliktus tyrimus 2/3 BIM vartotojų įžvelgia teigiamą ROI (*Return of Investment*). Beveik pusė vartotojų (48 %) ROI rodiklis yra vidutinio lygio. Vartotojai, vertinantys ROI, išskiria 5–6 pagrindinius veiksnius, turinčius įtakos BIM programų naudojimui (McGraw-Hill-Construction, 2008):

1. Geresni projektų rezultatai (sumažėjo klientui pateikiamos informacijos poreikis (RFI, *Request for Information*).

2. Efektyvesnis bendradarbiavimas naudojant 3D vizualizacijas.

3. Personalo produktyvumo pagerėjimas.
4. Teigiamas poveikis laimint projektus.
5. BIM gyvavimo ciklo vertė.
6. Pradinė personalo mokymo kaina.

Remiantis „McGraw-Hill-Construction“ atliktais tyrimais (2010), 27 % potencialių BIM programų vartotojų Vakarų Europoje nėra susidomėję šiomis programomis. To priežastis – statybos ekonominiai skirtumai šalyse.

Vakarų Europos šalyse vykdomi daug mažesnės apimties projektai, dažnai atliekamas jau esamų projektų rekonstravimas / modernizavimas – todėl aplinka šiose šalyse mažiau palanki naudoti BIM.

Pagal atliktas apklausas (McGraw-Hill-Construction 2010) 70 % profesionalių vartotojų teigimu, BIM jie naudoja daugiau nei 60 % savo projektų. 46 % pradedančiųjų, BIM vartotojų nuomone, pastato informacinį modelį naudoja daugiau kaip 15 % savo vykdomų projektų. Įvertinus visus Vakarų Europos BIM vartotojus – 59 % naudoja BIM programas daugiau kaip 30 % projektų. Daroma išvada, kad BIM programų subtilybes perpratę vartotojai geriau integravo BIM į savo vidinius projektavimo procesus.

Suomijoje valdžios institucijos, vietinės savivaldos, pramonės atstovai pradeda suprasti BIM galimybes (Tulenheimo 2015). 2012 m. išleistame bendrųjų BIM reikalavimų vadove buvo pabrėžta didėjanti būtinybė sukurti bendras taisykles ir standartizuoti BIM.

Pirmieji įgaliojimai ir reikalavimai buvo skirti tik pastatams projektuoti, o 2015 m. išleisti bendrieji reikalavimai infrastruktūros projektams (Tulenheimo 2015). Su panašiu BIM naudojimo skatinimu vyriausybiniu lygiu susidurta daugelyje šalių visame pasaulyje.

BIM institutas Kanadoje pasiūlė, kad BIM projektavimas būtų privalomas viešajame sektoriuje Kanadoje. Porwal ir Hewage (2013) teigia, kad dominuojantis veiksnys, veikiantis BIM diegimą viešajame sektoriuje, yra atsakingų organizacijų nesugebėjimas standartizuoti ir patentuoti BIM veikimo. Norint, kad informacija būtų laisvai prieinama visiems statybos rinkos dalyviams, reikalingi standartai ir protokolai bendra kalba, programinės įrangos paketai, galintys sąveikauti tarpusavyje.

Remiantis Lietuvos statybos organizacijos „Skaitmeninė statyba“ gairėmis 2014–2020 metams (2014), išskiriama BIM nauda pagal statinio statybos procesus statinio gyvavimo cikle: geresnis naujų teritorijų planavimas bei projektavimas, mažiau klaidų ir racionalesni sprendimai. Projektavimo procesas kokybiškesnis ir racionalesnis, mažesnis objekto pakeitimų poreikis ateityje. BIM modelis vizualizuoja visų projektavimo dalių projektinius sprendinius, todėl užsakovas geriau suvokia rezultatus, eliminuojamos klaidos, atsirandančios sankirtoje tarp atskirų projekto dalių. Remiantis teorija (Hattab, Hamzeh 2015) skirtingi BIM naudojimo scenarijai rodo, kad BIM tinklas yra efektyvus

mažinant sukuriamų klaidų skaičių. Pasipriešinimo klaidoms mechanizmai: nuolatinis ir tiesioginis bendravimas (esamuoju laiku), avarijų aptikimas, automatizuotas standartų / kodų tikrinimas, projektavimo universalumas ir nuolatinis mokymasis – svari priežastis mažinant projektavimo metu atsirandančių defektų skaičių. Pasak autorių, reikalingi tolesni tyrimai patikrinti teorinius eksperimentus, atliktus užsienio autorių.

Nėra vieno plačiai priimto kompanijos investicijų grįžimo skaičiavimo metodo, įsidiegus BIM. Dauguma vartotojų šį grįžimą suvokia kaip laiko, pinigų ir pastangų BIM diegti grįžimą (McGraw-Hill-Construction 2014).

Skaičiuojamas ROI rodiklis yra ne konkretaus projekto investicijų grąža, bet apskaičiuotas BIM programų atsipirkimas. Pirmaisiais metais pradiniame BIM diegimo etape neigiama ROI ar lygi investicijoms pastebima mažesnėse organizacijose, kurios ilgiau užtrunka patirdamos pradines išlaidas dėl programinės įrangos kainos, mokymų ir verslo plėtojimo, naudojant BIM. Pagrindiniai projekto, kuriame naudojamas BIM projektavimas, dalyviai ir BIM projektavimo naudos gavėjai yra projektuotojai ir rangovai (Cao *et al.* 2015). Rangovai dažniausiai greičiau pasiekia teigiamą ROI negu projektuotojai, nes jie gauna didesnę finansinę naudą – sumažėja kartotinio darbo, padidėja pelnas. Didžiausią ROI pasiekia vartotojai, turintys ilgametę patirtį su BIM, tvirtų įgūdžių, aukštą BIM įsisavinimo lygmenį (McGraw-Hill-Construction 2014).

Remiantis Poirier *et al.* (2015), investicijos į naują įrangą ir technologijas gali pagerinti organizacijos darbo našumą, tačiau jos produktyvumo rodikliai iš tiesų gali sumažėti, jei naujos įrangos kaina yra didesnė nei santykinės santaupos, atsiradusios kaip darbo sąnaudų ir pelno rezultatai. BIM diegimas įmonėje sukuria iššūkį, kuris gali būti įgyvendintas tik tada, kai BIM technologijų atsiradimas įmonėje yra pelningas, o pelnas potencialiai gali nusverti jo diegimo išlaidas. Kitame etape bus atliekami BIM ROI skaičiavimai, kurie lyginami su „Autodesk Revit“ ROI skaičiavimais.

BIM projektavimo atsiperkamumo tyrimai

Remiantis naujausios literatūros apžvalga, yra keletas metodų, kurie analizuoja BIM investicines perspektyvas. Žinomiausi yra investicijų grąžos analizė (ROI), PENG modelis ir visiško ekonominio poveikio (*Total Ecnomic Impact*) modelis. Kai kurių projektų ROI analizė atliekama CIFE (*Center for Integrated Facility Engineering from Stanford University* – Integruotos pramonės inžinerijos centras Stenfordo universitete) (Giel *et al.* 2009). Taip pat pirmųjų metų ROI skaičiuojama „Autodesk Revit“ kompanijos. PENG modelis naudojamas Švedijos statybos pramonėje apskaičiuoti, kiek sutaupoma naudojant BIM. TEI modelis naudojamas CIFE įvertinti VDC (*Virtual Design and Construction*) naudojimo poveikį visai kompanijai ir apskaičiuoti sistemos atsipirkimo laiką.

Azhar (2011) moksliniai tyrimai parodė, kad BIM technologijų investicijų atsiperkamumas (ROI) gali būti daug didesnis nei tradicinių statybos projektų nenaudojant BIM, kurie vaizduoja galimą ekonominę naudą.

Užsienio autorių tyrimai parodo, kad analizuoti BIM atsiperkamumą galima įvairiais aspektais. CIFE atlieka ROI analizę (kompanijos „Holder Construction“): skaičiuoja ROI vientisai 10-iai projektų, kuriuose buvo panaudotos BIM technologijos, įvertina santaupas. Dažnai atliekamos lyginamosios dviejų variantų studijos: vertinami du panašūs projektai (viename buvo panaudotas BIM, antrame projektavimo darbai atlikti tradiciniu metodu).

„Autodesk Revit“ yra sukūręs modelį apskaičiuoti pirmųjų metų ROI, kuriame įvertinama programinės įrangos kaina, darbo sąnaudos, produktyvumo sumažėjimas, produktyvumo padidėjimas, apmokymų trukmė. CIFE naudoja visiško ekonominio poveikio modelį (TEI – *Total Economic Impact*) siekiant išsiaiškinti skaitmeninio projektavimo teikiamus privalumus. Šis metodas labiau paremtas BIM investicijų atsipirkimo laiko įvertinimu (Sen 2012).

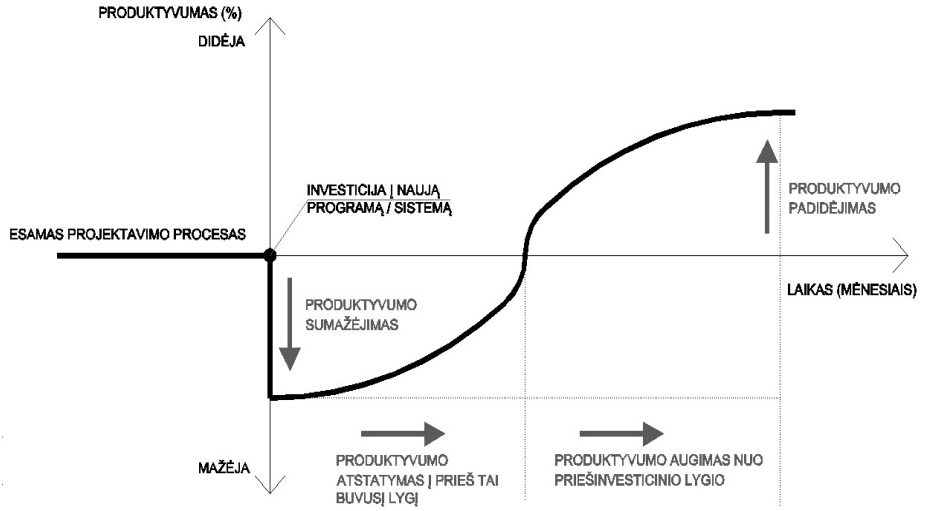
Įvertintas BIM investicijų atsiperkamumas Jungtinėje Karalystėje, Prancūzijoje ir Vokietijoje (McGraw-Hill-Construction 2010). 71 % Jungtinės Karalystės vartotojų gauna teigiamą investicijų atsipirkimą (37 % vartotojų investicijos grįžta 25 % ir daugiau). Neigiama ROI – 13 % vartotojų. Šis skaičius didžiausias iš vertintų trijų šalių.

Prancūzijoje teigiama ROI pastebima net 82 % vartotojų ir tik 5 % – neigiamas ROI rodiklis. Mažiausias teigiamas ROI rodiklis gaunamas – 67 % vartotojų Vokietijoje, 9 % – neigiamas ROI. 55 % nesinaudojančių BIM programomis išskiria, kad pirma to priežastis – nėra BIM poreikio iš kliento pusės. Be to, reikalingas laikas įvertinti tinkamą programinę įrangą, didelės investicijos. Mažos įmonės Vakarų Europoje neskuba diegti BIM, nes BIM mažiau efektyvus mažesniems projektams. Remiantis paskutinėmis AEC srities studijomis, BIM naudojimas atneša naujų iššūkių (Johansson *et al.* 2015). Labai dažnai modeliai tampa tokie dideli ir sudėtingi, kad viršija kompiuterio talpą, galimybes, todėl tampa problemiška stebėti modelius realiuoju laiku.

„Autodesk“ siūlomas ROI skaičiavimo metodas įvertina ne tik pačios sistemos kainą, bet ir produktyvumo pokyčius. Kai įsigyjama nauja sistema, pastebimas staigus produktyvumo sumažėjimas, nes vartotojai turi mokytis naudoti naują programą. Po apmokymų ir tam tikro įsisavinimo pastebimas laiko produktyvumo kreivės šuolis (1.9 pav.).

BIM ROI rodiklis negalėtų būti matuojamas nuo projektavimo iki statybos pabaigos ar nugriovimo. Dažnai BIM projektavimo iniciatoriai yra statybos bendrovės, kurios pačios nenori ar nesugeba kurti projektavimo padalinių, o BIM projektavimo svorį bando užkrauti projektuotojams. Projektuotojas žiūri į savo siūlomų paslaugų atsiperkamumą. Projektuotojo darbas prasideda užduoties

projektavimu ir komercinio pasiūlymo parengimu, o baigiasi su išimtu statybą leidžiančiu dokumentu ir projekto perdavimo–priėmimo aktu.



1.9 pav. Projektavimo paslaugų produktyvumas įdiegus BIM sistemą (remiantis Return on Investment with Autodesk Revit 2004)
Fig. 1.9. Design productivity during BIM system implementation Source: Return on Investment with Autodesk Revit 2004

Statybos rangovas dažniausiai atsiranda jau turint statybos leidimą. Dažniausiai statytojas statybos rangovą, kaip ir projektuotoją, renkasi pagal mažiausią kainą. Vertinant investicijų atsiperkamumą (ROI) galima smarkiai iškreipti atsiperkamumo kreivę. Vienas būdas – atsiperkamumo etapas imamas nuo projektavimo pradžios iki statybos pabaigos. Projektuotojui nėra svarbu, kada baigsis statybos, jei jis nėra pasirašęs autorinės priežiūros ar techninės priežiūros sutarties, todėl investicijų atsiperkamumas (ROI) negalėtų būti vienodai matuojamas projektavimo ir statybos įmonėms. BIM projektavimas negali būti priverstinis, viskas turi vykti nuosekliai ir savo noru.

Vertinant BIM privalumus, svarbu paminėti platesnes bendravimo ir bendradarbiavimo galimybes tarp personalo, atskirų projekto komandos narių (Chi *et al.* 2014). BIM užmezga glaudesnį bendradarbiavimą tarp projektuotojų komandos narių. BIM integruotos interaktyvios galimybės yra daug palankesnės klientų informavimui. Pastato informacinio modelio duomenų bazės informacija gali būti laisvai prieinama internetu ir pasidalyta naudojantis debesijos technologijomis tarp įvairių projektavimo komandos narių, klientų, tiekėjų, gamintojų ir t. t. (Chi *et al.* 2014).

ROI – rodiklis, apibūdinantis investicijų, reikalingų BIM technologijoms diegti, grąžą. ROI apskaičiuojamas taip (*Return on Investment with* Autodesk Revit, 2004):

$$ROI = \frac{Gain}{Cost}. \tag{1.3}$$

Pirmųjų metų ROI apskaičiuojamas pagal formulę:

$$ROI = \frac{(B - (\frac{B}{1+E})) \cdot (12 - C)}{A + (B \cdot C \cdot D)}. \tag{1.4}$$

Čia A – programinės įrangos kaina (eurais); B – mėnesinis darbo užmokestis darbuotojui (eurais); C – apmokymų trukmė (mėnesiais); D – produktyvumo sumažėjimas dėl mokymų (procentais); E – produktyvumo padidėjimas po mokymų (procentais).

Kyla klausimas, ar „Autodesk“ siūlomas ROI skaičiavimo metodas įvertina visus svarbius kintamuosius. Apskaičiuojant investicijų atsiperkamumą reikėtų įvertinti:

1. Programinę ir techninę įrangą.
2. Mokymus.
3. Vystymo procesus.
4. Sąveikos sprendimus.
5. 3D bibliotekų tobulinimą.
6. Konsultanto paslaugas.

Dalyvaujant autoriui (siūloma kitokia ROI skaičiavimo metodika (*ROI MR*)), įvertinti daugiau kintamųjų. Žodinė siūlomos ROI pirmiems metams formulės išraiška yra ši:

$$ROI\ MR\ (pirmiems\ metams) = \frac{(padidėjimas\ po\ investicijų - investicijų\ kaina)}{investicijų\ kaina} \tag{1.5}$$

Norint teisingai suprasti investicijų atsiperkamumą, išnagrinėjami kintamieji. Siūloma ROI formulė:

$$ROI\ \ MR = \frac{((12 - C) \cdot (1 + E) \cdot (B \cdot F \cdot G) - (A + (B \cdot C \cdot D)}{A + (B \cdot C \cdot D)}. \tag{1.6}$$

$$ROI\ MR\ (\text{pirmiems metams}) = \frac{\left((12 - C)\cdot(1 + E)\cdot(B \cdot F \cdot G)\right) - \left(A + (C \cdot B \cdot D)\right)}{A + (B \cdot C \cdot D)}. \quad (1.7)$$

1. Padidėjimas po investicijos = (12 mėnesių – apmokymų trukmė (mėnesiais)) × produktyvumo padidėjimas (kartais) × mėnesinis darbo užmokestis (eurais) × tiesioginis projektavimo darbas (kartais) × įmonės darbų specifiškumas (kartais).

2. Investicijų kaina – programinės įrangos kaina + (mokymų trukmė (mėnesiais) × mėnesinis darbo užmokestis (eurais) × produktyvumo sumažėjimas dėl mokymų (kartais).

Kiekybiniai rodikliai taip pat turėtų būti įvertinti. Vertinant investicijų atsipirkimą, svarbu vizualizacijos, produktyvumo padidėjimas, procesų patobulinimas – sumažinta kartotinio darbo ir tam tikros srities koordinavimo problemų, padidinta konkurencinis pranašumas, pagerintas bendravimas ir bendradarbiavimas (McGraw-Hill-Construction 2009). Norint įvertinti BIM naudą ir siekiant įvertinti investicijų atsipirkimą, būtina atsižvelgti į šiuos veiksnius: kiek nauja sistema sutaupys, ar naujų programų naudojimas padidins įmonės akcijų vertę arba pelningumą, kiek laiko truks išmokyti naujus vartotojus.

Kai kurie kintamieji, esantys formulėje, turi didesnę reikšmę nei kiti. Remiantis „Autodesk“ ROI skaičiavimo metodika (Return on Investment with Autodesk Revit 2004) matoma, kad didžiausią įtaką ROI turi produktyvumo rodiklis – produktyvumo padidėjimas ir sumažėjimas. Tyrimų rezultatai taip pat parodė, kad produktyviausi buvo vartotojai, kurie buvo mokomi nuo nulio, dar neturėję sąlyčio su programa. Vartotojai, kurie po programos įsigijimo savarankiškai bandė susipažinti su programa, produktyvumo neprilygo visiškai apmokytiems vartotojams. Apmokymų neturėję darbuotojai buvo mažiausiai produktyvūs.

Duomenys parodo, kad kritinis mokymų laikotarpis – 1–2 mėnesiai. Jei, įsigijus programą, laukiama daugiau nei du mėnesius ir tik paskui organizuojami mokymai, atsiranda blogų įpročių, išsivysto neteisingi programos vartojimo įgūdžiai, kurie trukdo pasiekti didelį produktyvumą (*Return on Investment with* Autodesk Revit 2004).

1.4. Statybų informacijos modeliavimo efektyvumas statybos metu

Statybų informacijos modeliavimo sistema (BIM) ir su ja susiję klausimai – tai tema intensyviems tyrimams ir vystymuisi. Išanalizuoti planavimo efektyvumo ir projektavimo pagerinimai (Porwal, Hewage 2013; Barlish, Sullivan 2012;

Redmond *et al.* 2012), statybų planavimas ir kontroliavimas (Park *et al.* 2013; Shen *et al.* 2012), projekto kūrimo integracija (Shahi *et al*. 2013; Bhatt *et al.* 2013) ir įstaigų valdymas (Davies, Harty 2013; Zhang *et al.* 2013). Taip pat buvo aprašyta BIM sistemos nauda, remiantis pasiektais procesų pagerinimais, susijusiais su statybomis (Lee *et al.* 2012; Kim *et al.* 2013; Ding *et al.* 2012).

Ekspertų plačiai pripažinta, kad BIM ir 4D technologijos padeda efektyviau bendrauti, teikti informaciją žmonėms, suinteresuotiems projektu, ir teikia geresnius bei inovatyvius sprendimo būdus, taikomus projektavimo procese, kaip ir daugybę kitų privalumų, įrodytų ankstesniais tyrimais (Aram *et al.* 2013; Smith, Tardif 2009; Chelson 2010). Straipsnyje (Fan *et al.* 2009) išnagrinėta BIM diegimo įtaka statybos procese.

Projekto įgyvendinimo būdo (PDM – *project delivery method*) įtaka BIM efektyvumui. Tikėtina, kad dėl BIM naudojimo DBB (*Design Bid Build*) projekto įgyvendinimo būdas (PDM) nepademonstruos tokio pat efektyvumo lygio kaip kiti PDM būdai. Klaidų eliminavimas yra BIM produktyvumo vertę didinanti savybė. Konkurencingoje statybų rangos darbų rinkoje laimi rangovai, suinteresuoti neatitikčių nustatymu, vėliau keldami papildomų darbų ir produktyvumo valdymo klausimus dėl klaidingų projekto dokumentų. Tik iš dalies pakeitus požiūrį į DBB, problemos išspręstos nebus, nes BIM procesas ne atviroje bendradarbiavimo aplinkoje yra tik iš dalies veiksmingas. Savininkai gali padidinti projekto vertę, apibrėždami BIM reikalavimus, ir įvertinti jais besivadovaujančius žemesnės pakopos rangovus ir tiekėjus, pasidalydami sutaupytomis lėšomis, susijusiomis tiesiogiai su BIM naudojimu. Yra keletas projektų, kuriuos projekto savininkas parengė naudodamas BIM programinę įrangą ir potencialiems rangovams pateikė prieš paskelbdamas rangos darbų konkursą, siekdamas gauti palankesnę pasiūlymo kainą.

Išsamios informacijos pateikimas projekto dokumentacijoje ir patikėjimas statybų planais yra veiksmingas būdas sumažinti statybų sąnaudas iki 10 %. Pateikta tyrimų ataskaita paneigė projekto savininkų įsitikinimus, kad taikant BIM nėra sutaupomos statybų rangos darbų sąnaudos, tačiau šis tyrimas nustatė tris DBB atvejus, kai rangovai nesumažino apčiuopiamų projektų rango darbų sąnaudų. Visi kiti PDM taikydami BIM sumažino statybų rangos sąnaudas.

Ekonominė nauda yra akivaizdi tiek projektų savininkams, tiek rangovams CM ir DB projektuose. DB projektams reikia vos pusės RFI (prašomos informacijos) poreikio, lyginant su CM (statybos valdymo) projektais. Tikėtina, kad šiam skirtumui įtaką daro du veiksniai – tai projekto savininko dalyvavimas ir palaikymas bei subrangovų dalyvavimas ankstyvajame projektavimo (bent iki 50 % iki užbaigimo) etape. Subrangovai konkursams buvo pasirenkami atsižvelgiant į jų techninės kvalifikacijos savybes DB ir į žemiausią pasiūlymo kainą CM projektuose. Šiuos veiksnius lemia geresnis / glaudesnis DB projektų komandos narių bendradarbiavimas.

Keli DB ar kiti projektai pritaikė integruoto projekto įgyvendinimo metodą, bet šiuose projektuose savininkas aktyviai dalyvavo suburiant viso projekto komandą kartu ankstyvuosiuose etapuose ir vertino sutarties dalyvio progreso našumą, atliekant projekto užduotis, parengtas remiantis BIM sistemos projektu. Vertinant projekto savininko poreikių/tikslų įgyvendinimą ir gautą ekonominę naudą, BIM sistemos ekonominis naudingumas, naudojant ją įvairiose PDM (produktų duomenų valdymo) aplinkose, įvertinamas taip (nuo žemiausio iki aukščiausio): DBB (statinio projektas), CM (statybos valdymas), CM *design-assist* (statybos valdymo projektavimo pagalbininkas), DB (projekto dizainas po statybų), IPD (integruotas projekto įgyvendinimas).

Kada pasirinkti projektavimo komandą. Šiame tyrime buvo nustatyta, kad sutarties dalyviai į projekto rengimo procesą turėtų būti įtraukiami ne vėliau kaip iki to laiko, kai projekto dokumentacija parengta 50 %, bet pageidautina ir anksčiau. Tokiu būdu sutarties dalyviai turės didesnę įtaką konstrukcinių elementų parinkimui ir derinimui. Tokiais atvejais užbaigtų projektų konstrukciniai persvarstymai/pakeitimai nėra būtini/aktualūs. Be to, statybos darbų rangovų dalyvavimas projektavimo proceso tobulinimo, planų koordinavimo ir neatitikčių / nesutarimų nustatymo procesuose iš esmės ir tiesiogiai veikia šios srities produktyvumą. Tačiau sutarties dalyvio įtraukimas į projektavimo procesą, turint aiškią projekto viziją, gali sumažinti architekto įtaką projektui. Šis tyrimas parodė silpną pozityvų santykį tarp modeliuotojų, kurie darbus pradeda įpusėjus projekto rengimo darbams iki RFI (prašomos informacijos) poreikio ir darbų perdarymo. Neatitikčių nustatymas remiantis BIM sistema labai sumažino RFI (prašomos informacijos) poreikį visuose analizuotuose projektuose.

Koordinavimo susirinkimų valdymas. Projekto koordinavimo susirinkimai neatitiktims nustatyti turi būti rengiami kiekvieną savaitę. Dauguma sutarties dalyvių naudojo telefoninės konferencijos programinės įrangos priemones (pvz., GoToMeeting®), nes dauguma tokių įrangų leidžia susirinkimo dalyviams dalyvauti iš savo darbo vietos ir jie netrukdomi atlieka kitus darbus, kai jiems nereikia dalyvauti pokalbyje. Tokiuose pokalbiuose turėtų būti diskutuojama tik svarbiausiais klausimais tam, kad tai nebūtų sutarties dalyvių laiko švaistymas. Susirinkimų produktyvumo lygis neturi reikšmingo poveikio rangos darbų produktyvumui, tačiau turi įtakos bendroms projekto sąnaudoms. Buvimas vienoje vietoje nėra kritiškai svarbus projekto sėkmei, nebent projektas yra didelis ir sudėtingas, fiziškai didelis susirinkimų kambarys gali net pakenkti projekto raidai. Rangos darbų produktyvumas padidėja dėl sutarties dalyvių bendradarbiavimo prieš pradedant rangos darbus, eliminavus darbų perdarymo poreikį, taip pat ir dėl sutarties dalyvių pasitikėjimo žinomais skirtingų sričių specialistais.

Sutarties dalyviai dažnai kviečia inžinierius visiems sutarties dalyvių modeliams koordinuoti, tačiau vėliau buvo suprasta, kad susirinkimus turi vesti

pagrindinis rangovas arba architektas. Pastebėta nežymi BIM procesų kuratoriaus įtaka rangos darbų produktyvumui, tačiau projektavimo proceso efektyvumas priklausė nuo požiūrio į susirinkimų valdymą.

BIM programinės įrangos ir modeliuotojo patirtis. Analizuotuose projektuose nebuvo rasta ryšio tarp BIM programinės įrangos rūšies ir rangos darbų produktyvumo. Dauguma sutarties dalyvių skuba naudoti rinkoje dominuojančią BIM programinę įrangą, bet tyrimai parodė, kad sutarties dalyvių naudojama programinė įranga projekto suderinamumui įtakos nedaro, vertinant RFI kylančių statybvietėje ir perdaromų darbų skaičių.

Šiokia tokia įtaka projektavimo proceso efektyvumui buvo pastebėta sutarties dalyviams naudojant tą pačią BIM programinę įrangą. Taip pat bendros BIM programinės įrangos naudojimo poreikis atsiranda savininkui reikalaujant galutinio projekto modelio iš vienos dizainerių komandos.

Yra ryšys tarp individualaus projekto dalyvio modeliavimo įgūdžių lygio naudojant BIM programinę įrangą ir rangos darbų produktyvumo, vertinant perdaromų darbų ir RFI prašomos informacijos kiekį. Jei modeliuotojas nesupranta operacijų sudėtingumo, ji neparinks visų būtinų komponentų arba parinks juos netinkamai. Nepatyręs modeliuotojas įvardijamas kaip vienas iš BIM sistemos nesėkmių priežasčių. Patyrusių modeliuotojų atitinkamų konstrukcijų žinios, susijusios su techniniais BIM aspektais, atitinka apie 3 ar 4 projektus. Modeliavimo proceso valdymo (pvz., teisingai nusprendžiant, ką modeliuoti) žinios atitinka 2 ar 3 projektus. Jeigu modeliuotojas neturi atitinkamų rangos darbų valdymo žinių, mokymosi kreivė yra tokio ilgio, kokio reikia, kad modeliuotojas išmoktų kiekvieną atitinkamų darbų operacijos detalę projekte. Savo atliekamų darbų lygmeniu sutarties dalyvis taip pat turėtų sukurti virtualų projekto modelį.

Vadinasi, yra stipri koreliacija tarp sutarties dalyvio, kuris paprašė sugeneruoti atitinkamų srities darbų modelį, BIM kompetencijos ir perdirbimo / perdarytų su modelių susijusių darbų kiekio. Aukštos kvalifikacijos trūkumas mažina rangos darbų produktyvumą. Šio tyrimo sutarties dalyviai suprato, kad geriausias būdas efektyviai kelti BIM modeliuotojo kvalifikaciją – mokyti specialistus tiesiog rangos darbų vietoje, susijusioje su atitinkamais srities aspektais. Taip modeliuotojas galės matyti praktinę jo sukurto modeliavimo detalių svarbą.

Detalumas. Modeliavimo detalumo lygis nustatomas remiantis ankstesne patirtimi. Vieni rangovai modelyje nurodo minimalius komponentų dydžius, o kiti leidžia patiems subrangovams pasirinkti, ką įtraukti į modelį, bet jie neatleidžiami nuo atsakomybės dėl komponentų nesuderinamumų, atsirandančių modeliuojant.

Per mažai informacijos modelyje gali būti žemesnio rangos darbų produktyvumo priežastimi, bet per daug detalus modeliavimas neturi neigiamos įtakos vykdomiems darbams.

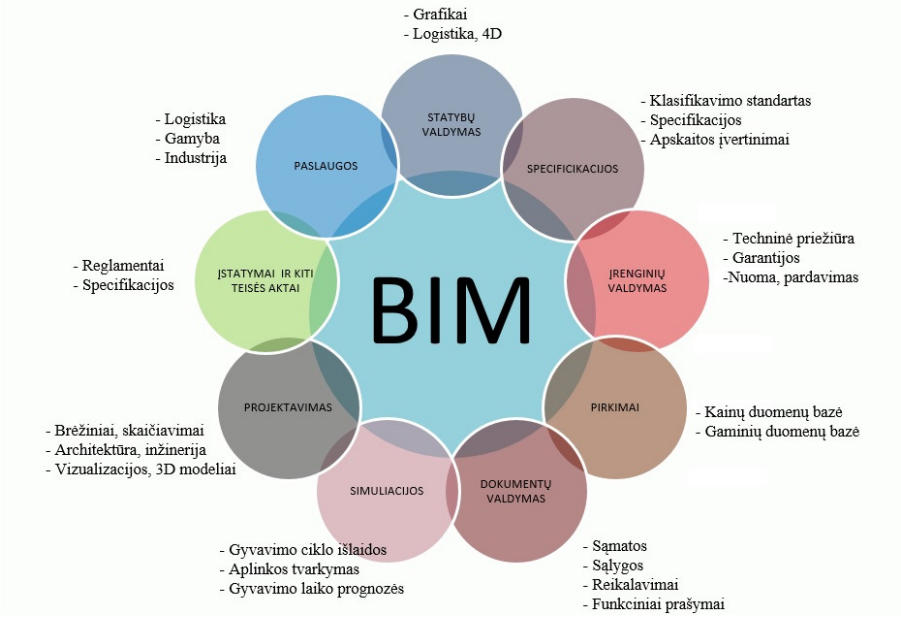
Dažniausiai pasikartojančios problemos kyla dėl per mažo detalumo modeliuojant, o dėl to susidaro dideli atliekų kiekiai, sumažina produktyvumą.

1.5. Pastato informacinio modeliavimo evoliucija

Akronimas BIM rodo skirtingą koncepcijos supratimą, nes vis dar nėra nė vieno visuotinai priimto apibrėžimo. Nauja idėja BIM gimė iš CAD pagrindų (XX a. 9-ajame dešimtmetyje), kai ji buvo aprašyta mokslininkų (Eastman *et al.* 2008) ir įgyvendinta programinės įrangos versija CAD programomis. Tuo laikotarpiu BIM iš tikrųjų reiškė trimatį grafinį modeliavimą, paįvairintą papildomomis galimybėmis (informacija kartu su grafiku). Šios technologijos pagrindas buvo informacija apie grafinį modelį (Froese 2003), apimantį pastato geometrinį modelį, jo fizines savybes, atskirų jo sudedamųjų dalių ir funkcinių detalių pavadinimai. Modernus apibrėžimas BIM pasirodė 10-ojo dešimtmečio pabaigoje ir XXI a. pradžioje. Iš karto pasirodęs rinkoje modelis buvo žinomas kaip SBM (*Single Building Model* – vieno pastato modelis) ir pasiūlytas įvairių programinės įrangos pardavėjų, tokių kaip CAD, „Autodesk Revit“, „Graphisoft“ ir „Bentley“ (Smith, Tardif 2009; Jung, Joo 2011). BIM tapo standartu statybos pramonėje integruojant platų informacijos spektrą tarp skirtingų sričių atstovų, modeliuojant ir kuriant virtualius protingų objektų modelius (Lee, Ha 2013; Leite *et al.* 2011). Tuo metu projektavimo bendrovės pradėjo pirmąjį BIM įgyvendinimo etapą (Grilo, Jardim Goncalves 2010).

Pastaraisiais metais stengiamasi paversti tradicinį trimatį BIM į keturių (4D) (Kim *et al.* 2013), penkių (5D) ir net šešių dimensijų (6D) arba septynių dimensijų (7D) pastato gyvavimo ciklo valdymo modelį, sukurtą remiantis PLM (*Product Lifecycle Management* – produkto gyvavimo ciklo valdymas) (Migilinskas, Ustinovichius 2006; Eastman *et al.* 2008; Popov *et al.* 2010). Šis sprendimas buvo pavadintas BLM (*Building Lifecycle Management* – statinio gyvavimo ciklo valdymas) arba bendru projekto valdymu (1.10 pav.) (Froese 2003). Naudojant 3D pastato modelį logiška tendencija yra tai, kad atsiranda dideli informacijos kiekiai (Ding *et al.* 2014). 3D vėliau evoliucionuoja į 4D, 5D 6D. BIM technologija gali būti apibūdinta taip:

- 4D – virtualus pastato modelis su statybos planu ir darbų eiga, valdymo funkcijas lydi praktiškai pastatyto pastato vizualizacija tam tikru momentu;
- 5D – apima tikslią išlaidų sąmatą ir eliminuojant žmogiškas klaidas rengiant sąmatą;



1.10 pav. Pastatų gyvavimo ir priežiūros trukmė (Ustinovičius *et al.* 2015)
Fig. 1.10. BIM lifecycle view (Ustinovičius *et al.* 2015)

– 6D – darnaus vystymosi įvadas kaip investicinio proceso dalis. Ši technologija leidžia, jau rengiant koncepciją, įvertinti pastato, pvz., saulės energijos vartojimą.

O pati naujausia kryptis įgyvendinant BIM gali būti žymima kaip 7D modeliavimas. Jis grindžiamas pastatų ūkio valdymo koncepcija. Ji apima visą pastato gyvavimo ciklą nuo koncepcijos sukūrimo iki griovimo. Statinių projektavimo daugelio sluoksnių integracija leidžia analizuoti problemas ir reiškinius, kurie iki šiol buvo tik pastato projektavimo sritis.

