

Ing. Zdenko MALÍK ^{1), 2)}
Ing. Pavel KOPECKÝ, PhD. ^{1), 2)}

¹⁾ ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky efektivních
budov

²⁾ ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
Katedra konstrukcí pozemních
staveb

Aplikácia zjednodušeného dynamického modelu prenosu tepla cez podlahu na zemine v simulácii celej budovy



Application of a Simplified Thermal Model of a Slab-on-ground-floor in a Whole Building Simulation

Recenzenti:
prof. Ing. František Drkal, CSc.
Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.

Tepelný tok podlahou na zemine výrazne ovplyvňuje tepelnú stratu celej budovy. Dnes dostupné programy využívajúce numerické metódy sú schopné určiť časový priebeh tepelného toku akoukoľvek konštrukciou. Keďže je však v prípade konštrukcií v styku so zeminou nutné brať do úvahy veľkú trojrozmernú oblasť, sú výpočty v týchto nástrojoch zdĺhavé a náročné na výpočtový výkon. Kvôli zrýchleniu simulačných výpočtov nahradzujeme referenčný numerický 3D model prenosu tepla cez podlahu na zemine náhradným zjednodušeným 1D modelom. V príspevku sa snažíme zistiť, či je zjednodušený model prenosu tepla cez podlahu na zemine vytvorený podľa publikácie [1] možné implementovať do zjednodušeného tepelného modelu celej budovy. Jednoduchá modelová budova v tvare kvádra s rozmermi 7×7×2,5 m je vystavená časovým zmenám teploty vonkajšieho vzduchu behom modelového roku. Referenčný 3D FEM model budovy a bloku zeminy bol vytvorený v prostredí COMSOL Multiphysics [2]. Zjednodušený 1D model tej istej budovy bol vytvorený v prostredí Matlab [3] a Simulink [4]. Boli porovnávané potreby tepla na vykurovanie (týždenné a mesačné úhrny) z referenčného a zjednodušeného modelu. Navrhnutý zjednodušený model budovy poskytoval výsledky v dostatočnej presnosti pre predbežné zhodnotenie návrhu budovy pri výraznej úspore času na výpočet.

Kľúčové slová: simulácia budov, prenos tepla, podlahu na zemine, náhradný model

The heat transfer through a slab-on-ground floor represents an unneglectable part of the building's heat loss. Nowadays available software using numerical methods of computing is capable to very precisely determine the time course of heat flux through any construction. In case of constructions in contact with the ground a large 3D domain has to be considered. That causes the computations to be very time- and computational power demanding. In order to reduce the time needed for simulation we substitute a reference numerical 3D model of heat transfer through a slab-on-ground floor by a surrogate simplified 1D model. In the paper we are trying to determine whether it is possible to implement this model created in accordance to [1] into a simplified building energy model. A simple model building (a block with dimensions of 7×7×2.5 m) is exposed to an external temperature changes in one model year. The reference 3D FEM model was created in COMSOL Multiphysics [2]. The simplified 1D model of the same building was created in Matlab [3] and Simulink [4]. The energy demand for heating (weekly and monthly sums) was compared between these two models. The simplified model considering the heat transfer through a slab-on-ground floor gives results with an acceptable error. The computation time was reduced significantly.

Keywords: building simulation, heat transfer, slab on the ground, surrogate model

ÚVOD

Tepelný tok podlahou na zemine tvorí nezanedbateľnú časť tepelnej straty celej budovy. Využitie 3D numerických softvérov pre určenie časového priebehu tepelných strát najmä pri zohľadňovaní veľkého bloku zeminy je náročné na výpočtový výkon a na čas výpočtu. To je v dnešnej dobe zvyšujúcich sa nárokov na energetickú efektívnosť, kedy je pre efektívny návrh budovy potrebné vyhodnotiť viacero variant, problematické. Preto je pre prvotné fázy návrhu potrebné disponovať nástrojom, ktorý v krátkom čase určí časový priebeh potrieb energií s dostatočnou presnosťou výsledkov.

