



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Kristína Kaniková

Autoreferát dizertačnej práce

**Aerodynamika štrbinových medzipriestorov dvojitéch
transparentných fasád**

na získanie akademického titulu: „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe: 3659 Teória a konštrukcie pozemných stavieb

v študijnom odbore: stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava 2024



Dizertačná práca bola vypracovaná na Stavebnej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave na katedre konštrukcií pozemných stavieb v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Kristína Kaniková**
Stavebná fakulta STU
Katedra konštrukcií pozemných stavieb
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Boris Bielek, PhD.**
Stavebná fakulta STU
Katedra konštrukcií pozemných stavieb
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa.....o.....h na Katedre konštrukcií pozemných stavieb Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Radlinského 11, v miestnosti č.

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty

Abstrakt

Táto dizertačná práca sa zaoberá aerodynamikou štrbinových medzipriestorov dvojitých transparentných fasád (DTF), pričom zahŕňa aj prirodzený pohyb vzduchu v medzipriestore, geometriu fasády a použitie simulačných nástrojov CFD (Computational Fluid Dynamics).

Teoretická časť prezentuje históriu DTF, ich rozdelenie podľa geometrie konštrukcie a materiálových vlastností, ako aj modelovacie postupy. Zároveň rozoberá prednosti a výzvy DTF v oblasti tepelnej pohody, prirodzeného vetrania, akustiky, osvetlenia, investičných a prevádzkových nákladov a požiarnej bezpečnosti.

Metodická časť popisuje použité metódy výskumu, ktoré zahŕňajú numerický výpočet, počítačovú simuláciu prúdenia (CFD) a experimentálne meranie v Twin-rooms.

Záverečná časť prezentuje výsledky numerického výpočtu, počítačovej simulácie a experimentálneho merania. Výsledky sú navzájom porovnávané a analyzované, čím sa dosahuje komplexný obraz o aerodynamickom správaní DTF a ich vplyve na interiérové prostredie.

Celkovo táto práca prináša komplexný pohľad na problematiku aerodynamiky štrbinových medzipriestorov DTF, pričom kombinuje teoretické poznatky s praktickými výsledkami získané rôznymi výskumnými metódami. Významným prínosom je aj skúmanie prirodzeného pohybu vzduchu v medzipriestore a geometrie fasády pomocou simulačných nástrojov CFD, čo umožňuje hlbšie pochopenie dynamiky prúdenia v týchto špecifických architektonických prvkoch.

DTF predstavujú inovatívny architektonický prvok s veľkým potenciálom pre zlepšenie energetickej efektívnosti a tepelného komfortu v interiéri budov. Ich široké využitie v praxi si však vyžaduje komplexnú analýzu ich tepelno-technických vlastností, požiarnej bezpečnosti a vplyvu na vnútorné prostredie.

Táto dizertačná práca prináša cenný prínos do oblasti DTF a slúži ako podklad pre ďalší výskum a vývoj v tejto oblasti.

Kľúčové slová: Dvojité transparentné fasády, tepelná pohoda, energetická efektívnosť, vnútorné prostredie, numerický výpočet, počítačová simulácia, experimentálne meranie, požiarne bezpečnosť.

Abstract

This dissertation thesis deals with the aerodynamics of narrow cavities of double skin facades (DSF), including natural air movement in the cavity, facade geometry, and the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation tools.

The theoretical part presents the history of DSF, their classification according to geometry, construction, and material properties, as well as modelling methods. It also discusses the advantages and challenges of DSF in terms of thermal comfort, natural ventilation, acoustics, lighting, investment and operating costs, and fire safety.

The methodological part describes the research methods used, which include numerical calculations, CFD simulations, and experimental measurements in Twin-rooms.

The final part presents the results of numerical calculations, CFD simulations, and experimental measurements. The results are compared and analysed with each other, leading to a comprehensive picture of the aerodynamic properties of DSF and their impact on the indoor environment.

Overall, this work provides a comprehensive overview of the aerodynamics of DSF narrow cavities, combining theoretical knowledge with practical results obtained using various research methods. A significant contribution is also the investigation of natural air movement in the cavity and facade geometry using CFD simulation tools, which allows for a deeper understanding of the flow dynamics in these specific architectural elements.

DSF represent an innovative architectural element with great potential for improving energy efficiency and thermal comfort in building interiors. However, their widespread use in practice requires a comprehensive analysis of their thermal-technical properties, fire safety and impact on the indoor environment.

This dissertation thesis makes a valuable contribution to the field of DSF and serves as a basis for further research and development in this area.

Key words: Double-skin transparent facades, thermal comfort, energy efficiency, the indoor environment, numerical quantification, CFD simulations, experimental measurements, fire safety.

Úvod

Dvojité transparentné fasády (DTF) sú v súčasnosti novým vývojovým trendom realizácie fasád moderných budov s využívaním obnoviteľnej energie slnečného žiarenia pre energetické potreby budovy. Európska únia a spoločnosť nás nabáda, aby nové budovy boli ekologické, nízkoenergetické, inteligentné, využívali obnoviteľné zdroje energie, po celý svoj životný cyklus (výstavba, prevádzka, demolácia) boli šetrné k životnému prostrediu a boli realizované a využívané v súlade s koncepciou trvalo udržateľného rozvoja. DTF je založená na fyzikálnej podstate medzipriestorov [1] a pasívne využíva energeticky čistý zdroj slnečnej energie. DTF funguje ako energeticky nárazový medzipriestor, v ktorom sa krátkovlnné slnečné žiarenie pri dopade na netransparentný povrch v medzipriestore (žalúzie protislnečnej ochrany, nepriehľadný parapet, podlahový rošt a pod.) mení na dlhovlnné tepelné žiarenie, ktoré uvedené povrchy zahrieva a tieto následne vyžarujú toto teplo do vzduchu prúdiaceho medzipriestorom DTF, čo spôsobuje zvýšenie teploty v medzipriestore. DTF funguje správne, keď dochádza za každej klimatickej situácie k prúdeniu vzduchu v jej medzipriestore.

Správne fungovanie DTF by malo zabezpečiť výraznú energetickú úsporu počas celej doby používania, v porovnaní s klasickou jednoduchou fasádou. Správne navrhnutá a nadimenzovaná DTF dokáže v letnom období redukovať energetickú záťaž vnútorného prostredia (zo slnečného žiarenia) o 90 – 95 %. V zimnom období môže vykazovať DTF v porovnaní s jednoduchou fasádou energetickú úsporu v rozsahu 25 až 30 % [1]. Pri nesprávnom návrhu DTF z hľadiska jej funkčnej aerodynamiky môže dochádzať k prehrievaniu medzipriestoru a následnej aj interiéru. Preto je dôležité, aby za každej klimatickej situácie dochádzalo ku pohybu vzduchu v medzipriestore. Kritickou klimatickou situáciou je bezvetrie, kedy je dynamika pohybu vzduchu v medzipriestore založená len na konvektívnom vztlaku. Aby dochádzalo k pohybu vzduchu v medzipriestore DTF za kritickej klimatickej situácie bezvetria, musí byť celkový aerodynamický odpor medzipriestoru DTF menší ako kritický konvektívny vztlak. Čím je šírka medzipriestoru väčšia, tým jednoduchšie je možné splniť túto podmienku. Pri správnom návrhu DTF poskytujú väčšie energetické úspory ako klasické jednoduché fasády a navyše znižujú hluk z dopravy [2]. Nesprávny návrh jednotlivých komponentov alebo systému DTF môže viesť k závažným nedostatkom, a k nepriaznivým účinkom fungovania, s ktorými sa stretla nejedna budova. Problémom funkčnej aerodynamiky v štrbinových fasádach (hrúbka medzipriestoru 100 – 300 mm) môže byť v letnom období spustená protislnečná ochrana vo forme tieniacich žalúzií [1]. Úlohou tieniacich zariadení v medzipriestore DTF je tepelná regulácia medzipriestoru, najmä kvôli ochrane vnútorných priestorov pred nadmernými energetickými ziskmi zo slnečného žiarenia [3]. Nesprávne umiestnenie tieniacich zariadení v úzkom štrbinovom medzipriestore DTF môže predstavovať pomerne veľký miestny aerodynamický odpor. Nevhodné umiestnenie tieniacich zariadení môže natoľko zvýšiť celkový aerodynamický odpor medzipriestoru DTF, že bude väčší ako je sila konvektívneho vztlaku vzduchu v medzipriestore a za bezvetria nebude dochádzať k požadovanému prúdeniu vzduchu. Okrem

prietoku vzduchu i optické vlastnosti transparentných konštrukcií môžu ovplyvniť zvýšenie teploty v medzipriestore vplyvom tepla absorbovaného v tieniacich zariadeniach [4, 5].

Aby sa predišlo vzniku problémov je potrebné overiť správne fungovanie výpočtovými, simulačnými metódami CFD (počítačová simulácia prúdenia) a experimentálnym meraním, aby sa doladili nedostatky simulácií. DTF majú svoje výhody aj nevýhody. Cena DTF bude vždy vyššia ako cena jednoduchej transparentnej fasády. Na druhej strane energetické úspory pri prevádzke budov s DTF sú výrazné a energetická návratnosť investície do týchto fasád v porovnaní s budovami s jednoduchými transparentnými fasádami je na úrovni 8 – 10 rokov. DTF sa navrhujú aj z akustického hľadiska na odfiltrovanie dopravného hluku [2]. Je však potrebné venovať náležitú pozornosť aj akustickému hľadisku pri ich návrhu, keď vietor pri náraze na nevhodne navrhnuté konštrukčné prvky v exteriérovej časti fasády môže vytvárať nežiadúce akustické javy (na vstupnom, výstupnom otvore, protidažďovej žalúzii, sieťke proti vtákom a hmyzu...).

1. Predmet, cieľ metodika dizertačnej práce

1.1 Predmet

Predmetom dizertačnej práce je DTF, ktorá svojou fyzikálnou podstatou dokáže výrazne redukovať zaťaženie zo slnečného žiarenia a tým aj potrebu chladenia v letnom období a súčasne dokáže výraznou mierou redukovať tepelné straty v zimnom období, čím prispieva ku vysokej energetickej efektívnosti budov s takouto fasádnou technikou. Okrem toho výraznou mierou sa podieľa aj na utlmení exteriérového hluku a prispieva tým ku akustickej pohode v interiéri budovy.

Základom správneho fungovania akejkoľvek DTF je jej funkčná aerodynamika to znamená aby za každej klimatickej situácie dochádzalo ku pohybu vzduchu v jej medzipriestorom. Kritickým stavom je bezvetrie kedy pohyb vzduchu v medzipriestore zabezpečuje jeho konvektívny vztlak. DTF musí byť nadimenzovaná tak, aby celkový aerodynamický odpor jej medzipriestoru bol menší ako je sila konvektívneho vztlaku vzduchu. Vzhľadom na malú šírku medzipriestoru a veľký miestny aerodynamický odpor protislnečných žalúzií v predmetnom medzipriestore je dimenzovanie funkčnej aerodynamiky DTF obzvlášť náročné pri fasádach s úzkym štrbinovým medzipriestorom so šírkou 100 - 300 mm, ktoré sú predmetom tejto dizertačnej práce.

1.2 Cieľ

Cieľom dizertačnej práce je zabezpečiť funkčnú aerodynamiku medzipriestoru dvojitej transparentnej fasády (DTF), a to najmä v podmienkach bezvetria, vysokej vonkajšej teploty a vysokej intenzity slnečného žiarenia. Celkový aerodynamický odpor predmetnej DTF musí byť menší ako sila konvektívneho vztlaku vzduchu. Hlavným cieľom predloženej práce je návrh a laboratórne experimentálne overenie geometrie prototypu DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom

s integrovaným tieniacim zariadením, jeho polohy a typu v medzipriestore z hľadiska jej funkčnej aerodynamiky numerickým výpočtom, pomocou CFD výpočtového softvéru ANSYS Fluent a laboratórnym experimentom s využitím pavilónového výskumu v reálnych podmienkach vonkajšej klímy v zariadení Twin-rooms v Centrálnych laboratóriách SvF STU v Bratislave - Trnávke. Z hlavného cieľa sa odvíjajú nasledovné čiastkové ciele práce:

- a) Konštrukčná tvorba DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom vo forme viacerých vývojových variantov DTF s integrovaným tieniacim zariadením. Posúdenie vývojových variantov DTF v simulačnom programe ANSYS Fluent z hľadiska ich funkčnej aerodynamiky pre režim fasády za bezvetria.
- b) Na základe funkčnej aerodynamiky optimalizácia výsledného variantu DTF.
- c) Výroba prototypovej vzorky optimalizovanej DTF pre pavilónový laboratórny experiment v reálnych podmienkach vonkajšej klímy.
- d) Realizácia pavilónových experimentálnych meraní na prototypovej vzorke DTF v experimentálnom zariadení Twin-rooms s využitím meracích prístrojov: meteorostanica (rýchlosť a smer vetra, vonkajšia teplota vzduchu, intenzita slnečného žiarenia), snímača na meranie tepelného toku (tepelný tok konštrukčnými prvkami DTF), snímače PT-100 (povrchové teploty na vonkajšej a vnútornej stene konštrukcie a teploty prúdiaceho vzduchu v medzipriestore), intenzitu slnečného žiarenia na zvislom povrchu obvodového plášt'a, v medzipriestore a v interiéri pomocou pyranometrov, operatívnu teplotu pomocou guľového teplomera v miestnosti, anemometrov na meranie rýchlosti prúdenia vzduchu (rýchlosť prúdenia vzduchu v medzipriestore a kvantifikácia prúdového poľa) so zameraním na jej funkčnú aerodynamiku.
- e) Vyhodnotenie a spracovanie výsledkov z experimentálneho merania in-situ.
- f) Porovnanie výsledkov z experimentálneho merania v Twin-rooms s výsledkami z výpočtových simulácií.
- g) Odladenie výpočtových simulácií na základe výsledkov z laboratórneho experimentu (výsledky z laboratórneho experimentu slúžili ako etalón pre odladenie simulácií).