Apibendrinant svarstymus dėl terminijos, BIM galima apibūdinti kaip priemonę:

a) parengti, projektuoti statybos projekto strategiją, organizuoti statybą ir valdymą, remiantis kompiuteriniu modeliavimu visu objekto gyvavimo ciklu (Miettinen, Paavola 2014);

b) teikti integruotą valdymo grafinių duomenų ir informacijos srautų, susijusių su proceso aprašymu, IT aplinką;

c) suburti atskirus rangovus į komandas arba išskaidyti juos, sprendžiant sudėtingas problemas arba atskiras užduotis sujungiant į procesus;

d) greitai, efektyviai ir pigiai tokius procesus įgyvendinti visu statybos projekto gyvavimo ciklu (Love Peter *et al.* 2014).

1.6. Daugiakriterių metodų taikymas sprendžiant energoefektyvių pastatų konstrukcijų ir inžinerinių sistemų parinkimo problemas

Iš pirmiau atliktos analizės matomas didelis energoefektyvių pastatų konstrukcijų ir inžinerinių sistemų variantiškumas. Įvairūs nauji MCDM metodai ir būdai daugiakriteriams sprendimams priimti taikomi daugybėje projektų įvairiose srityse, ypač civilinės inžinerijos projektuose, susijusiuose su statybos valdymu, energijos taupymu ir t. t. Be to, kai kurie nauji metodai, taikomi daugiakriterei analizei (MCA), buvo mokslininkų išplėtoti konkretiems projektams ankstesniais metais. Šie metodai yra tokie, taip kompleksinis nustatymas, kuris svarbus kokybinių ir kiekybinių charakteristikų atžvilgiu (pvz., COPRAS) (Zavadskas *et al* 2004; Kaklauskas *et al.* 2006) ir taikomas nustatant atributų reikšmių intervalus, COPRAS-Grey (COPRAS-G) (Zavadskas *et al.* 2008) ir daugiatikslis optimizavimo rodiklių analizės metodas (MOORA) (Brauers, Zavadskas 2006). Pateikti metodai turi keletą praktinių taikymo pavyzdžių, tai MOORA ir COPRAS metodai, kurie taikomi keletui bruožų vertinti, priimant kelių projektų sprendinius (Brauers *et al.* 2008; Zavadskas *et al.* 2007) vertinant gyvenamųjų rajonų Vilniuje tvarumą (Zavadskas *et al.* 2005; Zavadskas *et al.* 208b; Kaklauskas *et al.* 2007; Viteikiene, Zavadskas 2007).

MCDM metodai apima platų skirtingų metodų spektrą. Šie metodai gali būti suskirstyti į dvi kategorijas: priimančius diskretiškus MCDM arba diskretiškus daugiaatribučius sprendimus (MADM) ir tęstinius daugiatikslius sprendimų priėmimo (MODM) metodus (Chauhan, Vaish 2012; Kahraman, Çebı˙ 2009; Zavadskas *et al.* 2014). Pastaruoju metu paskelbta šimtai darbų, kuriuose pateikiama informacija apie MCDM metodus, jų kūrimą ir taikymą įvairiose srityse.

Saaty (1980) paskelbė išsamų analitinio hierarchinio proceso tyrimą (AHP). Vėliau Saaty (1996) paskelbė tolimesnį analitinio tinklo procesų (ANP) metodo tyrimo plėtojimą. Zeleny ir Cochrane (1982) išleido knygą, kurioje sprendžiama kompromisų teorijos problema. Hwang ir Lin (1987) paskelbtas grupinio sprendimų priėmimo pagal kelis kriterijus tyrimas. Roy (1996) apibendrino informaciją apie ELECTRE grupės metodus. Tyrimai buvo parengti Belton ir Stewart (2002), Gal *et al.* (1999), Miettinen (1999). Miyamoto *et al.* (2000), Brauers (2004) paskelbė tyrimus, remdamiesi MOORA ir MULTIMOORA (Moora plius visa dauginamoji forma) metodais. Pastaraisiais metais vis didesnę svarbą įgyja hibridiniai ir moduliniai metodai. Susiję tyrimai atliekami anksčiau sukurtų gerai žinomų metodų pavyzdžiu: TOPSIS (Yoon, Hwang 1981), SAW (MacCrimmon 1968), AHP (Saaty 1971), ANP (Saaty 1996), visų kriterijų optimizavimu ir kompromisiniu sprendimu (VIKOR) (Opricovic, Tzeng 2002),

sprendimų priėmimo bandymo ir vertinimo laboratorija (DEMATEL) (Fontela, Gabus 1976), duomenų apėmimo analize (DEA) (Charnes 1994), prioritetų reitingų organizavimo metodu pagerinimui vertinti (PROMETHEE) (Mareschal *et al.* 1984), ELECTRE (Roy 1968, 1996) ir jų pakeitimu taikant neapibrėžtų ir pilkų skaičių teoriją. Santykinai neseniai sukruti MCDM metodai, tokie kaip kompleksinio proporcingo vertinimas (COPRAS) (Zavadskas *et al.* 2004; Kaklauskas *et al.* 2006), adityvus santykis vertinimas (ARAS) (Turskis, Zavadskas 2010; Turskis, Zavadskas 2010b), MOORA (Brauers, Zavadskas 2006), MULTIMOORA (Brauers, Zavadskas 2010), laipsniška svorių vertinimo rodiklių analizė (SWARA) (Keršuliene *et al.* 2010) ir svertinis agreguotas suminis gaminio vertinimas (WASPAS) (Zavadskas *et al.* 2012), yra sparčiai plėtojami ir taikomi sprendžiant realias gyvenimo problemas. Kai sprendimai priimami lyginant galimų variantų privalumus ir trūkumus, esant skirtingam išorės sąlygų poveikiui. Šie uždaviniai gali būti išspręsti taikant lošimų teorijos metodus (Zavadskas, Turskis 2008; Tamošaitienė *et al.* 2008). Racionalių sprendimų variantų atrankos metodai pateikti 1.3 lentelėje.

Mokslininkai Chen ir Hwang (1992) deterministinius vieno asmens MADM metodus dar skirsto į kategorijas pagal informacijos tipą ir jos prieinamumą. Remiantis daugelio mokslininkų (Ларичев 2002; Triantaphyllou 2000; Hwang, Yoon 1981; Ustinovičius, Zavadskas 2004; Zavadskas, Turskis 2011; Vincke 1999) aprašytomis daugiakriterių sprendimo priėmimo metodų klasifikacijomis, sudaroma daugiatikslių sprendimo priėmimo metodų klasifikacija, paremta informacija apie rodiklius. Naudojama klasifikacija pateikta 1.4 lentelėje.

1.3 lentelė. Racionalių sprendimų variantų metodai (Banaitienė, Turskis 2004)
Table 1.3. Rational methods of decision variants

Uždavinio informacija	Sprendimo tipas	
	Variantų formavimas	Įvertinimas
1	2	3
Apibrėžta	*Klasikiniai optimizavimo metodai*	Patikimumo analizė
	Tiesinis programavimas	Kryptingas modeliavimas
	Sveikas ir mišriai sveikas programavimas	Ekonometrinis modeliavimas
	Netiesinis programavimas	Reikšmingumo metodai (MacCrimon)
	Kontrolės teorija	Daugelio kriterijų naudingumo teorija (Keeney, Raiffa)
		Nustatomos vertės teorija (Dyer, Sarin)

1.3 lentelės pabaiga

1	2	3
		Analitinis hierarchinis metodas (Saaty)
		Alternatyvų lyginimas poromis pagal įprastus kriterijus (Kirwood, Sarin)
		Supaprastintas daugelio kriterijų naudingumo metodas (Einhorn, McCoach)
		Electre I, II, III, IV metodai (Roy, Vincke, Duckstein)
Neapibrėžta	*Sprendimo analizė*	Monte Carlo modeliavimas
	Dinaminis programavimas	Papildomo reikšmingumo įvertinimo funkcija su daline informacija
	Neapibrėžtas netiesinis programavimas	Daugelio kriterijų metodas, kai neišsami informacija
	Stochastinė kontrolės teorija	

1.4 lentelė. Daugiatikslių metodų klasifikacija
Table 1.4. A taxonomy of method for the multiple atribute decision making

Metodų klasė	Informacija, gauta iš sprendimą priimančio asmens apie rodiklius	Metodai ir jų klasės
1	2	3
Metodai pagrįsti daugiakritere naudingumo teorija	Kiekybiniai matavimai	SAW, TOPSIS, TOPSIS-G, COPRAS, COPRAS-G, ARAS, MOORA, VIKOR, MultiMOORA
Analitinės hierarchijos ir neapibrėžtų aibių metodai	Kokybiniams matavimams suteikiamas kiekybinis pavidalas	Analitinis hierarchijos procesas (AHP) Metodai, naudojantys neapibrėžtas aibes (Fuzzy), (Fuzzy TOPSIS), (Fuzzy AHP)
Verbalinės analizės sprendimų metodai	Kokybiniai matavimai, nepereinama prie kiekybinių kintamųjų	Verbaliniai metodai: ZAPROS, PARK, ORKLASS, CLARA, DIFLASS, CIKL
Lyginamosios preferencijos metodai	Kiekybiniai ir kokybiniai matavimai	ELECTRE metodai, PROMETHEE metodai, MELCHIOR metodas, UTA metodas, MAUT metodas, TACTIC metodas ir kt.

Ustinovičius (2004) pabrėžė daugiatikslių metodų, kurie pateikti 1.5 lentelėje, pagrindinius privalumus ir trūkumus. Įvertinimo rezultatai parodyti 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. Daugiatikslių metodų įvertinimas
Table 1.5. Evaluation of the multi-purpose methods

Metodai ir pagrindiniai autoriai	Metodų privalumai	Metodų trūkumai
1	2	3
Kiekybiniais matavimais pagrįsti metodai Srinivasan, Shocker 1973; Yoon, Hwang 1981; Arditi, Gunaydin 1998; MacCrimmon 1968; Zavadskas, Kaklauskas 1996; Brauers, Zavadskas 2006; Brauers, Zavadskas 2010; Brauers, Zavadskas 2010; Ustinovichius *et al.* 2007; Simanavičienė, Ustinovichius 2012; Simanavičienė *et al.* 2012	– Metodai garantuoja lyginimų išsamumą; – taikant šios metodus skaičiavimo pabaigoje kiekvienas variantas gauna jo racionalumo reikšmę; – nustatyti racio-nalumai turi kieky-binį įvertinimą ir gali būti lengvai palyginti.	– Kiekvienas metodas turi savo prielaidą, kuri negarantuoja metodo absoliuto tikslumo; – kiekybinių rodiklių reikšmingumas turi subjektyvų charakterį ir dažnai nustatomas su klaidomis; – rodiklių reikšmin-gumo paklaida turi didelė įtaka variantų racionalumui.
Kokybiniais matavimais pagrįstų metodai, analitinės hierarchijos metodai Саати, Керне 1991; Saaty 1994; Saaty 1990) ir metodai, nau-dojantys neapibrėžtas aibes (Zadeh *et al.* 1975; Zadeh 1978	– Užtikrintas palyginimų išsamumas; – taikomas porinis parametrų palyginimas, kurio vertinimo rezultatai yra labai patikimi.	– Algoritmas labai jautrus žmonių matavimo klaidoms; – dažni atvejai, kai skaičiuojant atsiranda ciklai, dėl kurių palyginimo neįmanoma užbaigti.
Lyginamosios preferencijos metodai ELECTRE I (Roy 1968); ELECTRE IS (Roy, Skalka 1984); ELECTRE II (Roy, Bertier 1973); ELECTRE III (Roy 1978); ELECTRE IV (Roy, Hugonnard 1982); ELECTRE TRI (Roy, Bouyssou 1993); PROMETHEE I ir II (Brans *et al.* 1986); MELCHIOR (Leclercq 1984); MAPPAC (Matarazzo 1988); UTA (Kostkowski, Slowinski 1996; Beuthe, Scannella 2001); PRAGMA (Matarazzo 1988); CARTESIA (Giarlotta 1991)	Taikomas porinis alternatyvų lyginimas, taikant specialiuosius sutikimo ar nesutikimo indeksus; – atskiruose meto-duose numatyta pradinių duomenų bei ekspertų matavimų netikslumų įvertinimo galimybė; – metodų rezultatai nejautrūs žmonių klaidoms;	– Esant tam tikroms sutikimo ir nesutikimo reikšmėms, vertinant alternatyvas gali atsirasti ciklai, dėl kurių palyginimo neįmanoma užbaigti; – sunku įvertinti varianto pranašumo diapazoną; – rodiklių reikš-mingumai gali keistis esant toms pačioms sutikimo indekso reikšmėms,

1.5 lentelės pabaiga

1	2	3
Verbalinės analizės sprendimų priėmimo metodai Larichev 1992; Larichev, Moshkovich 1997; Ustinovichius *et al.* 2010; Moshkovich, Mechitov 2013	– Rodikliai gali buti kokybiniai ir kiekybiniai ir aprašomi įprastais budais; – sprendimų priėmimo taisyklės atitinka psichologiniu požiūriu taisykles; – informacijos tikri-nimo procedūros leidžia užtikrinti įeinančios informacijos patikimumą; – metodai numato aiškinimų gavimo galimybės, tai leidžia patikslinti galutinį variantų rangavimą.	– Sunku įvertinti varianto pranašumo diapazoną; – dažni atvejai, kai ciklai atsiranda skaičiuojant, dėl kurių palyginimo neįmanoma užbaigti.

Analizuojant pateiktą medžiagą, daroma išvada, kad galima parinkti daugiakriterių metodų derinį sprendžiant tam tikrus apibrėžtus uždavinius.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Pirmajame skyriuje apibendrinta administracinių pastatų atnaujinimo galimybių analizė taikant BIM technologiją. BIM technologijos plačiai nagrinėjamos užsienyje, tačiau jų taikymas, atnaujinant administracinius pastatus, yra gana nauja sritis. Lietuvoje BIM pradėtas naudoti tik 2002 m., o pasaulyje – jau nuo 1987 m. Lietuvoje nenustatyta administracinių pastatų atnaujinimo pavyzdžių, taikant BIM technologiją.
2. Atlikus tyrimus ir analizę, apibrėžtos energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės, kurių pagrindinis tikslas – modernizuojant pastatus užtikrinti mikroklimato ir komforto sąlygas.
3. Išanalizavus literatūrą nustatyti pagrindiniai konstrukciniai skirtumai tarp paprasto namo ir administracinio. Nustatyta, kad energetiškai efektyvaus pastato principinė sąlyga yra pastato hermetiškumas.
4. Atlikta esamo pastato termoizoliacijos įrengimo principų analizė. Nustatyta, kad termoizoliacijos įrengimas tose vietose, kur jau yra tam

tikra termoizoliacija, leidžia išsaugoti energiją ir padidinti komfortą. Daug energijos gali būti išsaugota ir tada, kai termoizoliacija įrengiama tose vietose, kur jos nėra.

5. BIM diegimo procesas mažai nagrinėtas ir nėra pasiūlytas optimalus jo modelis. Sukuriant BIM diegimo technologijų vertinimo daugiapakopį modelį, būtų naudinga įvertinti kiekvieno dalyvio vaidmenį.
6. BIM diegimas projektavimo įmonėse – sudėtingas procesas, keičiantis tris sritis įmonėje: technologiją, procesus ir darbuotojus (jų darbo įgūdžius, kvalifikaciją). Naudojant BIM projektavimo procesas yra greitesnis, efektyvesnis, padidėja sąnaudų skaičiavimo tikslumas, sumažėja nenumatytos išlaidos. Remiantis atliktos apklausos duomenimis, didžiausią įtaką BIM programų diegimui įmonėje turi automatizuoto 3D konstrukcijų skaičiavimo galimybė. Daroma išvada, kad įmonėms, kuriose atliekamas visas kompleksinis projektas, patogu naudoti bendrą BIM programą, nes konstrukcijos skaičiuojamos tame pačiame modelyje, kur kuriama ir visa pastato informacinio modelio centrinė byla.
7. Sukurtas BIM technologijų atsiperkamumo nustatymo metodas „ROI MR“, nagrinėjama ROI skaičiavimo formulė, apibūdinami nauji kintamieji. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad BIM technologijų atsiperkamumas yra ilgas procesas. Žinant, kad BIM projektavimo programa kainuoja daugiau nei 15 000 eurų, o projektuotojas dirbs visą darbo dieną tik su BIM programa, gautas atlyginimas (bruto) – 2200 eurų. Darbuotojui, uždirbančiam tokį darbo užmokestį, programa atsipirks tik per penkerius metus.
8. Rangovai, naudojantys BIM, pagerina našumą, o kartu ir padidinti pelną. Šis našumas pasiekiamas, kai yra aiškios komponentų surinkimo vizualizacijos ir pašalinti visi nesuderinamumai. Kai jau keletas rangovų geba valdyti koordinavimo procesus, mažėja išlaidos ir tuo anksčiau gaunamas ankstyvasis pelnas. Kuo daugiau rangovų didins savo našumą naudodami BIM, tuo sąnaudos, kurios buvo patiriamos anksčiau, mažės.

Atsižvelgiant į apibendrinimus, pastebimas poreikis sukurti metodologiją ir daugiakriterį modelį administracinių pastatų atnaujinimo technologijų bei sprendimų efektyvumui tirti ir vertinti taikant BIM technologiją. Suformuluoti šie disertacijos uždaviniai:

1. Nustatyti administracinių pastatų atnaujinimo galimybes ir energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemones, daugiausia dėmesio skiriant rezultatų nustatymui – kurios priemonės duoda didžiausią energijos vartojimo efektyvumą.

2. Sukurti energetiškai pasyvių visuomeninių pastatų modernizavimo ar rekonstravimo pastato modelį naudojant BIM technologiją, kuris realiai galėtų būti taikomas atliekant projektavimo bei statybos darbus modernizuojant administracinius pastatus.
3. Sukurti administracinių pastatų atnaujinimo technologijų medžio sintezės metodiką ir daugiakriterį modelį formuojant pasyvių namų konstrukcijos variantus.
4. Sukurti modernizavimo priemonių atrankos sprendimų modelį, kuris leistų nustatyti efektyviausią modernizavimo variantą.
5. Patikrinti administracinių pastatų atnaujinimo variantų ir sprendimų efektyvumo tyrimus ir vertinimus, taikant BIM technologiją, sukurtą metodiką bei daugiakriterį modelį ir jo praktinio taikymo algoritmą. Skaičiavimo rezultatus palyginti su literatūroje paskelbtais tyrimų rezultatais.

2

Administracinio pastato renovacijos ir rekonstrukcijos energijos efektyvumas naudojant pasyvaus namo modelį ir pastato informacinio modeliavimo technologiją

Antrajame skyriuje sukurtas administracinių pastatų modernizacijos ir rekonstrukcijos energijos vartojimo efektyvumo bazinis modelis, naudojantis pasyvių namų ir BIM technologijas. Apibrėžtos energinio efektyvumo užtikrinimo priemonės, kurios gali būti naudojamas pastatui modernizuoti. Pasyvaus namo sprendimai turi savų niuansų, į kuriuos reikėtų atsižvelgti ir įvertinti namo specifiką. Skyriuje pateiktos komforto sąlygų ir termoizoliacijos efektyvių sprendimų apibrėžtys, susijusios su pastato apšiltinimu, apsauga nuo perkaitimo šiltuoju metų laiku, pelėsio susidarymo ir garų difuzijos klausimais, šilumos tiltelių atsiradimu, pastato sandarumu. Taikant šias apibrėžtis numatomi pasyvių namų konstrukcijos (pamatai ir rūsio grindys, sienos, stogas, langai), vėdinimo ir šiltinimo sistemos sprendimai. Skyriuje suformuotas efektyvios

modernizavimo sprendimų priėmimo modelis ir sprendimų sintezės medis, naudojantis alternatyvių modernizavimo priemonių atrankos derinį.

Suformuotas taikomų efektyvumo rodiklių kompleksas. Uždaviniui spręsti adaptuotas pastato konstrukcijų modernizavimo sprendimų sintezės metodas SyMAD-3.

Skyriaus tematika paskelbtos keturios publikacijos: Rasiulis *et al.* 2016; Rasiulis *et al.* 2015; Reizgevičiūtė *et al.* 2013; Reizgevičius *et al.* 2014.

2.1. Energinio efektyvumo užtikrinimo priemonės

Svarbiausias XXI a. iššūkis yra gamtiškai, ekonomiškai ir visuomeniškai palaikyti kaimus, miestelius ir didmiesčius (Jarrar, Al-Zoabi 2008).

Pastatai turi tiesioginį poveikį gamtai, pradedant medžiagomis ir ištekliais, iš gamtos naudojamais statybai bei modernizavimui, ir baigiant natūralių išteklių suvartojimu bei atliekų žala gamtai (Balaras *et al.* 2005). Kuriant pastatų projektus turėtų būti apsvarstyta ilgalaikė gamtinė ir ekonominė nauda (Wang *et al.* 2011).

Ekonominis, socialinis ir gamtinis balansas skatinamas praktikuojant statybas ir įgyvendinant statybų projektus. Ši praktika siejama su įvairiais metodais įgyvendinant statybų projektus, kurie sukelia mažiau žalos gamtai (Ruggieri *et al.* 2009). Pastato energijos eksploatacinės savybės – tai apytikriai apskaičiuotas energijos kiekis, išreikštas pastato energijos galios klase, reikalinga naudojant pastatą pagal jo paskirtį (STR 2.01.09 2012). Daugumos viešųjų patalpų mikroklimatas neatitinka Lietuvos higienos normų, t. y. neatitinka šiluminio komforto parametrų. Kad tokio tipo patalpų mikroklimatas atitiktų Lietuvos higienos normas, patalpos turi būti modernizuotos (STR 2.01.09 2012).

Pasyvus namas – tai pastatas, kuriame šilumos komfortas (LST EN ISO 7730:2006) gali būti pasiekiamas šildant arba šaldant šviežio oro masę, kuri reikalinga pakankamos vidinės oro kokybės sąlygoms pasiekti be papildomos oro cirkuliacijos (Bayir *et al.* 2013).

Energijos efektyvumas pritraukia visuomenės dėmesį, nes šilumos suvartojimo išlaidos už šildymą sudaro nemažą gyventojų mokesčių dalį. Šios išlaidos gali būti mažinamos keliais būdais: sumažinant energijos kainas, statant naujus pastatus ir renovuojant senus, kurie vartotų mažiau energijos, taip sumažinant suvartojamos energijos kiekį (Volvačiovas *et al.* 2013).

Tam tikromis sąlygomis efektyvios energijos poreikį galima pasiekti, padarius statinio projekto pakeitimus. Industrijos ateitis yra statinio informacinis modeliavimas (BIM) (Талапов 2015). Svarbu, kad BIM – tai ne tik informacijos modelis, jis taip pat apima visą statinio gyvavimo ciklą, integruoja programos

kontrolę ir standartizuoja informacijos valdymą taip, kad reikšmės yra aiškios ir nuoseklios (San-Jose *et al.* 2014; Талапов 2011).

Tam tikromis sąlygomis efektyvus energijos poreikis gali būti pasiektas pritaikant pastato projekto pokyčius.

Technologijų pažanga, naujai išrastos medžiagos ir statybos technikos industrija leidžia panaudoti naujus sprendimus kiekviename pastato elemente (San-José Lombera, Cuadrado Rojo 2010).

BIM technologija (ateities statybų technologija, Harris 2013) padėtų išspręsti didelių išlaidų problemą, statybų proceso sąlygas, ilgaamžiškumo ir modelio projekto atkūrimą rekonstruojant visuomeninius pastatus, pasirenkant alternatyvias statybų baigtis. Tai yra nauja industrijos sąlyga, siejama su 3D vizualizacijos parametrų technologija ir industrijos procesais (Taylor, Bernstein 2009; Popov *et al.* 2010). BIM yra viena iš naujausių ir daugiausia žadančių programų (Azhar 2011). Į BIM programą įeina ilgaamžiškumo fazės, integruoti programos valdymo įrankiai ir standartizuotas informacijos valdymas, o sprendiniai yra aiškūs ir pastovūs (Talapov 2011). Tai yra papildomas modelis projektų inžinerijos informacijos duomenų bazėje, kurioje laikomi architektūros dizaino geometrijos informacija ir atitinkama visų darbų techninė informacija (Ding *et al.* 2012).

Galimybė perkelti pastatų duomenis iš BIM programos sumažina laiką ir neužtikrintumą pastato energijos modeliavimo procese. BIM technologija reikalauja kur kas mažiau darbo išteklių, nei tradiciškai kuriant projektinį modelį. Darbo jėgai reikia prasilaužimo skyrių, aukštų specifinėms dalims (šildymo, ventiliacijos ir elektros) paruošti (Wong, Fan 2012).

4D technologija leidžia projektuotojui parengti tikslesnius planus (Heesom, Mahdjoubi 2004; Migilinskas *et al.* 2013).

2.2. Komforto sąlygos ir termoizoliacijos užtikrinimo priemonės

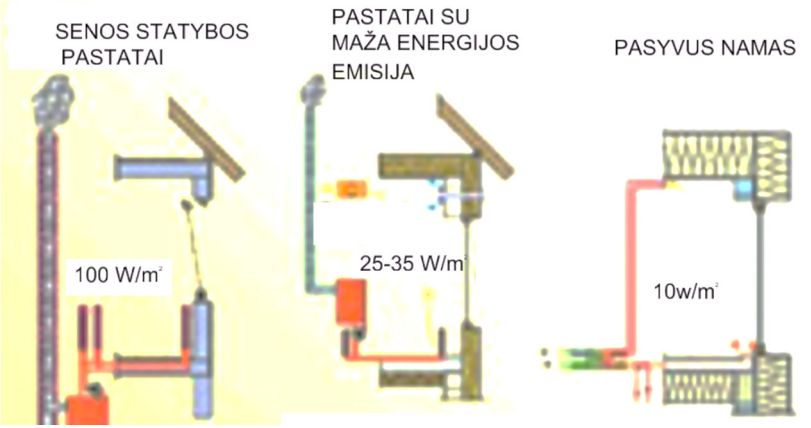
Komforto sąlygos ir energinį efektyvumą užtikrina pasyvaus namo taisyklės. Todėl toliau bus nagrinėjamos pasyvaus namo sistemų ir konstrukcijų problemos.

Pasyvus namas turi maksimaliai išnaudoti skleidžiamą saulės šilumą. Žiemą Vokietijoje įeinančios šilumos balansas reguliuojamas langais, kurie yra pagrindinis pastato šilumos šaltinis nuostoliams papildyti, jei langai apima didelį plotą ir yra nukreipti į pietinę pusę. Kartu šilumos paketas ir vėdinimo sistemos turi atitikti pasyvaus namo standartus. Šis derinys leidžia sujungti vėdinimo ir šildymo sistemas, šiek tiek kaitinant grynu oru, neviršijant santykinai mažos apkrovos iki 10 W/m. Šis šildymo sistemos supaprastinimas suteikia akivaizdų

vertės augimą. Be to šilumos energijos sąnaudos šildymui neturėtų viršyti 15 kWh/m^2. Tokia yra pasyvaus namo formulė.

Sąlygomis kur šildymo sistemos pritaikymas apibrėžiamas kaip mažo intensyvumo saulės šilumos ir vyraujančios žemos oro temperatūros (įskaitant šalčiausias penkias dienas) per žiemos mėnesius. Atitinkamai, oro šildymas naudojant oro šildymo technologiją per ventiliacijos sistemos šilumokaičius. Pasyviame name reikalingas tik tam tikrais šildymo sezono laikotarpiais. Pagrindiniais žiemos mėnesiais reikės papildomo šildymo arba atskiros sistemos, nekombinuotos su ventiliacija. Šiais pasyvių namų kriterijais būtų pasiekta mažiau šilumos, suvartojimų šildymui, nei 15 kWh/m^2 šildymo laikotarpiu. Be to, neužtenka tik tikslaus projektavimo ir gamybos, pageidautina, kad būtų įdėtos šilumą izoliuojančios langinės, taip išsprendžiant naktinės šilumos nuostolių problemą per langus žiemos mėnesiais. Žinoma, papildomas vėdinimas (pro atidarytus langus) negalimas, turi būti atliktos visos reikalingos priemonės šilumos tilteliams sandarinti ir t. t. Atsižvelgiant į visas realijas mūsų sąlygomis, tokio pastato konstrukcijos būtų vienetinės.

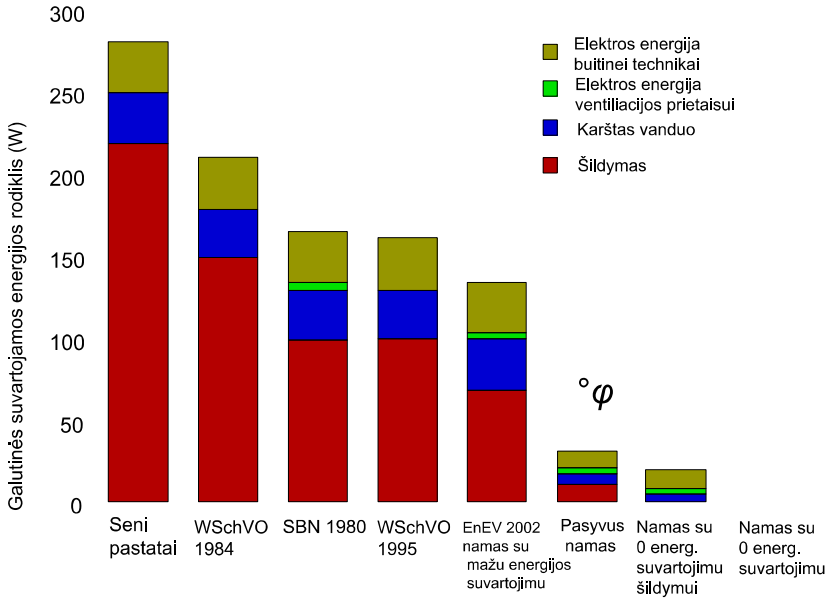
Standartinė šildymo sistema Centrinėje Europoje – centrinis karšto vandens šildymas radiatoriais, vamzdžiais iš centrinio šildymo katilo, kuris šildomas skystuoju kuru ar dujomis. Centrinėje Europoje paprastai senos statybos gyvenamieji namai turi apie 100 W/m^2 šilumos apkrovą šildymo sistemai. Tai reiškia, kad, norint pakeisti šildymo sistemą, kiekvienas kvadratinis metras tūrėtų būti apšviestas kaitinamąja 100 W lempa. Pagrindinę pasyvaus namo idėją galima būtu trumpai paaiškinti taip: pastato šilumos nuostoliai sumažinami iki tokio lygio, kad papildomas šildymas būtų nereikalingas (2.1 pav.).



2.1 pav. Šilumos užtikrinimas be šildymo sistemos
Fig. 2.1. Heat assurance without heating system

Reikalingas minimalus šildymas gali būti lengvai pasiekiamas naudojant ir tiekiamą šiltą orą. Jeigu didžiausia reikalinga šilumos apkrova pastato šildymo sistemoje yra mažiau nei 10 W/m^2, tuomet gyvenamajam kambariui šildyti užtektų dvejų kaitinamųjų lempų. Reikalingas šilumos kiekis gaunamas šiuo atveju, taikant oro šildymo sistemos ventiliaciją. 2.2 paveikslas rodo, kodėl ir kaip ji veikia. Jei ventiliacinės oro sistemos šilumos srautas yra pakankamas ir tai yra vienintelis šildymo sistemos šilumos šaltinis, toks pastatas vadinamas pasyviu namu, nes jis nereikalauja aktyvios šildymo sistemos, taip pat ir oro kondicionavimo sistemos.

Pasyvų namą galima šildyti visiškai minimalaus dydžio suvartojamos šilumos energijos kiekiu. Labai svarbu, kad apkrova būtų nedidelė, kad atskira šildymo sistema būtų nereikalinga: tokiu atveju pasyvų namą galima šildyti labai šaltu periodu šildant oru arba nedideliu skaičiumi papildomų kaitinamųjų lempų.



2.2 pav. Suvartojamos energijos rodiklių palyginimas
Fig. 2.2. Comparison of the energy consumption indicators

Pasyvaus namo statybos kriterijai:

1. Specifinis suvartojamos šilumos energijos kiekis pasyviam namui šildyti nustatomas „Pasyvaus namo projektavimo paketu“ (PHPP), kai neturi viršyti 15 kWh/m^2 (per metus).

2. Bendras buitinėms reikmėms (šildymui, karštam vandeniui ir elektros energijai) suvartojamos energijos kiekis neturėtų viršyti 120 kWh/m^2 (per metus).

Nepaisant šių punktų, pasyviame name turi būti komfortiška ir vasarą, nenaudojant kondicionieriaus.

1 ir 2 punktuose nurodyti reikalavimai pasyviam namui yra pakankami. Nenurodoma, kokio tipo televizorius naudojanti ir kokios sistemos ventiliaciją įrengus suvartojama mažai energijos. Pasyvų namą pastatyti tampa labiau prieinama dėl atsiradusių kokybiškesnių medžiagų ir konstrukcijų.

2.3. Šilumos tilteliai

Pastatų kevalas susideda ne vien tik iš įprastos konstrukcijos (sienos, stogas, grindys), bet ir apima kitus paviršius, kampus, jungtis ir pavojingas vietas, kuriose išorinis kevalas nėra vientisas (pvz., kiaurymės, vamzdynų klojimo vietos, vėdinimo konstrukcijų ir kitų elementų montavimo vietos). Visose šiose vietose šilumos nuostoliai yra didesni, lyginant su įprastiniu paviršiumi. Kruopščiai projektuojant ir sąžiningai įgyvendinant įmanoma sumažinti šilumos nuostolius per šilumos tiltelius.

Kai kurių šilumos tiltelių sunkiai galima išvengti, pavyzdžiui, šilumos nuostoliai išilgai išorinio pastato paviršiaus. Šie ir kiti vadinamieji šilumos tilteliai gali būti lengvai įvertinami ir apskaičiuojami.

Tie šilumos tilteliai, kurie atsiranda dėl nepalankių konstrukcinių detalių, pavyzdžiui, jei balkono plokštės termiškai neatskirtos nuo betoninių grindų, sudaro nemažai papildomų šilumos nuostolių. Reikėtų vengti tokių konstrukcinių jungčių, kurios suardo izoliacinio kevalo vientisumą, o tai ypač svarbu pasyviems pastatams.

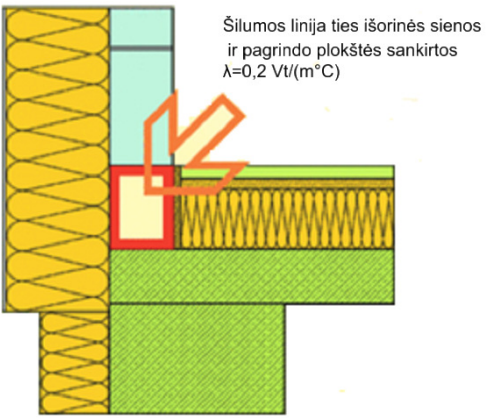
Yra keturios taisyklės, kurių reikėtų laikytis, norint sumažinti šilumos tiltelių sukeliamus šilumos nuostolius (2.1 lentelė).