V príspevku [1] bol navrhnutý zjednodušený model vedenia tepla cez podlahu na zemine. Ten si kládol za cieľ zmenšiť potrebné množstvo vstupných údajov, potrebný výpočtový čas a výkon, no zachovať čo najvyššiu presnosť. Zjednodušený model bol odvodený pri dopredu určených okrajových podmienkach ako v exteriéri, tak aj v interiéri (harmonické funkcie s ročnou periódou kmitu).

Tento článok si kladie za cieľ zistiť, či je možné použiť navrhnutý zjed-

nodušený model prenosu tepla cez podlahu na zemine v dynamickom simulačnom tepelnom modeli celej budovy. V takom prípade nie je totiž vnútorná teplota dopredu známa, ako sa predpokladalo pri odvodzovaní zjednodušeného modelu. Vnútorná teplota je ovplyvnená napríklad tepelnými stratami cez jednotlivé konštrukcie, ziskami z vykurovacích telies a solárnymi ziskami, a tepelne akumuláčnými vlastnosťami obálky a vnútorných konštrukcií.

Príspevok sa zaoberá popisom tvorby referenčného a zjednodušeného modelu testovanej budovy. V referenčnom modeli bolo potrebné zaviesť určité zjednodušenia pre elimináciu vplyvu tepelných mostov v stykoch konštrukcií. Vplyv týchto väzieb totiž nebol predmetom skúmania pre tento príspevok a vnášal by do výsledkov neistoty.

Tvorba modelov sa delí na tvorbu a validáciu modelu vrchnej stavby (bez uvažovania vplyvu zeminy) a na následné doplnenie o vplyv zeminy. Takto bolo možné určiť vplyv navrhovaného modelu prenosu tepla cez podlahu na zemine na presnosť výsledkov v simulácii celej budovy. Porovnávalo sa množstvo energie, ktorú je potrebné dodať na udržanie vnútornej teploty v intervale hodnôt.

REFERENČNÝ MODEL

Pre získanie referenčných výsledkov bol použitý 3D model jednoduché budovy zostavený v softvéri COMSOL Multiphysics 4.4 [2]. Tento softvér rieši úlohy metódou konečných prvkov. Geometria modelu je v takejto simulácii jemne rozdelená na veľké množstvo štvorbokých elementov, čo umožňuje veľmi presné modelovanie fyzikálnych dejov v každom mieste modelovanej geometrie. Modelovaný bol objekt rozmerov 7×7×2,5 m. Takto malý objekt sme zvolili, pretože modelovanie väčšej budovy pri uvažovaní bloku zeminy, ktorého rozmery sú určené podľa [5], by bolo pri dostupných výpočtových kapacitách neefektívne. Už výpočtová sieť modelu takto navrhutej budovy pozostáva kvôli malej hrúbke stien a strechy zo 77 006 elementov (obr. 1). To vychádza z nastavenia hustoty siete tak, aby v stenách a streche boli po ich hrúbke aspoň 2 elementy. Zvyšok siete bol potom dotvorený podľa parametrov rastu rozmerov elementov prednastavených v simulacnom softvéri [2].

Tento model pozostával zo 4 jednovrstevných stien, strechy a podlahy na zemine. Geometrické parametre jednotlivých konštrukcií sú zhrnuté v tab. 1. Fyzikálne vlastnosti konštrukcií sú zhrnuté v tab. 2. Samotná podlaha na zemine bola uvažovaná iba celkovým tepelným odporom $R_f = 5 \text{ m}^2\text{K/W}$ a jej hmota bola zanedbaná. Táto hodnota tepelného odporu zodpovedá približne odporu 20 cm vrstvy polystyrénu pre izoláciu podlahy na teréne. Modelovaný tepelný odpor spíňa aktuálnu odporúčanú hodnotu pre pasívne budovy normy ČSN 73 0540-2:2011 [6].