1.3 Metodika

Kvantifikácia celkového aerodynamického odporu (Z) dvojitej transparentnej fasády (DTF) s úzkym štrbinovým medzipriestorom sa určí:

- **výpočtovými vzťahmi** a to implementáciou teoretických a empirických vzťahov pre výpočet celkového aerodynamického odporu (Z) DTF a zohľadnením parametrov geometrie štrbinového medzipriestoru a vonkajších klimatických podmienok,

- o **pomocou počítačovej simulácie prúdenia (CFD)**, využitím CFD softvéru Ansys Fluent na modelovanie prúdenia vzduchu v DTF a analýzou rozloženia rýchlostí prúdenia a teplôt vzduchu v medzipriestore
- o **pavilónovým experimentom v experimentálnom zariadení Twin-rooms** v podmienkach reálnej klímy. Využitím meracích prístrojov na meranie rýchlosti a smeru vetra, teploty vonkajšieho vzduchu a intenzity slnečného žiarenia na horizontálnej a vertikálnej rovine pomocou meteorologickej stanice a meracích prístrojov na meranie: teploty vzduchu v medzipriestore a povrchových teplôt pomocou snímačov PT100, tepelného toku, intenzity slnečného žiarenia na zvislom povrchu obvodového plášťa, v medzipriestore a v interiéri, pomocou pyranometra, operatívnej teploty v miestnosti, pomocou guľového teplomera a rýchlostí prúdenia vzduchu v medzipriestore, pomocou anemometrov.

2. Výsledky dizertačnej práce

2.1 Numerický výpočet

2.1.1 Popis výpočtových vzťahov a výpočet

Celkový aerodynamický odpor fasády (Z) ovplyvňujú miestne aerodynamické odpory (Z_m) a aerodynamický odpor trenia po výške fasády (Z_l).

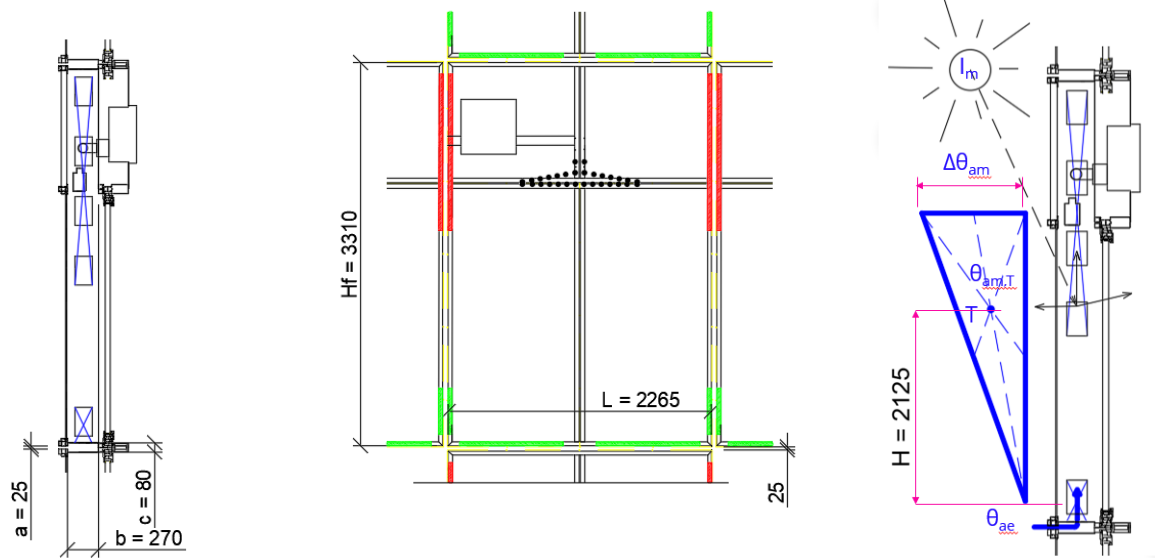
$$Z = 1 + \left(\sum Z_l + \sum Z_m \right) = 1 + \sum \frac{\bar{\lambda} \cdot (H + b)}{D_h} + \sum_{x=1}^x \xi_x \quad [-] \quad (1)$$

Miestnych aerodynamických koeficientov ξ je 12, jeden pri otvorenom vstupe do fasády (ξ_1), tri pri náhlom rozšírení prierezu (ξ_2, ξ_6, ξ_{10}), dva pri zmene smeru vzduchového prúdu (ξ_3, ξ_7), tri pri náhlom zúžení prierezu (ξ_4, ξ_8, ξ_{11}), dva na rošte (ξ_5, ξ_9) a jeden pri výstupe z fasády (ξ_{12}).

2.1.2 Aerodynamický odpor trenia po výške fasády

$$Z_l = \frac{\bar{\lambda}(H + b)}{D_h} \quad [-] \quad (2)$$

Aerodynamický odpor po výške fasády Z_l [-] závisí od koeficientu trenia $\bar{\lambda}$ [-], vzdialenosti ťažiska vstupného a výstupného otvoru na fasáde H [m], ktorá je znázornená aj na Obr. 1, od šírky medzipriestoru b [m], a od aerodynamického priemeru D_h [m].



Obr. 1 Schéma pohybu vzduchu cez DTF a vzdialenosť medzi prívodným a odvodným otvorom na fasáde (H)

Tab. 1 Legenda značiek k Obr. 1

H	vzdialenosť ťažiska prívodných otvorov a odvodných otvorov na fasáde	2,125	[m]
b	šírka medzipriestoru fasády	0,270	[m]
L	dĺžka jednej sekcie fasády	2,265	[m]

Tab. 2 Kinematická viskozita vzduchu, Reynoldsovo číslo, koeficient odporu trenia a aerodynamický odpor trením po výške fasády v závislosti od teploty v ťažisku

Teplota v ťažisku $\theta_{am,taž}$	Kinematická viskozita vzduchu ¹ ν	Reynoldsovo číslo Re	Koeficient odporu trenia $\bar{\lambda}$	Aerodynamický odpor trením po výške fasády Z_l
°C	m ² /s	-	-	-
30	1,5980E-05	6039	0,036	0,378
50	1,7880E-05	5397	0,037	0,388

¹ kinematická viskozita vzduchu vypočítaná podľa [6]

$$Z_l = \frac{\bar{\lambda}(H+b)}{D_h} \quad [-] \quad (3)$$

$$Z_l = \frac{\lambda(-)(2,265 \text{ m} + 0,27 \text{ m})}{0,231596 \text{ m}} \quad [-] \quad (4)$$

$$\bar{\lambda} = 0,3167 Re^{-1/4} \quad [-] \quad (5)$$

$$R_h = \frac{S}{O} = \frac{L \cdot b}{2L + 2b} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

$$R_h = \frac{2,265 \text{ m} \cdot 0,27 \text{ m}}{2 \cdot 2,265 \text{ m} + 2 \cdot 0,27 \text{ m}} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

$$R_h = 0,12062 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

$$D_h = 2 \cdot R_h = 2 \cdot 0,12062 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

$$D_h = 0,24124 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (10)$$

$$v_{am} = \sqrt{\frac{g H \Delta \theta_{am}}{Z \theta_{am, \uparrow A \downarrow}}} \quad [\text{m/s}] \quad (11)$$

$$Re = \frac{v_{am} \cdot 2D_h}{\nu} \quad [-] \quad (12)$$

$$Re = \frac{0,2 \text{ m/s} \cdot 2 \cdot 0,24152 \text{ m}}{\nu} \quad [-] \quad (13)$$

2.1.3 Miestne aerodynamické odpory

$$Z_m = \sum_{x=1}^{12} \xi_x \quad [-] \quad (14)$$

Miestne aerodynamické odpory Z_m [-] sú lokálne odpory v pohybovej línii vzduchového prúdu v medzipriestore DTF. Charakterizujú ich aerodynamické koeficienty miestneho odporu na otvorenom vstupe do fasády (ξ_1), pri náhlom rozšírení prierezu (ξ_2, ξ_6, ξ_{10}), pri zmene smeru (ξ_3, ξ_7), pri náhlom zúžení prierezu (ξ_4, ξ_8, ξ_{11}), na rošte (ξ_5, ξ_9), pri výstupe z fasády (ξ_{12}).

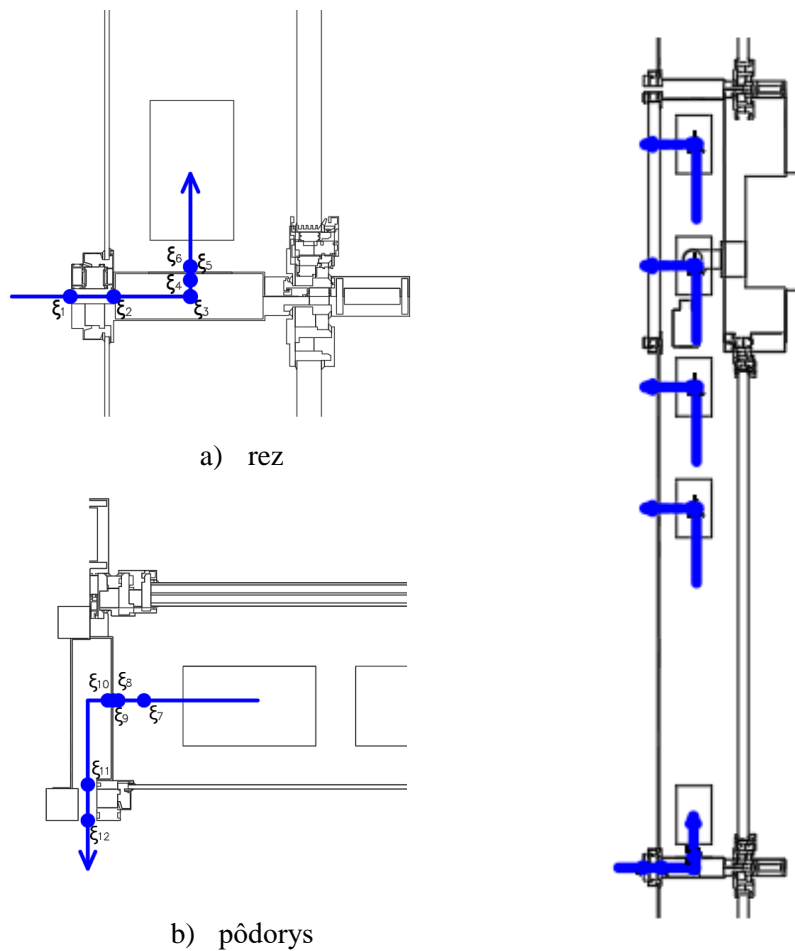
$$Z_m = \sum_{x=1}^{12} \xi_x = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5 + \xi_6 + \xi_7 + \xi_8 + \xi_9 + \xi_{10} + \xi_{11} + \xi_{12} \quad [-] \quad (15)$$

$$Z_m = 6,539 \quad [-] \quad (16)$$

Tab. 3 Označenie, vzorec a hodnota miestnych aerodynamických odporov

Ozn.	Aerodynamický koeficient	Vzorec	Hodnota	J.	Č. rov.
ξ_1	pri otvorenom vstupe do fasády	-	0,500	[-]	(17)
ξ_2	pri náhlom rozšírení prierezu	$\left(1 - \frac{S}{S'}\right)^2$	0,473	[-]	(18)
ξ_3	pri zmene smeru	$1,1 \sqrt{\frac{d}{\frac{b+c}{2}}}$	1,315	[-]	(19)
ξ_4	pri náhlom zúžení prierezu	$0,5 \left(1 - \frac{S}{S'}\right)^2$	0,091	[-]	(20)
ξ_5	na rošte	$\left(1 + \frac{0,7}{\sqrt{1 - \frac{a}{A}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{A}{a} - 1\right)^2$	0,640	[-]	(21)

ξ_6	pri náhlom rozšírení prierezu	$\left(1 - \frac{S}{S'}\right)^2$	0,260	[-]	(22)
ξ_7	pri zmene smeru	$1,1 \sqrt{\frac{d}{\frac{b+c}{2}}}$	1,315	[-]	(23)
ξ_8	pri náhlom zúžení prierezu	$0,5 \left(1 - \frac{S}{S'}\right)^2$	0,130	[-]	(24)
ξ_9	na rošte	$\left(1 + \frac{0,7}{\sqrt{1 - \frac{a}{A}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{A}{a} - 1\right)^2$	0,640	[-]	(25)
ξ_{10}	pri náhlom rozšírení prierezu	$\left(1 - \frac{S}{S'}\right)^2$	0,018	[-]	(26)
ξ_{11}	pri náhlom zúžení prierezu	$0,5 \left(1 - \frac{S}{S'}\right)^2$	0,158	[-]	(27)
ξ_{12}	pri výstupe z fasády		1,000	[-]	(28)



Obr. 2 Znáznornenie miestnych aerodynamických odporov v reze a v pôdoryse

2.1.4 Konvektívny vztlak

Konvektívny vztlak vzduchu, závisí od rýchlosti prúdenia v , objemovej hmotnosti vzduchu ρ , tiažového zrýchlenia g a z rozdielu výšok medzi prírodným a odvodným otvorom vzduchu. Hustotu suchého vzduchu pri tlaku 100 kPa zobrazuje Tab. 4. Hodnoty konvektívneho vztlaku boli vypočítané pre tlak vzduchu 100 kPa. Aby sme dostali bezrozmernú veličinu Z_{opt} , konvektívny tlak Δp_0 pre násobíme tiažovým zrýchlením g .

Výsledný optimálny aerodynamický odpor zodpovedajúci konvektívnemu vztlaku vzduchu Z_{opt} , sa znížil o 2 jednotky z dôvodu neistoty výpočtu a pre potreby rezervy. Výsledky zobrazuje Tab. 4 pre vzostup teploty 15 K.

Pri vzostupe teploty 15 K medzi vstupným a výstupným otvorom je hodnota konvektívneho vztlaku Z_{opt} 8,73 pre teplotu vzduchu vstupujúceho do medzipriestoru 35 °C a teploty vzduchu vystupujúceho z medzipriestoru 50 °C (Tab. 4).