2.1 lentelė. Šilumos tiltelių sukeliamų šilumos nuostolių sumažinimo taisyklės
Table 2.1. Rules of heat loss reduction caused by thermal bridges

Šilumos tiltelio išvengimo taisyklė	Jei įmanom, nedaryti skylių šilumą izoliuojančiame kevale
Perėjimo per šilumos izoliaciją taisyklė	Jei neįmanoma išvengti skylių šilumą izoliuojančiame sluoksnyje, šioje vietoje jis turėtų būti maksimaliai padidintas
Prigludimo taisyklė (sandūros)	Statybinių elementų izoliacijos jungčių prigludimo vieta turėtų būti be tuščių tarpų, t. y. jungtis turi būti visiškai izoliuota
Geometrijos taisyklė	Esant galimybei rinkitės tik bukus paviršių kampus (>90°)

Taip pat padeda ir ši taisyklė – projektuojant visas išorinis apvalkalas (be išimties) izoliaciniame sluoksnyje apvedamas storu pieštuku, jis turi atitikti reikalingą izoliacinio storio minimalų mastelį.

Iki šiol paskelbtoje techninėje literatūroje apie šilumos tiltelius kaip išeitinis domuo dažnai parenkamas ne išorinis, o vidinis kevalo dydis, renkantis vidaus kambarių galimus šilumos nuostolius. Ši informacija pamirštama, vertinant išorinius matmenis. Praktiškai vertinant vidinius matmenis, žinoma, yra painiavos, nes kaip „trivialius“ situacija sukuria dirbtinius šilumos tiltelius. Pavyzdžiui, elementarus vidinės sienos prigludimas prie išorinės sienos. Šis poveikis atsiranda dėl to, kad, naudojant vidinį dydį, lieka neįvertintas išorinis plotas. Linijinių šilumos nuostolių koeficientų santykis yra didesnis išorės matmenims.



2.5 pav. Izoliacinių plokščių virš rūsio perdangos ir išorinių sienų izoliacijos sujungimas, darant minimalius šilumos nuostolius
Fig. 2.5. Insulation junction of the insulating panels above the basement floor and external walls with minimum heat loss

Statyba be šiluminių tiltelių apibrėžiama taip: šilumos tiltelių įtaka turi būti labai maža arba jos iš viso neturi būti. Skaičiuojant iš pradžių nereikėtų įtraukti poveikio, kurį sukelia šiluminiai tilteliai, tokiu būdu labai supaprastinami skaičiavimai. Šilumos nuostoliai nustatomi viską sumuojant.

Apibrėžimo „be šilumos tiltelių“ patikrinimas – tik visų mazgų tikslių reikšmių apskaičiavimas. Be to, tai padeda sukurti supaprastintus „statybos be šilumos tiltelių“ kriterijus. Pirmiausia tokius mazgus iš pradžių reikia traktuoti kaip „be šiluminių tiltelių“, jei galioja sąlyga:

$$\Psi_a < 0{,}01 \text{ W/mK},$$

čia Ψ_a – ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas.

2.4. Pastato sandarumas

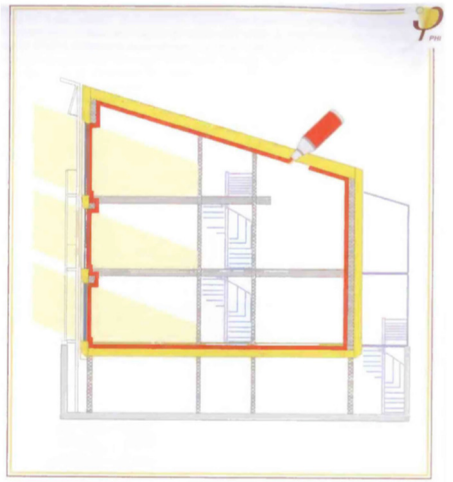
Pastatų išorinis apvalkalas turi būti sandarus. Principas yra paprastas ir nėra jokių abejonių – jis jau seniai nustatytas ir atitinka DIN 4108. Tačiau, nepaisant to, jokia kita pastato apvalkalo savybė nesukelia tiek daug karštų diskusijų, kaip sandarumas. Problemos esmė yra neteisingas mąstymas (įprastas įsitikinimas), kad oro nutekėjimas per išorines pastato atitvaras (siūlės, sandūras, spragas), gali būti pakankama ventiliacijai ir oro ištraukimui. Tai klaidinga. Oro kaita per išorinių sienų siūles gali kisti ir priklauso nuo vėjo, slėgio, temperatūros pokyčių labai plačiu diapazonu. Labiausiai tai vyksta nesandariuose pastatuose, kuriuose, net esant švelniam vėjui, atsiranda skersvėjai, o švelnus klimatas gali būti nepakankamas vėdinimui. Patalpų vėdinimas per nesandarias siūles tiesiog negalimas. Oro srautas per siūles turi didelį trūkumą: jei lauko oras lengvai patenka į vidų per siūles, tai su vėju lengvai gali patekti ir atmosferiniai krituliai. Jei oro srautas eina iš vidaus į išorę, tai pasekmės gali būti jau katastrofiškos. Šiltas drėgnas oras iš kambario aušdamas išeina per siūlės; išeidamas jis jau nebegali būti tos pačios santykinės drėgmės, nes šaltas oras pakeičia procentinę vandens garų išraišką. Drėgmės perteklius kondensuojasi siūlėse, t. y. konstrukcija įmirksta dėl išeinančios drėgmės (Carlsson *et al.* 1980). Per tokį garų konvekcinį transportavimą į pastato konstrukcijas patenka daug daugiau drėgmės nei dėl garų difuzijos, kuri dėl to daugeliu atvejų yra natūrali ir nekenksminga, kai tinkamai parenkama. Labai didelis visų statybinių žalų procentas susijęs su skylėtu pastato kevalu. Kiti trūkumai susiję su tokia ventiliacija – tai bloga garso izoliacija ir per dideli šilumos nuostoliai.

Kadangi siūlių nesandarumas atneša daugiau žalos nei naudos, pastato atitvaros turi būti sandarios. Pasyviems namams tai dar svarbiau. Reikalaujamą oro kaitą užtikrina vėdinimo sistema. Vėdinimas per siūles šiuo atveju gali sutrikdyti vėdinimo sistemos veikimą ir labai padidinti šilumos nuostolius, nes pritekant orui per siūles rekuperacija yra beprasmiška.

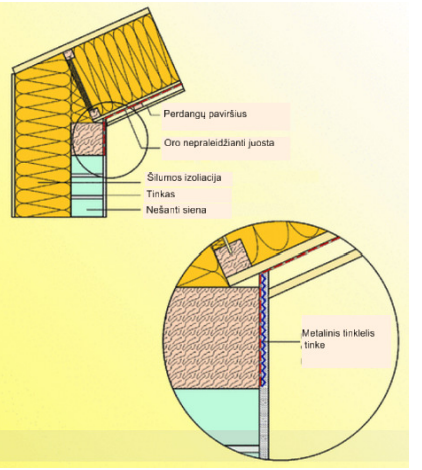
Pastatų sandarumą lengva išmatuoti. Šiam tikslui naudojamas vadinamasis bandomasis slėgis. Ventiliatoriumi įmontuoto išorinių durų ar lango vietoje visame pastate sudaromas tam tikras vakuumas (normalioji slėgio skirtumo vertė 50 Pa). Matuojamas pritekančio oro per nutekėjimo į patalpą kiekis, kai patalpoje sukurtas mažas slėgis. Tai apibrėžia nutekamo oro kiekį. Sandarumo vietas galima tiksliai nustatyti patikrinus išorinį kevalą konkrečiose vietose, kurios aptinkamos dėl oro infiltracijos.

Hermetiškus pastatus statyti nėra labai sudėtinga. Sąžiningas projektavimas šiuo atveju yra lemiamas (Peper, Feist 1999). Sandari yra, pavyzdžiui, klasikinė išorinė plytų siena, jei ji iš vidaus nutinkuota be įtrūkių. Vidaus tinkas tokiu atveju turi būti nepertraukiamas nuo pat grindų iki perdangos plokštės apačios. Taip pat turėtų būti nutinkuota už laiptų (tarp laiptatakio ir sienos), net jei tai nėra matoma.

Medinės konstrukcijos (tokios kaip stogas su kabančioms stogo santvaromis) bus hermetiškos tik tada, kai plastiko plėvele bus uždengtas visas šiluminės izoliacijos paviršius (2.6 pav.). Plėvelės juostas reikia atidžiai ir saugiai suklijuoti, naudojant dvipusę lipnią sandarinimo juostą butilo gumos pagrindu. Langų stiklai ir betono grindys yra hermetiški savaime.



2.6 pav. Visiškai užsandarintas, oro nepraleidžiantis pasyvaus namo kevalas
Fig. 2.6. Completely sealed, air-tight passive house shell



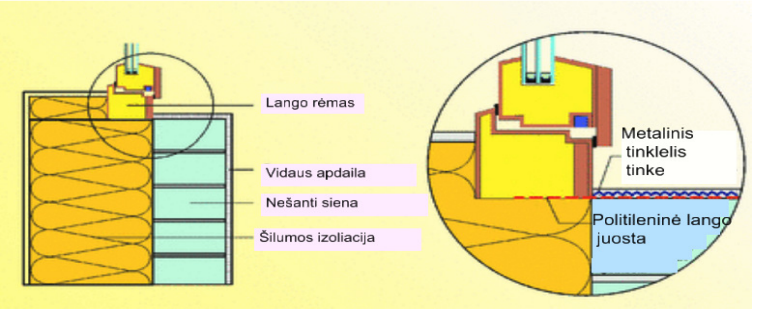
2.7 pav. Lengvosios medinės stogo konstrukcijos oro nepraleidžianti jungtis su tinkuota siena
Fig. 2.7. Air-tight connection of the light wooden roof construction with the plastered wall

Jei vieną kartą pasirinksite pagrindinę sandarinimo konstrukciją, tada visa kita bus pirmiausia priklausoma nuo konstrukcinių elementų jungčių sandarumo. Projektuojant turi būti vadovaujamasi principu, kad sandarus apvalkalas apima visą šildomą tūrį ir visiškai užsandarina paviršių. Tai aiškiai matyti – vidinis pastato tūris (plane ir pjūvyje) turi būti visiškai „apvestas“ pieštuku palei hermetišką paviršių be pertrūkių (2.6 pav.).

Lengvosios medinės stogo konstrukcijos nesandarus sudūrimas su tinkuota siena lengvai išsprendžiamas taip: pirma paklojama plėvelė su 8–20 cm užlaida ant laikančiosios sienos (2.7 pav.). Ant plėvelės klojamas tinkavimo tinklas. Vėliau tinklelis ir plėvelė tinkuojami, taip sudaroma patikimas sandarus sujungimas.

Orui laidus lango rėmo sujungimo su laikančiosios sienos vidiniu tinku mazgas yra parodyta 2.8 paveiksle. Iš tikrųjų šiandien tinkuojama iki pat lango rėmo. Tinko kraštas yra beveik visada nesandarus. Patikimą ir hermetišką mazgą

šioje situacijoje reikėtų įrengti taip: maždaug 10 mm atstumu nuo rėmo montuojama sandarinimo su tinku juosta, kuri hermetiškai užsandarina sujungimą. Siūlės užpildomos ilgalaike elastine medžiaga. Taip pat kaip alternatyva gali būti taikoma speciali lipni juosta.



2.8 pav. Orui laidus lango rėmo sujungimo su vidiniu lakančiosios sienos tinku mazgas
Fig. 2.8. Connection assembly of the breathable window frame with the internal plaster of the bearing wall

Aiškiai matyti, kad bet kuriuo atveju įvairių konstrukcijų paviršiai turi būti tvirtai ir sandariai sujungti vienas su kitu. Turi būti vienas sandarus paviršiaus lukštas aplink visą interjero erdvę. Papildomai tvarkyti atskiras sritis nesandarinant bendro paviršiaus plokštumos neturi prasmės.

Patirtis parodė, kad sandarumas yra lengvai pasiekiamas, jei:

- visi suprojektuoti elementai yra paprastos konstrukcijos;
- galima sukurti didelius uždarus paviršius naudojant patikimas ir išbandytas konstrukcijas;
- griežtai vykdomi sujungimų montavimo principai;
- yra minimalūs kevalo pradūrimai.

2.5. Pasyvių namų konstrukcijos

2.5.1. Pasyvių namų pamatai ir rūsio grindys

Gana dažnai namo pamatai yra kartu ir rūsio sienos. Patikimas jų eksploatavimas galimas tik tuomet, kai užtikrinama išorinių konstrukcijų, kurios liečiasi su žeme, šiluminė izoliacija. Šiluminės izoliacijos poreikis yra dėl to, kad šilumos nuostoliai per požemines pastato dalis kai kuriais atvejais siekia iki 20 % visos šilumos nuostolių (Ramanauskas 2004). Rūsio šilumos izoliacija apsaugo rūsio sienas nuo peršalimo, padeda išvengti kondensacijos formavimosi ir pelėsių atsiradimo.

Reikėtų pažymėti, kad požeminės dalies namo izoliacija leidžia pašalinti arba gerokai sumažinti pamatų kilnojimą, kas yra ypač aktualu regionuose, kur dirvožemiai (molio ir priemolio) priskiriami nestabiliems. Kai jie peršąla į pamatą, kuris yra grunte, dėl šalčio įtakos pradeda veikti kilnojimo jėgos, todėl pamatuose ir sienose atsiranda deformacijų.

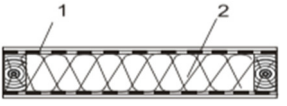
Esminiai šilumos nuostoliai atsiranda ir per cokolines perdangas, kurios yra virš nešildomų rūsių ir pogrindžių. Šiuo atveju nuo šiluminės izoliacinės kokybės priklauso ne tik namų šildymo išlaidos, bet ir galimybė sukurti patogią gyvenamąją aplinką (Černius *et al.* 2008).

Reikia pažymėti, kad, apšiltinus perdangas virš šaltų rūsių ir pogrindžių per jas, taip pat vyksta vandens garų difuzija. Siekiant apsaugoti izoliaciją nuo drėgmės, būtina įrengti garų barjerus, bet priešingai nei mansardai, garų barjerai turi būti įrengti virš šilumos izoliacijos (ne po ja), nes vandens garai sklinda iš šiltos (viršutinio) patalpų į šaltesnis (apatines) patalpas.

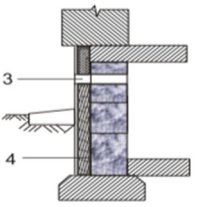
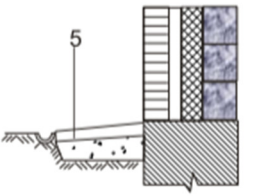
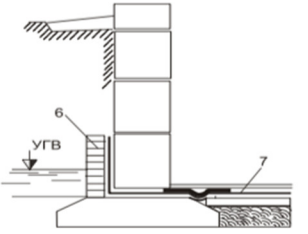
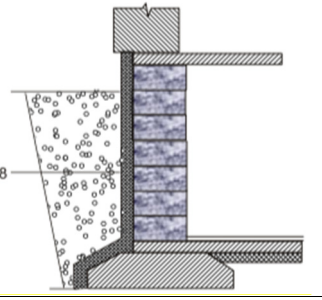
Norėdami išvengti drėgmės grindų izoliaciniame sluoksnyje ir išvengti pelėsių ir grybelio, pogrindžius ir rūsius būtina vėdinti. Šiam tikslui reikia įrengti specialias angas ir oro prapūtimo skyles, per kurias vandens garai išeitų į išorę su vėdinamu oro.

2.2 lentelėje pateiktos technologinės priemonės, kurios užtikrina konstrukcijų apsaugą nuo drėgmės šaltuose ir šiltuose rūsiuose.

2.2 lentelė. Technologinės priemonės, užtikrinančios konstrukcijų apsaugą nuo drėgmės šaltuose ir šiltuose rūsiuose
Table 2.2. Technological measures ensuring construction protection against humidity in warm and cold basements

Konstrukcijos drėkimo priežastis	Apsaugos būdas	Schema
1	2	3
Vandens garų difuzija per perdangą virš šalto rūsio	Garo izoliacijos įrengimas (1) iš šiltos patalpos pusės, virš šilumos izoliacijos (2)	

2.2 lentelės pabaiga

1	2	3
	Rūsio ir pogrindžio ventiliacijos įrengimas, prapučiant (3) cokolyje (4)	
Atmosferiniai krituliai	Nuogrindos įrengimas (5) aplink pastatą 200 mm plačiau nei karnizas	
Gruntiniai vandenys	Hidroizoliacijos įrengimas per visą rūsio aukštį. Esant labai aukštiems gruntiniams vandenims įrengiama apsauginė plytų sienutė (6) aukščiau nei gruntiniai vandenys 500 mm. Rūsio grindų hidroizoliacija (7)	
Kapiliarinis siurbimas	Medžiagų, kurios neįgeria vandens ir išlaiko geras termoizoliacines savybes drėgnoje aplinkoje, naudojimas rūsiams ir pusrūsiams (8).	

Izoliacijos storis parenkamas priklausomai nuo šiluminių charakteristikų pagal medžiagos šilumos laidumo koeficientą (2.3 lentelė.).

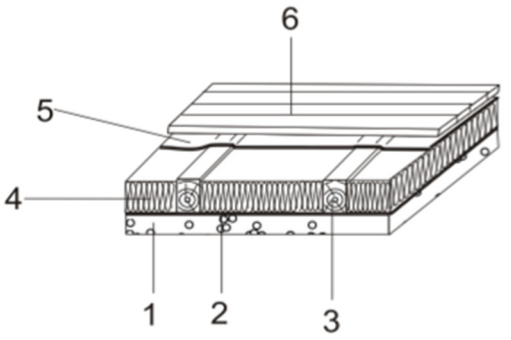
Apšiltinant cokolių perdengimo plokštes šilumos izoliacija klojama ant laikančiųjų plokščių įdedant tarp gulekšnių, kurie klojami ant betoninės plokštės po apačia padedant hidroizoliuojančią medžiagą (2.9 pav.).

Virš šiltinamojo sluoksnio klojamas garų barjeras, kuris neleidžia sudrėkti termoizoliacijai vandens garais, esančiais viduje. Garo izoliacinė medžiaga perdengiama ne mažiau kaip 100 mm ir siūlės suklijuojamos specialia lipnia juosta, siekiant užtikrinti sandarumą.

Folijos garų izoliacinės medžiagos įrengiamos blizgiu paviršiumi į šiltos patalpos pusę. Šiuo atveju virš garų barjero turi būti nedidelis oro tarpas.

2.3 lentelė. Termoizoliacijos sluoksnio nustatymas apšiltinant cokolines plokštes
Table 2.3. Insulation of plinth panels for thermal Insulation layer identification

Izoliacijos šilumos laidumo koeficientas, W/(m×°C)	0,035	0,04	0,044	0,045–0,046	0,04 – 0,049	0,005
Šilumos izoliacijos storis, mm	130	150	160	170	180	190



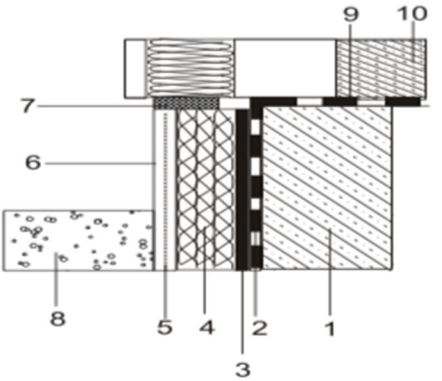
1 – perdangos plokštė;
2 – hidroizoliacija;
3 – medinis gulekšnis;
4 – termoizoliacija;
5 – garo izoliacija;
6 – lentos arba grindų pagrindas

2.9 pav. Cokolių perdangos plokštės šilumos izoliacija
Fig. 2.9. Thermal insulation of the joist of plinth

Cokolio šiltinimas. Cokolyje įrengiama horizontalioji hidroizoliacija, ji užkerta kapiliarinę drėgmę, kuri drėkina rūsio sienas ir cokolio perdangą. Cokolis yra nuolatos veikiamas drėgmės, todėl jo konstrukcijai naudojamos tankios medžiagos – sunkiojo betono blokai, keraminės plytos ir t. t. Apdailai naudojamas tinkuojamasis mišinys cemento pagrindu, apšiltinimui (jei yra šildomas rūsys) dažniausiai naudojamas ekstruzinis polistirenas, kurio vandens absorbcija yra artima nuliui ir termoizoliacinės savybės drėgnoje aplinkoje didelės. Cokolio termoizoliacija turi atitikti tuos pačius reikalavimus kaip ir išorinės sienos. Termoizoliacijos storis imamas iš 2.4 lentelės.

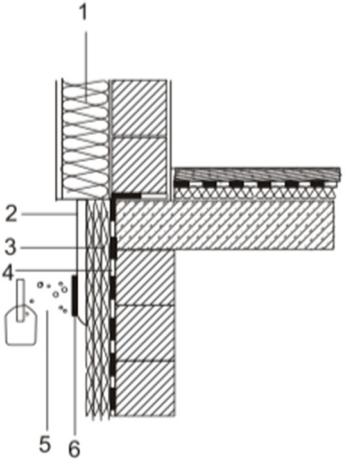
2.4 lentelė. Cokolio termoizoliacijos reikalavimai
Table 2.4. Plinth thermal insulation requirement

Termoizoliacijos šilumos laidumo koeficientas, W/(m×°C)	0,03	0,035	0,04	0,045
Termoizoliacijos storis, mm	90	110	120	130



1 – pamatas;
2 – vertikali rūsio hidroizoliacija;
3 – klijavimo mastika;
4 – ekstruzinis polistirenas;
5 – armavimo tinklelis;
6 – išorinis tinko sluoksnis;
7 – sandarinimo juosta;
8 – drenažo sluoksnis (žvyras);
9 – horizontali hidroizoliacija;
10 – cokolio perdangos plokštė

2.10 pav. Cokolio apšiltinimas
Fig. 2.10. Plinth heat-insulation



1 – sienos išorinės termoizoliacijos sistema;
2 – cokolinis tinkas;
3 – ekstruzinis putų polistirenas;
4 – pamato hidroizoliacija;
5 – žvyras;
6 – bituminės mastikos hidroizoliacija.

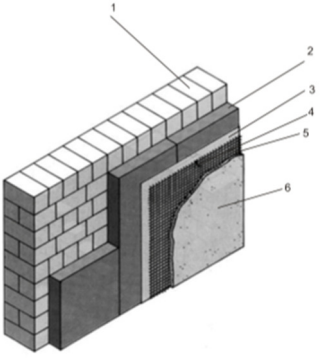
2.11 pav. Cokolio šilumos izoliacijos apsauga nuo išorės poveikių
Fig. 2.11. Plinth insulation protection from the external factors

2.5.2. Pasyvių namų sienos

Siekiant išsaugoti šilumą, neužtenka vien tik apšiltinti ir pasiekti reikiamą atitvaros varžą. Svarbu technologiškai gerai įrengti sienos konstrukciją, nes net 25–30 % pastato defektų atsiranda išorinėse sienose dėl savojo svorio, perdangų, stogo atlaikymo, vėjo poveikio, jėgos, atsirandančios dėl nevienodo pamatų sėdimo, temperatūrinės ir drėgminės deformacijos, saulės radiacijos, atmosferinių kritulių, oro ir temperatūros kaitos ir t. t.

Visapusiška šilumos izoliacijos sistema. Visapusiška šilumos izoliacijos sistema (2.12 pav.) gali būti naudojama tiek naujai statybai, tiek esamų pastatų renovacijai ar kapitaliniam remontui.

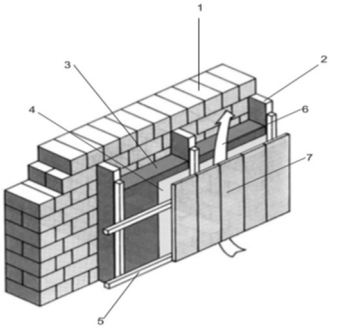
Tai tinka įvairiems fasadų tipams nuo stipriai pažeistų plytų fasadų iki tinkuotų. Ant išorinio sienos paviršiaus klijuojamas termoizoliacinių medžiagų sluoksnis, kuris toliau prie sienos pritvirtinamas kaiščiais, sustiprinama armavimo tinkleliu ir padengiama plonasluoksniu tinku.



1 – išorinė siena,
2 – šilumą izoliuojančios plokštės;
3 – tinko sluoksnis;
4 – mechaninio tvirtinimo elementas;
5 – armavimo sluoksnis,
6 – išorinis tinkas

2.12 pav. Termoizoliacijos kompleksinė sistema (termokevalas)
Fig. 2.12. Thermal insulation complex system

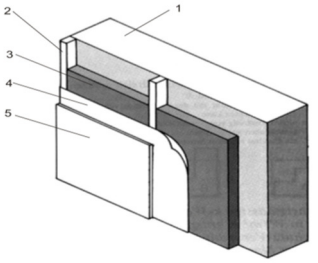
Pakabinamieji ventiliuojami fasadai. Ventiliuojami fasadai su oro judėjimo sistema (2.13 pav.) įrengiami kaip plytų fasadai. Jie yra veikiami saulės spindulių, lietaus ir vėjo, stiprios erozijos, tad būtina atkreipti dėmesį į fasado apdailą. Ventiliuojami fasadai konstrukciškai sudėtingesni, jų projektavimas yra daug laiko atimantis procesas, todėl jie yra brangesni nei tinkuojamo tipo fasadai. Tačiau jų privalumas tas, kad yra siūloma daugiau įvairesnių architektūros galimybių nei prieš tai minėta sistema.



1 – išorinė siena;
2 – vertikalūs mediniai tašeliai;
3 – šilumą izoliuojančios plokštės;
4 – difuzinė plokštė;
5 – mediniai horizontalūs tašeliai;
6 – vėdinimo plyšys;
7 – išorinė medinė apdaila

2.13 pav. Ventiliuojamas fasadas
Fig. 2.13. Ventilated facade

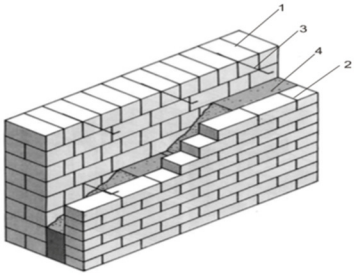
Išorinės sienos šiltinimas iš vidinės pusės. Išorinės pastato sienos šiltinimo įrengimo iš vidinės sienos pusės schema parodyta 2.14 paveiksle. Naujos statybos atveju paprastai teikiama pirmenybė išorinei šilumos izoliacijai dėl to, kad šilumos izoliacija iš vidinės pusės užima kambario plotą. Tačiau variantas, kai šilumos izoliacija montuojama iš sienos vidinės pusės, puikiai tinka pastatams, kurie yra architektūros paminklai arba tiesiog turi gražius, gerai išsilaikiusius fasadus. Šis variantas turi būti pasirinktas tik tais atvejais, kai pastatą apšiltinti iš išorės neįmanoma.



1 – išorinė siena;
2 – vertikalūs mediniai tašeliai;
3 – šilumos izoliacija;
4 – garo izoliacija;
5 – vidinė apdaila

2.14 pav. Vidinė išorinės sienos termoizoliacija
Fig. 2.14. Internal thermal-insulation of the external wall

Tarpo tarp sienų izoliacija. Dvigubos sienelės su vertikaliu oro tarpu (2.15 pav.) dažnai pasitaiko mūsų krašte, jos taip pat buvo nemažai paplitusios ir šiaurinėje Vokietijoje. Toks dviejų sienelių sprendinys leidžia įdėti papildomą šiluminės izoliacijos sluoksnį tarp sienų, įpurškiant sandarinimo medžiagos, taip siekiama pašalinti oro tarpus. Esant naujai statybai tarpą tarp mūro sienų rekomenduojama užpildyti statybos metu nedelsiant. Kaip parodė praktika, jei po rekonstrukcijos ar kapitalinio remonto esamų pastatų išorinės sienos sveikos (nėra įtrūkių) ir difuziškai paviršius pralaidus (nenaudojama garams nelaidžių klinkerio plytų arba dažų), išorinei sienai ventiliacija nereikalinga.



1 – vidinis mūro sluoksnis;
2 – išorinis mūro sluoksnis;
3 – metaliniai inkarai;
4 – birioji šiltinimo medžiaga

2.15 pav. Dvisluoksnio mūro vidinė izoliacija
Fig. 2.15. Internal insulation of the double layered masonry

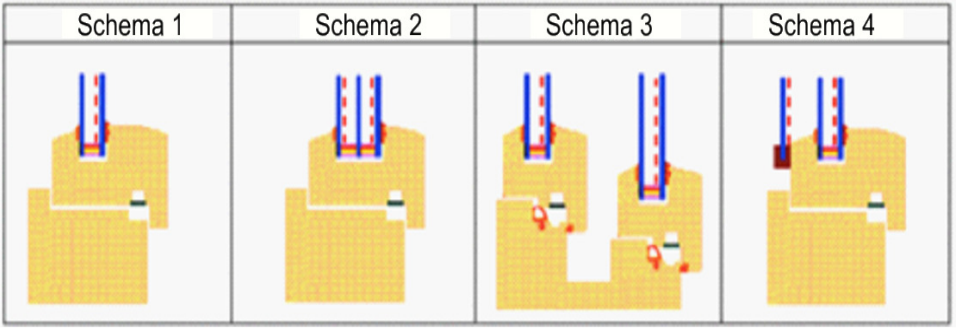
2.5.3. Pasyviems namas naudojami langai

Stiklinimo kokybė akivaizdžiai yra svarbesnė nei naudojamo stiklo kiekis (stiklo su bendru plotu santykis) (Feist 1994). Pabrėžtina, kad nėra būtina bet kokia kaina pasyvų namą stiklinti dideliais plotais iš pietinės pusės (Bliūdžius *et al.* 2007).

2.5 lentelėje ir 2.16 paveiksle pateikiamas galimi įstiklinimo tipai, kurie tinka pasyviems namams (schemose 1–4 punktyrine raudona linija parodomos mažos emisijos dangų vietos).

2.5 lentelė. Galimi stiklinimo būdai
Table 2.5. Possible ways of glazing

Eil. Nr.	Stiklinimo tipas	Stiklinimo šilumos perdavimo koeficientas U_g, W/(m^{2}K),	Saulės energijos pralaidumo koeficientas g, %
1	Du stiklai su viena mažos emisijos danga / argonas (šis tipas esant dideliems stiklinimo plotams netinkamas pasyviems namams)	1,1–1,4	55–68 %
2	Trys stiklai su dviem mažos emisijos dangomis, 2×11 mm/kriptonas	0,5–0,7	45–57 %
3	Dvigubas langų rėmas, du stiklo paketai su dviem stiklais (2×2 stiklai) su viena mažos emisijos danga kiekvienam / argonas	0,6	47 %
4	Du stiklai su viena mažos emisijos danga / argonas, ir prieš juos – vienas stiklas su kieta danga (k stiklas)	0,8	50 %



2.16 pav. Galimi stiklinimo variantai
Fig. 2.16. Possible version of glazing

Įstiklinimas, tinkamas pasyviems namams, leidžia šaltomis žiemos dienomis sukurti teigiamą balansą tarp gaunamos saulės energijos ir šilumos nuostolių per stiklą.

Netgi šaltuoju laikotarpiu ant vidinio stiklo paviršiaus ilgą laiką temperatūra yra tokia, kad dėl spinduliavimo ar konvekcijos nesusidaro koks nors reikšmingas šilumos iš patalpų nuostolis, kuris galėtų sukelti diskomfortą.

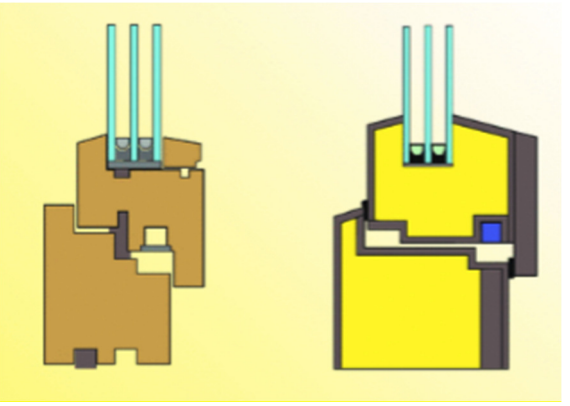
Pasyvaus namo:

- stiklinimo komforto kriterijai: $U_g < 0{,}8$ W/(m^{2}K);
- energiniai stiklinimo kriterijai: U_g – 1,6 W/(m^{2}K); $g < 0$.

Pasyviam namui reikia montuoti tokius langų rėmus, kad $U_g = 0{,}7$ W/(m^{2}K) į lango rėmą vidutiniškai šilumos perdavimo koeficientas U_w pasiekia vertę <0,8 W/(m^{2}K) (EN 10077 pagal metodą). Šio kriterijaus pagrindimas tiesiogiai išplaukia iš komforto sąlygų. Be kita ko, statybos projektuose turėtų būti apibrėžta, kaip užtikrinti langų montavimą be šiluminių tiltelių pasyvių pastatų išorinėse sienose.

Pasyvaus lango rėmo parinkimo kriterijai. Kai lango šilumos laidumo koeficientas $U_g = 0{,}7$ W/(m^{2}K), efektyvus lango šilumos laidumo koeficientas, įvertinant montavimą sienoje, $U_{w,eff} < 0{,}85$ W/(m^2 K).

Palyginimui – pasyvaus namo stiklinimo su standartiniais mediniais langais (kairėje) U_w vertė didesnė nei 1,09 W/(m^{2}K); naudojant aukštų izoliacinių savybių lango rėmus pasyviems namams (dešinėje), lango U vertė mažesnė nei 0,8 W/(m^{2}K) (2.17 pav.).

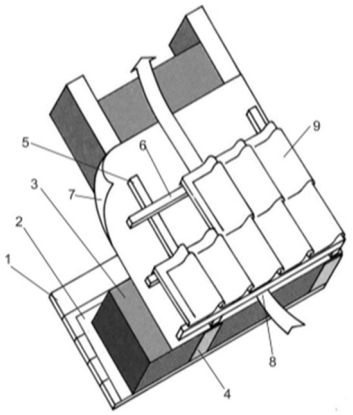


2.17 pav. Palyginimas (scheminis): pasyvaus namo stiklinimas su standartiniais mediniais langais (kairėje) ir aukštų izoliacinių savybių langais (dešinėje)
Fig. 2.17. Comparison (schematic): passive house glazing house with standard wooden windows (to the left) and high insulating features window for passive houses (to the right)

2.5.4. Pasyvių namų stogas

Stogas yra konstrukcijos pastato dalis, iš viršaus atskirianti pastatą nuo išorinės aplinkos, kaip ir vertikalios konstrukcijos. Konstrukciniu požiūriu stogas susideda iš kelių elementų, kurie turi funkcionuoti kompleksiškai. Tie elementai yra: laikančioji konstrukcija, garo izoliacija, šiluminė izoliacija, vėdinama ertmė (santykinai), apatinė stogo dangos konstrukcija, stogo danga. Jei visi išvardyti elementai yra patikimai įrengti ir tinkamai suderinti, stogas bus tvirtas ir ilgaamžis (Barkauskas, Stankevičius 1998). Projektuojant pasyvaus namo stogą, jokių apribojimų nėra. Jis gali būti plokščiasis, t. y. eksploatuojamas, neeksploatuojamas ir apželdintas arba šlaitinis. Stogo konstrukcijoms gali būti naudojamos įvairios medžiagos, tik jos turi derėti tarpusavyje ir šilumos perdavimo koeficientas neturi viršyti 0,10 W/m^2K.