Tab. 1 Geometrické vlastnosti konštrukcií v modeloch

Tab. 1 Geometric characteristics of structures in the models

Konštrukcia	Počet [-]	d_1 [m]	d_2 [m]	d_3 [m]	V_{total} [m ³]
Stena	4	7	2,5	0,4	28,0
Strecha	1	7	7	0,5	24,5
Zóna 1	1	7	7	2,5	122,5
Podlaha	1	7	7	-	-

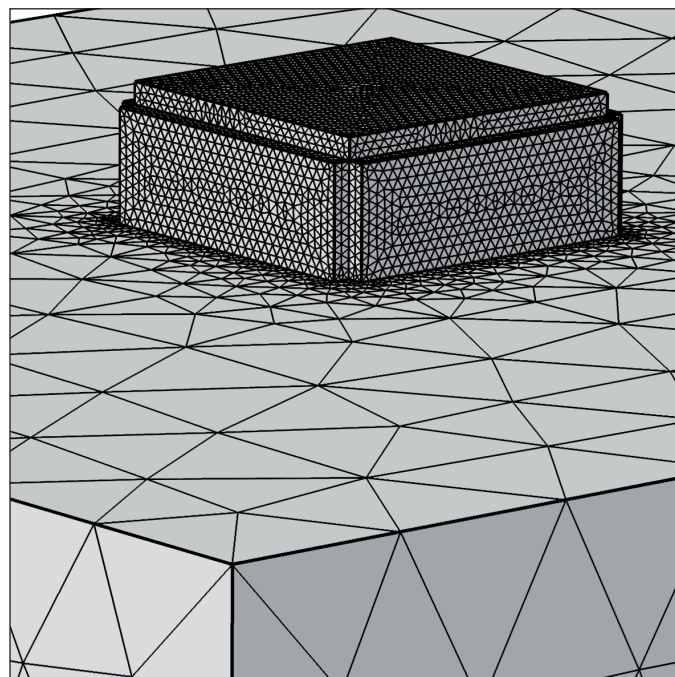
Tab. 2 Fyzikálne vlastnosti konštrukcií v modeloch

Tab. 2 Physical properties of structures in the models

Konštrukcia	c [J/(kg·K)]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]
Stena	1000	0,1	1800
Strecha	1500	0,08	1000
Zóna 1	1000	5,0	29,67
Zemina	1000	2,0	2000

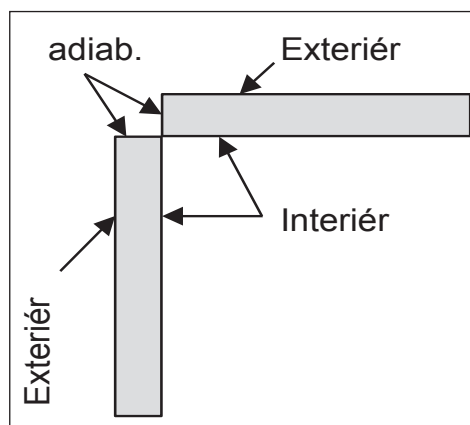
Ako exteriérová okrajová podmienka boli použité hodinové teplotné dáta z Prahy – Karlína. V modeli sa predpokladalo, že na budovu pôsobí iba teplota vonkajšieho vzduchu. Solárne ožarovanie jednotlivých fasád, strechy a povrchu zeme nebolo v simulácii uvažované. Do objemovej hmotnosti Zóny 1 (vnútorné prostredie budovy) bola započítaná aj objemová hmotnosť nábytku a prípadných priečok.

Referenčný model nemodeluje prúdenie vzduchu vo vnútri budovy. Vzduch je považovaný za nehybný materiál s ekvivalentným súčiniteľom tepelnej vodivosti $\lambda_{\text{vzduch}} = 5 \text{ W/(m·K)}$. Rovnaká hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti bola použitá aj v [7].