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{konštanta} \quad (29)$$

$$\Delta p_0 = Hg(\rho_{vstup} - \rho_{výstup}) \quad \text{Pa} \quad (30)$$

$$\Delta p_0 = 2,124 \cdot 9,81 (\rho_{vstup} - \rho_{výstup}) \quad \text{Pa} \quad (31)$$

Tab. 4 Hodnoty hustoty vzduchu sú pre suchý vzduch pri tlaku 100 kPa, konvektívny vztlak a optimálny aerodynamický odpor pri vzostupe teploty 15 K

Teplota na vstupe	$\rho_{vstup}^{1,2}$	Teplota na výstupe	$\rho_{výstup}^{1,2}$	Δp_0	Z_{opt}	Vzostup teploty
°C	kg/m ³	°C	kg/m ³	Pa	-	K
35	1,131	50	1,078	1,09	8,73	Δ15

¹ hustota suchého vzduchu pri tlaku 100 kPa

² hustota vzduchu vypočítaná podľa [7]

$$\text{Výpočtový konvektívny vztlak} \quad Z_{opt} = 8,73 \quad (-) \quad (32)$$

2.1.5 Vyhodnotenie výsledkov

$$\text{Aerodynamický odpor trenia po výške fasády} \quad Z_{l(max)} = \frac{\bar{\lambda}(H+b)}{D_h} = 0,388 \quad (-) \quad (33)$$

$$\text{Miestne aerodynamické odpory} \quad Z_m = \sum_{x=1}^{10} \xi_x = 6,539 \quad (-) \quad (34)$$

$$Z = 1 + \sum Z_l + \sum Z_m \quad (-) \quad (35)$$

Celkový aerodynamický odpor medzipriestoru $Z = 7,927$ (-) (36)

Porovnanie Z a Z_{opt} $Z < Z_{opt}$ (-) (37)

$7,93 < 8,73$ (-) (38)

2.1.6 Záver

Celkový aerodynamický odpor medzipriestoru je nižší ako je konvektívny vztlak vzduchu v medzipriestore za bezvetria a teda za bezvetria bude dochádzať ku pohybu vzduchu medzipriestorom DTF.

2.2 Výpočtová simulácia

2.2.1 Cieľ a metodika simulácie

Cieľom výpočtovej simulácie je dokázať, že v medzipriestore dochádza ku prúdeniu vzduchu v medzipriestore aj v čase bezvetria, kedy rýchlosť vetra nie je väčšia ako 0,5 m/s. Aerodynamický odpor predmetnej DTF nebude väčší ako sila konvektívneho vztlaku vzduchu.

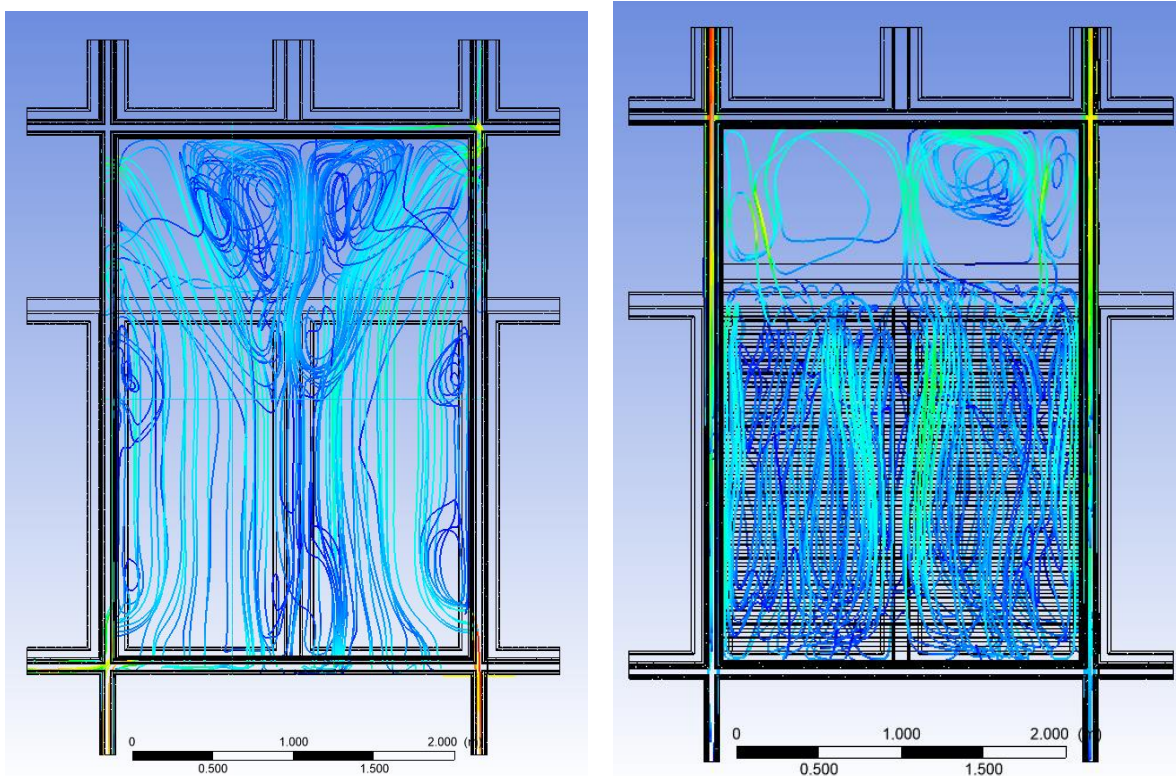
Boli spracované dva vývojové varianty modelov DTF:

- výpočtový model bez použitia tieniacich zariadení v medzipriestore,
- výpočtový model s použitím tieniacich zariadení v medzipriestore.

Pre oba modely boli vykonané CFD simulácie, ktorých výsledky boli zverejnené na dvoch vedeckých konferenciách: Simulace budov a techniky prostředí 2020 (SBTP 2020) v Brne (Kaniková et al. 2020) a Osmá studentska konferencija "Energetska efikasnost i održiv razvoj" (SKEEOR 2020) v Skopje v Macedónsku (Kaniková and Bielek 2020).

Výsledky simulácie (Obr. 3 vľavo) sú prezentované pre optimalizovaný variant DTF, pri ktorej bol za stavu bezvetria zabezpečený dostatočný požadovaný pohyb vzduchu medzipriestorom a jeho rovnomerná distribúcia (bez výraznejších lokálnych zón stagnácie vzduchu vysokej teploty). Na obrázku je vidieť, že k pohybu vzduchu v medzipriestore bez účinkov vetra dochádza. Rýchlosť prúdenia vzduchu v medzipriestore bol veľmi malý v rozmedzí od 0 do 0,134 m/s.

Pri simulácii (Obr. 3 vpravo) sme analyzovali prúdenie vzduchu v medzipriestore DTF so žalúziou v spustenom stave za bezvetria. Simulácia preukázala, že pre tento model pri spustenej žalúzii dochádza za bezvetria ku konvektívnemu pohybu vzduchového prúdu a teda celkový aerodynamický odpor uvažovanej DTF je menší ako sila konvektívneho vztlaku vzduchu v medzipriestore.



Obr. 3 Výsledky z dvoch simulácií

2.3 Pavilónový experiment v podmienkach reálnej klímy

2.3.1 Predmet merania

Premetom merania je dvojitá transparentná fasáda (DTF), ktorá bola počas môjho doktorandského štúdia vyvinutá Katedrou konštrukcií pozemných stavieb. Na jej realizácii som sa podieľala spolu so svojím školiteľom prof. Ing. Borisom Bielekom, a ďalšími.

Základný modul predmetnej DTF rozmerov 2300 x 3360 mm je tvorený DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom šírky 280 mm z hliníkového modulového systému Schüco s prerušeným tepelným mostom, s tromi úrovňami funkčných tesnení, s kontrolovaným odvodom dažďovej vody a kondenzu v každom segmente fasádnych blokov.

Nosná časť fasádneho elementu sa skladá z troch vertikálnych hliníkových stĺpikov a z troch horizontálnych priečnikov (dvoch obvodových s funkciou funkčnej škáry a jedného stredového oddelujúceho transparentnú a parapetnú netransparentnú výplň elementu). Táto konštrukcia vytvára nosný raster fasádneho elementu DTF v jeho vnútornom plášti. V spodnej okennej časti elementu je vnútorný plášť tvorený dvomi oknami s integrovaným krídlom. Okná sú zasklené izolačným trojsklom AGC Glass Thermobel TG Top s vysokou fyzikálnou kvantifikáciou (súčiniteľ prestupu tepla $U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, celková priepustnosť slnečného žiarenia $g = 53 \%$, svetelná priepustnosť $T_L = 75\%$, index vzduchovej nepriezvučnosti $R_w = 35 \text{ dB}$). Horná nepriehľadná parapetná časť vnútorného plášťa

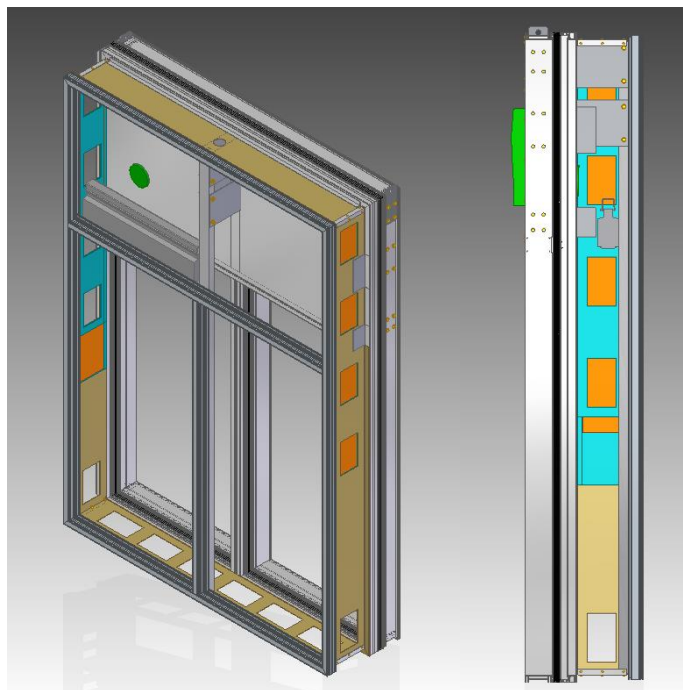
fasádneho elementu je uzatvorená oceľovým pozinkovaným plechom, za ktorým sa nachádza tepelnoizolačná výplň elementu z minerálnej vlny (120 kg/m^3).

Vonkajší plášť v jeho spodnej okennej časti je tvorený jednoduchým bezpečnostným čírym sklom a v nepriehľadnej parapetnej časti fotovoltickým sklom VSG/TVG 4.4.4 (2x TVG 4 mm low-iron, 60 buniek polykryštál (156×156), nominálny výkon 230 Wp, nominálne napätie 32,04 V, nominálny prúd 7,2 A, nepriehľadný modul 12 %), ktoré je osadené v hliníkových rámových profiloch.

Vnútorňý a vonkajší plášť DTF sú navzájom spojené prostredníctvom oceľových konzol a medzipriestor elementu je po stranách uzavretý oceľovým plechom. Prívod vzduchu do DTF je riešený cez spodnú stykovú škáru elementov šiestimi otvormi rozmerov $150 \times 250 \text{ mm}$ a cez bočné stykové škáry v ich spodných úrovniach dvomi otvormi rovnakých rozmerov, teda spolu ôsmimi otvormi. Odvod vzduchu z dvojitej transparentnej časti je riešený cez bočné stykové škáry elementov v ich horných úrovniach ôsmimi otvormi rozmerov $150 \times 250 \text{ mm}$. Odvodné otvory vzduchu je možné motoricky uzatvárať. Prívodné aj odvodné otvory vzduchu sú opatrené sieťkou proti vtáctvu a hmyzu. V medzipriestore DTF sa nachádza protisnečná ochrana vo forme mobilných tieniacich žalúzií, ktoré boli pri experimentálnom meraní v období júl – august s spustenej polohe.



a) prototypov fasády vo výrobnej hale firmy Ingsteel v Senci



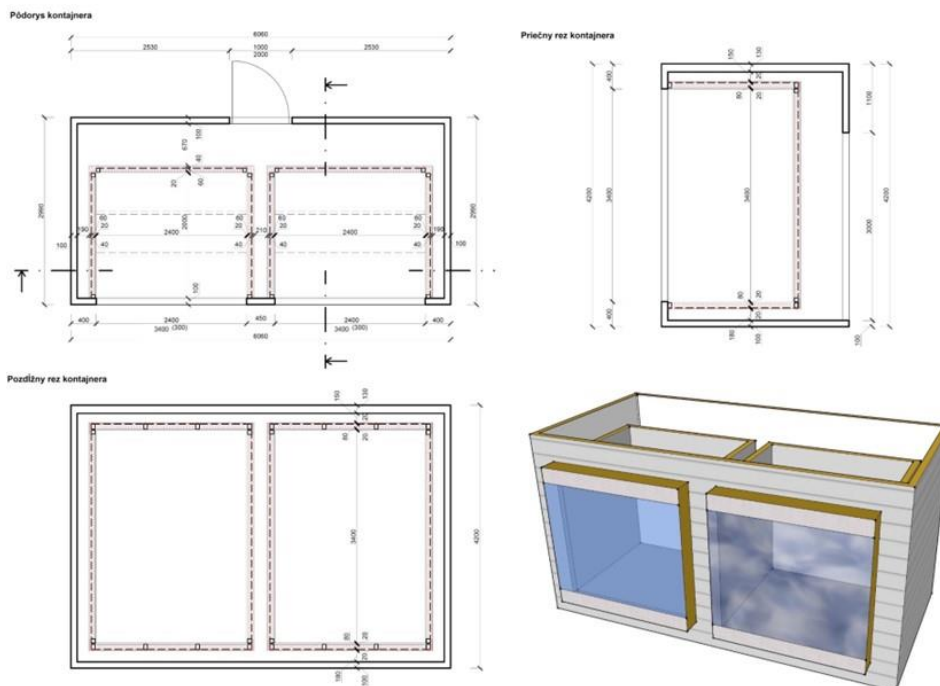
b) výrobný 3D model prototypu DTF

Obr. 4 Výroba prototypov fasády vo výrobnej hale firmy Ingsteel v Senci [62]

V nepriehľadnej parapetnej časti vnútornej steny DTF je situovaná fasádna rekuperačná jednotka Lunos Ne^{xx}t, ktorá nasáva v zimnom období predohriaty vzduch z jej medzipriestoru a v letnom období priamo z vonkajšej klímy.