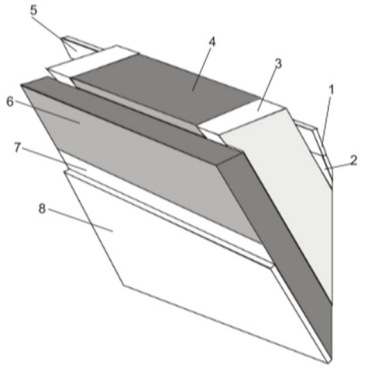
Jei palėpė dar neįrengta, stogo šlaitų termoizoliacinį sluoksnį geriausia įrengti tarp gegnių iš vidaus (2.18 pav.). Jei stogo danga turi būti atnaujinta (pakeista), šilumą izoliuojančią medžiagą galima įrengti iš išorės. Jeigu stogo būklė yra gera ir verta išsaugoti, taip pat interjeras irgi yra geras, izoliacija gali būti įrengta įšvirkščiant šilumą izoliuojančias medžiagas tarp gegnių. Bet kokiu atveju turėtų būti išsaugotas vėdinimas tarp stogo dangos ir palėpės.



1 – vidinė apdaila;
2 – garo izoliacija;
3 – termoizoliacija;
4 – gegnės;
5 – vertikalūs grebėstai;
6 – horizontalūs grebėstai;
7 – papildoma hidroizoliacija;
8 – ventiliuojamas tarpas;
9 – stogo danga (čerpės)

2.18 pav. Stogo šlaitų šiltinimas montuojant termoizoliaciją tarp gegnių
Fig. 2.18. Roof slopes insulation installing the thermal-insulation between rafters

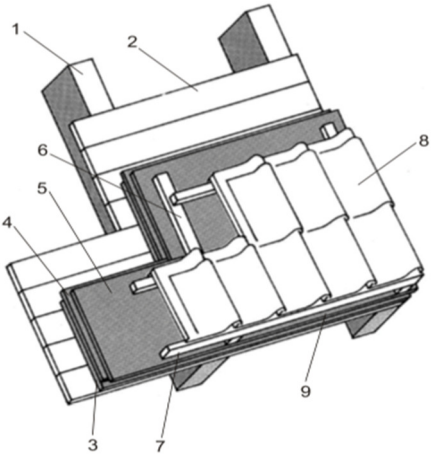
Stogo šlaitų termoizoliacija po gegnėmis. Stogo šlaitų termoizoliacija po gegnėmis (2.19 pav.) rekomenduojama kaip papildoma termoizoliacija. Vis dėlto pagrindinė termoizoliacija turi būti įrengta tarp gegnių (prieš tai buvęs pavyzdys). Papildomas šiluminės izoliacijos sluoksnis sumažina šilumos tiltelių įtaką, kuri vis dar lieka įrengus šilumos izoliaciją tarp gegnių.



1 – stogo danga;
2 – ventiliuojamasis tarpas;
3 – gegnės;
4 – tarpgegninė termoizoliacija;
5 – papildoma hidroizoliacija;
6 – papildoma vidinė termoizoliacija;
7 – garo izoliacija;
8 – vidinė apdaila

2.19 pav. Stogo šlaitų termoizoliacija po gegnėmis
Fig. 2.19. Roof slopes thermal-insulation under rafters

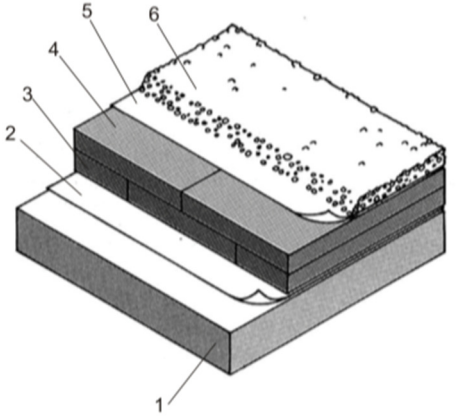
Termoizoliacijos virš gegnių įrengimas. Termoizoliacija, įrengta virš gegnių, gali būti papildoma arba alternatyva termoizoliacijai, įrengtai tarp gegnių (2.20 pav.), o tai bet kuriuo atveju reikalauja stogo dangos ardymo. Šis sprendimas leidžia iš esmės pašalinti šilumos tiltelius, be to, neizoliuotos gegnės gali būti naudojamos kaip dekoratyviniai elementai palėpės interjere.



1 – gegnės;
2 – vidinė apdaila;
3 – garo izoliacija;
4 – šiltinimas;
5 – papildoma hidroizoliacija;
6 – vertikalūs grebėstai;
7 – horizontalūs grebėstai;
8 – stogo danga;
9 – ventiliuojamas tarpas

2.20 pav. Termoizoliacijos virš gegnių įrengimas
Fig. 2.20. Installing thermal-insulation above rafters

Plokščiojo stogo šiltinimas. Jei rekonstrukcijos metu reikia pakeisti neventiliuojamo plokščiojo stogo dangą, tai galima padaryti įrengiant papildomą šilumą izoliuojantį sluoksnį (2.21 pav.). Norint padidinti šilumos izoliaciją, galima papildomai sukloti termoizoliacinį sluoksnį ir tada apsaugoti jį nuo vėjo poveikio užpilant žvyro užpildo sluoksniu.



1 – gelžbetoninė plokštė;
2 – postoginė hidroizoliacija;
3 – šilumą izoliuojančios plokštės;
4 – papildoma šilumos izoliacija;
5 – stogo hidroizoliacija;
6 – žvyro sluoksnis

2.21 pav. Plokščiojo stogo šiltinimas
Fig. 2.21. Flat roof insulation

2.5.5. Vėdinimo sistema

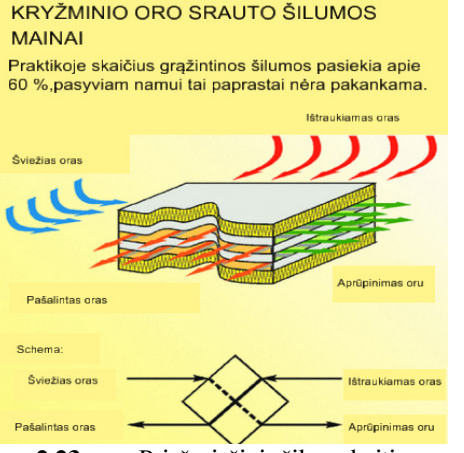
Grynas oras – tai geros savijautos ir gebėjimo laikytis patalpų mikroklimato higienos reikalavimų garantas. Natūralus vėdinimas oru, patenkančiu per nesadarumus ir plyšius, negali tinkamai sudaryti reikiamos oro apykaitos, nes tokia ventiliacija priklauso nuo gamtinių veiksnių, kurie yra nepastovūs. Nesandaraus pastato viduje esant stipriam vėjui susidaro skersvėjai, o ramiu oru šviežio oro kiekis tame pačiame pastate dažnai yra nepakankamas.

Max Joseph von Pettenkofer XX a. pradžioje pastebėjo, kad CO_2 esančio ore kiekis gali būti gero vėdinimo kriterijus. Dauguma vartotojų pripažįsta, kad oro kokybė yra gera, kai šis kriterijus yra mažesnis nei 0,1 %. Didžiausias CO_2 šaltinis yra žmogus, todėl, norint užtikrinti šviežią orą patalpose, per valandą vienam asmeniui turi pritekėti apie 25–30 m^3 šviežio oro.

Nepastoviais gamtiniais reiškiniais neįmanoma užtikrinti reikiamos ventiliacijos. Mažai energijos reikalaujantiems pastatams kaip variantą galima rekomenduoti šį paprastą sprendinį: įrengiamas pastovus nedidelis ventiliatorius orui ištraukti iš drėgnų patalpų (voniose, tualetuose ir virtuvėse), tai turi tiksliai atitikti reikiamą vartojamo oro kiekį. Jei pastato kevalas sandarus, šviežio oro srautas sklinda į bendrus kambarius, valgomuosius, vaikų kambarius ar miegamuosius per šiam tikslui skirtus kanalus sienose. Tam, kad būtų pasiektas geras mikroklimatas, turi būti sumontuoti patalpos ortakiai, jei įmanoma, aukščiau virš šildymo įrenginių. Ši vėdinimo sistema yra palyginti nebrangi, veiksminga ir gana paprasta.



2.22 pav. Paprasto, kryžminio, šilumos rekuperatoriaus schema
Fig. 2.22. Regular, cross, thermal recuperator scheme



2.23 pav. Priešpriešinis šilumokaitis
Fig. 2.23. Counter flow heat exchangers

Mažai energijos vartojančiuose pastatuose yra leidžiami nedideli šilumos nuostoliai dėl ventiliacijos, tačiau pasyviems pastatams tai nepriimtina.

Pavyzdžiui, galima apskaičiuoti šilumos nuostolius su vidutiniu šviežio oro debitu 120 m^3/h šeimai, susidedančiai iš keturių žmonių, gyvenančių 120 m^2 bute. Tarkim, metiniai šilumos nuostoliai, kurie susidaro dėl vėdinimo įrenginių, 28 kWh/m – tik vienas šis dėmuo yra gerokai didesnis už leidžiamą pasyvaus namo šilumos energijos suvartojimą šildymui, todėl reikia parinkti labai efektyvų šilumokaitį. Vėdinimo sistemų pastatuose, kuriuose suvartojama mažai energijos, montavimo patirtis rodo, kad pastatai turėtų turėti labai sandarų kevalą.

Rekuperatoriaus šilumos grąžinimo (efektyvumas) dalis turi būti daugiau nei 75 %. Tada šilumos nuostoliai yra maži. Šilumos grąžinimas daugiau nei 75 % yra pasiekiamas naudojant kombinuotus kryžminio srauto šilumokaičius (2.22 pav.) arba naudojant priešpriešinio srauto šilumokaičius (2.23 pav.). Šiuo metu rinkoje galima rasti tik keletą sistemų, atitinkančių šiuos reikalavimus. Elektros energijos sąnaudos vėdinimui turi būti nedidelės – tai taikoma patiems ventiliatoriams, taip pat prietaiso valdymui.

Kontrolinė vertė turėtų būti 0,3–0,45 W bendros galios į norimą 1 m^3 oro per valandą. Tokia maža elektros energijos suvartojimo vertė pasiekiama optimizuojant visą sistemą ir naudojant labai efektyvius ventiliatorius su vienodu srautu.

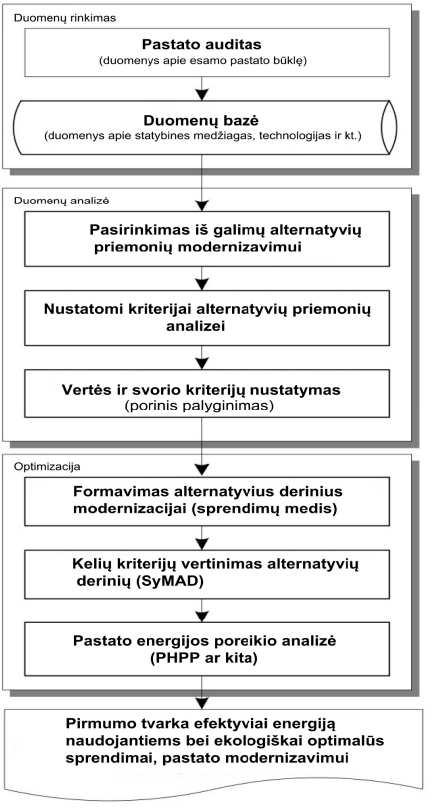
2.6. Sprendimų modelis

Sprendimų priėmimas remiasi daugeliu kriterijų ir jų sintezių skaičiavimo analize, kuri yra reikalinga kelių problemų integracijai į darnią visumą (Šarka *et al.* 2008). Sintezės sprendimų priėmimo samprata naudojama skaičiuojamuose tyrimuose (Srdjevic, Srdjevic 2013; Liaudanskienė *et al.* 2012; Simanavičienė *et al.* 2012; Simanavičienė, Ustinovichius *et al.* 2012) Sprendimų priėmimas naudojant sintezės metodus reikalauja žingsnis po žingsnio parinkti efektyviausią iš sudaryto alternatyvaus rinkinio. Modernizavimo priemonių alternatyvaus derinio atrankai naudojamas sprendimų modelis pateiktas 2.24 paveiksle.

Pastatų ir energijos ekspertai atlieka statinio auditą ir surenka duomenis pastato būklei nustatyti. Surinkti duomenys kartu su statybinių medžiagų, technologijų ir kita informacija kaupiami duomenų bazėje.

Vėliau iš surinktų duomenų sprendžiami modernizacijos klausimai atsižvelgiant į pastatų energijos suvartojimą, statybinių konstrukcijų ir specifinių problemų būklės analize.

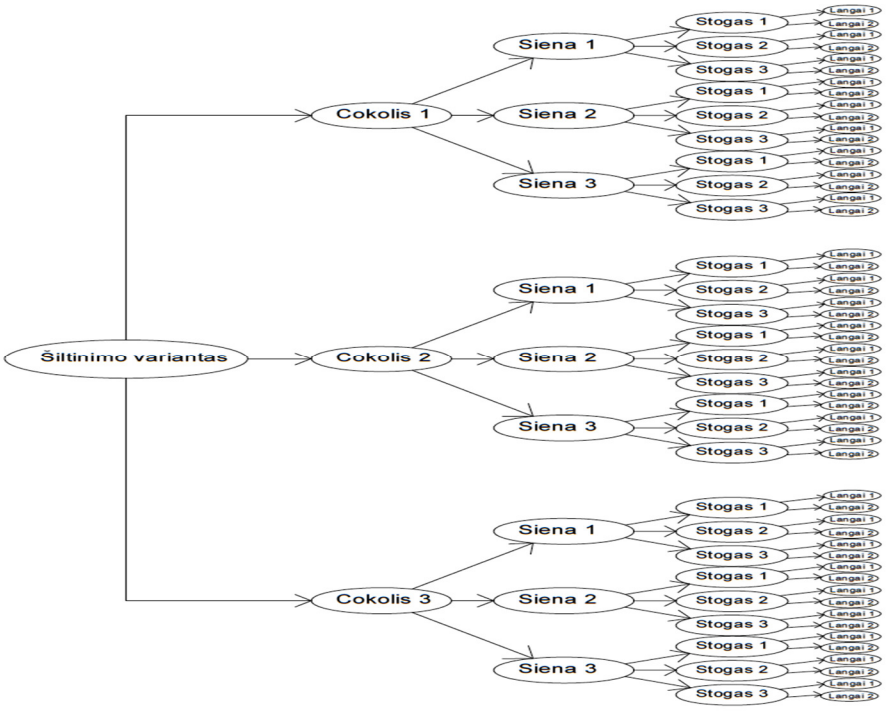
Ekspertai kartu su pastatų valdytojais nustato alternatyvių modernizavimo priemonių kriterijus. Ekspertai, naudodami porinius lyginimus, nustatyto dydžių ir svorių kriterijus.



2.24 pav. Siūlomas sprendimo modelis
Fig. 2.24. The proposed decision model

Buvo formuoti alternatyvūs modernizavimo priemonių deriniai, naudojant sprendimų medžio modelį (2.25 pav.). Šis modelis nustato izoliacijos galimybių derinius cokoliui, sienoms ir stogui. Keletas variantų gali būti naudojami deriniuose. Daugiakriteriai alternatyvų vertinimo deriniai siūlomi atrinkti taikant SyMAD-3 metodą, nes jis priklauso sintezės metodų grupei ir leidžia žingsnis po žingsnio pasirinkti efektyviausią variantą iš sudarytų alternatyvų. Sprendimų medis generuoja daug alternatyvių derinių. Siekiant sumažinti statinio energijos poreikio skaičiavimus, analizė atliekama pasitelkiant alternatyvių prioritetų eiliškumą. Statinio energijos poreikio analizė rodo, kokie alternatyvūs deriniai, taikomi modernizuoti, turės įtakos statinio energijos suvartojimui. Sprendimų

priėmėjas parenka geriausią alternatyvą, kuri atitinka efektyvumo rodiklių reikšmes, tokias kaip energijos suvartojimas, mokėjimų išlaidis ir kiti rodikliai.



2.25 pav. Sprendinių medžio fragmentas naudojamas alternatyvių derinių atrankai modernizavimo priemonėmis
Fig. 2.25. A fragment of decision tree used for selection of alternative combinations of modernization measures

2.7. Efektyvumo rodiklių rinkiniai

Veiksniai, lemiantys administracinių pastatų atnaujinimo būtinumą, yra susiję su problemomis, kurių yra kiekviename konkrečiame pastate. Nors problemos yra unikalios kiekvienu konkrečiu atveju, tyrimai rodo, jog dažniausiai pasitaikančios yra šios: patalpų temperatūra yra per maža arba per didelė, grindų temperatūra yra per žema, santykinis oro drėgnumas yra per mažas arba per didelis, patalpų oro srautas yra per didelis, anglies dioksido koncentracija patalpose yra per didelė, didelis energijos suvartojimas šildymui, karšto vandens ir elektros gamyba, didelis fizinis statybinių konstrukcijų, langų, durų,

inžinerinių sistemų nusidėvėjimas, prasta pastatų išorės išvaizda. Pasirinkti rodikliai visuomeniniams pastatams modernizuoti pateikti 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Nustatomi efektyvumo rodikliai, analizuojant alternatyvias modernizavimo priemones
Table 2.5. Criteria for the analysis of alternative measures of modernization

Kriterijai	Matavimo vienetai
Šilumos perdavimo koeficientas	W/m^2K
Modernizavimo kaina	EUR
Prognozuojamas priemonės gyvavimo laikas	m.
Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą	balai
Metiniai sutaupymai	$kWh/m^2/m$
Paprastasis atsipirkimo laikas	m
Konstrukcijos storis*	mm

* Taikoma tik cokoliui, išorinėms sienoms ir stogui.

2.8. Rodiklių reikšmingumų nustatymas

Efektyvumo rodiklių reikšmingumas nustatomas taikant porinio lyginimo metodą. Skaitinės rodiklių subjektyvių reikšmingumų reikšmės $q_j\,(j=\overline{1,n})$ nustatomos sprendžiant optimizavimo uždavinį:

$$\min\left\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(b_{ij}\overline{q}_j-\overline{q}_i\right)^2\right\}, \tag{2.1}$$

čia b_{ij} – ekspertų poriniai rodiklių R_i ir R_j lyginimas; $i, j=\overline{1,n}$. Šis rodiklis reiškia i-tojo ir j-ojo rodiklių eksperto įvertinimų reikšmingumų santykį, t. y.:

$$b_{ij}=\frac{\overline{q_i}}{\overline{q_j}}. \tag{2.2}$$

Taigi, naudojant porinio lyginimo matricas, surinkta informacija buvo susisteminta ir, atlikus skaičiavimus, kiekvienai pastato konstrukcinei daliai buvo nustatyti reikšmingumai ir pagal svarbą išrikiuoti rodikliai. Rezultatai pateikti 3.4–3.6 lentelėse. Suderinamumas buvo nustatytas pakankamas.

2.9. Pastato konstrukcijų modernizavimo sprendimų sintezės metodas SyMAD-*3*

Sprendimo priėmimas – tai yra siekiamo tikslo procesas, nustatantis galimas alternatyvas, surenkant informaciją apie atitinkamus kriterijus ir parenkant optimaliausias alternatyvas. Priimant sprendimą nepatikima taikyti tik vieną kriterijų, nes problemos būna paprastai sudėtingos dėl įvairios informacijos apie svarstomą objektą ir dažnai turi prieštaringų tikslų sprendimų priėmėjams. Rasti tinkamą sprendimą dėl sudėtingos problemos gali būti iššūkis, jei atitinkamų įrankių nėra. Kiekvienas modelis gali būti vertinamas taikant įvairių kriterijų metodiką, todėl rezultatai gali būti naudingi ir praktiški (Zolfani *et al.* 2015). Šiame darbe tokiam uždaviniui spręsti pateikiamas daugiapakopis daugiatikslių sprendimų sintezės metodas – SyMAD-3 (Simanavičienė *et al.* 2012.). Šis metodas skirtas sujungti daugiatikslius sprendimus (atskirų konstruktyvų modernizacijos sprendimus) į vieną sprendimą. Autoriai įsitikinę, šis metodas labai tinka vertinant modernizuojamo pastato patikimumą. Sprendimo patikimumui padidinti taikomi trys kiekybiniais matavimais pagrįsti daugiatiksliai sprendimo priėmimo metodai. Pateikto metodo algoritme taikomi šie metodai: efektyvumo rodiklių integruoto reikšmingumo nustatymo ir daugiatikslio sprendimo priėmimo: COPRAS (Zavadskas, Kaklauskas 1996), TOPSIS (Yoon, Hwang 1981) ir SAW (MacCrimmon 1968). Sprendimo patikimumui padidinti taikomi trys kiekybiniais matavimais pagrįsti daugiatiksliai sprendimo priėmimo metodai.

Projektų daugiakriterio kompleksinio proporcingumo įvertinimo metodas (COPRAS) (Zavadskas *et al.* 2004; Kaklauskas *et al.* 2006). Pagal šį metodą nagrinėjamas prioritetiškumas ir reikšmingumas tiesiogiai ir proporcingai priklauso nuo alternatyvas adekvačiai apibūdinančių rodiklių sistemos, efektyvumo rodiklių reikšmių ir jų reikšmingumų dydžių. Rodiklių sistemą nustato, o rodiklių reikšmes ir pradinius reikšmingumus apskaičiuoja ekspertai. Visą šią informaciją gali pakoreguoti suinteresuotos grupės (užsakovas, vartotojas ir pan.), atsižvelgdamos į savo siekiamus tikslus ir esamas galimybes. Todėl alternatyvų įvertinimo rezultatai išsamiai pateikia ekspertų ir suinteresuotų grupių bendrai pateiktus pradinius duomenis. Šiuo metodu nustatomas projektų prioritetiškumas taikant šią formulę:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-\min} \cdot \sum_{i=1}^{m} S_{-i}}{S_{-i} \cdot \sum_{i=1}^{m} \frac{S_{-\min}}{S_{-i}}}, i = \overline{1, m}, \tag{2.3}$$

čia lyginamų variantų santykinis reikšmingumas (efektyvumas) nustatomas pagal juos apibūdinančias teigiamas (projekto „pliusais“) S_{+i} ir neigiamas (projekto „minusais“) S_{-i} savybes. Kuo didesnis Q_i, tuo didesnis projekto efektyvumas (prioritetiškumas).

Variantų racionalumo nustatymas artumo idealiajam taškui metodu (TOPSIS). Yoon ir Hwang (1981) sukūrė variantų prioritetiškumo nustatymo metodika pagrįstą koncepcija, kad optimali alternatyva turi mažiausią atstumą nuo idealaus sprendimo ir didžiausią atstumą nuo idealiai blogiausio sprendimo. Šis metodas vadinamas variantų racionalumo nustatymu artumo idealiajam taškui metodu (TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Nustatomas kiekvieno *i*-tojo varianto santykinis atstumas iki idealaus:

$$K_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-} \qquad i = \overline{1,m}, \quad \text{kai } K_i \in [0;1], \tag{2.4}$$

čia L_i^+ – atstumas tarp lyginamojo *i*-tojo ir idealiai geriausio varianto; L_i^- – atstumas tarp lyginamojo *i*-tojo ir neigiamai idealaus varianto. Kuo K_i reikšmė artimesnė vienetui, tuo *i*-tasis variantas artimesnis a^+, t. y. racionalus variantas bus tas, kurio K_i reikšmė didžiausia.

Variantų racionalumo nustatymas paprastuoju sudedamuoju svėrimo (SAW) metodu. Paprastasis sudedamasis svėrimo metodas (SAW – *Simple Additive Weighting*) žinomas geriausiai, yra vienas iš paprastesnių ir plačiausiai taikomas. Metodo taisykles apibendrino MacCrimonas (MacCrimmon 1968).

Nustatant varianto racionalumą, atitinkami normalizuotosios matricos nariai dauginami iš reikšmingumų ir sumuojami. Racionalaus varianto sandaugų suma bus maksimali:

$$A = \left\{ A_i \middle| \max_i \sum_{j=1}^{n} \overline{q}_j \, \overline{x}_{ij} \middle/ \sum_{j=1}^{n} \overline{q}_j \right\}, \tag{2.5}$$

čia $\overline{x}_{ij}$ – normalizuota sprendimų priėmimo matrica.

Metodo SyMAD-3 apibrėžimas. Pateikto metodo paskirtis – daugiatikslių sprendimų sintezė, taikant tris daugiatikslius sprendimo metodus (Simanaviciene *et al.* 2012, 2014). Pateiktas daugiapakopis sprendimų medžio modelis vaizduoja sprendimų, priklausančių skirtingoms pakopoms, analizės struktūrą. Sprendimų analizės medžio diagrama aprašoma toliau pateikta notacija:

- sprendimų analizės pakopų aibė $K = \{k\}$, (k = 1, 2, ..., c), k – pakopos numeris, c – pakopų skaičius;
- kiekvienoje pakopoje esančių sprendimų medžio mazgų skaičius – m_k (k = 1, 2, ..., c) nustatomas atsižvelgiant į sprendimų lentelių skaičių;

– sumodeliuoto sprendimų medžio šakų, kurios jungia šakninį mazgą su galiniu mazgu (vadinamu lapu), skaičius: $z = m_c$, čia m_c – paskutinės sprendimų medžio pakopos mazgų skaičius. Medžio šakų skaičius – tai alternatyvių kombinacijų skaičius.

Turint sprendimų analizės modelį ir reikiamus duomenis, galima pradėti racionalaus sprendimo nustatymo procesą, t. y. pasirinkus atitinkamą algoritmą, nagrinėjamas alternatyvas išrikiuoti pagal racionalumą. Autorė tokiam uždaviniui spręsti pateikia naują daugiapakopį daugiatikslių sprendimų sintezės metodą SyMAD-3. Pateikto metodo algoritmą sudaro II etapai.

I sprendimo etapas skirtas uždaviniui formuluoti, skaičiavimo duomenims paruošti ir pirminiam alternatyvų įvertinimui atlikti. Šį etapą sudaro šeši žingsniai:

1. Sprendimo etapų nustatymas, efektyvumo rodiklių sistemos kiekvienai sprendimo medžio pakopai $K = \{k\}$, (k = 1, 2, …, c) formavimas. Kiekvienoje sprendimo pakopoje sudaromos sprendimo lentelės, čia m_k – k-tojoje pakopoje esančių sprendimo lentelių skaičius. Naudojant šias duomenų lenteles formuojamos sprendimų matricos:

$$X_t = \left[x_{ij}^t\right], \left(t = \overline{1, m_k}; i = \overline{1, a_t}, j = \overline{1, n_k}\right), \tag{2.6}$$

čia t – sprendimo lentelės numeris, a_t – t-tosios sprendimų lentelės alternatyvų skaičius; n_k – k-tosios pakopos efektyvumo rodiklių skaičius.

2. Ekspertų porinio palyginimo matricų, naudojamų efektyvumo rodiklių reikšmingumams nustatyti, užpildymas.

$$E = \{p\},\ p = 1, 2, ..., e_p, \tag{2.7}$$

čia E – ekspertų aibė; p – eksperto numeris; e_p – ekspertų skaičius.

3. Porinio palyginimo matricų darnos nustatymas. Tam imama kiekviena matrica ir skaičiuojamas jos suderinamumo laipsnis S:

$$S = \frac{S_I}{S_A}, \tag{2.8}$$

čia S_I – matricos suderinamumo indeksas; S_A – atsitiktinio indekso vidurkis. Jeigu $S < 0{,}1$ – matricos suderinamumas yra pakankamas ir matrica naudojama rodiklių subjektyvaus reikšmingumui nustatyti, jeigu ne – matricos duomenys tolimesniems skaičiavimams nenaudojami (Satty 1994).

4. k-tosios pakopos rodiklių reikšmingumo reikšmių nustatymas. Naudojant ekspertų užpildytas rodiklių porinio palyginimo matricas ir mažiausiųjų kvadratų metodą, apskaičiuojamos rodiklių subjektyvaus

reikšmingumo $\overline{q}_{kj}, \left(j = \overline{1,n}, k = \overline{1,c}\right)$ reikšmės. Remiantis informacija apie rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmes, tikrinamas ekspertų nuomonių dėl rodiklių reikšmingumo suderinamumas, skaičiuojant konkordancijos koeficientą. Jeigu ekspertų nuomonių dėl rodiklių reikšmingumų suderinamumas pakankamas, toliau skaičiuojamos rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmės $q^*_{kj}, (j = \overline{1,n_k}, k = \overline{1,c})$. Jeigu ekspertų nuomonių suderinamumas nepakankamas, svarstoma ekspertų grupės sudėtis. Rodikliai skaičiuojami pakartotinai su atnaujintos ekspertų grupės duomenimis.

5. Naudojant pirmiau sudarytas sprendimo matricas $X_t = \left[x^t_{ij}\right], \left(t = \overline{1,m_k}; i = \overline{1,a_t}, j = \overline{1,n_k}\right)$ ir rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmes $q^*_{kj}, (j = \overline{1,n_k}, k = \overline{1,c})$ alternatyvų racionalumas nustatomas trimis metodais: TOPSIS, SAW, COPRAS.
6. Atlikus skaičiavimus visais trimis metodais, rezultatai pateikiami santykinio reikšmingumo kriterijų pavidalu pagal TOPSIS, SAW ir COPRAS metodus, nesumuojant:

$$(A^i_k[TOPSIS, SAW, COPRAS]) = (R^i_{kT}, R^i_{kS}, R^i_{kC}), \quad (2.9)$$

$k = \overline{1,c},\ i = \overline{1,m_k}$.

II sprendimo etapas skirtas alternatyvioms kombinacijoms sudaryt ir jų racionalumui įvertinti. Naudojant I sprendimo etape gautų alternatyvų, aprašytų sprendimo lentelėmis A_k, racionalumo įvertinimo rezultatus ir sprendimų medžio modelį, sudaromos alternatyvios kombinacijos $B_s, \left(s = \overline{1,z}\right)$. II etapą sudaro trys žingsniai:

7. Alternatyvių kombinacijų duomenys pateikiami vektoriniu pavidalu:

$$B_s = \{\left(R^i_{1,T}, R^i_{1,S}, R^i_{1,C}\right), ..., \left(R^i_{c,T}, R^i_{c,S}, R^i_{c,C}\right) | \\ i = \overline{1,m_k}, k = \overline{1,c}\}, s = \overline{1,z} \quad (2.10)$$

8. Gautos alternatyvios kombinacijos surašomos į sprendimų lentelę (2.4 lentelė), kurios duomenys bus naudojami toliau skaičiuojant.
9. Taikant TOPSIS, SAW ir COPRAS metodus, atliekamas alternatyvių kombinacijų vertinimas. Iš sprendimų lentelėje (2.4 lentelėje) pateiktų duomenų sudaroma sprendimų matrica:

$$Y = [y_{sl}],\ s = \overline{1,z}, l = \overline{1,k \times mt} \quad (2.11)$$

čia *mt* – taikomų metodų skaičius (mūsų atveju *mt* = 3); *k* – pakopos numeris (*k* = 1, 2, ..., *c*). Šiuo atveju *s* – matricos *Y* eilučių skaičius; *l* – matricos *Y* stulpelių skaičius.

$$(y_{sl}) = (R^{i}_{k,Mr}),$$
$$s = \overline{1,z}, l = \overline{1,k \times t}, i = \overline{1,m_k}, k = \overline{1,c}, M_r = \overline{1,t} \tag{2.12}$$

čia M_r – taikomo metodo numeris.

2.6 lentelė. Alternatyvių kombinacijų sprendimų lentelė
Table 2.6. Alternative combinations decision table

Pakopos	I pakopos			...			c-tosios pakopos		
Rodikliai / Alter-natyvos	$R_{[1]}$	$R_{[2]}$	$R_{[3]}$	...	...	...	$R_{[7]}$	$R_{[8]}$	$R_{[9]}$
B₁	$R^{1}_{c,T}$	$R^{1}_{c,S}$	$R^{1}_{c,C}$	...	...	...	$R^{1}_{s,T}$	$R^{1}_{s,S}$	$R^{1}_{s,C}$
B₂	$R^{1}_{c,T}$	$R^{1}_{c,S}$	$R^{1}_{c,C}$	...	...	...	$R^{2}_{s,T}$	$R^{2}_{s,S}$	$R^{2}_{s,C}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
B_z	$R^{n1}_{c,T}$	$R^{n1}_{c,S}$	$R^{n1}_{c,C}$	...	...	...	$R^{n3}_{s,T}$	$R^{n3}_{s,S}$	$R^{n3}_{s,C}$
Min/max	*Max*	*Max*	*Max*	...	...	...	*Max*	*Max*	*Max*

Sudaroma rodiklių, reikalingų matricoje *Y* pateiktoms alternatyvoms įvertinti, aibė: $R = \{R_l\}$, ($l = 1, 2, ..., k \times mt$).

Optimali šio rodiklio reikšmė yra maksimumas ir jų reikšmingumo vertės tai pat, jiems įtakos nedaro nei subjektyvūs, nei objektyvūs faktoriai. Rodiklių reikšmingumo reikšmės turi tenkinti sąlygą:

$$\sum_{l=1}^{k \times mt} w_l = 1, \tag{2.13}$$

čia *k* – pakopų skaičius; *mt* – metodų skaičius.

Atlikus alternatyvių kombinacijų vertinimus minėtais metodais, lentelės pavidalu pateikiami alternatyvių kombinacijų racionalumo įverčiai ir alternatyvių kombinacijų rangai (išrikiavimas pagal svarbą) kiekvieno metodo atžvilgiu (2.6 lentelė). Pateiktas metodas gali būti taikomas įvairiems daugiapakopiams, daugiatiksliams sprendimo priėmimo uždaviniams spręsti, kai

informacija apie alternatyvas pateikta kiekybiniu pavidalu. Nagrinėjamuoju atveju SyMAD-3 metodas taikomas išorinių sienų įrengimo sprendimų analizei ir sintezei.

2.10. Antrojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad hermetiškumas yra viena iš pagrindinių sąlygų administracinių pastatų energiniam efektyvumui užtikrinti.
2. Nustatyta komforto sąlygų ir termoizoliacijos sąsaja. Tai leidžia numatyti užduotis senos statybos statinio energetinių nuostoliams mažinti.
3. BIM technologija, kuri pritaikoma modernizuojamiems visuomeniniams pastatams, turės įtakos įsipareigojimams valstybių CO_2 emisijai mažinti, nes BIM pagrįsta energijos valdymo modelio sistema, ankstyvuosiuose pastato gyvavimo etapuose užtikrina efektyviausią energijos pasirinkimo sprendimą.
4. Siūlomas metodas yra inovatyvus. Modelis stipriai priklauso nuo turimos informacijos ir modeliavimo technologijų efektyvumo. BIM pagrindu sukuriamas įvairialypis modelis, pagrįstas inžinerinių sistemų integravimu naujuose BIM posistemiuose, kurie įgalina energijos valdymo ir optimizavimo procesus. Šis modelis didina projekto priemonių pasirinkimo efektyvumą. BIM pagrindu sukurti optimizavimo posistemiai numatomame statinio modelio viduje leidžia palyginti ir pasirinkti taupiausią ir aplinkai tinkamiausią sprendimą statybos procese.
5. Siūlomas modelis ir toliau turėtų būti testuojamas atnaujinus pastatus. Išmaniosios modernizacijos monitoringas rodo, kaip tūrėtų būti sumažintos spragos. Sėkmingas modelio pagrindimas suteikia prielaidas sukurti pažangios modernizacijos proceso procedūras (auditas, projektavimo procesas, statybos procesas, kokybės kontrolė, eksploatacija). Poreikis žinių ir praktikos, ypač integruotų pastatų tobulinimo sprendimams priimti yra labai didelis. Kadangi daugiau nei 60 % Lietuvos administracinių pastatų, pastatytų 1961–1990 m., neatitinka nustatytų teisės aktų reikalavimų, šis sektorius turi milžinišką energijos taupymo potencialą. Taigi geri pavyzdžiai potencialiai gali paveikti procesą labiau energijos taupymo kryptimi, jau nekalbant apie tai, kad įkvepiantis bendruomenės įsitraukimas į projektus, neaplenkiant aplinkosaugos problemų, sukuria pridėtinę vertę ir bendruomenei, ir

šaliai. Siūlomas požiūris suteikia puikią platformą demonstravimui, geroji praktika „žinai kaip“ turėtų būti ir toliau platinama bei įkvepianti aplinkinius regionus.