Obr. 1 Výpočtová sieť v referenčnom 3D modeli spolu so zeminou

Fig. 1 Numerical mesh in the reference 3D model with ground



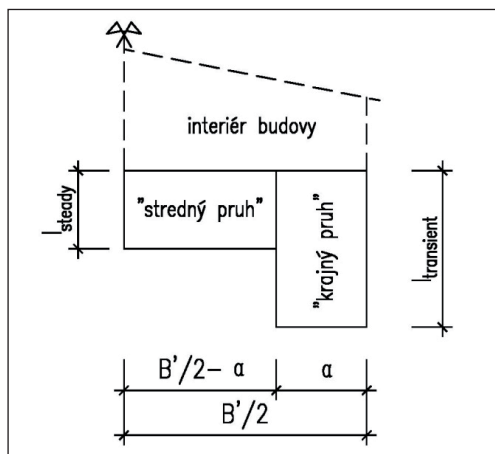
Obr. 2 Spôsob zabránenia vplyvu tepelných mostov v stykoch konštrukcií v referenčnom modeli

Fig. 2 Method to avoid influence of thermal bridges in connections of structures in the reference model

Pre elimináciu tepelných mostov sú v 3D modeli špeciálne riešené styky stena-stena a strecha-stena. Pôdorysne sa steny stretávajú len v jednom bode – vnútorný kút a ďalšia konštrukcia rohu je nahradená adiabatickou okrajovou podmienkou. Obdobne je riešený aj styk steny a strechy. Graficky je riešenie stykov konštrukcií nadzemnej časti budovy znázornené na obr. 2. Styk steny a zeminy je takisto modelovaný tak, aby medzi stenou a zeminou nedochádzalo k tepelnej interakcii. To umožňuje predpokladať šírenie tepla v jednotlivých konštrukciách len jedným smerom v celej ich ploche.

ZJEDNODUŠENÝ MODEL BUDOVY

Zjednodušený model bol zostavený v prostredí Matlab [3] a Simulink [4] ako sústava uzlov s tepelnou kapacitou prepojených vzájomne tepelnými vodivosťami. Tento model teda v porovnaní s referenčným modelom generalizuje geometriu a vlastnosti jednotlivých prvkov a využíva výrazne hrubšie delenie zadanej geometrie. Eliminácia tepelných mostov v referenčnom modeli umožnila modelovať tepelný tok medzi interiérom a exteriérom jednotlivými konštrukciami ako jednorozmerný problém. Steny boli rozdelené na 25 uzlov, strecha na 15 uzlov.



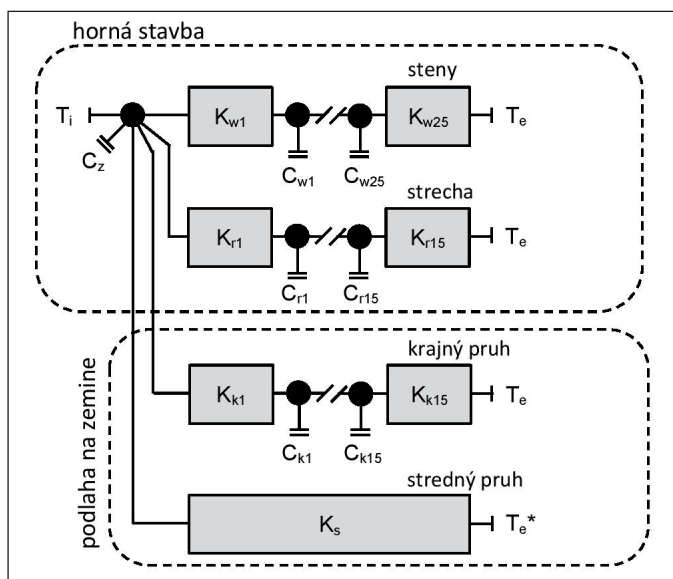
Obr. 3 Geometria prvkov zjednodušeného modelu prenosu tepla cez podlahu

Fig. 3 Geometry of elements of the simplified model of heat transfer through the floor

Tab. 3 Parametre zjednodušeného dynamického modelu pre zvolenú referenčnú budovu
Tab. 3 Parameters of the simplified dynamic model for the selected reference building

Parameter	Hodnota [m]
B'	3,50
$B'/2$	1,75
l_{steady}	0,49
$l_{\text{transient}}$	3,57
α	1,01

Časť modelu reprezentujúca podlahu na zemine bola vytvorená z dvoch pruhov zeminy (obr. 3). Geometrické parametre oboch pruhov boli nastavené podľa publikácie [1] a ich hodnoty sú uvedené v tab. 3. V týchto blokoch sa uvažuje s jednorozmerným šírením tepla. Krajný pruh podľa obrázku je tvorený pätnástimi uzlami s tepelnou kapacitou. Na jeho spodnom okraji pôsobí aktuálna hodnota teploty vonkajšieho vzduchu.