2.3.2 Metodika merania

Pokiaľ chceme študovať teplotný, aerodynamický a energetický režim DTF v reálnych klimatických podmienkach, bolo potrebné vyvinúť nové experimentálne zariadenie pavilónového typu. Zariadenie (Obr. 5) pozostáva z veľkopriestorového kontajnera s rozmermi 6000 × 3000 × 4200 mm, ktorý je umiestnený na betónových základoch. Nosná konštrukcia samotného kontajnera pozostáva z priestorového rámu zvarovaného z oceľových dutých valcovaných profilov. Plášť pozostáva z ľahkých sendvičových panelov, s vonkajším pozinkovaným tvarovaným plechom, výplňou s vysokou účinnou tepelnou izoláciou na báze minerálnej vlny a vnútornou vrstvou z dreva. Vstup do kontajnera sa nachádza na zadnej dlhšej strane kontajnera (6058 × 4200 mm) a je tvorený dverným otvorom s rozmermi 1000 × 2000 mm s pozinkovanými dverami s výplňovou tepelnou izoláciou (Obr. 5). V kontajneri sú situované dve miestnosti s mernými otvormi 2,4 × 3,4 m orientovanými na juh, do ktorých sa osadzujú merné vzorky fasádnych konštrukcií. V kontajneri aj v oboch miestnostiach sa udržiavala technikou prostredia rovnaká konštantná teplota a teda tepelné toky cez steny, podlahu a strop miestností boli nulové. Tepelné toky sa realizovali iba cez testované merné vzorky fasád. Množstvo energie, ktoré bolo potrebné dodať miestnostiam na zabezpečenie ich konštantnej teploty bolo rovné energii, ktorá prešla cez mernú vzorku fasády.



Obr. 5 Konštrukčné schémy experimentálneho testovacieho zariadenia Twin Rooms pre testovanie progresívnych fasádnych elementov v reálnych podmienkach vonkajšej klímy.



Obr. 6 Pohľad na experimentálne zariadenie

2.3.3 Výsledky experimentálneho merania

Meranie prebiehalo počas dvoch letných mesiacov júl - august 2023. Počas celého letného obdobia bola mobilná tieniaca žalúzia v medzipriestore v stiahnutej polohe s úplne uzavretou žalúziou.

Z dvojmesačného merania sa vybrali a analyzovali 4 varianty klimatických podmienok. Výberové kritérium bolo bezvetrie a vysoká intenzita slnečného žiarenia (okolo 700 W/m^2). Tab. 5 zobrazuje vybrané varianty.

Variant V01 – 10.08.2023 dosahoval najvyššiu vonkajšiu teplotu $22,86 \text{ }^\circ\text{C}$ v čase medzi 12:50 a 13:00. Z tohto 10-minútového intervalu sa spriemerovali teploty, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche a rýchlosť vetra. Namerané hodnoty boli spriemerované aritmetickým priemerom. Tento variant dosahoval vzostup teploty $15,17 \text{ K}$, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche dosiahla hodnotu 719 W/m^2 a najnižšia rýchlosť vetra v tomto 10 - minútovom intervale bola $0,22 \text{ m/s}$ v severo-severozápadnom smere ($24,7^\circ$) nameraná meteorologickou stanicou umiestnenou na streche kontajnera.

Variant V02 – 11.08.2023 dosahoval najvyššiu vonkajšiu teplotu $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ v čase medzi 13:00 a 13:10. Z tohto 10-minútového intervalu sa spriemerovali teploty, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche a rýchlosť vetra. Namerané hodnoty boli spriemerované aritmetickým priemerom. Tento variant dosahoval vzostup teploty $14,59 \text{ K}$, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche dosiahla hodnotu 716 W/m^2 a najnižšia rýchlosť vetra v tomto 10 - minútovom intervale bola $0,45 \text{ m/s}$ v severnom smere ($9,25^\circ$).

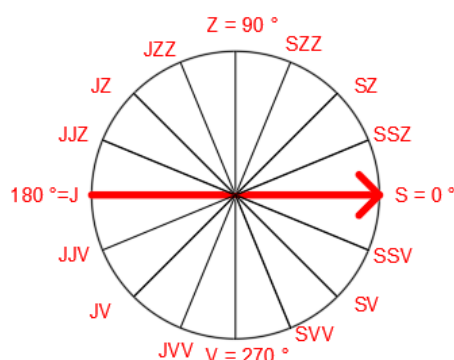
Variant V03 – 12.08.2023 dosahoval najvyššiu vonkajšiu teplotu 28,17 °C v čase medzi 13:45 a 13:55. Z tohto 10-minútového intervalu sa spriemerovali teploty, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche a rýchlosť vetra. Namerané hodnoty boli spriemerované aritmetickým priemerom. Tento variant dosahoval vzostup teploty 14,97 K, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche dosiahla hodnotu 691 W/m² a najnižšia rýchlosť vetra v tomto 10 - minútovom intervale bola 0,05 m/s v juho-juhozápadnom smere (156°).

Variant V04 – 21.08.2023 dosahoval najvyššiu vonkajšiu teplotu 33,2 °C v čase medzi 13:00 a 13:10. Z tohto 10-minútového intervalu sa spriemerovali teploty, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche a rýchlosť vetra. Namerané hodnoty boli spriemerované aritmetickým priemerom.. Tento variant dosahoval vzostup teploty 15,24 K, intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej ploche dosiahla hodnotu 732 W/m² a najnižšia rýchlosť vetra v tomto 10 - minútovom intervale bola 0,0 m/s vo východo-severovýchodnom smere (291°).

Smer vetra z meteostanice zobrazuje Obr. 7.

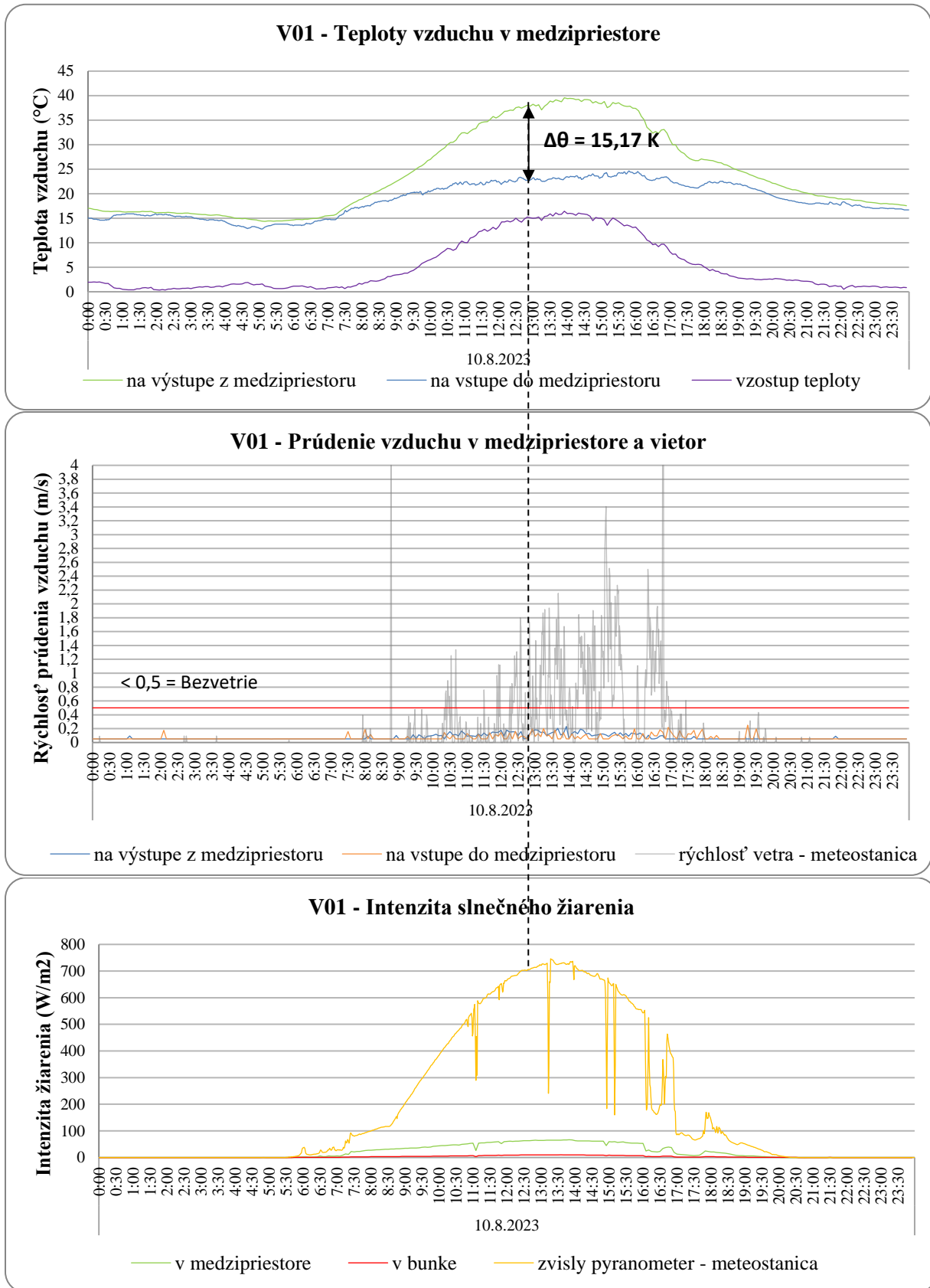
Tab. 5 Varianty

Varianty	Dátum	Čas	Vonkajšia teplota (°C)	Vzostup (K)	Slnečné žiarenie (W/m ²)	Rýchlosť a smer vetra (m/s)
V01	10.8.2023	12.50 – 13:00	22,86	15,17	719	0,22/ SSZ
V02	11.8.2023	13:00 – 13-10	25,50	14,59	716	0,45 / S
V03	12.8.2023	13:45 – 13:55	28,17	14,97	691	0,05 / JJZ
V04	21.8.2023	13:00 – 13:10	33,20	15,24	732	0

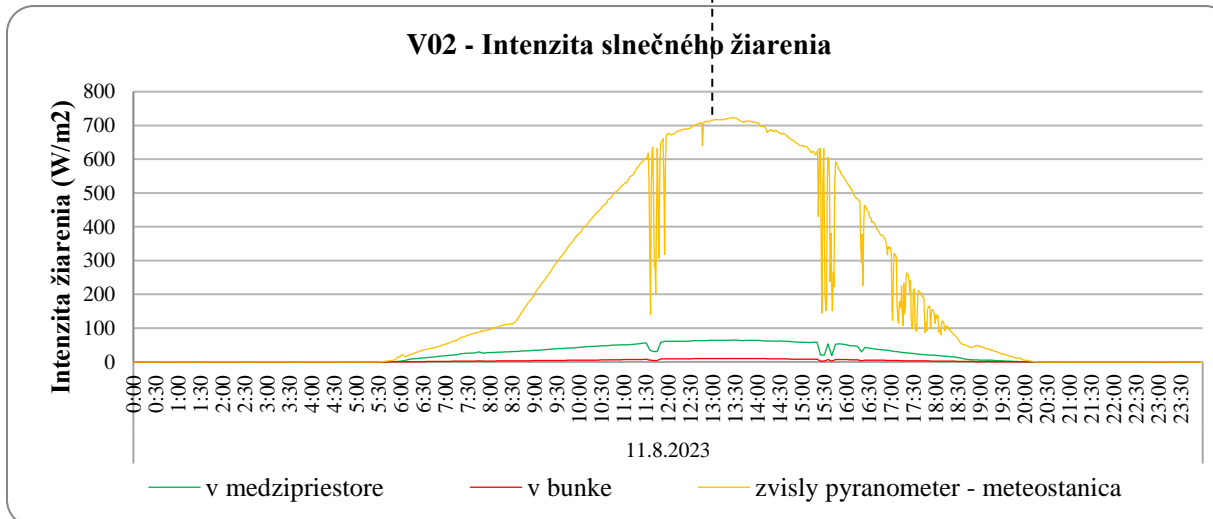
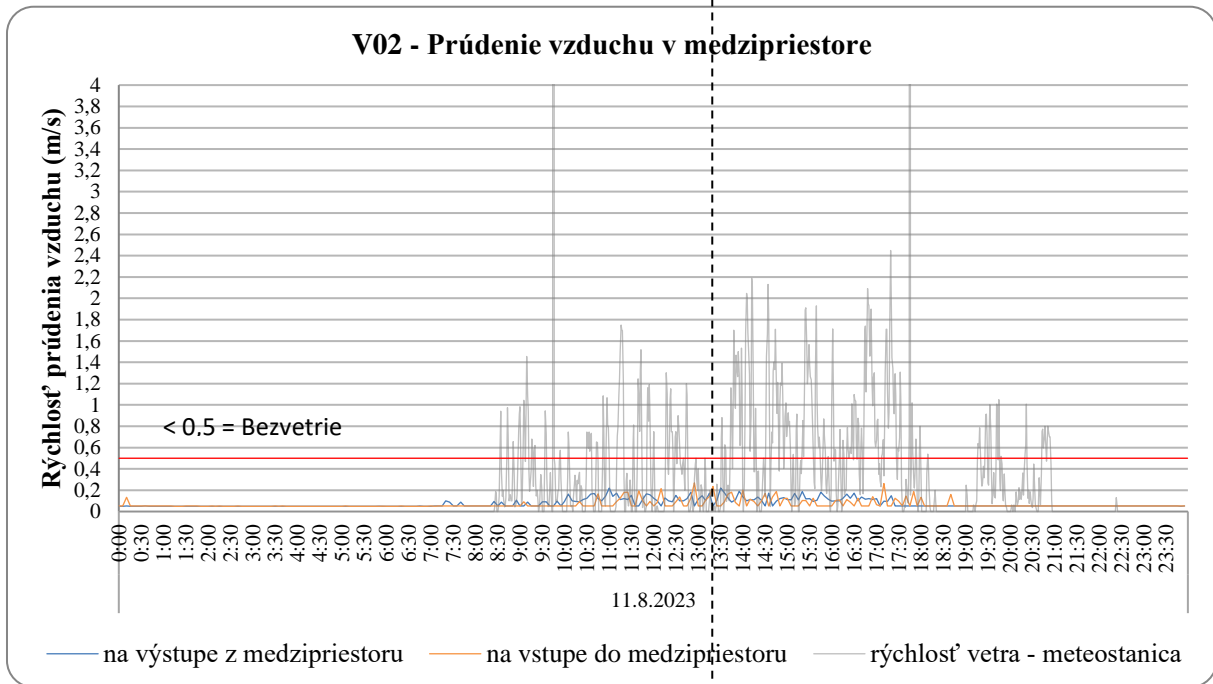
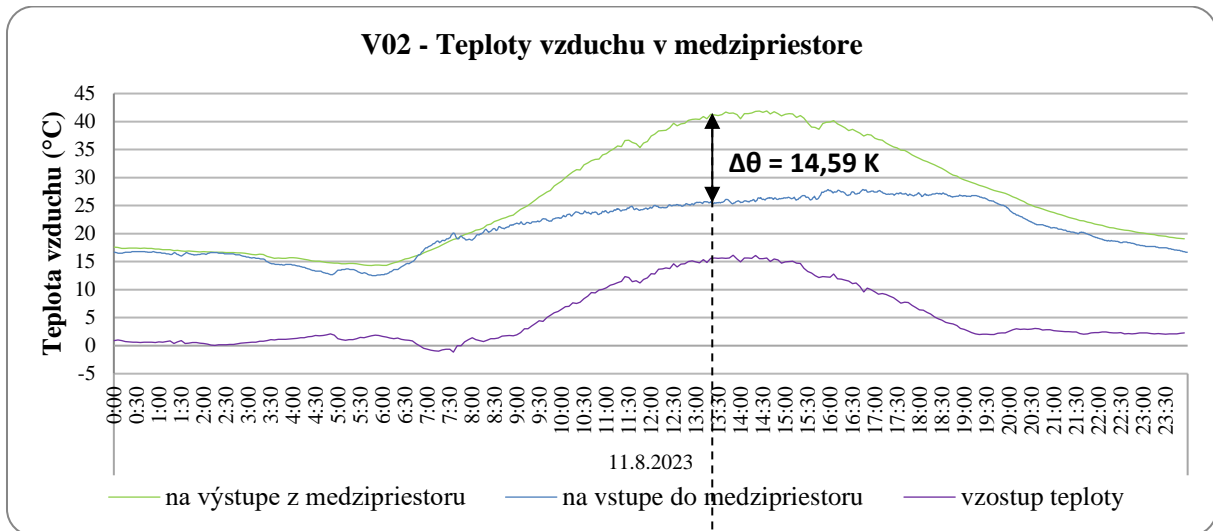