6. Šiuo metu yra didelis energinio naudingumo gerinimo esamiems pastatams poreikis, siūlomo modelio pritaikymas padidina aukštos kokybės atnaujinimo procesą. Tiksliniai vartotojai, kurie iš siūlomo modelio pritaikymo turės naudos, yra: visuomeninių pastatų savininkai; statybų operatoriai; gamintojai; architektai; dizaineriai; infrastruktūros vadovai; rangovai taip pat viešosios įstaigos, atliekančios kontrolės ir stebėsenos veiksmus. Projekto įgyvendinimo rezultatai, kai naudojamas modelis, kaip geras pavyzdys paveikia didelio masto renovacijos skatinimą, nes modelis, sukurtas su tam tikrais pakeitimais, gali būti lengvai pritaikomas įvairiose klimato zonose.
7. Atliktas tyrimas, kurio metu įvertintas administracinių pastatų rekonstrukcijos energinis efektyvumas, taikant pasyvaus pastato bazinį modelį ir BIM technologijos. Tyrimo rezultatai įrodė projektavimo klaidų ir statybos bei projektavimo trukmės mažėjimą, o taip pat priimamų sprendimų kokybės didėjimą.

3

Visuomeninių pastatų modernizavimo priemonių atrankos sprendimų modelis

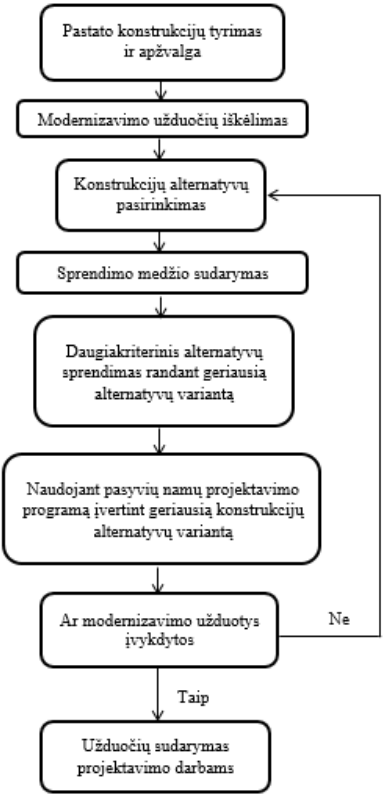
Šiame skyriuje sukurtas visuomeninių pastatų modernizavimo priemonių atrankos sprendimų modelis. Šiam tikslui pasiekti sukuriamas pasyvaus namo principu paremtas tyrimo modelis, kuris bus pritaikomas sprendžiant Vaidotų geležinkelio stoties pastato renovacijos klausimus. Skyriuje pateikti analizuojamojo pastato audito metu nustatyti atitvarinių konstrukcijų pagrindiniai parametrai. Modelyje, pirmiausiai įvardijami šiltinimo variantai, tokie kaip cokolio, sienų, stogo ir langų, kiekvienas variantas gali būti naudojamas ir derinamas su kiekvienu variantu. Nagrinėjamo pastato modernizacijos efektyvumo nustatymui apibrėžti pagrindiniai techniniai ekonominiai rodikliai, kurių pagalba suformuoti analizuojamojo pastato konstrukcijų modernizavimo variantai. Skyriuje patikrinta sukurta metodika bei daugiakriteris modelis administracinių pastatų atnaujinimo technologijų bei sprendimų efektyvumo tyrimui ir vertinimui BIM aplinkoje ir jo praktinio taikymo algoritmas. Nustatytas racionaliausias modernizavimo variantas.

Suprojektuotas pastatas dar kartą patikrintas PHPP (*Passive House Planning Package*) programa, įvertinant inžinerijos įrenginius ir įsitikinta, ar jis atitiks pasyvių namų standartą, jeigu šios sąlygos netenkina, reikia grįžti į projektinį etapą ir daryti racionalius pakeitimus. Šio modelio taikymo galimybės analizė atlikta remiantis BIM technologiją.

Skyriuje nagrinėjamomis temomis autorius kartu su bendraautoriais paskelbė publikacijas: Rasiulis *et al.* 2015, Ustinovičius *et al.* 2015, Ustinovichius *et al.* 2015.

3.1. Administracinio pastato tyrimo modelis

Sukuriamas pasyvaus namo principo modelis, kuris bus pritaikomas sprendžiant administracinio pastato renovacijos klausimus (3.1 pav.).



3.1.pav. Pasyvaus namo modelis
Fig. 3.1. Passive house model

Tyrimui pasirinkta Vaidotų geležinkelio stoties EC pastatas, kuris pastatytas 1980 m. Pastato bendrasis plotas 2168,00 m^2. Tai penkių aukštų pastatas, po kurio dalimi yra įrengtas rūsys su vietine dujine katiline. Pastato išorinės sienos įrengtos iš 510 mm storio silikatinių plytų mūro, cokolis – iš 400 mm storio gelžbetoninių blokų. Sienos iš lauko netinkuotos, vidaus pusės nutinkuotos bei nudažytos. Stogas sutapdintas, dengtas rulonine danga. Ant stogo atskirų esančių vėdinimo kaminų apskardinimas yra susidėvėjęs.

Sienų bei lubų apdaila nusidėvėjusi. Fasado plokštumoje vizualiai matomi įtrūkiai 1–1,4 mm.

Prieš pradedant izoliavimo darbus reikia nustatyti kaip izoliuotas pastatas, kokios jo vietos nėra izoliuotos. Nuo gautų rezultatų priklausys, kur būtina įrengti termoizoliaciją ir kokių charakteristikų.

Tiriant pastatą buvo nustatytas jo fizinis nusidėvėjimas prieš atnaujinimą, remiantis BCH 53–86 (p) metodika, nusidėvėjimas – 25 %. Oro temperatūra patalpose netenkino Lietuvos higienos normų reikalavimų, nes oro temperatūra patalpose šaltuoju metų laikotarpiu turi svyruoti 18–22 °C. Atlikus atitvarų šilumos laidumo matavimus paaiškėjo, kad Vaidotų st. EC pastato išorinių sienų ir stogų šilumos perdavimo koeficientai yra per dideli ir neatitinka Lietuvos statybos techninio reglamento nuostatų.

Įvertintos pastato rekonstravimo zonos:

1. Rekomenduojama įrengti šilumą izoliuojantį sluoksnį ir naują prilydomą dangą. Atliekant stogo remonto darbus būtina apskardinti parapetus. Apskardinti kaminėlius, atstatant mūrą bei pakeičiant kepures. Rekomenduojama lubas, esančias po gelžbetoninėmis stogo perdangomis, taisyti apdailos priemonėmis – perglaistyti, įterpiant stiklo plaušo tinklelį.
2. Apžiūrėjus pastatą nustatyta, kad pastato išorinių sienų konstrukcijų būklė patenkinama. Siūloma apšiltinti pastato sienas, įrengti išorės apdailinį sluoksnį.
3. Apžiūrėjus pastatą nustatyta, kad pastato cokolio konstrukcijos būklė patenkinama. Siūloma apšiltinti pastato cokolio konstrukciją, įrengti išorės apdailinį sluoksnį.
4. Rekomenduojama langus bei duris pakeisti naujais.

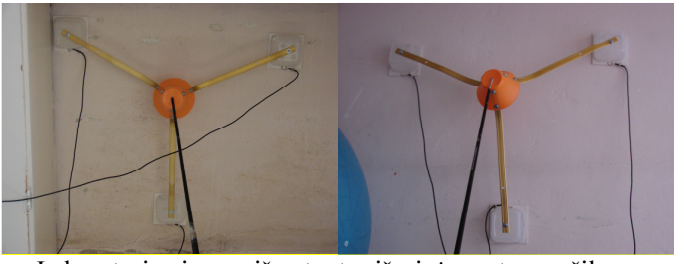
Aukščiau išvardintos problemos atsiranda dėl mažos grindų, sienų, stogo, langų, durų šiluminės varžos, netinkamo vėdinimo, neekonomiškų sprendinių pastate ir kitų priežasčių.

3.2. Šilumos perdavimo koeficientų rodiklių nustatymas

Visi pertvarų konstrukcijų audito parametrai yra nustatyti po faktinių matavimų, naudojant šiuos metodus.

Šilumos perdavimo koeficientai, pertvarų šiluminis laidumas, paviršiaus temperatūra, patalpų ir lauko oro temperatūros ir kiti mikroklimato parametrai matuojami naudojant matavimo prietaisą Ahlborn MESS-und Regelungstechnic GmbH (Vokietija) gamintojo (3.2 paveikslas) ir susideda iš:

- ALMEMO 2890-9 – duomenų valdiklis su išmatuotų duomenų atmintimi;
- FQA018CSI (ALMEMO®) – termoplokštele, šilumos srauto matavimams;
- FHA646-E1 (ALMEMO®) – temperatūros ir santykinės drėgmės matavimo daviklis;
- FHA646 (ALMEMO®) – oro temperatūros daviklis;
- FVA605-TA10 (ALMEMO®) – dujų srauto greičio jutiklis;
- FY A600-CO 2 H (ALMEMO®) – CO2 dujų matavimo daviklis.



3.2 pav. Laboratorine įranga išmatuotas išorinės pertvaros šilumos srautas
Fig. 3.2. The heat flow laboratory equipment measuring the external partition

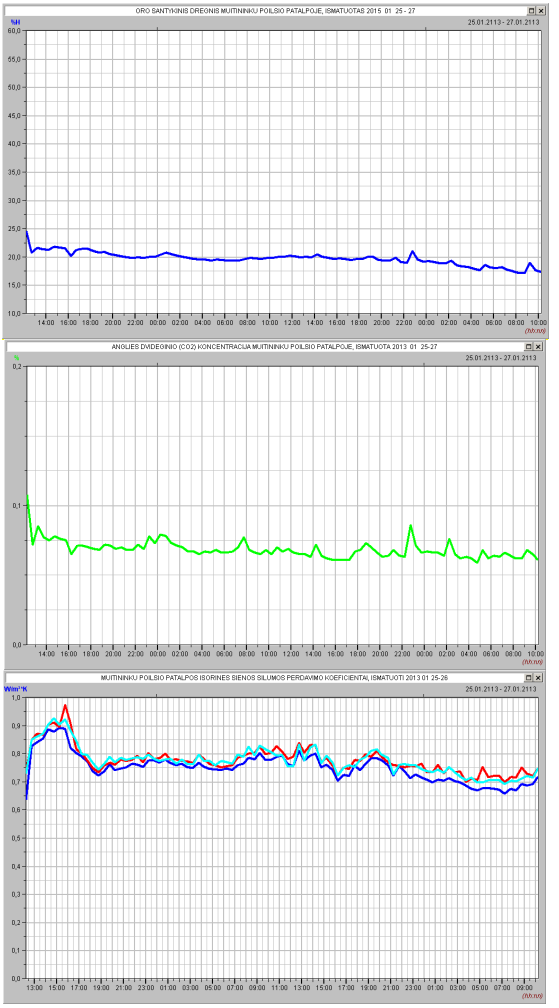
Išorinių atitvarų šilumos perdavimo koeficientui nustatyti parinkta tokia metodika: išorinės atitvaros šilumos perdavimo koeficientas U nustatomas matuojant šilumos srautus q, patalpos oro temperatūrą θi bei išorės oro temperatūrą θe ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$U = q/(\theta i - \theta e),\ \mathrm{W/m^2K}, \qquad (3.1)$$

čia q – išmatuotų šilumos srautų per išorines atitvaras vidurkis, $\mathrm{W/m^2K}$; θi – patalpos išmatuotos oro temperatūros vidurkis, °C; θe – išorės išmatuotos oro temperatūros vidurkis, °C .

Šiems tyrimams buvo sukomplektuoti specialūs laboratoriniai matavimo prietaisai su autonominiu programiniu valdymu.

Dėl tyrimo tikslumo šilumos srautai buvo matuojami vienu metu trijose tos pačios išorinės atitvaros vietose. Šilumos srautai ir temperatūros buvo matuojamos kas 30 minučių visą parą. Gauti matavimų rezultatai iš duomenų kaupiklio ALMEMO® 2890-9 atminties buvo nuskaitomi kompiuteriu, sudaromi grafikai (3.3 pav.) ir apskaičiuojamos vidutinės šilumos perdavimo koeficientų reikšmės.



3.3. pav. Matavimo rezultatai: a) santykinė oro drėgmė; b) CO_2 koncentracija; c) išorinės sienos paviršiaus temperatūra

Fig. 3.3. Results of measurements: a) relative humidity; b) CO_2 concentration; c) external wall surface temperature

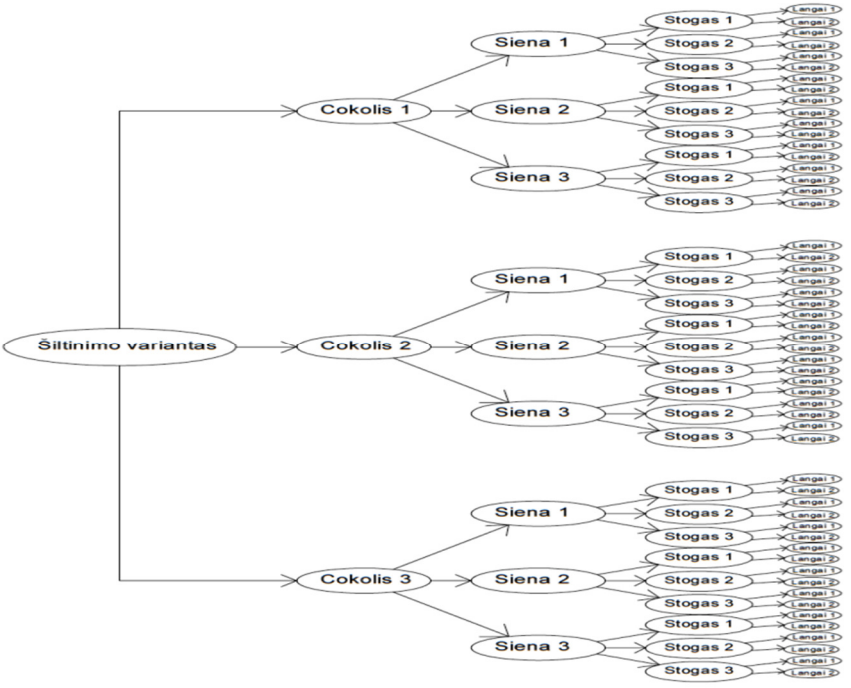
Atlikus Vaidotų stoties EC pastato išorinių atitvarų šilumos perdavimo koeficientų skaičiavimus, tyrimo rezultatai rodo, kad 510 mm storio išorinių sienų šilumos perdavimo koeficientas Us = 1,30 W/m^{2}K (R = 0,77 m^{2}K/W).

Šis koeficientas priimtas iš 1–28 patalpos šiaurės vakarų sienos tyrimo. Taip priimta todėl, kad ši siena yra nepalankiausioje šiaurės vakarų pusėje ir ji yra daugiausia pažeista. Daroma išvada, kad Vaidotų st. EC pastato išorinių sienų ir stogo šilumos perdavimo koeficientas yra per mažas ir neatitinka Lietuvos statybos techninių reglamentų. Rekomenduojama išorines sienas ir stogą papildomai apšiltinti.

3.3. Eksperimentiniai tiriamieji skaičiavimai

Tam, kad būtų racionaliai suformuluota ir išspręsta Vaidotų stoties EC pastato modernizacija, priimti geriausi sprendimai, turi būti taikomi tam tikri metodai ir sudaromas pagrindinis sprendimo modelis, kuris pavaizduotas 3.4 paveiksle.

Šiame modelyje pirmiausiai įvardijami šiltinimo variantai, tokie kaip cokolio, sienų, stogo ir langų, kiekvienas gali būti naudojamas ir derinamas su kiekvienu.

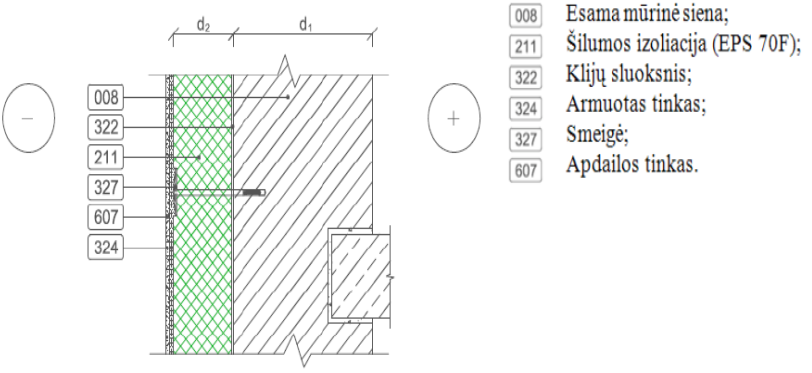


3.4 pav. Sprendimo modelis
Fig. 3.4. Decision model

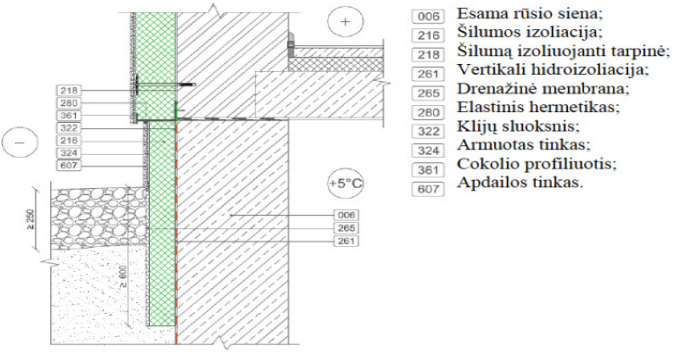
Prieš pradedant spręsti Vaidotų stoties EC pastato modernizacijos uždavinį, pirmiausiai parenkamos alternatyvos, iš kurių bus renkamos geriausios modernizavimo alternatyvos, todėl nagrinėjamos tokios pastato dalys: cokolinė dalis, išorinės sienos, stogas. Keliami konstrukcijos šilumos laidumo *U* reikalavimai:

- Sienoms $U = 0{,}10–0{,}15$ W/(m²K);
- Stogui $U = 0{,}09–0{,}12$ W/(m²K);
- Cokoliui $U = 0{,}12–0{,}18$ W/(m²K);
- Langams $U = 0{,}70$ W/(m²K).

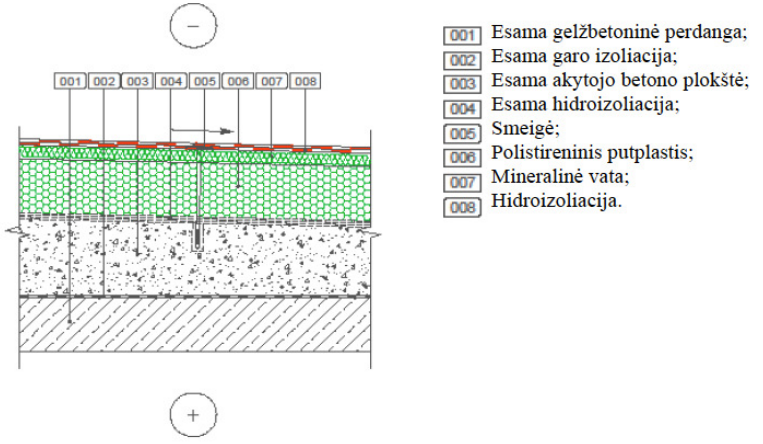
Kiekvienai pastato dalies alternatyvai parenkamas skirtingas šildymo tipas įvardijant iš kokių medžiagų susideda konstrukcijos tipas, nurodant kiekvienos medžiagos techninius duomenis (konstrukcinės alternatyvos pavaizduotos 3.5, 3.6, 3.7 paveiksluose).



3.5 pav. Sienos alternatyvos detalė
Fig. 3.5. Walls alternative detail



3.6 pav. Cokolio alternatyvos detalė
Fig. 3.6. Plinth alternative detail



3.7 pav. Stogo alternatyvos detalė
Fig. 3.7. Roof alternative detail

Nagrinėjant Vaidotų stoties EC posto cokolinę, išorinių sienų ir stogo dalis, parenkami tokie rodikliai:

- šilumos perdavimo koeficientas U, W/m^{2}K.;
- modernizavimo kaina, Eur;
- prognozuojamas priemonės gyvavimo laikas, m.;
- galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą, balais.;
- metiniai sutaupymai, MWh/m^2/m.;
- paprastasis atsipirkimo laikas, m.;
- eksploatavimo priežiūros sudėtingumas, balais.

Šilumos perdavimo koeficiento nustatymo metodas ir aprašymas pateiktas antrame skyriuje.

Gyvavimo laiko rodiklio nustatymas. Šis rodiklis nustatomas pagal naudojamų priemonių numatomus garantinius laikotarpius. Šis laikotarpis yra prognozuojamas ir priklauso nuo pastato priežiūros ir naudojimo pagal paskirtį. Tai kiekybinis rodiklis, kuris maksimizuojamas.

Darbų atlikimo galimybės rodiklio nustatymas. Tai kokybinis rodiklis, kuris vertinamas balais nuo 1 iki 6. Nagrinėjamas statybos darbų atlikimo sudėtingumas atsižvelgiant į metų laiką, kadangi paprastai ne visi darbai vienodai atliekami žiemos ir vasaros metu. Galimybių atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą paskirstymas balais:

- 1–2 balai – darbų negalima atlikti tam tikru metų laiku;
- 3–4 balai – galima iš dalies atsižvelgti į sezoniškumą;
- 5–6 balai – galima neatsižvelgti į sezoniškumą.

Šis rodiklis yra maksimizuojamas.

Metinių sutaupymų rodiklio nustatymas. Atlikus planuojamus modernizacijos darbus ir pagerinus pastato šilumines charakteristikas, tikimasi tam tikrų energijos sutaupymų. Kadangi išorinės atitvaros apšiltinamos, šilumos nuostoliai per jas sumažėja ir išlaidos už šildymą ir reikalingas šilumos kiekis sumažėja. Taigi nustatomi planuojami metiniai energijos sutaupymai MWh/m^2. Šis rodiklis yra kiekybinis ir maksimizuojamas.

Paprastojo atsipirkimo laiko rodiklio nustatymas. Rodikliuose pateikiamos energijos taupymo ir modernizacijos priemonės, galimų energijos sutaupymų bei reikalingų investicijų įvertinimas. Siekiant įvertinti energijos taupymo priemonių ekonominį efektyvumą skaičiuojamas paprastas ir tikrasis atsipirkimo laikas bei sutaupytos energijos kaina.

Planuojamų investicijų energijos taupymo priemonėms įdiegti paprastasis atsipirkimo laikas (*PAL* – kiekybinis rodiklis, kuris yra minimizuojamas) nustatomas pagal šią formulę:

$$PAL = I / S, \tag{3.2}$$

čia *PAL* – metai; *I* – planuojamos investicijos energijos taupymo priemonėms įdiegti, EUR; *S* – planuojami metiniai sutaupymai įdiegus numatytas energijos taupymo priemones, Eur / metus.

Eksploatavimo priežiūros sudėtingumo rodiklio nustatymas. Tai kokybinis rodiklis, kuris vertinamas balais nuo 1 iki 6. Kiekviena alternatyva vertinama pagal tai, koks yra eksploatavimo priežiūros sudėtingumo lygis, kadangi kiekvienas modernizavimo variantas turi tam tikrų techninės priežiūros atlikimo sudėtingumo aspektų. Eksploatavimo priežiūros sudėtingumo vertinimas balais skirstomas:

- 1–2 balai – sudėtinga atlikti techninę priežiūrą;
- 3–4 balai – vidutiniško sudėtingumo techninė priežiūra;
- 5–6 balai – galima lengvai atlikti techninę priežiūrą.

Paskirties pakeitimo rodiklio nustatymas. Tai kokybinis rodiklis, kuris vertinamas balais nuo 1 iki 6. Alternatyvos vertinamos pagal tai, kaip lengvai galima pakeisti pastato stogo paskirtį. Paskirties pakeitimo galimybės, balais:

- 1–2 balai – sudėtinga pakeisti paskirtį;
- 3–4 balai – vidutiniško sudėtingumo paskirties pakeitimai;
- 5–6 balai – galima lengvai pakeisti paskirtį.

Konstrukcijos storio rodiklio nustatymas. Tai kiekybinis rodiklis, kuris vertinamas mm atsižvelgiant į konstrukcijos storį. Vertinant šį rodiklį siekiama, kad atitvaros konstrukciją būtų kuo plonesnė.

Vaidotų g. EC modernizavimui visi pradiniai statybinių komponentų rodikliai ir alternatyvų parinkimo duomenys pateikiami 3.1–3.3 lentelėse.

3.1 lentelė. Cokolio modernizavimo variantai
Table 3.1. Plinth modernization options

Cokolio modernizavimo alternatyvos	Cokolio modernizavimo rodikliai						
	Šilumos perdavimo koef. U, W/m^{2}K	Modernizavimo kaina, Eur	Prognozuojamas modernizavimo gyvavimo laikas, metai	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą, balais	Metiniai sutaupymai, MWh/m^2/m	Paprastasis atsipirkimo laikas, m	Konstrukcijos storis, mm
1	2	3	4	5	6	7	8
Cokolis 1 Cokolis (95,3 m‘) šiltinamas 800 mm gylio ir 130 mm storio polistireniniu putplasčiu EPS 100, apdailinamas plytelėmis. Naujai įrengiama nuogrinda aplink pastatą.	0,18	31611	30	2	3	12	600
Cokolis 2 Cokolis (95,3 m‘) šiltinamas 800 mm gylio ir 160 mm storio polistireniniu putplasčiu EPS 100, putplastis nutinkuojamas *hidroizoliaciniu tinku.* Naujai įrengiama nuogrinda aplink pastatą.	0,16	32485	25	2	3,66	12	630
Cokolis 3 Cokolis (95,3 m‘) šiltinamas 800 mm gylio ir 200 mm storio polistireniniu putplasčiu EPS 100 įleidžiant 600 mm į gruntą. Putplastis esantis virš žemės uždengiamas apdailine plokšte, o esantis po žeme uždengiamas gumbuota membrana. Naujai įrengiama nuogrinda aplink pastatą.	0,14	33650	27	6	3,78	15	670

3.1 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
Cokolis 4 Cokolis (95,3 m‘) šiltinamas 600 mm gylio ir 250 mm storio ekstrudiniu polistireniniu putplasčiu EPS 80. Putplastis, esantis virš žemės, apdailinamas plonasluoksniu tinku, o esantis po žeme – uždengiamas gumbuota membrana. Taip pat naujai įrengiama nuogrinda aplink pastatą.	0,12	35106	25	2	3,89	14	720
Minimizuojamas / maksimizuojamas	min	min	max	max	max	min	max
Reikšmingumas, *q*	0,121	0,254	0,151	0,0461	0,173	0,175	0,0804

3.2 lentelė. Sienų modernizavimo variantai
Table 3.2. Wall modernization options

Sienų modernizavimo alternatyvos	Sienų modernizavimo rodikliai						
	Šilumos perdavimo koeficientas U, W/m^{2}K	Modernizavimo kaina, Eur	Prognozuojamas modernizavimo gyvavimo laikas, metai	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą, balais	Metiniai sutaupymai, MWh/m^2/m	Paprastasis atsipirkimo laikas, m	Konstrukcijos storis mm
1	2	3	4	5	6	7	8
Siena 1 Sienos (1655 m^2) šiltinamos 180 mm storio polistireniniu putplasčiu EPS 70F ir tinkuojamos plonasluoksniu tinku	0,15	361508	25	3	58,8	12	690

3.2 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
Siena 2 Sienos (1655 m^2) šiltinamos 200 m storio polistireniniu putplasčiu EPS 70F (NEOPORAS) ir tinkuojamos plonasluoksniu tinku	0,14	369985	26	4	59,75	12	710
Siena 3 Sienos (1655 m^2) šiltinamos akmens vata 240 mm, priešvėjine akmens vata 30 mm, paliekamas ventiliacinis tarpas 20 mm, tvirtinama fasadinė plokštė 10 mm	0,11	424520	27	6	62,59	15	780
Siena 4 Sienos (1655 m^2) šiltinamos 310 mm storio akmens vata. Akmens vata pritvirtinama klijais ir smeigėmis. Tuomet klojamas armavimo tinklelis ir sienos tinkuojamos plonasluoksniu tinku	0,10	489439	25	3	63,54	13	820
Minimizuojamas/ maksimizuojamas	*min*	*min*	*max*	*max*	*max*	*min*	*max*
Reikšmingumas, *q*	*0,140*	*0,245*	*0,136*	*0,0468*	*0,162*	*0,172*	*0,0976*

3.3 lentelė. Stogo modernizavimo variantai
Table 3.3. Roof modernization option

Stogo modernizavimo alternatyvos	Stogo modernizavimo rodikliai						
	Šilumos perdavimo koeficientas U, W/m^2K	Modernizavimo kaina, Eur	Prognozuojamas modernizavimo gyvavimo laikas, metai	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą, balais	Metiniai sutaupymai, MWh/m2/m	Paprastasis atsipirkimo laikas, m	Konstrukcijos storis mm
1	2	3	4	5	6	7	8
Stogas 1 Pašalinama sena ritininė danga ir sutvarkomos esamos šilumą izoliuojančios medžiagos. Paklojamas 270 mm storio apatinis polistireninio	0,12	108802	25	6	33,05	17	520

3.3 lentelės tęsinys

1	2	3	4	5	6	7	8
putplasčio EPS 80 sluoksnis. Paklojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 30 plokštė ir prilydoma dviejų sluoksnių ritininė hidroizoliacijos danga. (Plotas 424 m^2). Atliekant darbus apskardinami parapetai, izoliuojami vėdinimo kanalai							
Stogas 2 Pašalinama sena ritininė danga ir sutvarkomos esamos šilumą izoliuojančios medžiagos. Paklojamas 300 mm storio apatinis polistireninio putplasčio EPS 80 sluoksnis. Paklojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 30 plokštė ir prilydoma dviejų sluoksnių ritininė hidroizoliacijos danga. (Plotas 424 m^2). Atliekant darbus apskardinami parapetai, izoliuojami vėdinimo kanalai	0,11	113971	25	5	33,3	17	540
Stogas 3 Pašalinama sena ritininė danga ir sutvarkomos esamos šilumą izoliuojančios medžiagos. Paklojama 340 mm apatinė mineralinės vatos ROS 30 plokštė. Paklojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 50 plokštė ir prilydoma dviejų sluoksnių ritininė hidroizoliacijos danga. (Plotas 424 m^2). Atliekant darbus apskardinami parapetai, izoliuojami vėdinimo kanalai	0,10	119193	25	4	33,54	22	590
Stogas 4 Pašalinama sena ritininė danga ir sutvarkomos esamos šilumą izoliuojančios medžiagos. Paklojamas 380 mm storio apatinis polistireninio putplasčio EPS 80	0,09	123417	25	6	33,78	20	620

3.3 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
sluoksnis. Tuomet paklojama 20 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 30 plokštė ir prilydoma dviejų sluoksnių ritininė hidroizoliacijos danga. (plotas 424 m^2). Atliekant darbus apskardinami parapetai ir izoliuojami vėdinimo kanalai							
Minimizuojamas/ maksimizuojamas	min	min	max	max	max	min	max
Reikšmingumas, *q*	0,136	0,260	0,132	0,0485	0,155	0,216	0,052

3.4. Konstrukcijų daugiatikslio sprendimų sintezės modelio formavimas

Parenkant konstrukciją yra atsižvelgiama į ekspertų apklausos rezultatų duomenis. Prioritetiškumui nustatyti naudojama reikšmingumų skalė. Pagal užpildytas ekspertų nuomonių anketas, suformuojama lentelė, kurioje apskaičiuojamos pateiktų rodiklių vidutinės reikšmės.

Grupinis vertinimas gali būti laikomas gana patikimu tik tada, kai apklausiamų specialistų nuomonės suderintos. Todėl statistiškai apdorojant iš ekspertų gautą informaciją, reikėtų įvertinti jų nuomonių suderinamumą ir nustatyti informacijos nevienareikšmiškumo priežastis.

Pagal kiekvieną anketą nustatomi kriterijų rangai.

Darbe taikomi daugiatikslių TOPSIS, SAW ir COPRAS sprendimų priėmimo metodai. Taikant daugiatikslį sprendimų priėmimo metodą (*Multiple Attribute Decision-Making MADM*), kyla alternatyvų pasirinkimo problema, kuri susijusi su įvairiais ir prieštaringais rodikliais.

Subjektyvi ir objektyvi analizė turi daugelį privalumų ir trūkumų. Reikšmingumai, nustatyti subjektyviu požiūriu, nurodo subjektyvius asmens sprendimus, kurių rezultatas yra problemos alternatyvų rangavimas. Objektyvūs sprendimų reikšmingumai nustatomi matematiniais metodais, pagrįstais subjektyvia informacija.

Variantų prioritetiškumo nustatymo metodika, pagrįsta koncepcija: optimali alternatyva turi mažiausią atstumą nuo idealaus sprendimo ir didžiausią atstumą nuo idealiai blogiausio sprendimo. Šis metodas vadinamas variantų racionalumo nustatymu artumo idealiajam taškui metodu (TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*).

Paprastasis sudedamasis svėrimo metodas (SAW – *Simple Additive Weighting*) žinomas geriausiai, yra vienas iš paprastesnių ir plačiausiai taikomas. Išeities duomenys – sprendimų matrica ir reikšmingumų dydžiai. Sprendimų matrica negali turėti neskaitinių reikšmių.

Remiantis prieš tai aprašytu daugiapakopiu sprendimų analizės modeliu pritaikomas daugiapakopis, daugiatikslių sprendimų sintezės metodas *SyMAD-3 (*angl*. Synthesis of Multiple Attribute Decisions by three methods*). Šis metodas skirtas apjungti daugiatikslius sprendimus į vieną bendrą sprendimą. Sprendimo patikimumui padidinti taikomi trys kiekybiniais matavimais pagrįsti daugiatiksliai sprendimo priėmimo metodai. Pateikto metodo algoritme taikomi šie metodai: efektyvumo rodiklių integruoto reikšmingumo nustatymo ir daugiatiksliai sprendimo priėmimo SAW (Churchan, Ackoff 1954)*, TOPSIS* (Yoon, Hwang 1981) ir COPRAS (Zavadskas *et al*. 2004; Kaklauskas *et al.* 2005) metodai.

Sprendimo etapų nustatymas, efektyvumo rodiklių sistemos kiekvienai sprendimo medžio pakopai k (k = 1, 2, ..., c) formavimas.

Kiekvienos sprendimo pakopos sprendimo lentelių sudarymas, čia m_k – k-toje pakopoje esančių sprendimo lentelių skaičius. Naudojant šias duomenų lenteles formuojamos sprendimų matricos:

$$X_t = \left[x_{ij}^t\right], \left(t = \overline{1, m_k}; i = \overline{1, a_t}, \; j = \overline{1, n_k}\right), \tag{3.3}$$

čia t – sprendimo lentelės numeris; a_t – t-osios sprendimų lentelės alternatyvų skaičius; n_k – k-tosios pakopos efektyvumo rodiklių skaičius.