Obr. 4 RC schéma zjednodušeného modelu budovy. T_i – teplota v interiéri; T_e – aktuálna exteriérová teplota vzduchu; T_e^* – priemerná exteriérová teplota vzduchu za posledných 90 dní; K – tepelná vodivosť; C – tepelná kapacita uzla; z – zóna vnútorného prostredia; w – stena; r – strecha; k – krajný pruh; s – stredný pruh

Fig. 4 RC diagram of the simplified building model. T_i – indoor temperature; T_e – current outdoor air temperature; T_e^* – average outdoor air temperature over the last 90 days; K – thermal conductivity; C – heat capacity of the node; z – indoor environment zone; w – wall; r – roof; k – side strip; s – central strip

Pruh umiestnený pod stredom budovy sa modeluje ako vodivosť (bez tepelných kapacít). V publikácii [1] sa ako okrajové podmienky pre tento pruh používali priemerné ročné hodnoty teplôt na vnútornej a vonkajšej strane. V tomto príspevku boli použité aktuálna teplota vnútorného vzduchu a priemerná teplota vonkajšieho vzduchu za posledných 90 dní.

POROVNANIE ZJEDNODUŠENÉHO MODELU S REFERENČNÝM MODELOM BUDOVY

Pre porovnanie referenčného a zjednodušeného modelu sa sleduje množstvo energie dodanej na udržanie interiérovej teploty v požadovanom rozsahu. To je dosiahnuté pridaním ohrievača a chladiča, ktoré sú riadené jednoduchým termostatom. Parametre tohto systému sú zhrnuté v tab. 4.

V referenčnom modeli pôsobí ohrievač aj chladič pomerným výkonom v celom objeme vzduchu, v zjednodušených modeloch ako zdroj tepla pôsobiaci priamo na jeden uzel vnútornej zóny.

Tab. 4 Parametre jednoduchého termostatu

Tab. 4 Characteristics of a simple thermostat

Komponent	Zap. keď	Vyp. keď	Výkon [W]
Chladienie	$T_i > 27\text{ °C}$	$T_i < 24\text{ °C}$	1 000
Vykurovanie	$T_i < 19\text{ °C}$	$T_i > 23\text{ °C}$	1 500

Model nadzemnej časti budovy

Pri simulácii nadzemnej časti budovy bez vplyvu podlahy na zemine nedošlo k zapnutiu systému chladenie. Preto boli porovnávané len energie potrebné na vykurovanie. Ich týždenné úhrny sú uvedené v obr. 5, mesačné potom v obr. 6. Z pohľadu týždenných hodnôt je viditeľné, že zjednodušený model potrebu energie na vykurovanie niekedy nadhodnocuje a inokedy podhodnocuje. Najväčší rozdiel predstavuje 23. týždeň (začiatok júna), kedy potrebu tepla nadhodnotil o 11,5 kWh. To pri výkone ohrievača 1 500 W znamená vykurovanie v danom týždni o 7,5 hodiny dlhšie, než bolo potrebné v referenčnom modeli. Mesačné úhrny sú pomerne vyrovnané. Celková ročná potreba energie na vykurovanie je zhrnutá v tab. 5.

Model nadhodnocuje ročnú potrebu energie na vykurovanie o 87 kWh. Rádovo sú výsledné ročné bilancie porovnateľné s predpokladanou ročnou potrebou. Táto bola vypočítaná jednoduchým výpočtom z plôch a tepelných vodivostí obalových konštrukcií a z priemerných ročných teplôt v interiéri a exteriéri.