Obr. 7 Smer vetra

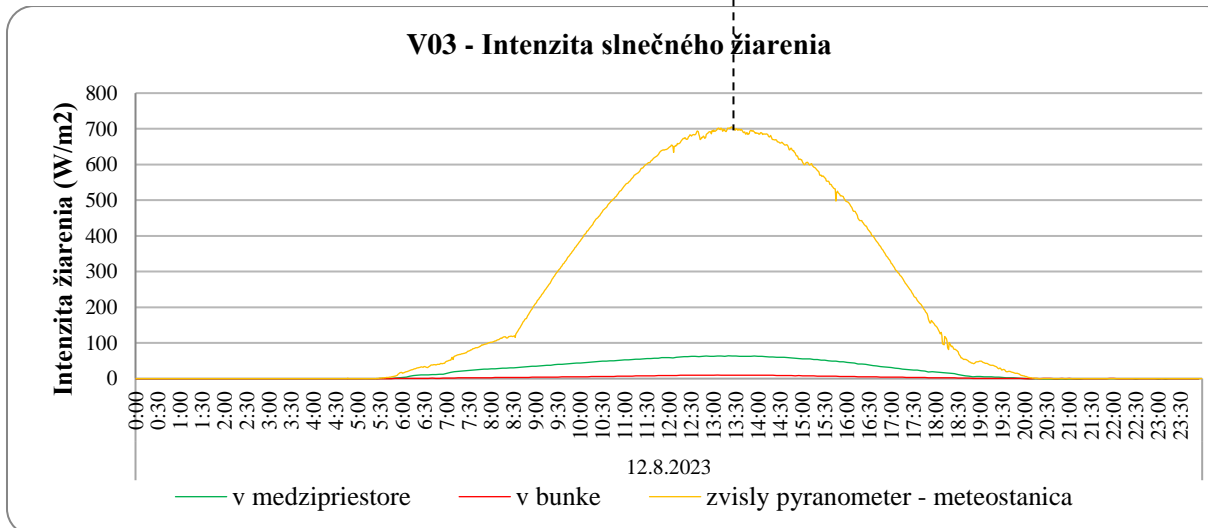
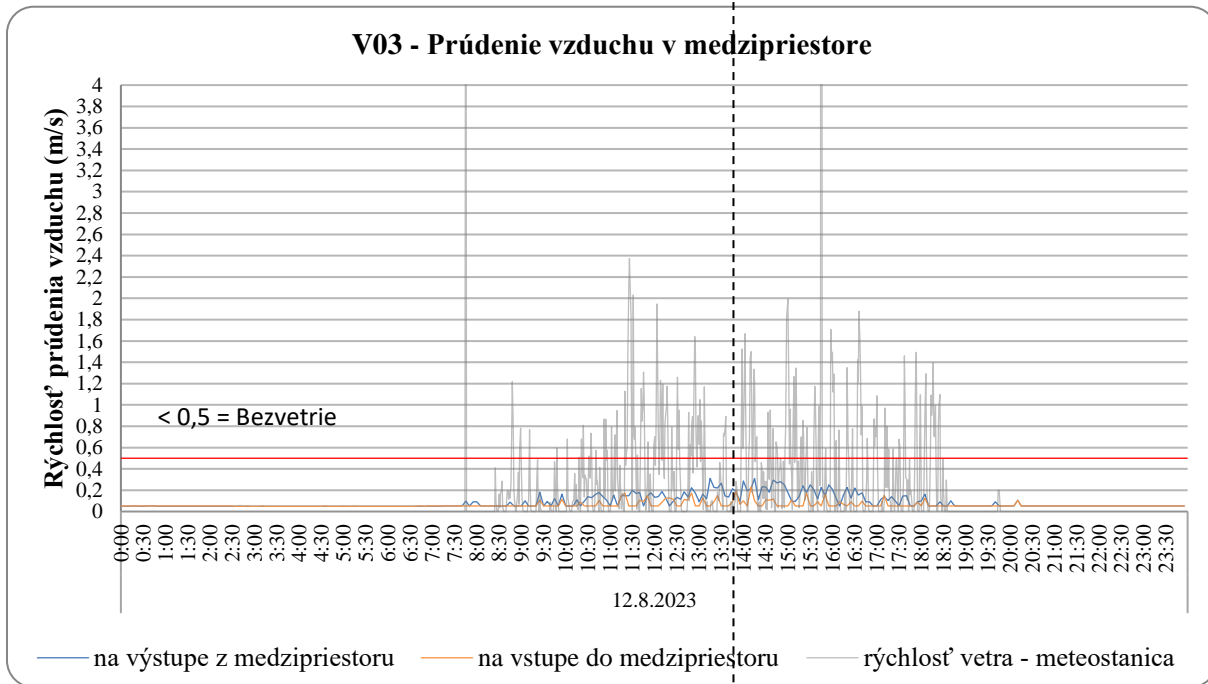
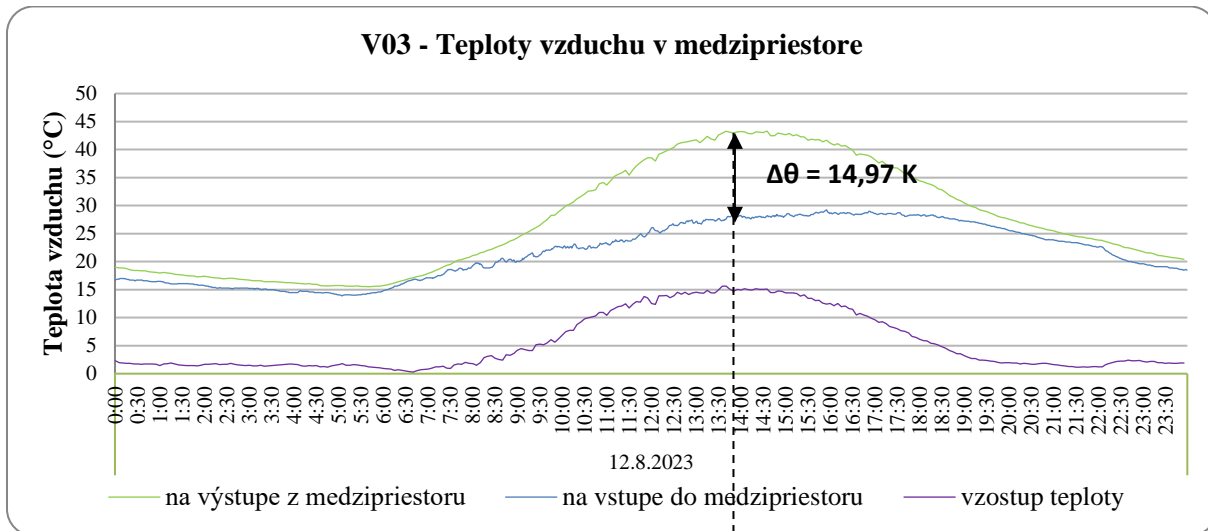
Graf 1 Výsledky meraní pre Variant V01



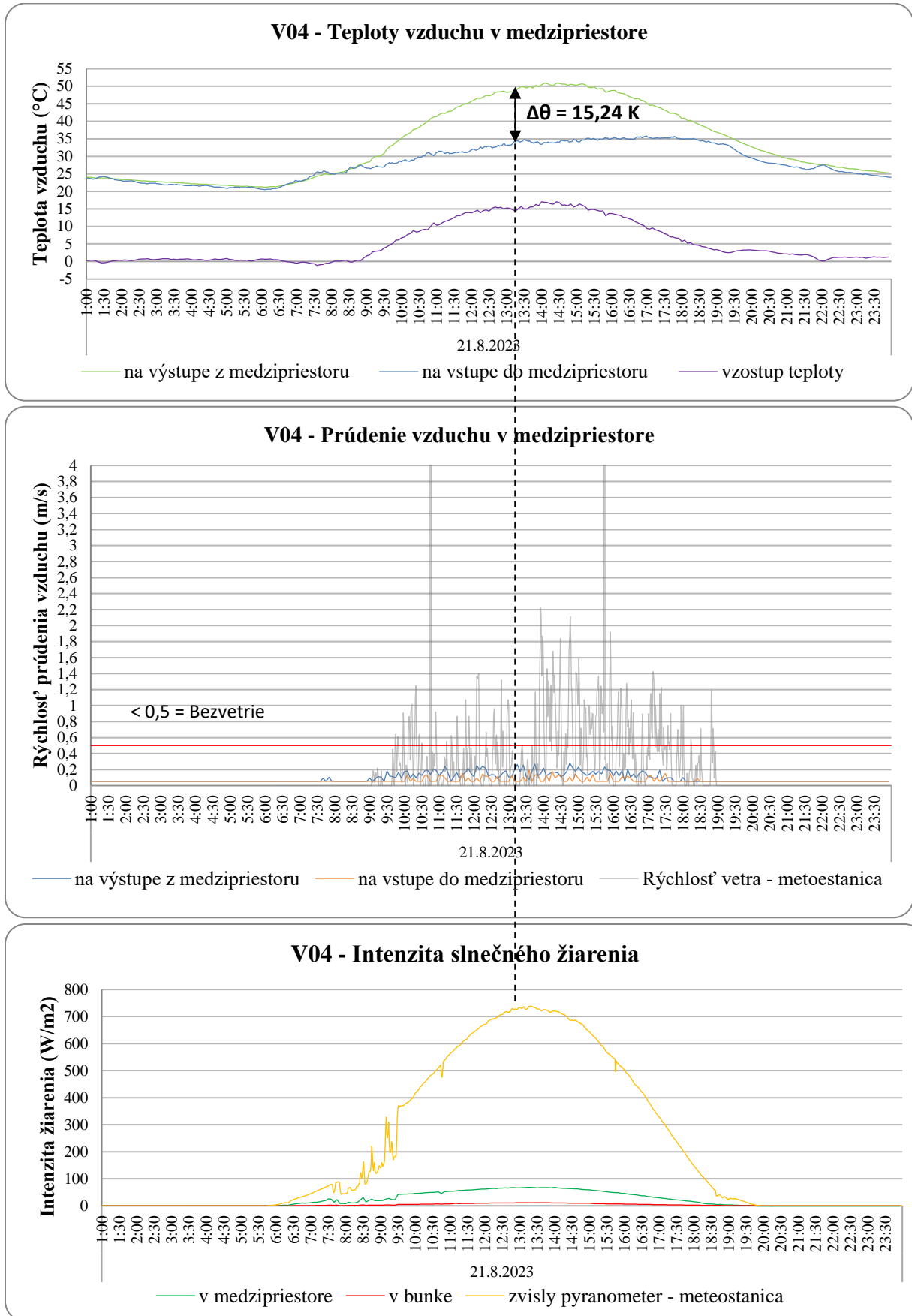
Graf 2 Výsledky meraní pre Variant V02



Graf 3 Výsledky meraní pre Variant V03



Graf 4 Výsledky meraní pre Variant V04



2.3.4 Vzostup teploty v medzipriestore

Pri intenzite slnečného žiarenia na vertikálnej fasádnej ploche okolo 700 W/m^2 sa vzostup teploty v medzipriestore v období bezvetria, ktoré je definované ako rýchlosť vetra nižšia ako $0,5 \text{ m/s}$, pohyboval okolo 15 K . Teplota vzduchu v medzipriestore DTF bola v rozmedzí 30 až $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.5 Prúdenie vzduchu v medzipriestore

Rýchlosti prúdenia vzduchu v medzipriestore závisia od intenzity slnečného žiarenia. Intenzita slnečného žiarenia má priaznivý vplyv na pohyb vzduchu v medzipriestore. S rastúcou intenzitou slnečného žiarenia sa zvyšuje aj teplota vzduchu v medzipriestore. Teplota vzduchu v medzipriestore ovplyvňuje jeho hustotu, ktorá sa s rastúcou teplotou znižuje. To vedie k rozdielu tlakov medzi vonkajším a vnútorným prostredím, ktorý zabezpečuje prúdenie vzduchu v medzipriestore.