Sukuriama sprendimų matrica x_{ij} :

$$[x_{ij}] = \begin{array}{c} \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{array}. \tag{3.4}$$

čia a_1–a_m – lyginamieji variantai (i = 1, m); X_1–X_n – efektyvumo rodikliai (j = 1, n); x_{11}–x_{mn} – efektyvumo rodiklių reikšmės.

Pateikto metodo paskirtis – daugiatikslių sprendimų sintezė, taikant tris daugiatikslius sprendimo metodus. Pateiktas daugiapakopis sprendimų medžio modelis vaizduoja analizės sprendimų, priklausančių skirtingoms pakopoms, struktūrą.

3.5. Duomenų analizė ir optimizavimas

Galimos modernizavimo priemonės buvo taikomos atsižvelgiant į pastato audito ir teikiamų ekspertų rekomendacijų rezultatus. Daugiapakopis sprendimų modelis sudarytas, atsižvelgiant į rūsio sienos esančios virš žemės (cokolis), išorinių sienų ir stogo apšiltinimo variantus. Buvo taikomos keturios šiltinimo galimybės kiekvienam elementui. Pritaikomi du variantai langams pakeisti.

Kiekvienam nagrinėjam modernizacijos etapui (cokolis, sienos ir stogas) sudaromas vienodas modernizavimo rodiklių rinkinys. Kiekviena cokolio, sienos ir stogo alternatyva buvo vertinama pagal pateiktus modernizavimo rodiklius. Kiekvieno etapo rodiklių reikšmės pateiktos 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Modernizavimo variantai ir rodiklių reikšmės
Table 3.4. Alternative measures and values of criteria

Modernizavimo alternatyvos	Kriterijai						
1	2	3	4	5	6	7	8
Cokolis 1	0,18	9155,17	30	2	3,00	12	600
Cokolis 2	0,16	9408,31	25	2	3,66	12	630
Cokolis 3	0,14	9745,72	27	6	3,78	15	670
Cokolis 4	0,12	10167,40	25	2	3,89	14	720
Siena 1	0,15	104 699,95	25	3	58,80	12	690
Siena 2	0,14	107 155,06	26	4	59,75	12	710
Siena 3	0,11	122 949,49	27	6	62,59	15	780
Siena 4	0,10	141 751,33	25	3	63,54	13	820
Stogas 1	0,12	31 511,24	25	6	33,05	17	520
Stogas 2	0,11	33 008,28	25	5	33,30	17	540
Stogas 3	0,10	34 520,68	25	4	33,54	22	590
Stogas 4	0,09	35 744,03	25	6	33,78	20	620
Langas 1	1,0	87 197,21	25	5	42,91	14	-
Langas 2	0,7	104 635,98	28	5	50,23	14	-
Min/max	min	min	max	max	max	min	min
Reikšmingumai							
Cokolis	0,121	0,254	0,151	0,046	0,173	0,175	0,080
Siena	0,140	0,245	0,136	0,047	0,162	0,172	0,097
Stogas	0,136	0,260	0,132	0,049	0,155	0,216	0,052
Langai	0,147	0,253	0,131	0,052	0,209	0,208	-

Kiekvieno etapo pradžioje variantai įvertinami atskirai, taikant TOPSIS, SAW ir COPRAS metodus. Po to gautus rezultatus sujungiame naujoje

sprendimų matricoje ir taikydami tuos pačius metodus atliekame alternatyvių kombinacijų vertinimus. Remiantis šio metodo algoritmu po pirmo skaičiavimų etapo gauti tarpiniai rezultatai, jie pateikti 3.5 lentelėje. 64 alternatyvūs deriniai buvo sudaryti remiantis tarpinių rezultatų (3.6 lentelė) pagrindais. Skaičiavimo rezultatai rodo, kad racionalus derinys yra B^{38}, kuris susideda iš 3 varianto cokolio, 2 varianto sienos ir 2 stogo varianto.

3.5 lentelė. Atskirai cokolio, sienų ir stogo alternatyvų racionalumo ir rangų įverčiai metodais TOPSIS, SAW ir COPRAS
Table 3.5. The significance of the alternatives and ranks obtained using TOPSIS, SAW and COPRAS methods

	Racionalumo reikšmės			Rangai		
Metodas / Alternatyva	TOPSIS	SAW	COPRAS	TOPSIS	SAW	COPRAS
Cokolis_1	0,395	0,876	0,243	4	4	4
Cokolis_2	0,447	0,887	0,248	3	3	3
Cokolis_3	0,604	0,907	0,260	1	1	1
Cokolis_4	0,486	0,894	0,249	2	2	2
Siena_1	0,550	0,892	0,246	3	3	3
Siena_2	0,609	0,910	0,253	1	1	2
Siena_3	0,557	0,909	0,255	2	2	1
Siena_4	0,434	0,889	0,245	4	4	4
Stogas_1	0,629	0,954	0,255	2	1	1
Stogas_2	0,671	0,946	0,254	1	2	2
Stogas_3	0,303	0,895	0,239	4	4	4
Stogas_4	0,512	0,937	0,251	3	3	3
Langas_1	0,423	0,911	0,487	2	2	2
Langas_2	0,577	0,958	0,513	1	1	1

3.6 lentelė. Alternatyvių kombinacijų fragmentas
Table 3.6. Fragment of the alternative combinations

Rodiklių tipas	Cokolis			Siena			Stogas		
Rodikliai alt. kombinacijos	$\boldsymbol{R^{T}_{[1]}}$	$\boldsymbol{R^{S}_{[2]}}$	$\boldsymbol{R^{C}_{[3]}}$	$\mathbf{R^{T}_{[4]}}$	$\boldsymbol{R^{S}_{[5]}}$	$\boldsymbol{R^{C}_{[6]}}$	$\boldsymbol{R^{T}_{[7]}}$	$\mathbf{R^{S}_{[8]}}$	$\boldsymbol{R^{C}_{[9]}}$

3.6 lentelės pabaiga

B^1	0,395	0,876	0,243	0,554	0,892	0,246	0,629	0,954	0,255
B^2	0,395	0,876	0,243	0,554	0,892	0,246	0,671	0,946	0,254
B^3	0,395	0,876	0,243	0,554	0,892	0,246	0,303	0,895	0,239
B^4	0,395	0,876	0,243	0,554	0,892	0,246	0,512	0,937	0,251
B^5	0,395	0,876	0,243	0,609	0,910	0,253	0,629	0,954	0,255
B^6	0,395	0,876	0,243	0,609	0,910	0,253	0,671	0,946	0,254
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
B^{35}	0,604	0,907	0,260	0,554	0,892	0,246	0,303	0,895	0,239
B^{36}	0,604	0,907	0,260	0,554	0,892	0,246	0,512	0,937	0,251
B^{37}	0,604	0,907	0,260	0,609	0,910	0,253	0,629	0,954	0,255
B^{38}	0,604	0,907	0,260	0,609	0,910	0,253	0,671	0,946	0,254
B^{39}	0,604	0,907	0,260	0,609	0,910	0,253	0,303	0,895	0,239
B^{40}	0,604	0,907	0,260	0,609	0,910	0,253	0,512	0,937	0,251
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
B^{63}	0,486	0,894	0,249	0,434	0,889	0,245	0,303	0,895	0,239
B^{64}	0,486	0,894	0,249	0,434	0,889	0,245	0,512	0,937	0,251
max/ min	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
Reikšmingumai	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111

Atsižvelgiant į cokolio, sienų ir stogo šiltinimo variantus nustatytas daugiafunkcinis sprendimų modelis. Analizuojami keturi cokolio, keturi sienų ir keturi stogo šiltinimo variantai (3.7 lentelė).

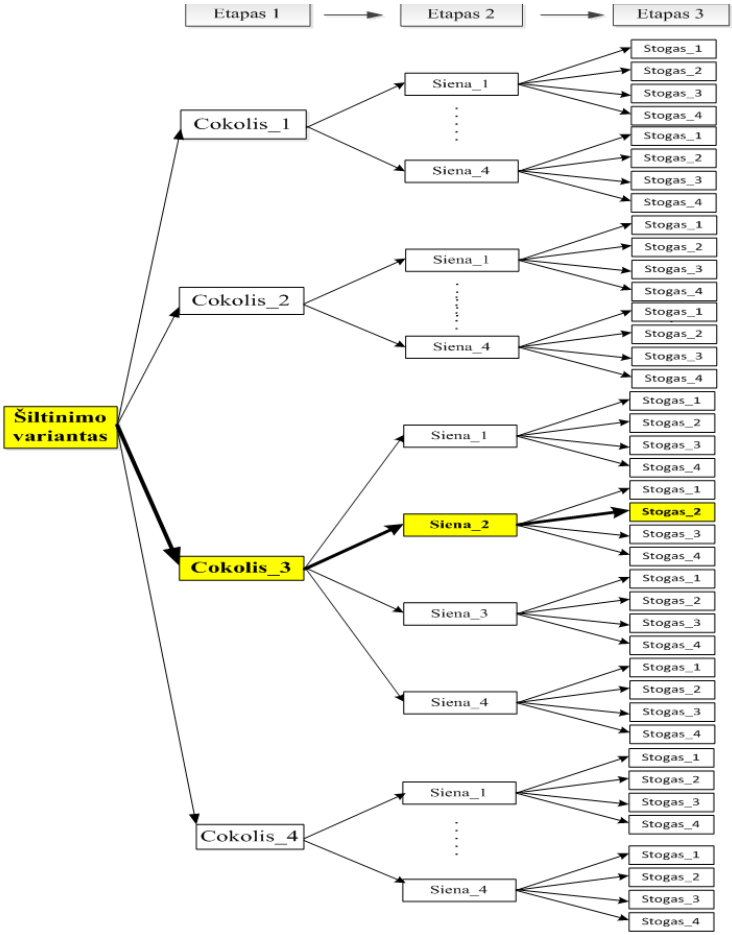
Racionalaus cokolio, sienų ar stogo izoliacijos metodo sprendimas turi būti padarytas vertinant juos kompleksiškai; suformuoto sprendimų modelio medžio pagalba bus išrinkti ir įvertinti sudėtingų alternatyvų deriniai (3.8 pav.).

3.7 lentelė. Alternatyvų kombinacijos
Table 3.7. Table of alternative combinations

				Rangavimas pagal		
Alternatyvios kombinacijos	*Cokolis*	*Siena*	*Stogas*	*TOPSIS*	*SAW*	*COPRAS*
B^1	cokolis1	siena 1	stogas 1	33	34	35
B^2	cokolis1	siena 1	stogas 2	27	29	28
B^3	cokolis1	siena 1	stogas 3	61	61	61
B^4	cokolis1	siena 1	stogas 4	46	48	47
B^5	cokolis1	siena 2	stogas 1	28	24	24
B^6	cokolis1	siena 2	stogas 2	24	21	21

…

B^{38}	cokolis 3	siena 2	stogas 2	1	1	1
B^{39}	cokolis 3	siena 2	stogas 3	47	37	41
B^{40}	cokolis 3	siena 2	stogas 4	15	8	7
B^{41}	cokolis 3	siena 3	stogas 1	5	4	5
B^{42}	cokolis 3	siena 3	stogas 2	3	3	3
B^{43}	cokolis 3	siena 3	stogas 3	49	43	44
B^{44}	cokolis 3	siena 3	stogas 4	20	12	13
B^{45}	cokolis 3	siena 4	stogas 1	16	18	14
B^{46}	cokolis 3	siena 4	stogas 2	12	13	10
B^{47}	cokolis 3	siena 4	stogas 3	52	54	53
B^{48}	cokolis 3	siena 4	stogas 4	34	33	32
B^{49}	cokolis 4	siena 1	stogas 1	13	20	20
B^{50}	cokolis 4	siena 1	stogas 2	10	16	15
B^{51}	cokolis 4	siena 1	stogas 3	57	56	56



3.8 pav. Alternatyvių kombinacijų sprendimų medis, kuriame matoma racionaliausia alternatyvi kombinacija

Fig. 3.8. Alternative combinations decision tree, which shows the rational alternative combination

3.6. Pastato energijos poreikio analizė

Atsižvelgiant į prieš tai pateiktus stogo, sienų ir cokolio izoliacinius sprendinius ir siekiant, kad pastatas naudotų mažai energijos, buvo papildomai analizuojamos pastato inžinerinės sistemos. Šie skaičiavimai atliekami naudojant pasyvaus namo planavimo paketą, toliau – PHPP.

Kai oro infiltracija yra santykinai maža hermetiškame, mažai energijos suvartojančiame pastate, norint palaikyti komfortiškas patalpų sąlygas turėtų būti įdiegtos mechaninės ventiliacinės sistemos. Svarbiausia ventiliacijos sistemos dalis yra šilumokaitis su efektyvumo santykiu ne mažesniu nei 0,8. Taigi ventiliacijos sistema su šilumos rekuperacija buvo laikoma su bent 0,8 efektyvumu ir vėdinimo sistemos ventiliatorius energijos naudojimo turi mažiau nei 0,75 Wh/m^3. Pastato sandarumas turi neviršyti 0,6 h^{-1}, taigi pastatas turi tenkinti mažos energijos suvartojimo standartą, kur priimta vertė yra apie 0,52 $val.^{-1}$.

Buvo taikomos papildomos priemonės sumažinant pastato perkaitimą atsižvelgiant į vasaros laikotarpį. Įvertinus visus duomenis gaunama 19,2 % tikimybė, kad patalpų temperatūra gali būti aukštesnė nei +25 °C vasara. Ši problema gali būti išspręsta montuojant žaliuzes ant rytinių, pietinių ir vakarinių langų, kur stiklą jos turi dengti 50 %.

Apskaičiuojami šildymo sistemos ir vandentiekio vamzdynų šiluminiai nuostoliai. Įvedamas šildymo sistemos vamzdynų projektinis ilgis, tipas, kambarių temperatūra, per kuriuos eis vamzdynai, ir kiti duomenys. Tai pat suvedami ir vandentiekio vamzdynų duomenys. Pastato savininkų pageidavimu yra išsaugomas dujinis katilas, kuris ruoš šiltą vandenį ir atliks papildomos šildymo sistemos funkciją. Preliminariems skaičiavimams parenkamas 85 kW kondensacinis dujinis katilas.

Skaičiuojama elektros prietaisų kiekis: šviestuvai, biuro technika ir kiti prietaisai. Pagal patalpas ir jų paskirtį parenkamas komfortiškas apšvietimas.

Pradiniai duomenys buvo įrašyti į įvesties duomenų langą (3.9 pav.).

Area Input

Area Nr.	Building Element Description	Group Nr.	Assigned to Group	Quantity	x (	a [m]	x	b [m]	+	User-Determined [m²]	-	User Subtraction [m²]	-	Subtraction Window Areas [m²]	)=	Area [m²]	Selection of the Corresponding Building Element Assembly	Nr.	U-Value [W/(m²K)]
	Treated Floor Area	1	Treated Floor Area	1	x (		x		+	1940,00	-				) =	1940,0			
	North Windows	2	North Windows	Please complete in Windows worksheet only!												112,6	From Windows sheet		1,061
	East Windows	3	East Windows													51,4	From Windows sheet		0,796
	South Windows	4	South Windows													85,4	From Windows sheet		0,796
	West Windows	5	West Windows													51,4	From Windows sheet		0,796
	Horizontal Windows	6	Horizontal Windows													0,0	From Windows sheet		0,000
	Exterior Door	7	Exterior Door		x (		x		+		-		) -		=		U-Value Exterior Door		
1	South Wall	8	Exterior Wall - Ambient	1	x (	31,00	x	21,00	+		-		) -	85,4	=	565,6	Outdoor Wall (nr.2)	2	0,147
2	North Wall	8	Exterior Wall - Ambient	1	x (	37,00	x	21,00	+		-		) -	112,6	=	664,4	Outdoor Wall (nr.2)	2	0,147
3	West Wall	8	Exterior Wall - Ambient	1	x (	13,60	x	21,00	+		-		) -	51,4	=	234,3	Outdoor Wall (nr.2)	2	0,147
4	East Wall	8	Exterior Wall - Ambient	1	x (	13,60	x	21,00	+		-		) -	51,4	=	234,3	Outdoor Wall (nr.2)	2	0,147
5	Roof	10	Roof/Ceiling - Ambient	1	x (		x		+	424,00	-		) -	0,0	=	424,0	Roof (nr.2)	4	0,114
6	Basement Floor	11	Floor Slab	1	x (		x		+	424,00	-		) -	0,0	=	424,0	Basement floor	9	0,308
7	Plinth	8	Exterior Wall - Ambient	1	x (	95,30	x	1,00	+		-		) -	0,0	=	95,3	Plinth (nr.3)	6	0,171
8	Basement Wall	9	Exterior Wall - Ground	1	x (	95,30	x	3,00	+		-		) -	0,0	=	285,9		13	

3.9 pav. Duomenų įvesties langas
Fig. 3.9. Input data window

Įvertinamos pastato pirminės energijos sąnaudos metams. Programa sudeda visas energijos rūšis, kurios naudojamos pastate. Tai pat pagal skirtingos energijos rūšį pritaiko tam tikrą koeficientą ir perskaičiuoja realų energijos kiekį į pirminės energijos kiekį.

Galiausiai gaunami energetiniai duomenys apie pastatą ir įvertinama ar jis atitinka pasyvaus namo standartą. Galutinis vertinimas pasirinktų pastatų modernizavimo priemonių, naudojančių PHPP programą, yra pavaizduotas 3.10 paveiksle.

Treated Floor Area:	1940,0 m^2			
	Applied:	Monthly Method	PH Certificate:	Fulfilled?
Specific Space Heat Demand:	14	kWh/(m^2a)	15 kWh/(m^2a)	Yes
Pressurization Test Result:	0,5	h^{-1}	0,6 h^{-1}	Yes
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating, Cooling, Auxiliary and Household Electricity):	111	kWh/(m^2a)	120 kWh/(m^2a)	Yes
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating and Auxiliary Electricity):	47	kWh/(m^2a)		
Specific Primary Energy Demand Energy Conservation by Solar Electricity:		kWh/(m^2a)		
Heating Load:	13	W/m^2		
Frequency of Overheating:		%	over 25 °C	
Specific Useful Cooling Energy Demand:	0	kWh/(m^2a)	15 kWh/(m^2a)	Yes
Cooling Load:	4	W/m^2		

3.10 pav. Pastato galutinis įvertinimas PHPP programa
Fig 3.10. Evaluation of the building energy demand using the PHPP program

3.7. Statinio informacinio modeliavimo technologija

Statybos etapo metu nustatyti privalumai: mažiau remonto darbų, informacija apie statinį gaunama greičiau ir ji yra kokybiškesnė, klientui pasiteikiama vizualizacija, pagerina našumą vykdant statybos darbų planavimą, greitesnis ir efektyvesnis statybos valdymas, tikslūs kiekiai bei sąmatos, galimybė atlikti simuliacinę vizualizaciją (Eastman *et al.* 2011; Hardin 2009; Elbeltagi, Dawood, 2011; Azhar 2011; Hartmann *et al.* 2012). Eksploatacijos etape ši technologija padeda kontroliuoti pastatų ūkio valdymą, integruoti statinio gyvavimo ciklo duomenis, greita ir tiksli informacija apie atliktus atnaujinimo darbus ir efektyvesnis įrenginio valdymas kartu su informacijos mainais (Eastman *et al.* 2011; Hardin 2009; Park *et al.* 2012).

Ši sistema suteikia galimybę modeliuoti pokyčius statybos metu, rekonstruojant ar statant naujus statinius, inžinerinės įrangos išdėstymas išvengiant kolizijų, stebėti esamą pastatą ir laiku imtis veiksmų dėl restauravimo, kvalifikuotai eksploatuoti esamus įrenginius, tiek technologiškai ir ekonomiškai BIM yra papildomas modelis informacinėje duomenų bazėje, kur

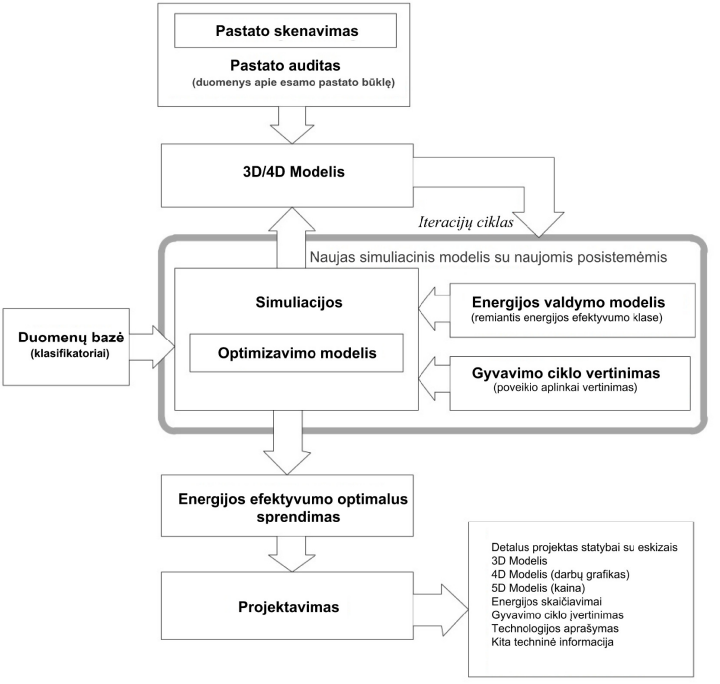
saugoma visa architektūros, projektavimo bei geometrinės informacijos ir atitinkama techninė informacija apie visus atliktus darbus (Ding *et al.* 2012).

BIM statybos standartizacija yra ne tik geometrija sienų, kolonų, sijų, durų, langų, ir kitų statybinių komponentų, bet taip pat ir apima kiekvieno objekto specifines savybes tokias kaip: medžiagų rūšis, materialų savybės, tiekėjus.

Atnaujinama informacija statybos grafike interaktyviai yra svarbiausias procesas vykdant statybos darbus (Tserng *et al.* 2014). Užduotys gali būti suformuotos projektavimo metu, vykstant statyboms palengvina darbus.

BIM Modelio pristatytas naujas metodas sukuria intelektualinių sprendimų priėmimo aplinką atnaujinimo strategijoms ir kokybės kontrolei, kartu sukuria sąlygas panaikinti atotrūkį tarp tikėtino ir faktinio energijos vartojimo efektyvumo (3.11 pav.). Taikant Pastato Informacinį Modelį (*Building Information Model*) su integruota nauja BIM posisteme įgalinami energijos valdymo ir optimizavimo procesai.

BIM energijos valdymo modelis, naudojamas kaip projektavimo, pagrįsto BIM, priemonė, įvertina ir šiuos kintamuosius: lauko temperatūrą, patalpų oro kokybę, pastato paskirtį ir kitus parametrus, reikalingus energijos vartojimo modeliavimui.



3.11 pav. BIM paremtas projektavimo ir atnaujinimo modelis
Fig. 3.11. The model of the BIM-based design and refurbishment

Išsamiam modernizavimo priemonių vertinimui autoriai siūlo taip pat įtraukti ir ekologinio efektyvumo ir ekonominius parametrus. Pagrindinė modelio dalis yra alternatyvių modernizavimo priemonių duomenų bazė, atitinkanti vietos klimato ir triukšmo sąlygų teisinius reikalavimus.

Pastatų skenavimas. Analizuojamų pastatų itin svarbiems techniniams parametrams, priklausomiems nuo plataus spektro aplinkos ir funkcinių veiksnių, apibrėžti būtini skaitmeniniai modeliai (Li, Yang 2014). Siekiant sumažinti duomenų konvertavimo į skaitmeninius objektus sąnaudas, autoriai rekomenduoja naudoti lazerinį skenavimo procesą. Tai novatoriškas metodas tiksliai atkurti realaus pastato modelį per palyginti trumpą laiką su minimaliomis darbo sąnaudomis. Lazerinis skenavimas automatiškai įrašo milijoną taškų, apibūdinančius objektą, per sekundę. Skenavimo duomenys gaunami nurodant atitinkamų vektorių elementų, apibūdinančių erdvinę objekto geometriją, vietą ir, jei reikia, pateikiant jų radiometrines reikšmes įvairiais pilkos spalvos atspalviais, dirbtiniu spalvų paletėje ar natūralių spalvų RGB komponentų pavidalu (Gimenez *et al.* 2016).

3D lazerinis skenavimas gali sukurti išsamų vietos ir aukšto lygio sudėtingumo elementų 3D vaizdą. Dėl to mln. taškų per sekundę nuskaitymo greičio skenavimas lazeriu yra efektyviausias metodas 3D dokumentams sukurti. Rezultatas yra taip vadinamas „taškų debesis“, t. y. milijonų taškų rinkinys, sudarantis tikslų skenuojamo objekto 3D modelį.

Tačiau taškų debesys sudaro netvarkingą didelio duomenų kiekio rinkinį, kuris turi būti registruojamas ir tvarkomas. Šis procesas apima pastato skaitmenizavimą, kurio pabaigoje yra sukuriamas 3D modelis, kuris gali tapti pagrindu aktyvaus BIM modelio sudarymui.

Pastato patikrinimas. Pastato energetinė kokybė yra nustatoma energinio naudingumo sertifikatu (parengiamas pagal įstatymą), remiantis dviem indeksais: pirminės neatsinaujinančios energijos EP ir galutinio energijos vartojimo EK. Šiame tyrime, energetinė esamų pastatų kokybė vertinama naudojant EP ir EK indeksus. Taip pat gali būti naudojama ir daugiau dirbtinių indeksų esamų pastatų energetiniam klasifikavimui nustatyti (klasifikacija buvo sukurta 2013 metais dėl teisinių pakeitimų projekto, susijusio su pastato energinio naudingumo sertifikavimu – šiuo metu jie nėra teisiškai taikomi). Pastato energetinės klasės priklauso nuo pastato tipo ir EA indekso reikšmės.

3D / 4D modelis ir duomenų bazė. Projektavimas yra komandinis darbas. Keitimasis informacija tarp investavimo dalyvių formuoja bendravimo kokybę. BIM apibrėžia veiklą: pastato informacinis modeliavimas, o ne objektą: pastato informacinis modelis.

Pastato informacinis modeliavimas sukuria jo virtualų atvaizdavimą, informatyvaus architektūrinio modeliavimo, 3D modelį. BIM modelį sudaro statybiniai komponentai: protingi daiktai, kurie „žino, kas jie yra“ ir žino savo

vietą. Parametrai apibrėžti jų geometriją, vietą erdvėje kitų objektų atžvilgiu ir jų skiriamuosius bruožus (medžiaga, šiluminiai parametrai ir t. t.).

Energijos valdymo modelis (modeliavimas naudojant aktyvų BIM). Pagrindinis modeliavimo tikslas: nustatyti pagrindines pastato atitvarų ir inžinerinių sistemų (šildymo, vėdinimo, elektros tiekimo ir kt.) charakteristikas. **Įvesties duomenys**: nuskenuoto pastato galimybių nustatymas, faktiškos tam tikrų sienų savybės. **Išankstiniai duomenys**: pastato reikiama klasė po rekonstrukcijos.

Lankstus modeliavimas (gyvavimo ciklo vertinimas). Remiantis dabartine strategija, ES šalys iki 2020 m. anglies dvideginio emisiją turi sumažinti 20 % lyginti su 1990 m. ir 20 % pagaminti iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Taigi, modeliavimo paskirtis turėtų būti CO_2 emisijos ir įvairių tipų prietaisų šilumos tiekimo analizė. Modeliavimas pasirinktai pastatų grupei turi būti atliekamas remiantis išmetamo CO_2 kiekio mažinimo galimų programomis ir senųjų, neekologinių šildymo įrenginių panaudojimo sąnaudų optimizavimo metodais kadangi Europos Komisija siekia sumažinti išmetamo CO_2 kiekį ir optimizuoti šildymo išlaidas.

Konstrukcinis pastato projektavimas (modeliavimas). Specialios projektavimo programos energiją taupančius pastatus dinamiškam modeliavimui. Analizuojamų pastatų energijos vartojimo efektyvumo nustatymui bus naudojamos specialiosios projektavimo programos energetinių pastatų projektavimui ir dinaminiam modeliavimui. Tai leis optimizuoti šildymo ir vėsinimo apkrovas naudojant „šilumos balansą“, nustatant mėnesinę ir valandinę pusiausvyrą. Energijos modeliavimas projektavimo procese yra būtinas sprendimų priėmimo ir energetinio efektyvumo sprendimų atrankos elementas, leidžiantis parinkti optimalius parametrus ir įvertinti alternatyvius šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo šaltinius. Dėl tokio programavimo atsiranda šiluminio komforto, oro sąlygų kaitos įtakos analizės galimybės, įvertinant vietos vėjo greitį arba apskaičiuojant oro sąlygų kaitos įtaką. Šie parametrai užtikrina gerą patalpų mikroklimatą, veikiantį gyventojų sveikatą ir gerą nuotaiką. Energijos modeliavimo analizę papildys informacija apie patalpų klimato ir oro kokybę. Ji bus gauta BIM matavimo jutiklių pagalba (vidaus temperatūra, drėgmė, oro kokybė, insoliacija ir t. t.).

Konstrukcinis pastato projektas (Optimizavimas). Sprendimo patikimumui padidinti taikomi trys kiekybiniais matavimais pagrįsti daug-iakriteriniai sprendimo priėmimo metodai (*TOPSIS, SAW, COPRAS),* pastato išorinės dalies (cokolių, sienų, stogo, langų) statybai pasirinktų rodiklių reikšmingumo nustatymo metodai, projekto įgyvendinimui parinkta pastatų inžinerinė įranga (3.4 pav.).

Optimaliausias energijos efektyvumo sprendimas. Daugiatikslių sprendimų sintezės metodas SyMAD-3 lemia racionalaus modernizuojamo pastato varianto pasirinkimą (3.8 pav.).

Projektavimas. Glaudus projekto dalyvių bendradarbiavimas yra pagrindinė sąlyga siekiant užtikrinti veiksmingą statybos projekto valdymą, kuris gali būti įgyvendintas naudojant 5D (penkių matmenų) modeliavimo koncepciją.

Ši santrumpa gali būti apibūdinta kaip trijų, tarpusavyje susijusių, pagrindinių projektavimo ir statybos sudedamųjų dalių kompleksas: pirmasis komponentas yra 3D (trimačio) projekto duomenys, antrasis komponentas yra laiko sąnaudų duomenys (kaip 4 matmuo) ir trečias komponentas yra su išlaidomis (fin. sąnaudomis) susiję duomenys (kaip 5 matmuo). Pastatų būklės ir energetinio efektyvumo rodikliai turi būti nustatyti optimizavimo proceso įgyvendinimui.

3.8. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus nagrinėjamo objekto tyrimus ir išsamią analizę nustatyta, kad santykinis oro drėgnumas neatitinka HN42:2012 visuomeninių patalpų komforto sąlygų reikalavimų, kartu tai pasireiškia didelėmis pastato išlaidomis už šildymą. Nustatyti per dideli šilumos nuostoliai per sienas, stogą, cokolinę ir kitas pastato dalis, o tai taip pat sudato dideles išlaidas už šildymą. Per žema patalpų oro temperatūra, per mažas santykinis drėgnis, prasta ventiliacija ir kitos problemos.
2. Atlikus tyrimus ir skaičiavimus taikant SAW, TOPSIS, COPRAS ir SyMAD-3 metodus, buvo nustatyta racionali pastato modernizavimo alternatyvų kombinacija Nr. 46, o likusios surikiuotos pagal racionalumą.
3. Siūloma modernizuoti, naudojant skaičiavimais nustatytą geriausią alternatyvų kombinaciją, nes taip pasiekiami geriausi šiluminiai rezultatai, susidaro mažiausios išlaidos ir sutaupoma daugiausia išlaidų už šildymą šaltuoju sezono metu.
4. Pastato modernizacijai parengtas BIM modelis, aprašant konstrukcines dalis. Parinktas modelis leidžia toliau automatizuoti modernizavimo projektavimo darbus sumažinant sąnaudas 30%.
5. Pasiūlytas sprendimų modelis, atrenkant efektyvų modernizacijos derinį. Sprendimų medžio modelis pritaikytas išanalizuotoms statybos modernizavimo priemonėms ir sudarytos visos įmanomos

kombinacijos. Algoritmo sprendimo sintezės metodą sudaro integruotos reikšmes, kuriuose nustatyti naudojimo efektyvumo rodikliai ir keliais kriterijais remiantis sprendimo būdai. Siekiant padidinti sprendimo patikimumą taikyti trys daugiakriteriai sprendimų paramos metodai grindžiami kiekybiniais matavimais.

6. Nustatyta keletas trūkumų, į kuriuos reikėtų atkreipti dėmesį. Sprendimų medis generuoja daug alternatyvių derinių. Galutiniame etape siekiant sumažinti skaičiavimo rutiną, buvo atlikta analizė ir tik keletas alternatyvių prioritetų pagal eiliškumo sąrašą buvo panaudota po vertinimo, vadinamųjų „pasyviųjų“ modernizavimo priemonių (šiltinimo sprendimai pastato atitvarų ir langų pakeitimo) pastatų energijos paklausos analizei. Galimų alternatyvių statybinių inžinerinių sistemų analizė nebuvo įtraukta į mūsų tyrimą. Atitinkamai vėdinimo, šildymo, pritemdymo sistemos buvo parenkamos tik iš vienos kombinacijos. Ateities tyrimai galėtų nagrinėti įvairias pastato inžinerinių sistemų alternatyvas ir pratęsti sprendimų modelį su naujais posistemiais, leidžiančiais greitą naujų duomenų apdorojimą. Tokioje analizėje bus tikslesni alternatyvių „pasyvių“ modernizavimo priemonių kartu su „aktyviomis“ priemonėmis deriniai, kurie darys įtaką pastato energijos suvartojimui.
7. Mokslinių tyrimų rezultatai rodo, kad sintezės SyMAD-3 metodas galėtų būti sėkmingai taikomas nustatant efektyviausias atrankos galimybes iš susidariusių alternatyvų. SyMAD-3 metodas gali būti taikomas įvairioms daugiapakopių, objektyvių sprendimų priėmimo problemoms, kai informacija apie alternatyvas yra pateikta kiekybine forma.

Bendrosios išvados

1. Darbe išnagrinėtos literatūroje paskelbtos pastatų atnaujinimo technologijų bei sprendimų efektyvumo tyrimų galimybės taikant BIM technologiją. Nustatyta, kad BIM technologijos plačiai nagrinėjamos užsienyje, tačiau jų taikymas atnaujinant administracinius pastatus yra gana nauja sritis. Nustatyta, kad, analizuojant pastatų modernizavimo variantus, būtinas BIM technologijų vertinimo daugiapakopis modelis, kuris įvertina kiekvieno elemento vaidmenį.
2. Šiame darbe nustatytos administracinių pastatų atnaujinimo galimybės ir energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės. Nustatyta komforto sąlygų ir termoizoliacijos sąsaja. Energijos vartojimo pastatuose tendencijos yra tiesiogiai susijusios su energijos tiekimo infrastruktūros modernizavimu ir nauja statyba, senų pastatų renovacija, šildymo, vėdinimo ir vėsinimo įrangos priežiūra, jos pakeitimu ir atnaujinimu.
3. Suformuluotas BIM technologijų naudos bei evoliucijos ir plėtros apibrėžimas. Skaitinė analizė parodė, kad, taikant ROI MR metodą, skaičiuojant projektavimo bei statybos įmonės atsiperkamumą, galima ne tik nustatyti BIM investicijų atsiperkamumą (pirmiems metams), bet

ir gali būti įvertinta, koks turėtų būti darbuotojo darbo užmokestis, kad investicijos už programinę įrangą atsipirktų.