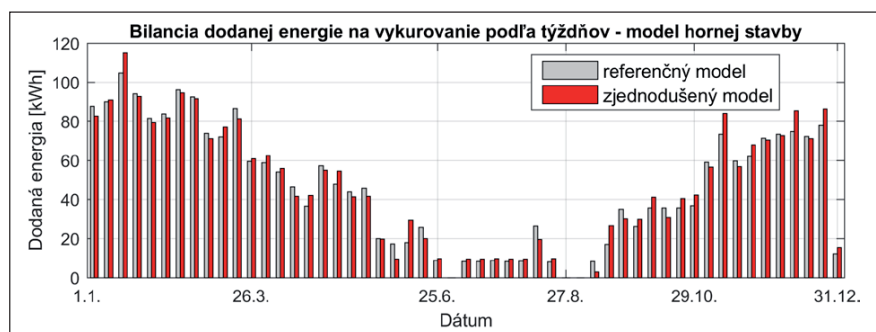
Model celej budovy s podlahou na zemine

Ani v tomto prípade nedošlo k aktivácii systému chladenia. Porovnanie množstva dodanej energie na vykurovanie v jednotlivých týždňoch je znázornené na obr. 7. Rovnako ako v prípade simulácie nadzemnej časti budovy, v niektorých prípadoch zjednodušený model potrebu

Tab. 5 Porovnanie výsledkov modelov hornej stavby

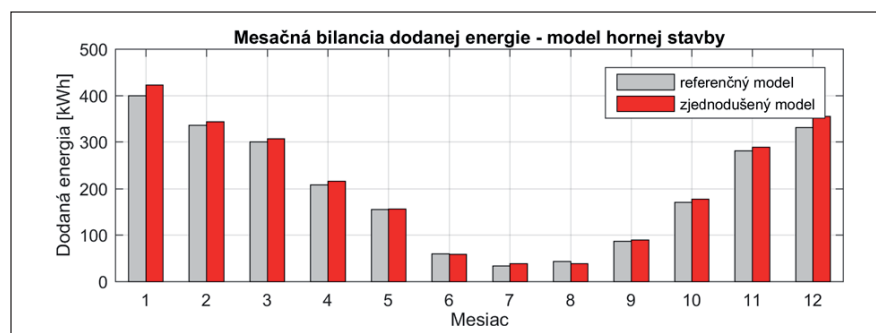
Tab. 5 Comparison of results from model of the top building part

Model	Potreba energie [kWh]
Referenčný model	2 406
Zjednodušený model	2 493
Chyba zjednod. modelu	+87 (3,6 %)
Predpoklad	2 551



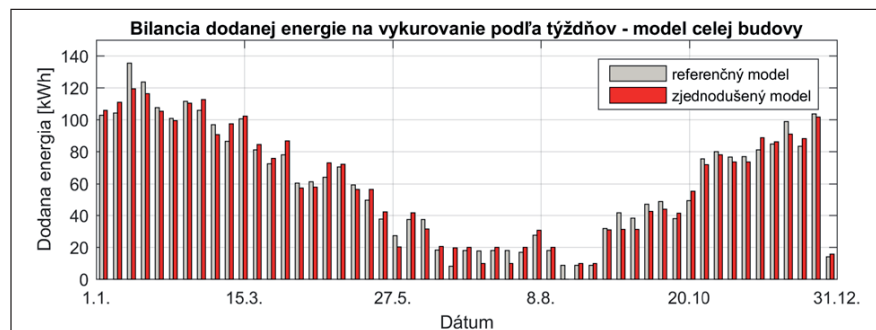
Obr. 5 Grafické porovnanie výsledkov referenčného a zjednodušeného modelu hornej stavby – týždenné hodnoty dodanej energie

Fig. 5 Graphical comparison of results from the reference and simplified model of the top building part – weekly values of supplied energy



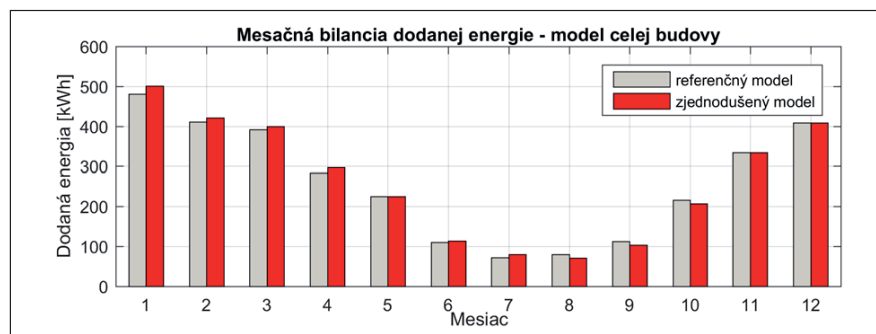
Obr. 6 Grafické porovnanie výsledkov referenčného a zjednodušeného modelu hornej stavby – mesačné hodnoty dodanej energie

Fig. 6 Graphical comparison of results from the reference and simplified model of the top building part – monthly values of supplied energy



Obr. 7 Grafické porovnanie výsledkov referenčného a zjednodušeného modelu celej budovy – týždenné hodnoty dodanej energie

Fig. 7 Graphical comparison of results from the reference and simplified model of the whole building – weekly values of supplied energy



Obr. 8 Grafické porovnanie výsledkov referenčného a zjednodušeného modelu celej budovy – mesačné hodnoty dodanej energie

Fig. 8 Graphical comparison of results from the reference and simplified model of the whole building – monthly values of supplied energy

tepla oproti referenčnému modelu nadhodnocuje, v niektorých zas podhodnocuje. V porovnaní jednotlivých hodnôt však zjednodušený model predpokladá relatívne porovnateľné množstvo dodanej energie s referenčným modelom. Zaujímavý môže byť 34. týždeň v roku (august), kedy je podľa referenčného modelu potrebné vnútornej zóne dodať asi 8 kWh tepla, no zjednodušený model vykazuje nulovú potrebu energie. V absolútnej hodnote sa najviac odlišujú výsledky referenčného a zjednodušeného modelu v 3. týždni (január). Tu zjednodušený model podhodnocuje potrebu energie o 16 kWh.

V mesačných bilanciách dodanej energie znázornených na obr. 8 je vidieť väčšinové mierne nadhodnocovanie potreby energie v zjednodušenom modeli.

Ročná bilancia v referenčnom modeli predstavuje 3 123 kWh, pričom bilancia zjednodušeného modelu 3 163 kWh sa od nej líši o 38,9 kWh. To predstavuje ročné nadhodnotenie potreby energie na vykurovanie o 1,25 % (tab. 6).

Tab. 6 Porovnanie výsledkov modelu celej budovy

Tab. 6 Comparison of results from model of the whole building

Model	Potreba energie [kWh]
Referenčný model	3 123
Zjednodušený model	3 163
Chyba zjednod. modelu	+38,9 (1,25 %)

DISKUSIA

Z výsledkov je zjavné, že už zjednodušené modelovanie hornej stavby s uvažovaním zóny ako jedného uzla s tepelnou kapacitou so sebou prináša isté nepresnosti. Využitie navrhovaného zjednodušeného modelu prenosu tepla cez podlahu na zemine však presnosť modelu v porovnaní s modelom iba hornej stavby výrazne nezhoršuje (tab. 5 a 6).

I použitie trojrozmerných FEM modelov totiž so sebou prináša značné množstvo neistôt. Modelovať celú budovu s uvažovaním všetkých fyzikálnych javov, ku ktorým skutočne dochádza, je veľmi náročné. Domnievame sa, že pri porovnaní simulácie s meraním na reálnom objekte by chyba ± 20 % mohla byť považovaná za ešte stále prijateľný výsledok simulácie. I z tohoto uhla pohľadu sa nejaví neistota vnesená kvôli využitiu náhradného zjednodušeného modelu podlahy na zemine ako vysoká.

Výsledky však naznačujú, že potreba energie na vykurovanie simuláciou na zjednodušenom modeli je vo väčšine mesačných úhrnov ako aj z pohľadu ročnej potreby energie nadhodnocovaná. Toto nadhodnocovanie ako v modeli hornej stavby, tak v modeli kompletnej budovy predstavuje chybu na strane bezpečnosti.

Zdrojom tejto nepresnosti môže byť napríklad spôsob, akým bol v referenčnom modeli dostupný zdroj tepla pre danú zónu (tepelný výkon zdroja bol rovnomerne rozdelený do celého objemu vnútornej zóny). Ďalej bola táto zóna v referenčnom modeli na rozdiel od jedného hmotného uzla v zjednodušenom modeli rozdelená na veľké množstvo konečných prvkov. Pri deaktivácii termostatu v oboch modeloch hornej stavby a sledovaní len časového priebehu teploty v interiéri bola maximálna odchýlka $\Delta T = 0,2 \text{ K}$.

Zavedenie náhradného zjednodušeného modelu prinieslo výraznú úsporu času potrebného na výpočet. Čas výpočtu na tej istej počítačovej zostave sa skrátil zo 40 hodín na 9 minút. To všetko pri zachovaní dostatočnej presnosti. Stále však ide o presnosť vzhľadom k výrazne zjednodušenému referenčnému prípadu. Tepelná izolácia základu dnes obvykle dopĺňa vodorovnú izoláciu v podlahe na teréne o zvislú tepelnú izoláciu po obvode základu. Vplyv zvislej izolácie zatiaľ nie je v navrhovanom zjednodušenom modeli podlahy na zemine zohľadnený.

ZÁVER

Tento príspevok overil použiteľnosť zjednodušeného dynamického modelu prenosu tepla cez podlahu na zemine v zjednodušenom modeli celej budovy. Predstavil referenčný model a jeho predpoklady potrebné preto, aby bolo možné jeho výsledky porovnávať s výsledkami zjednodušeného modelu. Ďalej uviedol spôsob, akým bola vyhodnotená nepresnosť vnesená zavedením práve tohto modelu podlahy na zemine do modelu celej budovy. Takto získané výsledky boli zhrnuté a následne vyhodnotené.

Zavedenie zjednodušeného modelu neovplyvňovalo výrazne negatívne presnosť výsledkov. Vo väčšine mesačných potrieb tepla na vykurovanie a v ročnej bilancii dodanej energie pre udržanie teploty vnútorného vzduchu v stanovenom rozsahu zjednodušený model výsledky mierne nadhodnocoval. Takéto správanie sa modelu je na strane bezpečnosti.

Ďalší vývoj modelu by sa mal uberať smerom k zohľadneniu rozšírenejších spôsobov založenia na teréne. Medzi ne patrí napríklad tepelná izolácia po obvode základovej dosky.

Kontakt na autora: zdenko.malik@cvut.cz

Podakovanie: Tento príspevok vznikol za finančnej podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605; za finančnej spoluúčasti grantu ČVUT číslo SGS16/011/OHK1/1T/11.

Literatúra:

- [1] MALÍK, Z., KOPECKÝ, P. Simplified dynamic thermal models of slab on ground floors. In: *CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*. Praha: Grada publishing, 2016, s. 837–844. ISBN 978-80-271-0248-8.
- [2] COMSOL Multiphysics 4.4 [online]. b.r. [cit. 2016-09-25]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [3] Matlab R2015b [online]. b.r. [cit. 2016-09-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab>
- [4] Simulink [online]. b.r. [cit. 2016-09-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/simulink>
- [5] ISO 13370:2007. Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods. b.r.
- [6] ČSN 73 0540-2:2011. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha, 2011.
- [7] VAN SCHIJNDEL, J. Methodologies and Preliminary Results. In: *Annex 58: Round Robin experiment: First results on CE 1: Design of the test box experiment*. Bilbao: 2011, s. 9–70.

FLEXIBILNÍ VÝKONNÉ VĚTRÁNÍ

- lokální větrací jednotka s rekuperací až 90%
- jednoduché ovládání pomocí aplikace SI Comfort
- automatický režim větrání
- účinná proti bakteriím a plísním
- snižuje náklady na vytápění
- nenápadný vzhled



NOVINKA

KORASMART TUBE 2400 A 2400E