Rýchlosti prúdenia vzduchu v medzipriestore závisia aj od rýchlosti vetra meraného na meteorologickej stanici umiestnenej na streche kontajnera. Z grafov Graf 1 až Graf 4 je vidieť, že dochádza k prúdeniu vzduchu v medzipriestore DTF aj počas kritickej situácie bezvetria (rýchlosť vetra menšia ako $0,5 \text{ m/s}$).

2.3.6 Vyhodnotenie a analýza výsledkov experimentu v podmienkach reálnej klímy

Experimentálnym overením DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom sme preukázali jej správny návrh z hľadiska jej funkčnej aerodynamiky. Aerodynamický odpor navrhovanej fasády bol nižší ako sila kovektívneho vztaku vzduchu a teda dochádzalo k neustálemu pohybu vzduchu medzipriestorom fasády i pri kritickej situácii bezvetria. Týmto je potvrdené, že predmetná DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom je správne navrhnutá a je schopná efektívne fungovať aj v podmienkach bezvetria.

2.4 Numerický výpočet – analýza po experimente

Pre hlbšiu analýzu sme opakovane aplikovali numerický výpočet na 4 varianty (V01 – V04), ktoré sme vybrali na základe výsledkov z experimentálneho merania. Výberové kritérium bolo bezvetrie a vysoká intenzita slnečného žiarenia.

Bolo potrebné prepočítať aerodynamický odpor trenia po výške fasády Z_l a konvektívny vztlak. Miestne aerodynamické odpory sa nemenili.

Tab. 6 zobrazuje údaje pre varianty V01 – V04 z experimentálneho merania.

2.4.1 Aerodynamický odpor trenia po výške fasády

$$Z_l = \frac{\bar{\lambda}(H + b)}{D_h} \quad [-] \quad (39)$$

Tab. 6 Kinematická viskozita vzduchu, Reynoldsovo číslo, koeficient odporu trenia a aerodynamický odpor trením po výške fasády v závislosti od teploty v ťažisku

Varianty	Teplota v ťažisku $\theta_{am,taž}$	Kinematická viskozita vzduchu ¹ ν	Reynoldsovo číslo Re	Koeficient odporu trenia $\bar{\lambda}$	Aerodynamický odpor trením po výške fasády Z_t
	°C	m ² /s	-	-	-
V01	38	1,6730E-05	5768	0,036	0,382
V02	41	1,7020E-05	5670	0,036	0,384
V03	43	1,7210E-05	5607	0,037	0,385
V04	48	1,7690E-05	5455	0,037	0,387

¹ kinematická viskozita vzduchu vypočítaná podľa [6]

2.4.2 Konvektívny vztlak

Pri vzostupe teploty 15 - 16 K medzi vstupným a výstupným otvorom sa hodnota konvektívneho vztlaku Z_{opt} pohybovala od 8,87 – 10,17 (Tab. 7).

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{konštanta} \quad (40)$$

$$\Delta p_0 = Hg(\rho_{vstup} - \rho_{výstup}) \quad \text{Pa} \quad (41)$$

$$\Delta p_0 = 2,124 \cdot 9,81 (\rho_{vstup} - \rho_{výstup}) \quad \text{Pa} \quad (42)$$

Tab. 7 Hodnoty hustoty vzduchu sú pre suchý vzduch pri tlaku 100 kPa, konvektívny vztlak a optimálny aerodynamický odpor pri vzostupe teploty 15-16 K

Varianty	Teplota na vstupe	$\rho_{vstup}^{1,2}$	Teplota na výstupe	$\rho_{výstup}^{1,2}$	Δp_0	Z_{opt}	Vzostup teploty
	°C	kg/m ³	°C	kg/m ³	Pa	-	K
V01	23	1,1763	38	1,1196	1,182	9,59	15
V02	25	1,1684	41	1,1089	1,240	10,17	16
V03	28	1,1568	43	1,1019	1,144	9,22	15
V04	33	1,1379	48	1,0848	1,108	8,87	15

¹ hustota suchého vzduchu pri tlaku 100 kPa

² hustota vzduchu vypočítaná podľa [7]

Výpočtový konvektívny vztlak

$$Z_{opt} = 8,87^1 \quad (-) \quad (43)$$

¹ Najnižšia hodnota pri vzostupe teploty 15 K

2.4.3 Vyhodnotenie výsledkov

Aerodynamický odpor trenia po výške fasády $Z_{l(max)} = \frac{\bar{\lambda}(H + b)}{D_h} = 0,387$ (-) (44)

Miestne aerodynamické odpory $Z_m = \sum_{x=1}^{10} \xi_x = 6,539$ (-) (45)

Celkový aerodynamický odpor $Z = 1 + \sum Z_l + \sum Z_m$ (-) (46)

medzipriestoru $Z = 7,926$ (-) (47)

Porovnanie Z a Z_{opt} $Z < Z_{opt}$ (-) (48)

$7,93 < 8,87$ (-) (49)

2.4.4 Záver

Celkový aerodynamický odpor (Z) medzipriestoru je nižší ako je konvektívny vztlak vzduchu. To znamená, že za bezvetria bude dochádzať ku pohybu vzduchu v medzipriestore DTF.

2.5 Výpočtová simulácia – analýza po experimente

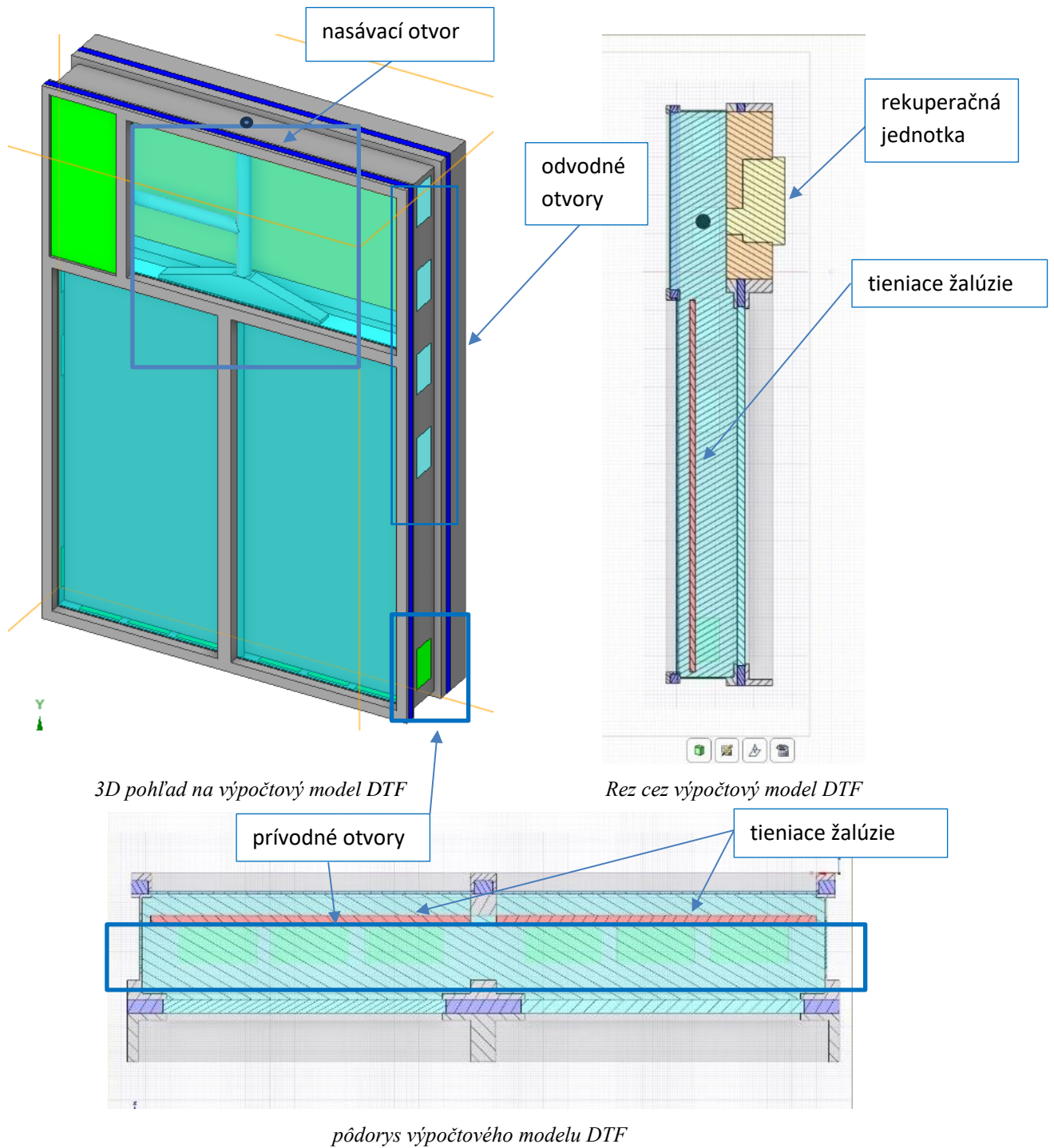
Zaujímalo nás aké sú presnosti simulácií vzhľadom na reálne správanie sa fasády, preto sme vytypovali z experimentu 4 charakteristické varianty okrajových podmienok, v ktorých sme previedli porovnávacie výpočtové simulácie, ktoré sme následne porovnali s výsledkami experimentu in-situ

2.5.1 Cieľ

Cieľom výpočtovej simulácie je preukázať prúdenie vzduchu v medzipriestore DTF aj v čase bezvetria, kedy rýchlosť vetra nie je väčšia ako 0,5 m/s, a kedy aerodynamický odpor predmetnej DTF nebude väčší ako sila konvektívneho vztlaku vzduchu. Simulácia vychádzala z výsledkov experimentálneho merania pre 4 charakteristické letné dni (V01 až V04).

2.5.2 Popis modelu simulácie – okrajové podmienky

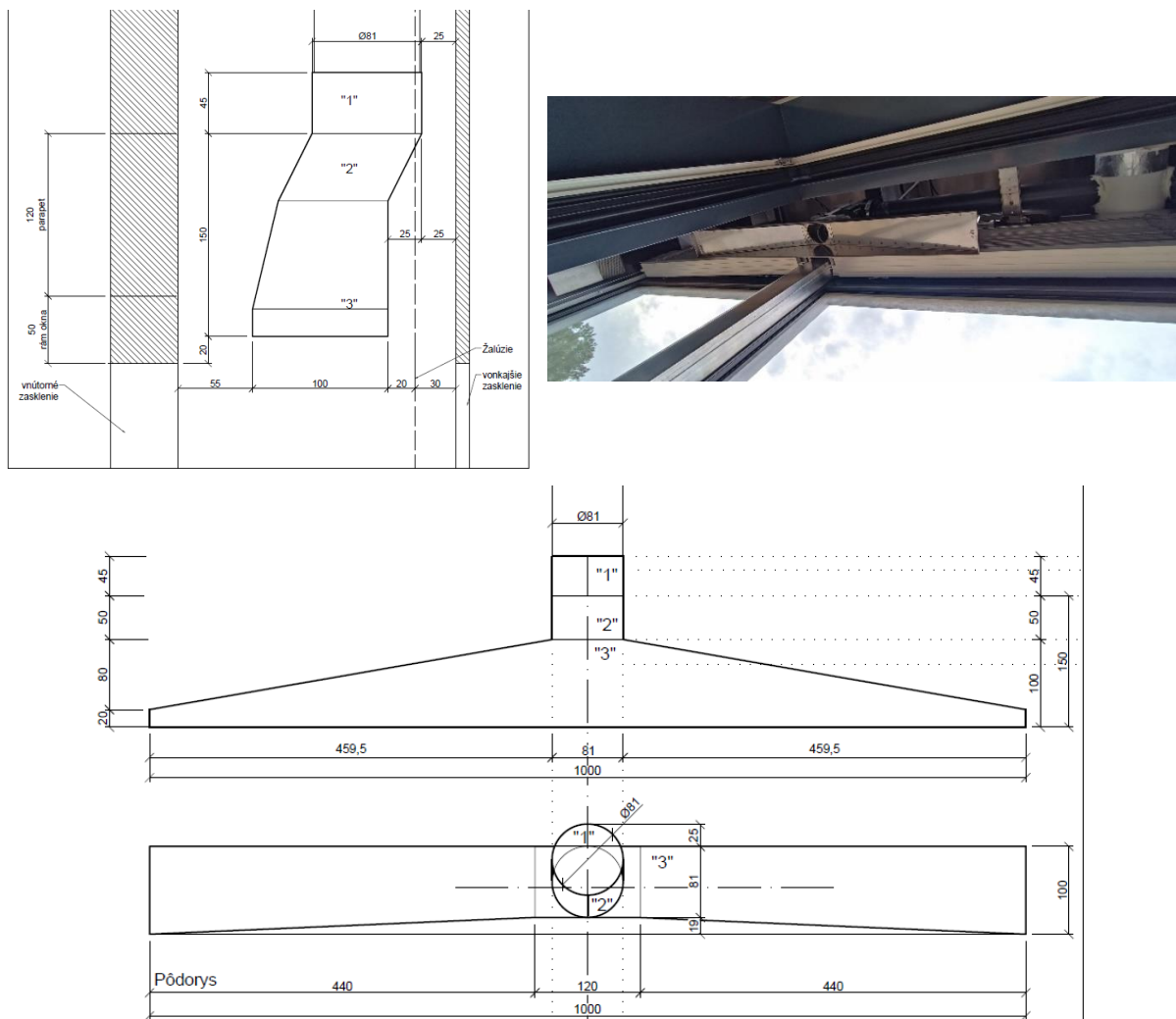
Simulačný model je statický 3-rozmerný (3D) (Obr. 8). Na spodnej stykovej škáre elementu sa nachádza šesť prívodných otvorov, dva na bočnej stykovej škáre a osem odvodných otvorov na bočnej stykovej škáre. Otvory na odvod vzduchu sú chránené sieťkou proti vtáctvu a hmyzu a dajú sa mechanicky uzatvárať. V medzipriestore je inštalovaná protisľnečná ochrana v podobe mobilných tieniacich žalúzií. V nepriehľadnej parapetnej časti vnútornej steny DTF je umiestnená fasádna rekuperačná jednotka. V letnom období nasávala vzduch priamo z vonkajšej klímy (v blízkosti hornej stykovej škáry) (Obr. 9a) a v zimnom predohriaty vzduch z medzipriestoru cez nasávací otvor (Obr. 9b).