4. Sukurtas energijos vartojimo efektyvumo administracinių pastatų modernizacijos ir rekonstrukcijos bazinis modelis ir BIM technologija. Šis modelis modernizuojant pastatą naudoja energinio efektyvumo užtikrinimo priemones bei įvertina komforto sąlygų ir termoizoliacijos efektyvių sprendimų sąsają.
5. Atliktas pasyviųjų namų konstrukcijos variantų formavimas, įvertinantis pasyviojo namo sprendinius, atsižvelgiant ir įvertinant namo specifiką. Šie variantai užtikrina korektiška sprendimų priėmimo matricos formavimą bei efektyvaus varianto nustatymo galimybę.
6. Sukurtas administracinių pastatų atnaujinimo technologijų daugiakriteris modelis ir variantų medžio sintezės metodika. Suformuotas efektyvios modernizacijos sprendimų priėmimo modelis ir sprendimų sintezės medis naudojant alternatyvių modernizavimo priemonių atrankos derinius.
7. Sukurtas modernizavimo priemonių atrankos sprendimų modelis. Šis modelis formuoja BIM duomenų bazė. Duomenų bazė gali būti keičiama ir pildoma, tai užtikrina korektiška BIM klasifikatoriaus sudarymą.
8. Suformuotas taikomų efektyvumo rodiklių kompleksas. Uždaviniui spręsti pritaikytas pastato konstruktyvių modernizacijos sprendimų sintezės metodas SyMAD-3. Šis modelis užtikrina atitvarinių konstrukcijų ir inžinerinių įrenginių derinio efektyvų parinkimą.
9. Daugiakriteris modelis ir sukurta metodologija patikrinta, algoritmas pritaikytas administracinio pastato atnaujinimo technologijų bei sprendimų efektyvumui tirti ir vertinti taikant BIM technologiją praktiškai. Patikros metu išspręstas Vaidotų stoties EC pastato modernizacijos naudingumo klausimas, sudarytas pagrindinis sprendimo modelis, priimti racionalūs sprendiniai, kurie pritaikyti modernizacijos projekte. Nustatyta, kad pasiūlyta technologija padidina sprendimo efektyvumą iki 30–40 %.

Literatūra ir šaltiniai

Aram, S.; Eastman, C.; Sacks, R. 2013. Requirements for BIM Platforms in the Concrete Reinforcement Supply Chain, *Automation in Construction*, 35, 1–17.

Arditi, D.; Gunaydin H. M. (1999). Perception of process quality in building projects, *Journal of Management in Engineering* 15(2): 43–54.

Azhar, S. 2011. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry, *Leadership and Management in Engineering*, 11(3): 241–252.

Balaras, C. A., Droutsa, K., Dascalaki, E., and Kontoyiannidis, S. 2005. Deterioration of European apartment buildings. *Energy Building*, 37(5), 515–527.

Banaitienė, N.; Turskis, Z. 2004. Sprendimų parama vertinant pastato gyvavimo proceso efektyvumą, *Technological and Economics Development of Economy,* 10(2): 57–66.

Barkauskas V., Stankevičius V. *Pastatų atitvarų šiluminė fizika*. Kaunas: Technologija, 2000. 286 p. ISBN 9986-13-740-3.

Barlish, K.; Sullivan, K. 2012. How to Measure the Benefits of BIM A Case Study, *Approach Automation in Construction*, Vol. 24: 149–159.

Bayır A; Kara H, Köylü O, Kocabas R, Ak A. (2013), The effects of ubiquinone (CoQ10) on heart tissue in cardiac toxicity related to organophosphate poisoning. *Human and Experimental Toxicology*, 32(1) 45–52.

Bayulken, B., Huisingh, D., 2015. Are lessons from eco-towns helping planners make more effective progress in transforming cities into sustainable urban systems: a literature review (part 2 of 2). *Journal of Cleaner Production*, 109(16), 152–165.

Belton V., Stewart T. 2002. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*, Springer.

Beuthe, M.; Scannella, G. 2001. Comparative analysis of UTA multicriteria methods, *European Journal of Operational Research*, 130: 246–262.

Bhatt, M. L., Borrmann, A., Amor, R. and Beetz, J. 2013. Architecture, Computing, and Design Assistance, *Automation in Construction*, 32, 161–164.

Bliūdžius R., Monstvilas E., Ramanauskas J. 2007. *Ataskaita*. Išanalizuoti teisės aktų ir norminių dokumentų, reglamentuojančių pastatuose įrengtų langų gamybos, energetinio efektyvumo bei kitų charakteristikų, įrengimo, eksploatavimo reikalavimus ir paruošti pasiūlymus dėl pastatuose įrengtų langų savybių atitikties nustatytiems reikalavimams tikrinimo. Kaunas. 57 p.

Brans, J. P.; Vincke, Ph.; Mareschal, B.1986. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method, *European Journal of Operational Research* 24: 228–238.

Brauers, W. K. M. 2004. *Optimization methods for a stakeholder society, a revolution in economic thinking by multi-objective optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.

Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K. 2006. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy, *Control and Cybernetics*, 35, 445–469.

Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K. 2010. Project management by MULTIMOORA as an instrument for transition economies, *Technological and Economic Development of Economy*, 16 (1), 5–24.

Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K.; Peldschus, F.; Turskis, Z. 2008. Multi-objective decision-making for road design, *Transport* 23 (3), 183–193.

Bryde, D., Broquetas, M., Volm, J. M. 2013. The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31, 971–980.

Bucoń, R., Sobotka, A. 2015. Decision-making model for choosing residential building repair variants, *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(7), 893–901.

Cao, D.; Wang, G.; Li, H.; Skitmore, M., Huang, T., Zhang, W. 2015. Practices and effectiveness of building information modelling in construction projects in China, *Automation in Construction,* 49, 113–122.

Carlsson B., Elmroth A., Engvall P. 1980. Airtightness and Thermal Insulation. *Buildings*, 144 p.

Charnes A. 1994. *Data envelopment analysis: theory, methodology and applications*, Springer.

Chauhan A., Vaish R., 2012. Magnetic material selection using multiple attribute decision making approach, *Materials & Design*, 36, 1–5

Chelson, D. E., 2010. *The Effects of Building Information Modeling on Construction Site Productivity*, Unpublished Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park.

Chen, S. J.; Hwang, C. L. 1992. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, New York. 536 p.

Chi, H.-L.; Wang, X.; Jiao, Y. 2014. BIM-Enabled Structural Design: Impacts and Future Developments in Structural Modelling, Analysis and Optimisation Processes, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 22(1), 135–151.

Černius M., Kuliešius E., Rutkevičienė V., Savarauskienė V. 2008. *Pastato apdaila. Pastato šiltinimas ir tinkavimas. Apdaila plytelėmis ir apdailos elementų montavimas*. Vilnius: Mintis, 297p.

Davies, R.; Harty, C. 2013. Implementing "Site BIM": A Case Study of ICT Innovation on a Large Hospital Project, *Automation in Construction*, 30, 15–24.

Ding, L.; Zhou, Y.; Akinci, B. 2014. Building Information Modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD, *Automation in Construction*, 46: 82–93.

Ding, L.Y.; Zhou, Y.; Luo, H. B.; Wu, X. G. 2012. Using nD Technology to Develop an Integrated Construction Management System for City Rail Transit Construction, *Automation in Construction*, 21: 64–73.

Dzeng, R.-J.; Wang, W.-Ch.; Hsiao, F.-Y. 2015. Function-space assignment and movement simulation model for building renovation, *Journal Of Civil Engineering and Management*, 21(5): 578–590.

Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Listo, K. 2008. *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Hoboken (New Jersey): Wiley, p. 490.

Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Liston, K. 2011. *BIM hand-book: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors.* Hoboken: Wiley.

Elbeltagi, E.; Dawood, M. 2011. Integrated visualized time con- trol system for repetitive construction projects, *Automation in Construction* 20(7): 940–953.

EPBD 2010. DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).

Fan, S-L.: Skibniewski, M., Hung T. W. 2014. Effects of Building Information Modeling During Construction. *Journal of Applied Science and Engineering*, 17(2), 157–166.

Feist, W. 1994. *Forschungsprojekt Passive Hauser*, Institute Wohnen und Umwelt, Darmstadt.

Fontela, E.; Gabus, A. 1976. The DEMATEL observer, *DEMATEL report*. Switzerland.

Friege, J.; Chappin, E. 2014. Modelling decisions on energy-efficient renovations: a review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39: 196–208.

Froese, T. 2003. Future directions for IFC-based interoperability. *ITcon*, 8, Special Issue IFC, Product models for the AEC arena, pp. 231–246, in: http://www.itcon.org/2003/17.

Gal T., Stewart T., Hanne T. 1999. *Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications*, Da Capo Press.

Giarlotta A. 1991. Multicriteria Compensability Analysis Ranking Totally the Alternatives based on the Employment of a Non-symmetric Information Axiom (CARTESIA), *Annali dell Facolta di Economia e Commercio* 37: 1–33.

Giel, B. K.; Issa, R.; Olbina, S. 2009. *Return on investment analysis of building information modeling in construction.* University of Florida.

Gimenez, C., Sierra, V., and Rodon, J., 2012 Sustainable operations: Their impact on triple bottom Line, *International Journal of Production Economics*, 140 (1) 149–159.

Gimenez, L.; Robert, S.; Suard, F.; Zreik, K. 2016. Automatic reconstruction of 3D building models from scanned 2D floor plans, *Automation in Construction*, 63, 48–56.

Grilo, A.; Jardim-Goncalves, R. 2010. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments, *Automation in Construction*, 19, 522–530.

Gu, N., and London, K. 2010. Understanding and Facilitating BIM adoption in the AEC Industry, *Automation in Construction*, 19, 988–999.

Gupta, R.; Kapsali, M. 2016. Evaluating the "as-built" performance of an eco-housing development in the UK, *Building Services Engineering Research & Technology*, 37 (2), 220–242.

Ham, Y.; Golparvar-Fard, M., 2015. Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling, *Automation in Construction*, 49: 214–224.

Hardin, B. 2009. *BIM and construction management: proven tools, methods, and work ows.* New Jersey: John Wiley and Sons.

Harris C. 2013. Occupational injury and fatality investigations: The application of forensic nursing science. *Journal of Forensic Nursing*, 9 (4), 193–199.

Hartmann, T.; Meerveld, H. V.; Vossebeld, N.; Adriaanse, A. 2012. Aligning building information model tools and construction management methods, *Automation in Construction* 22: 605–613.

Hattab, M.; Hamzeh, F. 2015. Using social network theory and simulation to compare traditional versus BIM-lean practice for design error management*, Automation in Construction,* 52: 59–69.

Heesom, D. and Mahdjoubi, L. 2004. Trends of 4D CAD applications for construction planning. *Construction Management & Economics*, 22, 171–182.

Hernandez, A. A.; Matesanz, P. A.; Rodriguez-Suarez, I.; Garcia, M. C. 2015. Evolution of urban renewal policies in Areas of Integrated Renovation in Spain (1978–2012), *Informes De La Construccion*, 67(1): 24.

HN 42:2009. *Lietuvos higienos norma HN 42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“*.

Hugon, A.; Kumar, A.; Lin, A.-P. 2016. Analysts, Macroeconomic News, and the Benefit of Active In-House Economists, *Accounting Review,* 91 (2), 513–534.

Humm, O.: *Niedrigenergie- und Passivhäuser*. Staufen 1998.

Humphries, C; 2016. Passive Design: Incentives for Affordable Housing, *Architect*, 105(9), 46–46.

Hwang C.-L., Lin M.-J. 1987. *Group decision making under multiple criteria*, Springer.

Hwang C., Yoon K. 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State of the Art Survey*. Sprinnger-Verlag, New York, NY.

IEA 2013, International Energy Agency. 2013. *Annual Report*. Printed by IEA

Irshad K., Habib K., Thirumalaiswamy N., Saha B. B. 2015. Performance analysis of a thermoelectric air duct system for energy-efficient buildings. *Energy*, 91, 1009–1017.

Yoon, K.; Hwang, C. L. 1981. *Topsis (technique for order preference by similarity to ideal solution) – a multiple atribute decision making, w: Multiple attribute decision making – methods and applications, a state-of-the-at surwey* / Berlin: Springer Verlag, p. 128–140.

Jarrar O. M., Al-Zoabi, A. Y., 2008. The applicability of sustainable cityparadigm to the city of Jerusalem: Criteria and indicators of efficiency; *Building and Environment*, 43(4), 550–557.

Johansson, M.; Roupé, M.; Bosch-Sijtsema, P. 2015. Real-time visualization of building information models (BIM), *Automation in Construction*, 54: 69–82.

Jung, Y.; Joo, M. 2011. Building information modelling (BIM) framework for practical implementation. *Automation in Construction*, 20, pp. 126–133.

Kahraman C., Çebı˙ S. 2009. A new multi-attribute decision making method: Hierarchical fuzzy axiomatic design, *Expert Systems with Applications*, 36 (3, Part 1), 4848–4861.

Kaklauskas A., Zavadskas E.K., Banaitis A., Šatkauskas G., 2007. Defining the utility and market value of a real estate: a multiple criteria approach, *International Journal of Strategic Property Management*, 11 (2), 107–120.

Kaklauskas A., Zavadskas E. K., Raslanas S., Ginevicius R., Komka A.,. Malinauskas P. (2006). Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case, *Energy and Buildings*, 38 (5), 454–462.

Keršuliene V., Zavadskas E. K., Turskis Z., 2010. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA), *Journal of Business Economics and Management*, 11 (2), 243–258.

Kim, C.; Son, H.; Kim, C. 2013. Automated Construction Progress Measurement Using a 4D Building Information Model and 3D Data, *Automation in Construction*, 31: 75–82.

Kim, H.; Anderson, K.; Lee, S.; Hildreth J. 2013. Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology, *Automation in Construction*, 35: 285–295.

Kim, Y.-B., Lee S.-Y., Jeong B.-R. 2009. Analysis of the Insulation Effectiveness of the Thermal Insulator by the Installation Methods, *Protected Horticulture and Plant Factory*, 18(4): 332–340.

Kinnane, Oliver; Sinnott, Derek; Turner, William J. N. 2016. Evaluation of passive ventilation provision in domestic housing retrofit, *Building And Environment*, 106, 205–218.

Kostkowski, M.; Slowinski R. 1996. *UTA+Application(v 1.20) user's manual*. Cahier LAMSADE 95.

Kreiner G. E., Sheep M. L., Hollensbe E. C., Smith B. R., Kataria N. 2015. Identity Elasticity and its Dialectic Tensions: How Can We Hold together while We're Pulling apart?, *Academy of Management Journal*, 58(4), 981–1011.

Larichev, O. I. 1992. Cognitive validity in design of decision-aiding techniques, *Journal of Multi-criteria Decision Analysis* 1(3): 127–138.

Larichev, O.; Moshkovich, H. M. 1997. *Verbal Decision Analysis for Unstructured Problems*. Boston: Kluwer Academic Press.

Li M., Yang J. 2014. Critical factors for waste management in office building retrofit projects in Australia, *Resources, Conservation and Recycling*, 93, 85–98.

Liaudanskiene, R.; Simanaviciene, R.; Ustinovichius, L. A model for solving structural, technological and safety problems, *Journal of civil engineering and management*, 18 (1), 30–42.

Lee, S.-I.; Bae, J. S.; Cho, Y. S. 2012. Efficiency Analysis of Set-Based Design with Structural Building Information Modeling (S-BIM) on High-Rise Building Structures, *Automation in Construction*, 23: 20–32.

Lee, S.; Ha M. 2013. Customer interactive building information modeling for apartment unit design. *Automation in Construction*, 35: 424–430.

Leclercq, J. 1984. Propositions d'extensions de la notion de dominance en présence de relations d'ordre sur les pseudo-critéres: Melchior, *Revue Beige de Recherche Operationnelle, de Statistique et d'lnformatique* 24: 32–46.

Leite, F.; Akcamete, A.; Akinci, B.; Atasoy, G.; Kiziltas, S. 2011. Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models, *Automation in Construction*, 20: 601–609.

Love, P.E.D.; Matthews, J.; Simpson, I; Hill, A.; Olatunji, O.A. 2014. A benefits realization management building information modeling framework for asset owners, *Automation in Construction*, 37, 1–10.

LST EN ISO 7730:2006 Šiluminės aplinkos ergonomika. Šiluminio komforto analitinis nustatymas ir aiškinimas, naudojant numatomojo vidutinio vertinimo ir numatomojo nepatenkintųjų procento rodiklių bei vietinio šiluminio komforto kriterijų skaičiavimą (ISO 7730:2005)

MacCrimmon K.R. 1968. *Decisionmaking among multiple-attribute alternatives: a survey and consolidated approach*, DTIC Document.

Mahdavi A., Tahmasebi F., 2015. Predicting people's presence in buildings: An empirically based model performance analyses, *Energy and Buildings*, 86, 349–355.

Mareschal B., Brans J. P., Vincke P. 1984. *PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis*, ULB-Universite Libre de Bruxelles.

Martinaitis, V.; Bieksa, D.; Rogoza, A.; Savickas R. 2015. Quantitative estimation of improvements in the efficiency of district heating substation control system, *Building Services Engineering Research & Technology*, 36(4), 455–468

Matarazzo, B. 1988. A more effective implementation of the MAPPAC and PRAGMA methods, *Foundations of Control Engineering* 13: 155–173.

McGraw-Hill-Construction. (2014), *The Business Value of BIM for Construction in Global Markets,* McGraw Hill Construction, Bedford MA, United States.

McGraw-Hill-Construction. 2008. *The Business Value of BIM for Construction in Global Market,* McGraw Hill Construction, Bedford MA, United States.

McGraw-Hill-Construction. 2010. *The Business Value of BIM for Construction in Global Market,* McGraw Hill Construction, Bedford MA, United States.

Medineckiene M., Zavadskas E. K., Bjork F., Turskis Z. 2015. Multi-criteria decision-making system for sustainable building assessment/certification, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1), 11–18.

Merschbrock C., Figueres-Munoz A. 2015. Circumventing obstacles in digital construction design – a workaround theory perspective, 8th Nordic Conference on Construction Economics and Organization, *Procedia Economics and Finance*, 21, 247 – 255.

Miettinen K. 1999. *Nonlinear multiobjective optimization*, Springer.

Miettinen, R.; Paavola, S. 2014. Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling, *Automation in Construction*, 43: 84–91.

Migilinskas, D., Popov, V., Juocevicius, V. Ustinovichius, L. 2013. "The benefits, obstacles, and problems of practical BIM implementation" *Procedia Engineering* 57, 767–774.

Migilinskas, D.; Ustinovichius, L. 2006. Computer-aided modelling, evaluation and management of construction project according PLM concept, *Lecture Notes in Computer Science*, 4101, 242–250.

Mirpadiab, S. K.; Bagheri, S. 2016. Identifying Intelligent Building Management Systems (Bms) In Sustainable Housing, *Journal of Fundamental and Applied Sciences* , 8 (SI 3), 1175–1190.

Mishra A. K., Ramgopal M. 2013. Field studies on human thermal comfort d An overview, *Building Environment* 64 (3) 94–106.

Miyamoto S., Liu Z.-Q., Kunii T. 2000. *Soft computing and human-centered machines*, Springer-Verlag New York, Inc.

Mjoernell, K.; Boss, A.; Lindahl, M.; Molnar, St. 2014. A Tool to Evaluate Different Renovation Alternatives with Regard to Sustainability, *Sustainability*, 6(7): 4227–4245.

Moshkovich, H. M.; Mechitov A. I. 2013. Verbal Decision Analysis: Foundations and Trends. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Decision Sciences* 2013: 9 p.

Opricovic S., Tzeng G.H. 2002. Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 17 (3), 211–220.

Park, C.-S.; Lee, D.-Y.; Kwon, O.-S; Wang, X., 2013. A Framework for Proactive Construction Defect Management Using BIM, Augmented Reality and Ontology-Based Data Collection Template, *Automation in Construction*, 33, 61–71.

Peper, S.; Feist, W.; Sariri, V. 1999. Luftdichte Projektierung von Passivhäusern (airtight planning of Passive Houses: Planning aid, *CEPHEUS Project Information* No. 7, Passive House Institute, Darmstadt, 10th edition 2009.

Poirier, E.A.; Staub-French, S.; Forgues, D. 2015. Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty, *Automation in Construction*, 58: 74–84.

Popov, V.; Juocevicius, V.; Migilinskas, D.; Ustinovichius, L.; Mikalauskas, S. 2010. The use of A Virtual Building design and Construction model for developing an effective Project concept in 5D environment, *Automation in Construction*, 19(3), 357–367.

Porwal, A.; Hewage, K. N. 2013. Building Information Modeling (BIM) partnering framework for public construction projects, *Automation in Construction*, 31, 204–214.

Ramanauskas J. 2004. *Statybinė fizika*. Kaunas: Technologija, 88 p.

Redmond, A.; Hore, A.; Alshawi, M.; West, R. 2012. Exploring How Information Exchanges Can be Enhanced through Cloud BIM, *Automation in Construction*, Vol. 24, 175–183.

Return on Investment with Autodesk Revit. 2004. Autodesk Building Solutions White Paper. http://usa.autodesk.com/revit/white-papers/ [15.04.2015].

Roy B. 1968. Classement et choix en présence de points de vue multiples, *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle*, 2 (V1), 57–75.

Roy, B. 1978. Electre III: un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critéres multiples, *Cahiers du CERO* 20: 3–24.

Roy B. 1996. *Multicriteria methodology for decision aiding*, Springer.

Roy, B.; Bouyssou, D.1993. *Aide Multicritére à la Décision: Méthodes et cas*. Paris: Economica.

Roy, B.; Bertier, P. 1973. *La méthode Electre II – une application au média planning*. In: M. Ross (ed.): *OR'72,* North-Holland Publishing Company, p. 291–302.

Roy, B.; Hugonnard J.-Chr. 1982. Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method, *Transportation Research*, 16: 301–312.

Roy, B.; Skalka J. M. 1984. *Electre IS – aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. Document du LAMSADE 30, 125 p.

Ruggieri E, Herbert T, Lawrence KT, Lawrence CE. 2009 Change point method for detecting regime shifts in paleoclimatic ime series: application to $\delta^{18}O$ time series of the Plio-Pleistocene. *Paleoceanography* 24: PA1204, DOI: 10.1029/2007 PA001568.

Saaty T. L. 1971. On polynomials and crossing numbers of complete graphs, *Journal of Combinatorial Theory*, Series A 10 (2), 183–184.

Saaty T. L. 1980. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation*, New York: McGraw.

Saaty, T. L. 1994. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP*. RWS Publications, Pittsburgh, PA, USA.

Saaty T. L. 1996. *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process.* Pittsburg.

Srdjevic, B.; Srdjevic Z. 2013. Synthesis of individual best local priority vectors in AHP-group decision making, *Applied Soft Computing*, 13, 2045–2056.

San-Jose Lombera, J. T.; Cuadrado Rojo, J. 2010. Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability, *Construction and building materials*, 24, 438–447.

Sen, S. 2012. The Impact of BIM/VDC on ROI: *Developing a Financial Model for Savings and ROI Calculation of Construction Projects,* Master of Science Thesis, Stockholm.

Shahi, A.; West, J. S.; Haas, C. T. 2013. Onsite 3D Marking for Construction Activity Tracking, *Auto-mation in Construction*, 30, 136–143.

Shen, W.; Shen, Q.; Sun, Q. 2102. Building Information Modeling-Based User Activity Simulation and Evaluation Method for Improving Designer User Communications, *Automation in Construction*, Vol. 21, 148–160.

Simanavičienė, R.; Ustinovičius, L. 2012. A new approach to assessing the biases of decisions based on multiple attribute decision making methods, *Electronics and electrical engineering (Elektronika ir elektrotechnika).* Kaunas: Technologija. ISSN 1392–1215.: 117 1, p. 29–32.

Simanavičienė, R.; Liaudanskiene, R.; Ustinovichius, L. 2012. A new synthesis method of structural, technological and safety decisions (SyMAD-3), *Journal of civil engineering and management. Vilnius* 18(2): 265–276.

Skaitmeninės statybos Lietuvoje gairės 2014–2020 m, 2014. http://www.skaitmeninestatyba.lt/files/140724_Skaitmenines_statybos_Lietuvoje_2014–2020_GAIRES_v1(1).pdf [15.04.2015].

Smith, D. K.; Tardif, M. 2009. *Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide For Architects, Engineers, Constructors, And Real Estate Asset Managers*. John Wiley & Sons, p. 216.

Srinivasan, V.; Shocker, A. D. 1973. Estimating the Weights for Multiple Attributes in a Composite Criterion Using Pairwise Judgments, *Psychonometrica* 38(4): 473–493.

Stankevicius V, Karbauskaite J, Monstvilas E. The development of reference values for energy certification of buildings in Lithuania. 2007. *Energy and Buildings*, 39, 284–288.

STR 2.01.09:2012. *Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas*.

Sun, L.; Deser, C.; Tomas, R. A. 2015. Mechanisms of stratospheric and tropospheric circulation response to projected Arctic sea ice loss, *J. Climate*, 28, 7824–7845, doi:10.1175/JCLI-D-15-0169.1.

Suo H., Angelotti A., Zanelli A. 2015. Thermal-physical behavior and energy performance of air-supported membranes for sports halls: A comparison among traditional and advanced building envelopes, *Energy and Buildings*, 109, 35–46.

Syed, A. T.; Abdou, A. A. 2016. A Model Of A Near-Zero Energy Home (Nzeh) Using Passive Design Strategies And Pv Technology In Hot Climates, *Journal of Green Building*, 11(1), 38–70.

Šarka, V.; Zavadskas, E. K.; Ustinovičius, L., Šarkienė, E.; Ignatavičius, Č. 2008. System of project multicriteria decision synthesis in construction, *Technological and Economic development of Economy* 14(4): 546–565.

Tamošaitienė, J.; Turskis, Z.; Zavadskas, E. K. 2008. Modeling of contractor selection taking into account different risk level. *In 25 th International Simpozium "Automatic and Robotic in Construction, ISARC'2008"*, 676–681.

Taylor J. E., Bernstein Ph. G. 2009. Paradigm Trajectories of BuildingInformation Modeling Practice in Project Networks, *Journal of Management in Engineering*, 25(2), 69–76.

Triantaphyllou, E. 2000. *Multi-Criteria Decision Making Methods: a Comparative Study* / Dordrechet: Kluwer Academic Publshers, 290 p.

Tserng, H.-P.; Ho, Sh.-P.; Jan, Sh.-H. 2014. Developing BIM- assisted as-built schedule management system for general contractors, *Journal of Civil Engineering and Management* 20(1): 47–58.

Tulenheimo, R. 2015 Challenges of Implementing New Technologies in the World of BIM – Case Study from Construction Engineering Industry in Finland, *Procedia Economics and Finance*, 21: 469–477.

Turner W. J. N., Walker I. S. 2013. Using a ventilation controller to optimise residential passive ventilation for energy and indoor air quality, *Building Environment* 70 (2013) 20e30, http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.004.

Turskis Z., Zavadskas E. K. 2010. A new fuzzy additive ratio assessment method (ARAS-F). Case study: The analysis of fuzzy multiple criteria in order to select the logistic centers location, *Transport*, 25 (4), 423–432.

Turskis Z., Zavadskas E. K. 2010b. A novel method for multiple criteria analysis: grey additive ratio assessment (ARAS-G) method, *Informatica*, 21 (4), 597–610.

Ustinovičius, L; Rasiulis, R.; Nazarko, Ł.; Vilutienė, T.; Reizgevičius, M. 2015. Innovative research projects in the field of Building Lifecycle Management*, Procedia Engineering*, 122: 166–171.

Ustinovichius, L.; Shevchenko, G.; Barvidas, A.; Ashikhmin, I. V.; Kochin, D. 2010. Feasibility of verbal analysis application to solving the problems of investment in construction, *Automation in Construction* 19(3): 375–384.

Ustinovičius L.; Zavadskas E. K. 2004. *Statybos investicijų efektyvumo sistemotechninis įvertinimas* (Assessment of investment profitability in construction from technological perspectives**)**. Vilnius, Technika, 220 p.

Ustinovichius, L.; Zavadskas, E. K.; Podvezko, V. 2007. Application of a quantitative multiple criteria decision making (MCDM-1) approach to the analysis of investments in construction, *Constrol and Cybenetics* 36(1): 256–268.

van Treeck, Ch.; Frisch, J.; Pfaffinger, M. 2009. Integrated thermal comfort analysis using a parametric manikin model for interactive real-time simulation, *Journal Of Building Performance Simulation,* 2(4), 233–250

Vincke, Ph. 1999. *Outranking approach*, in: T. Gal, T. Stewart, T. Hanne (Eds.) Multicriteria Decision Making: Advances in MCDM models, algorithms, theory and applications, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Viteikiene M., Zavadskas E. K. 2007. Evaluating the sustainability of Vilnius city residential areas, *Journal of civil engineering and management*, 13 (2), 149–155.

Volk, R., Stengel, J., Schultmann, F. 2014. Building information Modeling (BIM) for Existing Buildings Literature Review and Future Needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127.

Volvačiovas, R., Turskis, Z., Aviža, D., Mikštienė, R. 2013, Multi-attribute Selection of Public Buildings Retrofits Strategy, *Procedia Engineering*, vol. 57, pp. 1236–41.

Volvačiovas, R.; Turskis, Z.; Ignatavičius, Č.; Ustinovičius, L.; Ruzgys, A. 2013b. Considering the issue of renovating public buildings with reference to in-kind investigations into wall heat transfer coefficients, *Engineering Structures and Technologies* 5(2): 82–91. http://dx.doi.org/10.3846/2029882X.2013.811783

Wang N., Adeli H. 2015. Self-constructing wavelet neural network algorithm for nonlinear control of large structures. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 249–258.

Wang, H.-Ch.; Jiao, W.-L.; Lahdelma, R.; Zou, P.-H. 2011. Techno-economic analysis of a coal-fired CHP based combined heating system with gas-fired boilers for peak load compensation, *Energy Policy*, 39(12): 7950–7962.

Wong, K.; Fan, Q. 2012. Building information modelling (BIM) for sustainable building design, *Facilities*, 31(3/4): 138–157. (http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2004.04.003)

Yan, H.; Damian, P. 2008. Benefits and Barriers of Building Information Modelling, *12th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Beijing.

Zadeh, L.A. 1978. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility*, Fuzzy Sets and Systems* 1: 3–28.

Zadeh, L.A.; Fu, K.S.; Tanaka, K.; Shimura, M. (Editors). 1975. *Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Processes*. Academic Press, New York.

Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A. 1996. *Multiple criteria evualation of buildings*. Vilnius: Technika.

Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Banaitis A., Kvederyte N. 2004. Housing credit access model: The case for Lithuania, *European Journal of Operational Research*, 155 (2), 335–352.

Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Peldschus F., Turskis Z., 2007. Multi-attribute assessment of road design solutions by using the COPRAS method, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2 (4), 195–203.

Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Saparauskas J., 2005. Sustainable urban development and web-based multiple criteria analysis, *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 6, 217–226.

Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Turskis Z., Tamošaitiene J. 2008b. Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals, *Journal of civil engineering and management*, 14 (2), 85–93.

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2008. A New Logarithmic Normalization Method in Games Theory. *Informatica* 19(2): 303–314.

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2011. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview, *Technological and Economic Development of Economy* 17(2): 397–427.

Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J., Zakarevicius A., 2012. Optimization of weighted aggregated sum product assessment, *Elektronika ir elektrotechnika*, 6, 3–6.

Zavadskas E. K., Turskis Z., Kildienė S.. 2014. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods, *Technological and Economic Development of Economy*, 20 (1), 165–179.

Zavadskas E. K., Turskis Z., Tamošaitiene J., Marina V. 2008. Multicriteria selection of project managers by applying grey criteria, *Technological and Economic Development of Economy*, 14 (4), 462–477.

Žėkas V., Martinaitis V., Streckienė G., Vilutienė T. 2014. A quantitative evaluation of theoretical renewable energy potential of the building site. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(6), 873–883.

Zeleny M., Cochrane J. L. 1982. *Multiple criteria decision making*, McGraw-Hill New York.

Zhang H., Arens E., Huizenga C., Han T., 2010. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: whole-body sensation and comfort, *Building Environment*, 45 (2), 399–410.

Zolfani, S. H.; Sedaghat M.; Maknoon, R.; Zavadskas, E. K. (2015) Sustainable tourism: a comprehensive literature review on frameworks and applications. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 1–30.

Zhang, S.; Teizer, J.; Lee, J. K.; Eastman, C. M.; Venugopal, M. 2013. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules, *Automation in Construction*, 29: 183–195.

Ларичев О. 2002. Свойства методов принятия решений в многокритериальных задачах индивидуального выбора. *Автоматика и телемеханика*, № 2, 146–158.

Талапов В. 2011. *Основы BIM. Введение в информационное моделирование зданий,* 392 с.

Талапов В. 2015. *Технология BIM: суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий*, 410 стр.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Ustinovichius L.; Rasiulis R.; Ignatavičius, Č.; Vilutienė, T. 2012. Analysis of water-proofing defects and technology development for car parking roofs, *Journal of civil engineering and management* 18(4): 519–529. Thomson Reuters Web of Knowledge *(ISI Web of Science)*, IF_{2014}=1,070, http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3846/13923730.2012.701231.

Reizgevicius, M.; Ustinovichius, Leonas L.; Simanavicienė, R.; Rasiulis, R.; Peliksa, M. 2014. The evaluation and justification of the effectiveness of 4D CAD using multi-criteria analysis, *Journal of civil engineering and management*, 20(6): 884–892. Thomson Reuters Web of Knowledge *(ISI Web of Science)*, IF_{2014}=1,070, http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/13923730.2014.978362#.VKewV7feahg.

Rasiulis, R.; Ustinovichius L.; Vilutienė, T.; Popov V. 2016. Decision model for selection of modernization measures: public building case, *Journal of civil engineering and management* 22(1): 124–133, Thomson Reuters Web of Knowledge *(ISI Web of Science)*, IF_{2014}=1,070, http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2015.1117018.

Rasiulis, R; Ustinovichius, L.; Migilinskas, D.; Cepurnaite, J.; Virbickas, A. 2015. Energy efficiency of a public building renovation and reconstruction using base model

passive house and BIM technology, *Engineering structures and technologies* 7(3): 114–125, *Journal indexed in Index Copernicus* (ICV 7,17), ERIH PLUS, Google Scholar, BazTech and BazEkon. ISSN(online) 2300-0813.

Ustinovičius, L.; Walasek, D.; Rasiulis, R.; Cepurnaite, J. 2015. Implementation of information technologies in construction – practical case study, *Economics and Management* 7(1):290–310. Journal indexed in Index Copernicus (ICV 7,17), ERIH PLUS, Google Scholar, BazTech and BazEkon. ISSN (online) 2300-0813, http://dx.doi.org/10.12846/j.em.2015.04.06.

Rasiulis, R. 2011. Plokščiųjų eksploatuojamųjų stogų nuolydžių modeliavimas esant ribiniams nuolydžiams, *Jaunųjų mokslininkų darbai* 3(2): 35–38. ISSN 1648-8776 (Index Copernicus ir CEEOL).