Obr. 8 3D model simulácie



Obr. 9 Schematické zobrazenie prívodu vzduchu do rekuperačnej jednotky a) v letnom b) v zimnom období



Obr. 10 Schéma nasávacieho otvoru v medzipriestore

2.5.3 Analýza výsledkov simulácie

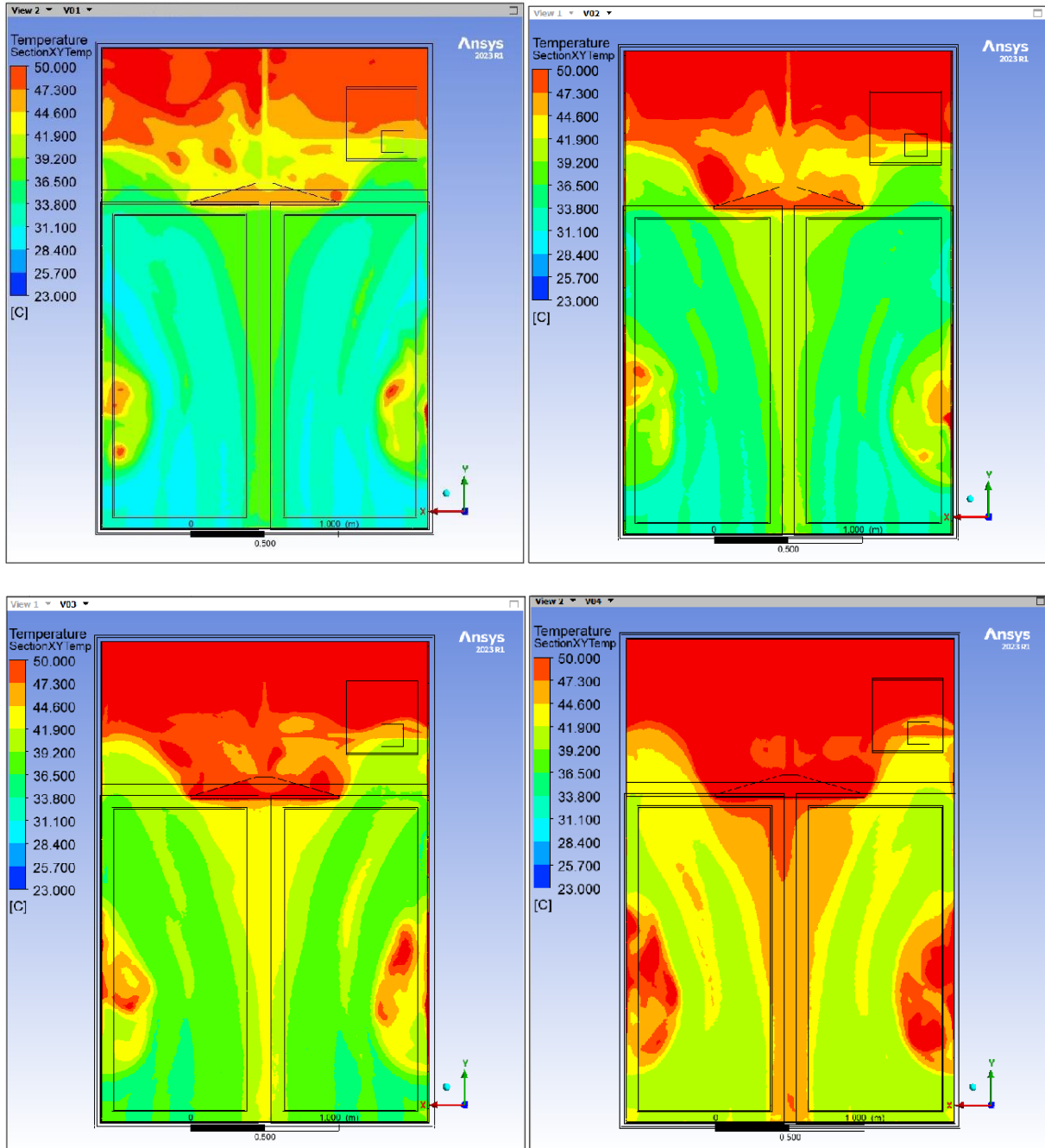
Výsledky z výpočtovej simulácie nám potvrdili, že v medzipriestore dochádza k prúdeniu vzduchu pri daných okrajových podmienkach.

Vo variante V01 bol vzostup teploty vo výpočtovej simulácii 15,1 K, v období bezvetria, kde vonkajšia teplota bola 22,86 °C, teplota na výstupe bola 37,97 °C pri intenzite slnečného žiarenia 719 W/m².

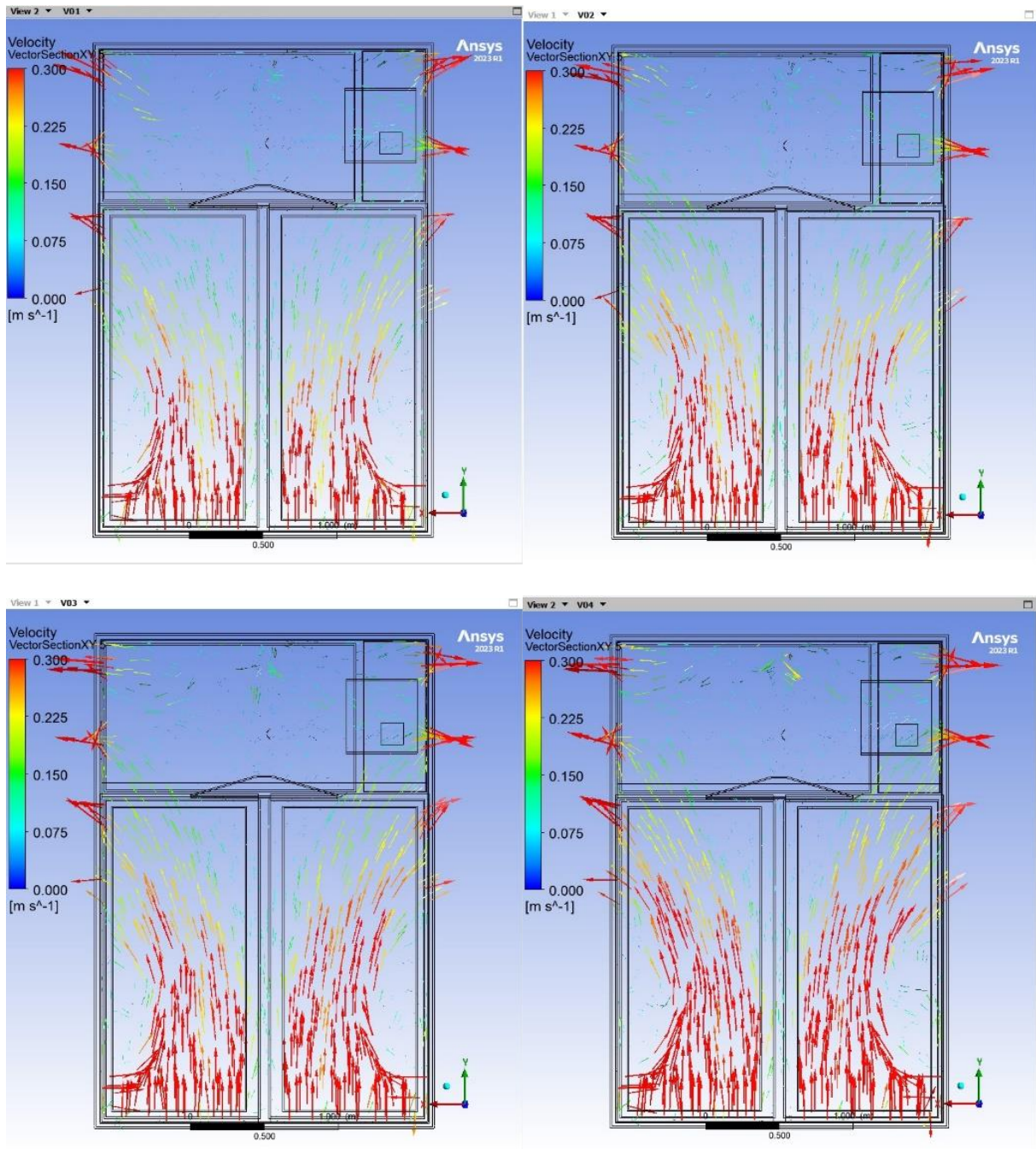
Vo variante V02 bol vzostup teploty vo výpočtovej simulácii 14,5 K v období bezvetria, kde vonkajšia teplota bola 25,50 °C, teplota na výstupe bola 40,01 °C a intenzita slnečného žiarenia bola 716 W/m².

Vo variante bol vzostup teploty vo výpočtovej simulácii 14,68 K, v období bezvetria, kde vonkajšia teplota bola 28,17 °C, teplota na výstupe bola 42,85 °C a intenzita slnečného žiarenia bola 691 W/m².

Vo variante V04 bol vzostup teploty vo výpočtovej simulácii 16,32 K, v období bezvetria, kde vonkajšia teplota bola 33,20 °C, teplota na výstupe bola 49,52 °C a intenzita slnečného žiarenia bola 732 W/m².



Obr. 11 Výsledky pre teplotu vzduchu v medzipriestore V01 – V04



Obr. 12 Výsledky pre rýchlosť prúdenia vzduchu medzipriestore V01 – V04

3. Porovnanie výsledkov numerického výpočtu, počítačovej simulácie (CFD) a experimentálneho merania v podmienkach reálnej klímy

Všetky tri metódy výpočtu preukázali, že i v období bezvetria dochádza k prúdeniu vzduchu v medzipriestore, a že aerodynamický odpor predmetnej dvojitej transparentnej fasády (DTF) ($Z_{skut} = 7,93$) je nižší ako konvektívny vztlak vzduchu.

Nasledujúce tabuľky Tab. 8 - Tab. 11 zobrazujú výsledky z jednotlivých metód, a to metódu výpočtovej simulácie a experimentálneho merania v reálnych klimatických podmienkach.

Zo zobrazených výsledkov ja zrejmé, že v období bezvetria a súčasne vysokej intenzity slnečného žiarenia je vzostup teploty okolo 15 K a rýchlosť prúdenia vzduchu v medzipriestore je okolo 0,2 m/s. Z týchto údajov je zrejmé, že aj v období bezvetria dochádza k prúdeniu vzduchu v medzipriestore.

Tab. 8 Porovnanie metód pre variant V01

V01	Medzipriestor	Simulácia	Experiment
	<i>Rýchlosť prúdenia vzduchu (m/s)</i>	0,130 – 0,270	0,186 – 0,230
	<i>Teplota vzduchu na výstupe (°C)</i>	37,97	38,03
	<i>Vzostup teploty (K)</i>	15,10	15,17
	Meteorologická stanica		
	<i>Intenzita slnečného žiarenia (W/m²)</i>	719	719
	<i>Vonkajšia teplota vzduchu (°C)</i>	22,86	22,86
	<i>Rýchlosť a smer vetra (m/s)</i>	-	0,22 (SSZ)

Tab. 9 Porovnanie metód pre variant V02

V02	Medzipriestor	Simulácia	Experiment
	<i>Rýchlosť prúdenia vzduchu (m/s)</i>	0,100 – 0,300	0,131 – 0,252
	<i>Teplota vzduchu na výstupe (°C)</i>	40,01	40,9
	<i>Vzostup teploty (K)</i>	14,50	14,59
	Meteorologická stanica		
	<i>Intenzita slnečného žiarenia (W/m²)</i>	716	716
	<i>Vonkajšia teplota vzduchu (°C)</i>	25,50	25,50
	<i>Rýchlosť a smer vetra (m/s)</i>	-	0,45 (S)

Tab. 10 Porovnanie metód pre variant V03

V03	Medzipriestor	Simulácia	Experiment
	<i>Rýchlosť prúdenia vzduchu (m/s)</i>	0,110 – 0,300	0,167 – 0,258
	<i>Teplota vzduchu na výstupe (°C)</i>	42,85	43,14
	<i>Vzostup teploty (K)</i>	14,68	14,97
	Meteorologická stanica		
	<i>Intenzita slnečného žiarenia (W/m²)</i>	691	691
	<i>Vonkajšia teplota vzduchu (°C)</i>	28,17	28,17
	<i>Rýchlosť a smer vetra (m/s)</i>	-	0,05 (JJV)

Tab. 11 Porovnanie metód pre variant V04

V04	Medzipriestor	Simulácia	Experiment
	<i>Rýchlosť prúdenia vzduchu (m/s)</i>	0,100 – 0,330	0,181 – 0,238
	<i>Teplota vzduchu na výstupe (°C)</i>	49,52	48,44
	<i>Vzostup teploty (K)</i>	16,32	15,24
	Meteorologická stanica		
	<i>Intenzita slnečného žiarenia (W/m²)</i>	732	732
	<i>Vonkajšia teplota vzduchu (°C)</i>	33,2	33,2
	<i>Rýchlosť a smer vetra (m/s)</i>	-	0

Maximálna odchýlka $\Delta\theta$ pre vzostup teploty v medzipriestore DTF pre variant V01 je 0 %, pre variant V02 je 1 %, pre variant V03 sú 2 % a pre variant V04 je 7%.

Odchýlky $\Delta\theta$ 0%, 1%, 2% a 7% pre vzostup teploty v medzipriestore pre varianty V01, V02, V03 a V04 naznačujú pomerne spoľahlivý výpočet. Je dôležité poznamenať, že v akomkoľvek výpočtovom modeli existujú inherentné neistoty. V kontexte tejto dizertačnej práce je odchýlka 7% vo variante V04 stále akceptovateľná.

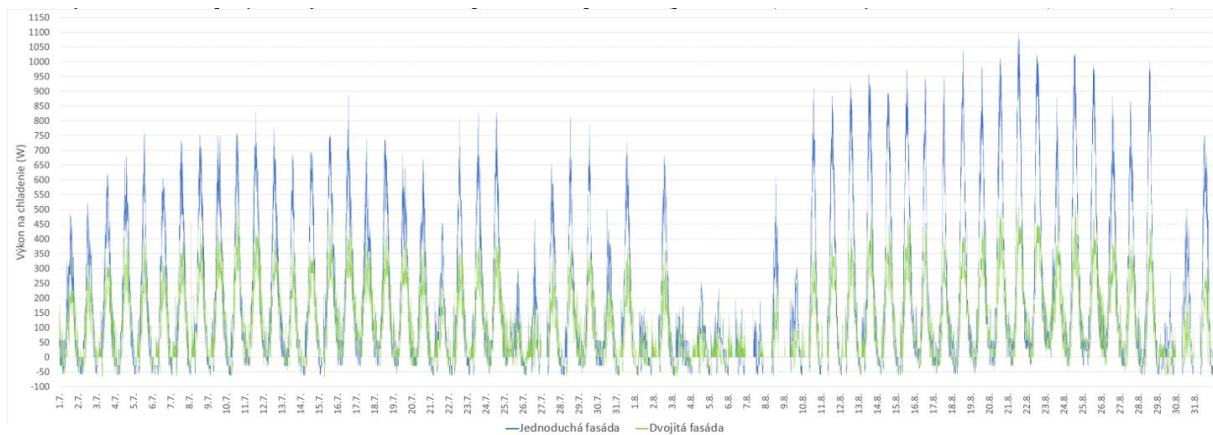
4. Záver

V súčasnosti, keď sa stavia čoraz viac výškových budov, je potrebné dbať na pohodu vnútorného prostredia. Dvojitá transparentná fasáda (DTF) nielen pomáha znižovať tepelné straty v zimnom období, ale pomáha k zníženiu tepelných záťaží počas letného obdobia. Tieniace zariadenia umiestnené v medzipriestore DTF sú chránené pred vonkajšími vplyvmi, ako je vietor, najmä v prípade výškových budov, v ktorých by v dôsledku vysokých rýchlostí vetra nebolo možné umiestňovať tieniace zariadenia do exteriéru.

Dvojitá transparentná fasáda (DTF) nielen pomáha znižovať tepelné straty v zimnom období, ale pomáha k zníženiu tepelných záťaží počas letného obdobia.

To nám potvrdilo aj letné meranie novej DTF v Twin-roomsoch.

Rozdiel medzi potrebou energie na chladenie v miestnosti s jednoduchou a v miestnosti s DTF predstavoval 115,6 kWh čo predstavuje úsporu energie 43 % (Obr. 13).



Obr. 13 závislosť energie na chladenie pre jednoduchú a dvojitú fasádu

Predložená dizertačná práca porovnávala tri metódy výpočtu aerodynamického odporu DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom.

Najrýchlejší výpočet je numerickou metódou s danou geometriou DTF a s predpokladom vzostupu tepla medzi vstupným a výstupným otvorom okolo 15 K.

Druhý spôsob je výpočtová simulácia (CFD), ktorá je náročnejšia na čas a je ovplyvnená výberom počítačového programu na výpočet a množstvom vstupných údajov, ktoré je potrebné správne predpokladať a zadať pred spustením výpočtu. Výsledky je potrebné zanalyzovať, vyhodnotiť, či sú správne, a porovnať s numerickým výpočtom, alebo podľa predchádzajúcich skúseností s podobnými typmi DTF, prípadne s experimentálnym meraním, ak sa realizovalo.

Tretia metóda je experimentálne meranie v podmienkach reálnej klímy. Táto metóda je najnáročnejšia na čas a financie, ale zároveň poskytuje najpresnejšie výsledky. Vyžaduje dlhý čas a môže slúžiť ako etalón pre výpočtové simulácie za iných klimatických podmienok či inej geometrie fasády s rovnakými klimatickými podmienkami.

Všetky metódy nám preukázali, že v medzipriestore DTF dochádza k prirodzenému prúdeniu vzduchu za bezvetria a vzostup teploty je 15 K. Aerodynamický odpor DTF je nižší ako je konvektívny vztlak. DTF je správne navrhnutá.

4.1 Prínos dizertačnej práce pre rozvoj vedy

- Dizertačná práca popisuje jednotlivé faktory ovplyvňujúce návrh a výpočet celkového aerodynamického odporu DTF.
- Dizertačná práca prináša podrobný návod na výpočet pre numerickú kvantifikáciu celkového aerodynamického odporu DTF a verifikovala správnosť výsledkov s výpočtovou simuláciou a experimentom in-situ.

- c) Dizertačná práca na základe výsledkov z experimentálneho merania odladila a verifikovala výpočtový model a prináša návod, ako možno pomocou výpočtových simulácií znížiť náklady na experimentálne merania tvorbou simulačných modelov.
- d) Dizertačná práca v sebe zahŕňa návrh, vývoj a vybudovanie nového špecializovaného in-situ experimentálneho zariadenia pavilónového výskumu Twin-rooms pre experimentálny výskum pokročilých fasádnych prvkov v podmienkach reálnej klímy s možnosťou ďalšieho výskumu rôznych fasádnych systémov, na ktorom som sa počas doktorandského štúdia aktívne podieľala.

4.2 Prínos dizertačnej práce pre spoločenskú prax

- a) Dizertačná práca prináša inžinierom, projektantom a architektom ucelenú teóriu návrhu a experimentálneho i výpočtového overenia DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom z hľadiska jej funkčnej aerodynamiky, ktorá je základným predpokladom jej správnej funkcie.
- b) Dizertačná práca prostredníctvom výpočtových simulácií odladila návrh elementovej modulárnej DTF s úzkym štrbinovým medzipriestorom, na základe ktorého bol spracovaný podrobný 3-D model fasády a vyrobený jeho funkčný prototyp, ktorý bol podrobený experimentu in-situ v podmienkach reálnej klímy na novom experimentálnom zariadení pavilónového výskumu Twin-rooms, na vývoji ktorého som sa počas doktorandského štúdia aktívne podieľala. Čiastkové výsledky experimentu potvrdili správny návrh fasády z hľadiska jej funkčnej aerodynamiky.
- c) Dizertačná práca prináša do praxe možnosť testovania rôznych fasádnych systémov, tieniacich zariadení, rôznych typov zasklenia a technologických zariadení, ako aj solárnych a fotovoltických panelov.

Na základe uvedených záverov konštatujem, že ciele dizertačnej práce boli v plnom rozsahu splnené.

5. Vybraný zoznam použitej literatúry

- [1] BIELEK, Boris, Milan BIELEK a Milan PALKO. *Dvojité transparentné fasády budov 1. diel: História, vývoj, klasifikácia a teória konštrukčnej tvorby*. 2002. ISBN 80-968846-0-3.
- [2] POIRAZIS, Harris. *Double-skin façades for office buildings—literature review*. B.m., 2004. Report EBD-R-04/3, Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Sweden.
- [3] BALDINELLI, G. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment* [online]. 2009, **44**(6), 1107–1118. ISSN 03601323. Available at: doi:10.1016/j.buildenv.2008.08.005

- [4] GHAFFARIANHOSEINI, Amirhosein Ali, Amirhosein Ali GHAFFARIANHOSEINI, Umberto BERARDI, John TOOKEY, Danny Hin Wa LI a Shahab KARIMINIA. Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **60**, 1052–1065. ISSN 18790690. Available at: doi:10.1016/j.rser.2016.01.130
- [5] JIRU, Teshome Edae, Yong X. TAOB a Fariborz HAGHIGHAT. Airflow and heat transfer in double skin facades. *Energy and Buildings* [online]. 2011, **43**(10), 2760–2766. ISSN 03787788. Available at: doi:10.1016/j.enbuild.2011.06.038
- [6] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Air - Dynamic and Kinematic Viscosity* [online]. 2003 [cit. 2022-11-03]. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html
- [7] OMNI CALCULATOR SP. Z O.O. *Air Density Calculator | What is Air's Density?* [online]. 2022 [cit. 2022-11-03]. Available at: <https://www.omnicalculator.com/physics/air-density>

6. Prehľad publikácií

Vedecké práce v domácich a zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

Bielek, Boris -- Szabó, Daniel -- Klem, Josip -- Kaniková, Kristína; Application of physical theory of cavity in the construction of double skin facades. *Curved and Layered Structures*, 9. s. 40--53.

Bielek, Boris -- Szabó, Daniel -- Klem, Josip -- Kaniková, Kristína -- Danková, Alžbeta; Twin rooms - new experimental test cells for testing advanced facade elements. In: SOJKOVÁ, Kateřina; HÁJEK, Petr. *Central Europe towards Sustainable Building 2022 (CESB22)*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2022, s. 354--360. ISBN 978-80-01-07096-3.

Publikované príspevky na domácich a zahraničných vedeckých konferenciách

Kaniková, Kristína -- Bielek, Boris; Double-skin transparent facade and its functioning aerodynamics. In: *Nové poznatky ve vědě a výzkumu z oblasti pozemního stavitelství*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2019, s. 58--64. ISBN 978-80-248-4199-1.

Kaniková, Kristína -- Macák, Marek -- Bielek, Boris; Aerodynamic optimisation of a double skin transparent façade with narrow cavity by CFD methods. In: ŠIKULA, Ondřej; BARTÁK, Martin. *Simulace budov a techniky prostředí 2020*. Praha: IBPSA-CZ, 2020, s. 107--110. ISBN 978-80-907423-1-4.

Kaniková, Kristína -- Bielek, Boris; Influence of shading devices on the aerodynamics of the double skin transparent façade cavity with CFD simulation methods. In: *Zbornik na trudovi od osmata studentska konferencija "Energetska efikasnost i održiv razvoj" - SKEEOR 2020*. Skopje: Univerzitet Sv. Kiril i Metodij Fakultet za elektrotehnika i informaciski tehnologii, 2020, s. 226--231. ISBN 978-9989-630-93-4.

Kaniková, Kristína; Optimalizácia geometrie dvojitéch transparentných fasád s úzkym štrbinovým medzipriestorom. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 351--356. ISBN 978-80-227-5052-3.

Kaniková, Kristína; Protipožiarna bezpečnosť prirodzene vetraných dvojitéch transparentných fasád. In: BISTÁK, Andrej. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 320--325. ISBN 978-80-227-5150-6.

Danková, Alžbeta -- Bielek, Boris -- Szabó, Daniel -- Kaniková, Kristína; The new test cells for experimental research of advanced facades. In: ŠVECOVÁ, Zuzana. *Indoor Climate of Buildings 2022*. Bratislava: SSTP, 2022, s. 251--261. ISBN 978-80-8284-004-2.

Kaniková, Kristína; Prehľad meracích zariadení použitých na kvantifikáciu dvojitéch transparentných fasád a príprava na meranie. In: BISTÁK, Andrej. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2022, s. 314--326. ISBN 978-80-227-5251-0.

Bielek, Boris -- Szabó, Daniel -- Kaniková, Kristína -- Danková, Alžbeta -- Šveda, Michal; Vývoj a overenie inovatívnej fasády s využívaním obnoviteľných zdrojov energie. In: ŠVECOVÁ, Zuzana. *Vnútrotná klíma budov 2023*. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2023, s. 118--125. ISBN 978-80-8284-020-2.

Šveda, Michal -- Bielek, Boris -- Vranay, František -- Lopušniak, Martin -- Bagoňa, Miloslav -- Szabó, Daniel -- Kaniková, Kristína -- Danková, Alžbeta; Examining the practical application of air cavity physical principles in Technicom building heat pump systems : preparation for experiment. In: PALKO, Milan; SEDLÁČKOVÁ, Nancy; PALKOVÁ, Adela. *Zborník článkov zo stretnutia katedier konštrukcií pozemných stavieb 2023*. Bratislava: Spektrum STU, 2023, s. 13--19. ISBN 978-80-227-5383-8

Danková, Alžbeta -- Kaniková, Kristína; Experimentálne overenie inovatívnej fasády využívajúcej energiu slnečného žiarenia. In: BISTÁK, Andrej. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering (AACEE 2023)*. Bratislava: Spektrum STU, 2023, s. 227--239. ISBN 978-80-227-5378-4.

Danková, Alžbeta -- Kaniková, Kristína -- Szabó, Daniel -- Bielek, Boris; Experimental verification and performance evaluation of an innovative facade during the summer period. In: ŠUHAIJDOVÁ, Eva; NOSEK, Jakub. *Juniorstav 2024*. Brno: ECON publishing, 2024, ISBN 978-80-86433-83-7.