Straipsniai kituose leidiniuose

Ustinovichius, L.; Rasiulis, R.; Nazarko, L.; Vilutienė, T.; Reizgevičius, M. 2015. Innovative Research Projects in the Field of Building Lifecycle Management, *Procedia Engineering* 122: 166–171, http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.021.

Reizgevičius, M.; Ustinovičius, Rasiulis, R. 2013. Efficiency Evaluation of 4D CAD Model, 11th international conference on modern building materials, structures and techniques *(MBMST)*, May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania, *Procedia Engineering* 57: 945–955, http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.120.

Ustinovichius, L.; Rasiulis, R.; Vilutienė, T. 2013b. The interactive system for implicit learning of projecs management in construction, *Creative Construction Conference*, Budapest, Hungary: p. 796–804,
http://2013.creative-construction-conference.com/img/nicedit/CC2013-Proceedings.pdf .

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Building Information Modelling (BIM) is a collaborative way of working, supported by the digital technologies, which unlock more efficient methods of designing. Computer model that has several 'dimensions' can be used for effective management of information throughout a project lifecycle – from earliest concept to operation. BIM-based processes are 'mainstream' for new buildings and infrastructure and have potential in refurbishment projects when complementary workflows such as laser scanning and rapid energy, economic and eco-efficiency analyses are employed. While BIM processes are established for new buildings, the majority of existing buildings are not maintained, refurbished or deconstructed with BIM yet. Volk *et al*. (2014) presents a review of over 180 recent publications on the topic. Results show scarce BIM implementation in existing buildings yet.

In this context BIM technology creates the opportunities for synergies of construction, energy sectors and the software industries. In current BIM various subsystems are installed e.g. construction cost can be calculated using designed building model, same system can be applied when creating timetables, for calculation of current material amount and so on (Popov *et al*. 2010; Migilinskas *et al*. 2013). Despite fast development and spreading standards, challenging research opportunities arise from process automation and BIM adaptation to existing buildings' requirements (Volk *et al.* 2014).

The thesis research problem question is the evaluation of renovation technology and the investigation efficiency of decisions in BIM environment.

Therefore, to address this problem, the thesis offers a developed tree synthesis methodology and multi-criteria model. The methodology is modified for BIM technology development in construction market and it can be applied in actual building renovation designing projects as well as.

Solution of the thesis research problem and practical application of the results would have a positive impact on the technological development of construction sector implementing BIM deployment in Lithuania. The universality of proposed tree synthesis methodology and multi-criteria model can be adjusted for changing environmental conditions and can be applied to the changing environmental conditions assessment.

Relevance of the thesis

The construction sector is one of the most significant sectors affecting the country's economic growth. This sector has significant influence creating high added value and job positions. This sector generates the majority of material investments and concludes about half of the energy demand. Significance of the construction sector is reasoned by building services procurement dominance in public procurement scope. This sector is significant not only for the individual added value, but also in the construction sector job position relationship and impact on other sectors, such as transport, energy, textile, information and communication technologies, employment.

Nevertheless, the question of energy efficiency and selection of most efficient alternative arises, there is no such thing that would enable to compare the efficiency and quality of different alternatives and allow the optimization of pre-built model. There is also no connection with the legal requirements. By using new subsystems allowing optimization and creating the connection with the database of legal requirements decision-maker receives an opportunity to select variant of the highest quality, the most cost effective, eco-efficient and energy saving which would match current legal requirements.

The pressure to build or renovate towards nearly zero-energy buildings means that the building sector needs to significantly upgrade its working practices. However non-technological barriers hamper the implementation of these provisions. The heterogeneity of the construction industry, the large number of companies and the relative lack of quality standards, inspection protocols and guidelines limit the number and impact of large-scale energy efficiency investments and the effective integration of renewable energies.

Supply side, demand side and public authorities need to cooperate and find solutions that drive compelling offers for building owners, and simultaneously lift as many barriers as possible.

The modernization, with use BIM technologies, of old buildings will have strong influence on the obligation taken by the communities to reduce $C0_2$ emissions, as the application of BIM based energy management model on early stages of building life cycle will ensure the selection of most energy efficient solutions. As currently, there is limited articulated demand from building owners for significant energy performance

improvements in existing buildings the product resulted from project will lift the significant barriers towards the sound, transparent and high quality renovation processes. This article as a good example will expectedly influence the fostering of the large-scale renovation, because the tool created with some modifications could be easily applied in different climatic zones.

Object of the research

Efficiency evaluation of renovation options using BIM technologies for the administration buildings

Aim of the thesis

To create a multi-criteria model for administrative building renovation options and decision efficiency investigation and evaluation methodology, applying BIM technology and its algorithm for practical application.

The objectives of the thesis

1. To analyze literature published efficiency researches of the renovation technologies and decision in BIM environment.
2. To set the energy consumption efficiency enhancing measures as well as administrative buildings' renovation opportunities.
3. To set the definitions of progress and development of ROI using BIM technologies.
4. To establish the basic model of energy efficiency for public building renovation and reconstruction using passive house and BIM technologies.
5. To develop construction options for the passive house.
6. To establish a tree synthesis methodology and multi-criteria model of the administrative building renovation technologies.
7. To establish decision model for selection of modernization measures.
8. To verify the multi-criteria model and created methodology, to adapt the algorithm to the testing of administrative Building renovation technologies and solutions performance and evaluation, using BIM technology in practice.

Research methodology

This thesis is based on foreign and Lithuanian scientists' publications, researches, construction companies' data, construction and design governing laws, construction technical regulations, construction law, BIM standards. Experimental evaluation, data structuring, graphical data representations are carried out. Decision-making method, modernization options synthesis' decision method, multi-criteria analyses, assessing the modernization effectiveness, are applied. Different publications and reports of the

construction industry institutions, statistics of Lithuanian and foreign institutions were used. Technical information of BIM manufacturers, various reports, return on investments calculation methodology were examined.

Scientific novelty of the thesis

The new results of the dissertation have been found to the science of construction engineering:

1. Energy efficiency of a public building renovation and reconstruction using base model passive house and BIM technology was developed.
2. Administrative building renovation technology tree synthesis methodology and multi-criteria model were designed deemed to create an algorithm for administrative building renovation project in BIM environment.
3. Decision model was developed for modernization measures selection, allowing to identify most efficient construction and engineering installation decisions for building renovations.

Practical value of the research findings

Research results might be useful for companies in making micro-level, mezzo-level, macro-level decisions identifying the efficiency of administrative building renovation technologies and decisions and evaluating them in BIM environment and applying to company's activities. Thesis research results application in macro-level can be useful formatting and implementing a unanimous BIM system and digitalizing construction sector of individual countries level. Research results may have significant influence on both micro-level and macro-level decision making relating to the introduction of innovations to construction sector, which directly and indirectly will affect other sectors of the economy as well as technology, social and humanitarian fields of science development.

Defended statements

1. Proposed energy efficiency of a public building renovation and reconstruction using base model passive house and BIM technology allow to assess the role of each participant and its level implementing BIM technologies for design company.
2. Administrative building renovation technology tree synthesis methodology and multi-criteria model, which are the basis for the administrative building renovation algorithm for project in BIM environment, were designed.
3. Decision model for selection of modernization measure, allowing to determine the most efficient construction and engineering facilities decision for building renovations, was designed.

Approval of the research findings

9 scientific articles on the subject of the thesis were published, three of which are listed in *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)*(Reizgevičius *et al.* 2014; Ustinovichius *et al.* 2012; Rasiulis *et al.* 2016), other three listed in *Conference material ISI Proceedings* (Reizgevičius *et al.* 2013; Ustinovičius *et al.* 2015; Ustinovičius *et al.* 2013), two – in other peer-reviewed foreign and Lithuanian scientific publications (Ustinovichius *et al.*, 2015; Rasiulis *et al.* 2015), one of the articles – in peer reviewed Lithuanian conference material (Ustinovichius, Rasiulis 2015).

Thesis research results were published in five scientific conferences (four international):

– 11th International Conference of "Modern Building Materials, Structures and Techniques" of VGTU, 2013, Vilnius;

– 15th German-Lithuania-Poland colloquium "Innovative Solutions in Construction Engineering and Management", 2015, Poznan, Poland;

– Creative Construction Conference 2013 m. Budapest, Hungary;

– 6th International Scientific Conference of "Young Scientists", 2013, Vilnius;

– Analizy problemów statyki i dynamiki konstrukcji budowlanych 2015 m. Bialystok.

The internship in Poland, Bialystok University of Technology was participated in 2015, where information about BIM implementation in Poland was collected.

Structure of the dissertation

The thesis consists of an introduction, three chapters, general conclusions, references and list of author's scientific publications on the subject, a summary in English and annexes.

The scope of the thesis with the summary in English is 134 pages with the exception of 2 annexes, the text contains 46 illustrations and 18 tables. 186 references have been used writing the dissertation.

1. Analysis of renovation facilities for administrative buildings using building information modeling technology

The first chapter of the thesis is focused on administrative building renovation feasibility analysis in BIM environment. The analysis of foreign literature and research is being executed.

Chapter analyzes the energy consumption efficiency improvement measures. The main purpose of modernization of buildings is to support microclimate and comfort conditions. It is necessary for microclimate to be not too cold and not too hot of premises to be appealing. The indoor humidity is also important. 70 percent and higher humidity is considered as a negative condition and vice versa when it is less than 40 percent. Summer slight – draft is considered as a positive condition, but during the cold period is negative. However, ventilation of premises is necessary in order to eliminate unpleasant

odors and reduce the accumulated humidity. It is known that low variations in temperature cause air flows and high variation causes colds.

A more detailed analysis of administrative building renovation feasibility was carried out. Economical, social and environmental balance is promoted in sustainable construction practice implementing construction projects. Sustainable construction practice refers to various methods in the process of implementing construction projects that involve less harm to the environment. Energy performance of a building is an estimated energy content expressed as a building energy performance class required when using the building for its intended purpose.

External thermal insulation not only saves energy but also ensures heat and dryness of the building. For this reason, in many cases the external insulation must be preferential over the inside insulation. However, in some cases, inside thermal insulation is possible when avoiding construction dampness due to the condensation by setting up works. Due to the underestimation of the humidity flow by convection, transference by air, the diffusion moisture transfer levels are often overestimated. Cavities and constructive voids can cause humidity flow through them. Humidity flow by air runs faster and in higher content. Further, work examines the interface of comfort conditions and thermal insulation.

In this chapter the developed BIM technology return on investment method *ROI MR* and *ROI* calculation formula are being analyzed, newly introduced variables are discussed. The calculations show BIM technology payback to be a long process. Knowing that BIM design software cost over 15.000,00 EUR and full-time employee with the salary (gross) of 2.200,00 EUR working only with BIM program the program ROI is expected only 5 years.

2. Energy efficiency of administrative building renovation and reconstruction using passive house model and building information modeling technology

The second chapter presents the created multi-stage assessment of BIM technologies efficiency model. The chapter describes 4D conception and application in Lithuania and abroad, analyses 4D efficiency theoretically. 4D efficiency experiment has been performed using decision support methods: SAW, COPRAS, TOPSIS. BIM maturity model has been analysed. The author presents BIM implementation phase to design division into 4 stage (see Fig. S2.1).

In order to ensure efficient energy consumption for heating it is not enough to cover house constructions with a thick layer of insulation material. The rational thickness is important since the warm air of the heating devices goes up and forms a high pressure to the partitioning constructions, i.e. ceilings, walls, windows. Warm air breaks outside through every possible leak with the force. At the same time, because of the air depletion at the lower section of the indoor, cold air forces in through various floor, door, wall and window cracks, and this air must be heated again. This energy loss can be reduced by tightening the partitioning constructions. Next heat loss involves radiative and conductive means, i.e. when the central heating or hot air emitted heat leak

though the walls to external environment. This energy loss can be reduced by increasing the thermal resistance of partitioning constructions that have a major impact on heat loss of the premises.

Chapter covers detailed analysis of the passive houses construction. Thermal insulation is not enough in order to keep the heat and to achieve the desired partition construction resistance. It is important for the building construction to be well-equipped technologically as around 25–30% of the building defects occur in the external walls due to its own weight, ceilings, roof withstand, wind effects, uneven foundation settlings resulting forces, temperature – humidity deformations, solar radiation, precipitation, air and temperature change and etc.

The essential passive house requirements are – tightness, high thermal resistance and ductwork ventilation system. Since the building should be particularly tight, it should have forced indoor ventilation. Passive house ventilation system must meet few requirements – heating season extracted air heat recovery should be at least 80% and the noise of the ventilation system in every living room should not exceed 25 dB, i.e., the work has to be inaudible.

Decision-making based analysis of a number of problems or their synthesis often requires integration of several problems into a coherent whole. Decision-making using the methods of synthesis requires step-by-step selection of the most effective option from a generated set of alternatives. The decision model used for selection of alternative combinations of modernization measures in this study is presented in Figure S2.1.

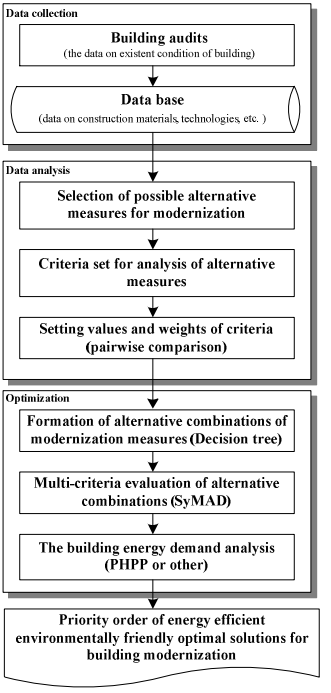


Fig. S2.1. The proposed decision model

First, building and energy experts perform the audits and collect the data on existent condition of building. Collected building data is stored in database together with data on available construction materials, technologies, etc. After that, experts select possible alternative measures for modernization, taking into account the result of building energy audit, state of building structures and specific problems found in exact building.

Experts, together with building managers, determine criteria set for analysis of alternative modernization measures. Next, experts set values and weights of criteria using pairwise comparison. Formation of alternative combinations of modernization measures were using decision tree model (Fig. S2.2).

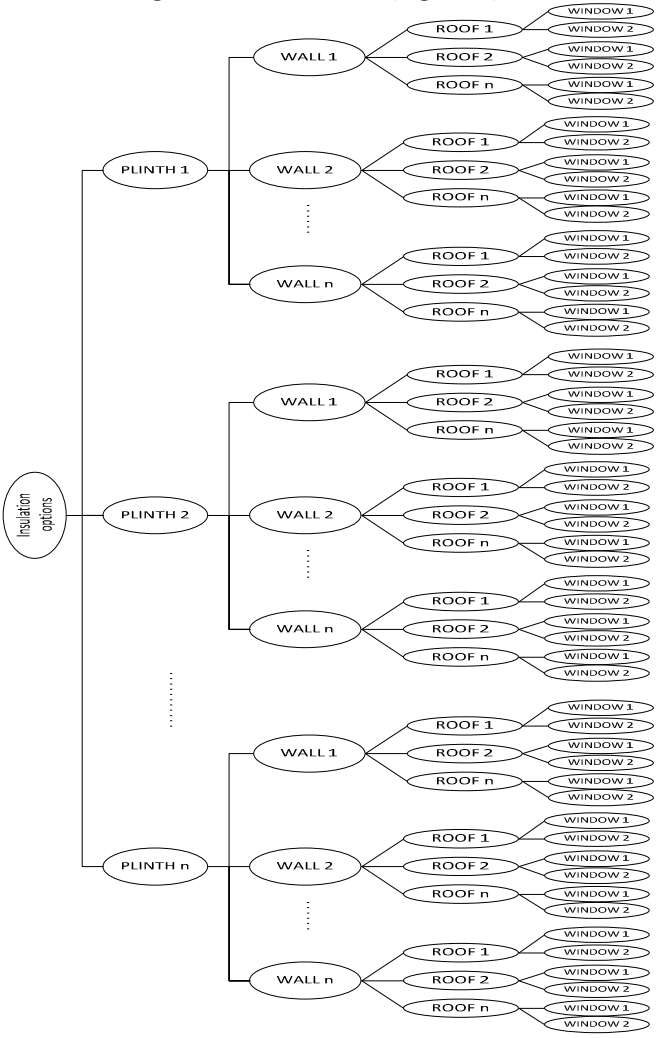


Fig. S2.2. A fragment of decision tree used selecting alternative combinations of modernization measures

Factors, determining the necessity of public buildings refurbishment, are related to the problems encountered in particular building. Selected criteria for the evaluation of public building modernization measures are defined in Table S2.1.

Table S2.1. Criteria set for analysis of alternative modernization measures

No	Criteria	Measuring units
R_1	Heat transfer coefficient	W/m^{2}K
R_2	The cost of measure	EUR
R_3	Predicted lifespan of the measure	years
R_4	Construction work possibility not depending on the seasonality	points
R_5	Annual savings	kWh/m^2/m
R_6	Simple payback period	years
R_7	Thickness of structure*	mm

* only for plinth, exterior walls and roof

Decision-making is the process of defining the goals, determining possible alternatives, gathering information about relevant criteria and selecting the optimal alternatives. In this work authors are applying a new multistage method: *Synthesis of Multiple Attribute Decisions by three methods – SyMAD*-3. This method is addressed to combine multiple criteria decisions into a single solution. Authors believe this method to be very suitable for evaluation of modernization decisions of the building envelope. Presented algorithm comprises method for integrated significance determination of efficiency indicators and multiple criteria decision methods *COPRAS*, *TOPSIS* and *SAW*. Three multiple criteria decision support methods based on quantitative measurements used to increase the reliability of the decision.

The SyMAD-3 method. The purpose of this method is multi-objective decision synthesis, using three multiple criteria decision methods. Multistage decision tree model represents the structure used for analysis of alternative solutions at different stages of decision making process. Model represents a decision tree and uses the following notations:

- $K = \{k\}$, $(k = 1, 2, \ldots, c)$ is the set of stages in the decision analysis, k is the stage number; c is the number of stages;
- m_k $(k = 1, 2, 3)$ *is* the number of decision tree nodes in each stage, determined depending on the number of the decision tables;
- $z = mc$ is the number of decision tree branches connecting the root node with the terminal node (leaf node), where mc is the number of the last decision tree branches. Number of the branches is the number of the alternative combinations.

Analyzed alternatives can be grouped and ranked by selecting the appropriate algorithm and the required initial data by using the decision tree model. *SyMAD-3* method algorithm consists of two stages.

Stage 1 is used to determine the object, primary effectiveness of alternatives and to set the calculation data. There are six steps on this stage:

1. Determining the number of solution stages and creating a system of efficiency criteria for each stage *k* of the solution. $K = \{k\}$, (k = 1, 2…, c) is the set of stages in the decision analysis, *k* is the stage number, c is the number of stages. In addition, decision tables for each stage of the solution are made, where m_k is the number of decision tree nodes in each stage at the *k* stage determined depending on the number of the decision tables. Using these data tables, decision matrices are constructed:

$$X_t = \left\| x_{ij}^t \right\|, \; t = \overline{1,m}; i = \overline{1,a_t}; \; j = \overline{1,n_k} \tag{S2.1}$$

Here *t* is the number of the decision tables, is the number of alternatives in the *t* decision table and is the number of the efficiency criteria at the *k* stage.

2. Filling the matrices of pairwise comparison, used to determine the significance of efficiency criteria.

$$E = \{p\}, \; p = 1, 2, ..., e_p . \tag{S2.2}$$

Here *E* is the group of experts, *p* – the expert number, e_p – the total number of experts.

3. Setting the coherence of the pairwise comparison. The degree of compatibility is calculated for every matrix:

$$S = \frac{S_I}{S_A} . \tag{S2.3}$$

Here is the matrix compatibility index, is average of the random index. If S <0.1 matrix compatibility is sufficient and matrix is used to determine the significance, if not, matrix data are not used for further calculations (Saaty 1994).

4. Determining the significance of criteria for the *k* stage. The values of integrated significance, are calculated using the matrixes of pairwise comparison filled by experts and processed using the method of least squares. The compatibility of experts' opinions on the significance of criteria are checked by calculating the coefficient of concordance. If the compatibility of experts' opinions is sufficient, the integrated significance, q_{kj}^* are calculating. If the expert opinions' compatibility is insufficient, experts' group composition is reconsidered. The calculations are repeated with the data obtained from renewed expert group.

5. The rationality of alternatives is being determined by three methods: TOPSIS, SAW, COPRAS, using the earlier formed decision matrixes $X_t = \left\| x_{ij}^t \right\|, \quad t = \overline{1,m}, \quad i = \overline{1,a_t}, \quad j = \overline{1,n_k}$ and values of integrated significance $q_{kj}, \quad j = \overline{1,n_k}, \; k = \overline{1,c}.$.

6. After performing the calculations by all three methods, the results are presented in the form of relative importance:

$$(A_k^i [TOPSIS, SAW, COPRAS]) = (R_{kT}^i, R_{kS}^i, R_{kC}^i) , \tag{S2.4}$$

Stage 2 is used to form the alternative combinations and evaluate their rationality. The alternative combinations are created from the alternatives composed at the *first* stage using the decision tree model and presented in decision tables . This stage consists of the following three steps:

7. Alternative combinations can be presented as a vector:

$$B_s = \{\left(R^i_{1,T}, R^i_{1,S}, R^i_{1,C}\right), ..., \left(R^i_{c,T}, R^i_{c,S}, R^i_{c,C}\right)\}$$
$$i = \overline{1, m_k}, k = \overline{1, c}\}, s = \overline{1, z} \quad \text{(S2.5)}$$

8. The obtained alternative combinations are recorded into decision table (table 2) and this data will be used for further calculations.

9. Each alternative combination is evaluated by the TOPSIS, SAW and COPRAS methods. Using the data from the decision table (Table S2.2) the decision matrix is being compiled:

$$Y = [y_{sl}],\ s = \overline{1, z}, l = \overline{1, k \times mt}\ . \quad \text{(S2.6)}$$

Here *mt* is the number of the used methods (in our case *mt* = 3), *k* – stage number, (k = 1, 2, ..., c). In this case *s* is the number of the rows of *Y* matrix, *l* – number of the columns of *Y* matrix.

$$(y_{sl}) = (R^i_{k,Mr}),$$
$$s = \overline{1, z}, l = \overline{1, k \times t}, i = \overline{1, m_k}, k = \overline{1, c}, M_r = \overline{1, t}\ . \quad \text{(S2.7)}$$

Here M_r is the number of the used methods.

Table S2.2. Decision table for alternative combinations of modernization measures

Stages	I stage			...			*c* stage		
Criteria / Alternatives	$R_{[1]}$	$R_{[2]}$	$R_{[3]}$	...	...	...	$R_{[7]}$	$R_{[8]}$	$R_{[9]}$
B_1	$R^1_{c,T}$	$R^1_{c,S}$	$R^1_{c,C}$	...	...	...	$R^1_{s,T}$	$R^1_{s,S}$	$R^1_{s,C}$
B_2	$R^1_{c,T}$	$R^1_{c,S}$	$R^1_{c,C}$	...	...	...	$R^2_{s,T}$	$R^2_{s,S}$	$R^2_{s,C}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
B_z	$R^{n1}_{c,T}$	$R^{n1}_{c,S}$	$R^{n1}_{c,C}$	...	...	...	$R^{n3}_{s,T}$	$R^{n3}_{s,S}$	$R^{n3}_{s,C}$
Optimality direction	*Max*	*Max*	*Max*	...	...	...	*Max*	*Max*	*Max*

A set of criteria required to evaluate the alternatives presented in the matrix *Y* is made. The optimal values of these criteria are maximum and their significance values are the same as they are not affected neither by subjective nor by objective factors. The significance values of criteria have to satisfy the following condition:

$$\sum_{l=1}^{k \times mt} w_l = 1\ . \quad \text{(S2.8)}$$

Here *k* is the number of stages and *mt* is the number of methods.

After evaluating the effectiveness of the alternative combinations by each of above mentioned methods, their values and ranks are presented in a table.

The described method can be used for various multistage, multi – objective decision-making challenges where information on alternatives is given in the quantitative form. In this case, the SyMAD-3 method is used for the analysis and synthesis of replacement solutions for external walls, roof, plinth insulation and windows.

3. Decision making model for modernization measures selection for public buildings

Passive house principle based model to solve the administrative building renovation matters is created. (Fig. S3.1).

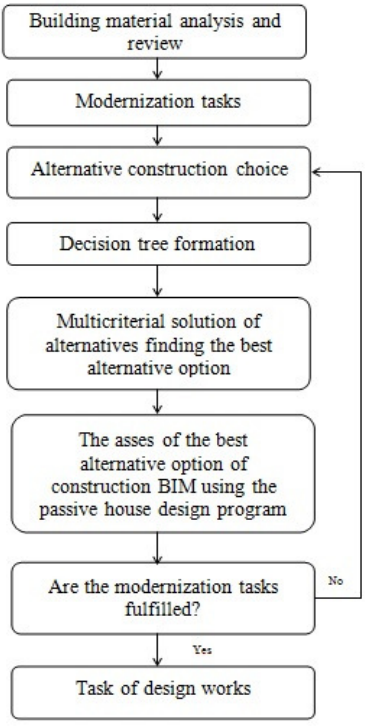


Fig. S3.1. The model of passive building

The Vaidotai railway station of total of 2.168 m^2 building gross, built in 1980, is selected for a study. This is a five – story building with a basement local gas boiler. The building outer walls are of 510 mm thick silicate bricks masonry and plinth is of 400 mm thick reinforced concrete blocks. Walls are not plastered from the outside but are plastered and painted from the inside. The roof is superposed, covered with the membrane roofing. Ventilation chimneys' tinning is worn out. Decoration of the walls and ceilings are worn out. The facade plane has a visible cracks of 1–1.4 mm.

Features of the modernized building constructions were identified during the audit. The best modernization alternatives are selected out of all the chosen alternatives before resolving the Vaidotai st. EC checkpoint task. Therefore the following building parts are being analyzed: plinth part, external walls and roof. Required thermal conductivity U of construction:

Walls U = 0.10–0.15 W/(m^{2}K);
Roof U = 0.09–0.12 W/(m^{2}K);
Plinth U = 0.12–0.18 W/(m^{2}K);
Windows U = 0.70 W/(m^{2}K).

Optional selected heating type is being selected for each building part alternative by identifying the construction type materials, specifying their technical data. The fallowing indicators, given in table 3.1, are selected during the Vaidotai st. EC post plinth's, exterior walls' and roof's examination.

The initial data tables are compiled for each of the building components after selecting the Vaidotai st. EC modernization indicators and alternatives.

Possible modernization measures were considered taking into account the results of building audit and recommendations provided by experts. The multistage decision model is compiled, taking into account the basement aboveground wall (plinth), exterior walls and roof insulation options. Four insulation options for each element were considered. Two replacement options for windows were selected.

All modernization measures (the plinth, walls and roof) are characterized by the equal set of criteria. All alternative combinations of plinths, walls and roofs were assessed taking into account those criteria. The values of criteria characterizing the alternative measures are presented in Table S3.1.

Table S3.1. Alternative measures and values of criteria

Alternative measures	Criteria						
1	2	3	4	5	6	7	8
Plinth 1	0.18	9,155.17	30	2	3.00	12	600
Plinth 2	0.16	9,408.31	25	2	3.66	12	630
Plinth 3	0.14	9,745.72	27	6	3.78	15	670
Plinth 4	0.12	10,167.40	25	2	3.89	14	720
Wall 1	0.15	104,699.95	25	3	58.80	12	690
Wall 2	0.14	107,155.06	26	4	59.75	12	710
Wall 3	0.11	122,949.49	27	6	62.59	15	780
Wall 4	0.10	141,751.33	25	3	63.54	13	820
Roof 1	0.12	31,511.24	25	6	33.05	17	520
Roof 2	0.11	33,008.28	25	5	33.30	17	540
Roof 3	0.10	34,520.68	25	4	33.54	22	590
Roof 4	0.09	35,744.03	25	6	33.78	20	620
Window 1	1.0	87,197.21	25	5	42.91	14	-
Window 2	0.7	104,635.98	28	5	50.23	14	-
Min/max	min	min	max	max	max	min	min
Significance of criteria							
Plinth	0.121	0.254	0.151	0.046	0.173	0.175	0.080
Wall	0.140	0.245	0.136	0.047	0.162	0.172	0.097
Roof	0.136	0.260	0.132	0.049	0.155	0.216	0.052
Windows	0.147	0.253	0.131	0.052	0.209	0.208	-

At the beginning, alternative measures were evaluated separately, using the TOPSIS, SAW and COPRAS methods. Then the results were moved into new decision matrix and the evaluation of alternative combinations of modernization measures is performed using same methods. Intermediate results, obtained after the first iteration by applying the calculation algorithm, are presented in Table S3.2. The 64 alternative combinations of measures were comprised on the basis of intermediate results (Table S3.3). Calculation results show that the rational combination is B38, which consists of 3rd plinth, 2nd wall and 2ndroof options.

Table S3.2. The significance of the alternatives and ranks obtained using TOPSIS, SAW and COPRAS methods

Method / Alternatives	Rationality			Rank		
	TOPSIS	SAW	COPRAS	TOPSIS	SAW	COPRAS
Plinth 1	0.395	0.876	0.243	4	4	4
Plinth 2	0.447	0.887	0.248	3	3	3
Plinth 3	0.604	0.907	0.260	1	1	1
Plinth 4	0.486	0.894	0.249	2	2	2
Wall 1	0.550	0.892	0.246	3	3	3
Wall 2	0.609	0.910	0.253	1	1	2
Wall 3	0.557	0.909	0.255	2	2	1
Wall 4	0.434	0.889	0.245	4	4	4
Roof 1	0.629	0.954	0.255	2	1	1
Roof 2	0.671	0.946	0.254	1	2	2
Roof 3	0.303	0.895	0.239	4	4	4
Roof 4	0.512	0.937	0.251	3	3	3
Window 1	0.423	0.911	0.487	2	2	2
Window 2	0.577	0.958	0.513	1	1	1

Table S3.3. Fragment of the alternative combinations of modernization measures

Building element	Plinth			Wall			Roof		
Criteria / Alternative combination	$R^T_{[1]}$	$R^S_{[2]}$	$R^C_{[3]}$	$R^T_{[4]}$	$R^S_{[5]}$	$R^C_{[6]}$	$R^T_{[7]}$	$R^S_{[8]}$	$R^C_{[9]}$
B^1	0.395	0.876	0.243	0.554	0.892	0.246	0.629	0.954	0.255
B^2	0.395	0.876	0.243	0.554	0.892	0.246	0.671	0.946	0.254
B^3	0.395	0.876	0.243	0.554	0.892	0.246	0.303	0.895	0.239
B^4	0.395	0.876	0.243	0.554	0.892	0.246	0.512	0.937	0.251
B^5	0.395	0.876	0.243	0.609	0.910	0.253	0.629	0.954	0.255
B^6	0.395	0.876	0.243	0.609	0.910	0.253	0.671	0.946	0.254
.....	…..	……	…..	…..	…..	…..	…..	…..	…..
B^{35}	0.604	0.907	0.260	0.554	0.892	0.246	0.303	0.895	0.239
B^{36}	0.604	0.907	0.260	0.554	0.892	0.246	0.512	0.937	0.251
B^{37}	0.604	0.907	0.260	0.609	0.910	0.253	0.629	0.954	0.255
B^{38}	0.604	0.907	0.260	0.609	0.910	0.253	0.671	0.946	0.254

Multilevel decision model is being established, taking into account the insulation options of plinth, walls and roof. Four plinth, four walls and four roof insulation options are analysed (Table S3.4).

The decision on which plinth, wall and roof insulation method would be most rational, assessing them in complex, has to be made; decision tree model is formed by which the evaluation of the complex alternative combinations will be carried out.

Table S3.4. Table of alternative combinations

				Rankings by		
Alternative combinations	*Plinth*	*Wall*	*Roof*	*TOPSIS*	*SAW*	*COPRAS*
B^1	plinth1	wall 1	roof 1	33	34	35
B^2	plinth1	wall 1	roof 2	27	29	28
B^3	plinth1	wall 1	roof 3	61	61	61
B^4	plinth1	wall 1	roof 4	46	48	47
B^5	plinth1	wall 2	roof 1	28	24	24
B^6	plinth1	wall 2	roof 2	24	21	21

Taking into account the above presented roof, walls and plinth insulation decisions and in order to achieve characteristics of the low energy building, the building engineering systems were analysed additionally. These calculations are carried out using the *Passive House Planning Package*, hereinafter – PHPP.

This system gives ability to model changes in the structure of the building, re-design building new engineering equipment, bringing its performance up to date requirements, monitor the current status of the building and to take timely action for the restoration, competently operate existing facilities, both technologically and economically BIM is an additional model for a project's engineering information database, storing all the architectural designs with geometric information and the corresponding technical information for all the works (Ding *et al.* 2012).

BIM construction standardization contain not only geometry of walls, columns, beams, doors, windows, and other building components, but also contains specific attributes for each object, such as material type, material properties, vendor.

Updating the as – built Schedule during the construction phase is generally recognized as the most critical strategy for successful Schedule management (Tserng, *et al.* 2014).

With selected types of structures the design works task can be formed.

General conclusions

1. Literature published building renovation technologies and decision efficiency research opportunities in BIM environment are analyzed in this thesis. Literature analysis shows that BIM technologies are widely analyzed abroad but their application in administrative buildings renovation is a relatively new area. It is determined, that BIM technology assessment multilevel model is necessary to

evaluate the role of influence of each element for building modernization options' analysis.

2. Energy consumption efficiency measures, administrative buildings renovation options, interface between comfort conditions and thermal insulation are identified in this thesis. Energy consumption trends are directly related to energy supply infrastructure modernization and new construction, renovation of old buildings, heating, ventilation and cooling equipment maintenance, renovation and replacement.
3. Definition of BIM technology advantage, evolution and development is submitted. Numerical analysis showed that calculating the payback for design and construction companies, using ROI MR method, allows not only to identify BIM returns on investments (of the first year), but the salary of the employee can also be measured.
4. Energy efficiency of a public building renovation and reconstruction base model and BIM technology are established. This model uses the energy efficiency of collateral for building modernization and estimates the interface between the comfort conditions and effective solutions of thermal insulation.
5. A passive house design options, evaluating passive house solutions, considering and evaluating specifics of the building, are carried out. These options ensure correct decision-making matrix formulation and effective option setting opportunity.
6. Multi-criteria model and options tree synthesis methodology were created for administrative building refurbishment. Decision-making model for effective modernization and decision synthesis tree were formulated using alternative measures of modernization selection combinations.
7. Modernization measures selection decision model was created. This model forms BIM database. The database can be amended and supplemented, which ensures correct classification of BIM conclusion.
8. Complex of applicable efficiency indicators was formulated. Building construction modernization solutions synthesis method – SyMAD-3 adapted for the object. This model ensures effective selection of combination of partitions and engineering equipment.
9. Multi-criteria model and the developed methodology are verified, algorithm adapted for administrative building renovation technologies and solutions performance analysis and evaluation applying BIM technology in practice. Modernization efficiency of Vaidotai station EC building was defined during inspection, basic decision model was formed, rational solutions that latter were adapted in modernization project were made. It was determined that the proposed technology increases the efficiency by 30–40%.

Priedai*

A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Romas RASIULIS

STATINIO INFORMACINIO MODELIAVIMO TECHNOLOGIJOMIS GRĮSTAS MODELIS ADMINISTRACINIŲ PASTATŲ ATNAUJINIMUI VERTINTI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (02T)

BUILDING INFORMATION MODELING TECHNOLOGY BASED MODEL FOR RENOVATION OF ADMINISTRATIVE BUILDINGS ASSESSMENT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2017 02 02. 12,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius