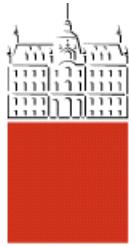


Univerza  
v Ljubljani  
*Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500 faks  
(01) 42 50 681  
tajnistvo@fgg.uni-lj.si

**DOKTORSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM III. STOPNJE  
GRAJENO OKOLJE**

Doktorand/-ka:

2019





**Mentor/-ica:**

**Somentor/-ica:**

**Poročevalci za oceno doktorske disertacije:**

-

-

-



## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

---

<u>Stran z napako</u>	<u>Vrstica z napako</u>	<u>Namesto</u>	<u>Naj bo</u>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

---

»Ta stran je namenoma prazna«

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

<b>UDK:</b>	<b>UDK: 544.774.2:697:699.86:725.1(043.3)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Grega Zrim, MSc. SED (UK)</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. znanst. svet. dr. Aleš Krainer</b>
<b>Somentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Roman Kunič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Uvedba aerogelne izolacijske odeje Spaceloft v ovoj zračno podprtih konstrukcij</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>doktorska disertacija</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>152 str., 49 pregl., 80 sl., 52 en., 184 ref.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>Zračno podprte stavbe, tekstilije in folije, optične lastnosti, dnevno osvetljevanje, koeficient dnevne svetlobe, količnik dnevne svetlobe, aerogel, eksperimentalno terensko delo, izračuni s programom DAYSIM, izračuni s programom EnergyPlus</b>

### Izvleček

Predstavljeno delo obsega raziskavo optičnih in toplotnih lastnosti obstoječega (toplotno neizoliranega) in predloga novega (toplotno izoliranega) konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja zračno podprtih konstrukcij z uvedeno aerogelno izolacijsko odejo Spaceloft®. Prikazani so učinki na delovanje vzorčnega primera stavbe z vidika njene dnevne osvetlenosti, rabe energije za ogrevanje in hlajenje ter toplotnega ugodja uporabnikov. Za raziskavo je bila izbrana Športna dvorana na Brezovici pri Ljubljani (ŠDB), približno devet kilometrov jugozahodno od središča mesta Ljubljana. Dvojni membranski ovoj obstoječe stavbe ni dodatno toplotno izoliran, sestavljen ga poliestrski tkanini (zunanja in notranja), prevlečeni s polivinilkloridno prevleko (PES(1)2009 in PES(2)2009). Zaradi pričakovane relativno nizke prosojnosti aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® je bila predlagana sestava novega konstrukcijskega sklopa z uporabo za svetlogo visokoprepustne etilen tetrafluoroetilenske (ETFE) folije kot primarne membranske nosilne konstrukcijske, aerogelne odeje (aerogel) kot toplotne izolacije in polietilenske tkanine (PEfabric), ki je bila namenjena za zaščito toplotne izolacije. S pomočjo laboratorijskih in terenskih meritev spektrov so bile določene: prvič, svetlobne (prepustnost in odbojnost v vidnem spektru), drugič, sončne (prepustnost, odbojnost na beli in črni podlagi, absorptivnost v ultravijoličnem, vidnem in bližnjem infrardečem spektru) in tretjič, toplotne lastnosti (v dalnjem infrardečem spektru, valovna dolžina med 2,5 µm in 16 µm) materialov, posameznih delov in celovitih različic konstrukcijskega sklopa (1. obstoječa iz dveh poliestrskih tkanin, prevlečenih s polivinilkloridno prevleko; 2. različica iz dveh enakih etilen tetrafluoroetilenskih folij; 3. toplotno izolirana različica). Terensko eksperimentalno delo je vključevalo meritve temperature in hitrosti zraka v zračnem kanalu dvojnega membranskega ovoja ŠDB, meritev okoljskih parametrov (temperature zraka v stavbi in zunaj nje) in drugih količin potrebnih za opis toplotnega odziva, ter meritve dnevne osvetlenosti. Rezultati terenskih meritev hitrosti in temperature zraka v zračnem kanalu med membranama so bili skupaj z optičnimi lastnostmi uporabljeni za izračun toplotnega upora vseh treh obravnnavanih različic dvojnega membranskega ovoja v odvisnosti od naklona konstrukcije. Izveden je bil tudi izračun totalne prepustnosti za sončno energijo. Na podlagi eksperimentalnih meritev dnevne osvetlenosti ŠDB je bila narejena primerjava z računalniškim programom DAYSIM izračunanih in simuliranih vrednosti količnika dnevne svetlobe, ki je potrdila primernost priprave geometrijskega modela stavbe in vhodnih podatkov. Posledično je bil z istim računalniškim programom opravljen izračun za napoved dnevne osvetlenosti stavbe z novim predlaganim ovojem s toplotno izolacijo, ki je pokazal boljšo dnevno osvetlenost igrišča, tudi na oblačni dan. Izračun rabe energije za lokalno klimo s programom EnergyPlus je pokazal, da uporaba prosojne toplotne izolacije Spaceloft® ne vpliva ugodno le na dnevno osvetlenost izbrane stavbe, temveč tudi na podaljšanje obdobja uporabe, ko stavba lahko deluje v prostem teku in je pri tem celo za bivanje udobnejša, kar posledično zmanjša potrebo po energiji za ogrevanje, tudi na račun povečanih sončnih dobitkov. Nasprotno, izbrani ukrep na količino energije, potrebne za hlajenje, ne vpliva ugodno in jo močno poveča. To v realnosti nima posebnega pomena, saj se vzorčna stavba v poletnem času, tj. v času eventualne potrebe po ohlajevanju, ne uporablja, ker lokalno podnebje dopušča letne športne aktivnosti na odprttem prostoru. Analiza toplotnega ugodja pokaže, da tedaj, ko je stopnja aktivnosti dovolj nizka (na primer igranje tenisa) med ogrevalno sezono, uvedba aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® ugodno vpliva na toplotno in tudi na svetlobno ugodje uporabnikov.

## BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

<b>UDK:</b>	<b>UDK: 544.774.2:697:699.86:725.1(043.3)</b>
<b>Author:</b>	<b>Grega Zrim MSc. SED (UK)</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Prof. Aleš Krainer, PhD</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>Assoc. Prof. Roman Kunič, PhD</b>
<b>Title:</b>	<b>Implementation of aerogel insulation blanket Spaceloft into envelope of air-supported structures</b>
<b>Document type:</b>	<b>Doctoral Dissertation</b>
<b>Scope and tools:</b>	<b>152 p., 49 tab., 80 fig., 52 eq., 184 ref.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>air-supported structures, architectural fabrics and foils, optical properties, daylighting, daylight coefficient, daylight factor, aerogel insulated membrane, experimental fieldwork, DAYSIM calculations, EnergyPlus energy use calculations</b>

### Abstract

The presented work encompasses the research of optical and thermal properties of an air-supported double membrane envelope structure with aerogel thermal insulation blanket Spaceloft® applied and the research of the influence of the aerogel blanket implementation on daylighting, energy use for heating and cooling and thermal comfort of occupants for the selected case study of the air-supported dome »Športna dvorana Brezovica«. The double membrane envelope of the selected air-supported structure is composed of two polyester fabrics coated with polyvinyl chloride resin. Due to the expected relatively low transmittance of aerogel blanket Spaceloft® a new proposal of the considered constructional complex was prepared, including highly transparent ethylene tetrafluoroethylene foil and polyethylene fabric. With the help of laboratory and field spectrometry the luminous (transmittance and reflectance), solar (transmittance, reflectance on white and black background and absorptance) as well as the thermal properties such as emissivity of individual materials, parts or whole constructional complex variations (existing made of two polyvinyl chloride coated polyester fabrics, the new made of two ethylene tetrafluoroethylene foils and its insulated version), were determined. The field experimental work included also the measurements of air temperature and velocity inside the channel of the double membrane envelope of the studied building, measurements of environmental parameters (temperature of air inside and outside the building and others) for the description of its thermal response and daylighting measurements. On the basis of these measurements, in combination with the optical properties thermal resistance of the three constructional complex versions as well as the total solar energy transmittance were determined. The results of experimental illuminance measurements of the »Športna dvorana Brezovica« were compared to those of the DAYSIM daylighting calculation, which confirmed that the geometry model and the input data about the optical properties were prepared correctly. Consequently, the prediction of indoor playground illuminance was made possible and a DAYSIM calculation of daylight factor was made for the case of a building with its envelope insulated by the aerogel blanket Spaceloft®. Furthermore, the calculation of heating and cooling energy use for local climate was made using EnergyPlus computer programme. The calculations showed that the predicted use of translucent thermal insulation Spaceloft® not only increases the possibility of the studied building daylighting, but also prolongs the free running mode period and decreases energy use for heating, also due to the increased solar gain utilisation. On the other hand, the use of aerogel blanket insulated constructional complex strongly increases the energy use for cooling. The analysis of the occupants' thermal comfort reveals that in case of low enough activity rate (i.e. tennis) during the heating season, the use of constructional complex with applied aerogel blanket Spaceloft® lowers the percentage of dissatisfied people.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju rednemu prof. znanst. svet. dr. Alešu Krainerju in somentorju izr. prof. dr. Romanu Kuniču za vodenje in pomoč pri študiju.

Kemijskemu inštitutu, Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter Inštitutu za tekstilstvo in grafično tehnologijo ter oblikovanje se zahvaljujem, da so mi omogočili laboratorijsko delo in del terenskega eksperimentalnega dela.

Zaslužnemu raziskovalcu, prof. dr. Borisu Orlu, se zahvaljujem za njegov prispevek, kritični pogled, spodbudo in čas, ki ga je namenil mojemu eksperimentalnemu delu. Hvala tudi dr. Mohorju Mihelčiču za nesebično podporo pri izvedbi laboratorijskih meritev.

Laboratoriju za fotovoltaiko in optoelektroniko se zahvaljujem za dostop do eksperimentalne opreme in pomoč pri izvedbi spektroradiometričnih meritev vpadnega sončnega sevanja.

Zahvaljujem se podjetju DUOL, d. o. o., in OŠ Brezovica za neomejen dostop do Športne dvorane Brezovica, kjer sem opravil eksperimentalne meritve.

Ženi, staršema in preostali družini se zahvaljujem za vso podporo, brez katere opravljeni študij preprosto ne bi bil mogoč.

»Ta stran je namenoma prazna«

## KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVE	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VI
ZAHVALA	VII
KAZALO VSEBINE	IX
KAZALO PREGLEDNIC	XIII
LIST OF TABLES	XVII
KAZALO SLIK	XXI
LIST OF FIGURES	XXIX
SEZNAM PRILOG	XXXIX
LIST OF APPENDICES	XL
SEZNAM KRATIC	XLI
LIST OF ABBREVIATIONS	XLV

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	1
<b>1.1</b>	Opredelitev problema	5
<b>1.2</b>	Cilji raziskovalnega dela	6
<b>1.3</b>	Hipoteze raziskovalnega dela	7
<b>1.4</b>	Struktura naloge	7
<b>2</b>	<b>METODOLOGIJA</b>	9
<b>2.1</b>	Predstavitev študijskega primera stavbe, izbora materialov in različic konstrukcijskega sklopa zračno podprtga dvojnega membranskega ovoja	9
<b>2.1.1</b>	Predstavitev Športne dvorane Brezovica	9
<b>2.1.1.1</b>	Zemljepisna lega in geometrija stavbe	9
<b>2.1.1.2</b>	Materiali in geometrija ovoja	10
<b>2.1.1.3</b>	Sistem dovajanja zraka in sistem ogrevanja	11
<b>2.1.1.4</b>	Neposredna okolica stavbe	11
<b>2.1.2</b>	Predlog novega konstrukcijskega sklopa zračno podprtga dvojnega membranskega ovoja	11
<b>2.2</b>	Materiali, meritve optičnih lastnosti, meritve hitrosti in temperature zraka v dvojnem membranskem zračno podprttem ovoju ter terenske meritve dnevne osvetljenosti in toplotnega odziva vzorčne zračno podprte stavbe	14
<b>2.2.1</b>	Optične lastnosti dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica v sončnem in toplotnem spektru elektromagnetnega valovanja	14
<b>2.2.1.1</b>	Meritve optičnih lastnosti tekstilij, folij in različic konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB opravljene v laboratoriju	16

<b>2.2.1.2</b>	Vpliv debeline vzorca na prepustnost	20
<b>2.2.1.3</b>	Terenske meritve svetlobnih lastnosti s prenosnim spektrometrom v realnih razmerah (oblačno nebo)	20
<b>2.2.1.4</b>	Meritev odbojnosti vzorcev membrane na območju nizko temperaturnega dolgovalovnega infrardečega sevanja med 8000 in 14000 nm s spektrometrom in določitev emitivnosti površin	21
<b>2.2.1.5</b>	Meritev temperature površine vzorcev membrane in ocena prepustnosti nizko temperaturnega infrardečega sevanja s pomočjo infrardeče kamere med 8000 nm in 14000 nm	21
<b>2.2.1.6</b>	Meritev odbojnosti vidne svetlobe in določitev barv obarvanih delov tal v Športni dvorani Brezovica	21
<b>2.2.2</b>	Termične meritve: določitev hitrosti zraka in temperaturnega profila v zračnem kanalu dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica	22
<b>2.2.3</b>	Meritve dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica in določitev porazdelitve količnika dnevne svetlobe na igrišču v stavbi	24
<b>2.2.4</b>	Raziskava topotnega odziva Športne dvorane Brezovica	27
<b>2.3</b>	Raziskave na podlagi računalniških izračunov in simulacij	28
<b>2.3.1</b>	Topotne lastnosti konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja	28
<b>2.3.1.1</b>	Vpliv mejnih zračnih plasti	30
<b>2.3.1.2</b>	Zračni kanal	30
<b>2.3.1.2.1</b>	Koeficient prenosa toplotne s konvekcijo	30
<b>2.3.1.2.2</b>	Koeficient prenosa toplotne z radiacijo	31
<b>2.3.1.2.3</b>	Topotni upor prezračevanega kanala	31
<b>2.3.1.3</b>	Topotni upor trdnih materialov	32
<b>2.3.1.4</b>	Totalna prepustnost za sončno sevanje	32
<b>2.3.2</b>	Raziskava dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica za različne različice sestave zračno podprtrega ovoja	33
<b>2.3.3</b>	Raziskava rabe energije za ogrevanje in hlajenje Športne dvorane Brezovica	37
<b>3</b>	<b>REZULTATI</b>	41
<b>3.1</b>	Materiali, meritve optičnih lastnosti, meritve hitrosti in temperature zraka v dvojnem membranskem zračno podprttem ovoju ter terenske meritve dnevne osvetljenosti in topotnega odziva vzorčne zračno podprte stavbe	41
<b>3.1.1</b>	Optične lastnosti dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica v sončnem in topotnem spektru elektromagnetnega valovanja	41
<b>3.1.1.1</b>	Laboratorijska raziskava optičnih lastnosti na celotnem spektru sončnega sevanja od 300 nm do 2500 nm	41
<b>3.1.1.1.1</b>	Svetlobne optične lastnosti	41
<b>3.1.1.1.2</b>	Terenske meritve svetlobnih lastnosti s prenosnim spektrometrom v razmerah dejanskega oblačnega neba	47
<b>3.1.1.1.3</b>	Sončne optične lastnosti	49
<b>3.1.1.1.4</b>	Ocena vpliva umazanije na zunanjji strani zunanje membrane	56

<b>3.1.1.2</b>	Meritev odbojnosti vzorcev membrane na območju nizko temperaturnega dolgovalovnega infrardečega sevanja med 8000 in 14000 nm s spektrometrom in določitev emitivnosti površin	56
<b>3.1.1.2.1</b>	Prepuštnost vzorcev za nizkotemperaturno IR-sevanje	57
<b>3.1.1.3</b>	Meritev odbojnosti vidne svetlobe in določitev barv obarvanih delov tal v Športni dvorani Brezovica	57
<b>3.1.2</b>	Termične meritve: določitev hitrosti zraka in temperaturnega profila v zračnem kanalu dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica	58
<b>3.1.3</b>	Meritve dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica in določitev porazdelitve količnika dnevne svetlobe na igrišču v stavbi	63
<b>3.1.3.1</b>	Kontrola normalizacije izmerjene osvetljenosti na CIE standardno oblačno nebo	67
<b>3.1.3.2</b>	Primerjava rezultatov	69
<b>3.1.4</b>	Raziskava toplotnega odziva Športne dvorane Brezovica	71
<b>3.2</b>	Raziskave na podlagi računalniških izračunov in simulacij	74
<b>3.2.1</b>	Raziskava toplotnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja Športne dvorane Brezovica	74
<b>3.2.2</b>	Raziskava dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica za različne različice sestave zračno podprtrega ovoja	83
<b>3.2.2.1</b>	Kontrola dimenzijskega modela	85
<b>3.2.2.2</b>	Določitev mreže točk izračuna količnika dnevne svetlobe s programom DAYSIM	85
<b>3.2.2.3</b>	Vpliv geometrije na izračun količnika dnevne svetlobe s programom DAYSIM	86
<b>3.2.2.4</b>	Študija vpliva nadsvetlobe na dnevno osvetljenost igrišča v dvorani s pomočjo koeficientov dnevne svetlobe	89
<b>3.2.2.5</b>	Vpliv aproksimacije ukrivljenosti dvojnega membranskega ovoja Športne dvorane Brezovica z odsekoma ravnnimi elementi	92
<b>3.2.2.6</b>	Izračun količnika dnevne svetlobe za različne vzorce barv tal	94
<b>3.2.2.7</b>	Količnik dnevne svetlobe za primer ovoja Športne dvorane Brezovica z uvedeno aerogelno izolacijsko odejo	98
<b>3.2.2.8</b>	Umeritev vrednosti med merilnikoma osvetljenosti	99
<b>3.2.2.9</b>	Študija vpliva direktne komponente sončnega sevanja na količnik dnevne svetlobe z uporabo računalniškega programa DAYSIM	100
<b>3.2.2.10</b>	Simulacija eksperimentalnih meritov dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica s pomočjo računalniškega programa DAYSIM	104
<b>3.2.3</b>	Raziskava rabe energije za ogrevanje in hlajenje Športne dvorane Brezovica	107
<b>3.2.3.1</b>	Simulacija toplotnega odziva Športne dvorane Brezovica in primerjava z eksperimentalnimi podatki	107
<b>3.2.3.2</b>	Izračun energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje Športne dvorane Brezovica	109
<b>3.2.3.3</b>	Toplotno ugodje v Športni dvorani Brezovica	111
<b>3.2.3.4</b>	Analiza vpliva optičnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja na sončne dobitke	114

<b>4</b>	<b>RAZPRAVA</b>	119
<b>5</b>	<b>SKLEPI</b>	126
<b>6</b>	<b>POVZETEK</b>	131
<b>7</b>	<b>SUMMARY</b>	137
	<b>VIRI</b>	143

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1.1:	Pregled tkanin s premazi in brez njih ter folij, namenjenih rabi v stavbah	3
Preglednica 2.1.1.1:	Pregled vzorcev materialov obstoječega konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB, odvzetih na terenu	10
Preglednica 2.1.2.1:	Pregled vzorcev materialov za novi predlagani konstrukcijski sklop dvojnega membranskega ovoja ŠDB	12
Preglednica 2.1.2.2:	Predlog izolacijskega sklopa PEfabric/aerogel/PEfabric	13
Preglednica 2.1.2.3:	Obravnavni konstrukcijski sklopi dvojnega membranskega ovoja ŠDB	14
Preglednica 2.2.1.1:	Instrumenti za merjenje optičnih lastnosti vzorcev tekstilij, folij, aerogelne odeje in površin v ŠDB	16
Preglednica 2.2.2.1:	Instrumentarij za izvedbo meritev temperature $T_{a,k}$ [°C] in hitrosti zraka $v_k$ [m/s] v zračnem kanalu med membranama dvojnega ovoja ŠDB	23
Preglednica 2.2.3.1:	Instrumentarij, uporabljen pri meritvah dnevne osvetljenosti ŠDB	25
Preglednica 2.2.4.1:	Instrumentarij za izvedbo meritev klimatskih parametrov zunaj ŠDB in v njej	27
Preglednica 2.3.2.1:	Nakloni segmentov $\gamma_i$ [°] cilindričnega dela geometrijskega modela ŠDB	35
Preglednica 2.3.3.1:	Razlika med temperaturo, simulirano z EnergyPlus (kalibrirani model) in temperaturo, izmerjeno na pozicijah $T_1$ , $T_2$ , $T_{cav}$ , $T_3$ , $T_4$ [°C]	38
Preglednica 3.1.1.1:	Totalna prepustnost ( $TT_{vis}$ , [%]), difuzna prepustnost ( $DT_{vis}$ , [%]), motnost ( $H$ , [%]) in totalna odbojnost ( $TR_{vis}$ , [%]) različnih vzorcev tkanin, folij, izolacijske odeje in kompozitov za spektralno območje 380–780 nm	41
Preglednica 3.1.1.2:	Totalna hemisferična-hemisferična prepustnost $TT_{vis,h-h}$ [%] neizolirane in izolirane različice dvojnega membranskega sklopa ETFE/ETFE in posameznih komponent za vidno svetlobo na območju spektra vidne svetlobe od 380 nm do 780 nm	48
Preglednica 3.1.1.3:	Optične lastnosti kompozitov tkanin, folij in aerogelne izolacijske odeje na območju spektra sončnega sevanja od 300 nm do 2500 nm: totalna (hemisferična) prepustnost [%] za celotno $TT_{sol}$ , UV ( $TT_{sol,UV}$ ), vidno VIS ( $TT_{sol,VIS}$ ) in NIR ( $TT_{sol,NIR}$ ) območje; totalna odbojnost [%] za črno ( $TRB_{sol}$ ) in belo ( $TRW_{sol}$ ) ozadje ter totalna absorptivnost $A_{sol}$ [%] iz $A(\lambda) = 1-(R(\lambda)+T(\lambda))$ , prav tako na celotnem, UV-, VIS- in NIR-spektralnem območju	54
Preglednica 3.1.1.4:	Vrednosti emitivnosti $e_T$ [-] vzorcev, izračunane za različne temperature, njihove površine in dve spektralni območji (od 8 $\mu m$ do 14 $\mu m$ ter od 2.5 $\mu m$ do 16 $\mu m$ ), na podlagi izmerjene spektralne odbojnosti dolgovalovnega infrardečega sevanja na zlatem ozadju	56
Preglednica 3.1.1.5:	Kolorimetrični podatki o barvah tal v ŠDB	58

Preglednica 3.1.2.1:	Orientacija in pozicija sonde za različna obdobja meritev hitrosti zraka $v(t)$ [m/s] in pripadajoče temperature zraka $T_{a,k}(t)$ [ $^{\circ}$ C]	60
Preglednica 3.1.2.2:	Ekstremne in povprečne vrednosti hitrosti $v_h$ [m/s] in temperature zraka $T_{a,k,h}$ [ $^{\circ}$ C] ter pripadajoči časi [h] za primere pozicij in orientacij sonde instrumenta od a do d, navedenih v <b>preglednici 3.1.2.1</b>	61
Preglednica 3.1.3.1:	Rezultat testa primerljivosti odčitkov, zajetih z dvema merilnikoma osvetljenosti ( <b>slika 3.1.3.6</b> ) istega tipa Volcraft in uporabljenima za eksperimentalno delo, opravljeno dne 29. 10. 2015	70
Preglednica 3.2.1.1:	Primeri vhodnih podatkov za izračun koeficientov radiacijskega ( $h_r$ ) in konvekcijskega ( $h_c$ ) koeficiente prenosa topote [W/m <sup>2</sup> .K]: čas v dnevnu, ki mu pripadajo podatki [h], hitrost zraka v zračnem kanalu (v [m/s]), temperaturi stranic zračnega kanala oziroma zraka neposredno ob stranicah ( $T_{s,k,i}$ in $T_{s,k,o}$ [ $^{\circ}$ C ali K]), razliko med temperaturo zraka in površine ( $\Delta T_{a-s}$ [K]) ter srednja absolutna temperatura zraka v kanalu ( $T_m$ [K])	75
Preglednica 3.2.1.2:	Podatki o geometriji zračnega kanala: hidravlični premer $D_{hyd}$ [m], povprečna debelina zračnega kanala med membranama $d_{povp}$ [m] ( <b>slika 2.3.2.1 B</b> ) in razmerje med višino zračnega kanala v posameznem segmentu in debelino zračnega kanala ( $d_{povp}$ ) $A_{gv,i}$ [-]	75
Preglednica 3.2.1.3:	Podatki o lastnostih zraka in zračnega toka v zračnem kanalu dvojnega membranskega ovoja za sete vhodnih podatkov od a do d v <b>preglednici 3.2.1.1</b>	76
Preglednica 3.2.1.4:	Izračunane absorptivnosti sončnega sevanja $A$ [-] (poglavlje 2.2.1) v valovnem območju med 300 nm in 2500 nm zunanje ( $A_{e1}$ ) (PES(1)2009z in ETFE)) in notranje ( $A_{e2}$ ) (PES(2)2009z, ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) membrane za obravnavane konstrukcijske sklope dvojnega membranskega ovoja	81
Preglednica 3.2.2.1:	Odbojnost ( $R_{vis}$ [%]) in RGB (rdeča/zelena/modra) vrednosti [-] za zunanje površine stavb v okolini dvorane ( <b>slika 3.2.2.1</b> ), albeda zunanjih tal, tla in površino tribune v dvorani ( <b>slika 3.2.2.2</b> )	83
Preglednica 3.2.2.2:	Optične lastnosti membran, ki so bile uporabljeni za izračune z računalniškim programom DAYSIM in upoštevanjem pristopa za prosojne (motne) materiale (TRANS [142])	84
Preglednica 3.2.2.3:	Deleži [%] površin v notranjosti geometrijskega modela ŠDB	97
Preglednica 3.2.2.4:	Vrednosti globalne osončenosti $I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ], izmerjene na dan eksperimentalnih meritev 29. 10. 2015, pred setom 1, med setoma in po setu 2	101
Preglednica 3.2.2.5:	Primeri analize vpliva absolutne vrednosti globalne osončenosti $I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ] in deleža direktne normalne komponente $n$ [-] na vrednosti KDS <sub>rač</sub> [%]. Difuzna ( $I_{o,dif}$ [W/m <sup>2</sup> ]) in direktna ( $I_{o,dir,n}$	102

Preglednica 3.2.2.6:	[W/m <sup>2</sup> ] komponenta $I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ] sta bili uporabljeni kot vhodni podatek za izračun KDS <sub>rač</sub> s programom DAYSIM Absolutna razlika med maksimalno in minimalno vrednostjo KDS <sub>rač</sub> ( $\Delta KDS_{rač}$ [%]) v točkah, ki ponazarjajo merilna mesta 1a, 9a, 5c, 1e in 9e, v odvisnosti od položaja sonca na nebesnem svodu (od 12.15 do 13.22) za različne primere osončenosti in deleža direktne normalne komponente sončnega sevanja $I_{o,dir,n}$ [W/m <sup>2</sup> ] ( <b>preglednica 3.2.2.5</b> )	104
Preglednica 3.2.2.7:	Eksperimentalno določene vrednosti svetlobne učinkovitosti sončnega sevanja $K$ [lm/W] iz dne 29. 10. 2015 izmerjenih podatkov o globalni osvetljenosti $E_{o,exp,glob}$ [lx] in osončenosti zunanje horizontalne površine $I_{o,exp,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ]	105
Preglednica 3.2.2.8:	Povprečna absolutna deviacija AAD [%] (poglavlje 2.2.3) med eksperimentalnimi in s programom DAYSIM simuliranimi vrednostmi KDS [%] za set 1 in set 2 eksperimentalnih meritev	107
Preglednica 3.2.3.1:	Temperatura tal pod ŠDB $T_{tla}$ [°C], po posameznih mesecih v letu ocenjena na podlagi povprečne mesečne temperature tal (globina 100 cm) [ <b>165</b> ] in povprečne mesečne temperature zunanjega zraka $T_{a,o}$ [°C] za Ljubljano [ <b>162</b> ]	108
Preglednica 3.2.3.2:	Rezultat izračuna letne energije, potrebne za ogrevanje $Q_{heat,a}$ [kWh/m <sup>2</sup> .a] in hlajenje $Q_{cool,a}$ [kWh/m <sup>2</sup> .a] ŠDB, s programom EnergyPlus za več različic prosojnosti sestave konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja (PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE)	110
Preglednica 3.2.3.3:	Vhodni podatki in rezultat izračuna indeksov topotnega ugodja PMV [-] in PPD [%] v skladu s standardom SIST EN ISO 7730:2006 z uporabo programa PMV Tool ter določitev kategorije stavbe po indeksih PMV in PPD, izračunanih v skladu s standardom SIST EN 15251:2007	112
Preglednica 3.2.3.4:	Delež časa v letu, ko je temperatura zraka v stavbi $T_{a,i}$ [°C] nad, v in pod območjem nastavitev termostata, ko ogrevanje ozira na hlajenje ni potrebno	113
Preglednica 3.2.3.5:	Gostota prepuščenega ( $q_{TTsol}$ ), odbitega ( $q_{TRBsol}$ in $q_{TRWsol}$ ) in absorbiranega ( $q_{Asol}$ ) sevalnega toka sonca [W/m <sup>2</sup> ] na celotnem sončnem spektru (od 300 nm do 2500 nm), na valovnem območju ultravijoličnega sevanja (UV), na valovnem območju vidne svetlobe (VIS) in valovnem območju kratkovalovnega infrardečega sevanja (NIR) za vzorce dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	116
Preglednica 3.2.3.6:	Razpoložljiva sončna energija [kWh/m <sup>2</sup> .mo] po mesecih izračunana iz osončenosti horizontalne zunanje površine upoštevajoč letne vremenske podatke za Ljubljano [ <b>162</b> ] ( $Q_{sol,mo}$ ) ter s totalno prepustnostjo za sončni spekter med 300 in 2500 nm ( $TT_{sol}$ ) konstrukcijskih sklopov PES(1)2009z/PES(2)2009z ( $Q_{sg,mo}^a$ ), ETFE/ETFE ( $Q_{sg,mo}^b$ ) in	117

	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ( $Q_{sg,mo}^{\circ}$ ) utežene vrednosti	
Preglednica 3.1.1.A.1:	Spektralne optične lastnosti primera notranje membrane z dodano aerogelno odejo PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE na valovnem območju od 300 nm do 2500 nm: $TT_{sol}(\lambda)$ [%] (A), $TRB_{sol}(\lambda)$ [%] (B) in $TRW_{sol}(\lambda)$ [%] (C)	B1
Preglednica 3.1.2.A.1:	Dnevnik meritev v obdobju od 17. 7. 2013 do 13. 8. 2017	C1
Preglednica 3.1.3.B.1:	Podatki o položaju sonca (smerni [°] in višinski kot [°]) med izvedbo eksperimentalnega dela na Brezovici dne 29. 10. 2015	D3
Preglednica 3.2.1.A.1:	Toplotni upor $R_{si}$ in $R_{se}$ [ $m^2 \cdot K/W$ ] notranje in zunanje mejne zračne plasti za primere vhodnih podatkov od a do d iz <b>preglednice 3.2.1.1</b>	F1
Preglednica 3.2.1.B.1:	Prehod toplotne $\Lambda$ [ $W/m^2 \cdot K$ ] med zunanjim in notranjim površinom sklopa	F2
Preglednica 3.2.2.A.1:	Dimenzijske geometrijske modela ŠDB	G1
Preglednica 3.2.2.C.1:	Osvetljenost zunanje horizontalne površine za tri eksperimentalne čase: 12:10:00, 12:45:30 in 13:24:00 na dan 29. 10. 2015, ko je bila izmerjena globalna osončenost $I_{o,glob}$ [ $W/m^2$ ]	G3
Preglednica 3.2.2.D.1:	Vhodni podatki o direktni normalni ( $I_{o,dir,n}$ ) in difuzni ( $I_{o,dif}$ ) osončenosti [ $W/m^2$ ] zunanje horizontalne površine za simulacijo prvega seta (set 1) eksperimentalnih meritev s programom DAYSIM	G4
Preglednica 3.2.2.D.2:	Vhodni podatki o direktni normalni ( $I_{o,dir,n}$ ) in difuzni ( $I_{o,dif}$ ) osončenosti [ $W/m^2$ ] zunanje horizontalne površine za simulacijo drugega seta (set 2) eksperimentalnih meritev s programom DAYSIM	G5
Preglednica 4.A.1:	Podatki o zračno podprtji stavbi v Novem mestu in porabi energenta [ $m^3$ ] za njeno ogrevanje	H1
Preglednica 4.A.2:	Podatki o energiji potrebnih za ogrevanje Športne dvorane Brezovica upoštevajoč temperaturo zraka in čas obratovanja dvorane v Novem mestu $Q_{heat, NM}$ [ $kWh/m^3 \cdot a$ ]	H1
Preglednica 4.B.1:	Ocena povratne dobe [leto] stroška aerogelne toplotnoizolacijske odeje v odvisnosti od njegove cene [ $EUR/m^2$ ] in cene energenta [ $EUR/kWh$ ] uporabljenega za ogrevanje študijskega primera zračno podprte stavbe na podlagi z EnergyPlus programom izračunanega prihranka energije [ $kWh/m^2 \cdot a$ ] za ogrevanje Športne dvorane Brezovica	H2

## LIST OF TABLES

Table 1.1:	Overview of uncoated or coated fabrics and foils for use in building envelopes	3
Table 2.1.1.1:	Overview of materials acquired from the existing air-supported double membrane envelope constructional complex of the sports hall Brezovica	10
Table 2.1.2.1:	Overview of materials included in the new proposed air-supported double membrane envelope constructional complex of the sports hall Brezovica	12
Table 2.1.2.2:	Proposal of the insulation constructional complex PEfabric/aerogel/PEfabric	13
Table 2.1.2.3:	Overview of the studied sports hall Brezovica double membrane envelope constructional complex versions	14
Table 2.2.1.1:	List of instruments used in the research of optical properties of the fabrics, foils, aerogel blanket and surfaces inside the air-supported structure at Brezovica	16
Table 2.2.2.1:	List of instruments used for measuring $T_{a,k}$ [°C] and speed of air $v_k$ [m/s] in the air gap between the envelope membranes of the air-supported structure at Brezovica	23
Table 2.2.3.1:	List of instruments used for daylighting measurements of the Brezovica air-supported dome	25
Table 2.2.4.1:	List of instruments used for measuring climatic parameters inside and outside the air-supported dome at Brezovica	27
Table 2.3.2.1:	Inclination of the segments in the cylindrical part of the Brezovica air-supported dome geometrical model	35
Table 2.3.3.1:	Difference between the EnergyPlus simulated temperature (calibrated model) and the measured temperature at positions $T_1, T_2, T_{cav}, T_3, T_4$ [°C]	38
Table 3.1.1.1:	Total transmittance ( $TT_{vis}$ , [%]), diffuse transmittance ( $DT_{vis}$ , [%]), haze ( $H$ , [%]) and total reflectance ( $TR_{vis}$ , [%]) of various fabrics, foils, aerogel blanket and their composites of visible spectral range between 380 nm and 780 nm	41
Table 3.1.1.2:	Total hemispherical-hemispherical transmittance $TT_{vis,h-h}$ [%] of uninsulated and insulated version of ETFE/ETFE constructional complex and its individual layers of visible spectral range between 380 nm and 780 nm	48
Table 3.1.1.3:	Optical properties of composites composed of fabrics, foils and aerogel insulation blanket on solar spectrum between 300 nm to 2500 nm: Total (hemispherical) transmittance [%] whole $TT_{sol}$ , UV ( $TT_{sol,UV}$ ), VIS ( $TT_{sol,VIS}$ ) and NIR ( $TT_{sol,NIR}$ ) spectral range; total reflectance on black ( $TRB_{sol}$ ) in white ( $TRW_{sol}$ ) background and total absorptance $A_{sol}$ [%] from $A(\lambda) = 1 - (R(\lambda) + T(\lambda))$ in total, UV, VIS and NIR spectral ranges	54
Table 3.1.1.4:	Emissivity $\epsilon_T$ [-] of samples at different temperatures of their surface and two spectral ranges (8 to 14 μm and 2,5 to 16 μm)	56

on the basis of measured spectral reflectance of IR radiation on gold background	
Table 3.1.1.5: Colorimetric data of floor colours in the air-supported dome at Brezovica	58
Table 3.1.2.1: Position and orientation of thermal anemometer probe during different periods of the air velocity $v(t)$ [m/s] and corresponding air temperature $T_{a,k}(t)$ [ $^{\circ}$ C] measurements	60
Table 3.1.2.2: Extreme and average values of air velocity $v_h$ [m/s], its corresponding temperature $T_{a,k,h}$ [ $^{\circ}$ C] and time of thermal anemometer position and orientation cases a to d ( <b>Table 3.1.2.1</b> )	61
Table 3.1.3.1: Estimation of the light meter reading comparability of the two Volcraft instruments ( <b>Figure 3.1.3.6</b> ) used for experimental work on 29 <sup>th</sup> October 2015	70
Table 3.2.1.1: Input data cases for the calculation of radiation ( $h_r$ ) in convection ( $h_c$ ) heat transfer coefficient [W/m <sup>2</sup> .K]: corresponding time of day [h], air velocity in the channel ( $v$ [m/s]), temperatures of air channel sides right next to the surfaces ( $T_{s,k,i}$ in $T_{s,k,o}$ [ $^{\circ}$ C or K]), difference between the air and channel sides temperature ( $\Delta T_{a-s}$ [K]) and average absolute air temperature in the channel ( $T_m$ [K])	75
Table 3.2.1.2: Data about the envelope air channel: hydraulic diameter $D_{hyd}$ [m], average thickness of the air channel between the membranes $d_{povp}$ [m] ( <b>Figure 2.3.2.1 B</b> ) and the ratio between the channel segment height and the average channel thickness ( $d_{povp}$ ) $A_{gv,i}$ [-]	75
Table 3.2.1.3: Data about the air properties and its flow in the channel of the double membrane envelope for the sets of input data from a to d given in <b>Table 3.2.1.1</b>	76
Table 3.2.1.4: The calculated absorptance of solar radiation (see chapter 2.2.1) in the spectral range between 300 nm and 2500 nm [-] of outer ( $A_{e1}$ ) (PES(1)2009z and ETFE) and inner ( $A_{e2}$ ) (PES(2)2009z, ETFE and PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) membrane of the studied constructional complexes of double membrane envelope	81
Table 3.2.2.1: Reflectance ( $R_{vis}$ [%]) and RGB (red/green/blue) values [-] for external surfaces of surrounding buildings ( <b>Figure 3.2.2.1</b> ), external ground albedo, floor surfaces and surfaces of spectator stand inside the studied dome ( <b>Figure 3.2.2.2</b> )	83
Table 3.2.2.2: Optical data used input for running DAYSIM calculations using the option for semispecular translucent material (TRANS [142])	84
Table 3.2.2.3: Percentages [%] of different surfaces in the interior of the air- supported dome at Brezovica	97
Table 3.2.2.4: Result of global irradiance $I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ] measurements on 29 <sup>th</sup> Oct. 2015 before, in-between and after set 1 and 2 of experimental measurements	101

Table 3.2.2.5:	Analysis cases of the influence of the global irradiance $I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ] and the proportion of normal direct component n [-] on the daylight factor $KDS_{rac}$ [%] values. The diffuse ( $I_{o,dif}$ [W/m <sup>2</sup> ]) and direct normal ( $I_{o,dir,n}$ [W/m <sup>2</sup> ]) component of $I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ] were used as input for the DAYSIM daylight factor $KDS_{rac}$ calculations	102
Table 3.2.2.6:	Absolute difference between maximal and minimal value of daylight factor $KDS_{rac}$ ( $\Delta KDS_{rac}$ [%]) at grid points representing the measuring sites measuring points 1a, 9a, 5c, 1e and 9e in dependence of sun's position in sky vault (between 12.15 and 13.22) and the percentage of direct normal component of global solar radiation $I_{o,dir,n}$ [W/m <sup>2</sup> ] <b>(Table 3.2.2.5)</b>	104
Table 3.2.2.7:	Experimental values of solar radiation luminous efficacy K [lm/W] on 29 <sup>th</sup> Oct. 2015 determined from the measured values of global illuminance $E_{o,exp,glob}$ [lx] and solar irradiance of external horizontal surface $I_{o,exp,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ]	105
Table 3.2.2.8:	Average absolute deviation AAD [%] (chapter 2.2.3) between the experimental $KDS$ [%] values and the DAYSIM simulated $KDS$ values for set 1 and 2 of experimental measurements	107
Table 3.2.3.1:	The estimated temperature of soil underneath the air-supported dome at Brezovica $T_{tla}$ [°C], based on average monthly temperature of soil (100 cm below surface) [165] and the average monthly outdoor air temperature $T_{a,o}$ [°C] in Ljubljana [162]	108
Table 3.2.3.2:	EnergyPlus calculation of yearly energy use for heating $Q_{heat,a}$ [kWh/m <sup>2</sup> .a] and cooling $Q_{cool,a}$ [kWh/m <sup>2</sup> .a] of the air-supported dome at Brezovica for different cases of transparent and translucent composition of the double membrane envelope constructional complex (PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE)	110
Table 3.2.3.3:	Input data and result of PMV [-] and PPD [%] thermal comfort indices in accordance with international standard SIST EN ISO 7730:2006 by using computer program PMV and determination of building category considering the calculated PMV and PPD according to European standard SIST EN 15251:2007	112
Table 3.2.3.4:	Percentage of time in a year, when the indoor air temperature $T_{a,i}$ [°C] is above, in and under the range of thermostat settings, when heating or cooling is not required	113
Table 3.2.3.5:	Radiative flux density [W/m <sup>2</sup> ] of solar radiation transmitted ( $q_{TTsol}$ ), reflected ( $q_{TRBsol}$ and $q_{TRWsol}$ ) or absorbed ( $q_{Asol}$ ) by the double membrane envelope samples PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE in full solar spectrum (from 300 nm to 2500 nm), in the ranges of ultraviolet (UV), visible (VIS) and infrared (NIR) radiation	116

Table 3.2.3.6:	The available solar energy [kWh/m <sup>2</sup> .mo] by months calculated from outdoor horizontal surface irradiance considering the yearly weather data for Ljubljana [162] ( $Q_{sol,mo}$ ) and its values weighted by the total solar transmittance ( $TT_{sol}$ ) of the double membrane envelope constructional complex variants PES(1)2009z/PES(2)2009z ( $Q_{sg,mo}^a$ ), ETFE/ETFE ( $Q_{sg,mo}^b$ ) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ( $Q_{sg,mo}^c$ )	117
Table 3.1.1.A.1:	Solar optical properties of the inner membrane insulated by aerogel blanket PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE in the spectral range between 300 nm and 2500 nm: $TT_{sol}$ [%], $TRB_{sol}$ [%], $TRW_{sol}$ [%] and $A_{sol}$ [%] from $A(\lambda) = 1 - (R(\lambda) + T(\lambda))$	B1
Table 3.1.2.A.1:	Diary of measurements between 17th July 2013 and 13th August 2013	C1
Table 3.1.3.B.1:	Sun's position (azimuth [°] and altitude [°]) during the execution of the experimental work at Brezovica on 29 <sup>th</sup> October 2015	D3
Table 3.2.1.A.1:	Thermal resistance of internal and external boundary layer thermal resistance $R_{si}$ and $R_{se}$ [m <sup>2</sup> .K/W] for analysed cases given in <b>Table 3.2.1.1</b>	F1
Table 3.2.1.B.1:	Heat transfer $\Lambda$ [W/m <sup>2</sup> .K] between internal and external constructional complex surface	F2
Table 3.2.2.A.1:	The dimensions of the Brezovica air-supported dome geometry model	G1
Table 3.2.2.C.1:	Outdoor horizontal surface illuminance at times when global solar irradiance $I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ] was measured on 29 <sup>th</sup> Oct. 2015, at 12:10:00, 12:45:30 and 13:24:00	G3
Table 3.2.2.D.1:	Solar irradiance [W/m <sup>2</sup> ] input data (direct normal ( $I_{o,dir,n}$ ) and diffuse horizontal ( $I_{o,dif}$ ) irradiance) for the DAYSIM simulation of the first set (set 1) of experimental measurements	G4
Table 3.2.2.D.2:	Solar irradiance [W/m <sup>2</sup> ] input data (direct normal ( $I_{o,dir,n}$ ) and diffuse horizontal ( $I_{o,dif}$ ) irradiance) for the DAYSIM simulation of the second set (set 2) of experimental measurements	G5
Table 4.A.1:	Data about the air-supported dome in Novo mesto and use of natural gas [m <sup>3</sup> ] for its heating	H1
Table 4.A.2:	Energy use for heating of the air-supported dome in Brezovica considering the air temperature and running period of the air-supported dome in Novo mesto $Q_{heat, NM}$ [kWh/m <sup>3</sup> .a]	H1
Table 4.B.1:	Estimation of thermal insulation material payback period [years] in dependence on its price [EUR/m <sup>2</sup> ] and the price of heating agent [EUR/kWh] on basis of calculated heating energy savings [kWh/m <sup>2</sup> .a] using EnergyPlus software	H2

## KAZALO SLIK

Slika 1.1:	Pnevmatike konstrukcije: zračno podprte (A) in napihnjene z zrakom: nadtlak znotraj konstrukcijskega elementa (B) in podtlak znotraj konstrukcijskega elementa (C)	2
Slika 1.2:	Shema strukture vsebine disertacije	8
Slika 2.1.1.1:	Pogled iz zraka na ŠDB (A), ortografski posnetek njene bližnje (B) in neposredne (C) okolice. (B) in (C) povzeto po [64]	9
Slika 2.1.1.2:	Prečni prerez cevastega segmenta dvojnega membranskega ovoja ŠDB	11
Slika 2.1.2.1:	Funkcionalna analiza obstoječega (A) in novega predlaganega (B) konstrukcijskega sklopa (glej <b>preglednici 2.1.1.1</b> in <b>2.1.2.1</b> in seznam kratik)	13
Slika 2.2.1.1:	Spektralna porazdelitev gostote sevalnega toka črnega telesa pri temperaturi površine 5773 K (krivulja a, leva ordinata) in 293 K (krivulja b, desna ordinata) v valovnem območju od 0,2 µm in do 25 µm	15
Slika 2.2.1.2:	Shema strukture raziskave optičnih lastnosti vzorcev posameznih materialov in sklopa dvojnega membranskega ovoja in tal ŠDB	15
Slika 2.2.1.3:	Orientacija vzorcev ( <b>preglednici 2.1.1.1</b> in <b>2.1.2.1</b> ) glede na vpadni snop svetlobe med meritvami optičnih lastnosti membran (na sliki sta pričazana vzorca obstoječega konstrukcijskega sklopa PES(1)2009/PES(2)2009 (A) in predloga novega konstrukcijskega sklopa, izoliranega z aerogelno odejo ETFE/PEfabric/SL/PEfabric/ETFE (B)). Povzeto po [82]	17
Slika 2.2.1.4:	Shematski prikaz meritov optičnih lastnosti s spektrometrom Perkin Elmer Lambda 950: meritve prepustnosti (A) in meritve odbojnosti (B)	18
Slika 2.2.1.5:	Shematski prikaz terenskih meritov prepustnosti za vidno svetlobo $TT_{vis,h-h} [\%]$ s spektrometrom StellarNet Black Comet	20
Slika 2.2.1.6:	Shematski prikaz terenskih meritov odbojnognega faktorja tal za vidno svetlobo $R_{vis,dif}(\lambda) [\%]$ s spektrometrom StellarNet Black Comet	22
Slika 2.2.2.1:	Prikaz mesta meritov temperature $T_{a,k} [^{\circ}C]$ in hitrosti zraka $v_k [m/s]$ v zračnem kanalu v dvorani (puščica) (A) in na prečnem prerezu zračnega kanala (križec) (B)	23
Slika 2.2.2.2:	Prikaz vpliva orientacije sonde anemometra na odčitek hitrosti zraka [m/s] glede na smer zračnega toka (v smeri označbe 100 % vrednost, v nasprotni smeri 70 % vrednosti)	23
Slika 2.2.3.1:	Tloris Športne dvorane Brezovica in potek meritov	25
Slika 2.2.4.1:	Prikaz pozicije notranje in zunanje enote vremenske postaje Conrad [115]: tloris (A), prerez A-A (B)	28
Slika 2.3.1.1:	Shematski prikaz topotnega vezja za obstoječo različico konstrukcijskega sklopa ovoja ŠDB (PES(1)2009z/PES(2)2009z) (A) in za predlagano novo različico z uvedeno aerogelno odejo Spaceloft® (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) (B)	29
Slika 2.3.1.2:	Shematski prikaz modela prenosa toplotne med stranicama zračnega kanala (notranjo in zunanjou površino) in zrakom v njem z uporovno mrežo v kateri je upor $R_1$ (pripadajoč prenosu toplotne z radiacijo brez	31

Slika 2.3.2.1:	sodelujočega vmesnega medija) vzporedno vezan z zaporedno vezavo uporov, pripadajočih konvekciji ob dveh stranicah Tloris geometrijskega modela ŠDB (A), prerez A-A (B) in prerez B-B (C). Na slikah (B) in (C) je prikazana tudi segmentacija lokov s pripadajočimi indeksi posameznih linearnih segmentov	34
Slika 2.3.2.2:	Ponazoritev izbora tipa metode generacije žarkov pri njihovem vzvratnem sledenju s programom Radiance, brez upoštevanja (A) in ob upoštevanju (B) predpostavk o optičnih lastnostih primerov dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B)	36
Slika 2.3.3.1:	Geometrijski model ŠDB za izračun njenega toplotnega odziva in energije, potrebne za njeno ogrevanje in hlajenje, s programom EnergyPlus. Tloris geometrijskega modela z označenimi dimenzijami in mesti zvarov med segmenti ovoja (A). 3D pogled geometrijskega modela (B)	39
Slika 3.1.1.1:	Totalna (hemisferična) spektralna prepustnost $TT_{vis}(\lambda) [\%]$ (A) in totalna (hemisferična) spektralna odbojnost $TR_{vis}(\lambda) [\%]$ (B) vzorcev PES(1)2009 (zunanja membrana) in PES(2)2009 (notranja membrana) in njunega kompozita PES(1)2009/PES(2)2009 na spektralnem območju od 380 nm do 780 nm. Oznaki -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na <b>sliki 2.2.1.3</b>	42
Slika 3.1.1.2:	Totalna (hemisferična) spektralna prepustnost $TT(\lambda) [\%]$ (A) in totalna (hemisferična) spektralna odbojnost $TR(\lambda) [\%]$ (B) vzorcev tkanine PEfabric, folije ETFE, izolacijske odeje aerogel in kompozitov ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	43
Slika 3.1.1.3:	Izračunana (hemisferična) prepustnost vidne svetlobe $TT_{vis,calc}(d) [\%]$ aerogelne odeje v odvisnosti od debeline $d [mm]$	43
Slika 3.1.1.4:	Difuzna (hemisferična) spektralna prepustnost $DT(\lambda) [\%]$ vzorcev posameznih materialov PES(1)2009z, PES(2)2009z, ETFE, PEfabric in aerogel (A) ter vzorci kompozitov PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B)	45
Slika 3.1.1.5:	Izračunana totalna prepustnost $TT_{vis} [\%]$ vzorcev dvojnega elementa z vzporednima stranicama: PES(1)2009z (a), PES(2)2009z (b), PES(1)2009z/PES(2)2009z (c), ETFE (d), ETFE/ETFE (e), PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ( <b>priloga 3.1.1.A</b> ) (f) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (g) v skladu z (2) (poglavlje 2.2.1)	46
Slika 3.1.1.6:	Na terenu izmerjena totalna hemisferična-hemisferična spektralna prepustnost $TT_{vis,h-h}(\lambda) [\%]$ nove izolirane različice dvojnega membranskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, izolacijskega kompozita PEfabric/ETFE/PEfabric in posameznih materialov (PEfabric, ETFE, aerogel) za vidno svetlubo na območju spektra vidne svetlobe od 380 nm do 780 nm	47

Slika 3.1.1.7:	Relativne spektralne porazdelitve sevalnega toka $D(\lambda)$ [%] CIE standardnega svetila A, svetila D65 in neba v času meritev svetlobnih lastnosti dne 25. 11. 2015, normalizirane pri valovni dolžini 555 nm	48
Slika 3.1.1.8:	Totalna hemisferična spektralna prepustnost $TT_{sol}(\lambda)$ [%] vzorcev PES(1)2009z (a), PES(1)2009n (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e), PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) in očiščenega vzorca PES(1)2009z (g) na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na <b>sliki 2.2.1.3</b>	50
Slika 3.1.1.9:	Totalna hemisferična spektralna odbojnost [%] za vzorce PES(1)2009z (a), PES(1)2009n (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e) in PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) na črni $TRB_{sol}(\lambda)$ (A) in beli $TRW_{sol}(\lambda)$ (B) podlagi na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na <b>sliki 2.2.1.3</b>	51
Slika 3.1.1.10:	Totalna hemisferična spektralna prepustnost $TT_{sol}(\lambda)$ [%] vzorcev ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/ PEfabric (e) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na <b>sliki 2.2.1.3</b>	52
Slika 3.1.1.11:	Totalna hemisferična spektralna odbojnost [%] vzorcev ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/PEfabric (e) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) na črni $TRB_{sol}(\lambda)$ (A) in beli $TRW_{sol}(\lambda)$ (B) podlagi na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na <b>sliki 2.2.1.3</b>	53
Slika 3.1.1.12:	Spektralno povprečne vrednosti optičnih lastnosti (totalna prepustnost [%] (A), totalna odbojnost [%] na črni podlagi (B), totalna odbojnost [%] na beli podlagi (C), absorptivnost [%] (D) vzorcev PES(1)2009z/PES(2)2009z (krivulja a) ETFE/ETFE (krivulja b), ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (krivulja c) na treh valovnih območjih sončnega spektra: ultravijoličnem (UV), vidnem (VIS) in kratkovalovnem infrardečem (NIR)	55
Slika 3.1.1.13:	Temperaturno polje [°C], posneto z IR-kamero za vzorca ETFE (A) in PEfabric (B)	57
Slika 3.1.1.14:	Izmerjeni spektralni faktor odbojnosti $R_{vis,dif}(\lambda)$ [%] različno obarvanih delov tal v ŠDB: rdeča barva (črna polna črta), svetlo modra barva (črna črtkana črta), temno modra barva (siva polna črta)	58
Slika 3.1.2.1:	Povprečne hitrosti zraka, izmerjene v zračnem kanalu v posamezni uri v dnevu ( $v_h$ [m/s]), polna črta, +; $v_h/0.7$ [m/s], črtkana črta, +) (levo) in pripadajoča povprečna izmerjena temperatura ( $T_{a,k,h}$ [°C]) (polna črta, ●) (desno) tekom dneva za različne pozicije in orientacije sonde instrumenta ( <b>preglednica 3.1.2.1</b> ): ob zunanjji stranici navzgor (A) in navzdol (B); ob notranji stranici navzdol (C) in navzgor (D)	59

Slika 3.1.2.2:	Diagram sončne poti za dan 01. 08. 2013, s prikazano orientacijo glavne osi ŠDB (črtkana rdeča črta) in poudarjenima pozicijama sonca ob 7. in 15. uri po lokalnem času (rumeni zvezdici). Slika je povzeta po [157]	61
Slika 3.1.2.3:	Povprečni urni profil hitrosti zraka na sredini kanala $v_{h,mid}^{povp}$ [m/s] (polna črta, +) (A), povprečna urna profila temperature zraka ob notranji $T_{a,k,h,i}^{povp}$ [ $^{\circ}$ C] (črtkana črta, ●) in zunanji $T_{a,k,h,o}^{povp}$ [ $^{\circ}$ C] (polna črta, ●) stranici (B) zračnega kanala za celotno obdobje meritev. Na (C) je prikazana razlika med urnima profiloma temperature ob zunanji in notranji stranici zračnega kanala $\Delta T_{a,k,h,povp}^{povp}$ [ $^{\circ}$ C]	62
Slika 3.1.3.1:	Izvedba meritev osvetljenosti $E_{i,exp,glob}(N_i)$ [lx] za 45 merilnih mest ( $N_i$ = od 1 do 45) na igrišču v ŠDB s pripadajočimi izoluksami, izraženimi z vrednostmi KDS [%] (KDS( $N_i$ )) med setom 1 (A) in setom 2 (B), z alternativno predstavljivjo na sliki (C) (set1, ○; set2, *; standardna deviacija, navpične črte). Na sliki (A) in (B) tribuna in koridorji ob igrišču niso prikazani	64
Slika 3.1.3.2:	Variacija difuzne osvetljenosti zunanje površine ( $E_{o,calc,dif}(N_i)$ ) (●, krivulji a in c) v času meritev osvetljenosti v stavbi ( $E_{i,exp,glob}(N_i)$ [lx]) (×, krivulji b in d) za merilna mesta ( $N_i$ = od 1 do 45) na tleh igrišča v ŠDB dne 29. 10. 2015 za set 1 (A) in set 2 (B). Za korelacijo merilnih mest in časa glej <b>sliki 3.1.3.1 A in B</b>	65
Slika 3.1.3.3:	Meritve osvetljenosti zunaj ŠDB: globalna osvetljenost $E_{o,exp,glob}$ [lx] (izvorni vidni kot instrumenta) (krivulja a) in difuzna osvetljenost $E_{o,calc,dif}$ [lx], izračunana iz $E_{o,exp,tube}$ [lx] (zmanjšani vidni kot instrumenta na 28°) (●, krivulja b)	66
Slika 3.1.3.4:	Osvetljenost zunanje nezasenčene horizontalne površine za set meritev 1 med 8.57 in 9.02 (A) in set meritev 2 med 9.10 in 9.15 (B) dne 5. 5. 2017: globalna osvetljenost, izmerjena z ročnim merilnikom osvetljenosti ( $E_{o,exp,glob}$ [lx], ○); globalna osvetljenost, izračunana iz izmerjenih spektralnih radiometričnih podatkov ( $E_{o,calc,glob,spectro}$ [lx], ×); difuzna hemisferična osvetljenost ( $E_{o,calc,dif}$ [lx], ●) izračunana iz podatkov o količini vpadne svetlobe iz izseka neba v smeri zenita in vidnim kotom 28° ( $E_{o,exp,tube}$ ). Interpolirane vrednosti $E_{o,calc,glob,spectro}$ za čase, pripadajoče $E_{o,calc,dif}$ (črna polna črta)	68
Slika 3.1.3.5:	Osončenost zunanje horizontalne površine [ $W/m^2$ ] v času eksperimenta dne 5. 5. 2017: globalna osončenost ( $I_{o,exp,glob}$ , ○); difuzna osončenost ( $I_{o,exp,dif}$ , ●)	69
Slika 3.1.3.6:	Merilnika osvetljenosti, uporabljeni za eksperimentalno delo na Brezovici dne 29. 10. 2015. Prikaz zaščite instrumenta za meritve zunaj stavbe na Brezovici $E_{o,exp,tube}$ (posnetek je bil narejen ob 13.36 uri) (A). Primerjava vrednosti inštrumentov opravljeni istega dne po opravljenem setu 2 meritev osvetljenosti (posnetek je bil narejen ob 13.41 uri) (B)	70
Slika 3.1.4.1:	Temperatura zraka, izmerjena znotraj $T_{a,i}$ [ $^{\circ}$ C] in zunaj $T_{a,o}$ [ $^{\circ}$ C] ŠDB za primere od a do d iz <b>preglednice 3.1.2.1</b> : obdobje a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013 (A), obdobje b med 23. 7. 2013 in 26. 7. 2013	71

(B), obdobje c 6. 8. 2013 (C), obdobje d od 7. 8. 2013 do 9. 8. 2013 (D). Prikazana je tudi linearna interpolacija med vrednostmi temperature zraka ob polnih urah (črtkana črta)	
Slika 3.1.4.2: Povprečne temperature zraka, izmerjene znotraj $T_{a,i}^{povp}$ [°C] in zunaj $T_{a,o}^{povp}$ [°C] ŠDB (A) v obdobjih, definiranih v <b>preglednici 3.1.2.1</b> (obdobje a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, obdobje b med 23. 7. 2013 in 26. 7. 2013, obdobje c 6. 8. 2013, obdobje d od 7. 8. 2013 do 9. 8. 2013), ter njuna razlika (B)	72
Slika 3.1.4.3: Povprečna temperatura zraka $T_{a,h}$ [°C] ob izbranih urah dneva na štirih merilnih mestih: v stavbi $T_{a,h,i}$ (krivulja a), ob notranji stranici zračnega kanala $T_{a,k,h,i}$ (krivulja b), ob zunanjji stranici zračnega kanala $T_{a,k,h,o}$ (krivulja c) ter zunaj stavbe $T_{a,h,o}$ (krivulja d)	73
Slika 3.1.4.4: Povprečne hitrosti vetra $v_w$ [m/s], izmerjene na zunanjji strani ob ŠDB v obdobjih prikazanih v <b>preglednici 3.1.2.1</b> (obdobje a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, obdobje b med 23. 7. 2013 in 26. 7. 2013, obdobje c 6. 8. 2013, obdobje d od 7. 8. 2013 do 9. 8. 2013)	73
Slika 3.2.1.1: Izračunani koeficienti prenosa topote z radiacijo $h_{r,i}(\gamma_i)$ [W/m <sup>2</sup> .K] in konvekcijo $h_{c,i}(\gamma_i)$ [W/m <sup>2</sup> .K] v odvisnosti od naklona konstrukcijskega sklopa $\gamma_i$ [°]: $h_{r,i}(\gamma_i)$ za primera PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE (A), $h_{r,i}(\gamma_i)$ za primer ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) in $h_{c,i}(\gamma_i)$ za vse tri primere sklopa PES(1)2009/PES(2)2009, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (C). Različne krivulje na (A),(B) in (C) ponazarjajo različne primere vhodnih podatkov za izračun koeficientov (primeri od a do e v <b>preglednici 3.2.1.1</b> )	78
Slika 3.2.1.2: Topotni upor $R_i(\gamma_i)$ [m <sup>2</sup> .K/W], izračunan za različice konstrukcijskega sklopa dvojnega ovoja ŠDB PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (A) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) v odvisnosti od naklona konstrukcijskega sklopa $\gamma_i$ [°] za različne sete eksperimentalno pridobljenih vhodnih podatkov (od a do e, <b>preglednica 3.2.1.1</b> ). Krivulja f ponazarja hipotetični primer brez upoštevanja konvekcijskega prenosa topote ( $h_{c,i}(\gamma_i)$ )	79
Slika 3.2.1.3: Izračunana totalna prepustnost za sončno energijo (g [-]) za obravnavane različice konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB: PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (B) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (C)	81
Slika 3.2.2.1: Shematski prikaz ŠDB z njeno neposredno okolico: glavna stavba OŠ Brezovica (A), individualna hiša z drevesi (B) in mesto meritev osvetljenosti zunaj stavbe (C). Barve zunanjih površin sosednjih stavb so prikazane s pripadajočo kodo RAL lestvice barv ( <b>preglednica 3.2.2.1</b> ). Smer sever je označena s črko N	83
Slika 3.2.2.2: Razporeditev barv tal in tribune v notranjosti ŠDB	84
Slika 3.2.2.3: Tloris geometrijskega modela obravnavane ŠDB, namenjen za izračune njene dnevne osvetljenosti	85
Slika 3.2.2.4: Zgoščena mreža z razdaljo med opazovanimi točkami 0.5 m x 0.5 m in rezultat izračuna KDS <sub>rac</sub> [%] s programom DAYSIM za dva	86

<p>primera obarvanosti tal: črna (<math>R_d = 0\%</math>) bela (<math>R_d = 100\%</math>)  šahovnica (A, C) in bela oziroma popolnoma odbojna tla (<math>R_d = 100\%</math>) (B, D)</p> <p>Slika 3.2.2.5: Segmenti (A) raziskane ŠDB, uporabljeni za izračun vrednosti KDS. B: seštevek DC-jev, izračunanih za pozicijo 5c (♦, krivulja a) in DC (○, označen s puščico) za isto pozicijo, 5c, izračunan za celoten cilindrični del, prosojen. C: primerjava DC-jev za vseh 45 pozicij, izračunanih s postopnim izračunom cilindrov (♦, krivulja b) z DC-ji, izračunanimi za celotni cilindrični del, prosojen (○, krivulja a)</p> <p>Slika 3.2.2.6: Pogled v geometrijski model dvorane (A); prikaz segmentov neba [148] (B); s programom DAYSIM izračunani DC-ji za vseh 45 opazovanih pozicij v primeru, da sta skrajna dela ovoja ŠDB zatemnjena, cilindrični del pa prosojen (♦, krivulja a), ter primer, da je celoten ovoj ŠDB prosojen (♦, krivulja b) (C). Optične lastnosti prosojnega dela ovoja (PES(1)2009z/PES(2)2009z) so navedene v <b>preglednici 3.2.2.2</b></p> <p>Slika 3.2.2.7: DC-ji [-], izračunani za vseh 45 opazovanih pozicij za primere, ko sta skrajna dela ovoja ŠDB zatemnjena, velikost prosojnega dela ovoja pa narašča: 6 segmentov (krivulja a), 12 segmentov (krivulja b) in 18 segmentov (krivulja c) cilindričnega dela stavbe. Optične lastnosti prosojnega dela ovoja (PES(1)2009z/PES(2)2009z) so navedene v <b>preglednici 3.2.2.2</b></p> <p>Slika 3.2.2.8: DC-ji [-], izračunani za vseh 45 opazovanih pozicij za primere, ko je celotna konstrukcija prosojna, velikost prozornega (ETFE/ETFE) dela ovoja pa narašča: 6 segmentov (krivulja a), 12 segmentov (krivulja b) in 18 segmentov (krivulja c) cilindričnega dela stavbe. Optične lastnosti prosojnega (PES(1)2009z/PES(2)2009z) in prozornega (ETFE/ETFE) dela ovoja so navedene v <b>preglednici 3.2.2.2</b></p> <p>Slika 3.2.2.9: Vpliv števila segmentov na vrednosti <math>KDS_{rač}</math> [%] pri aproksimaciji dvojno ukrivljenega ovoja z odsekoma ravnimi elementi: bela tla (A), črna tla (B), vzorec dejanskih tal (pozicija 5c (krivulja a), pozicija 1e (krivulja b)) (C)</p> <p>Slika 3.2.2.10: Izračunane vrednosti <math>KDS_{rač}</math> [%] (CIE standardno oblačno nebo) za ŠDB a tlemi, obarvanimi belo (□, krivulja a), kot dejansko v obstoječi stavbi (svetlo modro/rdeče/temno modro) (♦, krivulja b) in črno (■, krivulja c) ter <math>KDS_{rač}</math> za večslojno membrano z aerogelno izolacijo ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (◊, krivulja d)</p> <p>Slika 3.2.2.11: Vrednosti <math>KDS_{rač}</math> [%], izračunane za različne črno-bele vzorce barve tal v ŠDB: predominantno beli (A) in predominantno črni (B)</p> <p>Slika 3.2.2.12: Delež ur [%], ko je na voljo dnevna svetloba in je osvetljenost tal dvorane 300 (krivulja a), 500 (krivulja b) oziroma 700 (krivulja c) lx ali več, v odvisnosti od količnika dnevne svetlobe (minimum, povprečje, maksimum) za obstoječo varianto konstrukcijskega sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z (prvi set (set 1) eksperimentalnih meritev, O; drugi set (set 2) eksperimentalnih meritev, X) ter novo različico konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (Δ)</p>	<p>87</p> <p>88</p> <p>90</p> <p>91</p> <p>93</p> <p>95</p> <p>96</p> <p>99</p>
---	---

Slika 3.2.2.13:	Količnik dnevne svetlobe KDS [%], izračunan iz meritve $E_{i,exp,glob}$ (merilnik 1 na <b>sliki 3.1.3.8 B</b> ) in $E_{o,exp,tube}$ (merilnik 2 na <b>sliki 3.1.3.8 B</b> ) med setom meritve 1 (A) in 2 (B) dne 29. 10. 2015 (krivulja a), KDS z dodano razliko v vrednosti v primerjavi z merilnikom 1 (merilnik 2 v povprečju preceni vrednosti za 14,7 %, <b>preglednica 3.1.3.1</b> ) (krivulja b), KDS <sub>rač</sub> , izračunan s programom DAYSIM (CIE standardno oblačno nebo) (krivulja c)	100
Slika 3.2.2.14:	Spreminjanje izračunanega faktorja dnevne osvetljenosti KDS <sub>rač</sub> [%] v odvisnosti od lokacije merilnega mesta in položaja sonca na nebesnem svodu za vseh 45 merilnih mest v času eksperimenta dne 29. 10. 2015 med 12.15 in 13.22 v časovnem koraku 1 min in pri konstantni osončenosti nezasenčene horizontalne površine ( $I_{o,glob} = I_{o,dif} = 35 \text{ W/m}^2$ )	102
Slika 3.2.2.15:	Količnik dnevne svetlobe KDS [%] v odvisnosti od časa v vogalnih točkah in središču igrišča za različna razmerja direktne normalne in difuzne horizontalne osončenosti, navedene v <b>preglednici 3.2.2.5</b> . Količnik dnevne svetlobe, izračunan kot razmerje med $E_{i,calc,glob}^{DAYSIM}$ in $E_{o,calc,dif}^{DAYSIM}$	103
Slika 3.2.2.16:	S programom DAYSIM simulirani količnik dnevne svetlobe KDS <sub>sim</sub> [%], pripadajoč eksperimentalnim merilnim mestom dne 29. 10. 2015 v času med 12.15 in 12.45 (set 1) (A) ter med 12.56 in 13.22 (set 2) (B) za različne primere deleža direktne komponente ( $n = I_{o,dir,n}/I_{o,dif}$ ): 0 % (krivulja a), 4 % (krivulja b), 7 % (krivulja c), 10 % (krivulja d). Krivulja e pomeni izračun za CIE standardno oblačno nebo (tudi <b>slika 3.2.2.8</b> ), krivulja f pa eksperimentalno določen KDS	106
Slika 3.2.3.1:	Primerjava rezultata simulacije ( $T_{a,i,sim}$ [°C], krivulja a) in eksperimentalne meritve (18. 7. 2013 do 6. 8. 2013) ( $T_{a,i}$ [°C], krivulja b) temperature zraka v ŠDB	109
Slika 3.2.3.2:	Januarsko mesečno povprečje temperature notranjega zraka $T_{a,i}$ tekom dneva v ŠDB za primer konstrukcijskega sklopa obstoječega dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z (krivulja a) in nove različice ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (krivulja b)	111
Slika 3.2.3.3:	Januarsko mesečno povprečje srednje radiacijske temperature površin v ŠDB (MRT [°C]) tekom dneva za primer konstrukcijskega sklopa obstoječega dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z (krivulja a) in nove različice ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (krivulja b)	112
Slika 3.2.3.4:	Sončni spekter $\Phi_{e,ISO9845}$ [W/m <sup>2</sup> .μm], utežen s totalno spektralno prepustnostjo TT <sub>sol</sub> (λ) [-] za vzorce PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/ PEfabric/ETFE	115
Slika 3.2.3.5:	Sončni spekter $\Phi_{e,ISO9845}$ [W/m <sup>2</sup> .μm], utežen s totalno spektralno odbojnostjo na črni podlagi TRB <sub>sol</sub> (λ) [-] za vzorce PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/ PEfabric/ETFE	115
Slika 3.2.3.6:	Mesečna količina sončnega sevanja na zunanjih horizontalnih površinah $Q_{sol,mo}$ [kWh/m <sup>2</sup> .mo] in mesečna energija, potrebna za ogrevanje ŠDB $Q_{heat,mo}$ [kWh/m <sup>2</sup> .mo], izračunana s programom EnergyPlus za obravnavane različice konstrukcijskega sklopa njenega dvojnega	118

	membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	
Slika 2.2.4.A.1:	Prikaz razlike v izmerjeni vrednosti temperature s termometrom na notranji (krivulja a) in zunanji (krivulja b) enoti vremenske postaje	A1
Slika 3.1.1.A.1:	Spektralne optične lastnosti primera notranje membrane z dodano aerogelno odejo PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE na valovnem območju od 300 nm do 2500 nm: $TT_{sol}(\lambda)$ [%] (A), $TRB_{sol}(\lambda)$ [%] (B) in $TRW_{sol}(\lambda)$ [%] (C)	B1
Slika 3.1.1.B.1:	Totalna spektralna odbojnost $TR_{IR}(\lambda)$ [%] dolgovalovnega infrardečega sevanja na spektralnem območju med 2.5 in 16 $\mu\text{m}$ vzorcev ETFE, PEfabric, aerogel in PES(1)	B2
Slika 3.1.2.B.1	Prikaz spremembe temperature zraka v zračnem kanalu med membranama ob spremembni poziciji merilne sonde instrumenta od zunanje k notranji stranici zračnega kanala dne 26. 7. 2013	C2
Slika 3.1.3.A.1:	Eksperimentalne vrednosti osvetljenosti horizontalne površine, osvetljene z izsekom neba v smeri zenita in vidnim kotom 28° $E_{o,exp,tube}$ izmerjene v setu meritvev 1 ( $\Delta$ ) v času od 12.15 do 12.45, in seta meritvev 2 ( $\blacktriangle$ ) med 12.56 in 13.22 na Brezovici dne 29. 10. 2015	D1
Slika 3.1.3.B.1:	Prikaz položaja sonca glede na orientiranost ŠDB (zem. š.: 46,01 S; zem. d.: 14,41 V) (A) ter diagram sončne poti (B) na dan 29. 10. 2015 ob časih meritvev globalne osončenosti $I_{glob}$ [ $\text{W/m}^2$ ]: pred začetkom meritvev osvetljenosti (ob 12.10 uri), med setoma 1 in 2 (ob 12.45 uri) in po končanih meritvah osvetljenosti (ob 13.23 uri). Povzeto po [163]	D2
Slika 3.1.4.A.1:	Vrednosti temperature zraka, izmerjene zunaj ŠDB $T_{a,o}(t)$ [ $^\circ\text{C}$ ] (krivulja a), v ŠDB $T_{a,i}(t)$ [ $^\circ\text{C}$ ] (krivulja b) in ob zunanji stranici zračnega kanala $T_{a,k,o}(t)$ [ $^\circ\text{C}$ ] (krivulja c), hitrosti zraka v zračnem kanalu v [ $\text{m/s}$ ] (krivulja d) in hitrost vetra $v_w$ [ $\text{m/s} \cdot 10^{-1}$ ] (krivulja e) (18. 7. 2013)	E1
Slika 3.2.2.B.1:	Količnik dnevne svetlobe v odvisnosti od časa, v vogalnih točkah in središču igrišča za različna razmerja direktne normalne in difuzne horizontalne osončenosti, navedene v <b>preglednici 3.2.2.5</b> . Količnik dnevne svetlobe, izračunan kot razmerje med $E_{i,calc,glob}^{DAYSIM}$ in $E_{o,calc,glob}^{DAYSIM}$	G2

## LIST OF FIGURES

Figure 1.1:	Pneumatic structures: insuflated (A), inflted with air (B) and aspired structures (C)	2
Figure 1.2:	The schematic representation of the dissertation content structure	8
Figure 2.1.1.1:	Arial view of the air-supported sports hall Brezovica (A), orthographic shot of its immediate (B) and broader surroundings. (B) and (C) after [64]	9
Figure 2.1.1.2:	Cross section of the tubular double membrane envelope segment of the air-supported dome Brezovica	11
Figure 2.1.2.1:	Functional analysis of the existing (A) and newly proposed (B) constructional complex (see Tables 2.1.1.1 in 2.1.2.1 and list of abbreviations)	13
Figure 2.2.1.1:	Spectral distribution of radiation flux density of black body at temperature of surface 5773 K (curve a, left ordinate) and 293 K (curve b, right ordinate) in spectral region from 0,2 μm to 25 μm	15
Figure 2.2.1.2:	Schematic representation of the individual materials', double membrane envelope constructional complexes' and indoor floor's optical properties research	15
Figure 2.2.1.3:	Orientation of the samples (Tables 2.1.1.1 and 2.1.2.1) with respect to the incident beam of light during the measurements of optical properties (In the Figure the existing PES(1)2009z/PES(2)2009z and the newly proposed version of the double membrane envelope ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE constructional complex are shown). After [82]	17
Figure 2.2.1.4:	Schematic representation of the optical properties' measurements conducted with Perkin Elmer Lambda 950: transmittance measurements (A) and reflectance measurements (B)	18
Figure 2.2.1.5:	Schematic representation of field transmittance $TT_{vis,h-h}$ [%] measurements conducted with portable spectrometer StellarNet Black Comet	20
Figure 2.2.1.6:	Schematic representation of field visible light reflection factor $R_{vis,dif}(\lambda)$ [%] measurements conducted with portable spectrometer StellarNet Black Comet	22
Figure 2.2.2.1:	Location of air temperature $T_{a,k}$ [°C] and its velocity $v$ [m/s] measurements inside the air channel of the double membrane envelope (on building plan (A) and envelope cross section (B))	23
Figure 2.2.2.2:	Presentation of the anemometer orientation influence on the reading of air velocity [m/s] in respect to the air flow direction (flow in the direction of arrow 100 % value, in the opposite direction 70 %)	23
Figure 2.2.3.1:	Plan of the air-supported dome in Brezovica and the course of measurements	25
Figure 2.2.4.1:	Location of the indoor and outdoor Conrad [115] weather station unit: plan (A), cross section A-A (B)	28
Figure 2.3.1.1:	Schematic representation of the thermal circuit for the existing version of the constructional complex of the Brezovica air-supported dome (PES(1)2009z/PES(2)2009z) (A), and the newly proposed	29

<p>version insulated by the aerogel blanket Spaceloft®  (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) (B)</p> <p>Figure 2.3.1.2: Schematic representation of the heat transfer between the internal and external side of the envelope air channel with the new thermal resistor network inside which the thermal resistance <math>R_1</math> (radiative heat transfer between surfaces) parallelly bound with the sequentially bound of thermal resistances belonging to convective heat transfer next to the channel sides</p> <p>Figure 2.3.2.1: Plan of the Brezovica air-supported structure geometry model (A), its cross-section A-A (B) and its cross-section B-B (C). In (B) and (C) also the segmentation of arcs with corresponding indices is shown</p> <p>Figure 2.3.2.2: Illustration of the ray generation method choice in the raytracing runs by Radiance software without (A) and with (B) consideration of assumptions about the optical properties of the double membrane envelope constructional complex cases PES(1)2009z/PES(2)2009z and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE</p> <p>Figure 2.3.3.1: Geometry model of the air-supported dome at Brezovica used for EnergyPlus calculations of the building's thermal response and energy use for heating and cooling. Top view of the model with dimensions and location of welds between tubular envelope segments (A). 3D view of the geometry model (B)</p> <p>Figure 3.1.1.1: Total (hemispherical) spectral transmittance <math>TT_{vis}(\lambda)</math> [%] (A) and total (hemispherical) spectral reflectance <math>TR_{vis}(\lambda)</math> [%] (B) of samples PES(1)2009 (external membrane), PES(2)2009 (internal membrane) and their composite PES(1)2009/PES(2)2009 on spectral range from 380 nm to 780 nm. Labels -n and -z mark the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in <b>Figure 2.2.1.3</b></p> <p>Figure 3.1.1.2: Total (hemispherical) spectral transmittance <math>TT(\lambda)</math> [%] (A) and total (hemispherical) spectral reflectance <math>TR(\lambda)</math> [%] (B) of fabric sample PEfabric, foil ETFE, aerogel insulation blanket Spaceloft® and composites ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE</p> <p>Figure 3.1.1.3: Calculated (hemispherical) visible light transmittance <math>TT_{vis,calc}(d)</math> [%] of aerogel insulation blanket Spaceloft® in dependence on sample thickness <math>d</math> [mm]</p> <p>Figure 3.1.1.4: Diffuse (hemispherical) spectral transmittance <math>DT(\lambda)</math> [%] of individual material samples PES(1)2009z, PES(2)2009z, ETFE, PEfabric and aerogel (A) and samples of composites PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B)</p> <p>Figure 3.1.1.5: Calculated total transmittance <math>TT_{vis}</math> [%] of double membrane element with parallel sides: PES(1)2009z (a), PES(2)2009z (b), PES(1)2009z/PES(2)2009z (c), ETFE (d), ETFE/ETFE (e), PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (<b>Appendix 3.1.1.A</b>) (f) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (g) in accordance with (2) (see chapter 2.2.1)</p>	<p>31</p> <p>34</p> <p>36</p> <p>39</p> <p>42</p> <p>43</p> <p>43</p> <p>45</p> <p>46</p>
--	---

Figure 3.1.1.6:	Total hemispherical-hemispherical spectral transmittance $TT_{vis,h-h}(\lambda)$ [%] of the new thermally insulated version of the double membrane envelope constructional complex ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, insulation composite PEfabric/ETFE/PEfabric and individual materials (PEfabric, ETFE, aerogel) in the spectral range from 380 nm to 780 nm	47
Figure 3.1.1.7:	Relative spectral distribution $D(\lambda)$ [%] of CIE standard illuminant A, illuminant D65 and natural sky radiation flux normalized at wavelength of 555 nm. The spectral distribution of sky radiation flux was recorded on 25th November 2015	48
Figure 3.1.1.8:	Total hemispherical spectral transmittance $TT_{sol}(\lambda)$ [%] of samples PES(1)2009z (a), PES(1)2009z (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e), PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) and cleaned sample PES(1)2009z (g) on spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in <b>Figure 2.2.1.3</b>	50
Figure 3.1.1.9:	Total hemispherical spectral reflectance [%] of samples PES(1)2009z (a), PES(1)2009z (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e) and PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) on black $TRB_{sol}(\lambda)$ (A) and white $TRW_{sol}(\lambda)$ (B) background and in spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in <b>Figure 2.2.1.3</b>	51
Figure 3.1.1.10:	Total hemispherical spectral transmittance $TT_{sol}(\lambda)$ [%] of samples ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/ PEfabric (e) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) in spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in <b>Figure 2.2.1.3</b>	52
Figure 3.1.1.11:	Total hemispherical spectral reflectance [%] of samples ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/PEfabric (e) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) on black $TRB_{sol}(\lambda)$ (A) and white $TRW_{sol}(\lambda)$ (B) background and in spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in <b>Figure 2.2.1.3</b>	53
Figure 3.1.1.12:	Spectral average values of optical properties (total transmittance [%] (A), total reflectance [%] on black background (B), total reflectance [%] on white background (C), absorptance [%] (D)) of samples PES(1)2009z/PES(2)2009z (curve a), ETFE/ETFE (curve b), ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (curve c) in three spectral ranges of solar spectrum: ultraviolet (UV), visible (VIS) and near infrared (NIR)	55

Figure 3.1.1.13:	Temperature field [°C] recorded with IR camera for samples ETFE (A) and PEfabric (B)	57
Figure 3.1.1.14:	Measured spectral reflection factor $R_{vis,dif}(\lambda)$ [%] of differently coloured parts of the floor inside the studied air-supported dome at Brezovica: red colour (black full line), light blue colour (black dashed line), dark blue colour (grey full line)	58
Figure 3.1.2.1:	Over period of measurements averaged values of measured air velocity during each hour of the day ( $v_h$ [m/s], full line, +; $v_h/0.7$ [m/s], dashed line, +) (left) and corresponding average measured air temperature ( $T_{a,k,h}$ [°C]) (full line, ●) (right) for different locations and orientations of the instrument's probe ( <b>Table 3.1.2.1</b> ): next external side upwards (A) and downwards (B); next inner side downwards (C) and upwards (D)	59
Figure 3.1.2.2:	Sun path diagram on 1st August 2013 with main axis of the air-supported dome at Brezovica (red dashed line) added and emphasized sun's position (yellow stars) at 7 AM and 3 PM local time. After [157]	61
Figure 3.1.2.3:	Average hourly air velocity profile at the middle of air channel between the membranes $v_{h,mid}^{povp}$ [m/s] (full line, +) (A), average hourly air temperature profile next to inner $T_{a,k,h,i}^{povp}$ [°C] (dashed line, ●) and outer $T_{a,k,h,o}^{povp}$ [°C] (full line, ●) side (B) of the air channel for the whole period of field measurements. In (C) the difference between the hourly temperature profiles next to inner and outer side of air channel is shown $\Delta T_{a,k,h,povp}^{povp}$ [°C]	62
Figure 3.1.3.1:	The execution of $E_{i,exp,glob}(N_i)$ [lx] illuminance measurements at 45 points ( $N_i=1$ to 45) on the playground floor with the corresponding iso-illuminance values expressed with the KDS values ( $KDS(N_i)$ ) for <i>set1</i> (A) and <i>set2</i> (B) measurement data with the alternative presentation shown on (C) ( <i>set1</i> , open ○; <i>set2</i> , *; standard deviation, vertical bars). Spectator stand and corridors are not shown on A and B	64
Figure 3.1.3.2:	The variation of the outdoor sky illuminance ( $E_{o,calc,dif}(N_i)$ ) [lx] (●, curves a and c) during the measurements of the indoor illuminance ( $E_{i,exp,glob}(N_i)$ [lx]) values (×, curves b and d) at various sites ( $N_i=1$ to 45) on the playground floor inside the air-supported dome measured on 29 <sup>th</sup> of Oct. 2015 for the <i>set1</i> (A) and <i>set2</i> (B) of measurements. For the correlation of time to the sites see <b>Figure 3.1.3.1 A and B</b>	65
Figure 3.1.3.3:	Outdoor illuminance measurements: global illuminance $E_{o,exp,glob}$ [lx] (instruments original angle of view) (curve a) and sky illuminance $E_{o,calc,dif}$ [lx] calculated from $E_{o,exp,tube}$ [lx] (reduced angle of view to 28°) (●, curve b)	66
Figure 3.1.3.4:	Illuminance of unobstructed outdoor horizontal surface for set 1 (8.57 to 9.02) (A) and set 2 (9.10 to 9.15) (B) of measurements on 5th May 2017: global illuminance measured with handheld light meter ( $E_{o,exp,glob}$ [lx], ○); global illuminance calculated from the measured spectral radiometric data ( $E_{o,calc,glob,spectro}$ [lx], ×); diffuse hemispherical illuminance ( $E_{o,calc,dif}$ [lx], ●) calculated from the data	68

Figure 3.1.3.5:	about the amount of incident light from the sky segment in direction of zenith and field of view $28^\circ$ ( $E_{o,exp,tube}$ [lx]). Interpolated values of $E_{o,calc,glob,spectro}$ at times of corresponding $E_{o,calc,dif}$ (black full line) Solar irradiance of outdoor horizontal surface [ $\text{W/m}^2$ ] during the time of experiment on 5th May 2017: global irradiance ( $I_{o,exp,glob}$ , ○); diffuse irradiance ( $I_{o,exp,dif}$ , ●)	69
Figure 3.1.3.6:	The two lightmeters used for experimental work at Brezovica on 29 <sup>th</sup> October 2015. In Figure the instrument's protection for outdoor $E_{o,exp,tube}$ measurements is shown (picture taken at 13.36) (A). Comparison of the two instruments' readings, conducted on the same day after set 2 of illuminance measurements (picture taken at 13.41) (B)	70
Figure 3.1.4.1:	The measured air temperature inside $T_{a,i}$ [ $^\circ\text{C}$ ] and outside $T_{a,o}$ [ $^\circ\text{C}$ ] the air-supported structure at Brezovica for analysis cases a to d given in <b>Table 3.1.2.1</b> : period a from 17. 7. 2013 to 22. 7. 2013 (A), period b from 23. 7. 2013 to 26. 7. 2013 (B), period c 6. 8. 2013 (C), period d from 7. 8. 2013 to 9. 8. 2013 (D). The linear interpolation between air temperature values at full hours is also shown (dashed line)	71
Figure 3.1.4.2:	Average measured temperatures of air inside and outside the air-supported dome at Bezovica (A), averaged over the time periods given in <b>Table 3.1.2.1</b> (period a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, period b between 23. 7. 2013 and 26. 7. 2013, period c on 6. 8. 2013, period d from 7. 8. 2013 to 9. 8. 2013) and their difference (B)	72
Figure 3.1.4.3:	Average temperature of air $T_{a,h}$ [ $^\circ\text{C}$ ] at chosen hours of a day at four measurement locations: inside the studied building $T_{a,h,i}$ (curve a), next to the inner side of air channel $T_{a,k,h,i}$ (curve b), next to the outer side of air channel $T_{a,k,h,o}$ (curve c) and outside the building $T_{a,h,o}$ (curve d)	73
Figure 3.1.4.4:	Average measured wind velocities $v_w$ [m/s] next to the air-supported dome at Brezovica and averaged over the time periods given in <b>Table 3.1.2.1</b> (period a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, period b between 23. 7. 2013 and 26. 7. 2013, period c 6. 8. 2013, period d from 7. 8. 2013 to 9. 8. 2013)	73
Figure 3.2.1.1:	The calculated radiative $h_{r,i}(\gamma_i)$ [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ] and convective $h_{c,i}(\gamma_i)$ [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ] heat transfer coefficients in dependence on constructional complex inclination $\gamma_i$ [ $^\circ$ ]: $h_{r,i}(\gamma_i)$ of PES(1)2009/PES(2)2009 and ETFE/ETFE (A), $h_{r,i}(\gamma_i)$ of ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) and $h_{c,i}(\gamma_i)$ for all three envelope cases PES(1)2009/PES(2)2009, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/ PEfabric/ETFE (C). Different curves in (A), (B) and (C) represent different cases of input data for the calculation of the coefficients (cases from a to e in <b>Table 3.2.1.1</b> )	78
Figure 3.2.1.2:	The calculated thermal resistance $R_i(\gamma_i)$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ] of air-supported dome double membrane envelope constructional complex PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (A) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) in dependence on the	79

complex inclination $\gamma_i$ [°] for different sets of experimentally obtained input data (from a to e, see <b>Table 3.2.1.1</b> ). Curve f represent the hypothetical case without consideration of convective heat transfer ( $h_{c,i}(\gamma_i)$ )	
Figure 3.2.1.3: Calculated total solar energy transmittance (g [-]) of all studied versions of Brezovica air-supported dome double membrane envelope constructional complex: PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (B) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (C)	81
Figure 3.2.2.1: Schematic presentation of the air supported dome at Brezovica with surrounding buildings; primary school facility (A), detached house with a line of trees (B) and site of solar irradiation measurements (C). Surface colours (expressed as RAL numbers) are depicted on the surfaces of buildings and listed in <b>Table 3.2.2.1</b> . North direction is indicated with letter N	83
Figure 3.2.2.2: Distribution of floor colours over the interior of the air-supported dome at Brezovica	84
Figure 3.2.2.3: Top view of the Brezovica air-supported dome geometry model, used in daylighting calculations	85
Figure 3.2.2.4: Densified grid of KDS <sub>rač</sub> [%] calculation nodes 0.5 m x 0.5 m and the result of DAYSIM calculation for two cases of floor colour: black (Rd = 0 %) and white (Rd = 100 %) checkerboard (A, C) and white floor (Rd = 100%) (B, D)	86
Figure 3.2.2.5: Segments (A) of the air-supported dome at Brezovica used for the calculation of the DFs values (B and C). B: the sum of DCs calculated for point 5c (♦, curve a) and DC (○, indicated with arrow) for the same point (5c) calculated for the whole DUOL structure, C: comparison of DCs for all 45 sites obtained by taking sequentially optically translucent cylinders (♦, curve b) with DCs obtained for the whole structure (○, curve a)	87
Figure 3.2.2.6: View into the dome geometry model (A); illustration of sky segments [148] (B); DC values calculated with DAYSIM at all 45 observed sites in case, that the end parts of the air-supported structure at Brezovica are completely opaque and black and the cylindrical part translucent (♦, curve a); case when whole air-supported envelope is transparent (♦, curve b) (C). Optical properties of translucent part of envelope (PES(1)2009z/PES(2)2009z) are given in <b>Table 3.2.2.2</b>	88
Figure 3.2.2.7: Calculated DC's [-] of all 45 measurement sites for cases, when the end parts of air-supported structure composed of triangular envelope segments are completely opaque and the area of translucent area of the cylindrical part of the building is increasing: 6 segments (curve a), 12 segments (curve b) and 18 segments (curve c). Optical properties of translucent (PES(1)2009z/PES(2)2009z) part of the envelope are given in the <b>Table 3.2.2.2</b>	90
Figure 3.2.2.8: Calculated DC's [-] of all 45 measurement sites for cases, when whole air-supported structure is translucent and the transparent area of the cylindrical part of the building (ETFE/ETFE) is increasing: 6 segments (curve a), 12 segments (curve b) and 18 segments (curve	91

<p>c). Optical properties of translucent (PES(1)2009z/PES(2)2009z) and transparent (ETFE/ETFE) part of the envelope are given in the <b>Table 3.2.2.2</b></p> <p>Figure 3.2.2.9: The influence of number of envelope segments on the KDS<sub>rač</sub> [%] values when approximating the double curved envelope with planar elements: white floor (A), black floor (B), actual colour pattern (only sites 5c (curve a) and 1e (curve b)) (C)</p> <p>Figure 3.2.2.10: Calculated daylight values KDS<sub>rač</sub> [%] (CIE standard overcast sky) for the air-supported structure at Brezovica with the playground floor painted white (□, curve a), as painted in the structure (light blue/red/dark blue) (◆, curve b) and painted black (■, curve c) and KDS<sub>rač</sub> for multilayer membrane with aerogel blanket applied ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (◊, curve d)</p> <p>Figure 3.2.2.11: Calculated daylight factor values KDS<sub>rač</sub> [%] for a variety of black and white coloured floor samples: predominantly white (A) and predominantly black (B)</p> <p>Figure 3.2.2.12: Percentage of hours [%], when daylight is available and the dome floor illuminance is equal to or higher than 300 (curve a), 500 (curve b) and 700 (curve c) lx depending on daylight factor value (minimum, average, maximum) for the existing case of double membrane envelope constructional complex PES(1)2009z/PES(2)2009z (set 1 of experimental measurements, O; set 2 of experimental measurements, X) and the new version of it ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (Δ)</p> <p>Figure 3.2.2.13: Daylight factor KDS [%] calculated on basis of E<sub>i,exp,glob</sub> (lightmeter 1 in <b>Figure 3.1.3.8 B</b>) and E<sub>o,exp,tube</sub> (lightmeter 2 in <b>Figure 3.1.3.8 B</b>) recorded during set 1 (A) and set 2 (B) measurements on 29<sup>th</sup> October 2015 (curve a), corrected KDS value in respect to the difference with lightmeter 1 (lightmeter 2 overestimates the value in average by 14,7%, <b>Table 3.1.3.1</b>) (curve b) and KDS<sub>rač</sub> calculated with DAYSIM considering CIE standard overcast sky (curve c)</p> <p>Figure 3.2.2.14: Variation of the calculated daylight factor KDS<sub>rač</sub> [%] in dependence of measurement site location and sun's position on sky vault for all 45 measurement sites during the time of experiment on 29<sup>th</sup> October 2015 between 12.15 and 13.22. Calculations were performed for 1 min time step and constant irradiance of unobstructed horizontal surface (<math>I_{o,glob} = I_{o,dif} = 35 \text{ W/m}^2</math>)</p> <p>Figure 3.2.2.15: Daylight factor KDS [%] in dependence of time at corner points and in centrum of playground for various ratios (<b>Table 3.2.2.4</b>) of direct normal and diffuse horizontal components of incident solar radiation. Daylight factor was calculated as the ratio between E<sub>i,calc,glob</sub><sup>DAYSIM</sup> and E<sub>o,calc,dif</sub><sup>DAYSIM</sup></p> <p>Figure 3.2.2.16: The simulated (DAYSIM) daylight factor values KDS<sub>sim</sub> [%] corresponding to experimental measurement sites on 29<sup>th</sup> October 2015 between 12.15 and 12.45 (set 1) (A) and between 12.56 and 13.22 (set 2) (B) for various cases of the direct normal solar radiation component proportions (<math>n = I_{o,dir,n}/I_{o,dif}</math>): 0 % (curve a), 4 % (curve b), 7 % (curve c), 10 % (curve d). Curve e represents the</p>	<p>93</p> <p>95</p> <p>96</p> <p>99</p> <p>100</p> <p>102</p> <p>103</p> <p>106</p>
--	---

Figure 3.2.3.1:	calculation for CIE standard overcast sky (also <b>Figure 3.2.2.8</b> ) and curve f represents the experimentally obtained KDS Comparison of simulated (EnergyPlus) (18th July 2013 do 6th August 2013) ( $T_{a,i,sim}$ [°C], curve a) and experimentally measured ( $T_{a,i}$ [°C], curve b) air temperature inside the air-supported dome at Brezovica	109
Figure 3.2.3.2:	Monthly average interior air temperature during a January day $T_{a,i}$ inside the Brezovica air-supported dome double membrane envelope constructional complex cases PES(1)2009z/PES(2)2009z (curve a) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (curve b)	111
Figure 3.2.3.3:	Monthly average mean radiant temperature (MRT [°C]) of surfaces inside the air-supported dome at Brezovica during a January day for double membrane envelope constructional complex cases PES(1)2009z/PES(2)2009z (curve a) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (curve b)	112
Figure 3.2.3.4:	Solar spectrum $\Phi_{e,ISO9845}$ [W/m <sup>2</sup> .μm] weighted by total spectral transmittance $TT_{sol}(\lambda)$ [-] of samples PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	115
Figure 3.2.3.5:	Solar spectrum $\Phi_{e,ISO9845}$ [W/m <sup>2</sup> .μm] weighted by total spectral reflectance on black background $TRB_{sol}(\lambda)$ [-] of samples PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	115
Figure 3.2.3.6:	Monthly amount of solar energy incident on outdoor horizontal surface $Q_{sol,mo}$ [kWh/m <sup>2</sup> .mo] and monthly energy demand for heating of the air-supported dome at Brezovica $Q_{heat,mo}$ [kWh/m <sup>2</sup> .mo] calculated with EnergyPlus software considering the three studied double membrane envelope constructional complexes PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	118
Figure 2.2.4.A.1:	The temperature of air measured by indoor unit (curve a) and outdoor unit (curve b) of the weather station used in the field work	A1
Figure 3.1.1.A.1:	Spectral optical properties of internal membrane with PEfabric and aerogel blanket applied (PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) in spectral range from 300 nm to 2500 nm: $TT_{sol}(\lambda)$ [%] (A), $TRB_{sol}(\lambda)$ [%] (B) and $TRW_{sol}(\lambda)$ [%] (C)	B1
Figure 3.1.1.B.1:	Total spectral reflectance $TR_{IR}(\lambda)$ [%] of longwave IR radiation on spectral range from 2,5 μm and 16 μm of samples ETFE, PEfabric, aerogel and PES(1)	B2
Figure 3.1.2.B.1:	Representation of the air temperature inside the channel between the inner and outer membrane for different positions of the instruments probe	C2
Figure 3.1.3.A.1:	Experimental values of horizontal surface illuminance, illuminated by the sky segment in the direction of zenith and field of view 28° $E_{o,exp,tube}$ measured during set 1 of measurements (△) (12.15 to 12.45) and set 2 of measurements (▲) (12.56 to 13.22) at Brezovica on 29 <sup>th</sup> October 2015	D1
Figure 3.1.3.B.1:	Illustration of sun's position in respect to the orientation of the air-supported structure at Brezovica (altitude: 46,01 S; longitude: 14,41 V) (A) and corresponding sun path diagram (B) on 29 <sup>th</sup> October	D2

2015 at times of global irradiance  $I_{\text{glob}}$  [W/m<sup>2</sup>] measurements: before the start of indoor floor daylighting measurements (12.10), between sets 1 and 2 (12.45), and after the end of daylighting measurements (13.23). After [163]

Figure 3.1.4.A.1: The measured air temperature outside  $T_{a,o}(t)$  [°C] (curve a) and inside  $T_{a,i}(t)$  [°C] (curve b) the air-supported structure at Brezovica, air temperature next to the outer side of the air channel  $T_{a,k,o}(t)$  [°C] (curve c), air velocity inside the air channel  $v$  [m/s] (curve d) and wind velocity  $v_w$  [m/s\*10<sup>-1</sup>] (curve e) (18. 7. 2013) E1

Figure 3.2.2.B.1: Time dependent daylight factor in corner grid points and in centre of playground for different ratios between direct normal and diffuse horizontal solar irradiance given in **Table 3.2.2.5**. Daylight factor calculated as the ratio between  $E_{i,\text{calc,glob}}^{\text{DAYSIM}}$  and  $E_{o,\text{calc,glob}}^{\text{DAYSIM}}$  G2

»Ta stran je namenoma prazna«

## SEZNAM PRILOG

PRILOGA 2.2.4.A:	Kontrola razlik izmerjenih vrednosti parametrov	A1
PRILOGA 3.1.1.A:	Optične lastnosti notranje toplotno izolirane membrane	B1
PRILOGA 3.1.1.B:	Rezultat meritev totalne spektralne odbojnosti dolgovalovnega nizkotemperaturnega infrardečega sevanja	B2
PRILOGA 3.1.2.A:	Dnevnik terenskih meritev v obdobju julij–avgust 2013	C1
PRILOGA 3.1.2.B:	Prikaz spremembe temperature zraka v zračnem kanalu med membranama ob spremembi pozicije merilne sonde	C2
PRILOGA 3.1.3.A:	Eksperimentalne vrednosti osvetljenosti horizontalne površine, osvetljene z izsekom neba v smeri zenita	D1
PRILOGA 3.1.3.B:	Prikaz pozicije sonca in diagram sončne poti med eksperimentom dne 29.10.2015	D2
PRILOGA 3.1.4.A:	Primerjava temperature zraka v Športni dvorani Brezovica in zunaj nje ter v zračnem kanalu njenega dvojnega membranskega ovoja	E1
PRILOGA 3.2.1.A:	Toplotni upor mejnih zračnih plasti	F1
PRILOGA 3.2.1.B:	Prehod toplote med zunanjim in notranjim površino konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja	F2
PRILOGA 3.2.2.A:	Dimenzijske geometrijske modela obravnavane Športne dvorane Brezovica	G1
PRILOGA 3.2.2.B:	Količnik dnevne svetlobe v odvisnosti od časa, v vogalnih točkah in središču igrišča za različna razmerja direktno normalne in difuzne horizontalne osončenosti	G2
PRILOGA 3.2.2.C:	Osvetljenost zunanje horizontalne površine na dan 29. 10. 2015	G3
PRILOGA 3.2.2.D:	Vhodni podatki o direktni normalni in difuzni osončenosti zunanje horizontalne površine za simulacijo eksperimentalnih meritev s programom DAYSIM	G4
PRILOGA 4.A:	Podatki o energiji potrebnih za ogrevanje zračno podprte stavbe v Novem mestu, primerljivi Športni dvorani Brezovica	H1
PRILOGA 4.B:	Ocena povratne dobe stroška aerogelne toplotnoizolacijske odeje na podlagi z EnergyPlus programom izračunanega prihranka energije za ogrevanje Športne dvorane Brezovica	H2

## LIST OF APPENDICES

APPENDIX 2.2.4.A:	Control of the difference in measured values	A1
APPENDIX 3.1.1.A:	Optical properties of thermally insulated inner membrane	B1
APPENDIX 3.1.1.B:	The result of total spectral reflectance measurements of longwave low temperature infrared radiation	B2
APPENDIX 3.1.2.A:	Fieldwork diary for the time period July-August 2013	C1
APPENDIX 3.1.2.B:	Representation of the air temperature inside the channel between the inner and outer membrane for different positions of the instrument's probe	C2
APPENDIX 3.1.3.A:	The experimental values of horizontal surface illuminance, illuminated by zenithal sky segment	D1
APPENDIX 3.1.3.B:	Sun's position and solar path diagram during the execution of the experimental work at Brezovica on 29th October 2015	D2
APPENDIX 3.1.4.A:	Comparison of air temperature, inside and outside the air-supported dome Brezovica and in the channel of its double membrane envelope.	E1
APPENDIX 3.2.1.A:	Thermal resistance of the boundary air layers	F1
APPENDIX 3.2.1.B:	Thermal conductance between the outer and inner surface of the double membrane envelope constructional complex	F2
APPENDIX 3.2.2.A:	Dimensions of air-supported dome Brezovica geometry model	G1
APPENDIX 3.2.2.B:	Time dependent daylight factor in corner grid points and in centre of playground for different ratios between direct normal and diffuse horizontal solar irradiance	G2
APPENDIX 3.2.2.C:	Outdoor horizontal surface illuminance on 29th Oct. 2015	G3
APPENDIX 3.2.2.D:	External surface solar irradiance input data (direct normal and diffuse horizontal irradiance) for the DAYSIM simulation of experimental measurements	G4
APPENDIX 4.A	Energy use for heating of the air-supported dome in Novo mesto, comparable to the air-supported dome in Brezovica	H1
APPENDIX 4.B	Estimation of the thermal insulation material payback period on basis of calculated heating energy savings using EnergyPlus software	H2

## SEZNAM KRATIC

AAD	Povprečna absolutna deviacija
ASTM	Ameriško združenje za testiranje in materiale
ATR	Metoda oslabljene totalne odbojnosti
aerogel	Oblika silicijevega oksida, v disertaciji tudi oznaka za aerogelno izolacijsko odejo Spaceloft®
CIE	Mednarodna komisija za razsvetljavo
ETFE	Etilen tetrafluoroetilen
EXPO	Svetovna razstava
FE	Fakulteta za elektrotehniko
FEP	Fluoriran etilen propilen
HI	Hidroizolacija
IESNA	Severno ameriško združenje inženirjev razsvetljave
IMRAD	Uvod, Metodologija, Rezultati, Diskusija
NK	Nosilna konstrukcija
NRC	Nacionalni svet za raziskave
OŠ	Osnovna Šola
PES	Poliester
PVC	Polivinil klorid
PVF	Polivinil fluorid
PVDF	Polivinilidene fluorid
PTFE	Politetrafluoroetilen
PE	Polietilen
RMSE	Koren povprečne kvadratne napake
S, J, V, Z, SV, JV, JZ, SZ, S- SV, V-SV, V- JV, J-JV, J-ZJ, Z-JZ, Z-SZ,S- SZ	Smeri neba
SEK HI	Sekundarna hidroizolacija
SEK TI	Sekundarna toplotna izolacija
SEV	Zaščita proti sevanju
ŠDB	Športna dvorana Brezovica
TER TI	Terciarna toplotna izolacija
TFE	Tetrafluoroetilen
THV	Tetrafluoroetilen / Heksafluoropropilen / Vinilidene fluorid kopolimer
TI	Toplotna izolacija
TIM	Transparentni izolacijski material
VIP	Vakuumsko izolacijski paneli
ZKSEKTI	Zaščitna konstrukcija sekundarne toplotne izolacije
ZKTI	Zaščitna konstrukcija toplotne izolacije
ZPS	Zračno podprta stavba

$A(\lambda)$	Absorptivnost	[%]
$A_{gv,i}$	Razmerje med višino zračnega kanala v posameznem segmentu ovoja in debelino zračnega kanala	[-]
$A_{e1}, A_{e2}$	Absorptivnosti	[-]
$a(\lambda)$	Spektralna absorptivnost	[-]
$\alpha$	prestopni koeficient toplote	[W/m <sup>2</sup> .K]
$a_{t,dif.}$	Termična difuzivnost	[m <sup>2</sup> /s]
$a$	Absorpcijski koeficient	[cm <sup>-1</sup> ]
$B(\lambda,T)$	Spektralna sevnost črnega telesa	[W/sr.m <sup>2</sup> .m]

$\bar{b}(\lambda)$ ,	Kolorimetrična funkcija za modro barvo	
Bi	Biotovo število	[ - ]
Cr	Difuzna odbojnosc rdeče komponente svetlobe	[ - ]
Cg	Difuzna odbojnosc zelene komponente svetlobe	[ - ]
Cb	Difuzna odbojnosc modre komponente svetlobe	[ - ]
$c_0$	Hitrost svetlobe v vakuumu	[ m/s ]
$c_p$	Specifična topotna kapaciteta	[ J/kg.K ]
D	Svetlost neba po Perezu	[ ]
d	Debelina	[ m ]
$D(\lambda)$	Relativna porazdelitev moči vira svetlobe D65	[ - ]
$D_h$	Difuzna komponenta globalne osončenosti horizontalne površine	[ W/m <sup>2</sup> ]
$D_{hyd}$	Hidravlični premer	[ m ]
$\Delta$	Razlika, interval	[ - ]
ds	Razmerje med najdaljšo stranico in razdaljo od točke opazovanja do obravnovanega elementa	[ - ]
dj	Trepetanje direktne komponente vpadne svetlobe ang. »direct jitter«	
DC	Koeficient dnevne svetlobe	[ - ]
DIR	Smer	[ ° ]
DT( $\lambda$ )	Difuzna prepustnost za sevanje	[ % ]
E	Osvetljenost	[ lx ]
$e(\lambda)$	Spektralna emitivnost	[ - ]
$\varepsilon$	Stopnja čistosti neba po Perezu	[ - ]
$e_T$	Emitivnost	[ - ]
ERC	Od okoliških stavb in elementov odbita komponenta vpadne svetlobe	
FOV	Vidni kot	
$\Phi_{e,\lambda}$	spektralna porazdelitev sevalnega toka	[ W/nm.m <sup>2</sup> ]
$\Phi_{e,ISO9845}$	spektralna porazdelitev osončenosti $\Phi_{e,ISO9845}$	[ W/m <sup>2</sup> .μm ]
G	Globalna osončenost horizontalne površine	[ W/m <sup>2</sup> ]
$\bar{g}(\lambda)$ ,	Kolorimetrična funkcija za zeleno barvo	
$\gamma$	Naklon konstrukcijskega sklopa	[ ° ]
Gr	Grashofovo število	[ - ]
H	Motnost	[ % ]
h	Koeficient prenosa toplote	[ W/m <sup>2</sup> .K ]
$h_{Planck}$	Planckova konstanta	[ Js ]
I	Osončenost	[ W/m <sup>2</sup> ]
IR <sub>h</sub>	Infrardeče sevanje vpadno z neba	[ W/m <sup>2</sup> ]
IRC	Znotraj stavbe odbita komponenta vpadne svetlobe	
K( $\lambda$ )	Spektralna svetlobna efikasnost monokromatičnega sevanja	[ lm/W.nm ]
K, K <sub>m</sub>	Svetlobna efikasnost	[ lm/W ]
k	Topotna prevodnost (tudi lambda)	[ W/m.K ]
k <sub>1</sub>	Korekcijski faktor za debelino okvira	
k <sub>2</sub>	Korekcijski faktor za upoštevanje umazanije na steklu	
k <sub>B</sub>	Boltzmannova konstanta	[ J/K ]
k <sub>gv,i</sub>	Topotna prevodnost i-tega stekla	[ W/m.K ]
KDS	Količnik dnevne svetlobe	[ % ]
L	Svetlost	[ lm/sr.m <sup>2</sup> ]
l	Dolžina	[ m ]
$\Lambda$	Topotna prehodnost	[ W/m <sup>2</sup> .K ]
$\lambda$	Valovna dolžina	[ nm ]
$\Delta\lambda$	Interval valovne dolžine	[ nm ]
MRT	Srednja radiacijska temperatura	[ °C ]
m(X)	Srednja vrednost vzorca	

$\mu$	Dinamična viskoznost zraka	[N.s/m <sup>2</sup> ]
n	Delež direktne komponente	[ $\text{-}$ ]
v	Kinematična viskoznost zraka	[m <sup>2</sup> /s]
$\eta$	Efikasnost sončnega sevanja	[lm/W]
Ni	Zaporedna številka merilnega mesta	
Nm	Indeks vozlišča v mreži merilnih mest (stolpec, vrstica)	
Nu	Nusseltovo število	[ $\text{-}$ ]
p	Zračni tlak	[Pa]
Pr	Prandtlovo število	[ $\text{-}$ ]
PMV	Pričakovana presoja stopnje topotnega ugodja	[ $\text{-}$ ]
PPD	Indeks deleža nezadovoljnih uporabnikov	[ $\%$ ]
Q	Energija	[kWh/m <sup>2</sup> .a]
q	Gostota energijskega /topotnega toka	[W/m <sup>2</sup> ]
R <sub>eT</sub> ( $\lambda$ )	Totalna odbojnost infrardečega sevanja	[ $\%$ ]
R <sub>vis,dif</sub> ( $\lambda$ )	Odbojnostni faktor	[ $\%$ ]
RH	Relativna vlažnost	[ $\%$ ]
R	Topotni upor	[m <sup>2</sup> .K/W]
R( $\gamma$ )	Topotni upor v odvisnosti od naklona konstrukcijskega sklopa	[m <sup>2</sup> .K/W]
r( $\lambda$ )	Spektralna odbojnost	[ $\text{-}$ ]
$\rho$	Gostota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\bar{r}(\lambda)$	Kolorimetrična funkcija za rdečo barvo	
Ra	Rayleighovo število	[ $\text{-}$ ]
Re	Reynoldsovo število	[ $\text{-}$ ]
Rd	povprečna fotopična odbojnost rdeče, zelene in modre barve	[ $\text{-}$ ]
Rs	Delež zrcalno odbite komponente svetlobe	[ $\text{-}$ ]
S( $\lambda$ )	Relativna porazdelitev moči standardnega sončnega spektra ISO 9845-1	[ $\text{-}$ ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
Sr	Hrapavost površine	[ $\text{-}$ ]
St	Delež zrcalne komponente	(-)
$\Delta S_i$	Površina segmenta neba	
SC	Neposredno prepuščena komponenta vpadne svetlobe	
T	Temperatura, absolutna temperatura	[°C], [K]
t	Čas	[s]
t( $\lambda$ )	Spektralna prepustnost	[ $\text{-}$ ]
Td	delež difuzno prepuščene svetlobe	(-)
Ts	zrcalna prepustnost	(-)
t <sub>gv,i</sub>	Debelina i-tega stekla	[m]
TT( $\lambda$ )	Totalna prepustnost za sevanje	[ $\%$ ]
TR( $\lambda$ )	Totalna odbojnost sevanja	[ $\%$ ]
TRW( $\lambda$ )	Totalna odbojnost sevanja na beli podlagi	[ $\%$ ]
TRB( $\lambda$ )	Totalna odbojnost sevanja na črni podlagi	[ $\%$ ]
TT, DT, TR, TRW, TRB, A,	Spektralno povprečne vrednosti optičnih lastnosti	[ $\%$ ]
R <sub>eT</sub> , R <sub>vis,dif</sub>		
U	Topotna prehodnost	[W/m <sup>2</sup> .K]
V( $\lambda$ )	Relativna barvna občutljivost očesa za CIE 1931 standardnega opazovalca	[ $\text{-}$ ]
v	Hitrost zraka	[m/s]
v(t)	Hitrost zraka v odvisnosti od časa	[m/s]
x <sub>i</sub>	Spremenljivka vzorca	
h-h	Hemisferično-hemisferično	
n-h	Normalno-hemisferično	

h-n	Hemisferično-normalno
vis	Svetlobne lastnosti
sol	Sončne lastnosti
UV	Ultravijolični del spektra elektromagnetnega valovanja
VIS	Vidni del spektra elektromagnetnega valovanja
NIR	Kratkovalovni infrardeči del spektra elektromagnetnega valovanja
IR	Dolgovalovni infrardeči del spektra elektromagnetnega valovanja
specular	Zrcalna komponenta vpadnega sevanja
s	Površina
č.t.	Črno telo
a	Zrak
k	Kanal
o	Zunaj
i	Notri
m	Srednja temperature površin
mid	Sredina
h	Urni interval
povp	Povprečno
setpoint	Nastavitev termostata
a-s	Razlika med zrakom in površino
w	Veter
tla	Tla
exp	Eksperimentalna vrednost
calc	Izračunana vrednost
glob	Globalna vrednost
dif	Difuzna komponenta globalne vrednosti
dir, n	Direktna normalna komponenta globalne vrednosti
spectro	Spektrometer
cor	Korigirana vrednost
z, vz	Vertikalno v smeri zenita
rač	Izračunana vrednost
sim	Simulirana vrednost
p	Indeks
q	Indeks
r	Indeks
sum	Vsota
gv	Zasteklitev, šipa
si	Notranja površina
se	Zunanja površina
i	Zaporedno število
ex	Zunanji
int	Notranji
cv	Konvekcija
c	Konvekcija
r	Radiacija
heat	Ogrevanje
cool	Hlajenje
a	Letna
sg	Sončni dobitki

## LIST OF ABBREVIATIONS

AAD	Average absolute deviation	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
ATR	Attenuated total reflectance	
aerogel	Form of silicon oxide, in the dissertation also a mark for aerogel insulation blanket Spaceloft®	
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage	
ETFE	Etilen tetrafluoroetilen	
EXPO	International Exposition, also World's Fair	
FE	Faculty of Electrical Engineering	
FEP	Fluoriran etilen propilen	
HI	Waterproofing	
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America	
IMRAD	Introduction, Methodology, Results, Discussion	
NK	Structural element	
NRC	National Research Council	
OŠ	Primary school	
PES	Polyester	
PVC	Polyvinyl chloride	
PVF	Polyvinyl fluoride	
PVDF	Polyvinylidene fluoride	
PTFE	Polytetrafluoroethylene	
PE	Polyethylene	
RMSE	Root mean square error	
S, J, V, Z, SV, JV, JZ, SZ, S- SV, V-SV, V- JV, J-JV, J-ZJ, Z-JZ, Z-SZ,S- SZ	Sky directions	
SEK HI	Secondary waterproofing	
SEK TI	Secondary thermal insulation	
SEV	Protection against radiation	
ŠDB	Sports hall Brezovica	
TER TI	Tertiary thermal insulation	
TFE	Tetrafluoroethylene	
THV	Tetrafluoroethylene / Hexafluoropropylene / Vinylidene fluoride copolymer	
TI	Thermal insulation	
TIM	Transparent insulation material	
VIP	Vacuum insulated panels	
ZKSEKTI	Protective layer of secondary thermal insulation	
ZKTI	Protective layer of thermal insulation	
ZPS	Air-supported structure	
A( $\lambda$ )	Absorptance	[%]
A <sub>gv,i</sub>	Ratio between the air channel height and its thickness	[-]
A <sub>e1</sub> , A <sub>e2</sub>	Absorptance	[-]
a( $\lambda$ )	Spectral absorptance	[-]
$\alpha$	Heat transfer coefficient	[W/m <sup>2</sup> .K]
a <sub>t,dif.</sub>	Thermal diffusivity	[m <sup>2</sup> /s]
a	Absorption coefficient	[cm <sup>-1</sup> ]
B( $\lambda,T$ )	Temperature dependent spectral radiance of black body	[W/sr.m <sup>2</sup> .m]

$\bar{b}(\lambda)$ ,	Colour-matching function for blue colour	
Bi	Biot number	[ - ]
Cr	Diffuse reflectance – red colour	[ - ]
Cg	Diffuse reflectance – green colour	[ - ]
Cb	Diffuse reflectance – blue colour	[ - ]
$c_0$	Speed of light in vacuum	[ m/s ]
$c_p$	Specific heat capacity	[ J/kg.K ]
D	Sky luminance according to Perez	[ ]
d	Thickness	[ m ]
$D(\lambda)$	Relative spectral power distribution of D65 illuminant	[ - ]
$D_h$	Diffuse component of global horizontal irradiance	[ W/m <sup>2</sup> ]
$D_{hyd}$	Hydraulic diameter	[ m ]
$\Delta$	Difference, interval	[ - ]
ds	Ratio between element's/source's longest side and distance from the point of observation to considered element	[ - ]
dj	Source jitter	
DC	Daylight coefficient	[ - ]
DIR	Direction	[ ° ]
$DT(\lambda)$	Diffuse transmittance of radiation	[ % ]
E	Illuminance	[ lx ]
$e(\lambda)$	Spectral emissivity	[ - ]
$\varepsilon$	Sky clearness according to Perez	[ - ]
$e_T$	Emissivity	[ - ]
ERC	Externally reflected component of incident light	
FOV	Field of view	
$\Phi_{e,\lambda}$	Spectral irradiance	[ W/nm.m <sup>2</sup> ]
$\Phi_{e,ISO9845}$	Solar spectral irradiance $\Phi_{e,ISO9845}$	[ W/m <sup>2</sup> .μm ]
G	Global horizontal irradiance	[ W/m <sup>2</sup> ]
$\bar{g}(\lambda)$ ,	Colour-matching function for green colour	
$\gamma$	Inclination of building envelope segment	[ ° ]
Gr	Grashof number	[ - ]
H	Haze	[ % ]
h	Heat transfer coefficient	[ W/m <sup>2</sup> .K ]
$h_{Planck}$	Planck constant	[ Js ]
I	Solar irradiance	[ W/m <sup>2</sup> ]
IR <sub>h</sub>	Infrared irradiance	[ W/m <sup>2</sup> ]
IRC	Internally reflected component of incident light	
$K(\lambda)$	Spectral luminous efficacy of monochromatic radiation	[ lm/W.nm ]
$K, K_m$	Luminous efficacy	[ lm/W ]
k	Thermal conductivity	[ W/m.K ]
$k_1$	Frame thickness correction factor	
$k_2$	Soiling correction factor	
$k_B$	Boltzmann constant	[ J/K ]
$k_{gv,i}$	Thermal conductivity of i-th glass pane	[ W/m.K ]
KDS	Daylight factor	[ % ]
L	Luminance	[ lm/sr.m <sup>2</sup> ]
l	Length	[ m ]
$\Lambda$	Thermal conductance	[ W/m <sup>2</sup> .K ]
$\lambda$	Wavelength	[ nm ]
$\Delta\lambda$	Wavelength interval	[ nm ]
MRT	Mean radiant temperature	[ °C ]
$m(X)$	Mean value	
$\mu$	Dynamic viscosity of air	[ N.s/m <sup>2</sup> ]
n	Ratio of direct radiation component	[ - ]

$\nu$	Kinematic viscosity of air	[m <sup>2</sup> /s]
$\eta$	Solar radiation efficacy	[Jm/W]
Ni	Measurement site	
Nm	Calculation site	
Nu	Nusselt number	[-]
p	Air pressure	[Pa]
Pr	Prandtl number	[-]
PMV	Predicted Mean Vote	[-]
PPD	Percentage people dissatisfied	[%]
Q	Energy	[kWh/m <sup>2</sup> .a]
q	Heat flux density	[W/m <sup>2</sup> ]
R <sub>eT</sub> ( $\lambda$ )	Total reflectance of infrared (thermal) radiation	[%]
R <sub>vis,dif</sub> ( $\lambda$ )	Reflection factor	[%]
RH	Relative humidity	[%]
R	Thermal resistance	[m <sup>2</sup> .K/W]
R( $\gamma$ )	Inclination angle dependent thermal resistance	[m <sup>2</sup> .K/W]
r( $\lambda$ )	Spectral reflectance	[-]
$\rho$	Density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\bar{r}(\lambda)$	Colour-matching function for red colour	
Ra	Rayleigh number	[-]
Re	Reynolds number	[-]
Rd	Average photopic reflectance of red, green and blue colours	[-]
Rs	Fraction of light reflected off the first surface in a mirror-like way - specular reflectance	[-]
S( $\lambda$ )	Relative spectral power distribution of standard solar spectrum ISO 9845-1	[-]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
Sr	Surface roughness	[-]
St	Transmitted specularity	(-)
$\Delta S_i$	Area of sky segment	
SC	Directly transmitted component of incident light	
T	Temperature, absolute temperature	[°C], [K]
t	Time	[s]
t( $\lambda$ )	Specular transmissivity	[-]
Td	fraction of light passing all the way through the surface diffusely - diffuse transmissivity	(-)
Ts	Specular transmittance	(-)
t <sub>gv,i</sub>	Thickness of i-th glass pane	[m]
TT( $\lambda$ )	Total transmittance	[%]
TR( $\lambda$ )	Total reflectance	[%]
TRW( $\lambda$ )	Total reflectance on white background	[%]
TRB( $\lambda$ )	Total reflectance on black background	[%]
TT, DT, TR,	Spectral average values of optical properties	[%]
TRW, TRB, A,		
R <sub>eT</sub> , R <sub>vis,dif</sub>		
U	Thermal transmittance	[W/m <sup>2</sup> .K]
V( $\lambda$ )	spectral luminous efficiency for photopic vision defining the standard observer for photometry	[-]
v	Speed of air	[m/s]
v(t)	Time dependent speed of air	[m/s]
x <sub>i</sub>	Sample variable	
h-h	Hemispherical-hemispherical	
n-h	Normal-hemispherical	

h-n	Hemispherical-normal
vis	Luminous properties
sol	Solar properties
UV	Ultraviolet region of electromagnetic radiation spectrum
VIS	Visible region of electromagnetic radiation spectrum
NIR	Near-infrared region of electromagnetic radiation spectrum
IR	Longwave infrared region of electromagnetic radiation spectrum
specular	Specular component of incident radiation
s	Surface
č.t.	Black body
a	Air
k	Channel
o	Outside
i	Inside
m	Mean temperature
mid	Middle
h	Hour interval
povp	Average
setpoint	Thermostat setpoint
a-s	Difference between air and surface
w	Wind
tla	Floor
exp	Experimental value
calc	Calculated value
glob	Global value
dif	Diffuse component of global radiation
dir, n	Direct normal component of global solar radiation
spectro	Spectrometer
cor	Corrected value
z, vz	Zenithal
rač	Calculated value
sim	Simulated value
p	Index
q	Index
r	Index
sum	Sum
gv	Glazing
si	Internal surface
se	External surface
i	Sequential number
ex	External
int	Internal
cv	Convection
c	Convection
r	Radiation
heat	Heating
cool	Cooling
a	Yearly
sg	Solar gain

## 1 UVOD

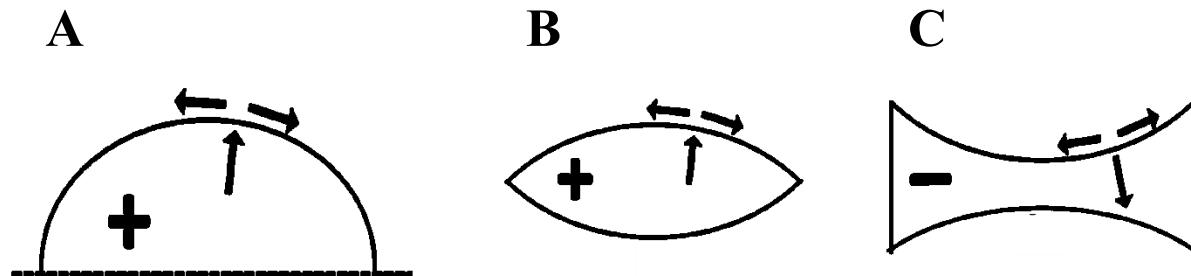
Pnevmatične konstrukcije (pneuma) so ploskovno stabilizirane membranske nosilne konstrukcije pri katerih se zaradi tlačne razlike med prostoroma, ki ju membrana loči, vzpostavi določena oblika v stabilni legi. Membrana mora biti sposobna prenašati določene napetosti oziroma mora imeti določeno natezno trdnost. Tlačna razlika je vzpostavljena preko plina, kapljevine, pene ali sipkega materiala [1], pri čemer je pogoj, da mora biti konstrukcija stalno natezno obremenjena [2]. Pomemben predstavnik pnevmatske arhitekture so zračno podprte stavbe (ZPS), ki jih pri nas poimenujemo tudi napihljive hale ali preprosto baloni. V tujih jezikih najdemo ZPS pod različnimi imeni, v angleščini »air-supported structures«, »air structures«, »air-halls«, »air-houses«, »air-domes« in v nemščini kot »Lufthallen«. V letu 2017 je minilo ravno sto let od prve znane prijave patenta za ZPS [3] in petdeset let od prvega mednarodnega kolokvija (1967) na temo pnevmatskih stavb v Stuttgartu [4], ki ga je organiziralo združenje »International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)«.

Sto let staro iznajdbo zračno podprte stavbe različni avtorji [5] [6] pripisujejo britanskemu inženirju in inovatorju Fredericku W. Lanchesterju. Njegov patent [3] iz leta 1918, obravnava izboljšavo konstrukcije vojaške terenske bolnišnice, skladišč, depojev in stavb sorodne namembnosti. V splošni literaturi ni zaslediti, da je Lanchester le dve leti pozneje prijavil tudi patent za ZPS, ki so namenjene prekrivanju prizorišč za družabne dogodke in sejmišča [7]. Kot piše Forster [6]. Lanchesterjevi izumi niso bili uspešno uresničeni v praksi, domnevno zaradi javnega mnenja in, bolj verjetno, zaradi pomanjkanja ustrezno vzdržljivega materiala.

Razvoj ZPS v Združenih državah Amerike, katerega pionir je nedvomno Walter Bird, naj bi potekal neodvisno, brez poznavanja Lanchesterjevega patentu [2]. Walter Bird je delovanje na področju pnevmatskih konstrukcij začel skupaj z ameriškim vojaškim letalstvom pri razvoju strešne konstrukcije za radarje (ang. »radome«), leta 1946 pa je bil narejen prvi prototip tovrstne konstrukcije. Za njegovo izvedbo je bila uporabljena tkanina iz steklenih vlaken, prevlečena z neoprenom [4]. Leta 1955 je W. Bird ustanovil »Birdair Structures« in začel postavljati tovrstne konstrukcije za civilne namene (prekrivanje teniških igrišč in bazenov). Z Walterjem Birdom je veliko sodeloval tudi ameriški arhitekt Victor Lundy, med drugim tudi kot avtor paviljona programa »Atoms for Peace« v sklopu razstave Ameriške komisije za jedrsko energijo, ki je leta 1960 potovala po srednjameriških in južnoameriških državah. Posebnost te konstrukcije je bil ovoj, sestavljen iz dveh membran z vmesnim zračnim kanalom skupne debeline 1,2 m [5]. Primarni namen druge (notranje) membrane je bil zagotoviti varnost, če se poškoduje zunanjega primarna membrana.

Kmalu potem, ko so se v 50. letih 20. stoletja pojavili prvi primeri ZPS, so v 60. letih vzporedno z uspešno komercializacijo in rabo za prekrivanje skladišč, športnih prizorišč, sejmišč in tudi tovarniških stavb sledile tudi prve tehnične smernice za načrtovanje tovrstnih konstrukcij. Primer je priročnik za načrtovanje tovrstnih stavb z enojnim ali dvojnim ovojem, ki ga je med letoma 1963 in 1968 pripravila korporacija »Hayes International Corporation« [8], v 70. letih pa so se uveljavili že prvi standardi (britanski, nemški in japonski) [9]. ZPS (ang. »insufflated structures«) so le del širše pnevmatske arhitekture, ki je doživela enega svojih viškov na svetovnem sejmu EXPO 1970 v Osaki. Tam je bilo razstavljenih več inovativnih pnevmatskih konstrukcij kot so ameriški paviljon (Davis – Brody Architects in de Harak, Chermayeff & Geismar Designers, inženir je bil David Geiger), ki je bil en prvih primerov s kabli ojačane ZPS; paviljon Fuji Group (Yutaka Murata in inženir Kawaguchi) kot primer napihljene konstrukcije (ang. »inflated structures«) in »Floating Theatre« (Yutaka Murata) kot primer pnevmatske konstrukcije stabilizirane s podtlakom (ang. »aspired structures«). Uporabljena je bila poliestrska tkanina, prevlečena s polivinilkloridnim premazom, s ciljem doseganja majhne teže in

odpornosti proti vremenskim vplivom ob hkratnem zagotavljanju dobre natezne trdnosti. Kot navajajo Pauletti [10] in drugi ([11] [12]), navedeni primeri pomenijo tudi tri osnovne tipologije pnevmatskih struktur [10] (**slika 1.1**).



**Slika 1.1:** Pnevmatske konstrukcije: zračno podprte (A) in napihnjene z zrakom: nadtlak znotraj konstrukcijskega elementa (B) in podtlak znotraj konstrukcijskega elementa (C)

**Figure 1.1:** Pneumatic structures: insuflated (A), inflated with air (B) and aspired structures (C)

Vzporedno s tehnološkim in izvedbenim razvojem pnevmatskih konstrukcij, katerega začetek predstavlja razvoj toplozračnih balonov (pionirski eksperiment je izvedel brazilski duhovnik Bartolomeu de Gusmão leta 1709, prvi toplozračni balon pa brata Montgolfier leta 1783) [10], so potekale tudi najrazličnejše študije in raziskave njihovih lastnosti. Med najbolj prepoznavnimi so tudi raziskave oblike pnevmatskih konstrukcij, katerih pionir je Otto Frei [2]. Njegove študije milnih mehurčkov (t. i. bionika, veda o prenosu izkušenj iz narave v tehnično sfero) so popoln primer prikaza lahkotnosti in breztežnosti pnevmatskih konstrukcij. Tako kot njegov predhodnik Buckminster Fuller [13], je sledil istemu cilju: izboljšati kakovost življenja z maksimalno učinkovitostjo in minimalno rabo materialov in energije [5]. Frei Otto je v svojem delu definiral pneu kot enega naj učinkovitejših nosilnih konstrukcijskih sistemov [2], ki ga je mogoče najti vsepovsod v naravi. Pneu je konstrukcijski sistem sestavljen iz duktelnega ovoja, ki lahko prenaša natezne obremenitve (raven obremenitve je odvisna od sistema), ima notranji (nad)tlak in je obdan z medijem. Sestavlja ga vsebina (plin, kapljevina, žele, granulat,...), ovoj (plinotesen ali pogojno tudi delno propustne za pline) in (obdajajoči) medij. Pneu lahko predstavlja enojno membrano (kapljica), dvojno membrano (mehurček), folijo, mrežo ali drugo [2]. V primeru kapljic in mehurčka površinska napetost kapljevine zagotavlja stabilnost sistema. Leta 1971 je Frei Otto skupaj z Ewaldom Bubnerjem, Kenzom Tangejem in Ovejem Arupom predstavil predlog kupole s premerom 2 km, poimenovan »The Arctic City«, v kateri bi bilo mogoče naseliti 45.000 prebivalcev [5].

V koraku s časom in trendom je bila tudi takratna Fakulteta za arhitekturo in gradbeništvo, Univerze v Ljubljani, kjer je bilo opravljeno diplomsko delo Mirana Debeljaka [14] na temo pnevmatskih konstrukcij in njihove klasifikacije, tudi s pomočjo študije milnih mehurčkov. Opravil ga je pod mentorstvom profesorja Niko Seliškarja in somentorstvom, takrat še asistenta Aleša Krainerja. Kot piše Debeljak so pnevmatske konstrukcije le tiste ploskovno stabilizirane membranske konstrukcije pri katerih je stabilizacijski medij v plinasti obliki. Malo pred tem, leta 1972, je na rimski univerzi »La Sapienza«, takrat še kot študent, danes pa mednarodno priznani arhitekt in profesor Thomas Herzog, opravil doktorsko disertacijo na temo pnevmatskih stavb, štiri leta pozneje pa je izdal tudi knjigo o tovrstni arhitekturi, s pregledom zgodovine in prvih preizkusov. Njen naslov je »Pneumatische

Konstruktionen« [15]. K vsebini knjige [15] sta prispevala svoj delež tudi Gernot Minke in Hans Eggers. V Veliki Britaniji, natančneje v Londonu, je leta 1971 po naročilu institucije »Ministry of Public Building and Works« Cedric Price, eden najvplivnejših in najbolj priznanih britanskih arhitektov, skupaj s sodelavci izdelal študijo o ZPS. Med avtorji študije je bil tudi mednarodno priznani britanski konstruktor Frank Newby, s katerim je C. Price soustanovil »Lightweight Enclosures Unit« [16].

Za razvoj pnevmatskih konstrukcij od prvih zasnov in inovacij do njihove razširjene uporabe v stavbah sta bila prav gotovo ključna dejavnika obstoj in dostopnost ustreznih materialov [10, 17]. Medtem ko je prve napihljive konstrukcije za vojaške namene med drugo svetovno vojno omogočilo odkritje najlona, je bila za omenjeni projekt ameriškega paviljona na svetovni razstavi EXPO 1970 v Osaki na novo razvita tkanina iz steklenih vlaken prekrita s teflonsko fluorokarbonsko smolo (TFE in FEP) [18]. Geigerjeva inovacija zračno podprte konstrukcije strehe omenjenega paviljona je bila zgled številnim poznejšim (na primer v 80. letih 20. stoletja) projektom streh stadionov v Združenih državah Amerike. Popularnost tovrstnih konstrukcij je sicer nekoliko upadla, ker so se večje strehe večkrat zrušile, predvsem zaradi prevelike teže snega in velikih vplivov vetra [19], kot v primeru strehe stadiona »Hubert H. Humphery Metrodome« (1981, Minneapolis, Skidmore, Owings & Merrill; Setter, Leach & Lindstrom ter Geiger-Berger Associates) [18]. Kljub temu se v različnih oblikah podobne konstrukcije izvajajo še danes. Primer iz slovenskega okolja so ZPS slovenskega podjetja DUOL [20].

**Preglednica 1.1:** Pregled tkanin s premazi in brez njih ter folij, namenjenih rabi v stavbah  
**Table 1.1:** Overview of uncoated or coated fabrics and foils for use in building envelopes

Material in struktura tekstilije	Prevleka (+ zaključni sloj)	Prosojnost za vidni del svetlobnega sevanja [%]	Odbojnosc / odpornost na pojav umazanije	Življenska doba [leto]	Obstojnost pri upogibanju
Poliestrska tkanina	PVC prevleka	0–25	Zadostna	10–15	Dobra
Poliestrska tkanina	PVC + akril	0–25	Dobra	<20	Dobra
	PVC + PVF		Zelo dobra		
	PVC + PVDF		Zelo dobra		
	PTFE prevleka	4–22 (30)	Zelo dobra	25–30	Slaba
Tkanina iz steklenih vlaken	Silikonska prevleka	10–20 (30)	Dobra	25–30	Slaba
	Fluorova polimerna prevleka	10	Dobra	15–20	Slaba
	Tkanina iz PTFE enojne niti	<90	Zelo dobra	<25	Zelo dobra
Tkanina iz ETFE preje	THV prevleka	<90		<25	Zelo dobra
Tkanina iz nerjavnih jeklenih vlaken		<95	Dobra	<50	Slaba
Tkanina iz aramidnih vlaken	PVC	–	Slaba	<20	Dobra
Tkanina iz mešanice bombažnih in poliestrskih vlaken		5–10	Slaba	<5	Zelo dobra
PVC folija		<90		15–20	Slaba
Folija na osnovi fluorovega polimera		<96	Zelo dobra	<25	Slaba
ETFE folija:		<96	Zelo dobra	<25	Slaba

Povzeto po [22]

V sodobnem času so v ospredje stopile pnevmatske konstrukcije, kjer je bila primarna nosilna konstrukcija palična ali okvirna konstrukcija, na katero so bile kot sekundarna nosilna konstrukcija montirane z zrakom napihnjene blazine, narejene iz prosojne ETFE folije (etilen tetrafluoroetilen) [21]. ETFE je komercialno poznal že iz 70. let 20. stoletja [21]. V obliki folije za rabo v stavbnem ovoju pa

je doživel razcvet pri uporabi iz ozko-namenskega proizvoda šele leta 2001, po končanju projekta biomov "Eden Project" (2000, Cornwall, UK, Nicholas Grimshaw) [21]. Med svetovno prepoznavnimi stavbami z dvo- ali večslojnimi ETFE blazinami so še: »National Space Centre« (2001, Leicester, Nicholas Grimshaw), »Allianz Arena« (2005, München, Herzog & de Meuron ter ArupSport) in »Water Cube«, Nacionalni plavalni center v Pekingu (2008, PTW Architects). V **preglednici 1.1** je povzet pregled tkanin in folij, ki se v stavbah uporabljam za različne namene.

Kot je videti tudi pri uporabi ETFE folij [23] [24], se skozi celoten razvoj pnevmatskih in tudi bolj specifično ZPS [25] [26] zastavlja vprašanja o domnevnih prednostih in slabostih tovrstnih stavb. Tako kot pri zasteklitvah [27], je tudi pri ultralahkih membranskih konstrukcijah iz tekstilij in folij mogoče na različnih delih spektra elektromagnetcnega valovanja kombinirati optične lastnosti posameznega sloja membrane oziroma ovoja pneva.

Že leta 1967 je na prej omenjenem prvem kolokviju o pnevmatskih strukturah v Stuttgartu [4], kjer so bili med gosti Freia Otta zbrani številni pionirji ZPS, med drugimi Walter Bird, Victor Lundy in Ciedric Price, Nikolaus Laing (nemški inženir, meteorolog in fizik) objavil prispevek z naslovom »The Use of Solar and Sky Radiation for Air Conditioning of Pneumatic Structures«. Prispevek obravnava večslojno membrano z zračnimi komorami pri čemer sta zunanjia in notranja membrana prepustni za sončno sevanje, vmesna premična pa je neprepustna in prevlečena s kovinskim premazom, ki dobro odbija sončno sevanje [4].

John Campbell [25] je v svojem članku »Environmental considerations of lightweight structures« med drugimi vidiki opozoril na problematiko zagotavljanja toplotnega ugodja v ZPS, ter povezano med prepustnostjo za sončno sevanje in toplotnim uporom ovoja z energetsko učinkovitostjo tovrstne stavbe. Izpostavil je tudi potrebo po matematičnih modelih za opis teh dejavnikov. Derek Croome [26] je ZPS izpostavil kot cenovno ugodno gradnjo, preprosto za transport, vendar z visokimi stroški obratovanja (zagotavljanje tlačne razlike in ogrevanje). Kot problem je navedel tudi dnevno osvetljevanje, saj so takratne napovedi o potrebi po zagotavljanju stanovitejših notranjih razmer z vidika toplotnega ugodja in manjše porabe energije za ogrevanje pripeljale do uvedbe debelejših slojev toplotnih izolacij, ki pa žal niso prepuščale sončnega sevanja.

Prikaz raziskovanja čim širše namembnosti ZPS sta tudi objavljeni raziskavi o zračno podprtih rastlinjakih iz leta 1987, kar so objavili S.A.M. Burek, B. Norton in S.D. Probert [28], in o energetski učinkovitosti ZPS, namenjenih bivanju, ki sta jo leta 1990 objavila I. Sanders in S.D. Probert [29].

A. Krainer je zapisal: »Arhitektonski artefakt je vmesnik med naravnim okoljem in človekovim grajenim okoljem, prilagojen človekovemu bivanju in delu« [30]. Podobno je o membranskih konstrukcijah razmišljal tudi Scheuermann [31], ki je zapisal, da pri membranskem ovoju lahko govorimo o vmesniku, s katerim lahko moderiramo in reguliramo vpliv zunanje klime na toplotni in vizualni odziv ovoja ter posledično energetsko učinkovitost z uravnavanjem načina kako ovoj odbija, prepušča ali absorbira različne dele spektra elektromagnetcnega sevanja. Tovrstne konstrukcije navaja tudi kot zelo odzivne na vplive okolja, kar obravnava kot prednost za stavbe s prekinjajočim se vzorcem zasedenosti. Za poglobljeno analizo toplotnih lastnosti membranskih stavb priporoča ločeno obravnavo delovanja v hladnem in vročem podnebju, in sicer tako v zimskih kot poletnih obdobjih.

Prepustnost za vidno svetlobo (in podobno tudi za sončno sevanje) poliestrskih tkanin prevlečenih s PVC, in steklenih tkanin prevlečenih s PTFE, se giblje v območju med 0 in 40 % [22], medtem ko za ETFE prepustnost naraste tudi na več kot 90 % [32] [33]. Pri uporabi ETFE folij je nekaj zadržkov, kot

n.pr.; zaradi bistveno večje prepustnosti svetlobe in sončnega sevanja v primerjavi s tkaninami se stavbe narejene iz (ETFE) folij lahko pregrevajo. Po analogiji z okenskimi stekli je to pripeljalo do predlogov sistemov narejenih iz polimernih folij [34] [35] v kombinaciji z uporabo v preklopnih elektrokromnih [36] [37], termokromnih [38] in termotropnih [39] [40] bolj ali manj transparentnih sklopih. Ti sistemi zagotavljajo modulacijo intenzitete prepuščenega sončnega sevanja skozi sistem na podlagi električnega pulza in/ali povišanja temperature.

Na drugi strani visoka optična prepustnost folij omogoča njihovo uporabo v dvo- ali večslojnih sistemih, pri katerih se hkrati kombinira dve ali več različnih lastnosti. Na primer, folije bi lahko uporabili v kombinaciji z aerogeli [41], saj aerogel ne ogroža pretoka svetlobe kompozitne membrane folija/aerogel/folija. Tovrstni poskusi kompenzacije visoke topotne prehodnosti enojnih ali večslojnih membranskih ovojev niso novi. Že leta 1987 je Huntington obravnaval uporabo prosojnih izolacijskih materialov ali t. i. »Transparent Insulation Materials« (TIM) v membranskih konstrukcijah [42], ter opozoril na stavbo »Lindsay Park« (zdaj športni center Repsol) v mestu Calgary (Kanada) zgrajeno leta 1983. V ovoju te stavbe je bila med zunanjim (18-odstotna prepustnost) in notranjim (90-odstotna prepustnost) membrano vstavljen prosojna topotna izolacija z 20-odstotno prepustnostjo za vidno svetobo. Študija uporabe prosojne izolacije TIM v kombinaciji z ETFE folijami pri pnevmatskih blazinah je bila predstavljena leta 2006 na mednarodni konferenci o adaptivnih stavbnih konstrukcijah v Eindhovnu na Nizozemskem, avtorji pa so bili Lingyun Zhang, Thomas Herzog in Gerd Hauser [43].

Aerogeli na osnovi amorfne silike [44] se že dalj časa obravnavajo kot zelo obetavni materiali v stavbarstvu, saj zagotavljajo najvišji topotni upor pri najmanjši debelini (topotna prevodnost  $\lambda$  se giblje med samo 0,011 in 0,018 W/(m.K) [45] [46]), hkrati pa so visoko prosojni (monolitni aerogel ima prepustnost za svetobo med 84 in 87 %, čisto steklo pa 90 % [47] [48]). Za doseganje še večje topotne izolativnosti je trenutno edina možnost izvedba z izsesavanjem zraka – t. i. vakuumski izolacijski paneli (VIP). TIM vključno z aerogeli, so v 90. letih 20. stoletja podrobno raziskovali v Goetzbergerjevi raziskovalni skupini na »Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE«, v Freiburgu [49]. Med raziskavo v okviru disertacije sta bila komercialno dostopna vsaj dva sistema zasteklitve z dodanim aerogelom, Scoba-lit in Okagel® [41]. Aerogel ima v teh dveh sistemih topotno prevodnost 0,018 W/(m.K), topotna prehodnost zasteklitve pa je za primer s 30 mm aerogela 0,6 W/(m<sup>2</sup>.K) in za primer s 60 mm aerogela 0,30 W/(m<sup>2</sup>.K).

Kljub izjemnim lastnostim zasteklitev z umeščenim monolitnim aerogelom (Airglass AB in Sweden, topotna prehodnost 0,66 W/(m<sup>2</sup>.K), g-faktor 76-80 %) [46] in robustnejšim rešitvam z aerogelimi granulami oziroma zrni [50] [51] [45] ti nimajo ustreznih mehanskih lastnosti za uporabo v pnevmatskih konstrukcijah. V tem pogledu iglana vlaknovina Spaceloft® [52], ki jo proizvaja Aspen Aerogels, katere steklena in poliestrska vlakna so obdana z nanoporoznim silika aerogelom, predstavlja pomemben korak k morebitni uspešni uporabi prosojnih izolacij v pnevmatskih konstrukcijah. Poleg izjemno visokega topotnega upora, ki ga daje osnovna 10 mm debela plast odeje (topotna prevodnost  $\lambda_D$  je enaka 0,015 W/m.K) [53], so njene glavne prednosti podajnost, možnost prilaganja poljubnim, tudi ukrivljenim podlagam, vodooodbojnost in odpornost na pojav gliv in mahov.

## 1.1 Opredelitev problema

Konec leta 2010 je bila v sodelovanju med podjetjema Aerogel CARD, d. o. o., in DUOL, d. o. o., pripravljena rešitev za uvedbo aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® v ZPS, z namenom zmanjšanja transmisijskih topotnih izgub skozi dvojni membranski ovoj. Leta 2011 je bila izvedena pilotna vgradnja večslojnega kompozita v zračno podprt streho športne dvorane v Trondheim-u na Norveškem.

Dana rešitev [54] ni omogočala dnevnega osvetljevanja stavbe. V tem primeru sicer zahteva po dnevnom osvetljevanju ni bila izražena, vendar kot pravi literatura [55] je možnost dnevnega osvetljevanja ena bistvenih prednosti membranskih konstrukcij, pomen naravne svetlobe pa sta poudarila Altomonte [56] in Figuerio s sodelavci [57]. Kljub razmeroma dobri raziskanosti osnovnih tehničnih lastnosti aerogelnih izolacijskih odej [53] in toplotnih lastnosti fasad z aerogelno izolacijo [58], podatki, potrebni za oblikovanje odgovorov na vprašanje o učinkih uvedbe aerogelne odeje Spaceloft® v ultralahke dvojne membranske konstrukcije z vidika dnevne svetlobe in topote, niso bili dostopni. V nasprotju s poliestrskimi tkaninami prevlečenimi s polivinil kloridom o optičnih lastnostih aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® ni bilo dovolj podatkov, podatki o toplotni prehodnosti izoliranega sklopa pa so bili le računsko ocenjeni [59].

Poznejše meritve toplotne prehodnosti na obstoječem neizoliranem primeru ZPS športne dvorane na Brezovici v nočnem času, ko stavba ni bila izpostavljena vplivu sončnega sevanja, ter okoliških stavb (dvorana je na odprtem) in ni bilo dodatnih notranjih virov sevanja (prostor je bil prazen in luči ugasnjene), so pokazale močno nihanje vrednosti toplotne prehodnosti (v območju od  $1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$  do  $2,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) v sorazmerno kratkih časovnih intervalih [60]. Hkrati so ti eksperimentalni podatki pridobljeni na terenu močno v navzkrižju s podatki laboratorijskih meritev, sicer na drugačnem, vendar močno podobnem primeru dvojnega membranskega ovoja z večjo debelino zračnega kanala, ki naj bi (kot kažejo rezultati) imela v nasprotju s pričakovanji višjo toplotno prehodnost [61].

Ti rezultati so nakazali, da je toplotno prehodnost tovrstne konstrukcije zaradi kompleksnosti prenosa toplotne znotraj zračnih kanalov (prisotnosti sevalnih in konvekcijskih tokov), njihovih lastnosti (lastnosti materialov in oblika) ter občutljivosti na spreminjanje robnih pogojev zahtevno določiti. Hkrati je zahtevnost določitve različnih vhodnih podatkov ter robnih pogojev po vplivu na rezultat enakovredne natančnosti različna. Različna pa je tudi možnost upoštevanja v sami metodologiji uveljavljenih računskih metod. Na primer, pričakovati je bilo, da optične in toplotne lastnosti materialov (glede na računske rezultate) bolj vplivajo na toplotne lastnosti kakor fluktuacija gibanja zraka znotraj zračnega kanala med membranama dvojnega membranskega ovoja. Vrednost laboratorijsko pridobljene toplotne prehodnosti je primerljiva z vrednostjo za navadno dvojno zasteklitev  $3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Tako je bila naša naloga, da (i) raziščemo, kakšen je vpliv vgradnje nove različice toplotnoizolacijskega in za svetlogo prepustnega konstrukcijskega sklopa (folija/(za svetlogo prosojna različica aerogelne odeje Spaceloft®) [52]/folija) na optične in toplotne lastnosti dvojnega membranskega ovoja ZPS in (ii) ugotovimo, vpliv, ki ga ima predlagani ovoj na dnevno osvetljevanje [62] ter rabo energije za ogrevanje in hlajenje v obravnavani Duolovi zračno podprtih strukturi.

Poglavitno vprašanje je:

- ali je mogoče z uvedbo aerogelne izolacijske odeje v dvojni ovoj Duolove ZPS izboljšati delovanje in energetsko učinkovitost zračno podprtih stavb v skladu z načeli bioklimatskega načrtovanja [63] [64]

## 1.2 Cilji raziskovalnega dela

- Določiti toplotne in optične lastnosti membranskega dvojnega ovoja brez in z uvedbo aerogelne izolacije.
- Ugotoviti vpliv uvedbe aerogelne izolacijskega sloja na prenos toplotne skozi obravnavane različice konstrukcijskih sklopov.

- Ugotoviti smiselne debeline uvedene aerogelne izolacijske odeje, vključno z zahtevami po dnevni osvetlitvi, ter ob tem preveriti smiselnost uporabe dvojnega ovoja.
- Ugotoviti ali se lahko predogreti zrak v zračnem sloju uporablja za ogrevanje prostora kot podpora aktivnemu ogrevanju ali samostojno, odvisno od kombinacije klimatskih parametrov.
- Raziskati učinek različnih stopenj prosojnosti ovoja na toplotne in vizualne razmere znotraj stavbe ter njegovo energetsko učinkovitost za več različic debeline izolacijskega sloja ter kombinacij klimatskih dejavnikov.
- Ugotoviti primerno prosojnost oziroma razmerje površin prosojnih in neprosojnih delov in vpliv takšnih sprememb ovoja na uravnoteženo porabo energije za ogrevanje in hlajenje za več različic debeline izolacijskega sloja ter kombinacij klimatskih dejavnikov.
- Določiti smernice za načrtovanje lastnosti ovoja ZPS z uvedeno aerogelno izolacijsko odejo.

### 1.3 Hipotezi raziskovalnega dela

- Ali je in v kolikšni meri je možno z uvedbo aerogelne izolacijske plasti izboljšati toplotno ugodje in vizualne razmere v stavbah z zračno podprtим, dvojnim lahkim zunanjim ovojem in
- ali je možno in v koliki meri je možno z uvedbo aerogelne izolacijske plasti zmanjšati količino potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe z zračno podprtим dvojnim, lahkim zunanjim ovojem.

### 1.4 Struktura naloge

Struktura naloge (**slika 1.2**) sledi shemi IMRAD. Razdeljena je na uvod, metodologijo, predstavitev rezultatov, analizo rezultatov in razpravo s sklepi. Poglavlje 1 sestavlja pregled razvoja ZPS, opredelitev problema in struktura naloge. Medtem, ko poglavje o metodah (poglavlje 2) poda podrobne informacije o študijskem primeru stavbe obravnavanih materialih, predpostavkah na katerih temeljita raziskovalno delo ter opis metod in instrumentarija za izvedbo eksperimentalnega in računskega dela, so v poglavju 3 predstavljeni rezultati. Obe poglavji sta smiselnost razdeljeni na eksperimentalni del (tako laboratorijski kot terenski) in ločeno na računski del, ki zajema tudi delo z različnimi računalniškimi orodji. Sinteza rezultatov je opravljena v njihovi analizi skupaj z razpravo v poglavju 4, sklepi pa so predstavljeni v poglavju 5.

Skozi nalogo se prepletata dve poglaviti tematski področji: prvo, dnevno osvetljevanje ZPS [62] (obravnavamo le vidni del sončnega sevanja), in drugo, toplotni tokovi skozi zunanji ovoj ZPS (obravnavajo kondukcije, konvekcije in radiacije v vidnem, bližnjem in oddaljenem IR-spektru). Zračni tokovi v dvojnem ovoju pa so obravnavani do stopnje smiselnosti. Hkrati se v nalogi skušata ti dve temi (dnevna svetlobe in energijska učinkovitost), povezati z uporabo aerogelnih plasti, ki zahtevajo spremembo iz prezračevanega v neprezračevani kanal. Na vseh treh ravneh opazovanja: mikro (material), mezo (ovoj) in makro (stavba) so analizirani elementi ovoja, procesi v njih (prehod svetlobe in toplotne) in na koncu tudi posledice oziroma rezultati teh procesov. Za obravnavo dnevne osvetljenosti in rabe energije za ogrevanje in hlajenje je bilo izbrano lokalno podnebje kjer stoji obravnavana stavba, podan pa je tudi komentar k obravnavi tovrstne konstrukcije z aerogelno odejo v drugih ekstremnih razmerah.

## **Uvedba aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® v ovoj zračno podprtih konstrukcij**

### **1. Uvod**

### **2. Metodologija**

Predstavitev študijskega primera stavbe, izbora materialov ter različic konstrukcijskega sklopa zračno podprtega dvojnega membranskega ovoja

#### **Prehod svetlobe**

Eksperimentalne metode določitve optičnih lastnosti materialov in konst. sklopov ter dnevne osvetljensoti

Računske metode določitve optičnih lastnosti in simulacije dnevne osvetljenosti

#### **Prehod toplote**

Eksperimentalne metode določitev toplotnih lastnosti materialov in okoljskih parametrov

Računske metode določitve toplotnih lastnosti materialov in konstrukcijskih sklopov

### **Raba energije za ogrevanje in hlajenje**

Metode meritev okoljskih parametrov in eksperimentalne določitve toplotnega odziva stavbe

Metoda raziskave rabe energije za ogrevanje in hlajenje stavbe na podlagi računskih simulacij

### **3. Rezultati**

#### **Prehod svetlobe**

Optične lastnosti materialov in konstrukcijskih sklopov

Dnevna osvetljenost stavbe za več različic konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja

#### **Prehod toplote**

Toplotni odziv konstrukcijskega sklopa

Toplotne lastnosti materialov in konstrukcijskih sklopov

### **Raba energije za ogrevanje in hlajenje**

Toplotni odziv stavbe

Raba energije za ogrevanje in hlajenje stavbe za več različic dvojnega membranskega ovoja

### **4. Analiza in diskusija rezultatov**

### **5. Zaključki**

### **Viri**

**Slika 1.2:** Shema strukture vsebine disertacije

**Figure 1.2:** The schematic representation of the dissertation content structure

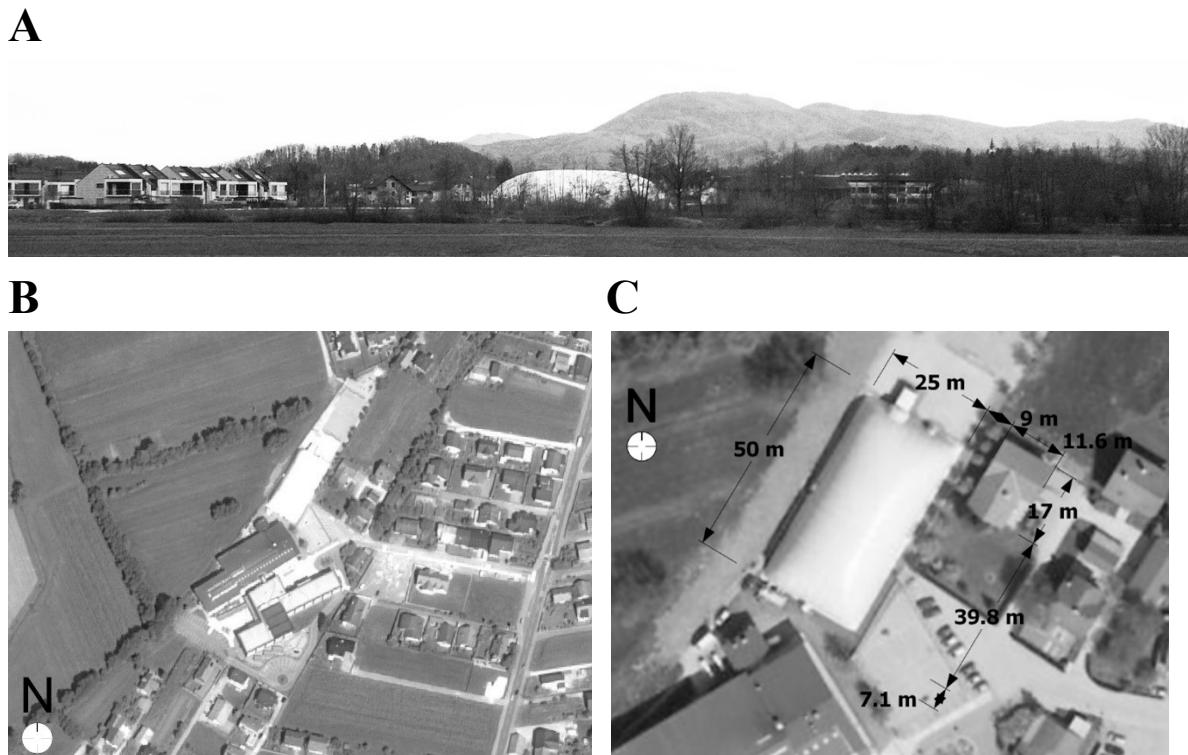
## 2 METODOLOGIJA

### 2.1 Predstavitev študijskega primera stavbe, izbora materialov ter različic konstrukcijskega sklopa zračno podprtega dvojnega membranskega ovoja

#### 2.1.1 Predstavitev Športne dvorane Brezovica

##### 2.1.1.1 Zemljepisna lega in geometrija stavbe

Športna dvorana Brezovica (ŠDB) (slika 2.1.1.1) se nahaja približno 9 km JZ od središča mesta Ljubljana ( $46,01^{\circ}$  S,  $14,41^{\circ}$  V), na ravnom območju med avtocestnim odsekom Dolgi most - Vrhnika ter železniško progo Ljubljana - Koper na nadmorski višini 297 m. Stavba je približno 50,0 m dolga, 25,0 m široka in 11,0 m visoka [65] [66]. Površina zračno podprtga ovoja ŠDB, ki pokriva  $1250\text{ m}^2$  velik tloris dvorane, meri približno  $1875\text{ m}^2$ , njen volumen pa je  $9075\text{ m}^3$ . Faktor oblike, definiran kot razmerje med površino zunanjega ovoja stavbe in (ogrevanim) volumnom, znaša  $0,34/\text{m}$ , kar pomeni, da je geometrija stavbe kompaktna in posledično tako z energetskega stališča ugodna. Glavna os stavbe (J-JZ) - (S-SV) je zasukana  $31^{\circ}$  od severa v smeri urnega kazalca. Dvoplastni zračno podprti ovoj ŠDB opisuje sinklastična ploskev, napeta čez tloris pravokotne oblike in tako predstavlja eno izmed dveh osnovnih oblik ZPS.



**Slika 2.1.1.1:** Pogled iz zraka na ŠDB (A), ortografski posnetek njene bližnje (B) in neposredne (C) okolice. (B) in (C) povzeto po [67]

**Figure 2.1.1.1:** Arial view of the air-supported sports hall Brezovica (A), orthographic shot of its immediate (B) and broader surroundings. (B) and (C) after [67]

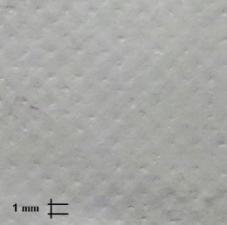
### 2.1.1.2 Materiali in geometrija ovoja

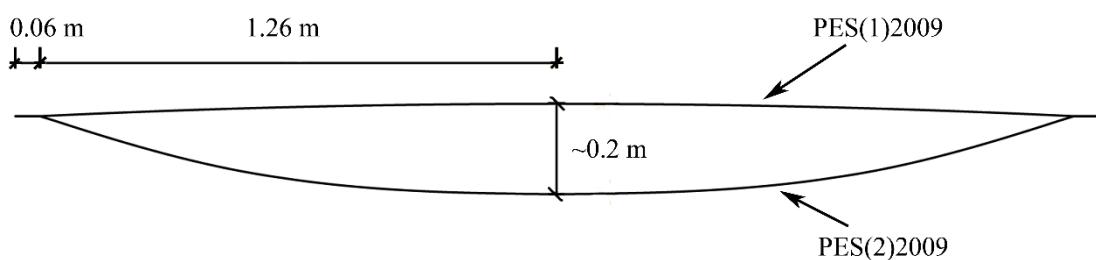
Dvojni zračno podprt ovoj stavbe je sestavljen iz medsebojno zvarjenih cevastih segmentov širokih 2,58 m, ki jih tvorita zunanja in notranja membrana. Membrani proizvajalca Serge Ferrari (Italija) sta poliestrske tkanini, prevlečeni s PVC in PVDF prevleko [68], in se razlikujeta v debelini (**preglednica 2.1.1.1**). Karakteristični prerez dvojnega ovoja je prikazan na **sliki 2.1.1.2**. Maksimalna razdalja med zunanjim in notranjim membranama je približno 20 cm [69]. Zračni kanali cevastih segmentov v obliki lokov so na dnu med seboj povezani. Površina prečnega prereza segmenta, širokega približno 2,52 m je ocenjena na povprečno vrednost 0,39 m<sup>2</sup>.

**Preglednica 2.1.1.1:** Pregled vzorcev materialov obstoječega konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB, odvzetih na terenu

**Table 2.1.1.1:** Overview of materials acquired from the existing air-supported double membrane envelope constructional complex of the sports hall Brezovica

Proizvajalec	Akrоним, komentar, slikovni prikaz in diagramski prikaz		Opis
Serge Ferrari, Italija	PES(1)2009z PES(1)2009n	Stranica z proti nebu Stranica n proti igrišču	Zunanja folija v dvojnem membranskem ovoju obstoječe ŠDB  Tkana vlaknovina iz poliestrskih (PES) vlaken s PVC (polivinil klorid) in PVDF (poliviniliden fluorid) prevleko na obeh stranicah vzorca  Debelina vzorca: 0,74 mm  Namens uporabe: nosilna konstrukcija (NK), hidroizolacija (HI), zaščita nosilne konstrukcije in uporabnika pred UV sevanjem (SEV)
Serge Ferrari, Italija	PES(2)2009z PES(2)2009n	Stranica z proti nebu Stranica n proti igrišču	Notranja folija v dvojnem membranskem ovoju obstoječe ŠDB  Tkana vlaknovina iz poliestrskih (PES) vlaken s PVC (polivinil klorid) in PVDF (poliviniliden fluorid) prevleko na obeh stranicah vzorca  Debelina vzorca: 0,43 mm  Namens uporabe: zaščitna konstrukcija toplotne izolacije (ZKTI), sekundarna hidroizolacija (SEK HI), preprečevanje kondenzacije

			
-	Zračni kanal		Sloj zraka Namen uporabe: toplotna izolacija (TI)
			.



**Slika 2.1.1.2:** Prečni prerez cevastega segmenta dvojnega membranskega ovoja ŠDB  
**Figure 2.1.1.2:** Cross section of the tubular double membrane envelope segment of the air-supported dome Brezovica

### 2.1.1.3 Sistem dovajanja zraka in sistem ogrevanja

ZPS niso popolnoma tesne. Za zagotavljanje potrebne razlike med notranjim in zunanjim zračnim tlakom je nujno stalno dovajanje zraka v stavbo. Ventilator z volumsko kapaciteto vpihovanja zraka 20000 m<sup>3</sup>/h je nameščen v strojnici poleg ŠDB. Na notranji strani stavbe je dovedeni zračni tok s posebno šobo razdeljen tako, da bistveni delež vstopi v notranjost stavbe, manjši (prerez dovodne cevi v zračni kanal približno 1 % glavne dovodne cevi) pa v zračni kanal med membranama dvojnega ovoja. Sistem ogrevanja je pri ŠDB toplo-zračni in vključuje plinski gorilnik (Nominalna moč 395,3 kW, kar predstavlja inštalirano moč 316,2 W/m<sup>2</sup> športne dvorane, proizvedeni toplotni tok 348,8 kW, toplotni izkoristek 88,3 %) [70], ki je povezan s sistemom dovajanja zraka v stavbo.

### 2.1.1.4 Neposredna okolica stavbe

V neposredni bližini obravnavane stavbe se na jugozahodni strani nahaja Osnovna šola Brezovica (skrajni vogal oddaljen približno 7 m od J-JZ stranice dvorane) na jugovzhodni strani pa samostojna stanovanjska hiša (oddaljena približno 9 m in vzporedna z V-JV stranico) (slika 2.1.1.1). Poleg stanovanjske hiše na J-JZ strani raste tudi nekaj iglavcev. Na severni in zahodni strani ni umetnih ovir. Tla v okolini obravnavane dvorane prekrivajo asfalt, prod, oziroma pesek in travnate površine. Privzeta vrednost albeda okolice je bila 0,20.

## 2.1.2 Predlog novega konstrukcijskega sklopa zračno podprtrega dvojnega membranskega ovoja

Aerogelna izolacijska odeja Spaceloft® [52] je večnamenski izolacijski produkt, sestavljen iz osnovne večslojne iglane vlaknovine, aerogela, ki obdaja vlakna, in dodatkov. Aerogel na osnovi amorfne silike

( $\text{SiO}_2$ ), katerega pripravo in lastnosti je prvi objavil Kistler že leta 1932 [44] [71], v primeru odeje Spaceloft® ni proizведен ločeno od preostalih komponent, temveč je vlaknovina vključena v postopek sol-gel [72]. Nano-porozna struktura (pore so velike nekaj 10 nm [44]) daje aerogelu nekatere izjemne fizikalne lastnosti, kot na primer najnižjo toplotno prevodnost med izolacijskimi proizvodi, ki ne vključujejo vakuumskih tehnologij. Mehanske, toplotne in optične lastnosti celotne izolacijske odeje Spaceloft® niso odvisne le od lastnosti aerogela ampak tudi od lastnosti vlaknovine. [73] [74] [75]. Pri odeji Spaceloft® so vlakna mešana, uporabljena pa so tako poliestrska kot steklena vlakna [52]. Spaceloft® ima od leta 2012 pridobljeno evropsko tehnično soglasje [53].

**Preglednica 2.1.2.1:** Pregled vzorcev materialov za novi predlagani konstrukcijski sklop dvojnega membranskega ovoja ŠDB

**Table 2.1.2.1:** Overview of materials included in the new proposed air-supported double membrane envelope constructional complex of the sports hall Brezovica

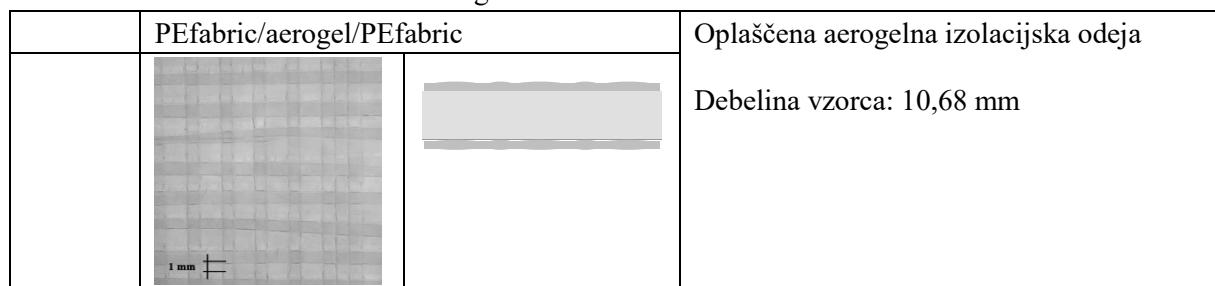
Proizvajalec	Akrоним, komentar, slikovni prikaz in diagramski prikaz		Opis
Vector Foiltec Texlon®	ETFE	Obe stranici enaki	<p>Ekstrudirani tanek film izdelan iz fluoroplastike ETFE (eten tetrafluoroetilen)</p> <p>Debelina vzorca: 0,30 mm</p> <p>Namen uporabe: nosilna konstrukcija (NK), nosilna konstrukcija toplotne izolacije (NK TI), hidroizolacija (HI), zaščita pred UV sevanjem (SEV)</p>
Lenzing	PEfabric	Obe stranici enaki	<p>Polietilenska (PE) tkanina</p> <p>Debelina vzorca: 0,34 mm</p> <p>Namen uporabe: zaščita toplotne izolacije (ZK TI), terciarna toplotna izolacija (nižja emitivnost IR) (TER TI)</p>
Aspen Aerogels Spaceloft®	aerogel		<p>Iglana vlaknovina, proizvedena iz steklenih in poliestrskih vlaken ter areogela iz amorfne silike</p> <p>Debelina vzorca: 10,00 mm</p> <p>Namen uporabe: primarna prosojna toplotna izolacija (TI)</p>
-	Zračni kanal		<p>Sloj zraka</p> <p>Namen uporabe: sekundarna toplotna izolacija (SEK TI)</p>

Aerogel, ki obdaja vlakna in aerogel, ki je ujet v matrici med vlakni je krhek material, ki se kruši pri rokovovanju z odejami. Slednje pri delu s temi materiali zahteva ustrezno zaščitno opremo in delovne

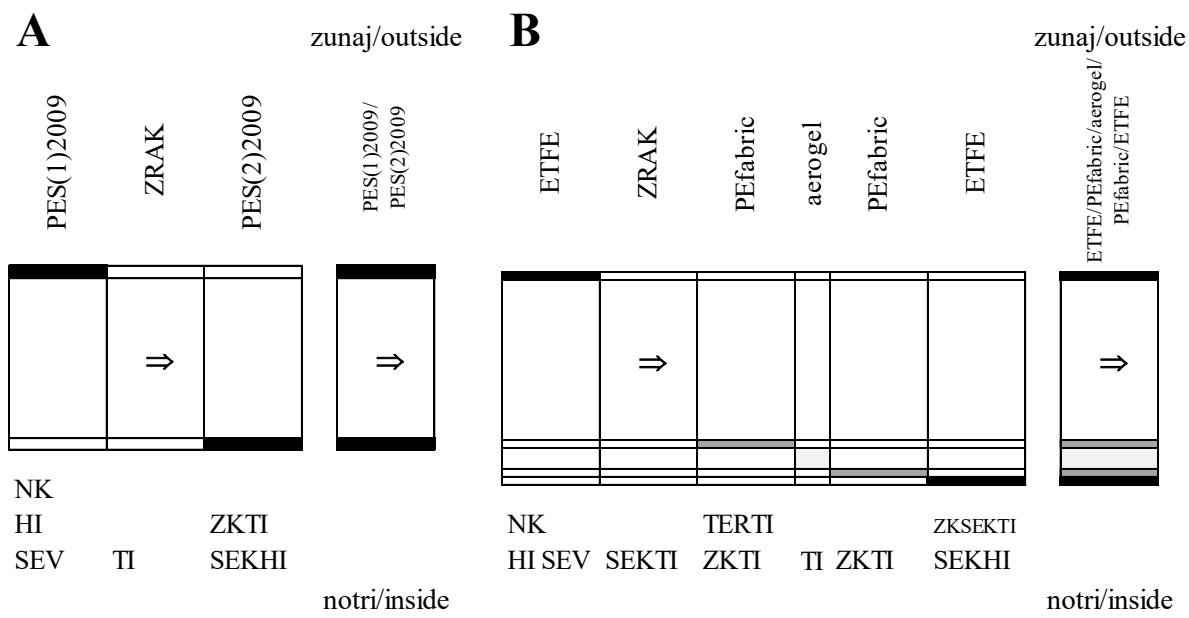
pogoje. V izogib neprijetnostim kot tudi potencialni zdravstveni nevarnosti je bilo predvideno oplaščenje aerogelne odeje s prosojno tkanino iz polietilenskih vlaken [76] (PEfabric) (**preglednica 2.1.2.2**). Drugo namembnost aplikacije in uporabo druge različice aerogelne odeje (Pyrogel<sup>®</sup>) istega proizvajalca so predhodno objavili tudi drugi avtorji [75].

**Preglednica 2.1.2.2:** Predlog izolacijskega sklopa PEfabric/aerogel/PEfabric

**Table 2.1.2.2:** Proposal of the insulation constructional complex  
PEfabric/aerogel/PEfabric



Za sestavo končnega predloga novega konstrukcijskega sklopa je bila že na začetku raziskave predvidena uporaba folije ETFE [21], prvenstveno zaradi tega, ker ima visoko prepustnost za dnevno svetlubo. Na podlagi vizualne ocene je bilo predvideno, da je prepustnost aerogelne odeje Spaceloft<sup>®</sup> majhna in da je zato potrebno s PVC prevlečeni poliestrski tkanini PES(1)2009 in PES(2)2009 zamenjati s prozorno ETFE-folijo, če se želi ohraniti možnost dnevnega osvetljevanja podobne ali celo boljše kakovosti in intenzitete kot pri obstoječi različici ZPS.



**Slika 2.1.2.1:** Funkcionalna analiza obstoječega (A) in novega predlaganega (B) konstrukcijskega sklopa (glej **preglednici 2.1.1.1** in **2.1.2.1** in seznam kratic)

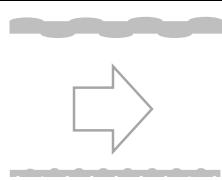
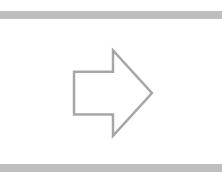
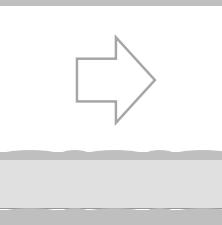
**Figure 2.1.2.1:** Functional analysis of the existing (A) and newly proposed (B) constructional complex (see **Tables 2.1.1.1** in **2.1.2.1** and list of abbreviations)

Na **sliki 2.1.2.1** so prikazane funkcije, ki jih opravlja posamezen sloj vsake od različic konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja. Sklop ETFE/ETFE ni posebej prikazan, saj je posredno vključen

na **sliki 2.1.2.1 B**. Iz te slike je mogoče tudi razbrati, da je predvidena uvedba aerogelne plasti v membranski sklop ni funkcionalno enoplasten, temveč, kot se izkaže v nadaljevanju vključuje poleg izolacijske aerogelne odeje (TI) in zraka v kanalu (SEK TI) tudi zmanjšanje prenosa toplote na račun optičnih lastnosti PEfabric (notranja stranica zračnega kanala) na dolgovalovnem infrardečem območju sevanja (TER TI).

**Preglednica 2.1.2.3:** Obravnavni konstrukcijski sklopi dvojnega membranskega ovoja ŠDB

**Table 2.1.2.3:** Overview of the studied sports hall Brezovica double membrane envelope constructional complex versions

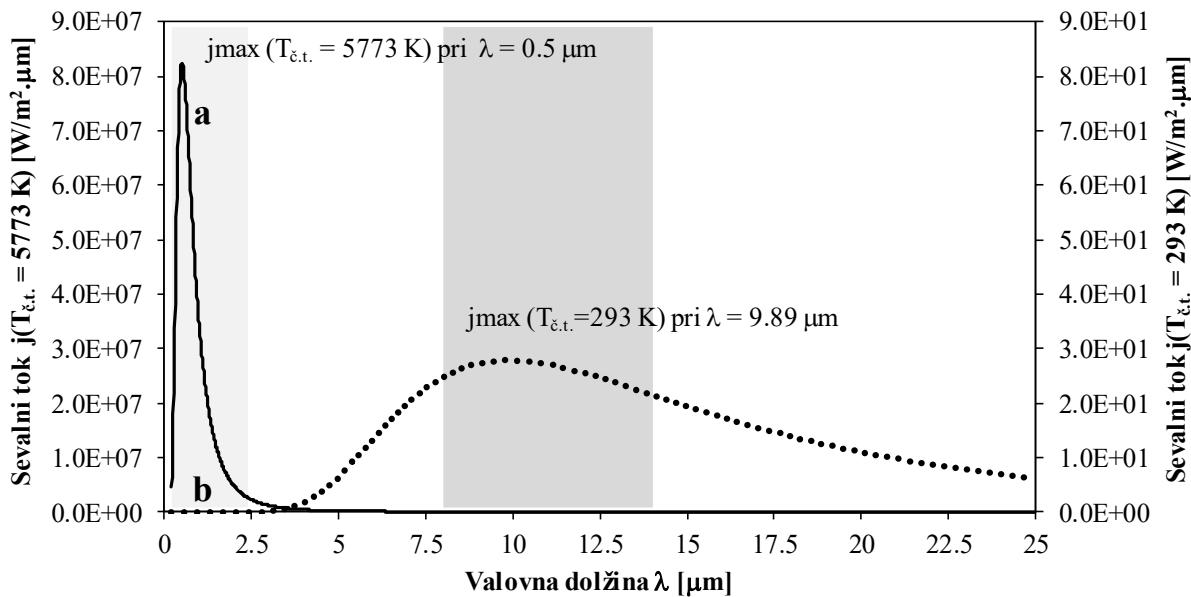
Ime	Akronim, komentar in shematični prikaz	Opis
Sklop I	PES(1)2009z/PES(2)2009z	Debelina sklopa: 201.17 mm 
Sklop II	ETFE/ETFE	Debelina sklopa: 200,60 mm 
Sklop III	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	Debelina sklopa: 211.28 mm 

V **preglednici 2.1.2.3** so podani različni konstrukcijski sklopi dvojnega membranskega ovoja, ki zajemajo izhodiščni primer konstrukcijskega sklopa ŠDB PES(1)2009z/PES(2)2009z; ETFE/ETFE, kar predstavlja strukturo večine konstrukcij z napihnjenimi blazinami, in novi predlagani sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE z uvedeno aerogelno odejo Spaceloft®.

## 2.2 Materiali, meritve optičnih lastnosti, meritve hitrosti in temperature zraka v dvojnem membranskem zračno podprtrem ovoju ter terenske meritve dnevne osvetljenosti in toplotnega odziva vzorčne zračno podprte stavbe

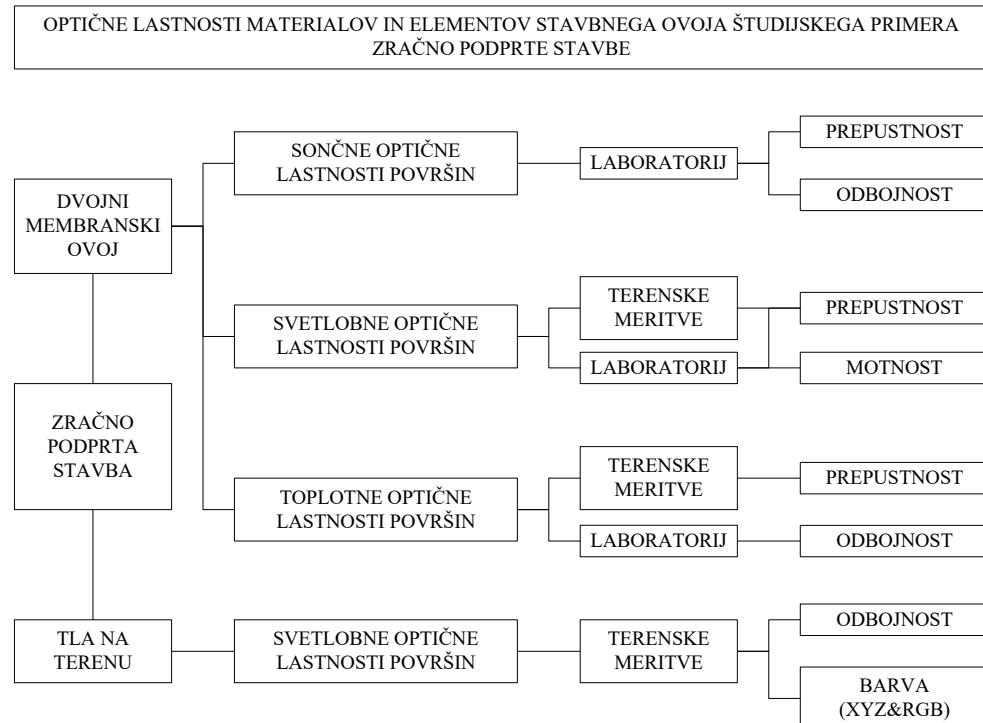
### 2.2.1 Optične lastnosti dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica v sončnem in toplotnem spektru elektromagnetnega valovanja

Če privzamemo, da sonce seva kot idealno črno telo s temperaturo približno 5770 K, potem s pomočjo Planckovega zakona lahko ocenimo, da na intervalu med 0,2 μm in 2,5 μm izseva približno 96 % energije glede na celotno sevalno območje med 0,2 μm in 25 μm [77]. Hkrati, ob uporabi istega zakona,



**Slika 2.2.1.1:** Spektralna porazdelitev gostote sevalnega toka črnega telesa pri temperaturi površine 5773 K (krivulja a, leva ordinata) in 293 K (krivulja b, desna ordinata) v valovnem območju od 0,2 μm in do 25 μm

**Figure 2.2.1.1:** Spectral distribution of radiation flux density of black body at temperature of surface 5773 K (curve a, left ordinate) and 293 K (curve b, right ordinate) in spectral region from 0,2 μm to 25 μm



**Slika 2.2.1.2:** Shema strukture raziskave optičnih lastnosti vzorcev posameznih materialov in sklopa dvojnega membranskega ovoja in tal ŠDB

**Figure 2.2.1.2:** Schematic representation of the individual materials', double membrane envelope constructional complexes' and indoor floor's optical properties research

ugotovimo, da je razmerje med količino izsevane energije črnega telesa pri temperaturi 293 K v valovnem območju Zemljinega atmosferskega okna (jasno nebo je prepustno za dolgovalovno infrardeče sevanje od 8 μm do 13 μm [78]) ter količino izsevane energije v valovnem območju od 0,2 μm in 25 μm pri enaki temperaturi enako približno 45 %. **Slika 2.2.1.1** prikazuje spektralni porazdelitvi gostote sevalnega toka črnega telesa pri absolutni temperaturi njegove površine 5773 K (krivulja a, leva ordinata) in 273 K (krivulja b, desna ordinata). Odziv stavbe (za podroben opis glej [78]) pri ultralahkih prosojnih konstrukcijah, uravnavamo z optičnimi lastnostmi njihovega ovoja.

Pri pnevmatskih stavbah z dvojnim prosojnim ovojem je, podobno kot pri sodobnih stavbah z dvojno zastekljenimi fasadami z zračnim kanalom, izbor optičnih lastnosti prosojnega ovoja (tudi posameznih slojev) v skladu s klimatskimi razmerami ključnega pomena za uspešno načrtovanje udobnega bivalnega okolja v stavbi [79] in njeno energetsko učinkovitost [80][23]. Kot je bilo omenjeno že v uvodu, se ZPS uporablajo tudi za poljedelstvo, na primer za rastlinjake [28]. Pomen optičnih lastnosti materialov za prekrivanje rastlinjakov so obsežno predstavili med drugimi Papadakis in sodelavci [81], tudi skozi vidik spektralne selektivnosti. Pomen slednje zahteve in ustreznega oblikovanja za potrebe elementov stavbnega ovoja, so nazorno predstavili Orel in sodelavci [82].

**Slika 2.2.1.2** prikazuje raziskave optičnih lastnosti, ki so služile za primerjalno analizo učinka uvedbe aerogelne odeje Spaceloft® v ovoj ZPS z obstoječo različico in napoved dnevne osvetljenosti ter toplotnega odziva ZPS z dodatno izoliranim dvojnim membranskim ovojem. V **preglednici 2.2.1.1** pa je podan pregled opravljenih meritov.

**Preglednica 2.2.1.1:** Instrumenti za merjenje optičnih lastnosti vzorcev tekstilij, folij, aerogelne odeje in površin v ŠDB

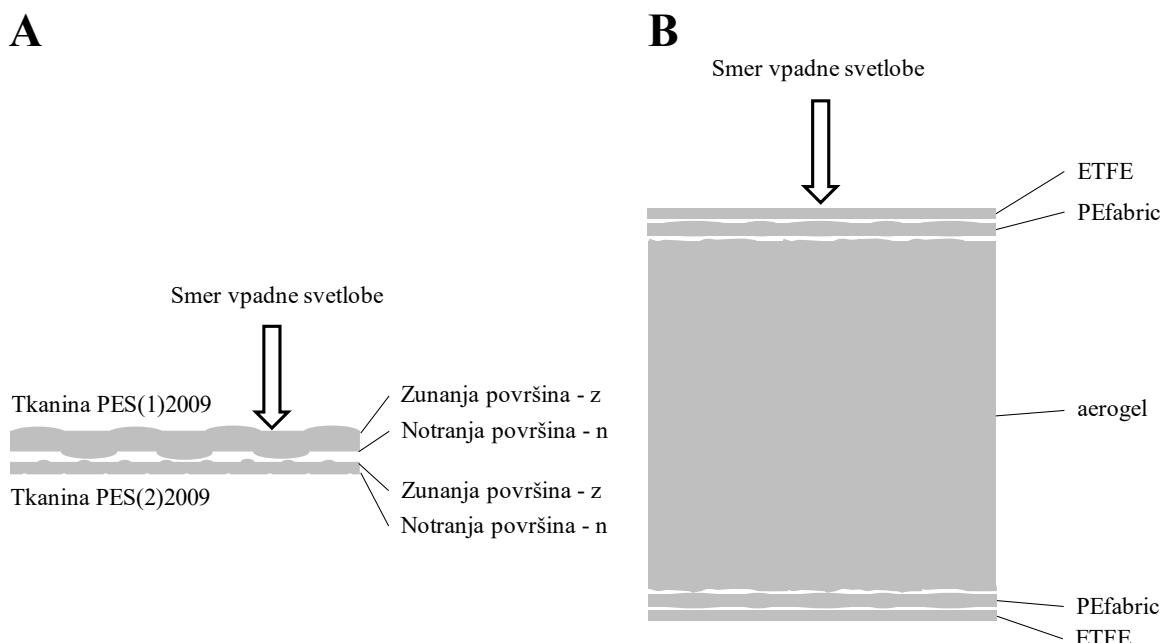
**Table 2.2.1.1:** List of instruments used in the research of optical properties of the fabrics, foils, aerogel blanket and surfaces inside the air-supported structure at Brezovica

Inštrument	Tip meritve	Oznaka
Perkin Elmer Lambda 950	Meritev totalne in difuzne spektralne normalne-hemisferične prepustnosti na vidnem delu sončnega spektra	$TT_{vis,n-h}(\lambda)$ [%] $DT_{vis,n-h}(\lambda)$ [%]
Perkin Elmer Lambda 950	Meritev totalne spektralne normalne-hemisferične prepustnosti na celotnem delu sončnega spektra	$TT_{sol}(\lambda)$ [%]
Perkin Elmer Lambda 950	Meritev totalne spektralne usmerjene-hemisferične odbojnosti na celotnem sončnem spektru – bela (W) in črna (B) podlaga	$TRW_{sol}(\lambda)$ [%] $TRB_{sol}(\lambda)$ [%]
StellarNet Black Comet	Meritev totalne spektralne hemisferične-hemisferične prepustnosti na vidnem delu sončnega spektra	$TT_{vis,h-h}(\lambda)$ [%]
Bruker Optics IFS 66/S FT-IR	Meritev odbojnosti na območju dolgovalovnega infrardečega sevanja za določitev emitivnosti	$R_{eT}(\lambda)$ [%]
Testo 881-3	Določitev temperature površine	$T_s$ [°C]
StellarNet Black Comet	Meritev odbojnognega faktorja tal	$R_{vis,dif}(\lambda)$ [%]

### 2.2.1.1 Meritev optičnih lastnosti tekstilij, folij in različic konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB opravljene v laboratoriju

Velikost vzorcev je bila praviloma 5 cm x 5 cm, le pri vzorcih, ki so vključevali aerogelno odejo, je bil uporabljen tudi lesen okvir za zagotovitev vzporednosti stranic. Velikost teh vzorcev je bila 4,5 cm x

4,5 cm. Večslojni vzorci so bili pripravljeni tako, da so se vsi sloji (**preglednici 2.1.1.1 in 2.1.2.1**) zložili drug vrh drugega v predpisanim zaporedju, kot je prikazano na **sliki 2.2.1.3**. Pri pripravi vzorcev je bilo treba zagotoviti čim bolj ravno površino, da se je ohranil predvideni kot vpadne svetlobe glede na površino (prepustnost  $0^\circ$ , odbojnost  $8^\circ$ ). Vzorci so bili pred vsako meritvijo vstavljeni v komoro spektrometra in dodatno pritrjeni ob steno ohišja integracijske krogle s čimer je bil zagotovljen dober stik med vzorcem in ohišjem integracijske krogle. Velikost vzorcev je bila glede na smer vpadne svetlobe dovolj velika, da je popolnoma prekrila odprtino integracijske krogle s premerom 2 cm v obeh primerih meritev. Pri meritvah prepustnosti je bil vzorec vstavljen med vir sevanja in integracijsko kroglo, pri meritvah odbojnosti pa za integracijsko kroglo v zadnji nosilec vzorca. V zadnjem primeru je bila za vzorcem črna komora (»light trap«). V standardu navedene nepravilnosti [83] so prisotne zaradi narave materiala, namreč na folijah so praske neizogibne.

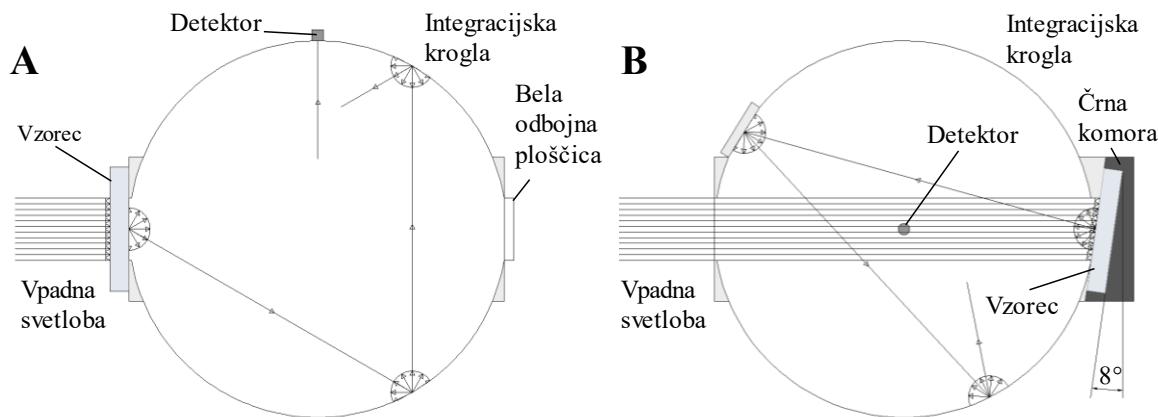


**Slika 2.2.1.3:** Orientacija vzorcev (**preglednici 2.1.1.1 in 2.1.2.1**) glede na vpadni snop svetlobe med meritvami optičnih lastnosti membran (na sliki sta prikazana vzorci obstoječega konstrukcijskega sklopa PES(1)2009/PES(2)2009 (A) in predloga novega konstrukcijskega sklopa, izoliranega z aerogelno odejo ETFE/PEfabric/SL/PEfabric/ETFE (B)). Povzeto po [62]

**Figure 2.2.1.3:** Orientation of the samples (**Tables 2.1.1.1 and 2.1.2.1**) with respect to the incident beam of light during the measurements of optical properties (In the Figure the existing PES(1)2009z/PES(2)2009z and the newly proposed version of the double membrane envelope ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE constructional complex are shown). After [62]

UV-Vis spektri tkanin, folij ter celovitih konstrukcijskih sklopov (**preglednice 2.1.1.1, 2.1.2.1 in 2.1.2.3**) so bili posneti s pomočjo Perkin Elmer Lambda 950 UV-Vis spektrometra opremljenega z integracijsko sfero (premer 150 mm) na Kemijskem Inštitutu v Ljubljani. Vzorci tkanin, folij in kompozitnih membran dimenzij 4,5 cm x 4,5 cm so bili vstavljeni v komoro spektrometra in spektri totalne  $TT_{vis,n-h}(\lambda)$  in difuzne normalne-hemisferične prepustnosti  $DT_{vis,n-h}(\lambda)$  (v koraku 5 nm od 380 nm do 780 nm), totalne normalne-hemisferične prepustnosti  $TT_{sol,n-h}(\lambda)$  (v koraku 10 nm od 300 nm do 2500

nm) ter totalne usmerjene-hemisferične odbojnosti  $TR_{sol,n-h}(\lambda)$  (v koraku 10 nm od 300 nm do 2500 nm) pomerjeni v atmosferi laboratorija (**slika 2.2.1.4**). Motnost (H), definirana kot razmerje (DT/TT v %) difuzne (DT) in totalne prepustnosti (TT), je bila izračunana prav tako na območju od 380 nm do 780 nm po postopku B podanem v standardu ASTM D1003 [83], ki predvideva usmerjeno vpadno svetlobo in hemisferično opazovanje. Meritve in izračuni so bolj podrobno opisani v literaturi, kot n.pr. [84]. Odbojnost je bila pomerjena (**slika 2.2.1.4 B**) tako na črni  $TRB(\lambda)$  kot na beli podlagi  $TRW(\lambda)$ .



**Slika 2.2.1.4:** Shematski prikaz meritev optičnih lastnosti s spektrometrom Perkin Elmer Lambda 950: meritve prepustnosti (A) in meritve odbojnosti (B)

**Figure 2.2.1.4:** Schematic representation of the optical properties' measurements conducted with Perkin Elmer Lambda 950: transmittance measurements (A) and reflectance measurements (B)

Naknadno je bila opravljena kontrola metode, ki smo jo uporabili za pripravo vzorcev dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa in za izvedbo meritev optičnih lastnosti v vidnem delu sončnega spektra med 380 in 780 nm. V namen kontrole je bila uporabljena enačba (1), ki velja za spektralne optične lastnosti izražene z enostavnim razmerjem intenzitete prepuščene in referenčne svetlobe [-] pri posamezni valovni dolžini.  $T_1$  in  $T_2$  predstavlja spektralni prepustnosti [-],  $R_1$  in  $R_2$  pa spektralni odbojnosti [-] posameznega sloja dvojne membrane.

$$TT = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \quad (1)$$

Totalne prepustnosti ( $TT_{vis}$  [%]) in odbojnosti ( $TR_{vis}$  [%]) vidne svetlobe vseh vzorcev so bile pridobljene z integracijo (Riemannovo vsoto) pripadajočih spektralnih vrednosti ( $TT(\lambda)$ ,  $TR(\lambda)$ ) z uporabo (2) in (3):

$$TT_{vis} = \frac{\sum_{380nm}^{780nm} TT(\lambda) D(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380nm}^{780nm} D(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2)$$

$$TR_{vis} = \frac{\sum_{380nm}^{780nm} TR(\lambda) D(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380nm}^{780nm} D(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (3)$$

V enačbah  $TT(\lambda)$  in  $TR(\lambda)$  pomenita spektralno prepustnost in odbojnost,  $D(\lambda)$  [-] relativno spektralno porazdelitev moči vira svetlobe D65,  $V(\lambda)$  [-] funkcijo relativne barvne občutljivosti človeškega očesa

za fotopičen vid CIE standardnega opazovalca po definiciji iz leta 1931 [85] in  $\Delta\lambda$  [nm] valovni interval. Pri pripravi spektralno povprečnih vrednosti, ki jih avtomatsko izračuna računalniški program za upravljanje spektrometra, je bil uporabljen CIE standardni vir svetlobe tipa A.

Za obravnavo spektrov sončnega sevanja v povezavi s toplotnimi dobitki in energetsko učinkovitostjo so bile poleg totalne prepustnosti  $TT_{sol}$  [%] (4) in odbojnosti  $TR_{sol}$  [%] (5) sončnega spektra pridobljene tudi spektralno povprečne vrednosti v območjih ultravijoličnega sevanja (UV, od 300 nm do 380 nm) (6) (7), vidnega sevanja (VIS, od 380 nm do 780 nm) (8) (9) ter kratkovalovnega infrardečega sevanja (NIR, od 780 nm do 2500 nm) (10) (11), pri čemer je bil upoštevan standardni sončni spekter ISO 9845-1 [86], označen kot  $S(\lambda)$  [-].

$$TT_{sol} = \frac{\sum_{300nm}^{2500nm} TT_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{300nm}^{2500nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (4)$$

$$TR_{sol} = \frac{\sum_{300nm}^{2500nm} TR_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{300nm}^{2500nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (5)$$

$$TT_{sol,UV} = \frac{\sum_{300nm}^{380nm} TT_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{300nm}^{380nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (6)$$

$$TR_{sol,UV} = \frac{\sum_{300nm}^{380nm} TR_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{300nm}^{380nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (7)$$

$$TT_{sol,VIS} = \frac{\sum_{380nm}^{780nm} TT_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (8)$$

$$TR_{sol,VIS} = \frac{\sum_{380nm}^{780nm} TR_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (9)$$

$$TT_{sol,NIR} = \frac{\sum_{780nm}^{2500nm} TT_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{780nm}^{2500nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (10)$$

$$TR_{sol,NIR} = \frac{\sum_{780nm}^{2500nm} TR_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{780nm}^{2500nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (11)$$

Spektralna absorptivnost je bila izračunana s pomočjo enačbe (12). Spektralno povprečna vrednost je bila izračunana podobno kot npr.  $TT_{sol}$  z enačbo (13).

$$A_{sol}(\lambda) = 1 - TT_{sol}(\lambda) - TR_{sol}(\lambda) \quad (12)$$

$$A_{sol} = \frac{\sum_{300nm}^{2500nm} A_{sol}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{300nm}^{2500nm} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (13)$$

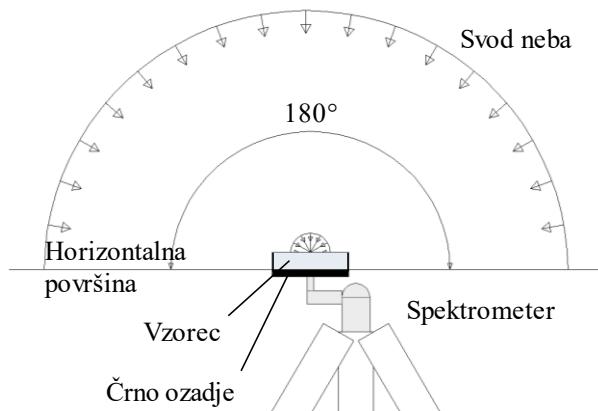
### 2.2.1.2 Vpliv debeline vzorca na prepustnost

Vpliv debeline vzorca aerogelne polsti  $TT_{vis,calc}(d)$  je bil ocenjen z uporabo Beerovega zakona (14) [87], ki velja za celotni spekter elektromagnetnega sevanja. V enačbi (14) je  $a$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] absorpcijski koeficient,  $d$  [ $\text{cm}$ ] pa debelina.

$$TT_{vis,calc}(d) = 10^{(-a \times d)} \quad (14)$$

### 2.2.1.3 Terenske meritve svetlobnih lastnosti s prenosnim spektrometrom v realnih razmerah (oblačno nebo)

Totalna spektralna hemisferična-hemisferična prepustnost ( $TT_{vis,h-h}(\lambda)$ ) je bila izmerjena s spektrometrom StellarNet Black Comet [88] (slika 2.2.1.5) v intervalih, širokih 5 nm, na valovnem območju med 380 in 780 nm. Za meritve smo uporabili stojalo, spektrometer StellarNet Black Comet, optični kabel, kosinusni receptor (vidni kot  $180^\circ$ ), kabel za povezavo z računalnikom in pripadajoče programsko orodje. Izdelan je bil tudi priročen nosilec vzorca, ki je hkrati priskrbel temno ozadje. Meritve so bile izvedene v skladu z navodili [88]. Najprej je bilo posneto črno ozadje (receptor pokrit), nato referenčni spekter vpasnega sevanja (receptor odkrit) in nazadnje še spekter prepuščene svetlobe (receptor pokrit z vzorcem). Za vsako meritve je bilo treba prilagoditi integracijski čas posameznega posnetka (večinoma pod 250 ms) in število posnetkov iz katerih je bil izračunan povprečni spekter prepustnosti (pet posnetkov). Pri danem poteku meritve ni bilo mogoče zagotoviti sočasne meritve referenčnega spektra svetlobe in spektra prepustnosti, vendar je bilo v ta namen uporabljeno že omenjeno povprečenje. Temperaturna korekcija je bila med vsemi meritvami izključena.



**Slika 2.2.1.5:** Shematski prikaz terenskih meritve prepustnosti za vidno svetlubo  $TT_{vis,h-h} [\%]$  s spektrometrom StellarNet Black Comet

**Figure 2.2.1.5:** Schematic representation of field transmittance  $TT_{vis,h-h} [\%]$  measurements conducted with portable spectrometer StellarNet Black Comet

Spektralno povprečne vrednosti  $TT_{vis,h-h}$  so bile pridobljene v skladu s standardom SIST EN 410:2011 [85], v spektralnem območju od 380 nm do 780 nm. Pri tem je bila uporabljena enaka enačba (2), kot je navedena pri laboratorijski spektrometriji.

#### **2.2.1.4 Meritev odbojnosti vzorcev membrane v območju nizko temperaturnega infrardečega (IR) sevanja (območje od 8000 14000 nm) z IR spektrometrom in določitev emitivnosti ( $e_T$ ) površine vzorcev**

Za določitev termične emitivnosti površin  $e_T$  je bila na valovnem območju med 2500 in 16000 nm s spektrometrom Bruker IFS 66/S z resolucijo meritve  $4 \text{ cm}^{-1}$  izmerjena totalna spektralna hemisferična odbojnost  $\text{TR}_{\text{IR}}(\lambda)$ . Spektrometer je bil opremljen z integracijsko sfero (OPTOSOL), kot referenčna površina za difuzni odboj pa je bila uporabljena zlata ploščica.

$$t(\lambda) = 0 \text{ in } a(\lambda) = 1 - r(\lambda) \quad (15)$$

Kadar je prepustnost  $t(\lambda) = 0$  (15) in kadar velja Kirchoffov zakon ( $a(\lambda) = e(\lambda)$ ), izmerjena reflektivnost  $r(\lambda)$  omogoča določitev termične emitivnosti površine materiala in sicer po enačbi (16):

$$e(\lambda) = 1 - r(\lambda) \quad (16)$$

Podobno kot pri svetlobnih in sončnih lastnostih je bila termična emitivnost  $e_T$  [-] izračunana z integracijo spektrov po enačbi (17). Poleg  $e(\lambda)$  v enačbi za izračun  $e_T$  (17) nastopata še spektralna sevnost črnega telesa  $B(\lambda, T)$ , odvisna od valovne dolžine  $\lambda$  in njegove temperature  $T_{\text{č.t.}}$  [K], ter valovni interval  $\Delta \lambda$  [nm]. Sevnost (ang. »radiance«) črnega telesa se izračuna po Planckovem zakonu, ki opiše spektralno porazdelitev gostote energije, ki jo izseva črno telo pri temperaturi  $T_{\text{č.t.}}$  (18).

$$e_T = \frac{\sum_{2500 \text{ nm}}^{16000 \text{ nm}} e(\lambda) B(\lambda, T_{\text{č.t.}}) \Delta \lambda}{\sum_{2500 \text{ nm}}^{16000 \text{ nm}} B(\lambda, T_{\text{č.t.}}) \Delta \lambda} \quad (17)$$

$$B(\lambda, T_{\text{č.t.}}) = \frac{2 \pi h c_0^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{h c_0}{k_B \lambda T_{\text{č.t.}}}\right) - 1 \right]} \quad (18)$$

V enačbi (18) nastopajo naslednje količine: Planckova konstanta  $h_{\text{Planck}}$  [Js], hitrost svetlobe v vakuumu  $c_0$  [m/s], valovna dolžina  $\lambda$  [nm], Boltzmannova konstanta  $k_B$  [J/K] in temperatura črnega telesa  $T_{\text{č.t.}}$  [K].

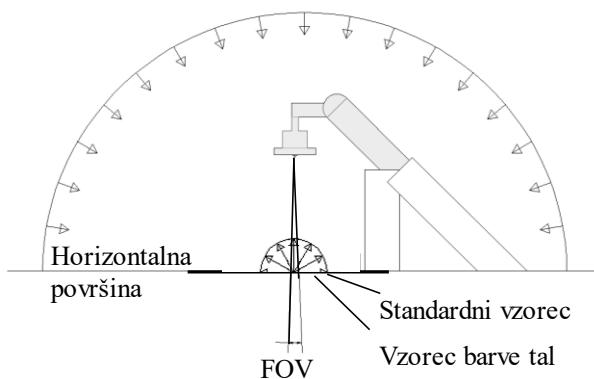
#### **2.2.1.5 Meritev temperature površine vzorcev membrane in ocena prepustnosti nizko temperaturnega infrardečega sevanja s pomočjo infrardeče kamere med 8000 nm in 14000 nm**

Za oceno prepustnosti vzorcev tkanin in folij IR sevanje je bila uporabljena infrardeča kamera TESTO 881-3, katere bolometer je občutljiv v valovnem območju med 8000 nm in 14000 nm [89].

#### **2.2.1.6 Meritev odbojnosti vidne svetlobe in določitev barv obarvanih delov tal v Športni dvorani Brezovica**

Meritve spektralnega odbojnognega faktorja  $R_{\text{vis,dif}}(\lambda)$  barv tal v dvorani so bile opravljene s prenosnim spektrometrom Black Comet proizvajalca StellarNet [88], glede na referenčno standardno belo površino na valovnem območju med 380 in 780 nm. V skladu s tehnično dokumentacijo [90], je bila geometrija meritev hemisferična (difuzna svetloba iz vseh smeri neba) in normalna (vpadni kot odbite svetlobe na receptor je bil  $0^\circ$ ), kot prikazuje slika 2.2.1.6. Pri meritvi je bil poleg že omenjene opreme uporabljen

tudi nastavek z lečo, ki zmanjša vidni kot s  $180^\circ$  na majhno točko (CR2-AD leča). Pri takšni geometriji meritev je zrcalna komponenta totalne odbojnosti izključena [90]. Kot pri predhodno opisanih terenskih meritvah prepustnosti z istim instrumentom je bilo tudi tu nemogoče izvesti referenčno meritev in meritev odbojnosti sočasno. Zanemarjen je bil tudi vpliv pozicije instrumenta na igrišču na barvo vpadne svetlobe, tudi kot posledice predhodnih odbojev od različno obarvanih površin znotraj stavbe.



**Slika 2.2.1.6:** Shematski prikaz terenskih meritev odbojnognega faktorja tal za vidno svetlobo  $R_{vis,dif}(\lambda)$  [%] s spektrometrom StellarNet Black Comet

**Figure 2.2.1.6:** Schematic representation of field visible light reflection factor  $R_{vis,dif}(\lambda)$  [%] measurements conducted with portable spectrometer StellarNet Black Comet

Odbojni faktor  $R_{dif}$  je bil izračunan z uporabo enačbe (3). Da bi dobili difuzno odbojnost površin za rdečo (Cr), zeleno (Cg) in modro (Cb) barvo, so bile vrednosti  $V(\lambda)$  v (3) nadomeščene s kolorimetričnimi funkcijami  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  [91].

## 2.2.2 Termične meritve: določitev hitrosti zraka in temperaturnega profila v zračnem kanalu dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica

Za izračun toplotnega upora zračnega kanala in določitev vpliva dovajanja zraka na toplotne lastnosti izbranih variant dvojnega membranskega ovoja ZPS (poglavlje 2.1) je bilo treba izvesti kontinuirane meritve hitrosti in temperature zraka v zračnem kanalu med membranama. Te so bile pripravljene po zgledu in v skladu z zahtevami standarda ASTM D3464 [92].

Temperatura ( $T_{a,k}$  [ $^\circ\text{C}$ ]) in hitrost ( $v$  [m/s]) zraka v zračnem kanalu med membranama sta bili izmerjeni s pomočjo digitalnega več-funkcijskega toplotnega anemometra TESTO 0560.4450 [93] in sonde TESTO 0635.1041 [94]. Ta vključuje toplotni anemometer, ki je namenjen meritvam hitrosti gibanja zraka oziroma pretoka pri relativno majhnih hitrostih od 0 m/s do 2 m/s (zunaj območja klasičnih Venovih anemometrov). Podrobne karakteristike so navedene v **preglednici 2.2.2.1**. Privzeto je bilo, da je anemometer narejen iz materialov, ki slabo absorbirajo sončno sevanje in da je zato vpliv na meritve zanemarljiv.

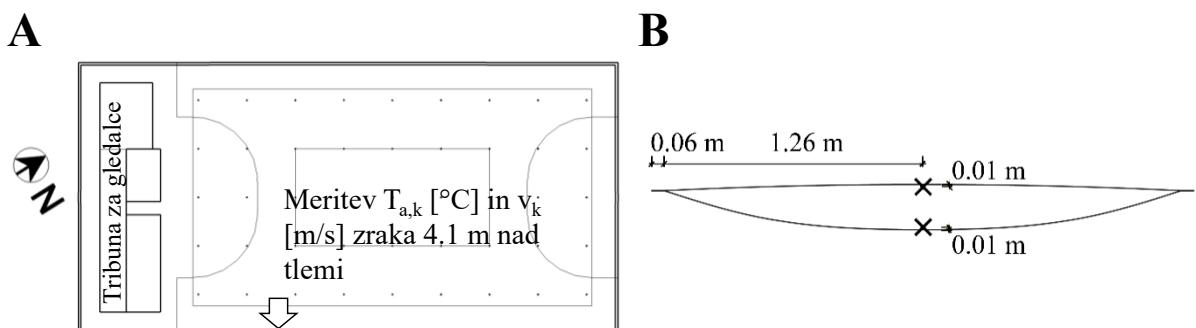
Na **sliki 2.2.2.1 A** je označeno mesto meritev hitrosti ( $v_k$ ) in temperature zraka ( $T_{a,k}$ ) na JV stranici ŠDB. Meritve so potekale z notranje strani stavbe na višini 4,1 m od tal. Na **sliki 2.2.2.1 B** sta označeni glavni mesti meritev ob zunanjji in notranji stranici zračnega kanala. Za zagotavljanje pozicije in orientiranosti

sonde je bil iz žice izdelan priročni nosilec teleskopske sonde, ta pa je bil z lepilnim trakom prilepljen na membrano.

**Preglednica 2.2.2.1:** Instrumenti za izvedbo meritev temperature  $T_{a,k}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] in hitrosti zraka  $v_k$  [ $\text{m/s}$ ] v zračnem kanalu med membranama dvojnega ovoja ŠDB

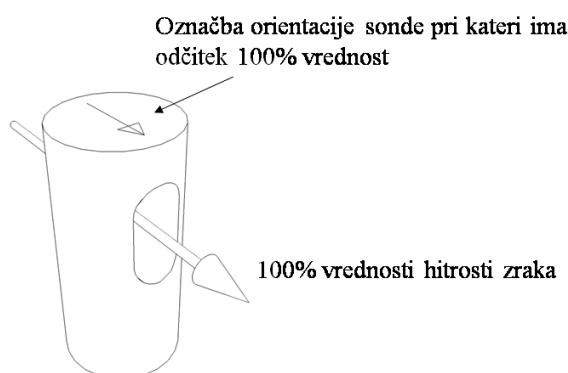
**Table 2.2.2.1:** List of instruments used for measuring  $T_{a,k}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] and speed of air  $v_k$  [ $\text{m/s}$ ] in the air gap between the envelope membranes of the air-supported structure at Brezovica

Instrument	Tip meritve	Oznaka	Drugo
TESTO 0560.4450 in TESTO 0635.1041	Hitrost zraka v zračnem kanalu med membranama	$v_k(t)$	Možnost avtomatskega zajemanja podatkov. Sonda Ø 10 z vročo žico. m. obm.: 0,0 m/s do 20,0 m/s napaka: pri 22 $^{\circ}\text{C}$ za hitrost 0,0 m/s do 2 m/s $\pm(0,03 \text{ m/s} + 3\% \text{ sr.v.})$
	Temperatura zraka	$T_{a,k}$	m. obm.: -20 $^{\circ}\text{C}$ do 70 $^{\circ}\text{C}$



**Slika 2.2.2.1:** Prikaz mesta meritev temperature  $T_{a,k}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] in hitrosti zraka  $v_k$  [ $\text{m/s}$ ] v zračnem kanalu v dvorani (puščica) (A) in na prečnem prerezu zračnega kanala (križec) (B)

**Figure 2.2.2.1:** Location of air temperature  $T_{a,k}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] and its velocity  $v$  [ $\text{m/s}$ ] measurements inside the air channel of the double membrane envelope (on building plan (A) and envelope cross section (B))



**Slika 2.2.2.2:** Prikaz vpliva orientacije sonde anemometra na odčitek hitrosti zraka [ $\text{m/s}$ ] glede na smer zračnega toka (v smeri označbe 100 % vrednost, v nasprotni smeri 70 % vrednosti)

**Figure 2.2.2.2:** Presentation of the anemometer orientation influence on the reading of air velocity [ $\text{m/s}$ ] in respect to the air flow direction (flow in the direction of arrow 100 % value, in the opposite direction 70 %)

Medtem, ko orientacija sonde na meritev temperature zraka ( $T_{a,k}$ ) ne vpliva, je za meritev hitrosti zraka ( $v_k$ ) orientacija še kako pomembna, saj je z njo moč določati tudi smer zračnega toka [95] (slika 2.2.2.2).

### **2.2.3 Meritve dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica in določitev porazdelitve količnika dnevne svetlobe na igrišču v stavbi**

V tej študiji je bila pozornost usmerjena na eksperimentalno določitev porazdelitve svetlobe na igrišču znotraj ŠDB (poglavlje 2.2) s pomočjo količnika dnevne svetlobe [96]. Število eksperimentalnih določitev osvetljenosti v stavbah in zunaj njih s pomočjo količnika dnevne svetlobe je relativno majhno [97] [98] v primerjavi s številom validacij, opravljenih na podlagi izračunov s programi, ki omogočajo simulacijo dnevne osvetljenosti. Simultane meritve direktne in difuzne osvetljenosti zunaj in znotraj izbranih stavb v naravnem merilu so opravili na inštitutu »British Building Research Establishment« [99] in v laboratoriju za dnevno svetobo na »National Research Council Canada« (NRC), kjer so priskrbeli podatke za različne testne primere z nizko, srednjo in visoko stopnjo kompleksnosti, kot na primer od strani osvetljeni prostori s standardno dvojno zasteklitvijo, prostori s svetlobnimi policami [97], prosojnimi paneli namesto čistega (prozornega) stekla [100] in zunanjimi žaluzijami [101]. Primer stavbe, obravnavan v dani disertaciji, se od navedenih razlikuje po tem, da celotna dvojno ukrivljena pnevmatska konstrukcija deluje kot prosojno okno, svetloba pa vpada iz vseh smeri neba hkrati, uporaba raznih senčil pa ni običajna, največkrat tudi težko izvedljiva.

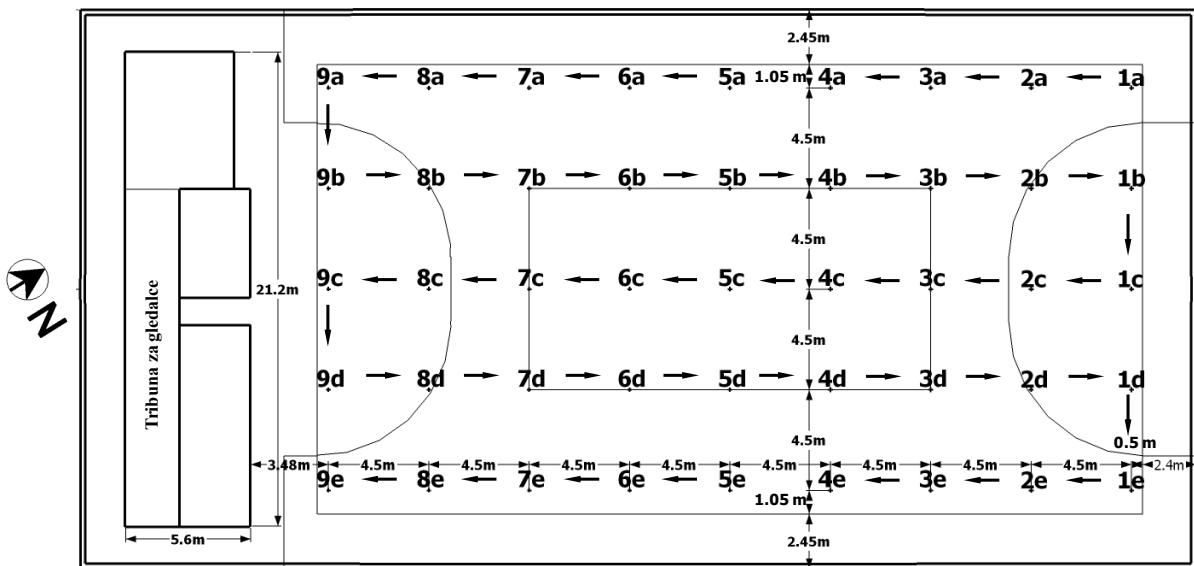
Količnik dnevne svetlobe (KDS) [96] se pri načrtovanju stavb uporablja za oceno nivojev dnevne osvetljenosti površin v notranjosti stavb, na podlagi katerih se lahko oceni, ali je za določen namen dejavnosti osvetljenost za uporabnika ustrezna. Definiran je kot razmerje med osvetljenostjo opazovane površine v stavbi in osvetljenostjo zunanje nezasenčene (ang. »unobstructed«) horizontalne osvetljenosti, ki se običajno eksperimentalno določa pri popolnoma oblačnem nebu in porazdelitvi svetlosti po nebesnem svodu, ki približno ustreza CIE standardnemu oblačnemu nebu [102].

Britanski standard [103] predлага minimalne vrednosti KDS za stanovanjske stavbe med 1,0 in 2,0 %. Boubekri [104] omeji KDS za učilnice na vsaj 1,5 %, z možnostjo povišanja na 2,0 %. Takih vrednosti KDS ni lahko doseči, še zlasti tedaj, ko svetloba vpada le iz ene strani, iz stranskega okna večinoma z visoko prepustnostjo za svetlobo. Po drugi strani, če vrednosti KDS presežejo 2,0 %, lahko poleti nastane problem zaradi bleščanja in pregrevanja, kar posledično pomeni nižjo stopnjo vizualnega in toplotnega ugodja. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Li v svojem preglednem članku, kjer je izpostavil veliko število meritev in študij na temo dnevne svetlobe [105]. Lahko povzamemo, da je tedaj, ko je  $KDS < 2\%$  za primere obravnavanih stavb in njihove uporabe, notranjost stavbe podosvetljena [106] in je potrebna dodatna umetna osvetlitev; če velja  $2\% < KDS < 5\%$  je notranjost stavbe primerno naravno osvetljena, če pa je  $KDS > 5\%$ , je umetna razsvetljava potrebna le ob jutrih in večerih, vendar obstaja možnost, da bosta bleščanje in pregrevanje zaradi povečanih solarnih dobitkov energije povzročala težave [107] [108].

Na KDS ne glede na tipologijo stavbe vplivajo dejavniki, kot so delež neba, ki ga iz opazovane točke v notranjosti stavbe lahko vidimo (ang. »sky component«, SC), delež svetlobe, odbite od zunanjih površin okoliških stavb do mesta opazovanja (ang. »externally reflected component«, ERC) in tudi delež svetlobe, prepuščen skozi prosojni del ovoja, vendar odbit od notranjih površin stavbe preden doseže mesto opazovanja (ang. »internally reflected component«, IRC).

$$KDS = (SC + ERC + IRC) TT_{vis} k_1 k_2 \quad (19)$$

Osvetljenost  $E_{i,\text{exp,glob}}(N_i)$  [lx] na določenem mestu ( $N_i$ ) v obravnavani stavbi sovpada z vsoto teh treh deležev (SC, ERC in IRC, enačba (19)) in je odvisna od (difuzne) osvetljenosti v določenem trenutku ( $t$ ), izmerjene zunaj ŠDB ( $E_{o,\text{calc,dif}}(t)$ ). V enačbi (19) nastopajo še prepustnost prosojnega ovoja ( $TT_{\text{vis}}$ ), korekcijski faktor za debelino okvira ( $k_1$ ) in korekcijski faktor za upoštevanje umazanije na steklu ( $k_2$ ). Po definiciji je KDS neodvisen od nihanja osvetljenosti, dokler je upoštevan dovolj dober približek CIE standardno oblačnega neba. Zadnje je bilo v našem primeru za izvedbo eksperimentalnega dela ključnega pomena, saj se je kljub nenehno spreminjači se intenziteti sončnega sevanja enostavno s pomočjo eksperimenta določilo KDS na podlagi meritev  $E_{i,\text{exp,glob}}(N_i)$  v notranjosti stavbe, kot je predstavljeno v tem in v poglavju 3.1.13.



**Slika 2.2.3.1:** Tloris Športne dvorane Brezovica in potek meritev

**Figure 2.2.3.1:** Plan of the air-supported dome in Brezovica and the course of measurements

V skladu s tem je bil za izbranih 45 pozicij ( $N_i = 1$  do  $45$ ) na igrišču (slika 2.2.3.1) v ŠDB (poglavlje 2.1) eksperimentalno določen količnik dnevne svetlobe [102] za dva seta (set 1 in set 2) razlikujučih se razmer neba, izveden v zaporednem časovnem obdobju v dobrih dveh urah. Za ta namen sta bila uporabljena dva detektorja svetlobe (preglednica 2.2.3.1) [109], prvi za poznejši izračun difuzne osvetljenosti zunanje nezasenčene površine  $E_{o,\text{calc,dif}}$  iz eksperimentalno določene  $E_{o,\text{exp,tube}}$ , in drugi za pripadajočo osvetljenost meritnih mest v stavbi  $E_{i,\text{exp,glob}}(N_i)$  ( $N_i = 1$  do  $45$ ). Mreža meritnih mest je bila pripravljena v skladu s priporočili priročnika »IESNA Lighting Handbook« [110], tako je bila razdalja v obeh smereh, vzdolž in prečno glede na glavno os stavbe 4,5 m. Predvideno zaporedje meritnih mest je prav tako prikazano na sliki 2.2.3.1.

**Preglednica 2.2.3.1:** Instrumentarij, uporabljen pri meritvah dnevne osvetljenosti ŠDB

**Table 2.2.3.1:** List of instruments used for daylighting measurements of the Brezovica air-supported dome

Instrument	Tip meritve	Oznaka	Drugo
VOLTCRAFT 4 v 1 Instrument 1	Osvetljenost	$E_{i,\text{exp,glob}}$	m. obm.: 0 lx do 20000 lx napaka.: $\pm (5\% \text{ rdg} + 10\text{dgt})$
VOLTCRAFT 4 v 1 Instrument 2	Osvetljenost	$E_{o,\text{exp,tube}}$	m. obm.: 0 lx do 20000 lx napaka.: $\pm (5\% \text{ rdg} + 10\text{dgt})$
TESTO 545	Osvetljenost	$E_{o,\text{exp,glob}}$	m. obm.: 0 lx do 100000 lx napaka.: $\pm 1 \text{ dgt}$
VOLTCRAFT	Osončenost	$I_{\text{glob}}$	m. obm.: 0 lx do 1999 W/m <sup>2</sup> napaka.: $\pm 10 \text{ W/m}^2$ oz. $\pm 5\%$

Osvetljenost nezasenčene zunanje horizontalne površine z nebom (označena z  $o$ ) ob ŠDB ( $E_{o,calc,dif}$  [lx]) je bila določena po sledečem postopku: za meritve vpadnega sončnega sevanja v spektralnem območju med 400 nm in 700 nm je bil izbran multi-funkcijski instrument Voltcraft [111] opremljen s silikonsko diodo (maksimalna občutljivost pri 550 nm). Merilno območje je bilo nastavljeno za vrednosti osvetljenosti do 20 000 lx pri resoluciji 10 lx. Za izvedbo meritve prispevka k osvetljenosti horizontalne površine s segmentom difuznega neba v smeri zenita, je bil uporabljen iz cevi improviziran nastavek valjaste oblike (radij 35 mm in višina 70 mm, ki nudi vidni kot 28° oziroma  $\sim 1$  sr), da se je lahko izmerilo sevanje le iz dela difuznega neba v smeri zenita ( $E_{o,exp,tube}$  [lx]). S tem je bil med merjenjem izključen od pozicije odvisen vpliv okolice (senčenje in odboj svetlobe s sosednjih objektov in tudi morebitna direktna komponenta z oblačnega neba vpadnega sončnega sevanja). Na tako pridobljene vrednosti  $E_{o,exp,tube}$  je bila normalizirana difuzna osvetljenost nezasenčene horizontalne površine  $E_{o,calc,dif}$ , pri čemer je bilo prevzeto CIE standardno oblačno nebo [102]. V postopku izračuna je bila najprej določena svetlost zenita ( $L_{o,calc,z}$  [lm/sr.m<sup>2</sup>]) z enačbo (20) oziroma (21). V naslednjem koraku je bila izračunana  $E_{o,calc,dif}$  tako, da so bile pred tem izračunane vrednosti  $L_{o,calc,z}$  pomnožene s faktorjem 7π/9 (enačba (22) oziroma (23)).

$$E_{o,exp,tube} = 2\pi L_{o,calc,z} \int_{\frac{19\pi}{45}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 + 2 \sin \gamma}{3} \sin \gamma \cos \gamma \, d\gamma \quad (20)$$

$$L_{o,calc,z} = E_{o,exp,tube} / (2\pi \int_{\frac{19\pi}{45}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 + 2 \sin \gamma}{3} \sin \gamma \cos \gamma \, d\gamma) \quad (21)$$

$$E_{o,calc,dif} = 2\pi L_{o,calc,z} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 + 2 \sin \gamma}{3} \sin \gamma \cos \gamma \, d\gamma \quad (22)$$

$$E_{o,calc,dif} = \frac{7\pi}{9} L_{o,calc,z} \quad (23)$$

Set meritve globalne (direktne + difuzne) osvetljenosti ( $E_{o,exp,glob}$  [lx]) v intervalu petih sekund je bil izведен zunaj ŠDB z merilnikom osvetljenosti Testo 545 [112]. Merilno območje je bilo nastavljeno na 100.000 lx z resolucijo 10 lx. Ocena razlike med vrednostmi  $E_{o,exp,glob}$  in  $E_{o,calc,dif}$  je bila izražena s korenom povprečne kvadratne napake (ang. »Root mean square error«, RMSE) (24)). V enačbi (24)  $x_i$  pomeni i-to zaporedno napovedano vrednost ( $E_{o,calc,dif}$ ),  $\hat{x}_i$  pa i-to zaporedno izmerjeno vrednost ( $E_{o,exp,glob}$ ).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (24)$$

Za obdelavo podatkov je bila uporabljena tudi povprečna absolutna deviacija (AAD [enota vzorca]), izračunana po enačbi (25), kjer  $x_i$  ponazarja i-to vrednost vzorca,  $m(X)$ , pa srednjo vrednost vzorca.

$$AAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - m(X)| \quad (25)$$

Meritve globalnega sončnega sevanja so bile izvedene s pomočjo ročnega merilnika proizvajalca Voltcraft tipa PL-110 SM z merilnim območjem od 0 W/m<sup>2</sup> do 1999 W/m<sup>2</sup>, ob resoluciji 0,1 W/m<sup>2</sup> in natančnosti ± 10 W/m<sup>2</sup> oziroma ± 5% [113].

Meritev spektralno-radiometričnih podatkov na območju valovnih dolžin od 300 nm do 1100 nm je bila izvedena s spektroradiometrom EKO MS-711 [114] v Laboratoriju za fotovoltaiko in optoelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Globalna osvetljenost ravne nezasenčene horizontalne površine ( $E_{o,calc,glob}$  [lx]) je bila iz spektralnih podatkov izračunana s pomočjo enačbe (26) [115]. Z  $V(\lambda)$  [-] je označena funkcija relativne barvne občutljivosti človeškega očesa za fotopičen vid,  $K_m$  [lm/W] ponazarja maksimum spektralne svetlobne efikasnosti monokromatičnega sevanja  $K(\lambda)$  [lm/W] pri valovni dolžini 555 nm, s  $\Phi_{e,\lambda}$  [W/nm.m<sup>2</sup>] pa je označena spektralna porazdelitev sevalnega toka.

$$E_{o,calc,glob} = K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (26)$$

V Laboratoriju za fotovoltaiko in optoelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani so bile izvedene tudi meritve globalne osončnosti nezasenčene horizontalne površine  $I_{o,exp,glob}$  [W/m<sup>2</sup>] in njene difuzne komponente  $I_{o,exp,dif}$  [W/m<sup>2</sup>]. V ta namen sta bila uporabljena dva piranometra MS-410 proizvajalca Eko Instruments [116], od katerih je eden imel montiran tudi obroč, ki senči direktno komponento vpadnega sončnega sevanja.

#### 2.2.4 Raziskava toplotnega odziva Športne dvorane Brezovica

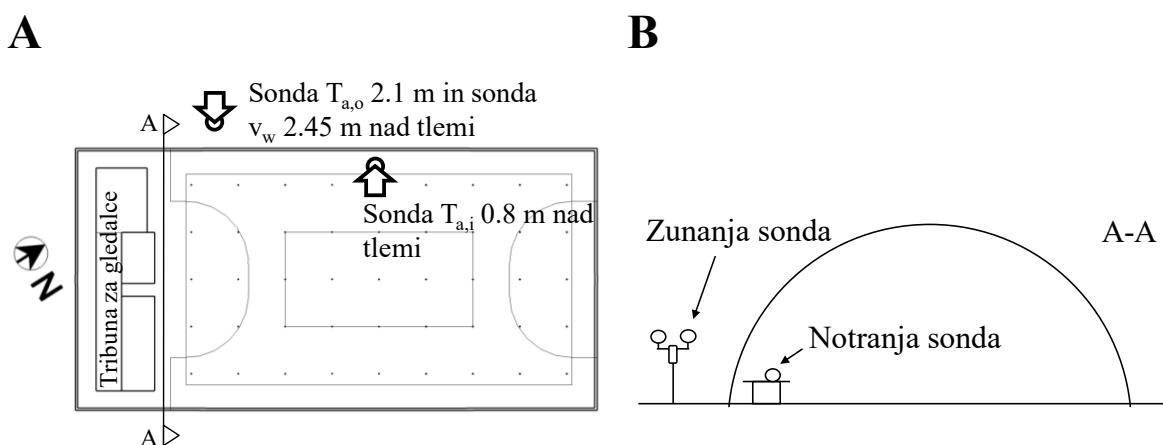
Zaporedje meritev (set) z vremensko postajo Conrad [117] (preglednica 2.2.4.1) je bilo izvedeno na ŠDB, da bi pridobili informacije o lokalnih klimatskih razmerah zunaj stavbe (temperatura zraka  $T_{a,o}$  [°C], vlažnosti zraka  $RH_{a,o}$  [%], hitrosti vetra  $v_w$  [m/s], smeri vetra  $DIR_w$  [°]) in za analizo spremembe temperature  $T_{a,i}$  [°C] in vlažnosti  $RH_i$  [%] zraka v stavbi. Cilj je bil določiti glavne vplive na toplotni odziv stavbe in pripraviti podatke za računsko delo, predstavljeno v poglavju 2.3.3.

**Preglednica 2.2.4.1:** Instrumentarij za izvedbo meritev klimatskih parametrov zunaj ŠDB in v njej  
**Table 2.2.4.1:** List of instruments used for measuring climatic parameters inside and outside the air-supported dome at Brezovica

Instrument	Tip meritve	Oznaka	Drugo
Vremenska postaja Conrad 672286	Smer vetra	$DIR_w$	
	Hitrost vetra	$v_w$	m .obm.: 0 km/h do 160 km/h napaka.: ±1 m/s
	Temperatura zraka zunaj stavbe	$T_{a,i}$	m. obm.: -40 °C do +65 °C napaka.: ±1°C
	Temperatura zraka v stavbi	$T_{a,o}$	m. obm.: 0 °C do +50 °C napaka.: ±1°C

	Relativna vlažnost zraka zunaj stavbe	RH <sub>a,o</sub>	m. obm.: 10 % do 90 % napaka: ±5 %
	Relativna vlažnost zraka v stavbi	RH <sub>a,i</sub>	m. obm.: 10 % do 90 % napaka: ±5 %

Izvedena je bila kontrola razlike v vrednosti izmerjene temperature zraka s termometrom na notranji in zunanji enoti vremenske postaje Conrad [117], njen rezultat pa je podan v **prilogi 2.2.4.A**.



**Slika 2.2.4.1:** Prikaz pozicije notranje in zunanje enote vremenske postaje Conrad [117]: tloris (A), prerez A-A (B)

**Figure 2.2.4.1:** Location of the indoor and outdoor Conrad [117] weather station unit: plan (A), cross section A-A (B)

Na **sliki 2.2.4.1** sta označeni poziciji notranje in zunanje enote vremenske postaje Conrad [117]. V času meritev je bila obravnavana stavba v prostem teku (ang. »free-running mode«), brez ogrevanja in hlajenja (prisoten le stalni mehanski dovod zraka), v njej pa so potekale le dejavnosti, povezane s predstavljenim raziskovalnim delom (tudi poglavje 2.2.2). Posledično je bil vpliv potencialnih notranjih dobitkov (visoko aktivni uporabniki, razsvetljave ipd.) izključen iz meritev in analize. Stavba je bila naravno osvetljena, osončena in izpostavljena vetru.

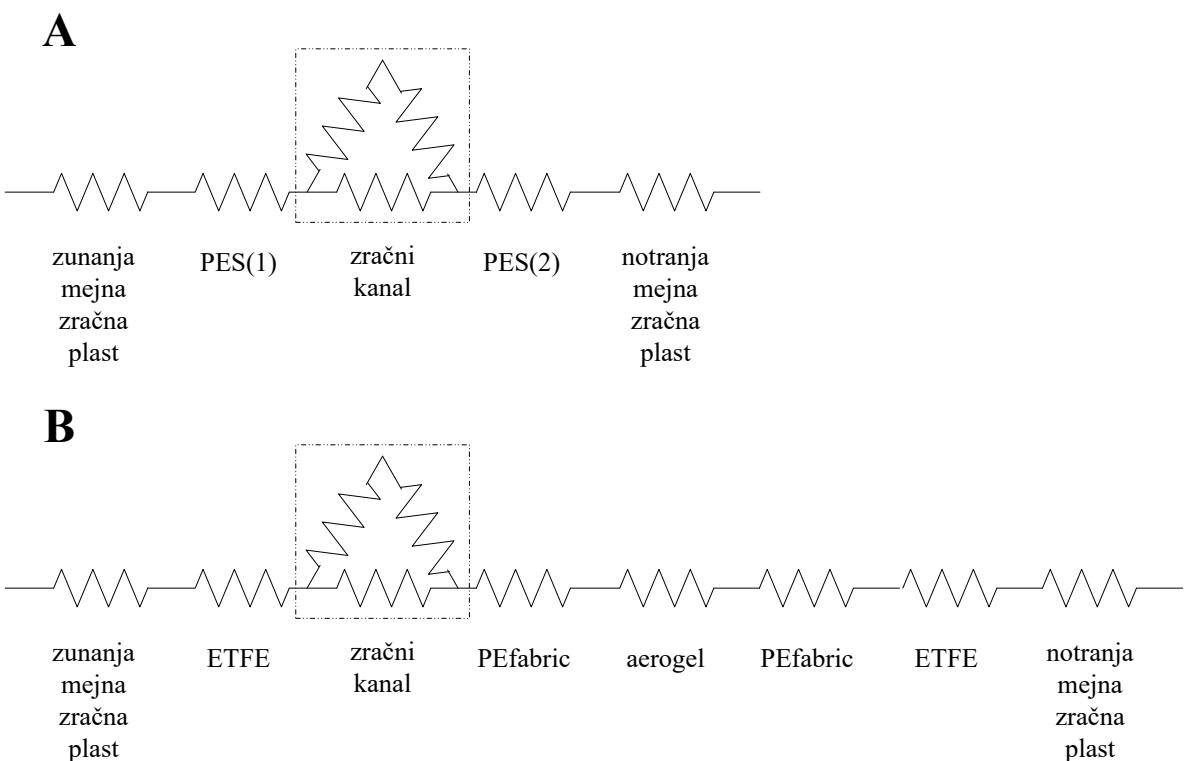
## 2.3 Raziskave na podlagi računalniških izračunov in simulacij

### 2.3.1 Toplotne lastnosti konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja

Toplotna prehodnost ( $U [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ ) konstrukcijskih sklopov (neprosojnih in prosojnih) se ne uporablja le pri stacionarnem izračunu energetske bilance [118] stavb, temveč tudi kot eden poglavitnih podatkov o topotnih lastnostih elementov stavbnega ovoja [41] [58] za primerjalne analize. Toplotna prehodnost konstrukcijskih sklopov opisuje, koliko je dani sestav konstrukcijskega sklopa pri stacionarnih razmerah sposoben prevajati toploto, torej toplotni tok skozi enoto površine sklopa  $1 \text{ m}^2$  pri temperaturni razliki notranjega in zunanjega okolja  $1 \text{ K}$ . Na splošno pa se izračuna kot recipročna vrednost skupnega toplotnega upora konstrukcijskega sklopa  $R [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$  (27), vključno z upoštevanjem toplotnega upora mejnih zračnih plasti.

$$U = \frac{1}{R} \quad (27)$$

Delo v sklopu obravnave toplotnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja ŠDB je bilo osredotočeno predvsem na računsko določitev toplotnega upora obstoječe različice konstrukcijskega sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z z uporabo eksperimentalno pridobljenih vhodnih podatkov (poglavlje 2.2.2). Narejen je bil še primerjalni izračun toplotnega upora sklopa ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Izračun totalne prepustnosti sklopov za sončno sevanje je bil narejen z uporabo eksperimentalno določenih optičnih lastnosti membran (poglavlje 2.2.1). Vzporedno s temi analizami je bilo tudi ocenjeno ali je ohranitev zračnega kanala z vidika prehoda toplote z radiacijo v primeru ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE smiselna ali ne. Dodatno smo dobili še oceno, ali je vpliv dovajanja zraka v zračni kanal zanemarljiv ali ne.



**Slika 2.3.1.1:** Shematski prikaz toplotnega vezja za obstoječo različico konstrukcijskega sklopa ovoja ŠDB (PES(1)2009z/PES(2)2009z) (A) in za predlagano novo različico z uvedeno aerogelno odejo Spaceloft® (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) (B)

**Figure 2.3.1.1:** Schematic representation of the thermal circuit for the existing version of the constructional complex of the Brezovica air-supported dome (PES(1)2009z/PES(2)2009z) (A), and the newly proposed version insulated by the aerogel blanket Spaceloft® (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) (B)

Toplotni upor sklopov  $R$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ] je bil izračunan kot navaja standard ISO 15099:2003 [119] za idealen presek, tj. za sredino zasteklitve (ang. »centre of glazing«) pri čemer je vpliv vogalnih učinkov in okvira zanemarjen. Pri tem je bila vodilna enačba (28). Pri izračunih je bilo predpostavljeno, da sta membrani vzporedni, učinki geometrije pa so bili posredno upoštevani le pri izračunih koeficienta konvekcijskega prenosa toplote.

$$R = \frac{1}{h_{ex}} + \sum_{i=2}^n R_i + \sum_{i=1}^n R_{gv,i} + \frac{1}{h_{int}} \quad (28)$$

V enačbi (28)  $h_{\text{ex}}$  [W/m<sup>2</sup>.K] in  $h_{\text{int}}$  [W/m<sup>2</sup>.K] ponazarjata koeficient prestopa toplote za notranjo in zunanjo mejno zračno plast;  $R_i$  [m<sup>2</sup>.K/W] toplotni upor i-te zračne plasti v zasteklitvi (v obravnavanem primeru le ena) in  $R_{\text{gv},i}$  [m<sup>2</sup>.K/W] toplotni upor i-te šipe (v obravnavanem primeru materialov navedenih v **preglednicah 2.1.1.1, 2.1.2.1**). Na **sliki 2.3.1.1 A** je prikazana shema toplotnega vezja za obstoječi konstrukcijski sklop ŠDB in na **sliki 2.3.1.1 B** shema za predlagano različico z aerogelom izoliranega dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa.

### 2.3.1.1 Vpliv mejnih zračnih plasti

Za oceno vpliva mejnih zračnih plasti na potek temperature v zidu, tako pri stacionarnih kot nestacionarnih pojavih, potrebujemo Biotovo število  $Bi$  [-], ki je definirano s količnikom toplotnega upora zidu ( $d/k$ ) in toplotnega upora mejne zračne plasti ( $1/\alpha$ ) (29) [120]. V enačbi (29)  $\alpha$  [W/m<sup>2</sup>.K] pomeni prestopni koeficient toplote,  $d$  [m] debelino zidu in  $k$  [W/m.K] njegovo toplotno prevodnost.

$$Bi = \alpha \frac{d}{\lambda} \quad (29)$$

### 2.3.1.2 Zračni kanal

#### 2.3.1.2.1 Koeficient prenosa toplote s konvekcijo

Standard ISO 15099:2003 [119] poda naslednjo enačbo (30) za izračun koeficiente prenosa toplote s konvekcijo  $h_{cv,i}$  [W/m<sup>2</sup>.K]:

$$h_{cv,i} = Nu_i \left( \frac{k_i}{d_i} \right) \quad (30)$$

Indeks i ponazarja i-to zračno plast v večlojnem sistemu zasteklitve, z  $Nu$  [-] je označeno Nusseltovo število, s  $k_i$  [W/m.K] pa toplotna prevodnost medija v kanalu med membranama (v našem primeru zraka),  $d_i$  [m] pa označuje povprečno debelino zračnega kanala. Isti standard (členi 5.3.3.1 do 5.3.3.5 [119]) najprej podaja podrobni postopek in enačbe za izračun koeficiente konvekcijskega prenosa toplote med površinama neprezračevanega zračnega kanala pod različnimi nakloni prosojnih elementov ovoja. Po tem postopku pridobljeni koeficienti upoštevajo združen vpliv prenosa toplote s kroženjem zraka kot z difuzijo toplote.

Za primer prezračevanega zračnega kanala na podlagi metode delitve toplotnega toka (ang. »split flux method«) standard [119] veže izračun toplotnega toka in pripadajočega koeficiente prenosa toplote s kondukcijo/konvekcijo na ekvivalentno povprečno temperaturo zraka v kanalu. Pri tem predpostavi tudi polovični toplotni upor zračnega sloja med površinama stranic kanala in mestom ekvivalentne povprečne temperature zraka v kanalu. Vrednosti prenosa toplote med stranicama kanala s kondukcijo/konvekcijo  $h_{cv,i}$  [W/m<sup>2</sup>.K] (30) se tako povečajo za faktor dva, pristet pa je še vpliv izmenjave zraka v kanalu  $4v_i$ , ki ponazarja proces prisilne konvekcije. Tako na koncu standard ISO 15099:2003 [119] poda dopolnjeno enačbo za izračun koeficiente prenosa toplote med stranicama kanala s konvekcijo  $h_{cvd,i}$  [W/m<sup>2</sup>.K] (31):

$$h_{cvd,i} = 2h_{cv,i} + 4v_i \quad (31)$$

Kot vhodni podatek za izračun  $h_{cv,i}$  po tem standardu je treba podati hidravlični premer zračnega kanala  $D_{hyd}$ , ki je bil izračunan po enačbi (32) [121].

$$D_{hyd} = \frac{4 * površina\ toka}{omočeni\ obseg} \quad (32)$$

### 2.3.1.2.2 Koeficient prenosa toplote z radiacijo

Za izračun koeficiente prenosa toplote med stranicama zračnega kanala z radiacijo  $h_r$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] je bilo predpostavljeno, da sta stranici zračnega kanala vzporedni in neprepustni za IR. Hkrati se izračun  $h_r$  v tej raziskavi zgleduje po izračunu  $h_r$  med absorberjem in pokrivno ploščo sončnega kolektorja [122], pri katerem je bila uporabljena enačba (33). V tej enačbi nastopajo naslednje količine:  $e_T'$  [-] in  $e_T''$  [-], ki pomenita hemisferični emitivnosti stranic kanala,  $T_m$  [K] ponazarja srednjo absolutno temperaturo zraka v kanalu (izračunana po enačbi (34)) in  $\sigma$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ] pomeni Stefan-Boltzmannovo konstanto.

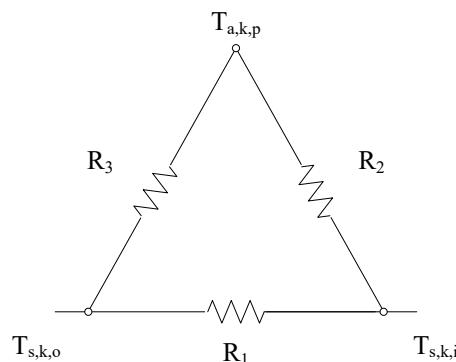
$$h_r = \frac{4\sigma T_m^3}{(1/e_T') + (1/e_T'') - 1} \quad (33)$$

$$T_m = \frac{T_{s,k,i} + T_{s,k,o}}{2} \quad (34)$$

Tovrstni približek (33) koeficiente prenosa toplote z radiacijo [123] lahko naredimo le tedaj, ko so temperaturne spremembe ob notranjih površinah zračnega kanala v primerjavi z absolutno temperaturo zraka (v [K]) med stenama majhne [124].

### 2.3.1.2.3 Toplotni upor prezračevanega kanala

Standard ISO 15099:2003 [119] eksplicitno ne poda enačbe za določitev topotnega upora prezračevane zračne plasti za primer, ki upošteva tako prenos toplote s konvekcijo kot radiacijo.



**Slika 2.3.1.2:** Shematski prikaz modela prenosa toplote med stranicama zračnega kanala (notranjo in zunanjou površino) in zrakom v njem z uporovno mrežo v kateri je upor  $R_1$  (pripadajoč prenosu toplote z radiacijo brez sodelujočega vmesnega medija) vzporedno vezan z zaporedno vezavo uporov, pripadajočih konvekciji ob dveh stranicah

**Figure 2.3.1.2:** Schematic representation of the heat transfer between the internal and external side of the envelope air channel with the new thermal resistor network inside

which the thermal resistance  $R_1$  (radiative heat transfer between surfaces) parallelly bound with the sequentially bound of thermal resistances belonging to convective heat transfer next to the channel sides

Ob predpostavki, da velja teorija topotnih vezij, ki se zgleduje po razporeditvi upornikov in drugih elementov električnih vezij [125], lahko zračni kanal ponazorimo, kot je prikazano na **sliki 2.3.1.2** in zapišemo enačbo (35), ki se poenostavi v enačbo (36).

$$R_i = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_3}} \quad (35)$$

$$R_i = \frac{1}{h_{r,i} + h_{cvd,i}} \quad (36)$$

Kot primer je topotni upor zračne plasti v solarnih kolektorjih, ob upoštevanju prenosa topote tako s konvekcijo kot z radiacijo, izračunan po enakem modelu z enačbo (36) [121]. Pri tem se predvideva, da zrak v kanalu ne nastopa kot sodelujoči medij pri izmenjavi topote med stranicama s sevanjem, ker proces prenosa topote z radiacijo poteka popolnoma neodvisno od konvekcije.

### 2.3.1.3 Topotni upor trdnih materialov

Izračun topotnega upora materialov, ki sestavljajo membrani (**preglednici 2.1.1.1** in **2.1.2.1**), je bil izračunana po enačbi (37), definirani v standardu ISO 15099:2003 [119].

$$R_{gv,i} = \frac{t_{gv,i}}{\lambda_{gv,i}} \quad (37)$$

### 2.3.1.4 Totalna prepustnost za sončno sevanje

Totalna prepustnost sončnega sevanja ali  $g$  [-] je bila prav tako izračunana za tri različice konstrukcijskega sklopa dvojnega zračno podprtoga ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Izračun je bil narejen po postopku za dvojne zasteklitve, kot je definiran v standardu ISO 9050:2003 [126]. Eksperimentalni vhodni podatki za izračun so bili pridobljeni po postopkih predstavljenih v poglavju 2.2.1.

$$g = TT_{sol} + q_i \quad (38)$$

$$q_i = \frac{\left(\frac{A_{e1}}{h_{ex}} + A_{e2} + \frac{A_{e2}}{\Lambda}\right)}{\left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ex}} + \frac{1}{\Lambda}\right)} \quad (39)$$

Medtem, ko so količine  $TT_{sol}$ ,  $h_{int}$  in  $h_{ex}$  že znane v enačbah (38) in (39) nastopata še  $A_{e1}$  [-] in  $A_{e2}$  [-], ki označujeta absorptivnost posameznega sloja dvojne zasteklitve v smeri vpadnega sončnega sevanja in  $\Lambda$  [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ], ki označuje topotno prehodnost med zunanjim in notranjim stranico konstrukcijskega sklopa brez upoštevanja mejnih zračnih plasti na notranji in zunanjji strani konstrukcijskega sklopa.

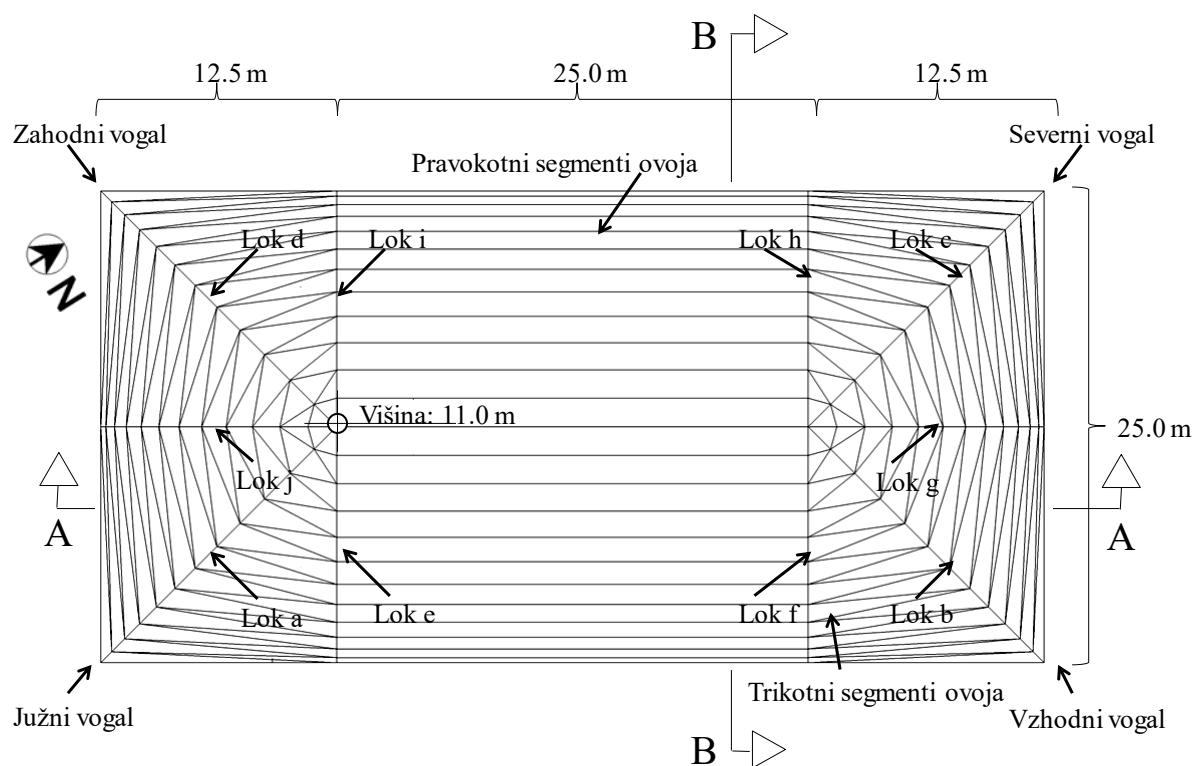
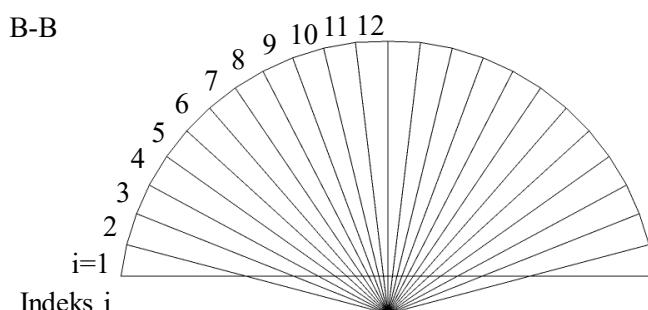
### 2.3.2 Raziskava dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica za različne različice sestave zračno podprtega ovoja

Prvotno so KDS izračunavali z enostavnimi razpredelnicami [108] in metodo ločitve tokov (ang. »split flux method«), čemur so sledile naprednejše računske tehnike, zasnovane na izsevani in odbiti komponenti sevanja skupaj (ang. »radiosity«) [127] [128]. Danes je načrtovalcem in raziskovalcem bivalnih in delovnih razmer v stavbah, med drugim dostopno tudi računalniško orodje DAYSIM [129], ki omogoča za različne oblike stavb oceno količine dnevne svetlobe na opazovani površini, pretvorbo v različne parametre, ki opisujejo razmere dnevne osvetljenosti, in podporo pri interpretaciji. DAYSIM je bil razvit na inštitutih: »National Research Council Canada« in »Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems«.

DAYSIM je zasnovan na podlagi programa RADIANCE [130], ki ga je konec 80tih. let 20. stoletja na inštitutu »Lawrence Berkeley National Laboratory« predstavil Greg Ward. Program temelji na metodi stohastičnega in determinističnega vzvratnega sledenja žarkov svetlobe. Omenjena metoda omogoča simulacijo vizualne podobe poljubnega okolja, sestavljene oblike ali ukrivljene površine, ki je zasnovana na fizikalnih količinah, pri čemer je vir svetlobe lahko umetni ali naravni [130]. Ravne in odsekoma ravne površine, ki sestavljajo elemente stavbnega ovoja so lahko enostavne neprosojne ali prozorne, lahko pa tudi kompleksne [131] z vidika prehoda svetlobe med katere spadajo tudi eno- ali večslojne prosojne površine. Metodološki preskok programa DAYSIM glede na program RADIANCE se skriva v dejstvu, da z zanesljivejšo in natančnejšo uporabo koeficientov dnevne svetlobe, DC (ang. »daylight coefficient«), kakor njegovi predhodniki (na primer Adeline in ESP-r) [132] v kombinaciji z metodo vzvratnega sledenja žarkov uporabniku omogoči časovno učinkovito in časovno odvisno analizo dnevne osvetljenosti skozi vse leto. Metoda koeficientov dnevne svetlobe je bila uspešno implementirana tudi v druge računalniške programe [133] [134] [131] [135] [101]. Zaradi neodvisnosti koeficientov dnevne svetlobe od dejanskih vremenskih razmer se ti, za izbrano geografsko lokacijo, posamezno obliko stavbe in definicijo optičnih lastnosti materialov, v opazovanih točkah izračunajo le enkrat, z dejansko porazdelitvijo svetlosti po nebesnem svodu pa se s pomočjo linearne superpozicije povežejo v drugem koraku izračuna. Končni rezultat opisanega postopka je iskana dnevna osvetljenost obravnavanih točk. Metodo izračuna prispevkov posameznih segmentov neba k osvetljenosti obravnavane točke oziroma metodo koeficientov dnevne svetlobe, ki je v svojem bistvu aproksimacija metode količnika dnevne svetlobe višjega reda [132], sta že leta 1983 predlagala Tregenza in Waters [136], njena uporaba pa programu DAYSIM omogoči analizo dnevne osvetljenosti tudi pri kompleksni porazdelitvi svetlosti neba, kot jo opiše Perezov vse-vremenski model [137]. Tako poleg osnovnega izračuna dnevne osvetljenosti pri stacionarnem standardno oblacičnem nebu [138] in uporabo količnika dnevne svetlobe uporabnikom omogoča časovno odvisno kvantitativno analizo dnevne osvetljenosti v vsem letu na podlagi sodobnejše metrike, ki temelji tudi na klimatskih podatkih [139]. Koeficient dnevne svetlobe ( $DC_i$ ), pripadajoč i-temu segmentu neba ( $\Delta S_i$ ), je definiran kot matematična funkcija, ki poveže porazdelitev svetlosti i-tega segmenta neba ( $L_i$ ) z osvetljenostjo ( $\Delta E$ ) točke v stavbi (40) in je z drugimi besedami merilo za občutljivost osvetljenosti točke v stavbi za spremembe svetlosti neba [136].

$$\Delta E = D_i L_i \Delta S_i \quad (40)$$

Zanesljivost rezultatov, ki jih podata programa Radiance in DAYSIM, je bila v preteklosti preverjena in potrjena v seriji napovedi s simulacijami [100], ki so pokazale, kako točno lahko simulacije potrdijo fizikalne meritve v številnih razlikujočih se razmerah neba v prostorih naravnega merila in zastekljenih s čistim stekлом, z žaluzijami ali brez njih [140], in prisotnimi svetlobnimi policami [97] [141] ali prosojnim (motnim) stekлом [100].

**A****B****C**

**Slika 2.3.2.1:** Tloris geometrijskega modela ŠDB (A), prerez A-A (B) in prerez B-B (C). Na slikah (B) in (C) je prikazana tudi segmentacija lokov s pripadajočimi indeksi posameznih linearnih segmentov

**Figure 2.3.2.1:** Plan of the Brezovica air-supported structure geometry model (A), its cross-section A-A (B) and its cross-section B-B (C). In (B) and (C) also the segmentation of arcs with corresponding indices is shown

Analizirana stavba ŠDB (poglavlje 2.1), bi bila lahko obravnavana kot skrajni primer, saj njen celotni svod deluje kot ukrivljeno prosojno steklo. Za izračune s programom DAYSIM je bila geometrija obravnavane stavbe razdeljena na sredinski del valjaste oblike ter dva skrajna dvojno ukrivljena dela, simetrična glede na glavno os stavbe (**slika 2.3.2.1 A**). Sredinski del je segment valja z radijem ukrivljenosti 12,75 m, odrezan 1,75 m v radialni smeri od središča krožnice v vertikalni smeri (višina stavbe 11,0 m) in je opisan s pravokotniki. Stranski del je s trikotniki opisana ploskev, napeta čez pet lokov z radijem ukrivljenosti 12,75 m, odrezanih enako kakor cilindrični del (**sliki 2.3.2.1 A in B**). Vsi vogali površin so pripeti na enega od desetih lokov z radijem ukrivljenosti 12,75 m. Loki a, b, c in d so bili dolgi 21,9 m, loki e, f, g, h, i in j pa 18,2 m. Nakloni linearnih segmentov lokov (**slika 2.3.2.1**) so podani v **preglednici 2.3.2.1**.

**Preglednica 2.3.2.1:** Nakloni segmentov  $\gamma_i$  [ $^\circ$ ] cilindričnega dela geometrijskega modela ŠDB

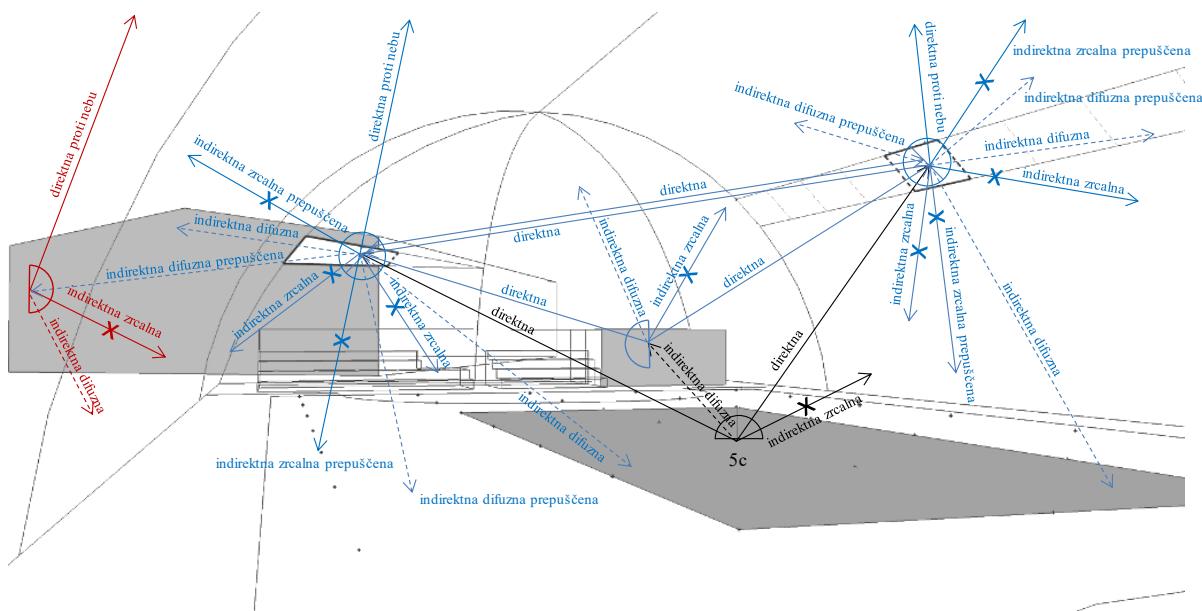
**Table 2.3.2.1:** Inclination of the segments in the cylindrical part of the Brezovica air-supported dome geometrical model

I	$\gamma_i$ [ $^\circ$ ]
[ $-$ ]	
1	79,7
2	72,4
3	66,0
4	58,5
5	51,9
6	45,0
7	38,1
8	31,0
9	24,4
10	17,2
11	10,3
12	1,9

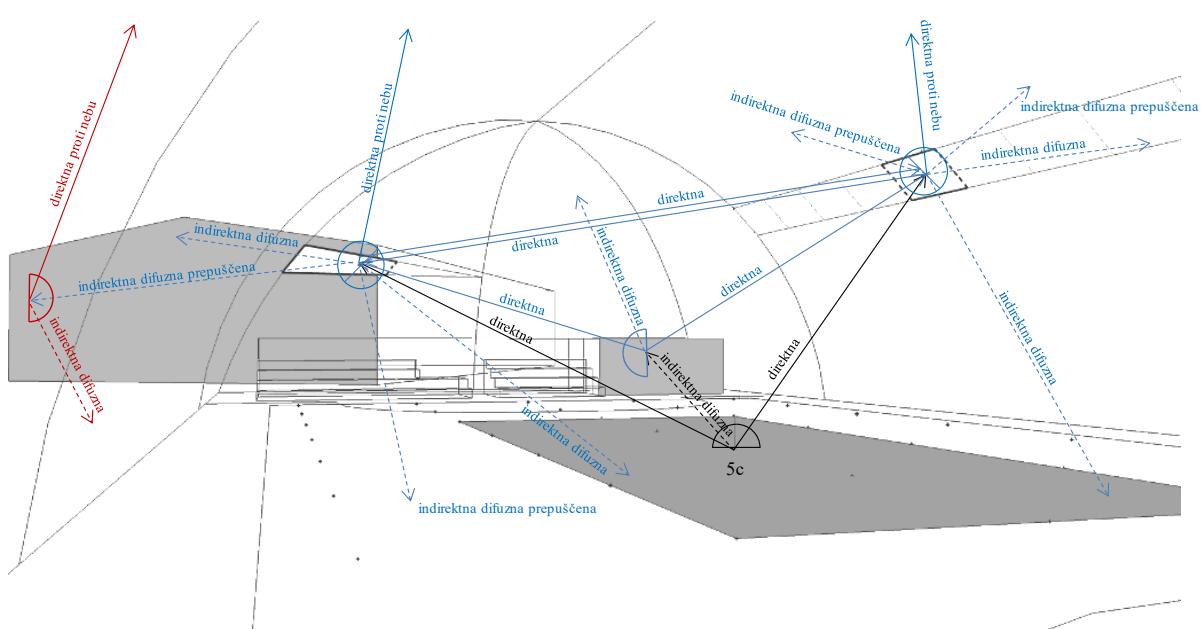
CIE standardno oblačno nebo [102] je bilo uporabljeno v izračunih, saj je približno odražalo dejanske razmere oblačnega neba (do 5000 lx, poglavje 3.1.3) na dan, ko so bile izvedene eksperimentalne meritve, s čimer je bila omogočena tudi visoko zanesljiva primerjava izračunanih KDS z eksperimentalnimi. Tudi v literaturi zasledimo priporočilo tovrstne prakse [142]. Hkrati zaradi omejene dostopnosti instrumentov v času izvedbe eksperimentalnih meritev na Brezovici direktna in difuzna komponenta sončnega sevanja nista bili neposredno merjeni, kar pomeni, da posledično ni bilo mogoče neposredno uporabiti Perezovega vse-vremenskega modela neba [141] [143] [137]. Narejena pa je bila študija vpliva direktne komponente sončnega sevanja ( $I_{o,dir}$  [ $W/m^2$ ]). Poleg primerjave s programom DAYSIM izračunanih KDS z eksperimentalnimi, je bila opravljena tudi analiza vpliva različnih vzorcev porazdelitve odbojnosti barv po igrišču. Pridobljene porazdelitve KDS so bile uporabljene kot indikator osvetljenosti in kot pomoč pri analizi vpliva v notranjosti stavbe odbite komponente vpadne svetlobe (IRC) v ŠDB.

Kompleksna oblika dvojnega membranskega ovoja (**slika 2.1.1.2**) je bila potem poenostavljena v enoslojni model konstrukcije, kateri so bile pripisane eksperimentalno določene svetlobne lastnosti celotnega konstrukcijskega sklopa (PES(1)2009z/PES(2)2009z in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) sistema membran, kot je opisano v poglavju 2.2.1. Razlog za tako odločitev se skriva v dejstvu, da program Radiance omogoča le simulacije primerov prehoda svetlobe z enkratnim sipanjem (ang. »single scattering event«) [144].

A



B



**Slika 2.3.2.2:** Ponazoritev izbora tipa metode generacije žarkov pri njihovem vzvratnem sledenju s programom Radiance, brez upoštevanja (A) in ob upoštevanju (B) predpostavk o optičnih lastnostih primerov dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ ETFE (B)

**Figure 2.3.2.2:** Illustration of the ray generation method choice in the raytracing runs by Radiance software without (A) and with (B) consideration of assumptions about the optical properties of the double membrane envelope constructional complex cases PES(1)2009z/PES(2)2009z and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE

Za opis optičnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja (modeliranega z enoslojno površino) je bil izbran tip materiala »trans«, ki se uporablja za opis svetlobnih lastnosti prosojnih elementov stavbnega ovoja [145], katerih totalna prepustnost in odbojnost sta sestavljeni tako iz zrcalne kot difuzne komponente. Validacijo uporabe tipa materiala »trans« s programom DAYSIM za simulacijo dnevne osvetljenosti v primeru pisarne z vertikalno stransko odprtino in oknom sestavljenim iz prosojnih kompozitnih panelov, sta izvedla C. F. Reinhart in Marilyn Andersen [100]. Za motne panele je bilo predpostavljeno, da je zrcalna prepustnost enaka nič ( $TT_{specular} = 0$ ), tako kot je bilo predpostavljeno v tej raziskavi dnevne osvetljenosti ŠDB. Uporabljena je bila le difuzna odbojnost obravnavanih vzorcev dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa, saj bi v nasprotnem primeru bile potrebne zahtevnejše goniofotometrične meritve, ki bi podale podrobne informacije ovisnosti svetlobnih lastnosti od vpadnega kota svetlobe [100].

**Sliki 2.3.2.2 A in B** prikazujeta, kateri žarki so med vzorčnim pošiljanjem žarkov zanemarjeni (prečrtani z X na **sliki 2.3.2.2 A**) zaradi navedenih predpostavk o optičnih lastnostih membran (upoštevani le difuzna prepustnost  $T_d$  in difuzna odbojnost  $R_d$ ). Pri vzvratnem sledenju žarkov za površine, ki so definirane kot vir svetlobe oziroma površine, ki so zelo svetle (okna), so bili opravljeni izračuni direktnih prispevkov le po deterministični metodi ter indirektnih prispevkov (zrcalnih in difuznih) po stohastični metodi [146]. Segmenti ovoja, obravnavani kot okna, so bili po dimenzijah preveliki, zato jih je program Radiance razdelil na manjše podelemente (na podlagi razmerja med najdaljšo stranico in razdaljo od točke opazovanja do obravnavanega elementa,  $ds = 0,2 [-]$ ) [147]. Metoda Monte Carlo (v splošnem oznaka za metode reševanja matematičnih problemov, ki temeljijo na ustrezнем statističnem vzorčenju [148] [149] in se uporablajo tudi pri vzvratnem sledenju žarkov) pri direktnem računu ni bila uporabljena, saj je bil parameter  $d_j$  (»direct jitter«) enak nič. Sekundarnih oziroma virtualnih virov svetlobe ni bilo, saj je veljala predpostavka, da zrcalne prepustnosti in odboja ni ( $TT_{specular} = 0$  in  $TR_{specular} = 0$ ). Posledično sekundarni viri niso bili vključeni v direktni račun. Tako so ostali le še indirektni računi difuzno prepuščene in difuzno odbite svetlobe (obe enaki v vse smeri – Lambertov difuzor), za katere je program Radiance uporabil metodo Monte Carlo, pri čemer je vzorčil hemisfero. Za žarke, ki dosežejo segment neba, definiran kot vir svetlobe, program Radiance ustavi izračun.

Med uporabo programa DAYSIM (glej »scene 1« v [129]) je bilo upoštevanih do pet odbojev pojemajočega žarka pred njegovo izključitvijo iz računa. Za vsako opazovano točko v stavbi (45 merilnih mest od 1a do 9e) je bilo obravnavanih vzorčnih 1000 žarkov. Lateralna resolucija izračunov s programom DAYSIM enaka  $\pm 3$  cm je bila veliko manjša v primerjavi z razdaljo med merilnimi mesti (mreža 4,5 m x 4,5 m) znotraj ŠDB. Za analizo je bil izbran originalni format koeficientov dnevne svetlobe [150].

### 2.3.3 Raziskava rabe energije za ogrevanje in hlajenje Športne dvorane Brezovica

EnergyPlus (7.0) [151] je računalniški program, ki ga različni inženirji in raziskovalci uporabljajo za simuliranje celotne rabe energije za ogrevanje, hlajenje, ventilacijo, razsvetljavo in druge procesne obremenitve v stavbah. [152].

Program EnergyPlus so pričeli razvijati leta 1996 v sodelovanju med Lawrence Berkeley Institute v ZDA, različnimi javnimi institucijami in tudi zasebnimi podjetji. Zasnovan je na podlagi dveh široko uporabljenih programov DOE-2 in BLAST [153]. Izračuni rabe energije temeljijo na toplotnih bilancah med površinami na katere vplivajo sevalni in konvekcijski toplotni tokovi. V ta namen so v programu uporabljene t. i. funkcije konduksijskega prenosa toplotne (ang. »conduction transfer function – CTF«), s čimer omogoča upoštevanje dinamičnega toplotnega odziva [154].

Pri podrobni obravnavi dinamičnega toplotnega odziva je v programu EnergyPlus za neprosojne materiale treba podati toplotno prevodnost  $k$  [W/m.K], specifično toplotno kapaciteto pri konstantnem tlaku  $c_p$  [J/kg.K] in gostoto materiala  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], razen za t. i. lahke materiale, ki imajo majhno toplotno kapaciteto. Obravnavna prehoda toplote skozi te materiale je lahko omejena samo na obravnavo toplotnega upora  $R$  [m<sup>2</sup>.K/W], vendar je pri tem treba biti prepričan, da je tovrstna predpostavka ustrezna. Pri prozornih oziroma prosojnih materialih za zasteklitve opis toplotnega odziva v programu EnergyPlus obravnavata stacionarno stanje (ang. »steady-state«), zato se poleg optičnih lastnosti podajata le toplotna prevodnost posameznega sloja zasteklitve [154]. Dejstvo je, da so sloji materialov, ki predstavljajo stekla oziroma šipe, tanki in imajo majhno toplotno kapaciteto, za razliko od optičnih lastnosti, ki pa bistveno vplivajo na delovanje stavbe. V skladu s tem je v disertaciji za opis optičnih in toplotnih lastnosti posameznih slojev konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB uporabljen modul za opis toplotnih in optičnih lastnosti stekel »WindowMaterial:Glazing« [155]. Membrani (PES(1)2009 in PES(2)2009), ki sestavlja ovoj obstoječe ŠDB, PES(1)2009z/PES(2)2009z, sta res tanki (0,74 mm in 0,43 mm, kar je precej manj kot stekla) (**preglednica 2.1.1.1**), medtem ko to za predlog novega konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ne velja več, saj je sloj prosojne toplotne izolacije Spaceloft® debel 10 mm (**preglednica 2.1.2.1**), kar predstavlja približno debelino dveh stekel.

EnergyPlus omogoča obravnavo transparentnih toplotnoizolacijskih materialov (TIM), vendar specifično le za primere, pri katerih je TIM položen na neprosojno podlago, in ne za primer stekla [155]. Kljub temu je modul podajanja podrobnih toplotnih in optičnih lastnosti TIM materiala enak tistemu za običajna stekla (»WindowMaterial:Glazing«) [155]. Na podlagi tega je bilo v disertaciji privzeto, da je mogoče uporabiti modul za zasteklitve tudi za opis toplotnih in optičnih lastnosti zunanje (ETFE) in notranje toplotno izolirane (PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) membrane konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, saj gre v obeh primerih za majhne debeline slojev z relativno nizko toplotno kapaciteto.

Za namen izbora ustreznega časovnega koraka je bil toplotni odziv aerogelne izolacijske odeje Spaceloft®, debele 10, 20 in 40 mm, ocenjen s pomočjo enačbe (41). V enačbi (41)  $t$  [s] pomeni ocenjeni čas vzpostavitve stacionarnega stanja v homogenem sloju materiala,  $d$  [m] debelino tega sloja in  $a$  [m<sup>2</sup>/s] njegovo termično difuzivnost. Čas  $t$  je za prosojen sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, ki vključuje 10 mm debel sloj Spaceloft®-a, enak 2771 s ali dobrih 46 min, na podlagi česar je privzeto, da je časovni korak 1 h primeren za izvedbo predvidenih izračunov s programom EnergyPlus.

$$t = \frac{d^2}{a} \quad (41)$$

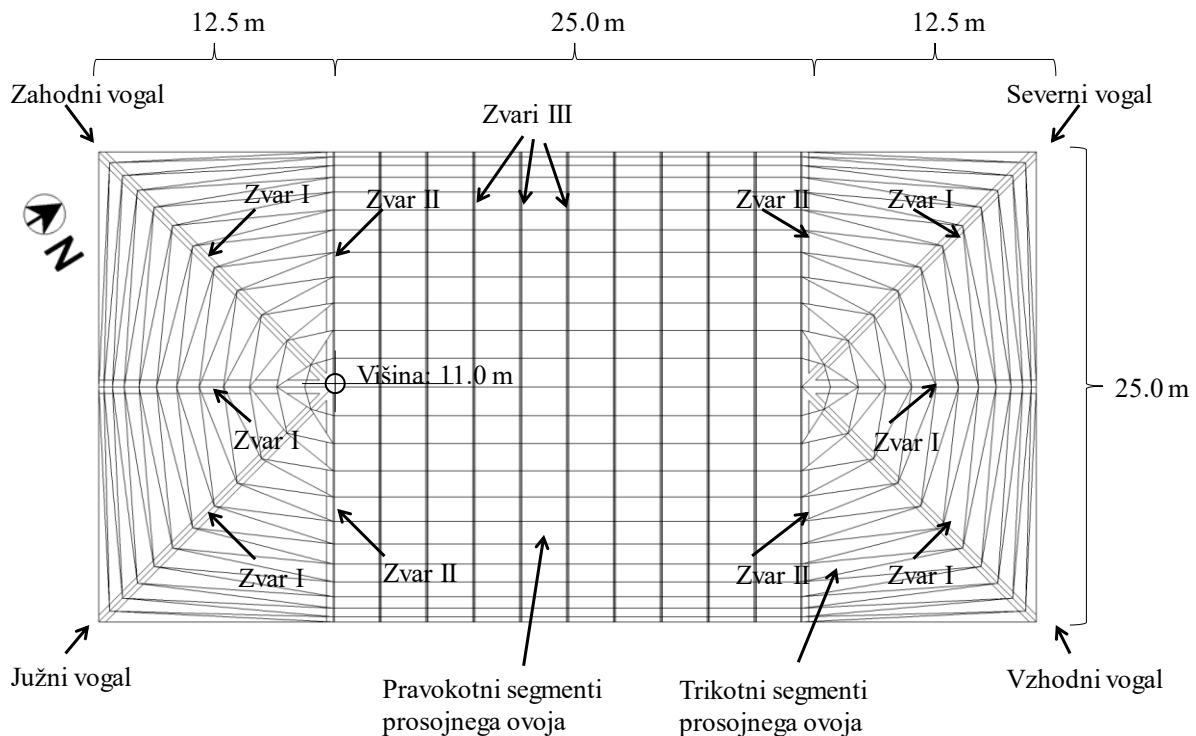
**Preglednica 2.3.3.1:** Razlika med temperaturo, simulirano z EnergyPlus (kalibrirani model) in temperaturo, izmerjeno na pozicijah  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{\text{cav}}$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  [°C]

**Table 2.3.3.1:** Difference between the EnergyPlus simulated temperature (calibrated model) and the measured temperature at positions  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{\text{cav}}$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  [°C]

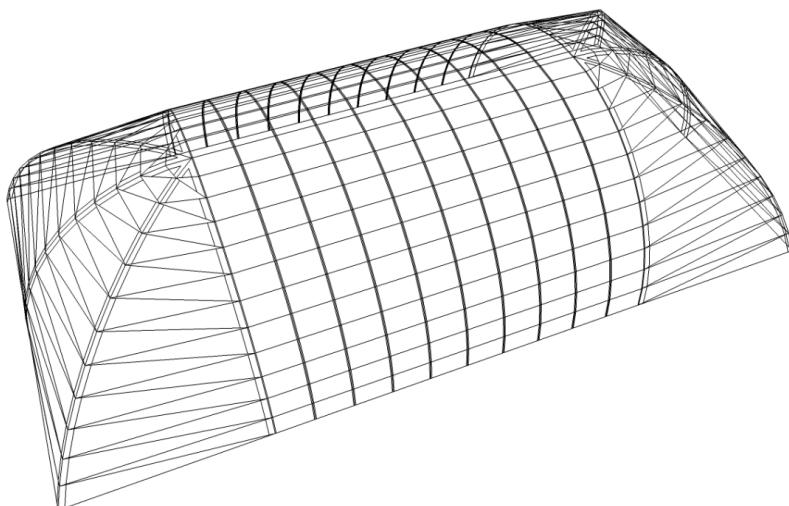
	Razlika v temperaturi med kalibriranim modelom in meritvijo [°C]			
$T_1$	Povp.	1,45	Maks.	9,72
$T_2$	Povp.	6,92	Maks.	43,95
$T_{\text{cav}}$	Povp.	1,20	Maks.	20,06
$T_3$	Povp.	2,01	Maks.	22,72
$T_4$	Povp.	2,96	Maks.	12,82

Povzeto po [154]

A



B



**Slika 2.3.3.1:** Geometrijski model ŠDB za izračun njenega toplotnega odziva in energije, potrebne za njeno ogrevanje in hlajenje, s programom EnergyPlus. Tloris geometrijskega modela z označenimi dimenzijami in mestimi zvarov med segmenti ovoja (A). 3D pogled geometrijskega modela (B)

**Figure 2.3.3.1:** Geometry model of the air-supported dome at Brezovica used for EnergyPlus calculations of the building's thermal response and energy use for heating and cooling. Top view of the model with dimensions and location of welds between tubular envelope segments (A). 3D view of the geometry model (B)

Deuk-Woo in Cheol-Soo [156] sta pripravila podrobno analizo razlik med eksperimentalno in z računalniškimi simulacijami (EnergyPlus 6.0) pridobljenimi podatki o delovanju škatlastega okna testne sobe, ki predstavlja eno od osnovnih tipologij dvojno zastekljenih fasad. Njuna ocena rezultatov pretežno temelji na razlikah med izmerjeno in simulirano temperaturo petih pozicij v prečnem prerezu fasade (**preglednica 2.3.3.1**): temperatura zunanje ( $T_1$ ) in notranje ( $T_2$ ) strani zunanje zasteklitve, temperatura zraka v zračnem kanalu ( $T_{cav}$ ) ter temperatura zunanje ( $T_3$ ) in notranje ( $T_4$ ) strani notranje zasteklitve. Iz **preglednice 2.3.3.1** je razvidno, da so te razlike kljub opravljeni kalibraciji tudi v povprečju precej visoke in, razen v primeru  $T_1$  in  $T_{cav}$  precej nad pričakovano natančnostjo termočlenov  $\pm 1^\circ\text{C}$  [156].

Avtorji raziskave so opredelili tri glavne vzroke za napake: nezanesljivost in napake pri meritvah, predpostavke in poenostavitev pri pripravi geometrijskega modela ter omejitve računalniškega programa EnergyPlus. Glavna vira napak so pripisali dejству, da točne geometrije vključujejo špranje ni mogoče podati, njihov vpliv na pretok zraka pa ni zanemarljiv ter omejenosti programa za uporabo enačb izračuna koeficiente konvekcijskega prenosa toplotne v skladu s standardom ISO 15099 [119].

EnergyPlus (7.0) uporabi standard ISO 15099:2003 za dvojne zasteklitve tako z zaprtim zračnim kanalom kot prezračevanim [154], s čimer je avtomatično privzeto, da bilančni izračuni temeljijo na stacionarnem stanju [119].

Za izračune toplotnega odziva ŠDB in energije, potrebne za njeno ogrevanje in hlajenje, je bil pripravljen geometrijski model (**slika 2.3.3.1**) po zgledu študije dnevne osvetljenosti ŠDB (**slika 2.3.2.1**). Podrobnejša razdelitev ploskev (**slika 2.3.3.1**) je bila pripravljena, da bi bilo mogoče upoštevati tudi mesta, kjer so posamezni cevasti segmenti kupole stavbe (**slika 2.1.1.2**) zvarjeni med seboj in pomenijo potencialno oslabitev toplotne izolacije v primeru sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. V vseh izračunih je bilo privzeto, da so zvari neprosojni za sončno sevanje. Na sredinskem cilindričnem delu, kjer so uporabljeni pravokotni segmenti ovoja, imajo zvari (Zvar III, **slika 2.3.3.1**) realne dimenzije, medtem ko sta zvara I in II (**slika 2.3.3.1**) vsota zvarov na delu konstrukcije, modeliranem s trikotnimi elementi. Skupna površina zvarov je približno 6 % celotne površine ovoja ŠDB.

### 3 REZULTATI

#### 3.1 Materiali, meritve optičnih lastnosti, meritve hitrosti in temperature zraka v dvojnem membranskem zračno podprttem ovoju ter terenske meritve dnevne osvetljenosti in toplotnega odziva vzorčne zračno podprte stavbe

##### 3.1.1 Optične lastnosti dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica v sončnem in toplotnem spektru elektromagnetskega valovanja

###### 3.1.1.1 Laboratorijska raziskava optičnih lastnosti na celotnem spektru sončnega sevanja od 300 nm do 2500 nm

Za ponazoritev optičnih lastnosti obstoječega in predloga nove rešitve dvojnega membranskega zračno podprtrega ovoja in posameznih komponent oziroma materialov (**preglednice 2.1.1.1, 2.1.2.1, 2.1.2.2, 2.1.2.3**) so bili vzorci le-teh, položeni v ustrezeno komoro spektrometra (orientacija vzorcev je razvidna s **slike 2.2.1.3**) in pripadajoče totalne (hemisferične) spektralne prepustnosti  $TT(\lambda)$  in totalne (hemisferične) spektralne odbojnosti  $TR(\lambda)$ , pomerjeni (**sliki 3.1.1.1 in 3.1.1.2**).

###### 3.1.1.1.1 Svetlobne optične lastnosti

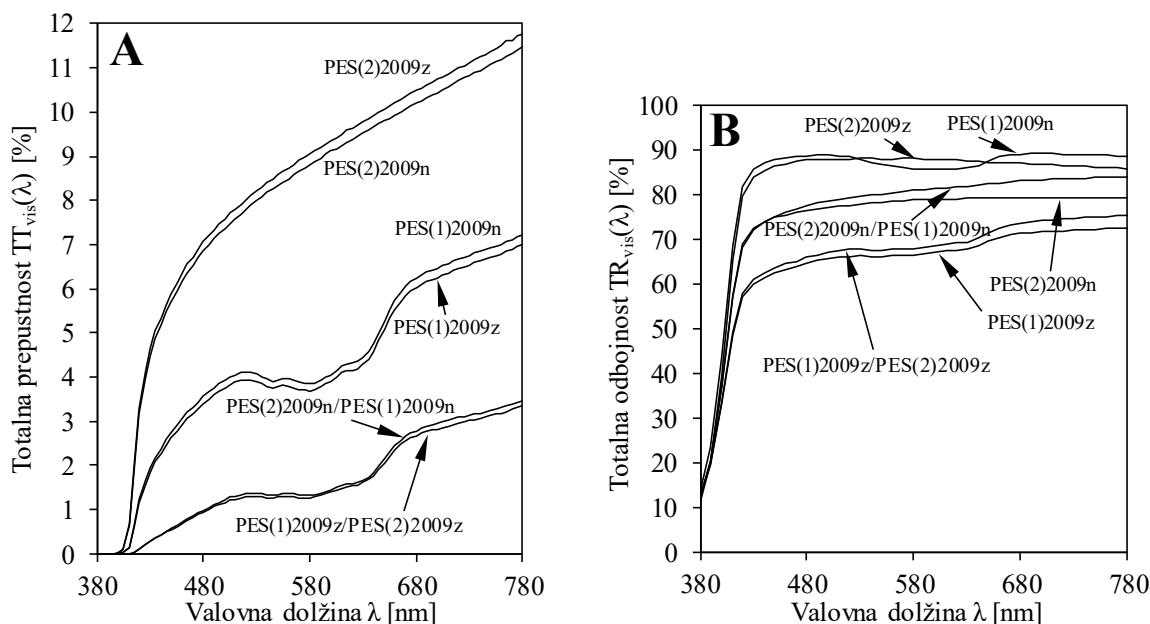
V skladu s pričakovanji so bili spektri prepustnosti  $TT(\lambda)$  (**slika 3.1.1.1**) za obe stranici tako rekoč enaki. Teoretično izpeljavo oziroma dokaz, da je to mogoče pričakovati, podajo Stegmaier in soavtorji [157]. Spektralno povprečne vrednosti  $TT_{vis}$ ,  $DT_{vis}$ , motnost (H) in  $TR_{vis}$  so podane v **preglednici 3.1.1.1**.

**Preglednica 3.1.1.1:** Totalna prepustnost ( $TT_{vis}$ , [%]), difuzna prepustnost ( $DT_{vis}$ , [%]), motnost (H, [%]) in totalna odbojnost ( $TR_{vis}$ , [%]) različnih vzorcev tkanin, folij, izolacijske odeje in kompozitov za spektralno območje 380–780 nm

**Table 3.1.1.1:** Total transmittance ( $TT_{vis}$ , [%]), diffuse transmittance ( $DT_{vis}$ , [%]), haze (H, [%]) and total reflectance ( $TR_{vis}$ , [%]) of various fabrics, foils, aerogel blanket and their composites of visible spectral range between 380 nm and 780 nm

Vzorec	d [mm]	TT <sub>vis</sub> [%]	DT <sub>vis</sub> [%]	H [%]	TR <sub>vis</sub> [%]
Vzorci posameznih tkanin, folij in izolacijske odeje					
PES(1)2009z	0,740	4,1	4,1	99,1	66,5
PES(1)2009n	0,740	3,9	3,9	99,1	87,1
PES(2)2009z	0,430	8,9	8,9	99,2	88,0
PES(2)2009n	0,430	8,7	8,6	99,2	78,3
ETFE	0,300	89,0	9,0	9,5	9,8
PEfabric	0,340	73,4	64,8	87,8	26,5
aerogel	10,000	4,0	4,0	98,6	76,3
Kompoziti sestavljeni iz folij in izolacijske odeje					
PES(1)2009z/PES(2)2009z	1,170	1,4	1,4	99,1	68,0
PES(2)2009n/PES(1)2009n	1,170	1,4	1,4	99,1	80,3
ETFE/ETFE	0,600	79,8	15,6	19,0	17,7
PEfabric/aerogel/PEfabric	10,680	3,9	3,9	98,9	77,8
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	11,280	3,7	3,7	99,0	80,0

Rezultati v **preglednici 3.1.1.1** s sočasnim pregledom izmerjenih spektrov (**slika 3.1.1.1**) so razkrili, da imata tkanini PES(1)2009 in PES(2)2009 nizko  $TT_{vis}$ , ki sta močno odvisni od debeline vzorca, in je manjša za debelejšo PES(1)2009 (4,0 % proti 8,8 %). Manj nazorne, vendar vseeno razločne, so bile razlike v vrednostih  $TR_{vis}$ . Notranja stranica (-n) zunanje membrane PES(1)2009 je imela višjo  $TR_{vis}$  (87,1 %) kot njena zunanja stranica (-z), ki je bila opazno nižja in enaka 66,5 %. Dobavljeni rezultat je mogoče razložiti z dejstvom, da je bila zunanja stranica po več letih izpostavljenosti zunanjemu okolju umazana. Podobno je bilo ugotovljeno za notranjo membrano PES(2)2009, katere  $TR_{vis}$  zunanje stranice (-z) je bila približno 9,7 % višja od  $TR_{vis}$  notranje, bolj umazane, stranice PES(2)2009n.



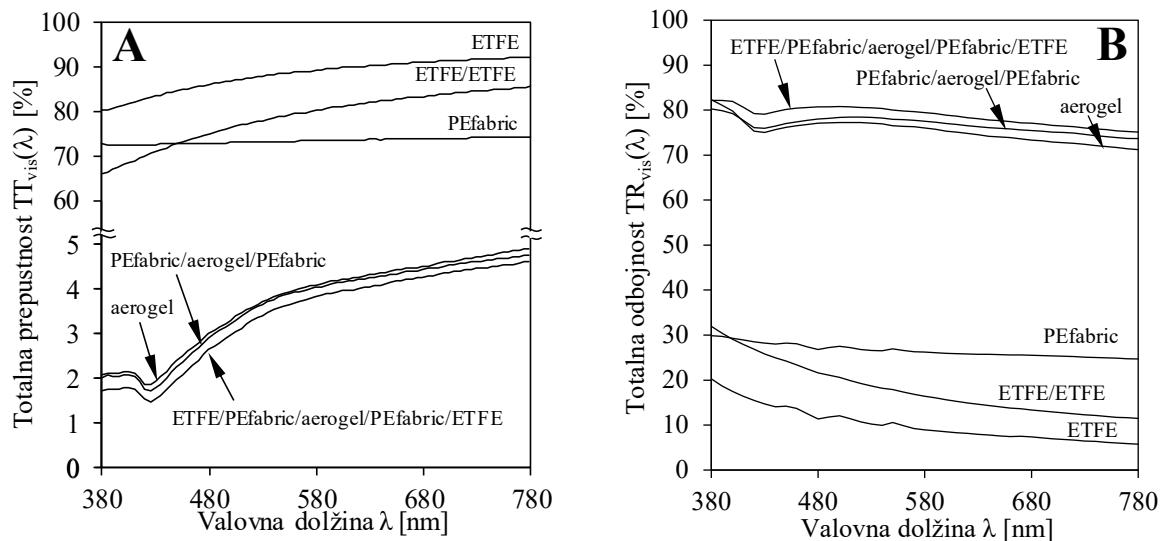
**Slika 3.1.1.1:** Totalna (hemisferična) spektralna prepustnost  $TT_{vis}(\lambda)$  [%] (A) in totalna (hemisferična) spektralna odbojnost  $TR_{vis}(\lambda)$  [%] (B) vzorcev PES(1)2009 (zunanja membrana) in PES(2)2009 (notranja membrana) in njunega kompozita PES(1)2009/PES(2)2009 na spektralnem območju od 380 nm do 780 nm. Oznaki -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na **sliki 2.2.1.3**

**Figure 3.1.1.1:** Total (hemispherical) spectral transmittance  $TT_{vis}(\lambda)$  [%] (A) and total (hemispherical) spectral reflectance  $TR_{vis}(\lambda)$  [%] (B) of samples PES(1)2009 (external membrane), PES(2)2009 (internal membrane) and their composite PES(1)2009/PES(2)2009 on spectral range from 380 nm to 780 nm. Labels -n and -z mark the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in **Figure 2.2.1.3**

S **slike 3.1.1.1** in podatkov v **preglednici 3.1.1.1** je mogoče sklepati, da se tkanini PES(1)2009 in PES(2)2009 razlikujeta. Padec vrednosti spektralne prepustnosti  $TT(\lambda)$  tkanine PES(1)2009 v območju spektra med 520 in 680 nm (**slika 3.1.1.1 A**) je bil pripisan absorpciji PVdF (poliviniliden fluorid) laka, nanesenega na obe stranici zunanje membrane PES(1)2009. Vpliv laka je razviden tudi iz spektrov odbojnosti za tkanino PES(1)2009 na **sliki 3.1.1.1 B**, medtem ko pri tkanini PES(2)2009 tega ni mogoče zaslediti. Dejstvo, da je prevlečena le zunanja membrana, je bilo potrjeno tudi z ATR-analizo [82].

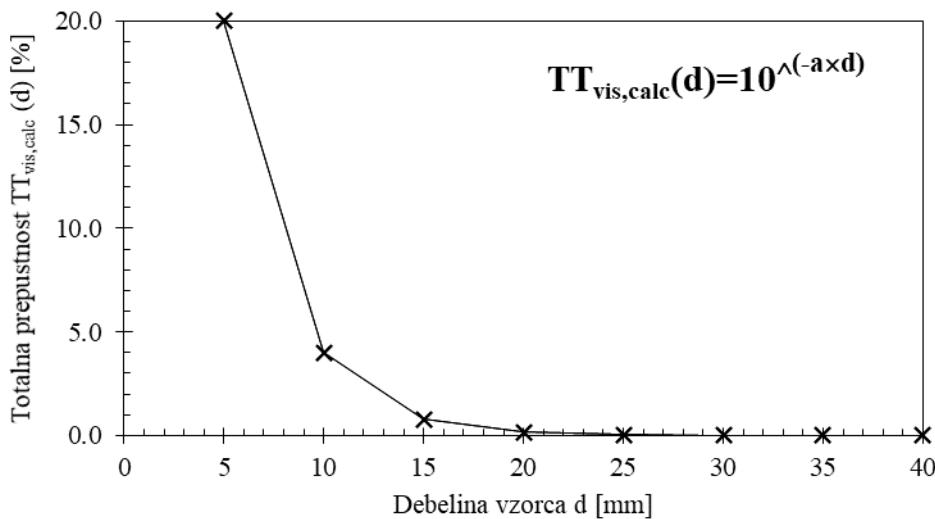
Spekter prepustnosti  $TT(\lambda)$  vzorca kompozita, ki ponazarja obstoječo različico dvojnega membranskega sklopa PES(1)2009/PES(2)2009 (**slika 3.1.1.1 A**) je imel občutno nižje (v povprečju je absolutna razlika

enaka 2,8 %) vrednosti kot posamezni tkanini z maksimalno vrednostjo približno 3,4 % v območju NIR-sevanja in padajočim trendom na območju vidnega sevanja.



**Slika 3.1.1.2:** Totalna (hemisferična) spektralna prepustnost  $TT(\lambda)$  [%] (A) in totalna (hemisferična) spektralna odbojnost  $TR(\lambda)$  [%] (B) vzorcev tkanine PEfabric, folije ETFE, izolacijske odeje aerogel in kompozitov ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE

**Figure 3.1.1.2:** Total (hemispherical) spectral transmittance  $TT(\lambda)$  [%] (A) and total (hemispherical) spectral reflectance  $TR(\lambda)$  [%] (B) of fabric sample PEfabric, foil ETFE, aerogel insulation blanket Spaceloft® and composites ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE



**Slika 3.1.1.3:** Izračunana (hemisferična) prepustnost vidne svetlobe  $TT_{vis,calc}(d)$  [%] aerogelne odeje v odvisnosti od debeline d [mm]

**Figure 3.1.1.3:** Calculated (hemispherical) visible light transmittance  $TT_{vis,calc}(d)$  [%] of aerogel insulation blanket Spaceloft® in dependence on sample thickness d [mm]

Za pripravo primerov analize topotno izoliranega konstrukcijskega sklopa je bilo najprej treba oceniti odvisnost  $TT_{vis}$  od debeline vzorca aerogelne odeje. Kot je bilo že predstavljeno, je osnovna debelina aerogelne odeje 10 mm. Vsi nadaljnji primeri debeline topotnoizolacijskega sloja, pomembni tudi za analizo topotnega odziva stavbe oziroma rabe energije za ogrevanje in hlajenje, pa naj bi bili sestavljeni kot večkratnik debeline osnovnega vzorca (npr. 20 mm in 40 mm). Spekter prepustnosti  $TT(\lambda)$  aerogelne odeje je prikazan na **sliki 3.1.1.2 A**, v **preglednici 3.1.1.1** pa je podana vrednost  $TT_{vis}$ . Kot je opisano v poglavju 2.2.1 smo vpliv debeline vzorca na prepustnost ocenili s pomočjo Beer Lambertovega zakona (14).

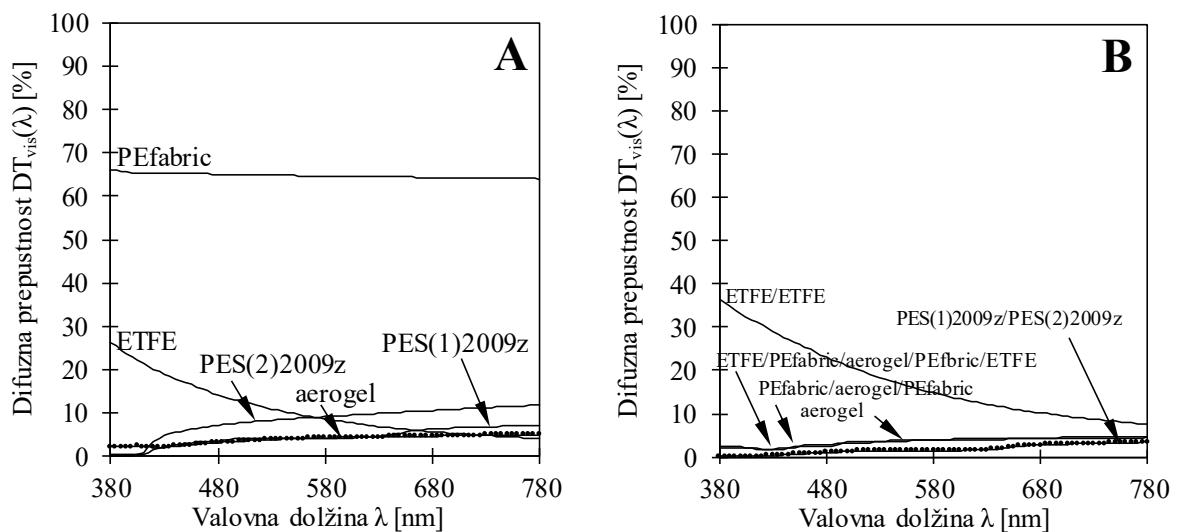
Rezultati izračuna  $TT_{vis,calc}(d)$ , prikazani na **sliki 3.1.1.3**, so pokazali, da bi 15 mm debela odeja imela le še slab odstotek prepustnosti (0,8 %), 20 mm debela odeja pa bi imela že skoraj zanemarljivo prepustnost (0,16 %). Tanjša, 5 mm debela različica, pa bi imela vrednost  $TT_{vis,calc}$  kar 5-krat večjo kot izvorna različica ( $d = 10 \text{ mm}$ ) in bi znašala 20 %. Prepustnost homogene plasti aerogelne odeje, bi bila teoretično enakovredna prepustnosti sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z pri debelini 13,2 mm.

Spektri prepustnosti in odbojnosti aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® in preostalih komponent kompozitne membrane ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, prikazani na **sliki 3.1.1.2 A** in **B** so bili uporabljeni za izračun vrednosti  $TT_{vis}$  in  $TR_{vis}$  (poglavlje 2.2.1), ki so služili za izračun količnika dnevne svetlobe (KDS), kot je prikazano v nadaljevanju. Rezultati (**slika 3.1.1.2 A** in **B**) so razkrili, da  $TT_{vis}$  za izolirano različico dvojne membrane, sestavljene iz dveh folij ETFE (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE), znaša 3,7 % (**preglednica 3.1.1.1**), kar je več kot 2,5-krat višja vrednost kot pri obstoječem dvojnem membranskem konstrukcijskem sklopu PES(1)2009/PES(2)2009 ( $TT_{vis} = 1,4 \%$ , **preglednica 3.1.1.1**). Tak rezultat lahko pripisemo dejству, da je totalna prepustnost aerogelne odeje Spaceloft® zelo podobna tisti od zunanje membrane PES(1)2009z in da je bila ta kombinirana z visoko-prepustnima, nizko-odbojnima in absorptivnima tkanino PEfabric in folijo ETFE namesto notranje membrane PES(2)2009z. Dobljeni rezultat se odraža tudi na celotnem spektru totalne prepustnosti  $TT_{vis}(\lambda)$  med 380 in 780 nm, saj je ta večja pri vzorcu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, v povprečju absolutno za 2,6 %.

Če pogledamo podrobnejše, kako posamezni sloji predlagane izolirane različice dvojnega membranskega ovoja vplivajo na spektralne optične lastnosti sklopa, opazimo (**slika 3.1.1.2**), da ima tkanina PEfabric skoraj enakomerno spektralno porazdelitev prepustnosti, kar pomeni, da bi se razmerja med vrednostmi  $TT_{vis}(\lambda)$  pri različnih valovnih dolžinah pri prehodu svetlobe ohranila oziroma bi prepuščena svetloba ohranila barvo, a bi se zmanjšala gostota svetlobnega toka. V nasprotju s tem kompozit PEfabric/aerogel/PEfabric praktično hrani vrednosti prepustnosti oziroma se  $TT_{vis}(\lambda)$  zmanjša le znatno (v povprečju absolutno 0,2 %). Folija ETFE je bolj prepustna kot tkanina PEfabric na celotnem spektru vidne svetlobe in ima vzdolž spektra naraščajoč trend. Njeno razmerje med maksimalno in minimalno spektralno prepustnostjo  $TT_{vis}(\lambda)$  se z dodatkom še enega sloja nekoliko poveča (1,15-krat). Vključitev kompozita PEfabric/aerogel/PEfabric med ETFE-foliji sicer močno zmanjša prepustnost sklopa ETFE/ETFE, v povprečju kar za 96 %, vendar je  $TT_{vis}$  izoliranega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE v primerjavi s prepustnostjo aerogelne odeje manjša le za 0,3 % (**preglednica 3.1.1.1**). Razmerje med maksimalno ( $TT_{vis}(780 \text{ nm}) = 85,6 \%$ ) in minimalno ( $TT_{vis}(420 \text{ nm}) = 65,8 \%$ ) vrednostjo  $TT_{vis}(\lambda)$  znaša 1,3 in se za ETFE/ETFE približno podvoji, na vrednost 2,64.

Pri novem predlogu konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE na njegovo totalno spektralno odbojnosc  $TR_{vis}(\lambda)$  vplivata predvsem sloja zunanje tkanine PEfabric in aerogelna odeja, saj je  $TR_{vis}(\lambda)$  za vzorec ETFE bistveno nižja ( $TR_{vis}$  približno 6,8-krat nižja) kakor za PES(1)2009z, kljub

umazaniji na zadnji tkanini, in hkrati tudi neprimerljivo bolj prepustna (**sliki 3.1.1.1 A** in **B** ter **preglednica 3.1.1.1**). Ker je ETFE za razliko do PES(1)2009 prepusten pri valovnih dolžinah nižjih od 450 nm (UV-sevanje) je treba opozoriti na potencialno UV-staranje in posledično poslabšanje svetlobnih lastnosti drugih slojev v celotnem sklopu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Poleg tega je treba izpostaviti, naj bo z vidika varovanja zdravja uporabnika, obstojnosti drugih materialov v dvorani ali pa potreb agronomije, da obravnavani vzorec topotno izoliranega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE tudi prepušča del UV sevanja. Prepustnost vzorcev variant konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja izključno za UV sevanje je podana v nadaljevanju.



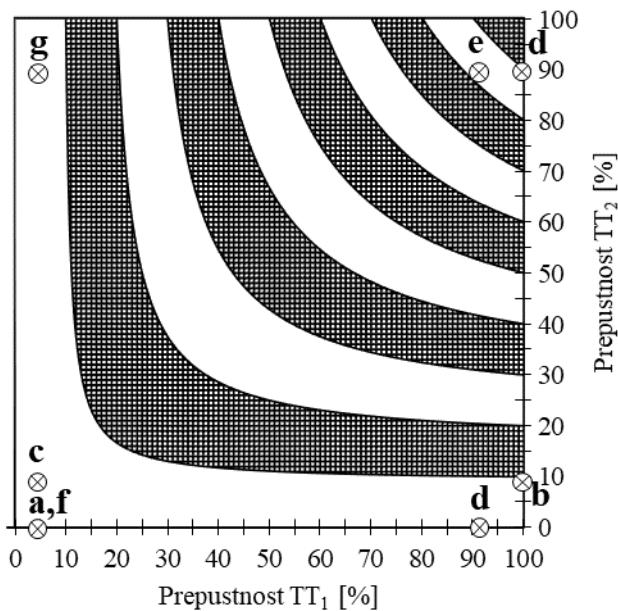
**Slika 3.1.1.4:** Difuzna (hemisferična) spektralna prepustnost  $DT(\lambda)$  [%] vzorcev posameznih materialov PES(1)2009z, PES(2)2009z, ETFE, PEfabric in aerogel (A) ter vzorci kompozitov PES(1)2009z/ PES(2)2009z, ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B)

**Figure 3.1.1.4:** Diffuse (hemispherical) spectral transmittance  $DT(\lambda)$  [%] of individual material samples PES(1)2009z, PES(2)2009z, ETFE, PEfabric and aerogel (A) and samples of composites PES(1)2009z/ PES(2)2009z, ETFE/ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B)

Rezultati določitve motnosti ( $H$  [%]) obravnavanih vzorcev (**preglednica 3.1.1.1**) pokažejo, da je mogoče le folijo ETFE opredeliti kot prozorno membrano, ki le malo sipa prepuščeno svetlobo ( $H = 9,5\%$ ), oziroma je večino prepušča direktno. Poleg tega je s **slike 3.1.1.4** razvidno, da folija ETFE najbolj sipa vijoličasti del spektra vidne svetlobe, proti rdečemu delu spektra, kjer je delež difuzne prepustnosti  $DT(\lambda)$  (%) najmanjši, pa le ta vztrajno pada.

Difuzna spektralna prepustnost  $DT(\lambda)$  vzorcev posameznih materialov, ki so že v osnovi motni (PES(1)2009, PES(2)2009, PEfabric in aerogel), je sicer nižja, vendar skoraj enaka totalni spektralni prepustnosti  $TT(\lambda)$  na celotnem območju spektra vidne svetlobe, zato jih lahko opredelimo kot prosojne. Vzorca tkanin PES(1)2009z in PES(2)2009z ter aerogel, ravno nasprotno kot folija ETFE, sipajo najbolj rdeči del spektra vidne svetlobe, proti kateremu delež difuzne spektralne prepustnosti vztrajno narašča. Motnost (**preglednica 3.1.1.1**) vzorcev PES(1)2009, PES(2)2009 in aerogela je praktično enaka, približno 99-odstotna, motnost vzorca PEfabric pa 87,8-odstotna.

Vsi vzorci kompozitov (PEfabric/aerogel/PEfabric, PES(1)2009z/PES(1)2009z, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE), razen ETFE/ETFE ( $H = 19\%$ ), so prav tako prosojni, saj je vsaj en sloj v kompozitu skoraj popolnoma moten ( $H$  je enak približno 99 %), hkrati pa je bilo že poudarjeno, da obravnavani motni materiali močno sipajo svetlobo praktično na celotnem spektru med 380 in 780 nm.



**Slika 3.1.1.5:** Izračunana totalna prepustnost  $TT_{vis}$  [%] vzorcev dvojnega elementa z vzporednima stranicama: PES(1)2009z (a), PES(2)2009z (b), PES(1)2009z/PES(2)2009z (c), ETFE (d), ETFE/ETFE (e), PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (prička 3.1.1.A) (f) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (g) v skladu z (2) (poglavlje 2.2.1)

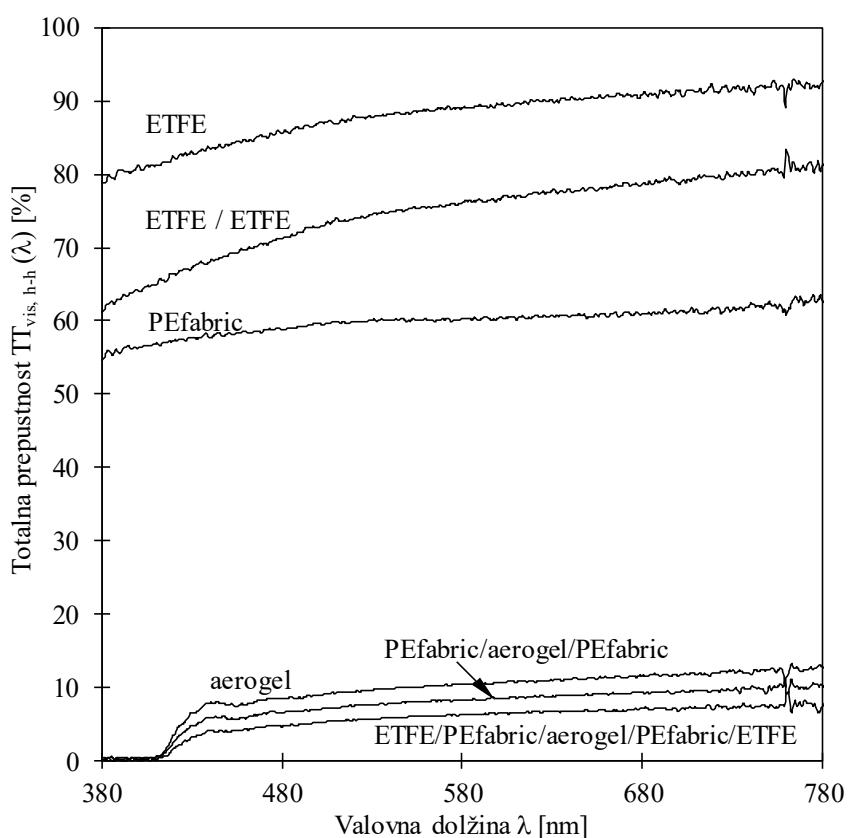
**Figure 3.1.1.5:** Calculated total transmittance  $TT_{vis}$  [%] of double membrane element with parallel sides: PES(1)2009z (a), PES(2)2009z (b), PES(1)2009z/PES(2)2009z (c), ETFE (d), ETFE/ETFE (e), PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (Appendix 3.1.1.A) (f) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (g) in accordance with (2) (see chapter 2.2.1)

Za kvalitativno oceno, kako vpliva odboj med stranicama PES(1)2009n in PES(2)2009z, je bila vrednost  $TT_{vis}$  za hipotetični varianti PES(1)2009z/zrak/PES(2)2009z in ETFE/zrak/ETFE izračunana iz vrednosti  $TT_{vis}$  za vzorce PES(1)2009z, PES(2)2009z in ETFE (preglednica 3.1.1.1) ter vrednosti  $TR_{vis}$  za vzorce PES(1)2009n, PES(2)2009z in ETFE (preglednica 3.1.1.1) z uporabo (3) (poglavlje 2.2.1), kot je to predlagal že Huntington [42]. Rezultati so prikazani na sliki 3.1.1.5.

Kot pokažejo rezultati, kljub temu, da so bili vzorci, ki ponazarjajo dvojno membrano z zračnim kanalom, staknjeni skupaj, izmerjene vrednosti zanemarljivo malo odstopajo od izračunanih po (1) (poglavlje 2.2.1). Pri obstoječem sklopu PES(1)2009z/PES(2)2009z je bila povprečna absolutna deviacija, izračunana z enačbo (25), 0,04 %, pri sklopu ETFE/ETFE 0,17 %. Tako je bil večji vpliv odbojnosti pripisan foliji ETFE z bolj gladko površino, manjšo motnostjo in višjo prepustnostjo.

### 3.1.1.2 Terenske meritve svetlobnih lastnosti s prenosnim spektrometrom v razmerah dejanskega oblačnega neba

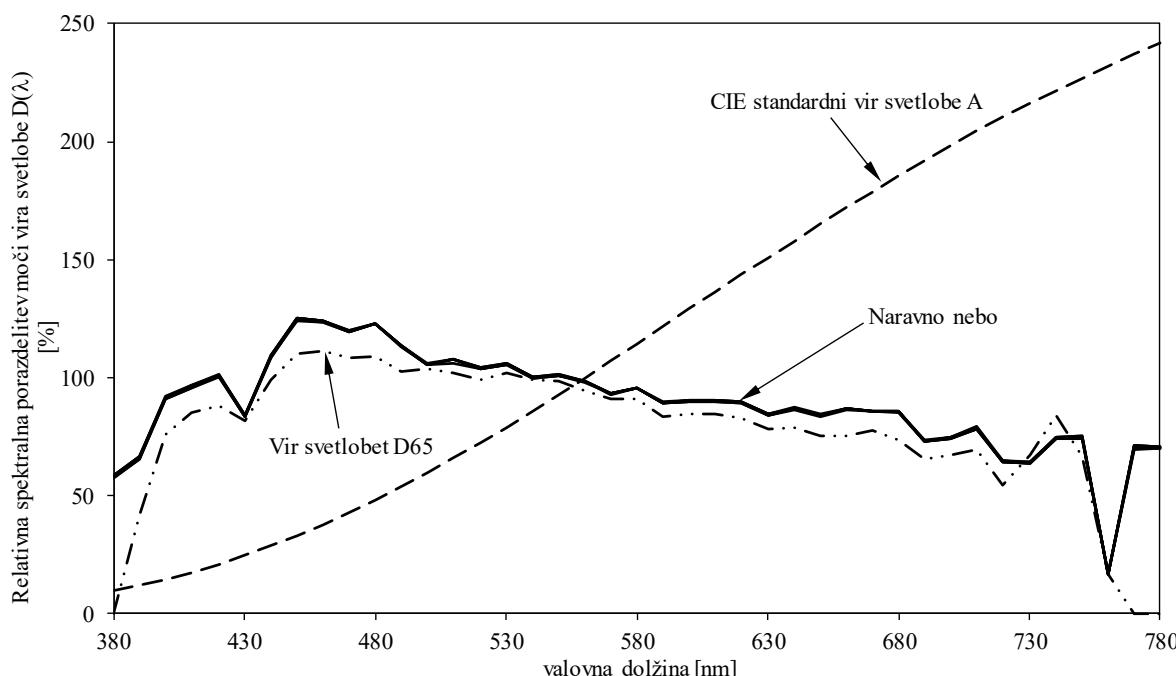
Pri primerjavi spekrov  $TT_{vis,h-h}(\lambda)$ , podanih na **sliki 3.1.1.6** s spektri  $TT_{vis,n-h}(\lambda)$  (**sliki 3.1.1.1** in **3.1.1.2**) neposredno opazimo, da so spektri, ki pripadajo istima vzorcema folije ETFE in sklopa ETFE/ETFE, zelo podobni, kar pa ni res za vzorca aerogel in PEfabric.  $TT_{vis,h-h}(\lambda)$  je večji od  $TT_{vis,n-h}(\lambda)$  na celotnem območju spektra vidne svetlobe, ravno nasprotno kot za vzorec PEfabric, za katerega je  $TT_{vis,h-h}(\lambda)$  manjši, kar nakazuje, da porazdelitev prepustnosti v odvisnosti od vpadnega kota po hemisferi ni enakomerna. Hkrati je opaziti, da aerogel pri  $TT_{vis,h-h}(\lambda)$  na območju UV svetlobe ni prepusten, kar dodatno potrjuje, da se UV-svetloba pod drugimi vpadnimi kakor  $0^\circ$  dobro absorbira, medtem, ko vzorca ETFE in PEfabric dobro prepuščata UV-svetlobo v obeh primerih meritev svetlobnih lastnosti.



**Slika 3.1.1.6:** Na terenu izmerjena totalna hemisferična-hemisferična spektralna prepustnost  $TT_{vis,h-h}(\lambda)$  [%] nove izolirane različice dvojnega membranskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, izolacijskega kompozita PEfabric/ETFE/PEfabric in posameznih materialov (PEfabric, ETFE, aerogel) za vidno svetlobo na območju spektra vidne svetlobe od 380 nm do 780 nm

**Figure 3.1.1.6:** Total hemispherical-hemispherical spectral transmittance  $TT_{vis,h-h}(\lambda)$  [%] of the new thermally insulated version of the double membrane envelope constructional complex ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ ETFTE, insulation composite PEfabric/ETFE/PEfabric and individual materials (PEfabric, ETFE, aerogel) in the spectral range from 380 nm to 780 nm

Vstavitev izolacijskega kompozita PEfabric/aerogel/PEfabric sklopu ETFE/ETFE zmanjša hemisferično-hemisferično spektralno prepustnost na delež, manjši od 10 %, maksimalno vrednost približno 8 % pa spekter doseže na zgornjem robu območja spektra vidne svetlobe.



**Slika 3.1.1.7:** Relativne spektralne porazdelitve sevalnega toka  $D(\lambda)$  [%] CIE standardnega svetila A, svetila D65 in neba v času meritev svetlobnih lastnosti dne 25. 11. 2015, normalizirane pri valovni dolžini 555 nm

**Figure 3.1.1.7:** Relative spectral distribution  $D(\lambda)$  [%] of CIE standard illuminant A, illuminant D65 and natural sky radiation flux normalized at wavelength of 555 nm. The spectral distribution of sky radiation flux was recorded on 25th November 2015

**Preglednica 3.1.1.2:** Totalna hemisferična-hemisferična prepustnost  $TT_{vis,h-h}$  [%] neizolirane in izolirane različice dvojnega membranskega sklopa ETFE/ETFE in posameznih komponent za vidno svetlobo na območju spektra vidne svetlobe od 380 nm do 780 nm

**Table 3.1.1.2:** Total hemispherical-hemispherical transmittance  $TT_{vis,h-h}$  [%] of uninsulated and insulated version of ETFE/ETFE constructional complex and its individual layers of visible spectral range between 380 nm and 780 nm

Vzorec	$T_{vis,h-h}$ [%] naravno nebo	$T_{vis,h-h}$ [%] vir svetlobe D65
Vzorci posameznih tkanin, folij in izolacijske odeje		
ETFE	88,5	88,5
PEfabric	60,1	60,1
aerogel	10,0	10,0
Kompoziti		
ETFE+ETFE	75,2	75,2
PEfabric/aerogel/PEfabric	7,9	7,9
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	5,9	5,9

Na **sliki 3.1.1.7** so podane relativne spektralne porazdelitve sevalnega toka (SPD) (ang. »spectral power distribution«) CIE standardnega svetila A, svetila D65 in neba v času meritev svetlobnih optičnih lastnosti dne 25. 11. 2015, normalizirane na valovno dolžino 555 nm. Krivulja, ki ponazarja SPD dejanskega neba, ponazarja porazdelitev za vse ponovitve meritev svetlobnih lastnosti, le da so razlike praktično zanemarljive. SPD dejanskega neba se s SPD svetila D65 v povprečju razlikujejo manj kot za 10 %, zato so bile meritve privzete kot relevantne. To se odraža tudi v do decimalke odstotka identičnih vrednostih izračunanih vrednosti  $TT_{vis,h-h,sky}$  in  $TT_{vis,h-h,D65}$ .

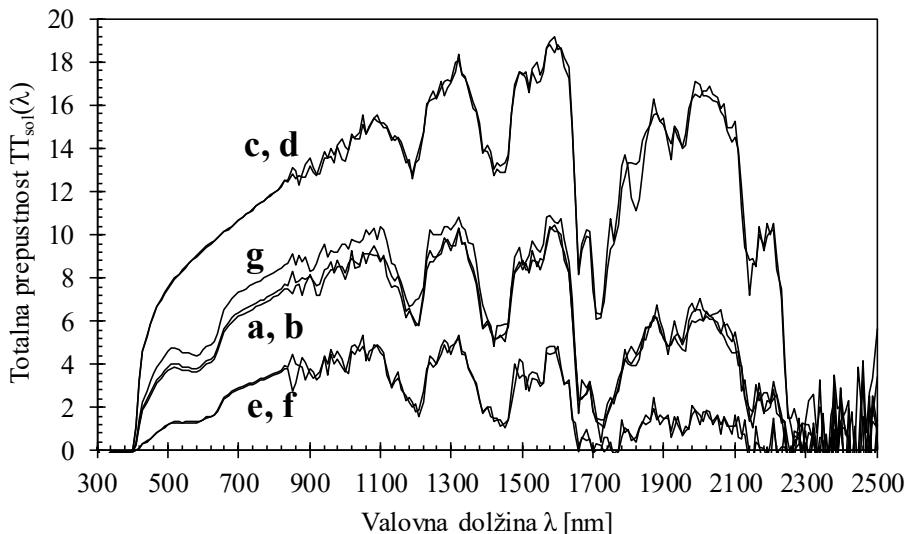
Čeprav izvedba gonifotometričnih meritev svetlobnih lastnosti vzorcev, navedenih v **preglednicah 2.1.1.1** in **2.1.2.1**, ni bila mogoča, v **preglednici 3.1.1.2** zbrane vrednosti izračunane totalne hemisferične-hemisferične prepustnosti ob privzeti veljavnosti predpostavk (poglavlje 2.2.1) nakažejo vpliv odvisnosti prepustnosti vzorca za vidno svetlobo od smeri vpadne svetlobe. Najizrazitejši vpliv nakaže rezultat za aerogelno odejo, za katerega je  $TT_{vis,h-h}$  (**preglednica 3.1.1.2**) 2,5-krat višja kakor  $TT_{vis,n-h}$  (**preglednica 3.1.1.1**), izmerjena po metodologiji pojasnjeni v podpoglavlju 2.2.1.3. Da prepustnost vzorca pri vpadih kotih, večjih od  $0^\circ$  (smer normale na površino vzorca) ni vedno višja, pokaže rezultat za PE-tkanino (PEfabric), za katero je  $TT_{vis,h-h}$  (**preglednica 3.1.1.2**) manjša za 13,3 % kot  $TT_{vis,n-h}$  (**preglednica 3.1.1.1**). Morda celo po naključju, pa vendar je opaziti, da vrednosti  $TT_{vis}$  in  $TT_{vis,h-h}$  za vzorec PEfabric sledita Lambertovemu kosinusnemu zakonu. Zanimivo je tudi, da je za folijo ETFE rezultat obeh meritev tako rekoč enak (**preglednici 3.1.1.1** in **3.1.1.2**), razlika v spektralno povprečnih vrednostih pa pričakovano majhna, saj je razlika v spektralni prepustnosti manjša od 5 %. V skladu z dejstvom, da je prepustnost  $TT_{vis,h-h}$  za aerogelno odejo višja, so ustrezno višji tudi rezultati za vzorce kompozitov. To pokaže tudi dejstvo, da je za izolirano različico sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE razmerje med  $TT_{vis,h-h}$  in  $TT_{vis,n-h}$  enako 1,6. Čeprav je bila višja vrednost  $TT_{vis,h-h}$  predvidoma ugodna, opravljeni eksperiment ni podal natančnih podatkov o odvisnosti prepustnosti  $TT_{vis,h-h}$  vzorca od vpadnega kota svetlobe in ali je z gotovostjo mogoče trditi, da dobljeni rezultat ni posledica le neustreznega razmerja med velikostjo vzorca in velikostjo integracijske sfere. Na podlagi teh ugotovitev je bilo za nadaljnje raziskovalno delo privzeto, da je rezultat, pridobljen po metodologiji spektrometrije v laboratoriju ( $TT_{vis,n-h}$ ), merodajen in na varni strani.

### 3.1.1.1.3 Sončne optične lastnosti

S **slike 3.1.1.8** je razvidno, da so prikazani sončni spektri na območju vidne svetlobe med 380 in 780 nm zvezno gladki na območju valovnih dolžin NIR sevanja ( $\lambda > 780$  nm) pa postanejo bolj razgibani (nezvezen potek krivulj). Poleg tega se vrednosti spektralne  $TT_{sol}(\lambda)$  dvignejo nad vrednost pri valovni dolžini 780 nm. Razmerje med maksimalno vrednostjo  $TT_{sol}(\lambda)$  posameznega spektra in njegovo vrednostjo pri  $TT_{sol}(780$  nm) je za tkanino PES(1)2009 enako ~1,5, za tkanino PES(2)2009 ~1,6 in za sklop obeh tkanin PES(1)2009z/PES(2)2009z ~1,6 ter 1,5 za PES(2)2009n/PES(1)2009n. Hkrati so vrednosti  $TT_{sol}(\lambda)$  na približno 30 % celotnega spektralnega območja med 300 in 2500 nm večje od vrednosti  $TT_{sol}(\lambda=780$  nm) za vzorec PES(1)2009, 50 % za vzorec PES(2)2009 in 25 % za vzorec PES(1)2009/PES(2)2009. Tudi pri meritvi  $TT_{sol}(\lambda)$  se je izkazalo, da vzorci obravnavanih PES tkanin ne prepuščajo UV-svetlobe na območju med 300 in 380 nm.

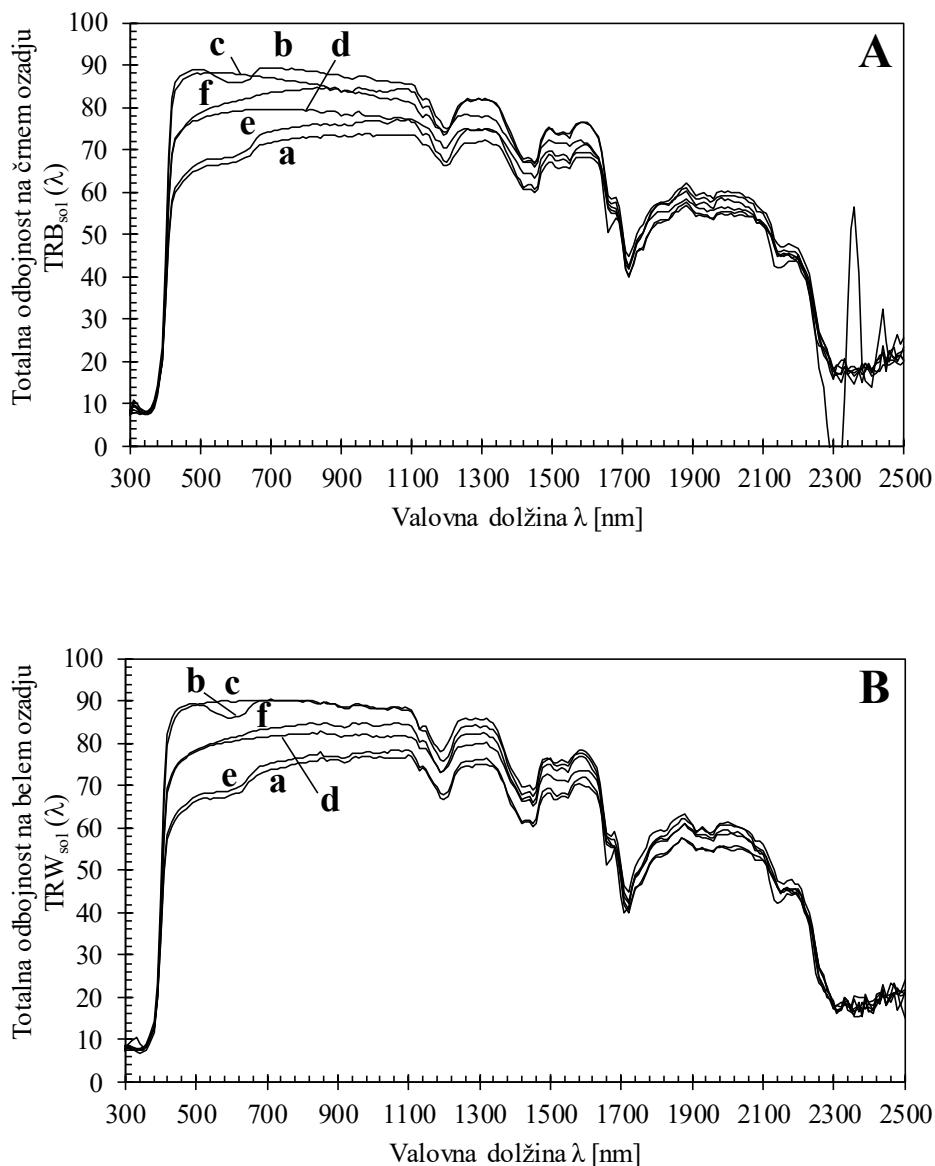
Na **sliki 3.1.1.9** so prikazane totalne hemisferične spektralne odbojnosti za črno  $TRB_{sol}(\lambda)$  (**slika 3.1.1.9 A**) in belo  $TRW_{sol}(\lambda)$  (**slika 3.1.1.9 B**) ozadje, ki razkrijejo, da se vrednosti ne spremenijo bistveno. V povprečju je absolutna razlika za vzorec PES(1)2009z enaka 1,2 % in za stranico -n 0,9 %, za vzorec PES(2)2009z 3,0 % in stranico -n 2,2 %, za vzorec PES(1)2009z/PES(2)2009z 1,9 % ter za vzorec PES(2)2009n/PES(1)2009n 0,4 %. Zanimivo je, da obe tkanini, PES(1)2009 in PES(2)2009, in njun sklop, na območju UV-svetlobe (v omenjenem primeru od 300 nm do 380 nm) večino sevana吸收irajo, saj je njihova  $TT_{sol}(300\text{ nm} < \lambda < 380\text{ nm})$  praktično zanemarljiva,  $TRB_{sol}(\lambda)$  pa majhna (do

10 %). Na območju NIR-svetlobe sicer, kot je bilo že omenjeno,  $TT_{sol}(\lambda)$  na posameznih delih spektra naraste, vendar kljub temu  $TRB_{sol}(\lambda)$  vztrajno in močneje pada vzdolž naraščanja valovne dolžine, zaradi česar se posledično poveča absorptivnost  $A_{sol}(\lambda)$ .



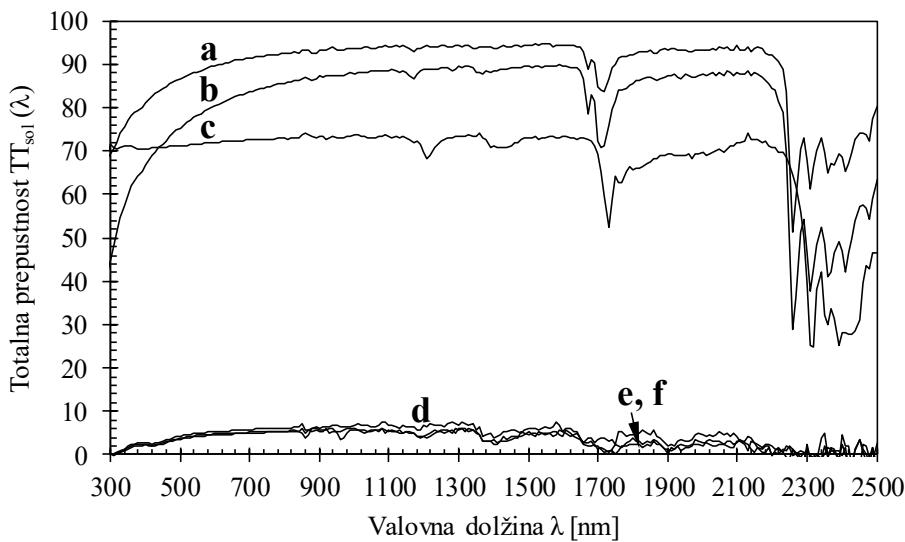
**Slika 3.1.1.8:** Totalna hemisferična spektralna prepustnost.  $TT_{sol}(\lambda)$  [%] vzorcev PES(1)2009z (a), PES(1)2009z (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e), PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) in očiščenega vzorca PES(1)2009z (g) na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na **sliki 2.2.1.3**

**Figure 3.1.1.8:** Total hemispherical spectral transmittance  $TT_{sol}(\lambda)$  [%] of samples PES(1)2009z (a), PES(1)2009z (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e), PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) and cleaned sample PES(1)2009z (g) on spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in **Figure 2.2.1.3**



**Slika 3.1.1.9:** Totalna hemisferična spektralna odbojnost [%] za vzorce PES(1)2009z (a), PES(1)2009z (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e) in PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) na črni  $\text{TRB}_{\text{sol}}(\lambda)$  (A) in beli  $\text{TRW}_{\text{sol}}(\lambda)$  (B) podlagi na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na sliki 2.2.1.3

**Figure 3.1.1.9:** Total hemispherical spectral reflectance [%] of samples PES(1)2009z (a), PES(1)2009z (b), PES(2)2009z (c), PES(2)2009n (d), PES(1)2009z/PES(2)2009z (e) and PES(1)2009n/PES(2)2009n (f) on black  $\text{TRB}_{\text{sol}}(\lambda)$  (A) and white  $\text{TRW}_{\text{sol}}(\lambda)$  (B) background and in spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in Figure 2.2.1.3



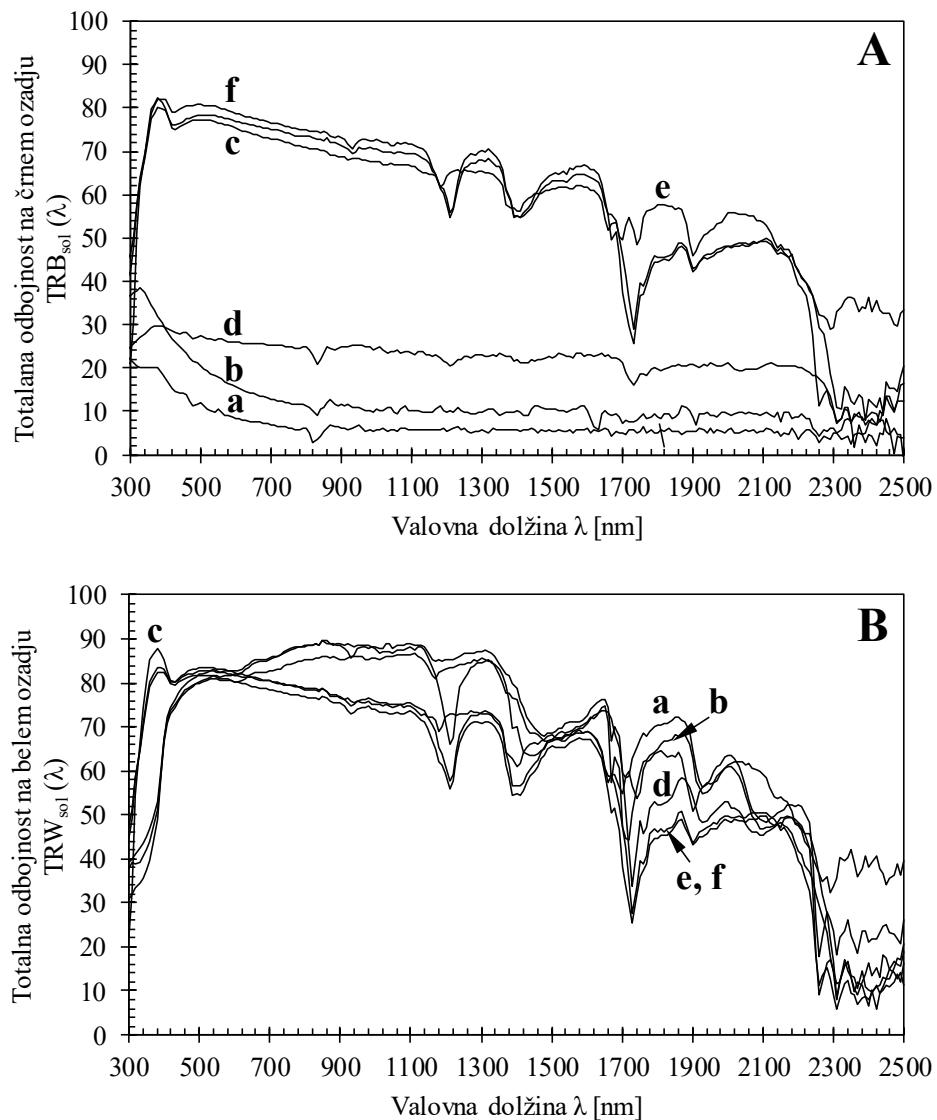
**Slika 3.1.1.10:** Totalna hemisferična spektralna prepustnost  $TT_{sol}(\lambda)$  [%] vzorcev ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/PEfabric (e) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na **sliki 2.2.1.3**

**Figure 3.1.1.10:** Total hemispherical spectral transmittance  $TT_{sol}(\lambda)$  [%] of samples ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/PEfabric (e) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) in spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in **Figure 2.2.1.3**

Medtem ko  $TT_{sol}(\lambda)$  vzorcev ETFE in PEfabric (**slika 3.1.1.10**) doseže maksimalne vrednosti že v vidnem delu spektra, se  $TT_{sol}(\lambda)$  vzorca aerogel poveča še za ~20 %. Učinek tega se odraža tudi pri vzorcih PEfabric/aerogel/PEfabric in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Pri prvem zraste vrednost  $TT_{sol}(\lambda)$  še za dodatnih 14 % in pri drugem za 19 %. Tudi pri spektrih prepustnosti  $TT_{sol}(\lambda)$  na **sliki 3.1.1.10** je videti, da pri valovnih dolžinah nad 780 nm spektri niso več tako gladki in tudi nenaden padec vrednosti spektralne prepustnosti pri valovnih dolžinah nad približno 2260 nm.

Totalna spektralna odbojnosc folije ETFE na črnem ozadju  $TRB_{sol}(\lambda)$  (**slika 3.1.1.11**) je v primerjavi z odbojnostjo preostalih vzorcev najmanjša na celotnem spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. Padajoči trend, razviden že s **slike 3.1.1.2 B**, se do konca vidnega območja pri 780 nm skoraj popolnoma ustavi in vrednosti  $TRB_{sol}(\lambda)$  se zmanjšajo do valovne dolžine 2500 nm še za približno 2 % (10 % vrednosti pri  $\lambda = 300$  nm). Če dodamo en sloj ETFE folije, se oblika spektra ne spremeni drastično, vrednosti  $TRB_{sol}(\lambda)$  na večjem delu spektra narastejo skoraj enakomerno. Pri vzorcu PEfabric ima tudi  $TRB_{sol}(\lambda)$  dokaj enakomerno porazdelitev (vrednosti padejo za ~12 %), razen predela nad ~2260 nm. Vzorca folije ETFE in tkanine PEfabric sta močno prosojna (**slika 3.1.1.10**), zato odbojnosc  $TRB_{sol}(\lambda)$  vzorca aerogel močno vpliva na odbojnosc  $TRB_{sol}(\lambda)$  izolacijskega kompozita PEfabric/aerogel/PEfabric in sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Zanimiv je vpliv dodatka zunanjega sloja ETFE na območju nad 1700 nm, kjer je odbojnosc vzorca aerogel  $TRB_{sol}(\lambda)$  zvišana ob dodatku PEfabric (PEfabric/aerogel/PEfabric), pri kompozitu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE pa  $TRB_{sol}(\lambda)$  pri  $\lambda > 1700$  nm zopet pade. Sprememba totalne hemisferične spektralne odbojnosti ob dodatku referenčnega belega in neprosojnega ozadja je lepo razvidna s **slika 3.1.1.11 B**, kjer prej

razmeroma majhne vrednosti odbojnosti (do 30 %) narastejo prek odbojnosti najbolj odbojnega vzorca na črnem ozadju ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, močno nad 80 %. Na belem ozadju ima tako pričakovano najvišje vrednosti  $TRW_{sol}(\lambda)$  vzorec ETFE.



**Slika 3.1.1.11:** Totalna hemisferična spektralna odbojnost [%] vzorcev ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/PEfabric (e) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) na črni  $TRB_{sol}(\lambda)$  (A) in beli  $TRW_{sol}(\lambda)$  (B) podlagi na spektralnem območju od 300 nm do 2500 nm. -n in -z ponazarjata, kako so bili vzorci orientirani glede na vpadni snop svetlobe, kot je prikazano na **sliki 2.2.1.3**

**Figure 3.1.1.11:** Total hemispherical spectral reflectance [%] of samples ETFE (a), ETFE/ETFE (b), PEfabric (c), aerogel (d), PEfabric/aerogel/PEfabric (e) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (f) on black  $TRB_{sol}(\lambda)$  (A) and white  $TRW_{sol}(\lambda)$  (B) background and in spectral range from 300 nm to 2500 nm. -n and -z are marking the orientation of the samples with respect to the direction of incident light as shown in **Figure 2.2.1.3**

**V preglednici 3.1.1.3 in na sliki 3.1.1.12** so podane spektralno povprečne vrednosti totalne prepustnosti ( $TT_{sol} [\%]$ ), totalne odbojnosti za črno ( $TRB_{sol} [\%]$ ) in belo ( $TRW_{sol} [\%]$ ) ozadje in absorptivnosti ( $A_{sol} [\%]$ ) na celotnem sončnem spektru za vzorce PES(1)2009z/PES(2)2009z (krivulja a na **sliki 3.1.1.12**), ETFE/ETFE (krivulja b na **sliki 3.1.1.12**) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (krivulja c na **sliki 3.1.1.12**). Poleg teh so podane tudi spektralno povprečne vrednosti za tri značilna valovna območja sončnega spektra: ultravijolično (UV, od 300 nm do 380 nm), vidno (VIS, od 380 nm do 780 nm) in kratkovalovnega infrardečega (NIR, od 780 nm do 2500 nm).

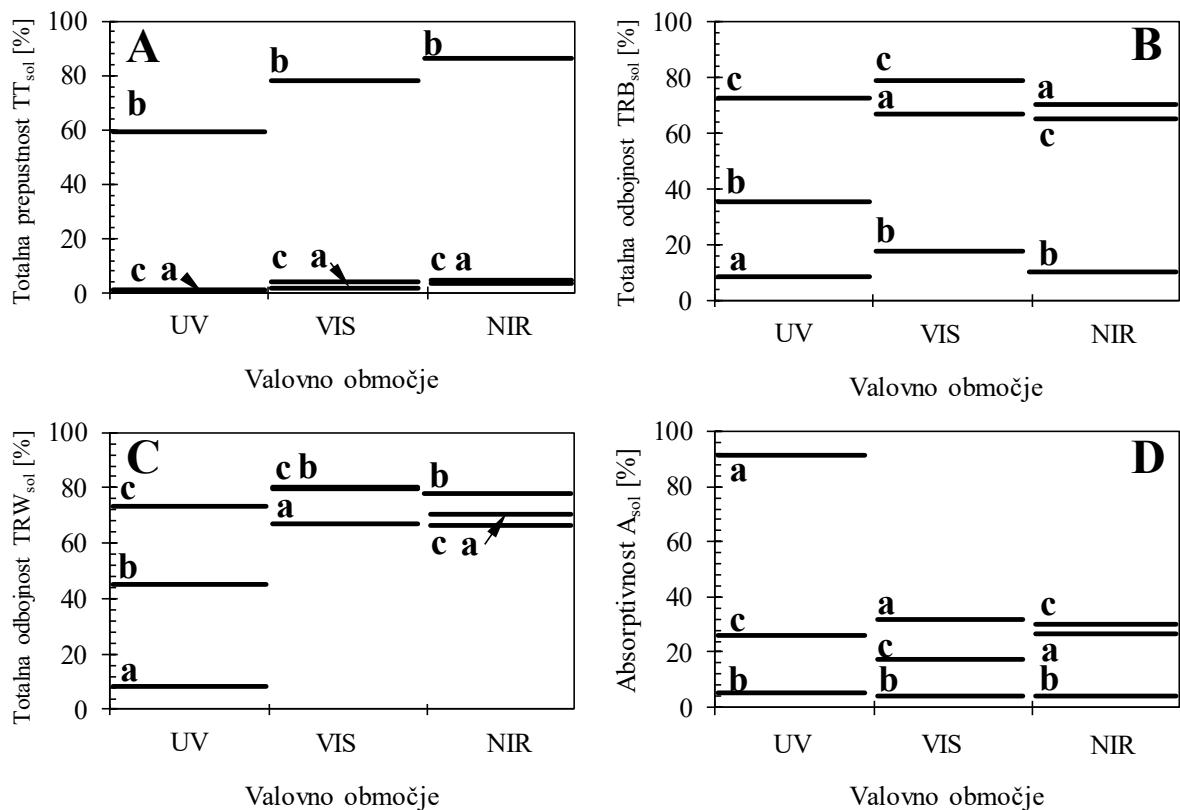
**Preglednica 3.1.1.3:** Optične lastnosti kompozitov tkanin, folij in aerogelne izolacijske odeje na območju spektra sončnega sevanja od 300 nm do 2500 nm: totalna (hemisferična) prepustnost [%] za celotno  $TT_{sol}$ , UV ( $TT_{sol,UV}$ ), vidno VIS ( $TT_{sol,VIS}$ ) in NIR ( $TT_{sol,NIR}$ ) območje; totalna odbojnost [%] za črno ( $TRB_{sol}$ ) in belo ( $TRW_{sol}$ ) ozadje ter totalna absorptivnost  $A_{sol} [\%]$  iz  $A(\lambda) = 1 - (R(\lambda) + T(\lambda))$ , prav tako na celotnem, UV-, VIS- in NIR- spektralnem območju

**Table 3.1.1.3:** Optical properties of composites composed of fabrics, foils and aerogel insulation blanket on solar spectrum between 300 nm to 2500 nm: Total (hemispherical) transmittance [%] whole  $TT_{sol}$ , UV ( $TT_{sol,UV}$ ), VIS ( $TT_{sol,VIS}$ ) and NIR ( $TT_{sol,NIR}$ ) spectral range; total reflectance on black ( $TRB_{sol}$ ) in white ( $TRW_{sol}$ ) background and total absorptance  $A_{sol} [\%]$  from  $A(\lambda) = 1 - (R(\lambda) + T(\lambda))$  in total, UV, VIS and NIR spectral ranges

Vzorec	$TT_{sol}$ [%]	$TRB_{sol}$ [%]	$TRW_{sol}$ [%]	$A_{sol} [\%]$			
PES(1)2009z/PES(2)2009z	2,3	66,6	67,1	31,1			
ETFE+ETFE	81,0	15,1	78,1	3,9			
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	4,2	73,0	74,2	22,8			
Vzorec	$TT_{sol,UV}$ [%]	$TT_{sol,VIS}$ [%]	$TT_{sol,NIR}$ [%]	$TRB_{sol,UV}$ [%]	$TRB_{sol,VIS}$ [%]	$TRB_{sol,NIR}$ [%]	
PES(1)2009z/PES(2)2009z	0,0	1,6	3,4	8,6	66,8	70,2	
ETFE+ETFE	59,3	78,3	86,0	35,7	17,9	10,1	
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	1,3	4,0	4,7	72,9	78,8	65,3	
Vzorec	$A_{sol,UV}$ [%]	$A_{sol,VIS}$ [%]	$A_{sol,NIR}$ [%]	$TRW_{sol,UV}$ [%]	$TRW_{sol,VIS}$ [%]	$TRW_{sol,NIR}$ [%]	
PES(1)2009z/PES(2)2009z	91,6	31,6	26,5	8,5	67,3	70,7	
ETFE+ETFE	5,0	3,8	3,9	45,4	79,8	78,0	
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	25,8	17,1	30,0	73,5	80,1	66,5	

Totalne prepustnosti  $TT_{sol,UV}$ ,  $TT_{sol,VIS}$ , ter  $TT_{sol,NIR}$  naraščajo za vse tri zgoraj omenjene vzorce dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa z naraščajočim valovnim območjem od UV do NIR. Proporcionalno najbolj naraste prepustnost vzorca PES(1)2009z/PES(2)2009z, najmanj pa pri sklopu ETFE/ETFE. Trend spremenjanja totalne odbojnosti  $TRB_{sol}$  na črni podlagi se razlikuje za te vzorce na različnih valovnih območjih (UV, VIS, NIR). Zanimivo je, da je bila pri obstoječem konstrukcijskem sklopu PES(1)2009z/PES(2)2009 njegova odbojnost  $TRB_{sol,UV}$  najnižja (8,6 %), potem pa močno narasla na območjih VIS in NIR (**preglednica 3.1.1.3 in slika 3.1.1.12**), pri čemer je bila njegova  $TRW_{sol}$  tako rekoč enaka za vsa tri merjena območja. Posledično je absorptivnost na UV-območju, kjer je  $TT_{sol,UV}$  zelo nizka oziroma enaka 0 %, zelo visoka, na VIS- in NIR-območju pa je nizka, saj je tudi odbojnost  $TRB_{sol}$  bistveno višja. Torej je vzorec PES(1)2009z/PES(2)2009z topel na UV-območju in hladen na VIS in NIR. Za vzorec konstrukcijskega sklopa ETFE/ETFE pa odbojnost na črni podlagi  $TRB_{sol}$ , nasprotno kot pri vzorcu PES(1)2009z/PES(2)2009z, z naraščanjem valovne dolžine pada, na beli podlagi pa sprva močno naraste, nato nekoliko upade. Pri tem je pomembno, da razlika med  $TRB_{sol}$

in  $TRW_{sol}$  naraste, vendar absorptivnost  $A_{sol}$  celo nekoliko upade, kar pomeni, da je dvojni membranski konstrukcijski sklop ETFE/ETFE na celotnem sončnem spektru hladen.



**Slika 3.1.1.12:** Spektralno povprečne vrednosti optičnih lastnosti (totalna prepustnost [%] (A), totalna odbojnosc [%] na črni podlagi (B), totalna odbojnosc [%] na beli podlagi (C), absorptivnost [%] (D)) vzorcev PES(1)2009z/PES(2)2009z (krivulja a) ETFE/ETFE (krivulja b), ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (krivulja c) na treh valovnih območjih sončnega spektra: ultravijoličnem (UV), vidnem (VIS) in kratkovalovnem infrardečem (NIR)

**Figure 3.1.1.12:** Spectral average values of optical properties (total transmittance [%] (A), total reflectance [%] on black background (B), total reflectance [%] on white background (C), absorptance [%] (D)) of samples PES(1)2009z/PES(2)2009z (curve a), ETFE/ETFE (curve b), ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (curve c) in three spectral ranges of solar spectrum: ultraviolet (UV), visible (VIS) and near infrared (NIR)

Z vstavitvijo aerogelne izolacijske odeje, obdane s polietilensko tkanino PEfabric, v konstrukcijski sklop ETFE/ETFE se močno spremenijo tudi optične lastnosti sklopa ETFE/ETFE (**preglednica 3.1.1.3** in **slika 3.1.1.12**). Totalna prepustnost  $TT_{sol}$  močno upade (z 81 % na komaj 4,2 %), najbolj na UV-območju (z 59,3 % na samo 1,3 %) in najmanj na NIR-območju (s 86,0 % na 4,7 %). Odbojnosc sklopa predvsem na račun odbojnosti aerogelne izolacijske odeje močno naraste, najmanj na UV (približno na polovico) in najbolj na valovnem območju NIR (približno za 6,5-krat). Totalna odbojnosc na beli podlagi je na UV- in VIS-območju višja za vzorec ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, na območju NIR pa nižja. Razlike med  $TRB_{sol}$  in  $TRW_{sol}$  so za ETFE/PEfabric/aerogel/ETFE majhne in le nekoliko večje kot pri vzorcu PES(1)2009z/PES(2)2009z, ob prav tako nekoliko večji  $TT_{sol}$ . To se odraža na absorptivnosti, ki je nižja na UV- (za kar 65,8 %) in VIS-območju (za 14,5 %), na NIR pa je le nekoliko

(za 3,5 %) višja od  $A_{s,NIR}$  za vzorec ETFE/ETFE. Na podlagi teh rezultatov je mogoče sklepati, da je sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE hladnejši od sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z na valovnih območjih UV- in VIS-svetlob, na območju NIR-svetlobe pa nekoliko toplejši.

### 3.1.1.4 Ocena vpliva umazanije na zunanj strani zunanje membrane

V **preglednici 3.1.1.3** je podan tudi podatek o  $TT_{sol}$  za očiščen vzorec zunanje membrane PES(1)2009z. Primerjava z vrednostjo  $TT_{sol}$  za neočiščen vzorec pa pokaže, da je ta približno za 14 % višja. Če na podlagi izmerjene spektralno prepustnosti  $TT_{sol}(\lambda)$  za očiščen vzorec PES(1)2009z določimo  $TT_{vis}$  dobimo vrednost 7,4 %, ki je celo 80 % višja od tiste za vzorec PES(1)2009 (**preglednica 3.1.1.1**). Podobno, če s pomočjo enačbe (2) izračunamo tudi  $TT_{vis}$  obstoječega sklopa za očiščeno zunano membrano PES(1)2009z, očiščen/PES(2)2009z, dobimo za  $TT_{vis}$  vrednost 2,3 %, kar je 64 % višja vrednost od vrednosti za vzorec PES(1)2009z/PES(2)2009z.

### 3.1.1.2 Meritev odbojnosti vzorcev membrane na območju nizkotemperaturnega dolgovalovnega infrardečega sevanja med 8000 in 14000 nm s spektrometrom in določitev emitivnosti površin

Emitivnosti za tri različne temperature površin (-20 °C, 20 °C in 50 °C) vzorcev ETFE, PEfabric, aerogel in PES(1), določene na podlagi meritve spektrov totalne (hemisferične) odbojnosti dolgovalovnega infrardečega sevanja na zlatem ozadju in na spektralnem območju med 2,5 in 16 µm, so podane v **preglednici 3.1.1.4**. Iz danih spektrov, prikazanih na **sliki 3.1.1.B.1** in v **prilogi 3.1.1.B**, so bile v skladu z opisom metode v poglavju 2.2.1.4 preračunane tudi emitivnosti na območju od 8 µm do 14 µm za tri enake temperature površine (**preglednica 3.1.1.4**). Izbrane temperature ponazarjajo razpon pričakovanih temperatur, ki jih (zunanja) membrana zavzame v različnih sezonskih in vremenskih pogojih. Rezultati pokažejo, da se vrednosti  $e_T$  (valovno območje računa od 2,5 µm do 16 µm) določenih po enačbah (17) in (18) s spremembijo temperature  $T_{č.t.}$  spremenijo za manj kot 2 %. Medtem ko v spektralnem območju od 8 µm do 14 µm ni zaznati nobenih sprememb. Vrednosti  $e_T$ , določeni za dani spektralni območji, pa se prav tako minimalno razlikujeta (manj kot za 5 %).

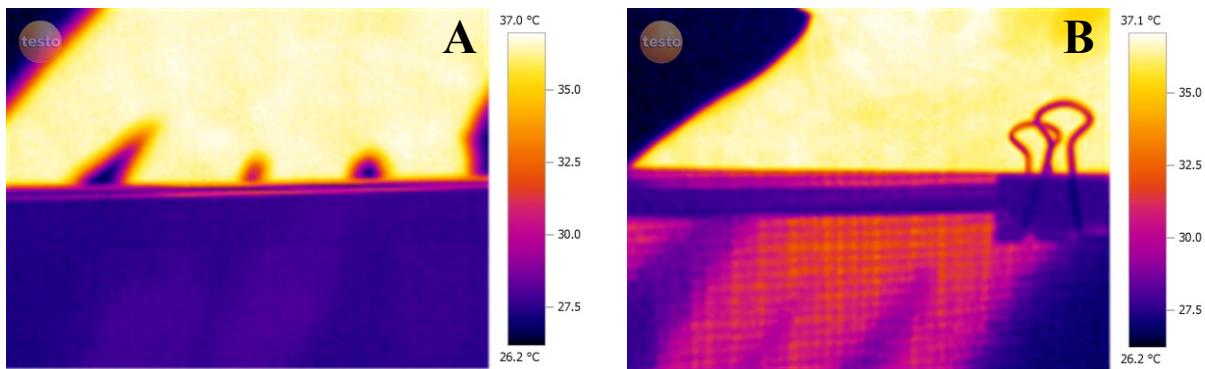
**Preglednica 3.1.1.4:** Vrednosti emitivnosti  $e_T$  [-] vzorcev, izračunane za različne temperature, njihove površine in dve spektralni območji (od 8 µm do 14 µm ter od 2,5 µm do 16 µm), na podlagi izmerjene spektralne odbojnosti dolgovalovnega infrardečega sevanja na zlatem ozadju

**Table 3.1.1.4:** Emissivity  $e_T$  [-] of samples at different temperatures of their surface and two spectral ranges (8 µm to 14 µm and 2,5 µm to 16 µm) on the basis of measured spectral reflectance of IR radiation on gold background

Vzorec	$e_T$ [-]					
	8-14 µm oz. 8 000 – 14 000 nm			2,5-16 µm oz. 2500 – 16 000 nm		
Valovno območje						
Temperatura	263,15 K oz. -10 °C	293,15 K oz. 20 °C	323,15 K oz. 50 °C	263,15 K oz. -10 °C	293,15 K oz. 20 °C	323,15 K oz. 50 °C
ETFE	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93
PEfabric	0,60	0,60	0,60	0,58	0,58	0,59
aerogel	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95
PES(1)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96

### 3.1.1.2.1 Prepustnost vzorcev za nizkotemperaturno IR-sevanje

Termografska posnetka, prikazana na **sliki 3.1.1.13**, nakaže, da vzorca ETFE in PEfabric nista neprepustna za dolgovalovno IR-sevanje na valovnem območju med 8 in 14  $\mu\text{m}$ . Pomen prepustnosti etilen tetrafluoroetilenske folije za toplotno IR sevanje je izpostavil Poirazis s sodelavci [23].



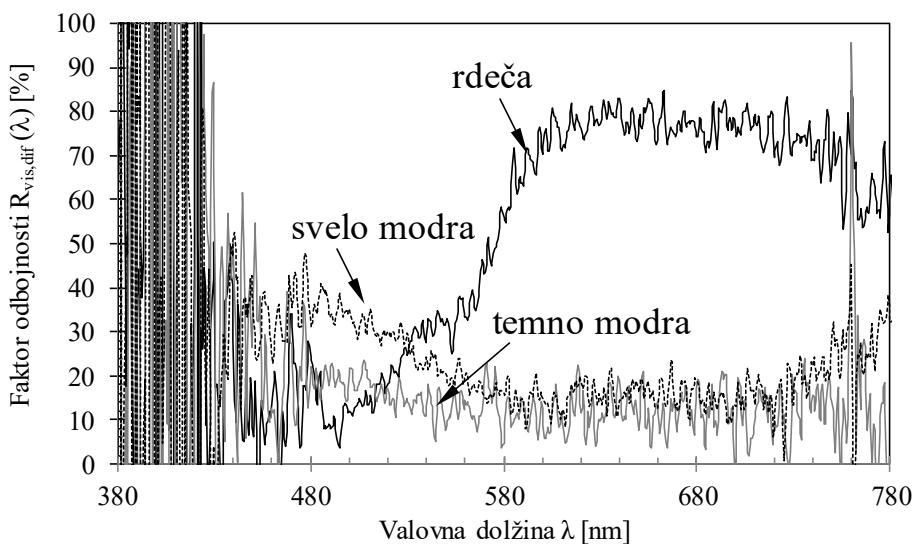
**Slika 3.1.1.13:** Temperaturno polje [ $^{\circ}\text{C}$ ], posneto z IR-kamero za vzorca ETFE (A) in PEfabric (B)  
**Figure 3.1.1.13:** Temperature field [ $^{\circ}\text{C}$ ] recorded with IR camera for samples ETFE (A) and PEfabric (B)

Posledično, vrednost  $e_T = 0,6$  ne ustreza termični emitivnosti vzorca PEfabric, ampak termični emitivnosti vzorca na za toplotno IR sevanje visoko odbojnem ozadju, ki je neprepustno za toplotno IR sevanje. Ker od ozadja odbito IR sevanje ob uporabi enačb (15) in (16) navidezno zniža emitivnost prepustnega vzorca, lahko sklepamo, da je dejanska vrednost  $e_T$  samega vzorca v danem primeru višja. Na podlagi tega je bila za vrednost  $e_T$  obravnavanega vzorca ETFE privzeta kar izmerjena vrednost vpliv prepustnosti pa zanemarljiv. Enačba (33) za izračun  $h_r$  velja le za zračni kanal z vzporednimi stranicami, ki so neprepustne za toplotno IR-sevanje [123].

### 3.1.1.3 Meritev odbojnosti vidne svetlobe in določitev barv obarvanih delov tal v Športni dvorani Brezovica

**Slika 3.1.1.14** prikazuje na terenu izmerjene spektre totalne hemisferične-normalne odbojnosti (spektralni odbojnostni faktor  $R_{\text{vis,dif}}(\lambda)$ ) različno obarvanih delov površin tal v ŠDB, ki so bili uporabljeni za določitev kolorimetričnih podatkov o njihovi barvi.

In-situ meritve so bile izvedene v realnih in nestanovitnih razmerah, v katerih spektralna porazdelitev gostote svetlobnega toka ni stalna, temveč se s časom spreminja. V tovrstnih razmerah morata biti referenčni in odbiti spekter vpadne svetlobe izmerjena sočasno, vendar to v danem primeru fizično ni bilo izvedljivo. Tako sta bila spektra posneta v časovnem sosledju v intervalu, krajšem od 1 min. Hkrati je bilo treba zaradi šibke intenzitete vpadne svetlobe (v notranjosti stavbe približno 25-krat nižja od tiste zunaj stavbe, relativno majhna prepustnost ovoja), podaljšati čas osvetlitve receptorja instrumenta na 1000 ms, kar je približno 4-krat nad priporočeno vrednostjo [88]. Posledično je bila izvedena posamezna meritev le z enim posnetkom, saj bi avtomatsko povprečenje več posnetkov (število posnetkov je možno nastaviti) še dodatno podaljšalo časovni interval izvedbe meritve, na spektrih pa je prisoten šum.



**Slika 3.1.1.14:** Izmerjeni spektralni faktor odbojnosti  $R_{vis,dif}(\lambda)$  [%] različno obarvanih delov tal v ŠDB: rdeča barva (črna polna črta), svetlo modra barva (črna črtkana črta), temno modra barva (siva polna črta)

**Figure 3.1.1.14:** Measured spectral reflection factor  $R_{vis,dif}(\lambda)$  [%] of differently coloured parts of the floor inside the studied air-supported dome at Brezovica: red colour (black full line), light blue colour (black dashed line), dark blue colour (grey full line)

**Preglednica 3.1.1.5:** Kolorimetrični podatki o barvah tal v ŠDB

**Table 3.1.1.5:** Colorimetric data of floor colours in the air-supported dome at Brezovica

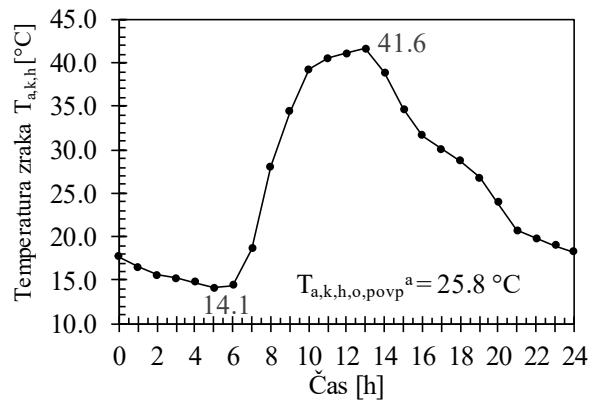
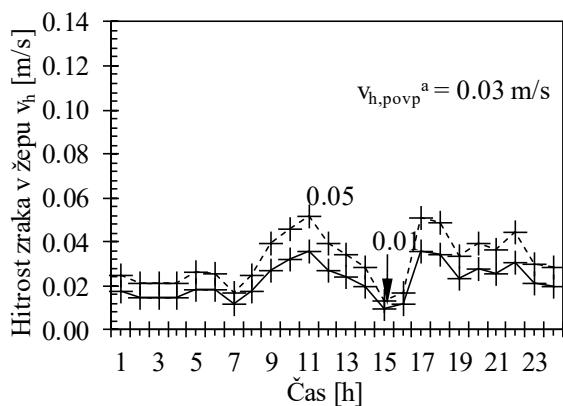
Vzorec	CIE Lab			CIE XYZ		
	L [-]	a [-]	b [-]	X [-]	Y [-]	Z [-]
Svetlo modra	53,64	-9,840	-17,980	18,60	21,63	35,77
Rdeča	70,18	+38,708	+21,793	52,45	41,00	27,71
Temno modra	44,48	+17,029	-32,590	16,28	14,17	34,86

Prav tako so bili izmerjeni spektri, obdelani s programom SpectraWiz [88], s katerim se tudi upravlja spektrometer. Ta program je bil uporabljen za [88] določitev kolorimetričnih količin, kot so trikromatični indeksi X, Y in Z, ter svetlost in barvni koordinati a (zeleno-rdeča os) in b (rumeno-modra os) po klasifikaciji CIE Lab. Pri tem je bil uporabljen vir svetlobe D65. Rezultati so zbrani v **preglednici 3.1.1.5**, medtem ko so na **sliki 3.1.1.14** prikazani spektri  $R_{vis,dif}(\lambda)$  za omenjene tri barve. Na podlagi teh kolorimetričnih podatkov so bile v nadaljevanju izbrane barve tal za namen analize dnevne osvetljenosti ŠDB (izračuni KDS) s pomočjo računalniškega programa DAYSIM.

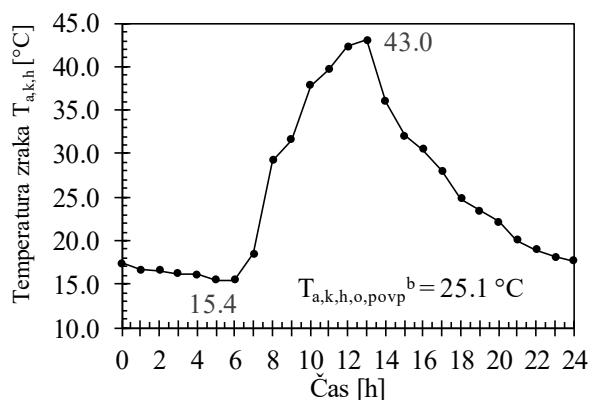
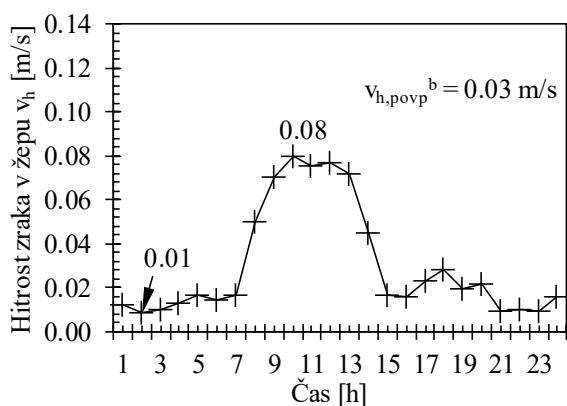
### 3.1.2 Termične meritve: določitev hitrosti zraka in temperaturnega profila v zračnem kanalu dvojnega ovoja Športne dvorane Brezovica

Meritve hitrosti gibanja zraka  $v(t)$  [m/s] in temperature zraka  $T_{a,k}(t)$  [ $^{\circ}$ C] ob notranji (PES(2)2009z) in zunanji (PES(1)2009n) stranici zračnega kanala so potekale v obdobju med 17. 07. 2013 in 13. 08. 2013. Rezultati (**slika 3.1.2.1**) so razdeljeni na štiri obdobja (**preglednica 3.1.2.1**), v katerih se je spremenila usmeritev sonde instrumenta (navzgor ali navzdol) ali pa položaj (ob notranji ali zunanji stranici zračnega kanala), kot je prikazano v poglavju 2.2.2. Dnevnik meritov je podan v **prilogi 3.1.2.A**.

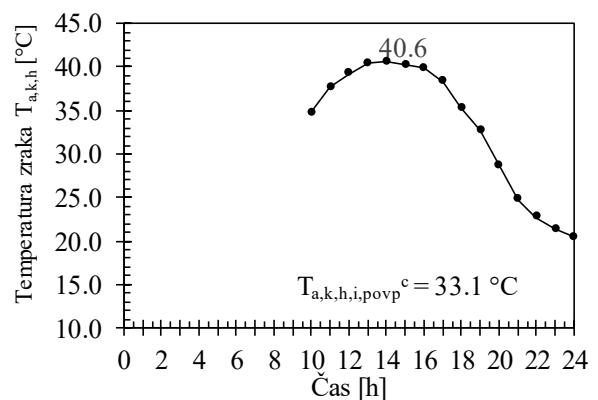
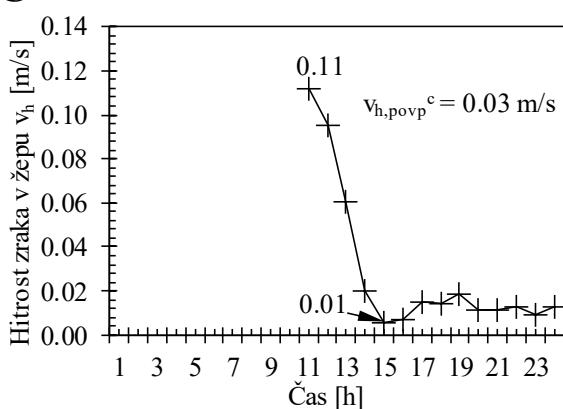
**A**



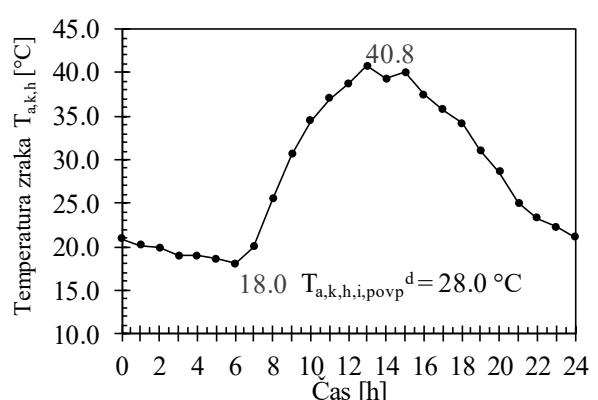
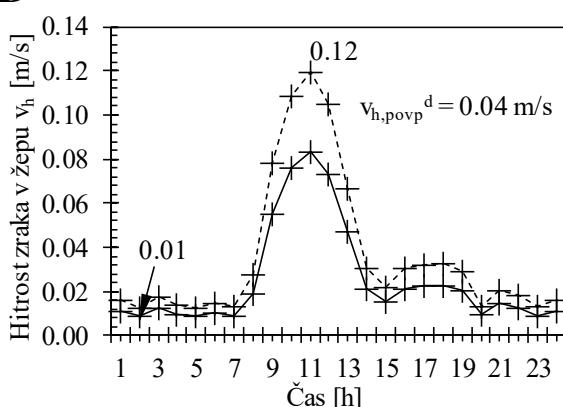
**B**



**C**



**D**



**Slika 3.1.2.1:** Povprečne hitrosti zraka, izmerjene v zračnem kanalu v posamezni uri v dnevnu ( $v_h$  [m/s]), polna črta, +;  $v_h/0,7$  [m/s], črtkana črta, +) (levo) in pripadajoča povprečna izmerjena temperatura ( $T_{a,k,h}$  [°C]) (polna črta, ●) (desno) tekom dneva za različne pozicije in orientacije sonde instrumenta (**preglednica 3.1.2.1**): ob zunanjih stranicah navzgor (A) in navzdol (B); ob notranji stranici navzdol (C) in navzgor (D)

**Figure 3.1.2.1:** Over period of measurements averaged values of measured air velocity during each hour of the day ( $v_h$  [m/s], full line, +;  $v_h/0,7$  [m/s], dashed line, +) (left) and corresponding average measured air temperature ( $T_{a,k,h}$  [°C]) (full line, ●) (right) for different locations and orientations of the instrument's probe (**Table 3.1.2.1**): next external side upwards (A) and downwards (B); next inner side downwards (C) and upwards (D)

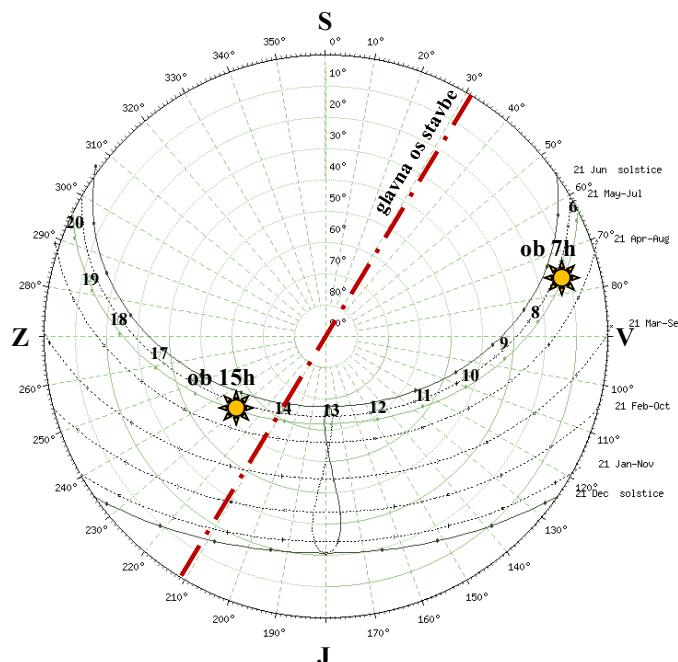
**Preglednica 3.1.2.1:** Orientacija in pozicija sonde za različna obdobja meritev hitrosti zraka  $v(t)$  [m/s] in pripadajoče temperature zraka  $T_{a,k}(t)$  [°C]

**Table 3.1.2.1:** Position and orientation of thermal anemometer probe during different periods of the air velocity  $v(t)$  [m/s] and corresponding air temperature  $T_{a,k}(t)$  [°C] measurements

Primer	Obdobje meritev	Orientacija sonde	Pozicija sonde
a	od 17. 7. 2013 do 22. 7. 2017	navzgor	ob zunanjih stranicah
b	od 23. 7. 2013 do 26. 7. 2017	navzdol	ob zunanjih stranicah
c	dne 6. 8. 2017	navzdol	ob notranji stranici
d	od 7. 8. 2017 do 9. 8. 2017	navzgor	ob notranji stranici

Vrednosti hitrosti gibanja zraka  $v(t)$  [m/s] in pripadajoče temperature  $T_{a,k}(t)$  [°C] so bile izmerjene v intervalu 2 s, nato pa so bile izračunane povprečne vrednosti hitrosti  $v_h$  [m/s] (povprečje intervala 1 h za vsako uro dneva) in temperature zraka  $T_{a,k,h}$  [°C] (povprečje intervala meritev 1 min. ob posameznih polnih urah dneva), vključujuč vse dni posameznega obdobja meritev (primeri od a do d, **preglednica 3.1.2.1**), ki so prikazane na **sliki 3.1.2.1**. Na **slikah 3.1.2.1 A** levo in **D** levo, so prikazane tudi vrednosti  $v_h$ , korigirane s korekcijskim količnikom 0,7. Ta količnik moramo, v skladu z navodili proizvajalca [158], upoštevati v kolikor je sonda med meritvijo obrnjena proti zračnemu toku (oznaka na sondi kaže kako sonda pravilno obrniti, **slika 2.2.2.2**).

Iz primerjave **slik 3.1.2.1** in **3.1.2.2** je lepo razvidno, da vrednosti hitrosti gibanja zraka  $v_h$  ne glede na položaj sonde najbolj narastejo v času med 7. in 15. uro (0,5, 0,08, 0,11 in 0,12 m/s za primere a, b, c, d), kar sovпадa z orientacijo objekta in časom osonenosti stranice objekta, na kateri so bile opravljene meritve (mesto meritve na JV stranici stavbe je označeno na **sliki 2.2.2.1**). Hkrati je opaziti, da vrednosti  $v_h$  dosežejo drugi maksimum med 17. in 19. uro, ko se smerni kot položaja sonca zopet približa smerinemu kotu normali na površino SZ stranice stavbe, vendar je praviloma precej manjši, tudi do 3.7-krat, izključujuč obdobje meritev c, ko je vrednost kar 6-krat manjša.



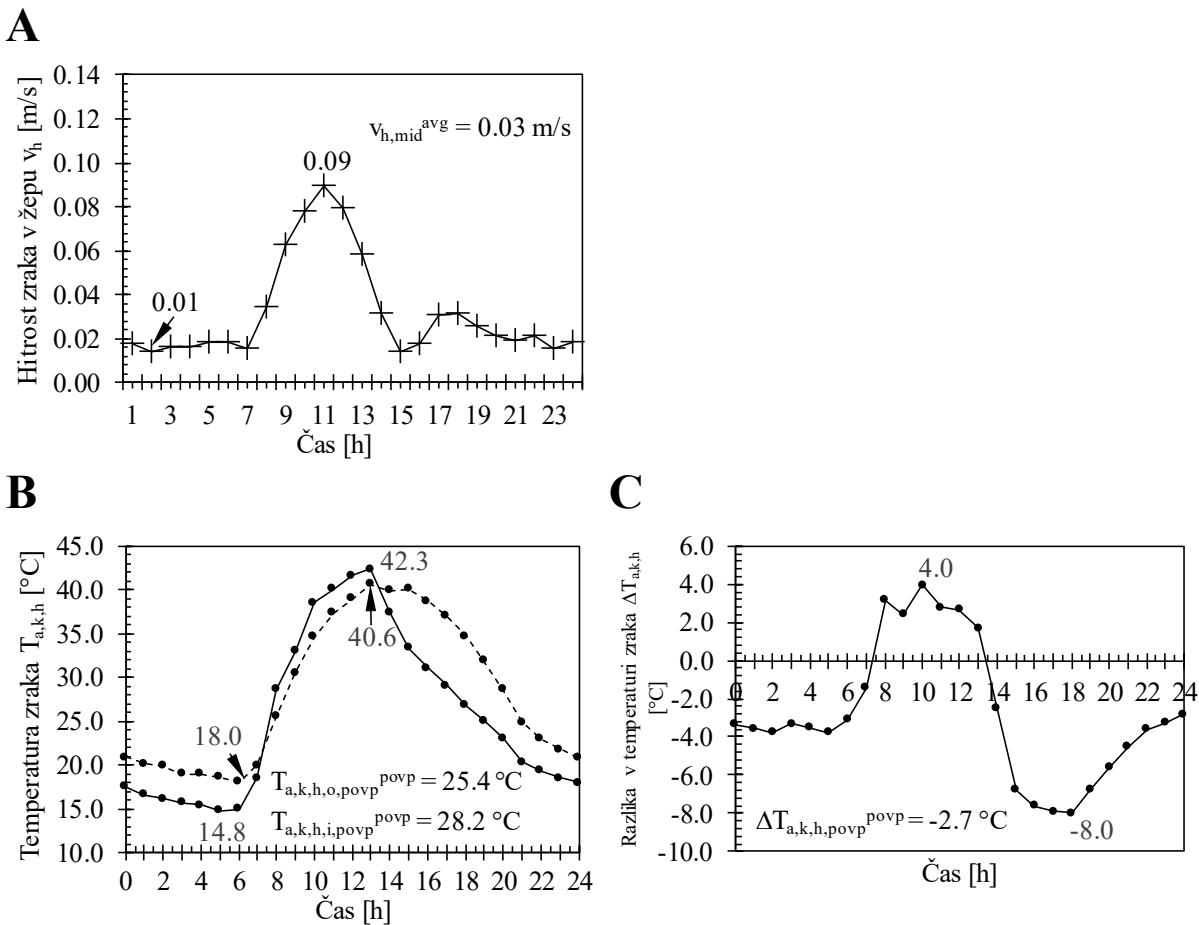
**Slika 3.1.2.2:** Diagram sončne poti za dan 01. 08. 2013, s prikazano orientacijo glavne osi ŠDB (črtkana rdeča črta) in poudarjenima pozicijama sonca ob 7. in 15. uri po lokalnem času (rumeni zvezdici). Slika je povzeta po [159]

**Figure 3.1.2.2:** Sun path diagram on 1st August 2013 with main axis of the air-supported dome at Brezovica (red dashed line) added and emphasized sun's position (yellow stars) at 7 AM and 3 PM local time. After [159]

**Preglednica 3.1.2.2:** Ekstremne in povprečne vrednosti hitrosti  $v_h$  [m/s] in temperature zraka  $T_{a,k,h}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] ter pripadajoči časi [h] za primere pozicij in orientacij sonde instrumenta od a do d, navedenih v **preglednici 3.1.2.1**

**Table 3.1.2.2:** Extreme and average values of air velocity  $v_h$  [m/s], its corresponding temperature  $T_{a,k,h}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] and time of thermal anemometer position and orientation cases a to d (**Table 3.1.2.1**)

Primer	$v_h$ [m/s]				$v_{h,povp}$ [m/s]	$T_{a,k,h}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]			$T_{a,g,h,povp}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
	max	čas	min	čas		čas	čas	čas	
a	0,05	11 <sup>h</sup>	0,01	15 <sup>h</sup>	0,03	39,3	11 <sup>h</sup>	38,8	15 <sup>h</sup>
b	0,08	11 <sup>h</sup>	0,01	2 <sup>h</sup>	0,03	37,9	11 <sup>h</sup>	16,7	2 <sup>h</sup>
c	0,11	11 <sup>h</sup>	0,01	15 <sup>h</sup>	0,03	34,8	11 <sup>h</sup>	40,6	15 <sup>h</sup>
d	0,12	11 <sup>h</sup>	0,01	2 <sup>h</sup>	0,04	34,5	11 <sup>h</sup>	20,2	2 <sup>h</sup>
		čas		čas		max	čas	min	čas
a	0,03	14 <sup>h</sup>	0,03	6 <sup>h</sup>	0,03	41,6	14 <sup>h</sup>	14,1	6 <sup>h</sup>
b	0,02	14 <sup>h</sup>	0,02	7 <sup>h</sup>	0,03	43,0	14 <sup>h</sup>	15,4	7 <sup>h</sup>
c	0,01	15 <sup>h</sup>	0,11	11 <sup>h</sup>	0,03	40,6	15 <sup>h</sup>	-	-
d	0,03	14 <sup>h</sup>	0,01	7 <sup>h</sup>	0,04	40,8	14 <sup>h</sup>	18,0	7 <sup>h</sup>



**Slika 3.1.2.3:** Povprečni urni profil hitrosti zraka na sredini kanala  $v_{h,mid}^{povp}$  [m/s] (polna črta, +) (A), povprečna urna profila temperature zraka ob notranji  $T_{a,k,h,i}^{povp}$  [°C] (črtkana črta, ●) in zunanji  $T_{a,k,h,o}^{povp}$  [°C] (polna črta, ●) stranici (B) zračnega kanala za celotno obdobje meritev. Na (C) je prikazana razlika med urnima profiloma temperature ob zunanji in notranji stranici zračnega kanala  $\Delta T_{a,k,h}^{povp}$  [°C]

**Figure 3.1.2.3:** Average hourly air velocity profile at the middle of air channel between the membranes  $v_{h,mid}^{povp}$  [m/s] (full line, +) (A), average hourly air temperature profile next to inner  $T_{a,k,h,i}^{povp}$  [°C] (dashed line, ●) and outer  $T_{a,k,h,o}^{povp}$  [°C] (full line, ●) side (B) of the air channel for the whole period of field measurements. In (C) the difference between the hourly temperature profiles next to inner and outer side of fair channel is shown  $\Delta T_{a,k,h}^{povp}$  [°C]

Iz grafov poteka temperature  $T_{a,k,h}$  [°C] tekom dneva, prikazanih na **sliki 3.1.2.1** (desno), je videti, da v vseh obdobjih meritev dnevni minimumi in maksimumi ne sovpadajo z ekstremnimi vrednostmi hitrosti gibanja zraka  $v_h$  (**preglednica 3.1.2.2**). Kot je prikazano v nadaljevanju disertacije, ekstremne vrednosti  $T_{a,k,h}$  dobro sovpadajo z ekstremnimi dnevnimi vrednostmi temperature zraka zunaj stavbe in v njej. Najvišjo temperaturo ob notranji in zunanji membrani v zračnem kanalu zrak doseže ob 13. uri, razen v primeru c, ko doseže maksimum povprečno ob 14. uri. Ti rezultati so skladni tudi s pozicijo sonca na nebu. Minimalno vrednost  $T_{a,k,h}$  zavzame v primeru a ob 5. uri, v primerih b in d pa ob 6. uri. Zanimivo je tudi, da se maksimumi v povprečju v vseh obdobjih povzpnejo nad 40 °C, hkrati pa sta pričakovano maksimalni vrednosti temperature  $T_{a,k,h}$  ob zunanji stranici (**slika 3.1.2.1 A in B desno**) zračnega kanala višji kakor ob notranji stranici. V **prilogi 3.1.2.B** je prikazan dejanski rezultat meritve  $T_{a,k}$  na dan 26. 7. 2013, na **sliki 3.1.2.B** pa je razvidna razlika med  $T_{a,k,i}$  in  $T_{a,k,o}$  ob spremembami položaja sonde.

V **preglednici 3.1.2.2** so podane tudi povprečne vrednosti  $v_{h,povp}$  in  $T_{a,k,h,povp}$  za celotna posamezna obdobja, navedena v **preglednici 3.1.2.1**. Neposredno je videti, da so povprečne hitrosti  $v_{h,povp}^{a,b,c,d}$  za vsa obdobja meritev (primeri od a do d) tako rekoč enake, pri čemer pa se pripadajoče povprečne temperature zraka  $T_{a,g,avg}^{a,b,c,d}$  nekoliko bolj razlikujejo.

Za pripravo vhodnih podatkov za izračun toplotne prehodnosti obstoječega konstrukcijskega sklopa ovoja ŠDB PES(1)2009z/PES(2)2009z in drugih različic so bili določeni povprečni urni profili hitrosti gibanja zraka na sredini kanala  $v_{h,mid}^{povp}$  [m/s] ter povprečna urna profila temperature zraka ob notranji  $T_{a,k,h,i}^{povp}$  [ $^{\circ}$ C] in zunanji  $T_{a,k,h,o}^{povp}$  [ $^{\circ}$ C] stranici zračnega kanala za celotno obdobje meritev (**slika 3.1.2.3**). S **slike 3.1.2.3 C** je videti, da je  $T_{a,k,h,o}^{povp}$  večja od  $T_{a,k,h,i}^{povp}$  le v času, ko je ovoj na mestu meritev osončen tudi z direktnim sevanjem. Zjutraj po 6. uri začne temperatura  $T_{a,k,h,o}^{povp}$  naraščati hitreje kakor  $T_{a,k,h,i}^{povp}$ , jo med 7. in 8. uro preraste ter ostane višja do 13. ure, potem pa začne hitreje padati in do 14. ure je zopet nižja od  $T_{a,k,h,i}^{povp}$ . V popoldanskem času, ko je sonce na drugi strani stavbe, nastanejo tudi največje razlike med  $T_{a,k,h,o}^{povp}$  in  $T_{a,k,h,i}^{povp}$ , vrednost razlike pa doseže celo 8  $^{\circ}$ C.

### 3.1.3 Meritve dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica in določitev porazdelitve količnika dnevne svetlobe na igrišču v stavbi

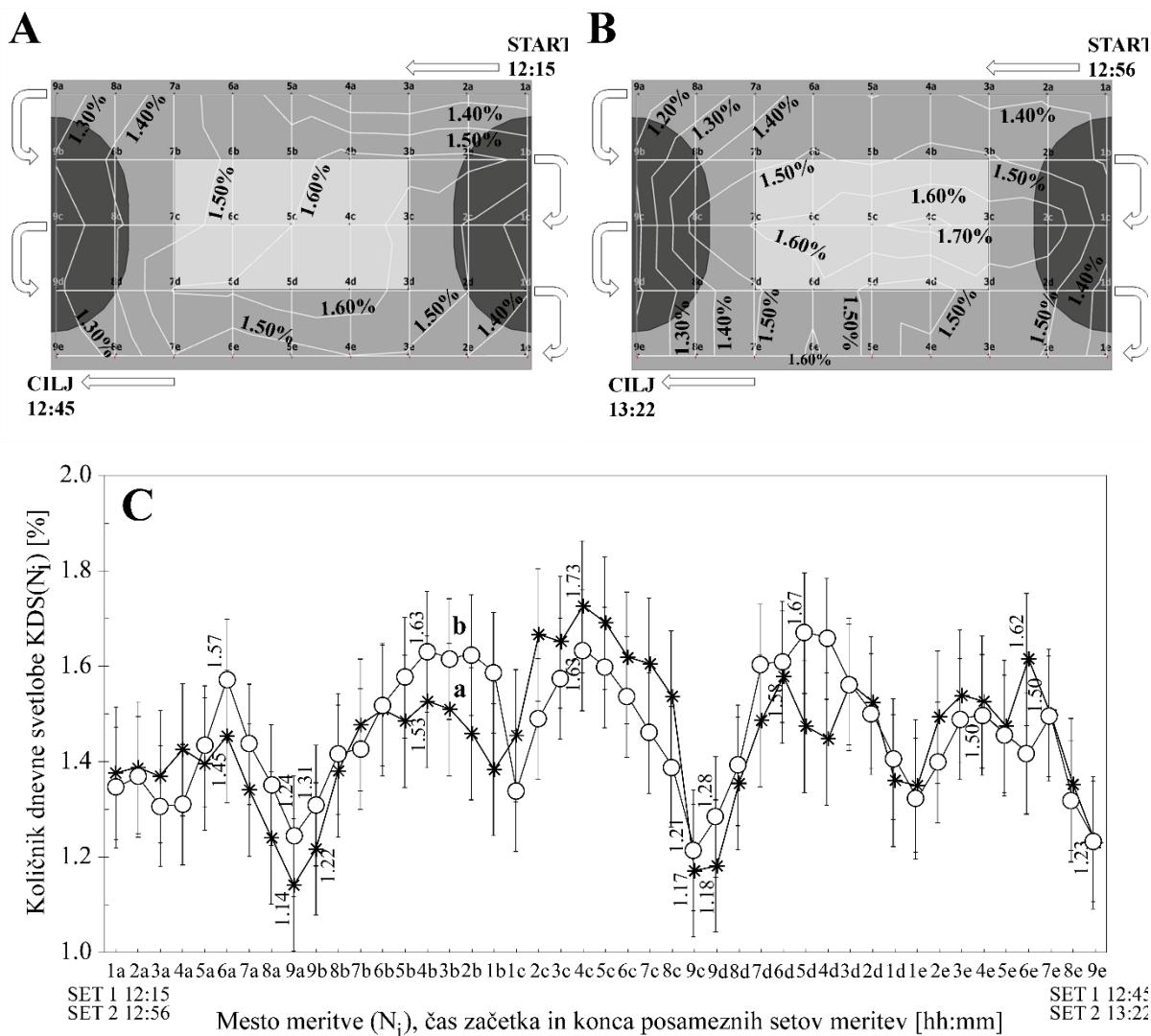
Za izračun količnika dnevne svetlobe (KDS [%]) (**slika 3.1.3.1**) po postopku, opisanem v poglavju 2.2.3, je bilo potrebno najprej določiti osvetljenost izbranih 45 merilnih mest ( $N_i = 1$  do 45) v stavbi ( $E_{i,exp,glob}(N_i)$  [lx]) in pripadajoče difuzne osvetljenosti zunanje nezasenčene horizontalne površine ( $E_{o,calc,dif}(N_i)$  [lx]). Medtem ko so bile vrednosti  $E_{i,exp,glob}(N_i)$  [lx] izmerjene (**slika 3.1.3.2**), so bile vrednosti  $E_{o,calc,dif}(N_i)$  [lx] (**slika 3.1.3.2**) izračunane iz eksperimentalno določene  $E_{o,exp,tube}(N_i)$  (**priloga 3.1.3.A**). Postopek normalizacije teh vrednosti na CIE standardno oblačno nebo [102] je prav tako predstavljen v poglavju 2.2.3. Dne 29. 10. 2015 sta bila v časovnem zaporedju izvedena dva seta meritev. Prvi (*set 1*) se je pričel ob 12.15 uri in končal ob 12.45, kmalu zatem pa se je začel drugi (*set 2*), ob 12.56 uri, in končal ob 13.22, kot je prikazano na **slikah 3.1.3.1 A** in **B**. Rezultati so takoj potrdili dejstvo, da je vpliv neizogibnega in stalnega spremicanja (difuzne) osvetljenosti nezasenčene horizontalne površine, prisotnega tudi v času izvedenih meritev (**slika 3.1.3.2**), z uporabo KDS močno izničen.

Vzopredno s temi meritvami je bila izvedena tudi meritev globalne (direktne + difuzne) osvetljenosti zunanje horizontalne površine  $E_{o,exp,glob}(N_i)$  [lx] v intervalu 5 s (**slika 3.1.3.3**). Razlika med izmerjeno  $E_{o,exp,glob}$  in  $E_{o,calc,dif}$ , izražena s korenom povprečne kvadratne napake, je znašala 271 lx (oz. približno 6 %).

Pregled rezultatov, prikazanih na **sliki 3.1.3.1**, je pokazal, da so vrednosti KDS razmeroma nizke (od 1,1 % do 1,7 %), na podlagi česar je mogoče sklepati, da je ŠDB potrebno pogosto dodatno umetno osvetljevati [106, 107]. Če bi v izračunu KDS( $N_i$ ) ohranili vrednosti  $E_{i,exp,glob}(N_i)$  in uporabili vrednosti  $E_{o,exp,glob}$  namesto vrednosti  $E_{o,calc,dif}$ , bi bila RMSE med vrednostima KDS za posamezno mesto  $N_i$  manjša od 0,3 %.

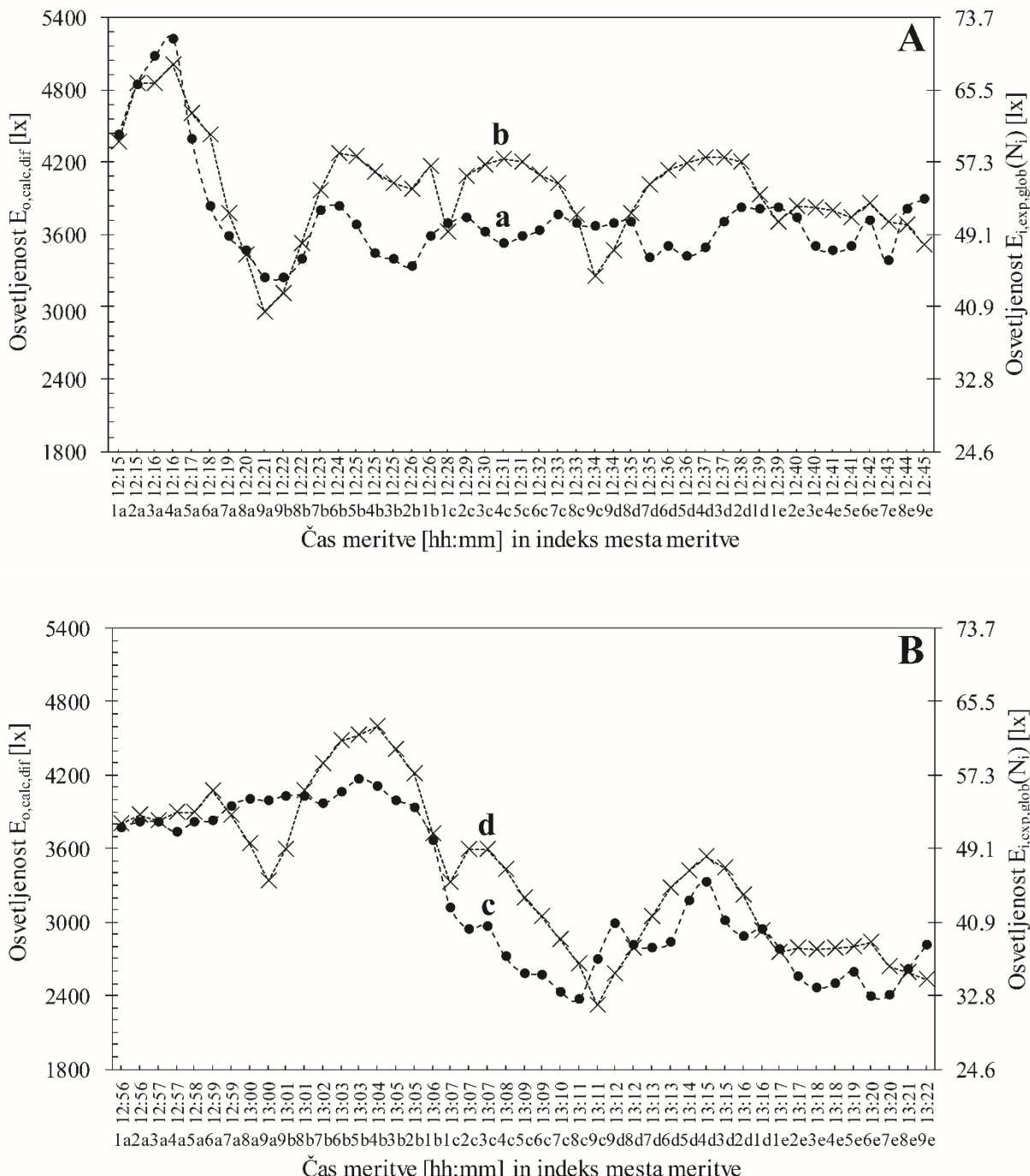
Iz dobljenih rezultatov je bilo tudi ocenjeno, da pri difuzni osvetljenosti zunanje horizontalne površine ~27.300 lx, osvetljenost površine v stavbi znaša ~300 lx. Ta vrednost sovpada z minimalno priporočeno vrednostjo za odbojkarska igrišča v stavbah izobraževalnih ustanov [110]. V danih razmerah neba in pri vrednostih difuzne osvetljenosti v času eksperimenta (npr. ~3000-4000 lx, **slika 3.1.3.2**) bi zagotovili vrednoti osvetljenosti 300 lx v stavbi tedaj, ko bi bil KDS večji ali enak 10 %. Hkrati lahko na

obravnavani zemljepisni širini ( $\sim 46^\circ$  S) pričakujemo osvetljenost zunanje površine 5000 lx vsaj 90 % časa med 9. in 17. uro v letu [142] kar pomeni, da bi za izpolnitve pričakovane vrednosti  $E_{i,\text{exp,glob}} = 300$  lx zadostoval 6-odstotni KDS. Pomembno je opozoriti, da nizke vrednosti KDS v obravnavani vrsti pnevmatskih konstrukcij, kakršna je na Brezovici, ne omejujejo njihove uporabnosti, saj uporaba tkanin in folij z visoko prepustnostjo pogosto privede do problema z bleščanjem, ki praviloma pomeni nepremagljivo oviro, saj je senčenje v primerih takšnih stavb zelo oteženo.



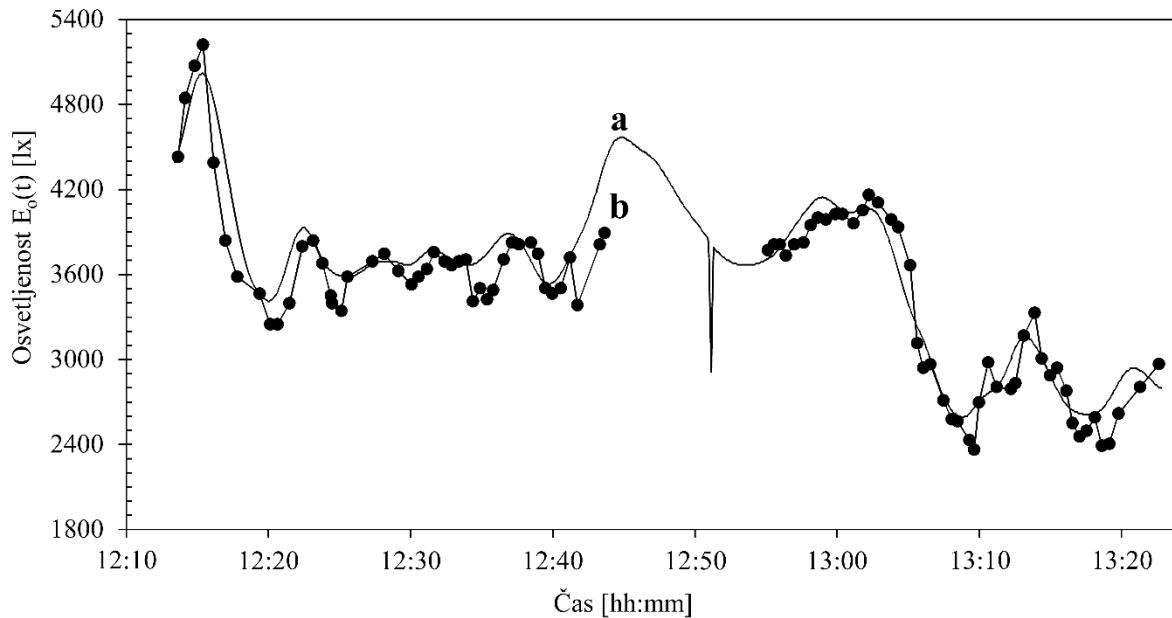
**Slika 3.1.3.1:** Izvedba meritve osvetljenosti  $E_{i,\text{exp,glob}}(N_i)$  [lx] za 45 merilnih mest ( $N_i = \text{od } 1 \text{ do } 45$ ) na igrišču v ŠDB s pripadajočimi izoluksami, izraženimi z vrednostmi KDS [%] ( $KDS(N_i)$ ) med setom 1 (A) in setom 2 (B), z alternativno predstavitvijo na sliki (C) ( $set1$ ,  $\circ$ ;  $set2$ ,  $*$ ; standardna deviacija, navpične črte). Na sliki (A) in (B) tribuna in koridorji ob igrišču niso prikazani

**Figure 3.1.3.1:** The execution of  $E_{i,\text{exp,glob}}(N_i)$  [lx] illuminance measurements at 45 points ( $N_i=1$  to 45) on the playground floor with the corresponding iso-illuminance values expressed with the KDS [%] values ( $KDS(N_i)$ ) for  $set1$  (A) and  $set2$  (B) measurement data with the alternative presentation shown on (C) ( $set1$ , open  $\circ$ ;  $set2$ ,  $*$ ; standard deviation, vertical bars). Spectator stand and corridors are not shown on A and B



**Slika 3.1.3.2:** Variacija difuzne osvetljenosti zunanjega površine ( $E_{o,calc,dif}(N_i)$  [lx]) (●, krivulji a in c) v času meritev osvetljenosti v stavbi ( $E_{i,exp,glob}(N_i)$  [lx]) (×, krivulji b in d) za merilna mesta ( $N_i = \text{od } 1 \text{ do } 45$ ) na tleh igrišča v ŠDB dne 29. 10. 2015 za set 1 (A) in set 2 (B). Za korelacijo merilnih mest in časa glej slike 3.1.3.1 A in B

**Figure 3.1.3.2:** The variation of the outdoor sky illuminance ( $E_{o,calc,dif}(N_i)$  [lx]) (●, curves a and c) during the measurements of the indoor illuminance ( $E_{i,exp,glob}(N_i)$  [lx]) values (×, curves b and d) at various sites ( $N_i=1$  to 45) on the playground floor inside the air-supported dome measured on 29<sup>th</sup> of Oct. 2015 for the set1 (A) and set2 (B) of measurements. For the correlation of time to the sites see Figure 3.1.3.1 A and B



**Slika 3.1.3.3:** Meritve osvetljenosti zunaj ŠDB: globalna osvetljenost  $E_{o,exp,glob}$  [lx] (izvorni vidni kot instrumenta) (krivulja a) in difuzna osvetljenost  $E_{o,calc,dif}$  [lx], izračunana iz  $E_{o,exp,tube}$  [lx] (zmanjšani vidni kot instrumenta na  $28^\circ$ ) (●, krivulja b)

**Figure 3.1.3.3:** Outdoor illuminance measurements: global illuminance  $E_{o,exp,glob}$  [lx] (instruments original angle of view) (curve a) and sky illuminance  $E_{o,calc,dif}$  [lx] calculated from  $E_{o,exp,tube}$  [lx] (reduced angle of view to  $28^\circ$ ) (●, curve b)

Prav tako je opaziti, da so vrednosti KDS za oba seta (*set 1* in *set 2*) zelo podobne, vendar ne identične, razlikujejo pa se absolutno za manj kot 0,2 % (**slike 3.1.3.1 A, B in C**). V skladu s pričakovanji je bila opažena kvazi periodičnost, z minimalnimi vrednostmi na mestih od 9a do 9e in od 1a do 1e (**slika 3.1.3.1 C**) ter maksimumi v sredinskem delu igrišča (mesta 3c - 6c) (**slika 3.1.3.1 C**). Tribuna na levi strani stavbe je dodatno senčila igrišče, posledica tega pa so bile nekoliko nižje vrednosti KDS. Vrednosti KDS na sredini igrišča (1,7 %) so bile v primerjavi z vrednostmi na levi in desni strani igrišča (1,1 – 1,3 %) razmeroma visoke, čeprav je bila odbojnost ( $R_{vis,dif} = 34\%$ ) rdeče obarvanega sredinskega dela tal igrišča razmeroma nizka. Dejstvo je, da so imele barve tal in njihov vzorec razporeditve opazen učinek na vrednosti KDS, kar je služilo kot povod za študijo vpliva notranje odbite komponente KDS na vrednosti količnika v obravnavani ŠDB v odvisnosti od vzorca razporeditve barv. Rezultati študije so predstavljeni v poglavju 3.2.2.

Treba je dodati, da bi lahko razlike v vrednostih KDS med setoma 1 in 2 (**slika 3.1.3.1**) kljub močno oblačnemu vremenu pripisali dvema glavnima vzrokom. Prvič, neujemanje vrednosti bi lahko pripisali spremembni položaju sonca na nebu v času med 12.15 in 13.22 ure (**priloga 3.1.3.B**), in drugič, bolj verjetnemu vzroku, spremembni intenziteti direktne in difuzne svetlobe ter njunemu razmerju med trajanjem eksperimenta [98].

V okviru predstavljene raziskave direktna in difuzna komponenta globalne osončenosti, zaradi nerazpoložljivosti merilne opreme, nista bili izmerjeni ločeno, zaradi česar v nadaljevanju dela ni bilo mogoče v celoti izkoristiti zmogljivosti programa DAYSIM, ki omogoča Perezovega vse-vremenskega modela porazdelitve svetlosti neba [143] [137]. V skladu s tem so bile izračunane vrednosti KDS z uporabo CIE standardnega oblačnega neba [102], v nadaljevanju pa je bila opravljena primerjava teh z

eksperimentalnimi vrednostmi KDS, določenimi v podobnih vremenskih razmerah (oblačno nebo, 5000 lx).

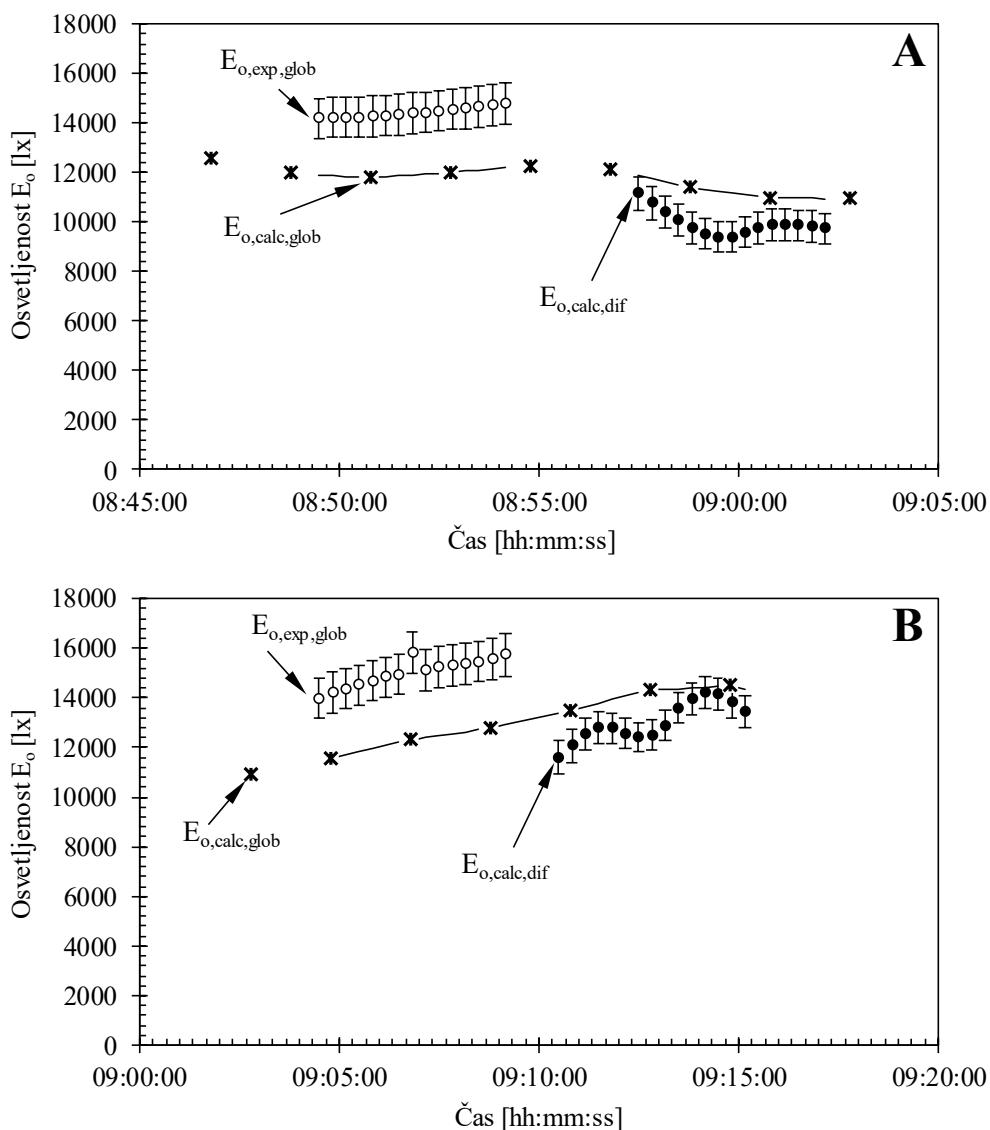
### 3.1.3.1 Kontrola normalizacije izmerjene osvetljenosti na CIE standardno oblačno nebo

Na oblačen dan, 5. 5. 2017, so bile opravljene meritve spektralne porazdelitve gostote toka vpadnega sončnega sevanja na valovnem območju med 288 nm in 1124 nm s pomočjo spektroradiometra MS-711 proizvajalca EKO INSTRUMENTS [114], ki se nahaja na strehi stavbe B na Tržaški cesti 25, Fakultete za elektrotehniko (FE) Univerze v Ljubljani.

Na **sliki 3.1.3.4** so prikazani rezultati eksperimentalne določitve osvetljenosti horizontalne površine, osvetljene z izsekom neba v smeri zenita in vidnim kotom  $28^\circ$  (in prostorskim kotom približno 1 sr) ( $E_{o,exp,tube}$ ) prav tako na dan 5. 5. 2017. Pričakovana natančnost meritev z instrumentom Voltcraft je bila  $\pm (5\% + 10 \text{ najmanj pomembnih števk})$ . Pri meritvah  $E_{o,exp,tube}$  je bila resolucija meritev 1 lx, zato je bilo treba poleg 5 % vrednosti meritve prištetи 10 lx, skupna natančnost meritev pa se je v prvem setu gibala med  $\pm 45$  lx in  $\pm 52$  lx oziroma  $\pm 6,2 - 6,4$  % vrednosti meritve, v drugem setu pa od  $\pm 53$  lx do  $\pm 63$  lx oziroma od  $\pm 5,9 - 6,2$  % vrednosti meritve. Območje natančnosti  $E_{o,calc,dif}$  je bilo enako območju za  $E_{o,exp,tube}$ .

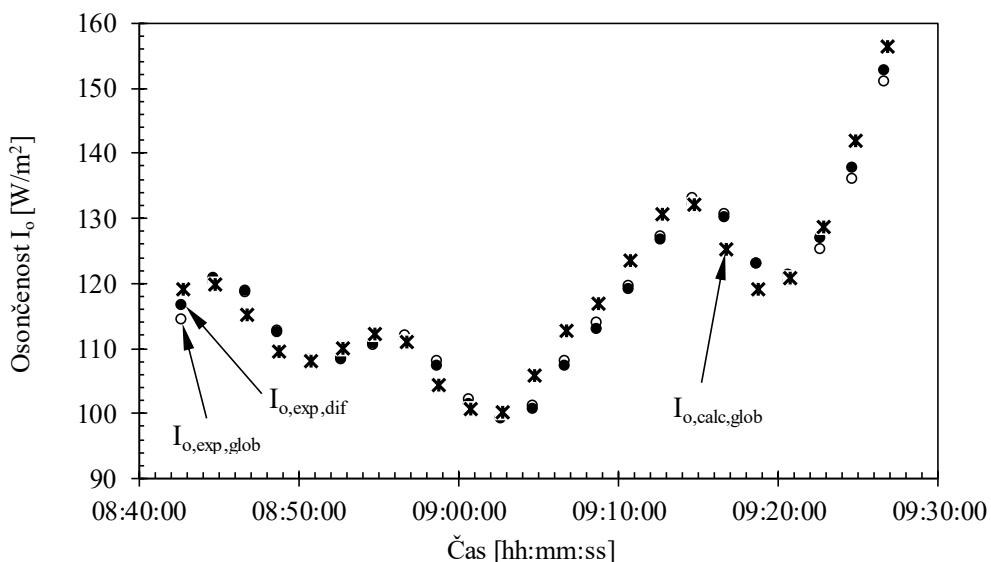
Rezultati meritev globalne osvetljenosti  $E_{o,exp,glob}$  so za prvi set meritev (set 1) prikazani na **sliki 3.1.3.4 A** in za drugi set meritev (set 2) na **sliki 3.1.3.4 B**. Pri teh meritvah je bila resolucija instrumenta nastavljena na 10 lx, zato je bilo treba 5% izmerjenim vrednostim prištetи še 100 lx. Skupna natančnost meritev pa se je v prvem setu meritev gibala med  $\pm 809$  lx in  $\pm 837$  lx oziroma  $\pm 5,6$  % vrednosti meritve, v drugem setu pa med  $\pm 800$  lx in  $\pm 892$  lx oziroma od  $\pm 5,6 - 5,7$  % vrednosti meritve.

Na **sliki 3.1.3.4** so prikazane tudi izračunane vrednosti globalne ( $E_{o,calc,glob,spectro}$  [lx]) in difuzne ( $E_{o,calc,dif}$  [lx]) osvetljenosti zunanje nezasenčene horizontalne površine. Vrednosti  $E_{o,calc,glob,spectro}$  se med setom 1 gibljejo med približno 11 000 in 13 000 lx, trend padanja ali naraščanja pa ni stalen, medtem ko pri setu 2  $E_{o,calc,glob,spectro}$  stalno narašča, od približno 10 900 lx do približno 12 800 lx. Že na prvi pogled se opazi, da meritev globalne osvetljenosti  $E_{o,exp,glob}$  z uporabljenim Voltcraftovim ročnim merilnikom osvetljenosti [111] v obeh setih meritev (**sliki 3.1.3.4 A** in **B**) preceni vrednosti (set 1: od 2270 lx do 2590 lx oziroma od 19 % do 21 %; set 2: od 2500 lx do 2800 lx oziroma od 22 % do 23 %, ena izmed meritev seta 2 odstopa za 29% (**slika 3.1.3.4 B**)) glede na vrednosti  $E_{o,calc,glob,spectro}$ , izračunane na podlagi spektralno radiometričnih meritev. Kljub temu pa imajo vrednosti podoben trend. Na **slikah 3.1.3.4 A** in **B** se tudi razločno vidi, da so izračunane vrednosti difuzne osvetljenosti  $E_{o,calc,dif}$  pričakovano nižje (set 1: od 710 lx do 1850 lx oziroma od 6 % do 16 %; set 2: od 200 lx do 1800 lx oziroma od 1 % do 13 %) od vrednosti globalne osvetljenosti  $E_{o,calc,glob,spectro}$  izračunanih na podlagi spektralno radiometričnih meritev. Sočasno so bili ti rezultati v skladu s pričakovanji, saj je trend spremenjanja vrednosti  $E_{o,calc,dif}$  drugačen kot pri  $E_{o,calc,glob,spectro}$ .



**Slika 3.1.3.4:** Osvetljenost zunanje nezasenčene horizontalne površine za set meritev 1 med 8.57 in 9.02 (A) in set meritev 2 med 9.10 in 9.15 (B) dne 5. 5. 2017: globalna osvetljenost, izmerjena z ročnim merilnikom osvetljenosti ( $E_{o,exp,glob}$  [lx], ○); globalna osvetljenost, izračunana iz izmerjenih spektralnih radiometričnih podatkov ( $E_{o,calc,glob}$  [lx], ×); difuzna hemisferična osvetljenost ( $E_{o,calc,dif}$  [lx], ●) izračunana iz podatkov o količini vpadne svetlobe iz izseka neba v smeri zenita in vidnim kotom  $28^\circ$  ( $E_{o,exp,tube}$  [lx]). Interpolirane vrednosti  $E_{o,calc,glob,spectro}$  za čase, pripadajoče  $E_{o,calc,dif}$  (črna polna črta)

**Figure 3.1.3.4:** Illuminance of unobstructed outdoor horizontal surface for set 1 (8.57 to 9.02) (A) and set 2 (9.10 to 9.15) (B) of measurements on 5th May 2017: global illuminance measured with handheld light meter ( $E_{o,exp,glob}$  [lx], ○); global illuminance calculated from the measured spectral radiometric data ( $E_{o,calc,glob,spectro}$  [lx], ×); diffuse hemispherical illuminance ( $E_{o,calc,dif}$  [lx], ●) calculated from the data about the amount of incident light from the sky segment in direction of zenith and field of view  $28^\circ$  ( $E_{o,exp,tube}$  [lx]). Interpolated values of  $E_{o,calc,glob,spectro}$  at times of corresponding  $E_{o,calc,dif}$  (black full line)



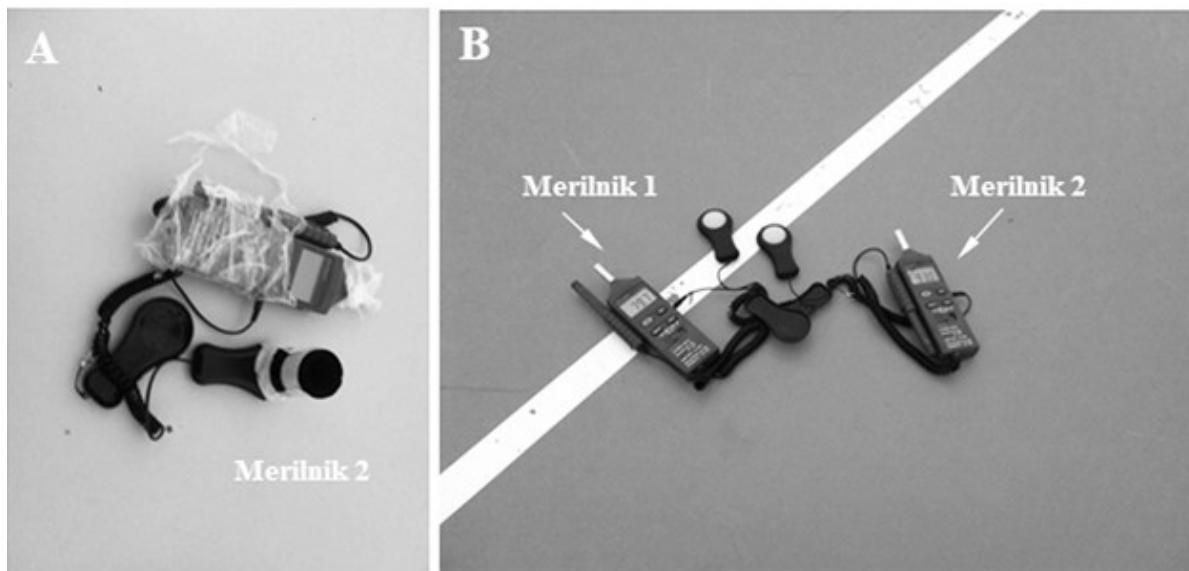
**Slika 3.1.3.5:** Osončenost zunanje horizontalne površine [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] v času eksperimenta dne 5. 5. 2017: globalna osončenost ( $I_{\text{o},\text{exp,glob}}$ , ○); difuzna osončenost ( $I_{\text{o},\text{exp,dif}}$ , ●)

**Figure 3.1.3.5:** Solar irradiance of outdoor horizontal surface [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] during the time of experiment on 5th May 2017: global irradiance ( $I_{\text{o},\text{exp,glob}}$ , ○); diffuse irradiance ( $I_{\text{o},\text{exp,dif}}$ , ●)

Tako je morda zato, ker je izključeni del neba preprosto svetlejši, kot predvideva porazdelitev svetlosti CIE standardno oblačnega neba [102]. Drugi mogoči razlog pa je, da je bila uspešno izključena direktna komponenta globalne osvetljenosti. Kljub močno oblačnemu nebu nekaj direktne komponente lahko pripotuje do Zemljinega površja. Da določitev pravega vpliva ni trivialna pokažejo rezultati meritev globalne  $I_{\text{o},\text{exp,glob}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] in difuzne  $I_{\text{o},\text{exp,dif}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] osončenosti (slika 3.1.3.5). S slike 3.1.3.5 je razvidno, da je ob posameznih časih difuzna osončenost  $I_{\text{o},\text{exp,dif}}$  celo višja od globalne.

### 3.1.3.2 Primerjava rezultatov

Vzporedno z že opisanimi meritvami na Brezovici je bila opravljena meritev globalne osvetljenosti tal v notranjosti stavbe ( $E_{\text{i},\text{exp,glob}}$  v lx) za medsebojno primerjavo vrednosti, izmerjenih z uporabljenima merilnikoma osvetljenosti [111] (slika 3.1.3.6). Rezultati meritev vključujejo osvetljenosti  $E_1$  in  $E_2$ , ter medsebojno absolutno ( $\Delta E$ ) in relativno ( $\Delta E/E_2$ ) razliko in so podani v preglednici 3.1.3.1. Vpliv na vrednosti KDS je opisan v nadaljevanju, v poglavju 3.2.2.



**Slika 3.1.3.6:** Merilnika osvetljenosti, uporabljen za eksperimentalno delo na Brezovici dne 29. 10. 2015. Prikaz zaščite instrumenta za meritve zunaj stavbe na Brezovici  $E_{o,exp,tube}$  (posnetek je bil narejen ob 13.36 uri) (A). Primerjava vrednosti inštrumentov opravljena istega dne po opravljenem setu 2 meritev osvetljenosti (posnetek je bil narejen ob 13.41 uri) (B)

**Figure 3.1.3.6:** The two lightmeters used for experimental work at Brezovica on 29<sup>th</sup> October 2015. In Figure the instrument's protection for outdoor  $E_{o,exp,tube}$  measurements is shown (picture taken at 13.36) (A). Comparison of the two instruments' readings, conducted on the same day after set 2 of illuminance measurements (picture taken at 13.41) (B)

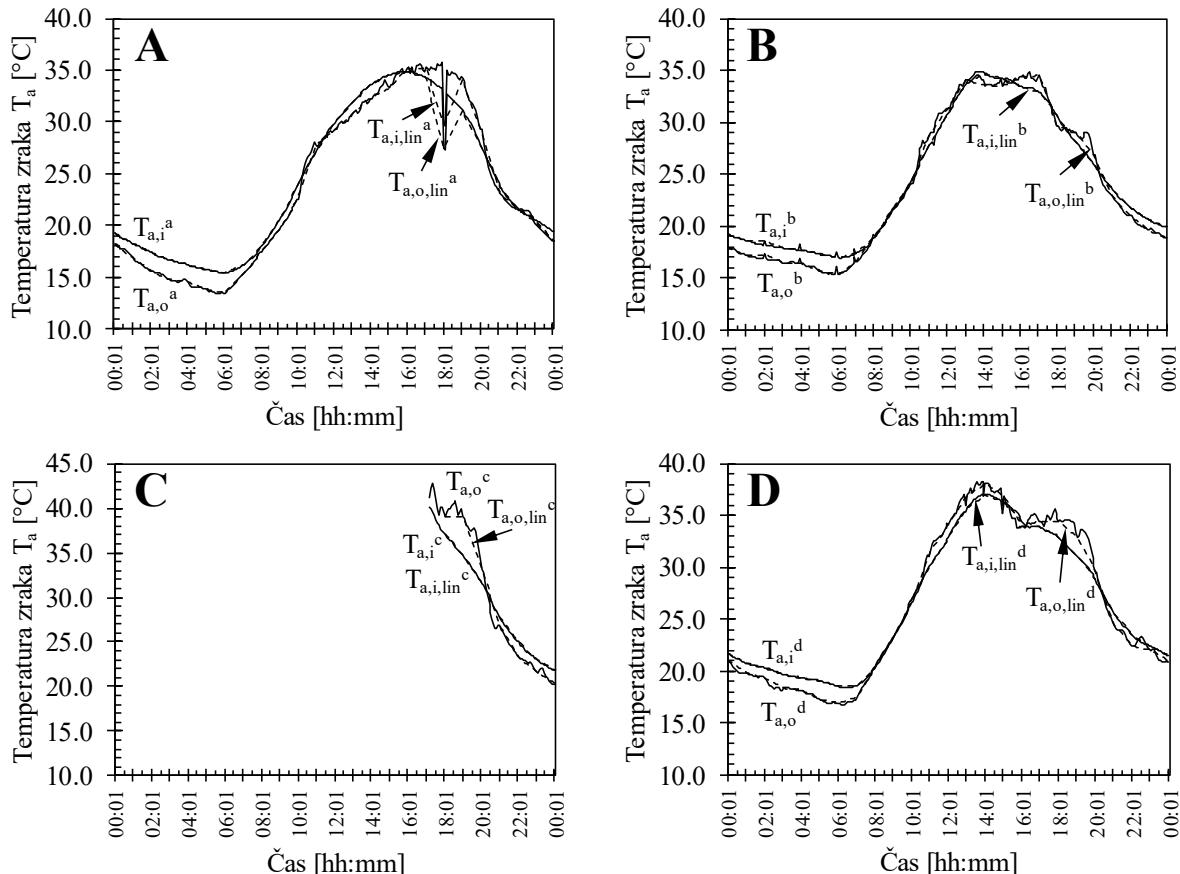
**Preglednica 3.1.3.1:** Rezultat testa primerljivosti odčitkov, zajetih z dvema merilnikoma osvetljenosti (**slika 3.1.3.6**) istega tipa Voltcraft in uporabljenima za eksperimentalno delo, opravljeno dne 29. 10. 2015

**Table 3.1.3.1:** Estimation of the light meter reading comparability of the two Voltcraft instruments (**Figure 3.1.3.6**) used for experimental work on 29<sup>th</sup> October 2015

	<b>Merilnik svetlobe 1 (za <math>E_{i,exp,glob}</math>)</b>	<b>Merilnik svetlobe 2 (za <math>E_{o,exp,tube}</math>)</b>	<b>Razlika</b>	<b>Razlika</b>
	<b><math>E_1</math></b>	<b><math>E_2</math></b>	<b><math>\Delta E_h = E_{h,2} - E_{h,1}</math></b>	<b><math>\Delta E/E_2</math></b>
	[lx]	[lx]	[lx]	[%]
1	75,8	88,8	13,0	14,6
2	77,6	91,0	13,4	14,7
3	78,8	92,5	13,7	14,8
4	79,9	93,6	13,7	14,6
5	80,5	94,4	13,9	14,7
6	80,9	94,9	14,0	14,8
Povp.	78,92	92,53	13,62	14,7

### 3.1.4 Raziskava topotnega odziva športne dvorane Brezovica

Vzporedno z meritvami hitrosti in temperature zraka v zračnem kanalu so potekale tudi meritve temperature zraka zunaj ( $T_{a,o}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]) in v notranjosti ( $T_{a,i}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]) ŠDB. Vremenska postaja proizvajalca Conrad [117] (poglavlje 2.2.4), vključuje tudi sonde za meritev relativne vlage v ( $\text{RH}_{a,i}$  [%]) in zunaj ( $\text{RH}_{a,o}$  [%]) stavbe ter hitrosti  $v_w$  [m/s] in smeri  $\text{DIR}_w$  vetra. Dnevnik meritev je podan v **prilogi 3.1.2.A**.



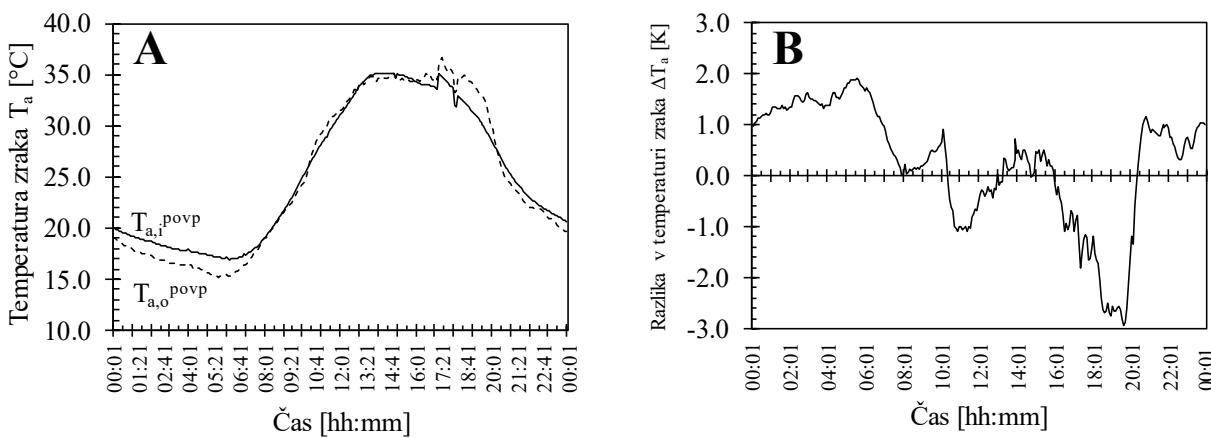
**Slika 3.1.4.1:** Izmerjena temperatura zraka znotraj  $T_{a,i}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] in zunaj  $T_{a,o}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] ŠDB za primere od a do d iz **preglednice 3.1.2.1**: obdobje a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013 (A), obdobje b med 23. 7. 2013 in 26. 7. 2013 (B), obdobje c 6. 8. 2013, obdobje d od 7. 8. 2013 do 9. 8. 2013 (D). Prikazana je tudi linearna interpolacija med vrednostmi temperature zraka ob polnih urah (črtkana črta)

**Figure 3.1.4.1:** The measured air temperature inside  $T_{a,i}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] and outside  $T_{a,o}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] the air-supported structure at Brezovica for analysis cases a to d given in **Table 3.1.2.1**: period a from 17. 7. 2013 to 22. 7. 2013 (A), period b from 23. 7. 2013 to 26. 7. 2013 (B), period c 6. 8. 2013 (C), period d from 7. 8. 2013 to 9. 8. 2013 (D). The linear interpolation between air temperature values at full hours is also shown (dashed line)

**Slika 3.1.4.1** prikazuje povprečne vrednosti izmerjene temperature zraka v ( $T_{a,i}$ ) in zunaj ( $T_{a,o}$ ) ŠDB za enaka obdobja kot so navedena v **preglednici 3.1.2.1** (primeri od a do d). Povprečja po dnevih so bila izvedena za posamezen čas v intervalu 5 min (poglavlje 2.2.4). Ker je bil v nadaljevanju namen primerjati rezultate z rezultati računskega dela, so na grafih (**slika 3.1.4.1**) podane tudi krivulje, ki prikazujejo vrednosti temperature, če bi vzeli povprečne vrednosti ob polnih urah, vse druge vrednosti v posameznem intervalu med izmerjenimi vrednostmi pa bi pridobili z linearno interpolacijo. Analiza

razlik pokaže, da bi se tako pripravljeni podatki v povprečju relativno razlikovali manj kot 1 %, vendar bi bila ta razlika večja od resolucije meritev zanesljivosti in natančnosti ( $0,1^{\circ}\text{C}$ ) [117].

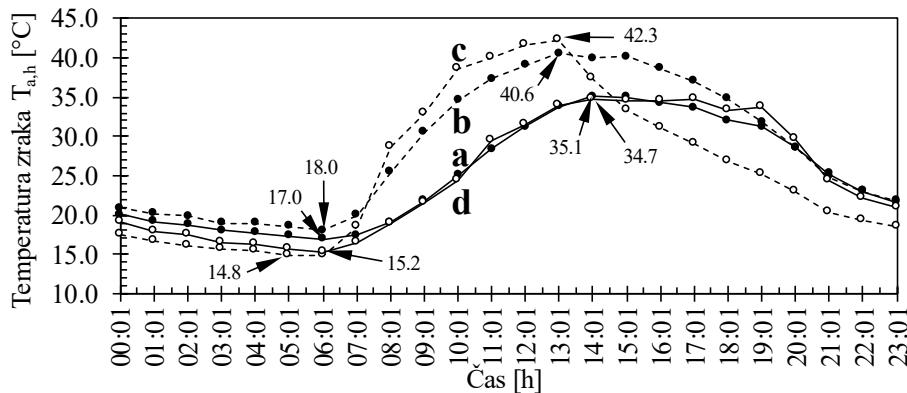
Če rezultate s **slike 3.1.4.1** primerjamo s temperaturami prikazanimi na **sliki 3.1.2.1**, ugotovimo, da je temperatura v stavbi skoraj ves čas nižja od temperature zraka ob notranji stranici zračnega kanala (celo do  $15,5^{\circ}\text{C}$ ), ko je prisotno sončno sevanje (prib od 8. do 19. ure) in nižja od temperature zraka ob zunanjih membrani ( $11,9^{\circ}\text{C}$ ) med 8. in 15. uro, ko je sonce že prešlo na drugo stran stavbe (**slika 3.1.2.2**). Temperatura zunaj stavbe je bila praktično nižja od temperature ob notranji stranici zračnega kanala večino dneva, razen med 19. in 21. uro, in nižja od temperature ob zunanjih stranic zračnega kanala med približno 7. in 15. uro.



**Slika 3.1.4.2:** Povprečne temperature zraka, izmerjene znotraj  $T_{a,i}^{\text{povp}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] in zunaj  $T_{a,o}^{\text{povp}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] ŠDB (A) v obdobjih, definiranih v **preglednici 3.1.2.1** (obdobje a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, obdobje b med 23. 7. 2013 in 26. 7. 2013, obdobje c 6. 8. 2013, obdobje d od 7. 8. 2013 do 9. 8. 2013), ter njuna razlika (B)

**Figure 3.1.4.2:** Average measured temperatures of air inside and outside the air-supported dome at Bezovica (A), averaged over the time periods given in **Table 3.1.2.1** (period a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, period b between 23. 7. 2013 and 26. 7. 2013, period c on 6. 8. 2013, period d from 7. 8. 2013 to 9. 8. 2013) and their difference (B)

Pripravljena sta bila še povprečna profila temperature v ( $T_{a,i}^{\text{povp}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]) in zunaj ( $T_{a,o}^{\text{povp}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]) ŠDB v obdobjih, navedenih v **preglednici 3.1.2.1**. S **slike 3.1.4.2** je nazorno razvidna topotna dinamika stavbe v poletnem času. Od 24. do 10. ure dopoldne je v povprečju obdobja temperatura v stavbi višja od temperature zunaj, dvigati pa se začne skoraj sočasno (zamik je krajši od 15 min). Minimalna vrednost notranje temperature je  $16,9^{\circ}\text{C}$ , zunaj pa  $15,2^{\circ}\text{C}$ . Med 10. in 13. uro se temperatura zunanjega ozračja dvigne nad notranjo, vendar se kmalu notranja temperatura zopet dvigne nad zunanjim ter med 14. in 15 uro doseže svoj maksimum ( $35,1^{\circ}\text{C}$ ). Zunanja temperatura doseže še nekoliko višje vrednosti, sicer eno do dve ur pozneje ( $36,6^{\circ}\text{C}$ ). Po 15. uri začne temperatura v stavbi vztrajno padati, višja od zunanje temperature zraka pa postane zopet med 20. in 21. uro, ob sončnem zahodu. Kot je bilo že poudarjeno, je temperatura zraka ob notranji stranici zračnega kanala večji del dneva nad temperaturo notranjega zraka (tudi tedaj, ko sonce obsije nasprotno SZ stranico stavbe). Posledično lahko sklepamo, da je v tem času temperatura zraka podobna temperaturi zraka zunaj stavbe zaradi konstantnega dovoda zunanjega zraka (1,6-krat na uro za celotno prostornino stavbe) za zagotavljanje tlačne razlike med notranjostjo in zunanjostjo stavbe, izmenjava predznaka razlike  $T_{a,i}$  in  $T_{a,o}$  pa predvsem posledica prisotnosti sončnega sevanja in izmenjave toplote med notranjostjo in zunanjostjo ŠDB.

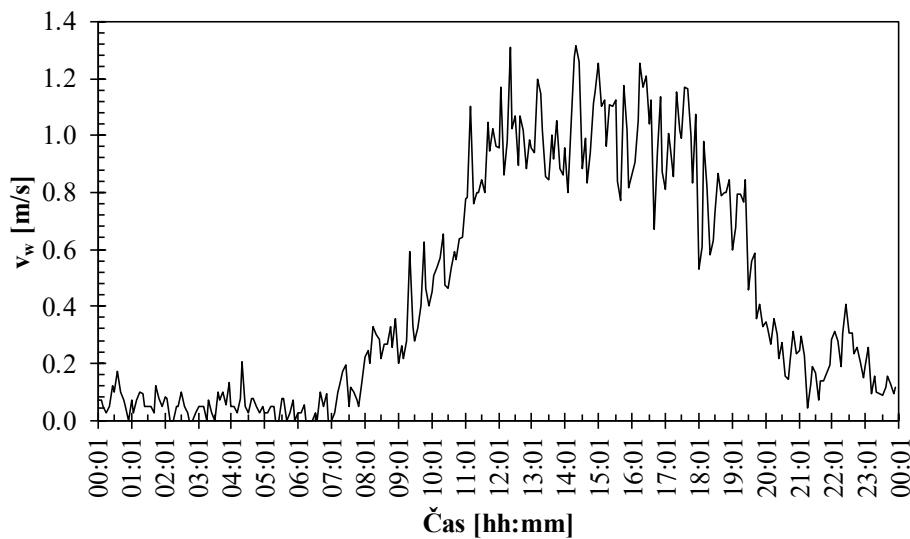


**Slika 3.1.4.3:**

Povprečna temperatura zraka  $T_{a,h}$  [ $^{\circ}$ C] ob izbranih urah dneva na štirih merilnih mestih: v stavbi  $T_{a,h,i}$  (krivulja a), ob notranji stranici zračnega kanala  $T_{a,k,h,i}$  (krivulja b), ob zunanj stranici zračnega kanala  $T_{a,k,h,o}$  (krivulja c) ter zunaj stavbe  $T_{a,h,o}$  (krivulja d)

**Figure 3.1.4.3:**

Average temperature of air  $T_{a,h}$  [ $^{\circ}$ C] at chosen hours of a day at four measurement locations: inside the studied building  $T_{a,h,i}$  (curve a), next to the inner side of air channel  $T_{a,k,h,i}$  (curve b), next to the outer side of air channel  $T_{a,k,h,o}$  (curve c) and outside the building  $T_{a,h,o}$  (curve d)



**Slika 3.1.4.4:**

Povprečne hitrosti vetra  $v_w$  [m/s], izmerjene na zunanj strani ob ŠDB v obdobjih prikazanih v **preglednici 3.1.2.1** (obdobje a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, obdobje b med 23. 7. 2013 in 26. 7. 2013, obdobje c 6. 8. 2013, obdobje d od 7. 8. 2013 do 9. 8. 2013)

**Figure 3.1.4.4:**

Average measured wind velocities  $v_w$  [m/s] next to the air-supported dome at Brezovica and averaged over the time periods given in **Table 3.1.2.1** (period a med 17. 7. 2013 in 22. 7. 2013, period b between 23. 7. 2013 and 26. 7. 2013, period c 6. 8. 2013, period d from 7. 8. 2013 to 9. 8. 2013)

Na **sliki 3.1.4.3** so skupaj prikazani podatki o povprečni temperaturi zraka na štirih pozicijah: v stavbi, ob notranji stranici zračnega kanala, ob zunanj stranici zračnega kanala ter zunaj stavbe za posamezne ure dneva. Ti podatki skupaj kažejo eksperimentalno določeno časovno spremenjanje temperaturnega

profila. Poleg pričakovanega rezultata, da temperatura zraka v zračnem kanalu doseže najvišje vrednosti ob 13. uri (med 13. in 14. uro na mestu meritev ni več vpadnega direktnega sončnega sevanja, **slika 3.1.2.2**), je potrebno poudariti, da je temperatura ob zunani stranici nižja od vseh drugih temperatur med 24. in 6. uro ter med 16. in 24. uro. Ta rezultat je mogoče pojasniti z radiacijskim hlajenjem zunanje membrane (ki je tudi nekoliko prosojna za dolgovalovno IR sevanje, poglavje 3.1.1) proti nebu, ki na valovnem območju atmosferskega okna ( $8 \mu\text{m} < \lambda < 13 \mu\text{m}$ ) predstavlja ponor toplove [77]. V **prilogi 3.1.4.A** je prikazan rezultat meritev dne 18. 7. 2013, ki ponazarja, da temperaturni profil, prikazan na **sliki 3.1.4.3**, ni le posledica povprečja vrednosti temperature ob izbranih urah dneva, ampak domnevno rezultat radiacijskega hlajenja pri katerem je nebo ponor toplove.

S **slike 3.1.4.4** je razvidno, da se veter pojavlja predvsem podnevi. Maksimalne vrednosti do 1,3 m/s doseže v popoldanskih urah, ko v povprečju piha s hitrostjo 1,0 m/s. Povprečni mesečni hitrosti vetra za obravnavana meseca julij in avgust v Ljubljani sta 1,4 in 1,2 m/s [160], medtem ko sta povprečni mesečni maksimalni vrednosti v dnevu za ta dva meseca 2,4 m/s (julij) in 2,1 m/s (avgust) [160]. Povprečje vseh izmerjenih vrednosti znaša 0,5 m/s, kar kaže na zmerne vetrovne razmere.

## 3.2 Raziskave na podlagi računalniških izračunov in simulacij

### 3.2.1 Raziskava topotnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja Športne dvorane Brezovica

Na podlagi rezultatov iz poglavja 3.1.4 (**slika 3.1.4.3**) in **preglednice 3.1.2.2** je bilo pripravljenih 5 setov (*primeri od a do e*) vhodnih podatkov za izračun radiacijskega ( $h_r$ ) in izračun konvekcijskega ( $h_c$ ) koeficiente prenosa toplove v skladu s standardom EN ISO 15099:2003 [119]. Eksperimentalno dobljeni vhodni podatki (**preglednica 3.2.1.1**, *primeri od a do e*) zajemajo hitrost zraka v zračnem kanalu (v [ $\text{m/s}$ ]), temperaturi stranic zračnega kanala oziroma zraka neposredno ob stranicah ( $T_{s,k,i}$  in  $T_{s,k,o}$  [ $^\circ\text{C}$  ali K]), razliko med temperaturo zraka in površine ( $\Delta T_{a-s}$  [K]) ter srednjo absolutno temperaturo zraka v kanalu ( $T_m$  [K]) (poglavlje 2.3.1). Primer e (**preglednica 3.2.1.1**) je bil pripravljen, da bi ponazorili vpliv pretoka zraka. Rezultati meritev pokažejo, da je vpliv spremembe vhodnih podatkov (**preglednica 3.2.1.1**, primeri od a do e) in naklona konstrukcijskega sklopa na topotne lastnosti obravnavnih različic dvojnega membranskega ovoja majhen, saj so spremembe topotnega upora manjše od 7,3 % pri različicah PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE ter manjše od 3,2 % v primeru ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Izračun faktorja g pokaže močan vpliv optičnih lastnosti na njegovo vrednost, medtem ko je vpliv spremembe prehoda toplove v odvisnosti od naklona segmenta ovoja na faktor g zanemarljiv.

Kot je navedeno v poglavju 2.2.2, so bile meritve, na podlagi katerih so bili pripravljeni vhodni podatki, opravljene na višini pnevmatske konstrukcije 4,1 m od tal. **Slika 2.3.2.1** prikazuje aproksimacijo dejanske sinklastične oblike stavbe za izračun topotnega upora zračno podprtrega ovoja stavbe  $R_i$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ] v odvisnosti od naklona konstrukcijskega sklopa  $\gamma$  [ $^\circ$ ]. Izračun  $R_i(\gamma_i)$  je bil izveden za 12 primerov naklona segmentov cilindričnega dela ovoja (**preglednica 2.3.2.1**), indeks i pa ponazarja zaporedno številko segmenta v smeri padajočega naklona (i = 1 do 12). Mesto na terenu izvedenih meritev (**slika 2.2.2.1 A**) se sklada s segmentom št. 3 (**slika 2.3.2.1 C**), njegov naklon ( $\gamma_3$ ) pa je  $66^\circ$  (**preglednica 2.3.2.1**). Tako je bilo izračunanih tudi 12 radiacijskih ( $h_{r,i}$ ) in 12 konvekcijskih ( $h_{c,i}$ ) koeficientov prenosa toplove za tri primere sestave dvojnega zračno podprtrega membranskega ovoja: PES(1)2009/PES(2)2009, ETFE/ETFE, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Za vse je bilo uporabljenih pet setov vhodnih podatkov od a do e, podanih v **preglednici 3.2.1.1**.

**Preglednica 3.2.1.1:** Primeri vhodnih podatkov za izračun koeficientov radiacijskega ( $h_r$ ) in konvekcijskega ( $h_c$ ) koeficiente prenosa toplote [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ]: čas v dnevnu, ki mu pripadajo podatki [h], hitrost zraka v zračnem kanalu (v [m/s]), temperaturi stranic zračnega kanala oziroma zraka neposredno ob stranicah ( $T_{s,k,i}$  in  $T_{s,k,o}$  [ $^\circ\text{C}$  ali K]), razliko med temperaturo zraka in površine ( $\Delta T_{a-s}$  [K]) ter srednja absolutna temperatura zraka v kanalu ( $T_m$  [K])

**Table 3.2.1.1:** Input data cases for the calculation of radiation ( $h_r$ ) in convection ( $h_c$ ) heat transfer coefficient [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ]: corresponding time of day [h], air velocity in the channel (v [m/s]), temperatures of air channel sides right next to the surfaces ( $T_{s,k,i}$  in  $T_{s,k,o}$  [ $^\circ\text{C}$  or K]), difference between the air and channel sides temperature ( $\Delta T_{a-s}$  [K]) and average absolute air temperature in the channel ( $T_m$  [K])

Primer	Čas [h]	v [m/s]	$T_{s,k,o}$ [ $^\circ\text{C}$ ali K]	$T_{s,k,i}$ [ $^\circ\text{C}$ ali K]	$T_m$ [K]	$\Delta T$ [K]
a	1 <sup>h</sup> -2 <sup>h</sup>	0,01	17,1 ali 291,3	20,5 ali 293,7	292,0	1,7
b	10 <sup>h</sup> -11 <sup>h</sup>	0,09	35,8 ali 309,0	32,6 ali 305,8	307,4	1,6
c	18 <sup>h</sup> -19 <sup>h</sup>	0,03	27,9 ali 301,1	35,9 ali 309,1	305,1	4,0
d	Povp.	0,03	25,7 ali 298,8	28,5 ali 301,7	300,1	1,4
e	-	0,00	25,7 ali 298,8	28,5 ali 301,7	300,1	1,4

**Preglednica 3.2.1.2:** Podatki o geometriji zračnega kanala: hidravlični premer  $D_{hyd}$  [m], povprečna debelina zračnega kanala med membranama  $d_{povp}$  [m] (**slika 2.3.2.1 B**) in razmerje med višino zračnega kanala v posameznem segmentu in debelino zračnega kanala ( $d_{povp}$ )  $A_{gv,i}$  [-]

**Table 3.2.1.2:** Data about the envelope air channel: hydraulic diameter  $D_{hyd}$  [m], average thickness of the air channel between the membranes  $d_{povp}$  [m] (**Figure 2.3.2.1 B**) and the ratio between the channel segment height and the average channel thickness ( $d_{povp}$ )  $A_{gv,i}$  [-]

	$D_h$ [m]	$d_{povp}$ [m]	$A_{gv,i}$ [-]
Zračni kanal	0,30	0,126	12

Poleg podatkov navedenih v **preglednici 3.2.1.1**, in podatkov o naklonu segmentov ovoja so bili potrebni tudi podatki o emitivnosti površin ( $\epsilon_T$  [-]) stranic zračnega kanala (površina notranje in zunanje membrane, ki je orientirana proti zračnemu kanalu) (**preglednica 3.1.1.4**), podatki o geometriji zračnega kanala (**preglednica 3.2.1.2**), ter podatki o naravi oziroma lastnostih zračnega toka v njem (**preglednica 3.2.1.3**).

Metais in Eckert podajata [161] način določitve režima (zračnega) toka v vertikalnih ceveh na podlagi Reynoldsovega in Graetzovega števila (razmerje med produkтом Grashofovega števila (Gr), Prandtlovega števila (Pr) in debelino zračnega kanala (d) ter dolžino kanala (L)). Če primerjamo sete podatkov (v,  $T_m$  in  $\Delta T$ ) od a do d, podane v **preglednici 3.2.1.1**, ugotovimo, da zračni tok ob 2. uri ponoči (primer a) ustreza mešani konvekciji na meji med laminarnim in turbulentnim tokom, tok ob 11. in 19. uri (primer b) pa mešani konvekciji in turbulentnemu toku. V povprečju (primer d) bi imeli na podlagi teh podatkov v zračnem kanalu med membranama mešano konvekcijo zraka in turbulentni tok.

**Preglednica 3.2.1.3:** Podatki o lastnostih zraka in zračnega toka v zračnem kanalu dvojnega membranskega ovoja za sete vhodnih podatkov od a do d v **preglednici 3.2.1.1**

**Table 3.2.1.3:** Data about the air properties and its flow in the channel of the double membrane envelope for the sets of input data from a to d given in **Table 3.2.1.1**

Količina	Enota	Primer			
		a	b	c	d
Dinamična viskoznost zraka - $\mu$	[N.s/m <sup>2</sup> ]	1,81E-05	1,89E-05	1,88E-05	1,86E-05
Kinematična viskoznost zraka - $v$	[m <sup>2</sup> /s]	1,50E-05	1,64E-05	1,62E-05	1,58E-05
Specif. toplotna kapaciteta zraka - $c_p$	[J/kg.K]	1004,8	1005,7	1005,5	1005,3
Gostota - $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,21	1,15	1,16	1,18
Toplotna prevodnost zraka - $\lambda$	[W/m.K]	0,026	0,027	0,027	0,026
Toplotna difuzivnost zraka - a	[m <sup>2</sup> /s]	2,10E-05	2,32E-05	2,28E-05	2,22E-05
Prandtlovo število - Pr	[-]	7,12E-01	7,09E-01	7,09E-01	7,10E-01
Grashofovo število - Gr	[-]	4,04E+05	3,19E+05	3,31E+05	3,57E+05
Rayleighovo število - Ra	[-]	2,88E+05	2,26E+05	2,35E+05	2,53E+05
Izraz: $Gr \cdot Pr \cdot d/L =$	[-]	2,40E+04	1,89E+04	1,96E+04	2,11E+04
Reynoldsovo število - Re	[-]	2,02E+02	1,66E+03	5,61E+02	5,78E+02
Režim zračnega toka (ang. »regimes of flow«)		mešani laminarni- turbulentni	mešani turbulentni	mešani turbulentni	mešani turbulentni

Za naklone prosojnih elementov ovoja  $\gamma$  med  $60^\circ$  in  $90^\circ$  (v danem primeru za  $i = 1, 2, 3$ ) standard ISO 15099:2003 [119] navaja veljavnost postopka oziroma enačb za izračun Nusseltovega števila  $Nu_i$  za Rayleighova števila v območju med  $10^2$  in  $10^7$ , kar je v primeru obravnavanega primera izpolnjeno. Za preostale obravnavane segmente ovoja ( $i = 4$  do  $12$ ) pa vrednosti Rayleighovega števila presegajo območje veljavnosti, ki ga navaja standard ISO 15099:2003 ( $Ra < 10^5$ ) [119], vendar hkrati uporabnika nadalje usmeri k raziskavi, ki jo je opravil Hollands s sodelavci [162]. Avtorji poudarjajo, da je za višja Rayleighova števila sicer lahko pričakovana veljavnost enačb, vendar bi bile za dokončno potrditev potrebne dodatne raziskave, ter navajajo, da bi morale podane enačbe veljati za poljubno razmerje višine in debeline zračnega kanala.

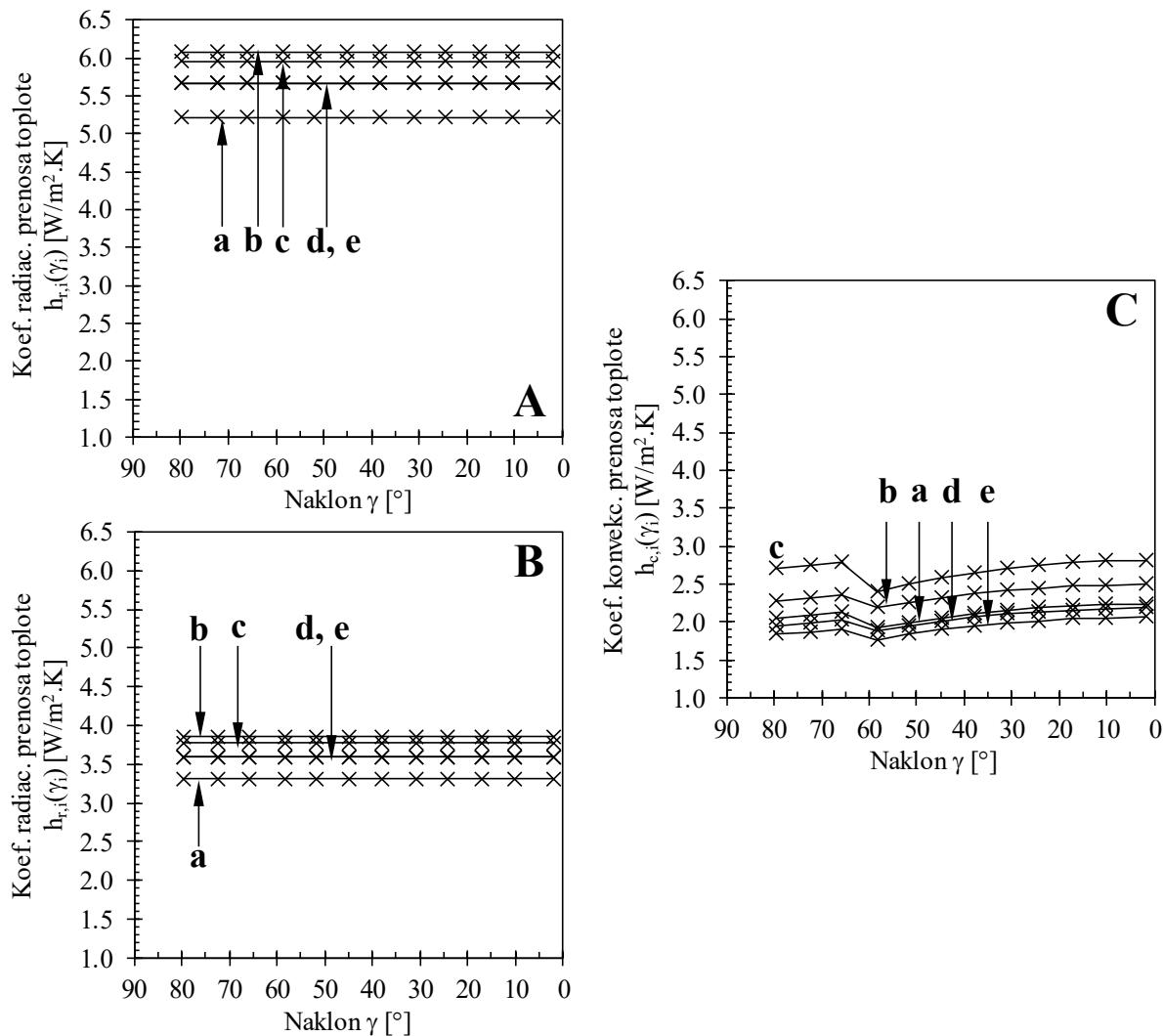
**Slika 3.2.1.1** prikazuje rezultate izračuna  $h_{r,i}(\gamma_i)$  in  $h_{c,i}(\gamma_i)$  za konstrukcijske sklope PES(1)2009/PES(2)2009, ETFE/ETFE in toplotno izolirano različico le-tega ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Medtem ko je rezultat izračuna za PES(1)2009/PES(2)2009 eksperimentalno podprt in relevanten, rezultati za ostali dve različici konstrukcijskega sklopa ŠDB ne kažejo realnega stanja (izbor  $v$ ,  $T_m$  in  $\Delta T_{a-s}$  ni poljuben), marveč so namenjeni analizi, koliko v vseh primerih konstrukcijskih sklopov eksperimentalno določeno spremenjanje vrednosti  $v$ ,  $T_m$  in  $\Delta T_{a-s}$  vpliva na toplotne karakteristike. V skladu s tem sta bila za vse primere vhodnih podatkov od a do e privzeta enaka toplotna upora notranje in zunanje mejne plasti ( $R_{si}$  in  $R_{se}$  [m<sup>2</sup>.K/W]), njune vrednosti (**priloga 3.2.1.A**) pa so bile ocenjene na podlagi primera d v **preglednici 3.2.1.1** in podatkov, prikazanih na **sliki 3.1.4.2**.

Ker so emitivnosti  $e_T$  površin tkanin PES(1)2009n, PES(2)2009z in folije ETFE enake (**preglednica 3.1.1.4**), so koeficienti radiacijskega prenosa toplote  $h_{r,i}(\gamma_i)$  za primera PES(1)2009/PES(2)2009 in

ETFE/ETFE ob upoštevanju posameznega seta vhodnih podatkov enaki, kot je tudi podano na **sliki 3.2.1.1 A**. Kot omenjeno v poglavju 3.1.1.2.1, emitivnost  $e_T = 0,6$  ne ustreza termični emitivnosti vzorca PEfabric. Vendar, upoštevanje te vrednosti, pripisuje zunanji strani notranje membrane (PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) topotno izoliranega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE lastnosti kombinacije PEfabric z nizko emisijskim materialom, neprepustnim za topotno IR sevanje. Za tak primer sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, z  $e_T$  zunanje strani notranje membrane 0,6, pa so  $h_{r,i}(\gamma_i)$  podani ločeno na **sliki 3.2.1.1 B**. Iz primerjave **slik 3.2.1.1 A** in **B** lahko povzamemo, da sprememba emitivnosti  $e_T$  površine zunanje strani notranje membrane z 0,96 na 0,60 pričakovano zmanjša vrednosti  $h_{r,i}(\gamma_i)$ , in sicer za 37 % za vse primere obravnave od a do e. Čeprav pričakovano, vendar vseeno zanimivo je tudi dejstvo, da so vrednosti  $h_{r,i}(\gamma_i)$  najvišje sredi dneva (ob 11. uri, primer b), ko  $T_m$  zavzame najvišje vrednosti, in nasprotno najnižje ponoči (ob 2. uri, primer a). Tako se vrednosti (vsi primeri sklopov od a do e) glede na primer a razlikujejo za slabih 17 %. Če bi emitivnost  $e_T$  zunanje strani notranje membrane zračnega kanala kateregakoli od obravnnavanih primerov konstrukcijskega sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE znižali pod 0,30 oziroma obe stranic zračnega kanala pod 0,40, bi vrednosti  $h_{r,i}(\gamma_i)$  za vse primere analize od a do e (**preglednica 3.2.1.1**) znižali pod pripadajoče vrednosti  $h_{c,i}(\gamma_i)$ .

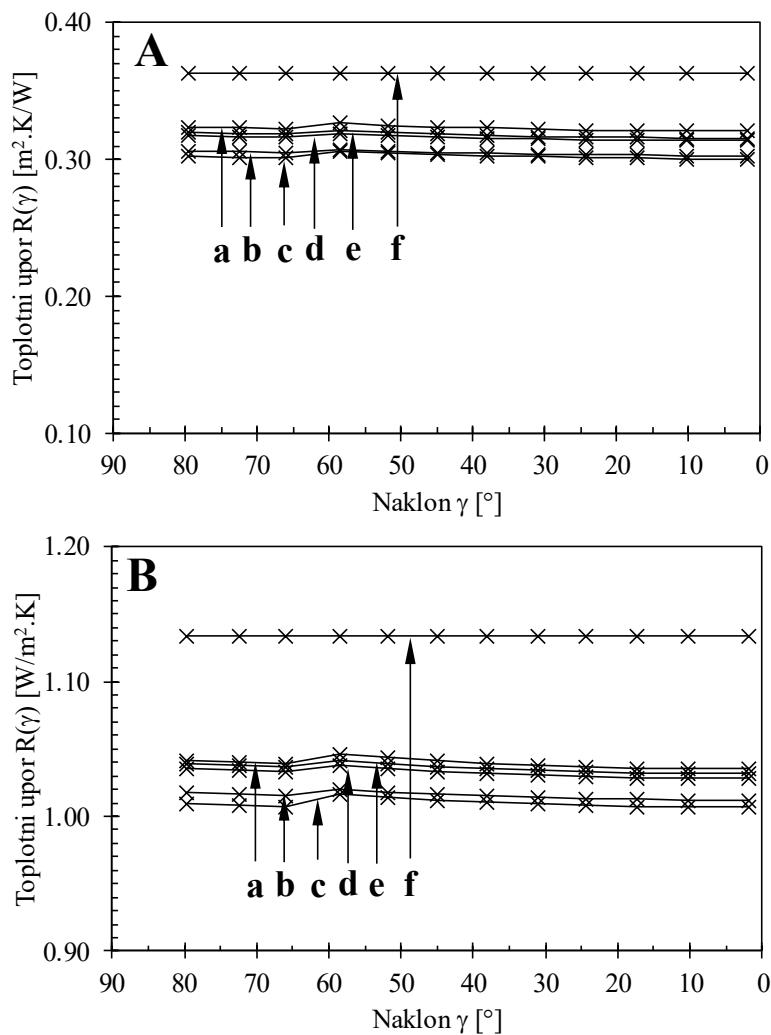
Kot je bilo že rečeno, se koeficienti konvekcijskega prenosa topote  $h_{c,i}(\gamma_i)$  za obravnavane različice dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa med seboj ne razlikujejo, saj so bili za vse različice konstrukcijskega sklopa uporabljeni enaki vhodni podatki. Iz podatkov na **sliki 3.2.1.1** je mogoče izluščiti, da je za primere a, b in c vpliv spremembe vhodnih parametrov  $v$ ,  $T_{s,k,i}$ ,  $T_{s,k,o}$ ,  $\Delta T_{a-s}$  in  $T_m$  nekoliko večji, kakor je vpliv naklona segmentov  $\gamma_i$  ( $i = 1$  do 12), saj je razmerje maksimalnih in minimalnih vrednosti  $h_{c,i}(\gamma_i)$  nekoliko večje (vrednost med 1,25 in 1,32) za primere a, b, in c za posamezen kot nagiba  $\gamma_i$ , kot je isto razmerje (vrednost med 1,14 in 1,17) za posamezen primer vhodnih parametrov a, b ali c, pri čemer indeks i teče od 1 do 12 v smeri padajočega naklona segmenta ovoja, oz. od spodaj do vrhnjega položaja membranske stavbe. Dodatno lahko rečemo, da na  $h_{c,i}(\gamma_i)$  v danem naboru podatkov in metodi izračuna znatno ne vpliva hitrost zraka, temveč  $\Delta T_{a-s}$ . Pomembno je omeniti tudi, da primer d, ki predstavlja povprečne razmere tekom dneva, podcenii konvekcijske koeficiente prenosa topote  $h_{c,i}(\gamma_i)$ , kar dodatno potrdi, da je model opisa  $h_{c,i}(\gamma_i)$  v danih primerih obravnave izkaže večjo občutljivost predvsem na kombinacijo vhodnih klimatskih parametrov kot na posamezne vrednosti.

Iz primerjave **slik 3.2.1.1 A, B** in **C** lahko povzamemo, da so vrednosti  $h_{r,i}(\gamma_i)$  pri izhodiščni različici konstrukcijskega sklopa PES(1)2009/PES(2)2009 ves čas v dnevnu (in s tem tudi različne kombinacije vhodnih parametrov  $v$ ,  $\Delta T_{a-s}$  in  $T_m$ ) bistveno višje od vrednosti  $h_{c,i}(\gamma_i)$  (od 2,1- do 2,8-krat višje). Maksimalna sprememba  $h_{c,i}(\gamma_i)$  s sprememboto naklona (0,41 W/m<sup>2</sup>.K) pa bi znašala le 6,7 % maksimalne vrednosti in 7,8 % minimalne vrednosti  $h_{r,i}(\gamma_i)$ . Za primer izoliranega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE se rezultati na račun zmanjšanja  $e_T$  zunanje strani notranje membrane spremenijo in vrednosti  $h_{r,i}(\gamma_i)$  ter  $h_{c,i}(\gamma_i)$  postanejo bolj primerljive (njuno razmerje med 1,3 in 1,8). V skladu s prejšnjo ugotovitvijo, da je na  $h_{c,i}(\gamma_i)$  najbolj vplivala vrednost  $\Delta T_{a-s}$ , so razlike med koeficientoma  $h_{r,i}(\gamma_i)$  in  $h_{c,i}(\gamma_i)$  za topotno izolirani sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE najnižje za primer c in so v povprečju manjše od 29 %.



**Slika 3.2.1.1:** Izračunani koeficienti prenosa topote z radiacijo  $h_{r,i}(\gamma_i)$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] in konvekcijo  $h_{c,i}(\gamma_i)$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] v odvisnosti od naklona konstrukcijskega sklopa  $\gamma_i$  [ $^\circ$ ]:  $h_{r,i}(\gamma_i)$  za primera PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE (A),  $h_{r,i}(\gamma_i)$  za primer ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) in  $h_{c,i}(\gamma_i)$  za vse tri primere sklopa PES(1)2009/PES(2)2009, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (C). Različne krivulje na (A),(B) in (C) ponazarjajo različne primere vhodnih podatkov za izračun koeficientov (primeri od a do e v preglednici 3.2.1.1)

**Figure 3.2.1.1:** The calculated radiative  $h_{r,i}(\gamma_i)$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] and convective  $h_{c,i}(\gamma_i)$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] heat transfer coefficients in dependence on constructional complex inclination  $\gamma_i$  [ $^\circ$ ]:  $h_{r,i}(\gamma_i)$  of PES(1)2009/PES(2)2009 and ETFE/ETFE (A),  $h_{r,i}(\gamma_i)$  of ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) and  $h_{c,i}(\gamma_i)$  for all three envelope cases PES(1)2009/PES(2)2009, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (C). Different curves in (A), (B) and (C) represent different cases of input data for the calculation of the coefficients (cases from a to e in Table 3.2.1.1)



**Slika 3.2.1.2:** Toplotni upor  $R_i(\gamma_i)$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ], izračunan za različice konstrukcijskega sklopa dvojnega ovoja ŠDB PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (A) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) v odvisnosti od naklona konstrukcijskega sklopa  $\gamma_i$  [ $^\circ$ ] za različne sete eksperimentalno pridobljenih vhodnih podatkov (od a do e, **preglednica 3.2.1.1**). Krivulja f ponazarja hipotetični primer brez upoštevanja konvekcijskega prenosa toplove ( $h_{c,i}(\gamma_i)$ )

**Figure 3.2.1.2:** The calculated thermal resistance  $R_i(\gamma_i)$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ] of air-supported dome double membrane envelope constructional complex PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (A) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (B) in dependence on the complex inclination  $\gamma_i$  [ $^\circ$ ] for different sets of experimentally obtained input data (from a to e, see **Table 3.2.1.1**). Curve f represent the hypothetical case without consideration of convective heat transfer ( $h_{c,i}(\gamma_i)$ )

Spremembe vrednosti  $h_{c,i}(\gamma_i)$  v smeri padajočega naklona  $\gamma_i$  se lepo odražajo tudi na **sliki 3.2.1.2**, na kateri so podane izračunane vrednosti topotnega upora  $R_i(\gamma_i)$  treh različic dvojnega membranskega sklopa (PES(1)2009/PES(2)2009 (**slika 3.2.1.2 A**), ETFE/ETFE (**slika 3.2.1.2 A**) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (**slika 3.2.1.2 B**) za primere vhodnih podatkov navedenih v **preglednici 3.2.1.1** (primeri od a do e). Krivulja f na **slikah 3.2.1.2 A** in **B** ponazarja topotni upor sklopa v kanalu katerega je vzpostavljen popolni vakuum. Ta hipotetična predpostavka služi kot prikaz izračuna, kot bi se topota med stranicama kanala prenaša le z radiacijo in tako služi le za oceno, ne pa

kot prikaz dejanskega fizikalnega odziva. Posledično je v tem primeru upor celotnega konstrukcijskega sklopa najvišji za vse obravnavane različice ter neodvisen od njegovega naklona (poglavlje 2.3.1). Upor zunanje ( $0,086 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) in notranje ( $0,098 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) mejne plasti je po metodi izračuna neodvisen od naklona elementa ovoja, saj je objekt prisilno prezračevan (poglavlje 2.3.1), hitrost zraka ob površinah pa predvidoma konstantna. Toplotni upor zračnega kanala se pri sklopih PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE giblje med 0,11 in 0,14  $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Pri sklopu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE pa med 0,15 in 0,20  $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Pri sklopu z dodano aerogelno izolacijsko odejo je upor višji (zaradi nižjega  $h_{r,i}(\gamma_i)$  v zračnem kanalu) na račun nižje emitivnosti notranje stranice zračnega kanala. Na **sliki 3.2.1.2 B** se to odraža v večji absolutni razliki med krivuljo f in preostalimi krivuljami od a do e kot je prikazano na **sliki 3.2.1.2 A**.

Ker so vsi vhodni podatki razen tistih za izračun  $h_{r,i}(\gamma_i)$  in  $h_{c,i}(\gamma_i)$  zračnega kanala konstantni, so spremembe vrednosti  $R_i(\gamma_i)$  na **sliki 3.2.1.2** le posledica sprememb  $h_{r,i}(\gamma_i)$  in  $h_{c,i}(\gamma_i)$  v odvisnosti od primera vhodnih podatkov od a do e v **preglednici 3.2.1.1** in naklona posameznega elementa  $\gamma_i$  (**preglednica 2.3.2.1**). Izpostaviti je potrebno, da upora mejnih zračnih plasti  $R_{se}$  in  $R_{si}$  plasti nista zanemarljiva ter, da bi njuna sprememba močno vplivala tudi na upora celotnega sklopa PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE. Za ti dve različici (celovitega) konstrukcijskega sklopa se vrednosti  $R_i(\gamma_i)$  pri posameznem naklonu s spremembami primera vhodnih podatkov iz **preglednice 3.2.1.1** spremenijo med 6,7 in 7,3 %, za sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE pa med 2,8 in 3,2 % (**slika 3.2.1.2**). Če bi na podlagi vrednosti topotnega upora, prikazanih na **sliki 3.2.1.2**, ocenili topotno prehodnost (poglavlje 2.3.1), bi se njene vrednosti za PES(1)2009z/PES(2)2009z gibale med 3,06 in 3,33  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ . V kolikor bi upoštevali vsakemu primeru od a do e lastne topotne upore mejnih zračnih plasti,  $R_{se}$  in  $R_{si}$  (**priloga 3.2.1.A**), bi bile spremembe vrednosti (**slika 3.2.1.1**) opazno večje: za primera PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE od 21,1 do 21,6 % ter v primeru ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE med 6,5 in 6,8 %.

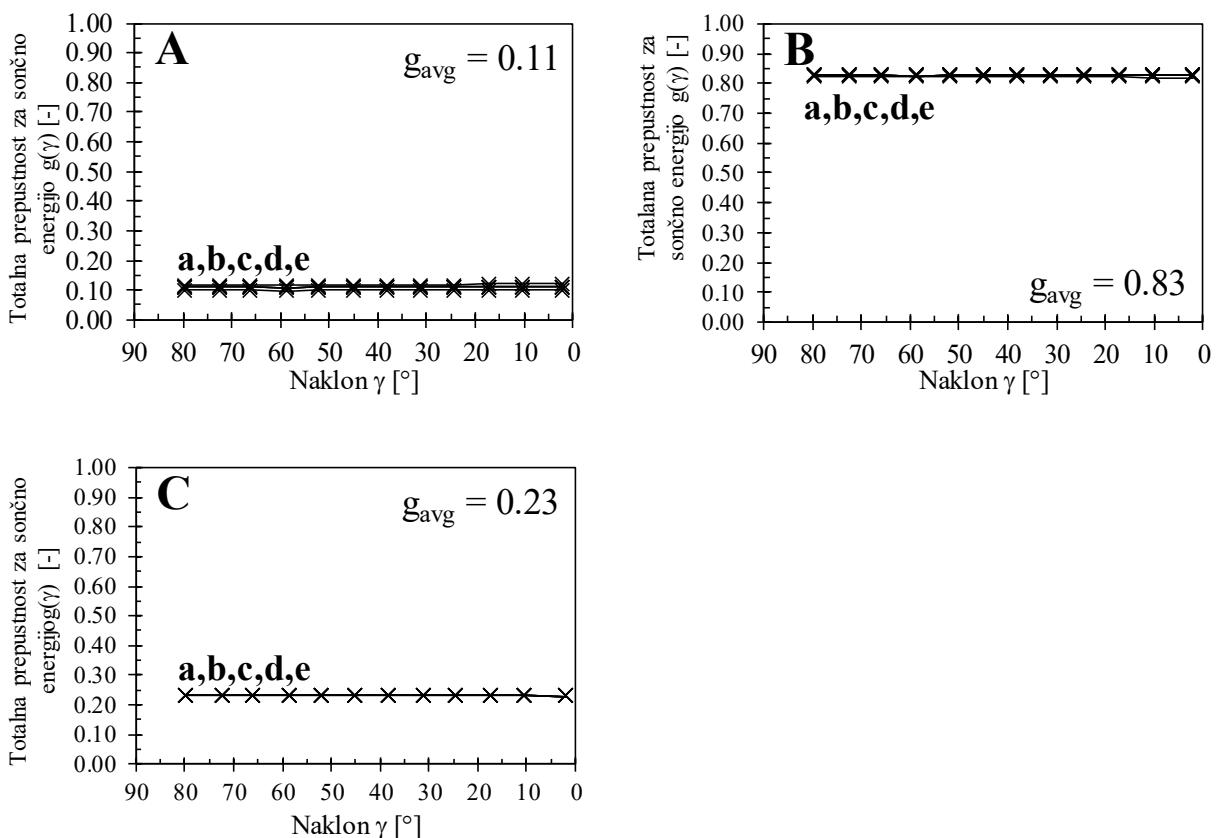
Poleg topotnega upora  $R$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ] oziroma topotne prehodnosti  $U$  [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ] je za prozorne oziroma prosojne elemente pomembno navesti ne le podatek o prepustnosti za vidni in celotni sončni spekter, temveč tudi podatek o totalni prepustnosti za sončno energijo, faktor g [-]. Ta je bil izračunan za vse primere za katere je bila pred tem izračunana topotna prehodnost, saj je prehod topote brez vpliva mejnih zračnih plasti ( $\Lambda$  [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ]) vključen v njegov izračun ((38), poglavje 2.3.1). Ker je bil račun faktorja g opravljen za primer dvoplastnega elementa z zračnim kanalom po postopku podanem v literaturi [126], je bilo potrebno pripraviti podatke o absorptivnosti zunanje ( $A_{e1}$ ) (PES(1)2009 in ETFE) in notranje ( $A_{e2}$ ) (PES(2)2009, ETFE in PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) membrane, zbrane v **preglednici 3.1.1.3**. Spektri, pripadajoči notranji izolirani membrani, so zbrani v **prilogi 3.1.1.A**. V **prilogi 3.2.1.B** so predstavljeni podatki o prehodu topote ( $\Lambda$  [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ]) med zunano in notranjo površino obravnavanih različic dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa, uporabljeni za izračun faktorja g. Hkrati je bilo v skladu z metodologijo meritev optičnih lastnosti upoštevano, da so uporabljeni optični lastnosti reprezentativne za vpadni kot sevanja  $0^\circ$  (normalna smer glede na površino vzorca).

Iz podatkov v **preglednici 3.2.1.4** je mogoče razbrati, da je pri obstoječem konstrukcijskem sklopu absorptivnost  $A_{e1}$  višja kakor  $A_{e2}$ . Pri izoliranem sklopu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE pa je ravno nasprotno. Iz vrednosti navedenih v **preglednici 3.1.1.3**, je mogoče sklepati, da je večja absorptivnost zunanje membrane sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z  $A_{e1}$  posledica izpostavljenosti zunanjosti in umazaniji, saj se absorptivnosti notranje in zunanje stranice za vzorec PES(2)2009 ne razlikujeta toliko pri vzorcu PES(1)2009.

**Preglednica 3.2.1.4:** Izračunane absorptivnosti sončnega sevanja A [-] (poglavlje 2.2.1) v valovnem območju med 300 nm in 2500 nm zunanje ( $A_{e1}$ ) (PES(1)2009z in ETFE)) in notranje ( $A_{e2}$ ) (PES(2)2009z, ETFE, PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) membrane za obravnavane konstrukcijske sklope dvojnega membranskega ovoja

**Table 3.2.1.4:** The calculated absorptance of solar radiation (see chapter 2.2.1) in the spectral range between 300 nm and 2500 nm [-] of outer ( $A_{e1}$ ) (PES(1)2009z and ETFE) and inner ( $A_{e2}$ ) (PES(2)2009z, ETFE and PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) membrane of the studied constructional complexes of double membrane envelope

Vzorec	$A_{e1}$	$A_{e2}$
	[ - ]	[ - ]
PES(1)2009/PES(2)2009	0,300	0,008
ETFE/ETFE	0,020	0,015
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	0,029	0,207



**Slika 3.2.1.3:** Izračunana totalna prepustnost za sončno energijo ( $g$  [-]) za obravnavane različice konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB: PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (B) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (C)

**Figure 3.2.1.3:** Calculated total solar energy transmittance ( $g$  [-]) of all studied versions of Brezovica air-supported dome double membrane envelope constructional complex: PES(1)2009/PES(2)2009 (A), ETFE/ETFE (B) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (C)

S slike 3.2.1.3 je razvidno, da imata izbor klimatskih podatkov ( $v$ ,  $T_m$  in  $\Delta T_{a-s}$ ) med *primeri* od *a* do *e* (**preglednica 3.2.1.1**) in naklon konstrukcijskega elementa  $\gamma_i$  tako rekoč zanemarljiv vpliv na vrednosti totalne prepustnosti za sončno energijo  $g$  za vse tri obravnavane različice konstrukcijskega sklopa.

Nazorno je razvidno tudi, da se faktor  $g$  za sklopa PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE drastično razlikuje, čeprav imata sklopa praktično enaka topotna upora, in da ima sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE kljub v povprečju 6,5-krat večjemu topotnemu uporu od obeh neizoliranih različic faktor  $g$  bolj podoben obstoječemu konstrukcijskemu sklopu stavbe na Brezovici. Podrobnejša obravnavava pokaže, da je sicer prispevek topotnega ( $q_i$ ) in optično prepuščenega ( $TT_{sol}$ ) dela energije obravnavan enakovredno (38), vendar je za primera z nizko prepustnostjo za sončno sevanje  $TT_{sol}$  topotni del ( $q_i$ ) večji (~3.8-krat za PES(1)2009/PES(2)2009 in ~4.5-krat za ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE), od njune prepustnosti  $TT_{sol}$ , kar je posledica zamenjave vrednosti absorptivnosti zunanje in notranje membrane (**preglednica 3.2.1.4**). Pri sklopu ETFE/ETFE je absorptivnost obeh membran majhna ( $q_i$  za ETFE/ETFE znaša le ~2 % skozi sklop prepuščene ( $TT_{sol}$ ) gostote sevalnega toka sonca), vendar je osnovna folija tako močno prepustna, da je faktor  $g$  sklopa kljub temu visok.

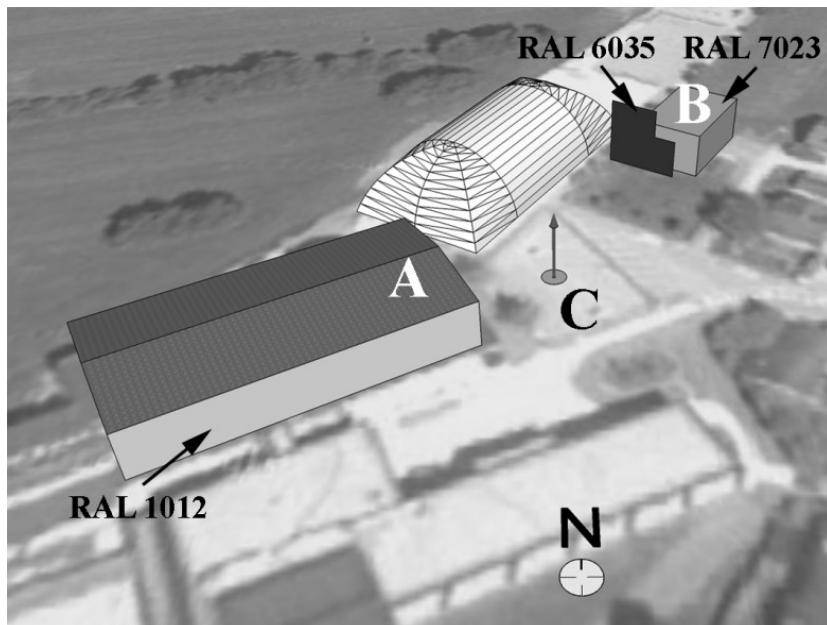
Na podlagi rezultatov, lahko domnevamo, da nova z aerogelno plastjo izolirana različica dvojnega membranskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ugodno vpliva na rabo energije za ogrevanje pozimi, saj je topotna prehodnost  $U$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] v povprečju vseh obravnavanih primerov za 69 % manjša od topotne prehodnosti obstoječega konstrukcijskega sklopa, hkrati pa so sončni dobitki energije celo nekoliko večji.

Povečanje debeline aerogelne polsti na 20 ali 40 mm bi povzročilo izgubo prosojnosti sklopa, topotni upor aerogelne odeje bi pri debelini 20 mm znašal  $1,33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  in v primeru 40 mm  $2,67 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Topotni upor ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE z 10 mm aerogelne odeje, upoštevajoč prikazane rezultate, v povprečju znaša  $1,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ .

Treba je poudariti, da ob upoštevanju vrednosti hitrosti zraka ( $v$  [ $\text{m}/\text{s}$ ]) (**preglednica 3.2.1.1**) del enačbe (31) (poglavlje 2.3.1), ki predvideva zvišanje koeficiente prenosa topote s konvekcijo  $h_c$  za  $4v_i$ , znaša za *primer a* iz **preglednice 3.2.1.1**  $0,04 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , za *primer b* (**preglednica 3.2.1.1**)  $0,12 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  in *primer c* (**preglednica 3.2.1.1**)  $0,36 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , kar v deležu posameznega primera a, b in c znaša največ 2 %, 16 % in 5 % vrednosti  $h_{c,i}(\gamma_i)$ , neodvisno od treh obravnavanih variant sestave konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja. Hkrati je vpliv vrednosti tega istega člena (torej prisotnosti hitrosti zraka v kanalu med membranama) za *primere a, b in c* na topotni upor  $R_i(\gamma_i)$  sklopov PES(1)2009/PES(2)2009 in ETFE/ETFE manjši od 2 % in manjši od 1 % za sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Podobno pokaže primerjava  $R_i(\gamma_i)$  za primera d in e, ki se razlikujeta kot posledica spremembe  $h_{c,i}(\gamma_i)$  na račun izničenja pretoka zraka (**preglednica 3.2.1.1**). Razlika v topotnem uporu med primeroma d in e je za vse obravnavane primere konstrukcijskega sklopa in pripadajoče naklone manjša od 1 % vrednosti topotnega upora za primer e. Za potrebe nadalnjih računskih raziskav vpliva uvedbe aerogelne odeje na energetsko učinkovitost ŠDB je bilo privzeto, da je vpliv prisilne konvekcije znotraj zračnega kanala na podlagi izmerjenih hitrosti zraka zanemarljiv, še posebej v primerjavi z vplivom topotnih in optičnih lastnosti materialov iz katerih je ovoj sestavljen. Posledično je bilo predpostavljeno, da je segmente ovoja ŠDB možno obravnavati kot dvojne zasteklitve z zaprtim zračnim kanalom znotraj katerega poleg prenosa topote z radiacijo poteka proces prenosa topote z naravno kondukcijo/konvekcijo kot posledico temperaturnih razlik stranic kanala in s tem tudi gostote zraka ob njih.

### 3.2.2 Raziskava dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica za različne sestave zračno podprtega ovoja

Za izračun KDS<sub>rač</sub> s programom DAYSIM je bila upoštevana celovita geometrija obravnavane stavbe (poglavlje 2.3.2), ki zajema tribuno, stranske koridorje, igrišče in barve (**preglednica 3.2.2.1**). Upoštevana je bila tudi njena neposredna okolica (**slika 3.2.2.1**).



**Slika 3.2.2.1:** Shematski prikaz ŠDB z njeno neposredno okolico: glavna stavba OŠ Brezovica (A), individualna hiša z drevesi (B) in mesto meritev osvetljenosti zunaj stavbe (C). Barve zunanjih površin sosednjih stavb so prikazane s pripadajočo kodo RAL lestvice barv (**preglednica 3.2.2.1**). Smer sever je označena s črko N

**Figure 3.2.2.1:** Schematic presentation of the air supported dome at Brezovica with surrounding buildings; primary school facility (A), detached house with a line of trees (B) and site of solar irradiation measurements (C). Surface colours (expressed as RAL numbers) are depicted on the surfaces of buildings and listed in **Table 3.2.2.1**. North direction is indicated with letter N

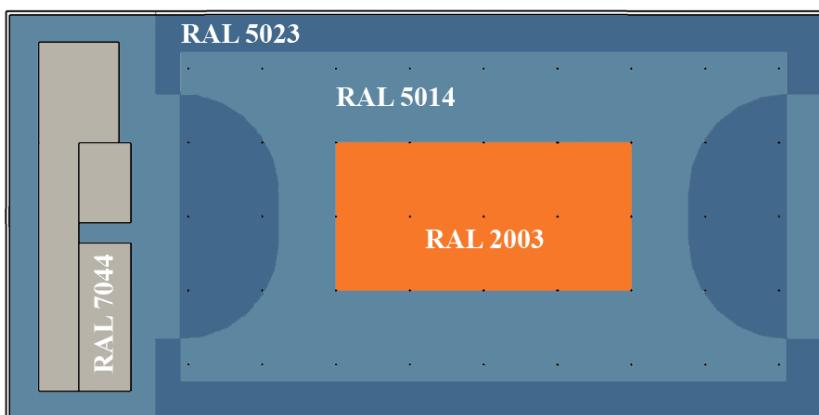
**Preglednica 3.2.2.1:** Odbojnost ( $R_{vis}$  [%]) in RGB (rdeča/zelena/modra) vrednosti [-] za zunanje površine stavb v okolini dvorane (**slika 3.2.2.1**), albeda zunanjih tal, tla in površino tribune v dvorani (**slika 3.2.2.2**)

**Table 3.2.2.1:** Reflectance ( $R_{vis}$  [%]) and RGB (red/green/blue) values [-] for external surfaces of surrounding buildings (**Figure 3.2.2.1**), external ground albedo, floor surfaces and surfaces of spectator stand inside the studied dome (**Figure 3.2.2.2**)

	$R_{vis}$ [%]	R [-]	G [-]	B [-]
1. JZ stena stavbe - RAL 1012	45,8	0,5952	0,4473	0,0067
2. JV stena stavbe - RAL 7023	20,6	0,1753	0,2197	0,1896
3. Drevesa poleg SV stavbe - RAL 6035	7,8	0,0252	0,1030	0,0400
4. Albedo tal	20,0	-	-	-
5. Rdeče obarvani del tal - RAL 2003	32,0	0,7273	0,1886	0,0121

6. Svetlo modro obarvani del tal - RAL 5014	18,5	0,1033	0,2043	0,3139
7. Temno modro obarvani del tal - RAL 5023	12,4	0,0406	0,1421	0,2785
8. Tribuna za gledalce - RAL 7044	45,3	0,4118	0,4764	0,4206

Razporeditev barv tal, navedenih v **preglednici 3.2.2.1**, kot je bila uporabljena za primerjavo eksperimentalnih vrednosti KDS in s programom DAYSIM izračunanih vrednosti  $KDS_{rač}$  v 45 točkah na teh dvorane (prikazano na **sliki 3.2.2.2**). Metoda določitev barv je opisana v poglavju 2.2.1, rezultati pa v poglavju 3.1.1. Potem ko so bile barve tal določene, so bile za dejanski izračun  $KDS_{rač}$  izbrane barve iz nabora, podanega na spletni strani programa Radiance [163], katerih trikromatični indeksi X, Y in Z se najbolj ujemajo z eksperimentalno določenimi (**preglednica 3.1.1.5**).



**Slika 3.2.2.2:** Razporeditev barv tal in tribune v notranjosti ŠDB

**Figure 3.2.2.2:** Distribution of floor colours over the interior of the air-supported dome at Brezovica

**Preglednica 3.2.2.2:** Optične lastnosti membran, ki so bile uporabljeni za izračune z računalniškim programom DAYSIM in upoštevanjem pristopa za prosojne (motne) materiale (TRANS [144])

**Table 3.2.2.2:** Optical data used input for running DAYSIM calculations using the option for semispecular translucent material (TRANS [144])

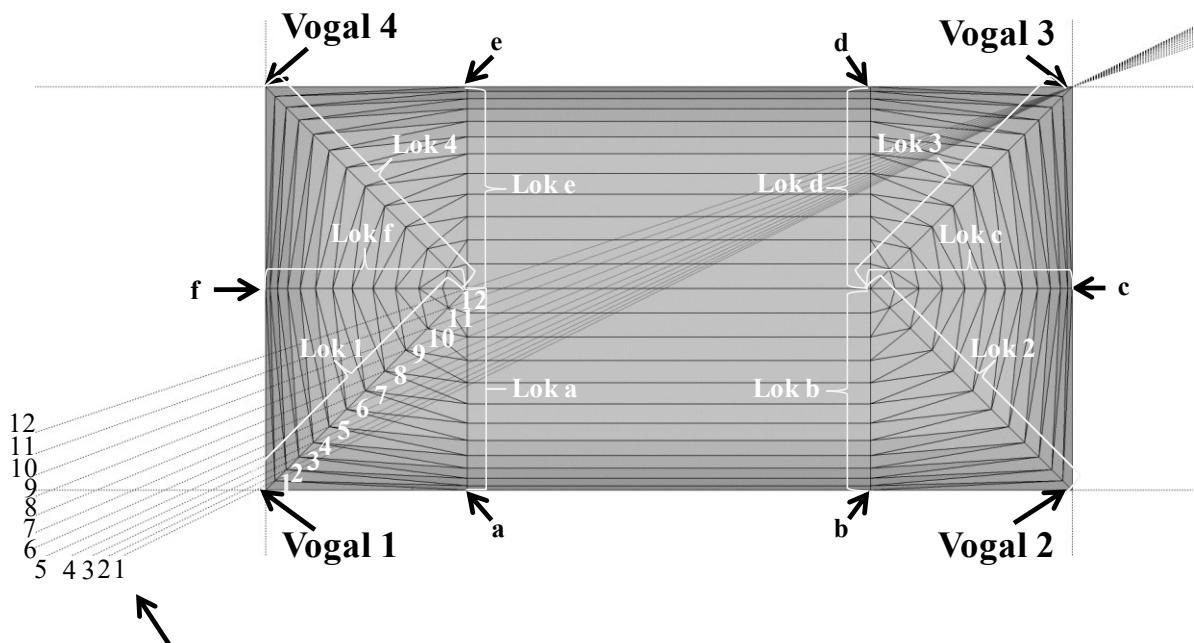
Št.	Vhodni podatki*	PES(1)2009z/ PES(2)2009z	ETFE/ PEfabric/ aerogel/ PEfabric/ ETFE
1.	Cr (difuzna odbojnosc – rdeča barva) [-]	0,79	0,81
2.	Cg (difuzna odbojnosc – zelena barva) [-]	0,82	0,79
3.	Cb (difuzna odbojnosc – modra barva) [-]	0,83	0,77
4.	Rd (povprečna fotopična odbojnosc rdeče, zelene in modre barve) [-]	0,80	0,80
5.	Rs (delež svetlobe odbit od prve površine v obliki zrcalnega odboja – zrcalna odbojnosc) [-]	0,0	0,0
6.	Td (delež difuzno prepustljive svetlobe – difuzna transmisivnost) [-]	0,0143	0,0372
7.	Ts (zrcalna prepustnost) [-]	0,0	0,0
8.	Sr (hrapavost površine) [-]	0,0	0,0

4-7 so bile določne iz spektrov  $TT(\lambda)$  in  $TR(\lambda)$  z uporabo enačb (2) in (3) ter pripadajo vrednostim  $TT_{vis}(Td)$  in  $TR_{vis}(Rd)$  (**preglednica 3.1.1.1**).

V preglednici 3.2.2.2 so podani vhodni podatki o optičnih lastnostih konstrukcijskega sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z obstoječe ŠDB in novega konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE za izračun KDS s programom DAYSIM.

### 3.2.2.1 Kontrola dimenzijskega modela

Pred pričetkom izvajanja izračunov z računalniškim programom DAYSIM je bila narejena kontrola dimenzijskega modela ŠDB. Razlike v dimenzijsah elementov, kot posledica ročnega risanja elementov stavbe, so bile zanemarljive. Dolžina diagonal od 1 do 12 (preglednica 3.2.2.A.1) iz posameznega vogala od 1 do 4 (slika 3.2.2.3) so se med seboj razlikovale do 5 mm (0,01 % dolžine diagonale), površina pravokotnih segmentov ovoja pa do 0,1 %.



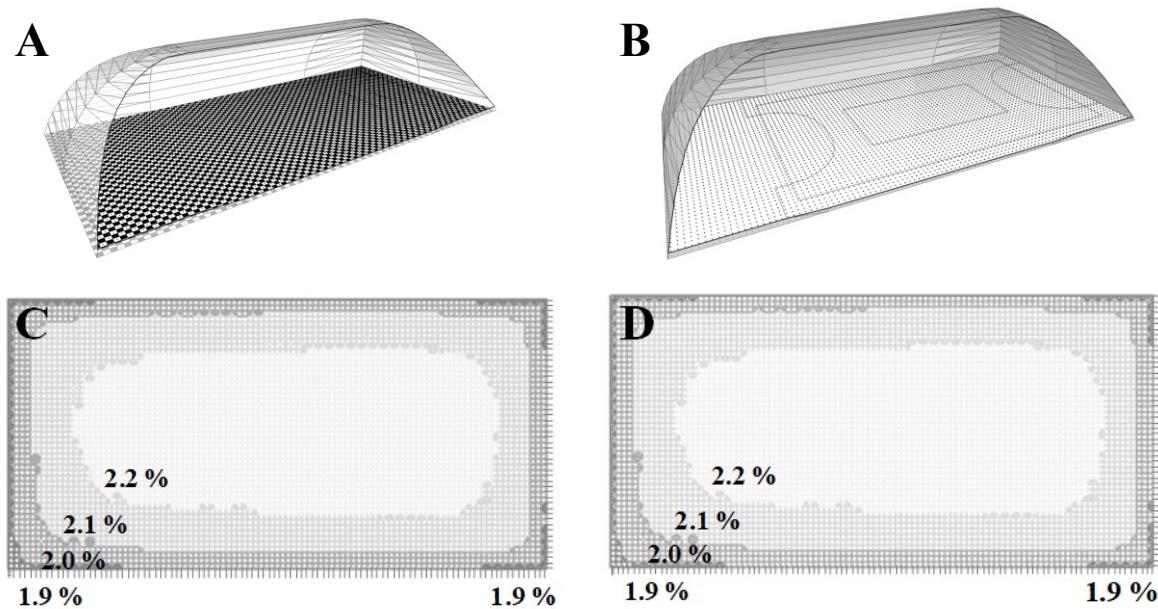
Premice 1-12 (črne številke) od vogala 3 do točk 1-12 (beli številke) na loku v vogalu 3

**Slika 3.2.2.3:** Tloris geometrijskega modela obravnavane ŠDB, namenjen za izračune njene dnevne osvetljenosti

**Figure 3.2.2.3:** Top view of the Brezovica air-supported dome geometry model, used in daylighting calculations

### 3.2.2.2 Določitev mreže točk izračuna količnika dnevne svetlobe s programom DAYSIM

Mreža eksperimentalnih merilnih mest je bila, kot je opisano v poglavju 2.2.3, določena v skladu z virom [110]. Za izračun KDS s programom DAYSIM je bilo preverjeno, kako spremenjanje odbojnosti tal vpliva na rezultate in ali je mogoče pričakovati kakšne posebnosti pri rezultatih, katerih uporaba redkejše mreže ne bi razkrila. Izvedena sta bila izračuna KDS za zelo gosto mrežo, v kateri je bila razdalja med opazovanimi točkami 0,5 m v vzdolžni in prečni smeri stavbe. V prvem primeru so bila tla obarvana kot črna ( $R_d = 0\%$ ) bela ( $R_d = 100\%$ ) šahovnica, v drugem pa kot bela oziroma popolnoma odbojna tla ( $R_d = 100\%$ ).



**Slika 3.2.2.4:** Zgoščena mreža z razdaljo med opazovanimi točkami  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$  in rezultat izračuna  $KDS_{\text{rač}} [\%]$  s programom DAYSIM za dva primera obarvanosti tal: črna ( $Rd = 0 \%$ ) bela ( $Rd = 100 \%$ ) šahovnica (A, C) in bela oziroma popolnoma odbojna tla ( $Rd = 100\%$ ) (B, D)

**Figure 3.2.2.4:** Densified grid of  $KDS_{\text{rač}} [\%]$  calculation nodes  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$  and the result of DAYSIM calculation for two cases of floor colour: black ( $Rd = 0 \%$ ) and white ( $Rd = 100 \%$ ) checkerboard (A, C) and white floor ( $Rd = 100\%$ ) (B, D)

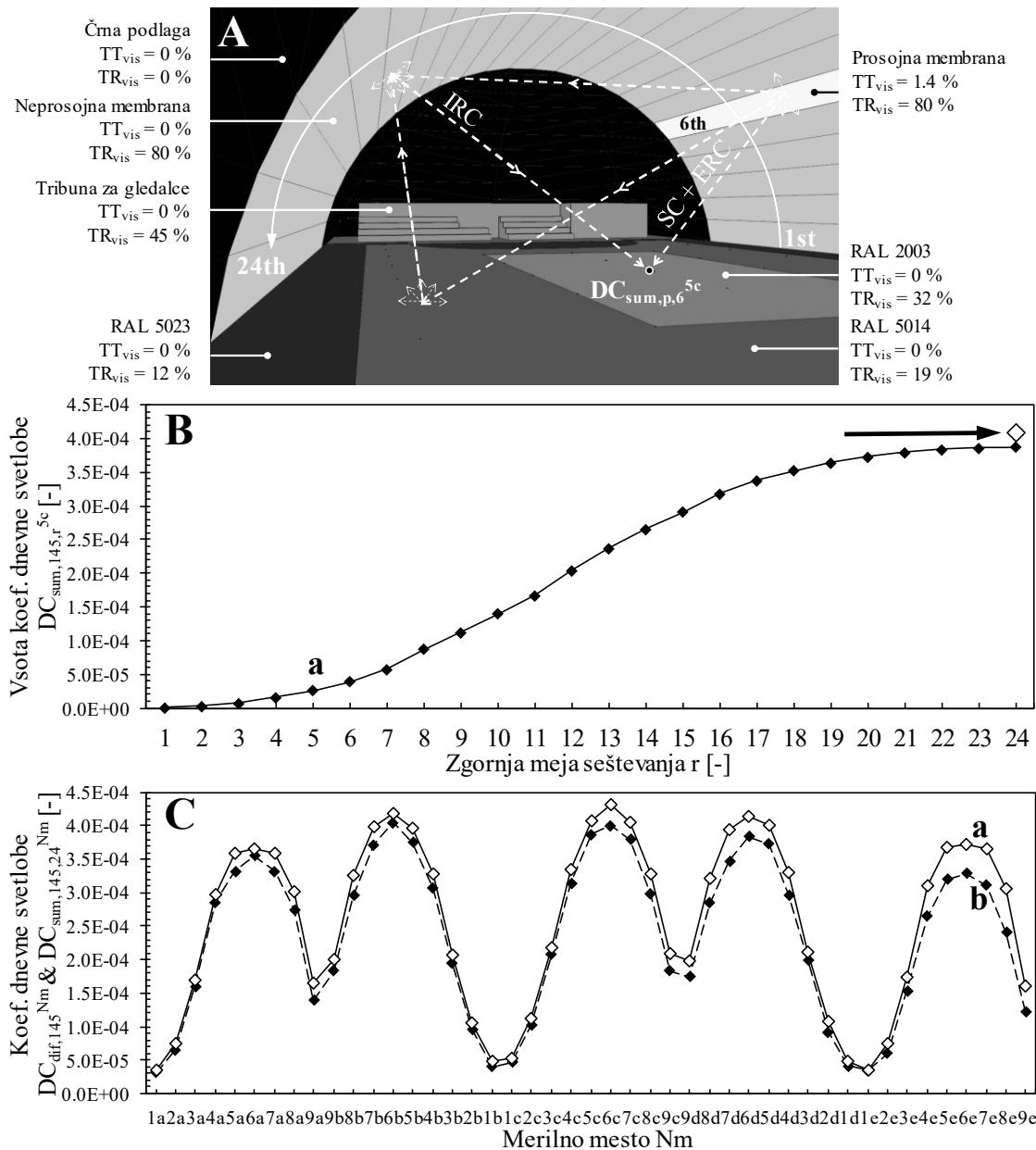
Na podlagi rezultatov izračuna KDS, prikazanih na **slikah 3.2.2.4 C** in **D**, lahko povzamemo, da je gostota mreže eksperimentalnih točk (poglavlje 2.2.3) primerna tudi za izračun KDS s programom DAYSIM.

### 3.2.2.3 Vpliv geometrije na izračun količnika dnevne svetlobe s programom DAYSIM

Za oceno vpliva vzorca razporeditve barve na  $KDS_{\text{rač}}$ , je bil analiziran vpliv notranje odbite komponente (ang. »internal reflected component«, IRC) za 12 primerov vzorcev porazdelitve barv notranjosti obravnavane stavbe na Brezovici (**slika 3.2.2.2**). Najprej pa je bil cilj potrditi, da so izračuni osvetljenosti v stavbi, katere dvojno ukrivljena geometrija je bila aproksimirana z odsekoma ravnimi elementi, podajajo ustrezne vrednosti KDS. To je bilo storjeno z izračunom koeficientov dnevne svetlobe (DC), kot je opisano v nadaljevanju.

V skladu z metodo koeficientov dnevne svetlobe (DC [-]), ki je predstavljena v poglavju 2.3.2, računalniški program DAYSIM razdeli nebesni svod na 145 segmentov [132] in izračuna enako število difuznih koeficientov dnevne svetlobe ( $DC_{\text{dif,p}}$ ,  $p = 1$  do 145) [140]. Za izvedbo preizkusa veljavnosti metode smo namerno uporabili le segment neba, ki pripada zenitu ( $p = 145$ ). Skladno s tem je bilo raziskanih 24 primerov obravnavane stavbe, izmed katerih je vsaka imela po en pravokotni segment ovoja v sredinskem cilindričnem delu (**slika 3.2.2.5**) prosojen s svetlobnimi lastnostmi  $TT_{\text{vis}}$  in  $TR_{\text{vis}}$  obstoječega primera dvojnega membranskega ovoja ŠDB PES(1)2009z/PES(2)2009z (**preglednica 3.1.1.1**). Vsi drugi pravokotni segmenti posamezne konstrukcije so bili neprosojni ( $TT_{\text{vis}} = 0 \%$ ,  $TR_{\text{vis}} \neq 0 \%$ ), medtem ko sta bila skrajna dela konstrukcije, sestavljena iz trikotnih segmentov ovoja, popolnoma neprosojna, s 100-odstotno absorpcijo svetlobe ( $TT_{\text{vis}} = 0 \%$ ,  $TR_{\text{vis}} = 0 \%$ ) (**slika 3.2.2.5**). V izračunih

je bila vsaka od konfiguracij obravnavana kot cilinder z različno locirano in različno naklonjeno odprtino (oknom), katere prispevek k osvetljenosti je bil odvisen od položaja v stavbi (45 merilnih mest). Posledično je bila vsaka od 24 odprtin glede na zenitni segment neba ( $p = 145$ ) orientirana drugače. Vsaki od teh odprtin je bila pripisana številka v zaporedju od 1 do 24, ki jo je ponazarjal indeks  $q$ .

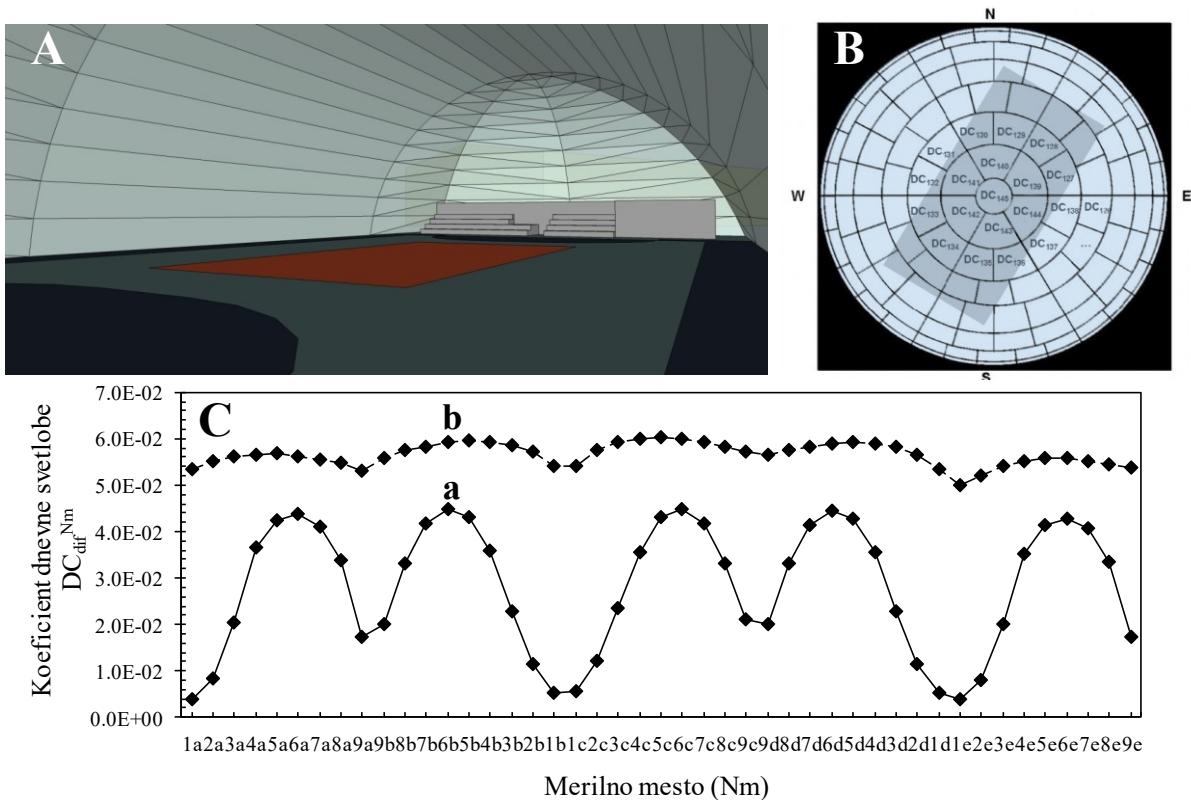


**Slika 3.2.2.5:** Segmenti (A) raziskane ŠDB, uporabljeni za izračun vrednosti KDS. B: seštevek DC-jev, izračunanih za pozicijo 5c (◆, krivulja a) in DC (○, označen s puščico) za isto pozicijo, 5c, izračunan za celoten cilindrični del, prosojen. C: primerjava DC-jev za vseh 45 pozicij, izračunanih s postopnim izračunom cilindrov (◆, krivulja b) z DC-ji, izračunanimi za celotni cilindrični del, prosojen (○, krivulja a)

**Figure 3.2.2.5:** Segments (A) of the air-supported dome at Brezovica used for the calculation of the DFs values (B and C). B: the sum of DCs calculated for point 5c (◆, curve a) and DC (○, indicated with arrow) for the same point (5c) calculated for the whole DUOL structure, C: comparison of DCs for all 45 sites obtained by taking sequentially optically translucent cylinders (◆, curve b) with DCs obtained for the whole structure (○, curve a)

$$DC_{sum,145,r}^{Nm} = \sum_{q=1}^r DC_{dif,145,q}^{Nm} \quad (42)$$

Analogni izračuni so bili narejeni za vseh 24 ločenih primerov cilindra (6. cilinder je prikazan na sliki 3.2.2.5 A). Koeficienti dnevne svetlobe za zenitni, 145. segment neba ( $DC_{dif,145,q}^{Nm}$ ), za pozicijo Nm ( $N = \text{od } 1 \text{ do } 9$  in  $m = \text{od } a \text{ do } e$ ), so bili sešteeti s pomočjo enačbe (42) za različne zgornje meje seštevanja ( $r = \text{od } 1 \text{ do } 24$ ) in q indeks seštevanja. Pozicije v notranjosti stavbe, v katerih so bili DC-ji s programom DAYSIM izračunani, so sovpadale z eksperimentalnimi mestni meritev ( $N_i$ ) (slika 2.2.3.1).



**Slika 3.2.2.6:** Pogled v geometrijski model dvorane (A); prikaz segmentov neba [150] (B); s programom DAYSIM izračunani DC-ji za vseh 45 opazovanih pozicij v primeru, da sta skrajna dela ovoja ŠDB zatemnjena, cilindrični del pa prosojen (♦, krivulja a), ter primer, da je celoten ovoj ŠDB prosojen (◆, krivulja b) (C). Optične lastnosti prosojnega dela ovoja (PES(1)2009z/PES(2)2009z) so navedene v preglednici 3.2.2.2

**Figure 3.2.2.6:** View into the dome geometry model (A); illustration of sky segments [150] (B); DC values calculated with DAYSIM at all 45 observed sites in case, that the end parts of the air-supported structure at Brezovica are completely opaque and black and the cylindrical part translucent (♦, curve a); case when whole air-supported envelope is transparent (◆, curve b) (C). Optical properties of translucent part of envelope (PES(1)2009z/PES(2)2009z) are given in Table 3.2.2.2

Rezultati za izbrano pozicijo na sredini igrišča 5c ( $N = 5$ ;  $m = c$ ) so prikazani na slikah 3.2.2.5 B in C. Primerjava vrednosti seštetege DC ( $DC_{sum,145,24}^{5c}$ ) z vrednostjo DC, izračunanega za celoten prosojen cilindrični del obravnavane stavbe ( $DC_{sum,145}^{5c}$ ), je pokazala izvrstno ujemanje (slika 3.2.2.5 B). Ta

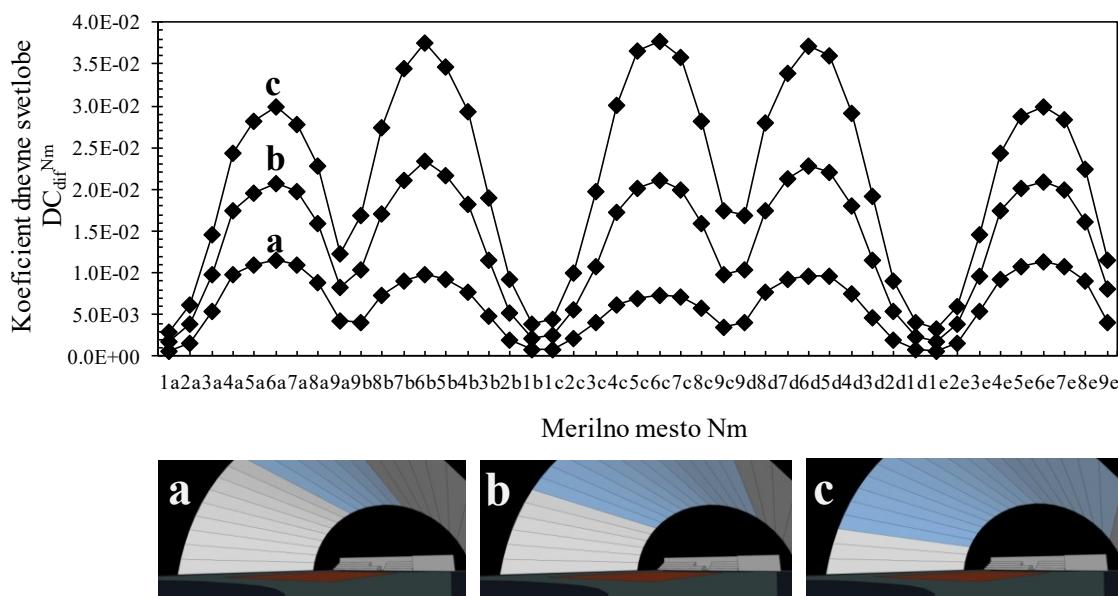
ugotovitev je potrdila ustrezzo pripravo geometrijskega modela ŠDB in pravilen izračun osvetljenosti v stavbi. DC-ji za vseh 45 pozicij ( $DC_{sum,145,24}^{Nm}$ ), izračunanih po pojasnjem postopku seštevanja ( $DC_{dif,145,q}^{Nm}$ ), in pripadajočih vrednosti DC-jev, izračunanih za celoten prosojen cilindrični del ( $DC_{dif,145}^{Nm}$ ), so prikazani na **sliki 3.2.2.5 C**. Dobro ujemanje je bilo potrjeno za vseh 45 obravnavanih pozicij, kar je naprej potrdilo, da uporabljeni model podaja pravilne rezultate ter je posledično primeren za obsežno uporabo in izračune s programom DAYSIM, kot je prikazano v nadaljevanju.

Na **sliki 3.2.2.6** je prikazano, kako zatemnitev krajnih koncev konstrukcije ( $TT_{vis} = 0 \%$ ,  $TR_{vis} = 0 \%$ ) vpliva na vrednosti DC-jev. Takoj se opazi, da cilindrični del najbolj vpliva na osrednji del igrišča (npr.: na poziciji 6a se vrednost DC zviša le za ~30 %), medtem ko k osvetljenosti robnih delov igrišča močno in bistveno pripomore tudi prosojnost preostalega dela ovoja ŠDB (npr.: na poziciji 1a se vrednost DC poveča za faktor ~13,7-krat). Vrednosti DC-jev na **sliki 3.2.2.6** pripadajo primeru, ko je stavba osvetljena s celim nebom (vseh 145 segmentov neba), zato so vrednosti ustrezeno večje kot na **sliki 3.2.2.5 C**.

### **3.2.2.4 Študija vpliva nadsvetlobe na dnevno osvetljenost igrišča v dvorani s pomočjo koeficientov dnevne svetlobe**

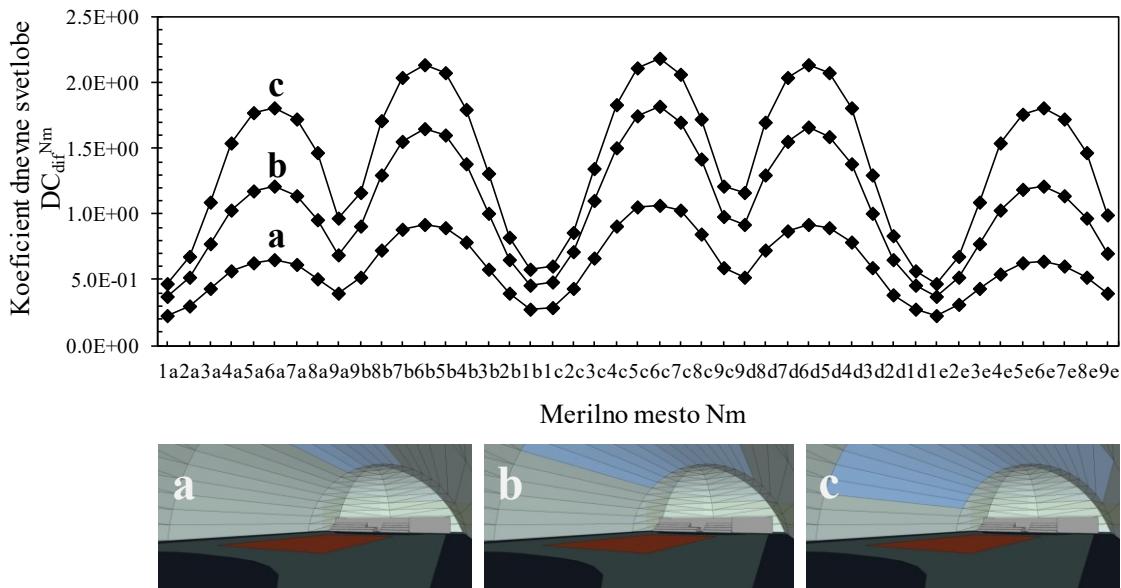
V nadaljevanju so najprej podani rezultati analize vpliva postopnega povečevanja velikosti prozornega dela ovoja kot svetlobnika v smeri od temena konstrukcije proti tlom za primer, ko sta skrajna dela popolnoma zatemnjena ( $TT_{vis} = 0 \%$ ,  $TR_{vis} = 0 \%$ ), neprosojni del cilindra pa odbija svetlobo ( $TT_{vis} = 0 \%$ ,  $TR_{vis} \neq 0 \%$ ). Koraki analize pomenijo deleže prosojnega dela ovoja glede na površino cilindričnega dela ovoja: 25%, 50% in 75%. Na **sliki 3.2.2.7** je videti, da se DC-ji na vseh pozicijah v dvorani ob povečanju površine prosojnega dela pričakovanu povečajo, podrobnejša analiza rezultatov pa pokaže, da povečanje ni enakomerno porazdeljeno po pozicijah in se giblje od 1,8- do 2,9-krat (v povprečju 2,3-krat), ko se delež prosojne površine poveča s 25 na 50 %, ter 2,5- do 5,2-krat (v povprečju 3,8-krat) tedaj, ko se delež poveča s 25 na 75 %.

Rezultati na **sliki 3.2.2.8** kažejo, da tedaj, ko del popolnoma prosojnega ovoja z lastnostmi obstoječe dvojne membrane PES(1)2009z/PES(2)2009z (rezultat izračuna DC-jev na **sliki 3.2.2.6**) nadomestimo s sklopom ETFE/ETFE, že v prvem koraku, ko je površina prozornega dela enaka 25 % cilindričnega dela ovoja, ta prispeva večino k osvetljenosti posameznega merilnega mesta.



**Slika 3.2.2.7:** DC-ji [-], izračunani za vseh 45 opazovanih pozicij za primere, ko sta skrajna dela ovoja ŠDB zatemnjena, velikost prosojnega dela ovoja pa narašča: 6 segmentov (krivulja a), 12 segmentov (krivulja b) in 18 segmentov (krivulja c) cilindričnega dela stavbe. Optične lastnosti prosojnega dela ovoja (PES(1)2009z/PES(2)2009z) so navedene v **preglednici 3.2.2.2**

**Figure 3.2.2.7:** Calculated DC's [-] of all 45 measurement sites for cases, when the end parts of air-supported structure composed of triangular envelope segments are completely opaque and the area of translucent area of the cylindrical part of the building is increasing: 6 segments (curve a), 12 segments (curve b) and 18 segments (curve c). Optical properties of translucent (PES(1)2009z/PES(2)2009z) part of the envelope are given in the **Table 3.2.2.2**



Slika 3.2.2.8:

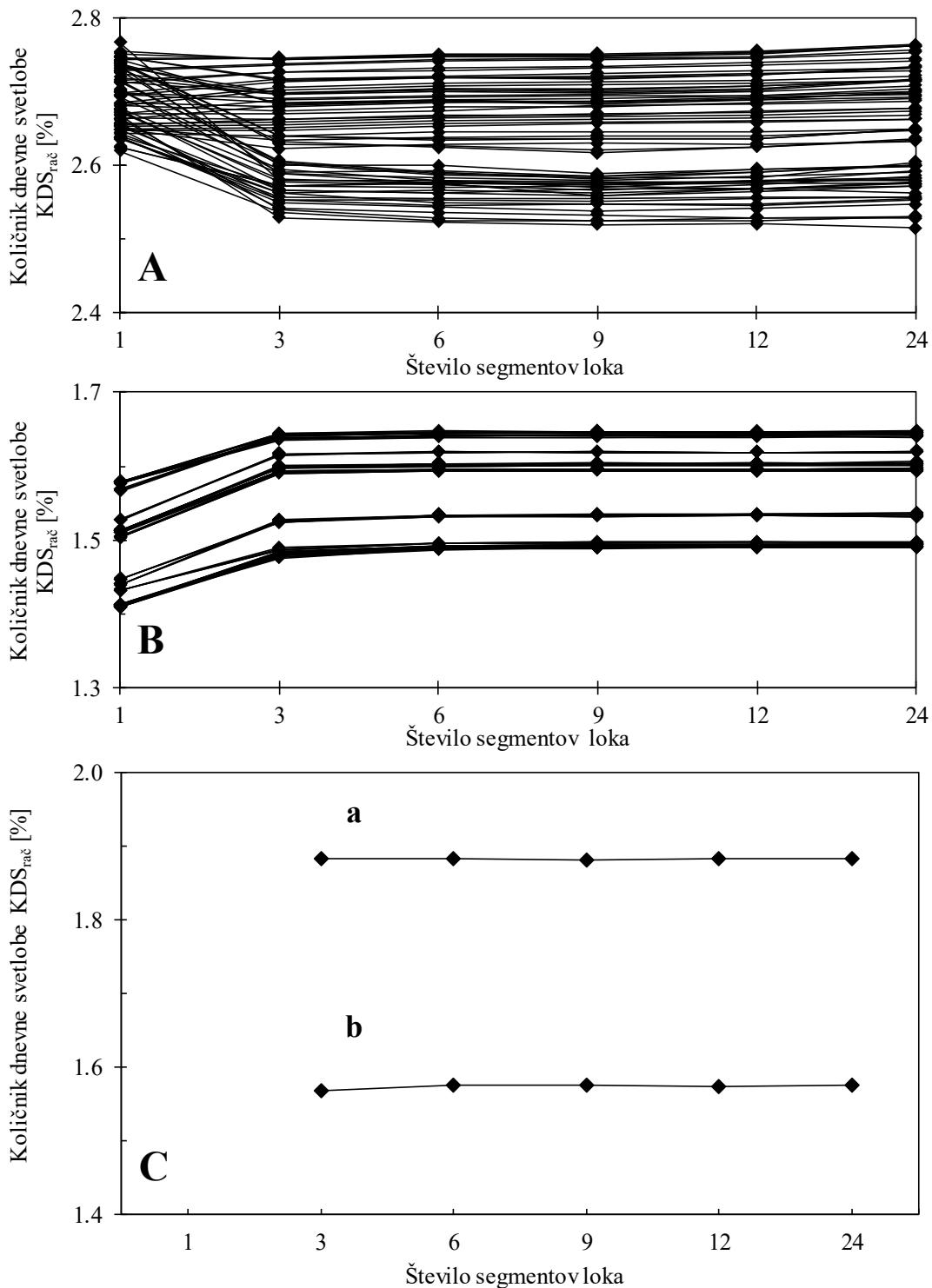
DC-ji [-], izračunani za vseh 45 opazovanih pozicij za primere, ko je celotna konstrukcija prosojna, velikost prozornega (ETFE/ETFE) dela ovoja pa narašča: 6 segmentov (krivulja a), 12 segmentov (krivulja b) in 18 segmentov (krivulja c) cilindričnega dela stavbe. Optične lastnosti prosojnega (PES(1)2009z/PES(2)2009z) in prozornega (ETFE/ETFE) dela ovoja so navedene v **preglednici 3.2.2.2**

Figure 3.2.2.8:

Calculated DC's [-] of all 45 measurement sites for cases, when whole air-supported structure is translucent and the transparent area of the cylindrical part of the building (ETFE/ETFE) is increasing: 6 segments (curve a), 12 segments (curve b) and 18 segments (curve c). Optical properties of translucent (PES(1)2009z/PES(2)2009z) and transparent (ETFE/ETFE) part of the envelope are given in the **Table 3.2.2.2**

### **3.2.2.5 Vpliv aproksimacije ukrivljenosti dvojnega membranskega ovoja Športne dvorane Brezovica z odsekoma ravnimi elementi**

Iz rezultatov, prikazanih na **sliki 3.2.2.9**, sledi, da segmentacija v primerih analiziranih variant geometrijskega modela (lok sestavljen iz 1, 3, 6, 9, 12 in 24 segmentov, lok razdeljen na 12 segmentov, je prikazan na **sliki 2.3.2.1**), ko je celotna konstrukcija prosojna, nima bistvenega vpliva na KDS<sub>rač</sub>. Opazna razlika je le v koraku med aproksimacijama z enim in tremi segmenti, sicer pa se relativna razlika v vrednostih KDS<sub>rač</sub> med primerom uporabe dvanajst segmentov (uporabljen v dani raziskavi) in uporabo primera z enim segmentom, če so tla bela, giblje med -6,8 % in 1,1 % (v povprečju -1,7 %), in če so tla črna med 4,0 % in 6,7 % (v povprečju 5,5 %). Opozoriti je treba še, da ta rezultat velja le za difuzno nebo s porazdelitvijo svetlosti po njegovem svodu, ki čim bolj ustreza definiciji KDS. Hkrati je dobljeni rezultat tudi posledica dejstva, da so bili v izračunih upoštevani le difuzni odboji ( $R_d \neq 0$ , **preglednica 3.2.2.2**), saj je bila pri optičnih lastnostih zrcalna komponenta zanemarjena ( $R_s = 0$ , **preglednica 3.2.2.2**).



**Slika 3.2.2.9:** Vpliv števila segmentov na vrednosti KDS<sub>rač</sub> [%] pri aproksimaciji dvojno ukrivljenega ovoja z odsekoma ravnnimi elementi: bela tla (A), črna tla (B), vzorec dejanskih tal (pozicija 5c (krivulja a), pozicija 1e (krivulja b)) (C)

**Figure 3.2.2.9:** The influence of number of envelope segments on the KDS<sub>rač</sub> [%] values when approximating the double curved envelope with planar elements: white floor (A), black floor (B), actual colour pattern (only sites 5c (curve a) and 1e (curve b)) (C)

### 3.2.2.6 Izračun količnika dnevne svetlobe za različne vzorce barv tal

Za določitev vpliva obarvanosti tal igrišča v ŠDB na vrednosti KDS so bili pripravljeni različni vzorci barv tal, za katere so bile izračunane vrednosti  $KDS_{rač}$  v točkah na igrišču, ki hkrati ponazarjajo merilna mesta dnevne osvetljenosti (poglavlje 2.2.3). Opravljena je bila tudi primerjava le-teh z vrednostmi  $KDS_{rač}$  za popolnoma črno in belo obarvana tla (**slika 3.2.2.10**, krivulji a in c). Na koncu so bile izračunane tudi vrednosti KDS za primer toplotno izoliranega, pa vendar za svetlobo prepustnega dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (**slika 3.2.2.10**, krivulja e).

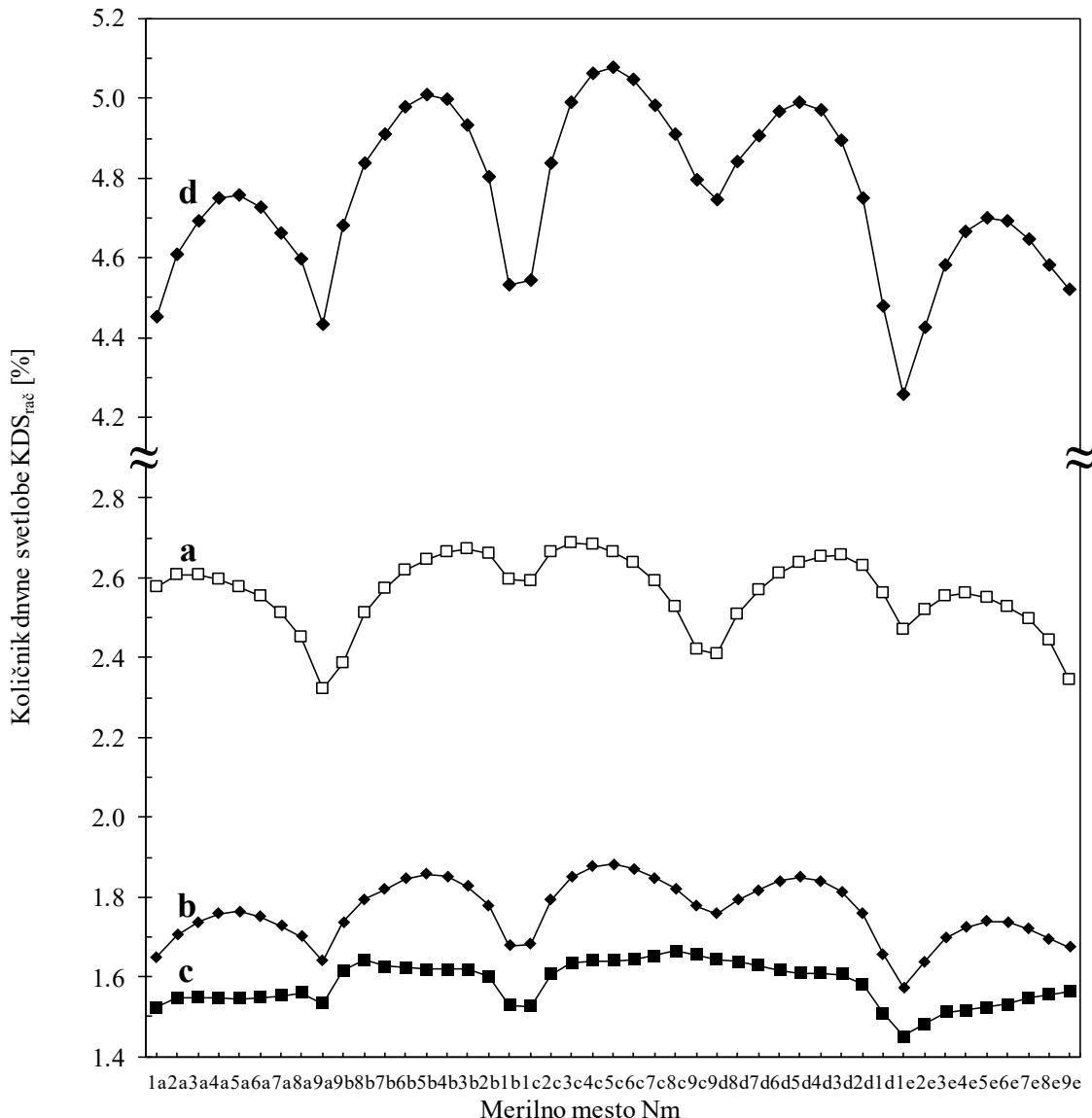
Rezultati, prikazani na **sliki 3.2.2.10**, so pokazali, da so vrednosti  $KDS_{rač}$  primera, ki ponazarja dejansko obarvanost tal v dvorani na Brezovici (krivulja b), srednje velikosti (1,6 – 1,9 %) in se nahajajo med vrednostmi  $KDS_{rač}$  za popolnoma bela (2,3 % - 2,7 %) (krivulja a) in popolnoma črna (1,5 – 1,7 %) (krivulja c) tla. Presenetljivo so bile eksperimentalne vrednosti KDS (**slika 3.1.3.1**) manjše od vrednosti  $KDS_{rač}$  in najbolj podobne primeru s popolnoma črnimi tlemi (**slika 3.2.2.10**, krivulja c). Pri računskih vrednostih KDS so bile vrednosti, ki pripadajo setu 1 in setu 2, enake, saj je bilo pri izračunih privzeto CIE standardno oblačno nebo [102]. Povprečna absolutna deviacija med setom 1 in setom 2 eksperimentalnih vrednosti in izračunanimi vrednostmi je enaka 0,08 % (set 1) in 0,09 % (set 2).

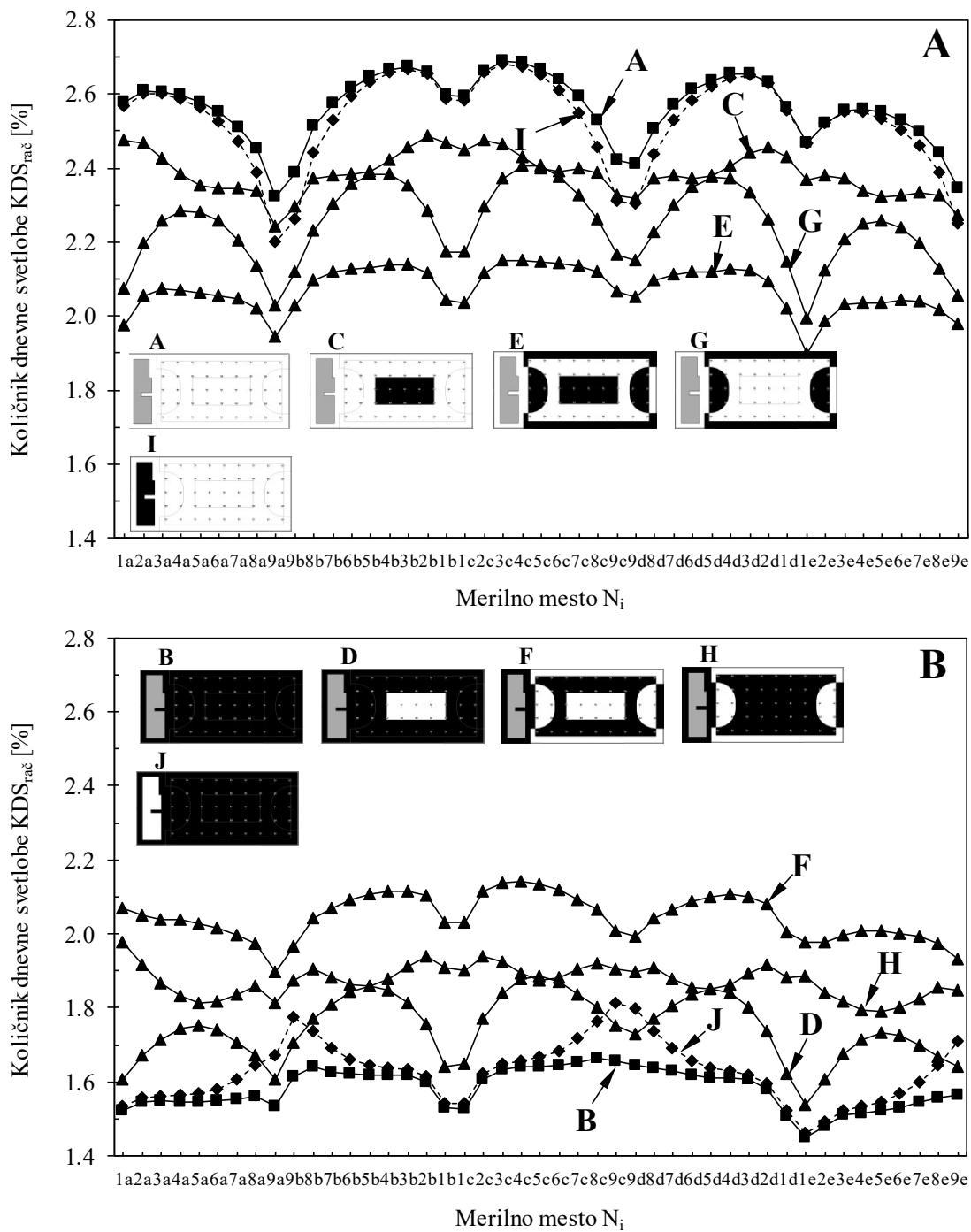
Treba je poudariti, da porazdelitev vrednosti  $KDS_{rač}$  ni bila simetrična glede na sredino igrišča, saj se ob JZ stranici stavbe nahaja tribuna, hkrati pa tudi del tribune nima stopničastih stojišč. V tem pogledu so se rezultati terenskih meritev in izračunov z računalniškim programom DAYSIM kar dobro ujemali. To bi lahko sklepali tudi na podlagi višjih minimumov  $KDS_{rač}$  na pozicijah od 9a do 9e v primerjavi z vrednostmi na pozicijah od 1a do 1d (**sliki 3.1.3.1** in **3.2.2.10**).

V nadaljevanju je bil analiziran učinek različnih vzorcev barve tal (**slika 3.2.2.11**) v notranjosti obravnavane stavbe na porazdelitev vrednosti  $KDS_{rač}$ . Upoštevani so bili le črno-beli vzorci (črna barva  $TR_{vis} = 0\%$ , bela barva  $TR_{vis} = 100\%$ ) prav tako prikazani na **sliki 3.2.2.11** s črkami pripadajočih krivulj (od a do j).

Rezultati so pokazali, da vzorec razporeditve barv močno vpliva na porazdelitev vrednosti  $KDS_{rač}$ , pri čemer se spremenijo maksimumi na sredini igrišča (pozicije 5a, 5b, 5c, 5d, 5e) in minimumi na desnem robu igrišča (pozicije 1a, 1b, 1c, 1d, 1e).  $KDS_{rač}$  za popolnoma bela tla (**slika 3.2.2.11 A**, krivulja a) in popolnoma črna tla (**slika 3.2.2.11 B**, krivulja b) je imel referenčne vrednosti, saj so ponazarjale najvišje in najnižje vrednosti  $KDS_{rač}$  na posamezni poziciji, vrednosti  $KDS_{rač}$  za vse druge primere pa so bile vmes (**slika 3.2.2.11 A** in **B**).

Barvni vzorci so bili razdeljeni na tiste pri katerih je prevladovala bela (vzorci a, c, g, in i na **sliki 3.2.2.11 A**) (*bela skupina*) in tiste pri katerih je prevladovala črna barva (b, d, h, in j na **sliki 3.2.2.11 B**) (*črna skupina*), vzorca e in f pa sta tvorila vmesno skupino (*srednja skupina*). Razmerja površine so podana v **preglednici 3.2.2.3**.





**Preglednica 3.2.2.3:** Deleži [%] površin v notranosti geometrijskega modela ŠDB  
**Table 3.2.2.3:** Percentages [%] of different surfaces in the interior of the air-supported dome at Brezovica

Vzorec		a	c	e	g	d	f	h	b	i	j
membrana	kot določeno na podlagi spektrometrije										
tla	rdeča	bela	črna	črna	bela	bela	bela	črna	črna	bela	črna
	svetlo modra	bela	bela	bela	bela	črna	črna	črna	bela	bela	črna
	temno modra	bela	bela	črna	črna	črna	bela	bela	črna	bela	črna
tribuna	siva	siva	siva	siva	siva	siva	siva	siva	črna	črna	bela
Delež celotne notranje površine [%]											
membrana	kot določeno na podlagi spektrometrije										
tla	bela	33,9	29,1	18,2	23,0	4,8	15,8	10,9	0,0	33,9	7,5
	črna	0,0	4,8	15,8	10,9	29,1	18,2	23,0	33,9	7,5	33,9
tribuna	siva	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	0,0	0,0	0,0
Delež površine tal in tribune skupaj [%]											
membrana	kot določeno na podlagi spektrometrije										
tla	bela	81,9	70,2	43,8	55,5	11,6	38,0	26,4	0,0	81,9	18,1
	črna	0,0	11,6	38,0	26,4	70,2	43,8	55,5	81,9	18,1	81,9
tribuna	siva	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	0,0	0,0

*Bela skupina:* vrednosti KDS<sub>rač</sub>, pripadajoče vzorcem a, g in i, so bile podobne glede pozicije minimumov na desni in levi strani obravnavanega igrišča in maksimumov, ki se ponavljajo vmes. Pričakovano je vzorec i izkazal nižje minimume v primerjavi z vzorcem a, saj popolnoma črna tribuna (TR<sub>vis</sub> = 0 %) ni odbijala svetlobe, s čimer so se znižale vrednosti KDS<sub>rač</sub> na pozicijah od 9a do 9e. Na drugi strani stavbe, na pozicijah od 1a do 1e, pa so vrednosti KDS<sub>rač</sub> ostale enake. Vzorec g je v skladu z večjo površino črne barve (**preglednica 3.2.2.3**) znižal vrednosti KDS<sub>rač</sub> bolj kot preostali vzorci v *beli skupini*.

*Črna skupina:* vrednosti maksimalnih in minimalnih KDS<sub>rač</sub> za vzorec d so bile podobne tistim za vzorce a, g in i v *beli skupini*, kar je bilo skladno z dejstvom, da je bil belo obarvan le osrednji del igrišča. Zanimivo je bilo tudi, da so bile vrednosti KDS<sub>rač</sub> vzorca h zelo podobne vrednostim vzorca c, čeprav so bile vrednosti v prvem primeru opazno višje: minimuma na pozicijah 9c in 1e nista bila opazna, kar je bilo pripisano manjši površini belo namesto črno pobarvanih površin. V primeru, ko je bila tribuna belo obarvana (primer j) so bile najviše vrednosti KDS<sub>rač</sub> pričakovano na pozicijah od 9a do 9e.

*Srednja skupina:* skoraj enake vrednosti KDS<sub>rač</sub> (krivulji e in f na **sliki 3.2.2.11 A in B**) pokažejo, da tedaj, ko so deleži črnih in belih površin podobni po vrednosti in razporeditvi (vzorec e na **sliki 3.2.2.11 A** 18,2 % bele in 15,8 % črne, vzorec f na **sliki 3.2.2.11 B** ravno nasprotno). Razlika v porazdelitvi se je pokazala s prisotnostjo minimumov v desnem spodnjem kotu (pozicija 1e), kar je nakazalo močan vpliv barv na notranjo odbito komponento KDS v okolini tega mesta.

Izmed obravnavanih črno-belih vzorcev barve tal je za stavbo ŠDB v beli skupini najbolj značilen vzorec g (23 % površine notranosti ŠDB predstavlja bela tla, 10,9 % črna in 7,5 % siva tribuna) in črni vzorec d (4,8 % površine notranosti ŠDB predstavlja bela tla, 29,1 % črna in 7,5 % siva tribuna). Skupno vzorcema d in g ter dejanskemu vzorcu barv tal je najbolj odbojno obarvan sredinski del igrišča ter siva

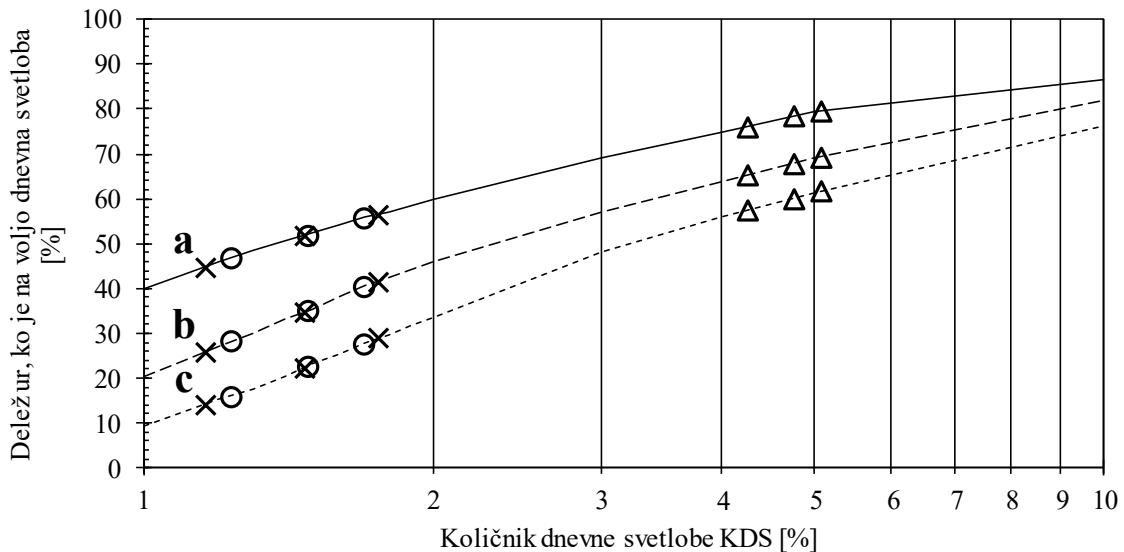
tribuna. Hkrati se rezultat izračuna KDS<sub>rač</sub> za dejanski vzorec barv tal po njegovih vrednostih nahaja med rezultatom za vzorec d in g.

### **3.2.2.7 Količnik dnevne svetlobe za primer ovoja Športne dvorane Brezovica z uvedeno aerogelno izolacijsko odejo**

Na koncu je bila z računalniškim programom DAYSIM raziskana še dnevna osvetlitev primera stavbe s toplotno izoliranim dvojnim membranskim ovojem ŠDB (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE), ki ima nekoliko (2,5-krat) višjo totalno hemisferično prepustnost TT<sub>vis</sub> (3,7 %) kot obstoječa različica ovoja stavbe na Brezovici, PES(1)2009/PES(2)2009, in tako rekoč enako TR<sub>vis</sub> (**preglednica 3.1.1.1**). Transmisijski in refleksijski spektri aerogelne polsti Spaceloft® in drugih komponent teh večslojnih membran, podani na **sliki 3.1.1.1**, so bili namenjeni za pridobitev podatkov o TT<sub>vis</sub> in TR<sub>vis</sub>, uporabljenih v izračunih KDS<sub>rač</sub> s programom DAYSIM. Uporabljeni so bili optični podatki, navedeni v **preglednici 3.2.2.2**. Izračuni KDS<sub>rač</sub> za 45 pozicij na igrišču so pokazali, da so se njegove vrednosti bistveno povečale, po igrišču pa so variirale med 4,3 in 5,1 % (**slika 3.2.2.10**, krivulja d).

Za oceno, kaj dobljeno zvišanje KDS pomeni na letni ravni, je na **sliki 3.2.2.12** prikazan delež časa, ko je na voljo vnaprej izbrana osvetljenost opazovane točke na tleh v notranjosti stavbe za različne vrednosti KDS. Ti rezultati so bili pripravljeni na podlagi vremenskih podatkov za Ljubljano [164] tako, da je bila najprej izračunana osvetljenost zunanje nezasenčene horizontalne površine s programom DAYSIM, na podlagi že pred tem določenega KDS pa nato določeno, pri kateri osvetljenosti zunanje površine je izpolnjen pogoj osvetljenosti igrišča v stavbi (300, 500 in 700 lx glede na izbor kategorije športne dvorane [110]).

Na **sliki 3.2.2.12** je takoj videti, veliko povečanje deleža ur, ko je na voljo dnevna svetloba in je hkrati izpolnjen pogoj osvetljenosti tal v stavbi, na račun povečanja TT<sub>vis</sub> dvojnega membranskega ovoja ob spremembi variante konstrukcijskega sklopa z obstoječe PES(1)2009z/PES(2)2009 na novo predlagano ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Pri tem je bila povprečna vrednost v vseh obravnavanih točkah po igrišču izračunanega KDS za primer nove različice konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (4,8 %) 3,2-krat večja od izračunane povprečne vrednosti eksperimentalno določenega KDS v vseh točkah meritve mreže v stavbi ŠDB (1,5 %). Povprečje absolutnega povečanja števila ur, ko je stavba zadovoljivo dnevno osvetljena in je na voljo dnevna svetloba, glede na obstoječe stanje, znaša 32,6 %. Torej lahko v povprečju, glede na uporabljene vremenske podatke, za izračun osvetljenosti zunanje horizontalne površine tekom celotnega leta (uporabljen je bil računalniški program DAYSIM), v stavbi s toplotno izolirano različico dvojnega membranskega ovoja ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE pričakujemo 300 lx 78,5 % časa, ko je na voljo dnevna svetloba, 500 lx 68 % časa in 700 lx 60,1 % časa v letu, ko je na voljo dnevna svetloba.

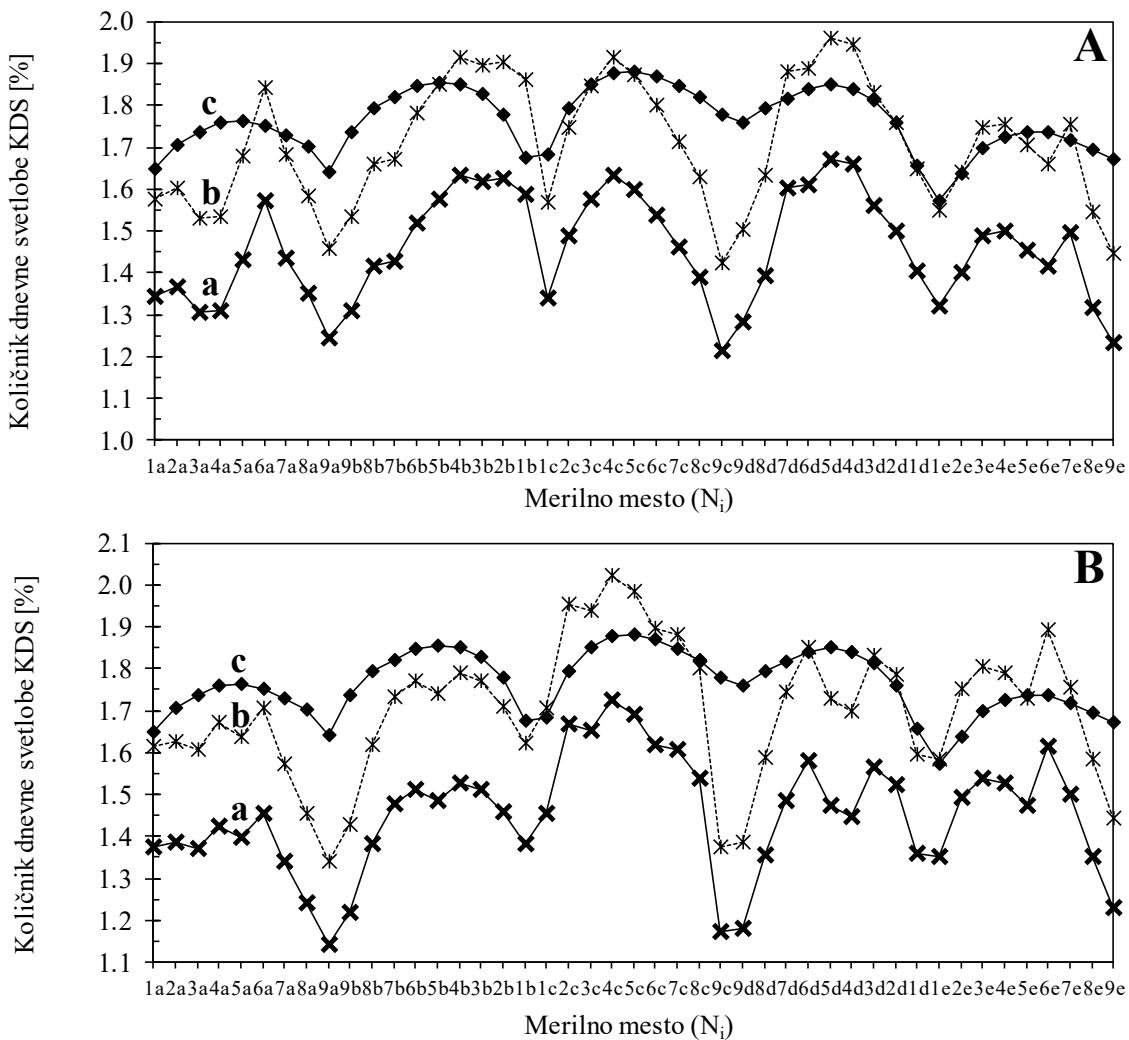


**Slika 3.2.2.12:** Delež ur [%], ko je na voljo dnevna svetloba in je osvetljenost tal dvorane 300 (krivulja a), 500 (krivulja b) oziroma 700 (krivulja c) lx ali več, v odvisnosti od količnika dnevne svetlobe (minimum, povprečje, maksimum) za obstoječo varianto konstrukcijskega sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z (prvi set (set 1) eksperimentalnih meritev, O; drugi set (set 2) eksperimentalnih meritev, X) ter novo različico konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (Δ)

**Figure 3.2.2.12:** Percentage of hours [%], when daylight is available and the dome floor illuminance is equal to or higher than 300 (curve a), 500 (curve b) and 700 (curve c) lx depending on daylight factor value (minimum, average, maximum) for the existing case of double membrane envelope constructional complex PES(1)2009z/PES(2)2009z (set 1 of experimental measurements, O; set 2 of experimental measurements, X) and the new version of it ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (Δ)

### 3.2.2.8 Umeritev vrednosti med merilnikoma osvetljenosti

Če bi pri izračunu KDS na dan meritev 29. 10. 2015 upoštevali določeno razliko v vrednostih med instrumentoma, bi dobili še boljše ujemanje eksperimentalnih KDS in z DAYSIM-om pridobljenih  $KDS_{rač}$ . Izračun je bil narejen tako, da so bile vrednosti osvetljenosti zunanje nezasenčene horizontalne površine  $E_{o,calc,dif}$  (ekvivalent zmanjšanju  $E_{o,exp,tube}$ ) ustrezno zmanjšane, za 14,7 % (**preglednica 3.1.3.1**), in nato s korigiranimi vrednostmi  $E_{o,calc,dif,cor}$  izračunan KDS za set 1, prikazan na **sliki 3.2.2.13** (krivulja b). Osvetljenost v stavbi  $E_{i,exp,glob}$  je bila pri tem nespremenjena. Lahko bi korigirali vrednosti  $E_{i,exp,glob}$  z razliko 17,3 % in dobili enak rezultat, kot je prikazan na **sliki 3.2.2.13**.



**Slika 3.2.2.13:** Količnik dnevne svetlobe KDS [%], izračunan iz meritev  $E_{i,\text{exp,glob}}$  (merilnik 1 na sliki 3.1.3.6 B) in  $E_{o,\text{exp,tube}}$  (merilnik 2 na sliki 3.1.3.6 B) med setom meritev 1 (A) in 2 (B) dne 29. 10. 2015 (krivulja a), KDS z dodano razliko v vrednosti v primerjavi z merilnikom 1 (merilnik 2 v povprečju prečeni vrednosti za 14.7 %, preglednica 3.1.3.1) (krivulja b), KDS<sub>rač</sub>, izračunan s programom DAYSIM (CIE standardno oblačno nebo) (krivulja c)

**Figure 3.2.2.13:** Daylight factor KDS [%] calculated on basis of  $E_{i,\text{exp,glob}}$  (lightmeter 1 in Figure 3.1.3.6 B) and  $E_{o,\text{exp,tube}}$  (lightmeter 2 in Figure 3.1.3.6 B) recorded during set 1 (A) and set 2 (B) measurements on 29<sup>th</sup> October 2015 (curve a), corrected KDS value in respect to the difference with lightmeter 1 (lightmeter 2 overestimates the value in average by 14,7%, Table 3.1.3.1) (curve b) and KDS<sub>rač</sub> calculated with DAYSIM considering CIE standard overcast sky (curve c)

### 3.2.2.9 Študija vpliva direktne komponente sončnega sevanja na količnik dnevne svetlobe z uporabo računalniškega programa DAYSIM

Ker med predstavljeno terensko raziskavo dnevne osvetljenosti ŠDB podrobne meritve za opis vremenskih razmer niso bile na voljo, je bila pozneje narejena študija vpliva direktne komponente na eksperimentalne vrednosti KDS.

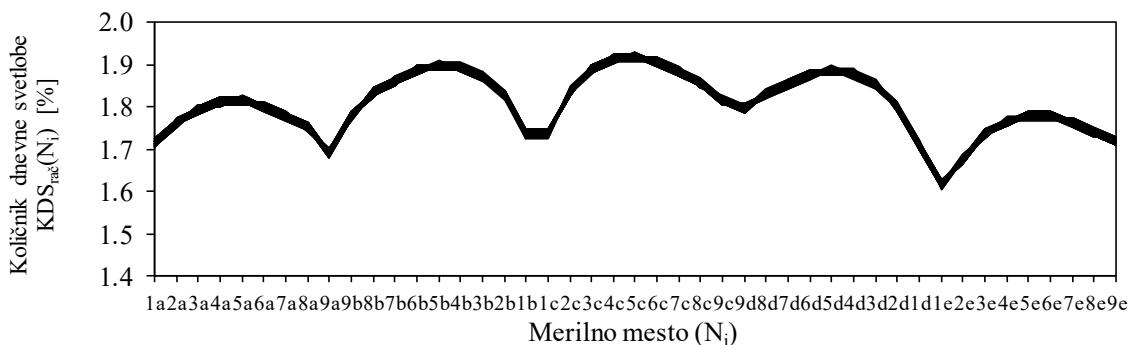
**Preglednica 3.2.2.4:** Vrednosti globalne osončenosti  $I_{o,glob}$  [ $\text{W/m}^2$ ], izmerjene na dan eksperimentalnih meritev 29. 10. 2015, pred setom 1, med setoma in po setu 2

**Table 3.2.2.4:** Result of global irradiance  $I_{o,glob}$  [ $\text{W/m}^2$ ] measurements on 29<sup>th</sup> Oct. 2015 before, in-between and after set 1 and 2 of experimental measurements

Meritev	Čas [hh:mm:ss]	$I_{o,glob}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
1	12:10:00	42,9
2	12:45:30	35,0
3	13:24:00	17,4

S programom DAYSIM je bila narejena, analiza ali pri močno oblačnem nebu, ko ni prisotnega direktnega sončnega sevanja ( $I_{o,dir} = 0 \text{ W/m}^2$ , kakršen je bil domnevno tudi dan eksperimenta), sprememba pozicije sonca spremeni vrednosti količnika dnevne svetlobe. Posledica spremembe pozicije sonca je drugačna porazdelitev svetlosti neba, kar opisuje tudi Perezov vse-vremenski model [137], uporabljen v programu DAYSIM. V tem primeru neposrednega izračuna KDS<sub>rač</sub> program DAYSIM ne omogoča zato sta bila izvedena dva ločena izračuna z enakimi vhodnimi podatki o osončenosti horizontalne nezasenčene površine, vendar v enem primeru brez geometrijskega modela stavbe in njene okolice. Izračuna sta bila narejena za eksperimentalno vrednost globalne osončenosti  $35,0 \text{ W/m}^2$  (meritev št. 2, **preglednica 3.2.2.4**), ki je bila v skladu z izhodiščno predpostavko podana kot difuzna osončenost horizontalne površine. Izračun je bil izveden za vsako pozicijo sonca v intervalu 1 min od pričetka meritev ob 12.15 do zaključka drugega seta ob 13.22. Tako so bile za vsak čas dobljene osvetljenosti znotraj stavbe v vseh 45 točkah opazovanja (merilna mesta  $N_i$ ). Prav tako je bil izračunan količnik dnevne svetlobe za vse točke hkrati ob posameznem času, **slika 3.2.2.14** pa prikazuje vseh 68 porazdelitev KDS<sub>rač</sub>, s čimer je bila dobljena ovojnica vrednosti.

Na podlagi dobljenega rezultata lahko povzamemo, da je vpliv spremembe pozicije sonca pri popolnoma difuznem nebu praktično zanemarljiv (KDS<sub>rač</sub> na posamezni točki niha v območju 0,02 %) in nihanje premajhno, da bi zgolj s spremembijo položaja sonca na nebesnem svodu pojasnili razlike v vrednostih KDS med setoma 1 in 2 eksperimentalnih meritev. Zato je bila v nadaljevanju opravljena analiza vpliva morebiti prisotnega direktnega sončnega sevanja na vrednosti količnika dnevne svetlobe. Študija je bila opravljena računsko, s pomočjo programa DAYSIM, ki, kot je bilo že povedano, pri izračunih osvetljenosti zunanje ali notranje površine uporabi Perezov vse-vremenski model porazdelitve svetlosti neba [137], za izračun pa potrebuje kot vhodni podatek informacijo o direktni normalni ( $I_{o,dir,n}$  [ $\text{W/m}^2$ ]) in difuzni horizontalni osončenosti ( $I_{o,dif}$  [ $\text{W/m}^2$ ]) [129]. Za analizo so bili uporabljeni primeri navedeni v **preglednici 3.2.2.5**, pri čemer je bila vrednost  $I_{o,dir,n}$  predpostavljena in izražena kot mnogokratnik ( $n$ , **preglednica 3.2.2.5**)  $I_{o,dif}$  ((43) do (45)). Primeri od a do d ponazarjajo situacijo, ko je globalna osončenost konstantna, spreminja se le delež direktne komponente ( $n = 0,1, 0,2$  in  $0,9$ ), primera e in f pa situacijo, ko bi bila ob meritvi izključena direktna komponenta, tako kot pri pretvorbi eksperimentalnih meritev osvetljenosti  $E_{o,exp,tube}$  v hemisferično vrednost  $E_{o,exp,dif}$  (poglavlje 2.2.3). Izhodiščna globalna osončenost (primer a, **preglednica 3.2.2.5**) je bila enaka kakor pri izračunih preprostega premika sonca in sicer  $35,0 \text{ W/m}^2$  (meritev št. 2, **preglednica 3.2.2.4**).



**Slika 3.2.2.14:** Spreminjanje izračunanega faktorja dnevne osvetljenosti  $KDS_{rač} [\%]$  v odvisnosti od lokacije merilnega mesta in položaja sonca na nebesnem svodu za vseh 45 merilnih mest v času eksperimenta dne 29. 10. 2015 med 12.15 in 13.22 v časovnem koraku 1 min in pri konstantni osončenosti nezasenčene horizontalne površine ( $I_{o,glob} = I_{o,dif} = 35 \text{ W/m}^2$ )

**Figure 3.2.2.14:** Variation of the calculated daylight factor  $KDS_{rač} [\%]$  in dependence of measurement site location and sun's position on sky vault for all 45 measurement sites during the time of experiment on 29<sup>th</sup> October 2015 between 12.15 and 13.22. Calculations were performed for 1 min time step and constant irradiance of unobstructed horizontal surface ( $I_{o,glob} = I_{o,dif} = 35 \text{ W/m}^2$ )

$$I_{o,glob} = I_{o,dir} + I_{o,dif} \quad (43)$$

$$I_{o,glob} = I_{o,dir,n} \cos \gamma + I_{o,dif} \quad (44)$$

$$I_{o,glob} = n I_{o,dif} \cos \gamma + I_{o,dif} = (n \cos \gamma + 1) I_{o,dif} \quad (45)$$

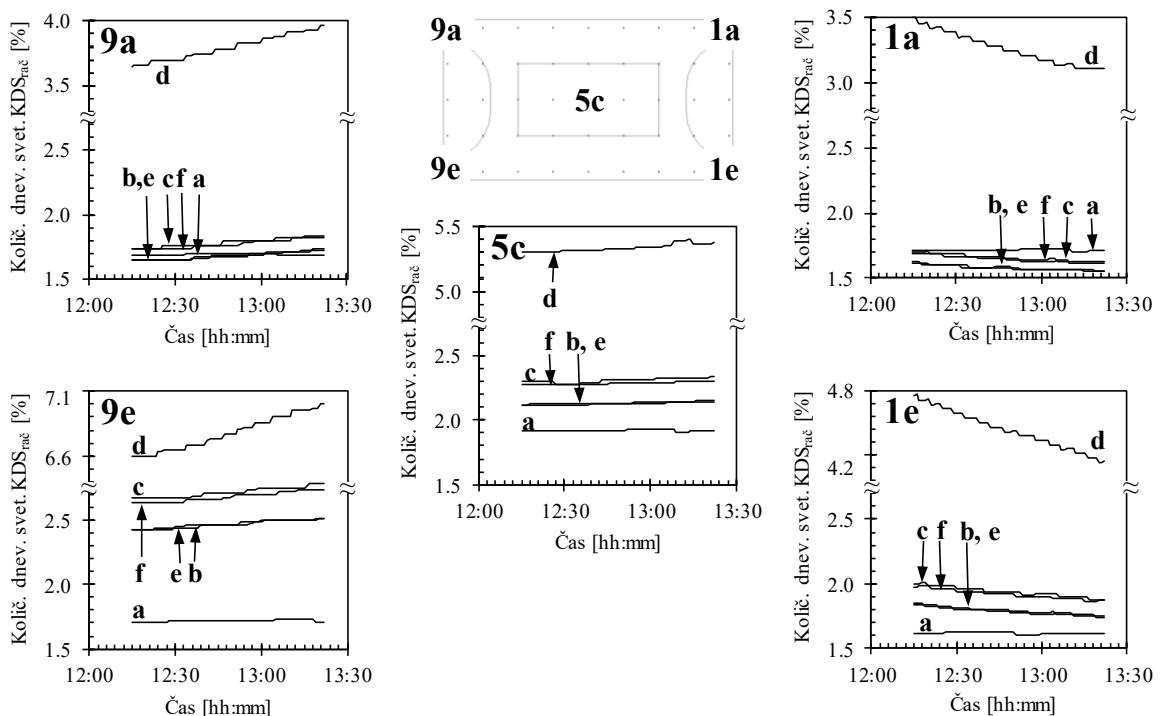
**Preglednica 3.2.2.5:** Primeri analize vpliva absolutne vrednosti globalne osončenosti  $I_{o,glob}$  [ $\text{W/m}^2$ ] in deleža direktne normalne komponente  $n$  [-] na vrednosti  $KDS_{rač}$  [%]. Difuzna ( $I_{o,dif}$  [ $\text{W/m}^2$ ]) in direktna ( $I_{o,dir,n}$  [ $\text{W/m}^2$ ]) komponenta  $I_{o,glob}$  [ $\text{W/m}^2$ ] sta bili uporabljeni kot vhodni podatek za izračun  $KDS_{rač}$  s programom DAYSIM

**Table 3.2.2.5:** Analysis cases of the influence of the global irradiance  $I_{o,glob}$  [ $\text{W/m}^2$ ] and the proportion of normal direct component  $n$  [-] on the daylight factor  $KDS_{rač}$  [%] values. The diffuse ( $I_{o,dif}$  [ $\text{W/m}^2$ ]) and direct normal ( $I_{o,dir,n}$  [ $\text{W/m}^2$ ]) component of  $I_{o,glob}$  [ $\text{W/m}^2$ ] were used as input for the DAYSIM daylight factor  $KDS_{rač}$  calculations

Primer	Vpadni kot ob 12.45	$n$	$I_{o,glob}$	$I_{o,dir,n}$	$I_{o,dif}$
	[°]	[-]	[ $\text{W/m}^2$ ]	[ $\text{W/m}^2$ ]	[ $\text{W/m}^2$ ]
a	60,97	0,0	35,0	0,0	35,0
b	60,97	0,1	35,0	3,5	33,3
c	60,97	0,2	35,0	7,0	31,6
d	60,97	0,9	35,0	31,5	19,7
e	60,97	0,1	36,7	3,5	35,0
f	60,97	0,2	38,4	7,0	35,0

Pri eksperimentalnem delu je bila v skladu z definicijo količnika dnevne svetlobe upoštevana difuzna osvetljenost horizontalne nezasenčene površine ( $E_{o,calc,dif}$ ) (ang. »sky illuminance«), hkrati pa naj bi se KDS določal pri oblačnem nebu [96]. Poleg spremenjanja položaja sonca na nebesnem svodu (sprememba smernega in višinskega kota sonca) in deleža direktne komponente je bil pri izračunu KDS dodatno preverjen vpliv upoštevanja globalne osvetljenosti namesto difuzne. V analogiji z eksperimentom bi to pomenilo, da bi za izračun KDS uporabili  $E_{o,exp,glob}$ . Skladno so rezultati dela prikazani na **sliki 3.2.2.15** in **sliki 3.2.2.B.1 (priloga 3.2.2.B)**, grafi na slikah pa prikazujejo spremjanje vrednosti  $KDS_{rac}$  v točkah na igrišču, ki ponazarjajo merilna mesta 1a, 9a, 5c, 1e in 9e, v odvisnosti od položaja sonca na nebesnem svodu, izražene s časom, za več primerov vpadnega sevanja s konstantno intenziteto (primeri od a do f, **preglednica 3.2.2.5**). Med potovanjem sonca po nebu se je kljub konstantni intenziteti sevanja spremnjala porazdelitev svetlosti neba, saj se je spremjal vpadni kot sonca.

Rezultati na obeh slikah (**sliki 3.2.2.15** in **3.2.2.B.1**) orijejo območje vrednosti  $KDS_{rac}$ , saj območje vrednosti faktorja  $0 \leq n \leq 0,9$  v grobem izražajo tudi naravne razmere [164]. Hkrati je bil povprečni vpadni kot v času eksperimenta dne 29. 10. 2015 med 12.10 in 13.24 enak  $61,3^\circ$ , medtem ko je letni povprečni vpadni kot  $63,8^\circ$  (na podlagi podatkov za leto 2015 [165]).



**Slika 3.2.2.15:** Količnik dnevne svetlobe  $KDS [\%]$  v odvisnosti od časa v vogalnih točkah in središču igrišča za različna razmerja direktne normalne in difuzne horizontalne osončenosti, navedene v **preglednici 3.2.2.5**. Količnik dnevne svetlobe, izračunan kot razmerje med  $E_{i,calc,glob}^{\text{DAYSIM}}$  in  $E_{o,calc,dif}^{\text{DAYSIM}}$

**Figure 3.2.2.15:** Daylight factor KDS [%] in dependence of time at corner points and in centrum of playground for various ratios (**Table 3.2.2.4**) of direct normal and diffuse horizontal components of incident solar radiation. Daylight factor was calculated as the ratio between  $E_{i,calc,glob}^{\text{DAYSIM}}$  and  $E_{o,calc,dif}^{\text{DAYSIM}}$

**Preglednica 3.2.2.6:** Absolutna razlika med maksimalno in minimalno vrednostjo  $KDS_{rač}$  ( $\Delta KDS_{rač} [\%]$ ) v točkah, ki ponazarjajo merilna mesta 1a, 9a, 5c, 1e in 9e, v odvisnosti od položaja sonca na nebesnem svodu (od 12.15 do 13.22) za različne primere osončenosti in deleža direktne normalne komponente sončnega sevanja  $I_{o,dir,n} [W/m^2]$  (preglednica 3.2.2.5)

**Table 3.2.2.6:** Absolute difference between maximal and minimal value of daylight factor  $KDS_{rač}$  ( $\Delta KDS_{rač} [\%]$ ) at grid points representing the measuring sites measuring points 1a, 9a, 5c, 1e and 9e in dependence of sun's position in sky vault (between 12.15 and 13.22) and the percentage of direct normal component of global solar radiation  $I_{o,dir,n} [W/m^2]$  (Table 3.2.2.5)

	$\Delta KDS_{rač} [\%]$				
	1	9	5	1	9
a	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
b	0,08	0,07	0,03	0,01	0,08
c	0,09	0,10	0,05	0,13	0,11
d	0,39	0,32	0,10	0,52	0,44
e	0,07	0,09	0,03	0,09	0,08
f	0,08	0,09	0,03	0,11	0,11

Na sliki 3.2.2.15 najprej opazimo, da je z naraščanjem smernegata upadanjem višinskega kota KDS za vse primere osončenosti od a do f ob večini časovnih korakov v točkah 9a in 9e naraščal, v točki 5c prav tako, a z nižjim trendom, ter se v točkah 1a in 1e zmanjševal, razen pri osončenosti a. Absolutne razlike med maksimalno in minimalno vrednostjo  $KDS_{rač}$  (izračun z  $E_{o,calc,dif}$ ) v posamezni točki (1a, 9a, 5c, 1e, 9e) ter za vse primere osončenosti so podane v preglednici 3.2.2.6. V območju absolutnih sprememb s časom so vključene tudi morebitne spremembe v vrednosti  $KDS_{rač}$ , ki sovpadajo tudi z razliko med časoma izvedbe eksperimentalne meritve osvetljenosti na posamezni točki tekom seta 1 in seta 2. Torej iz rezultatov lahko izluščimo, da so v preglednici 3.2.2.6 prikazane razlike takšne, da bi lahko bile tudi pojasnilo za razlike med eksperimentalnimi vrednostmi KDS za set 1 in set 2 v primerih osončenosti b, c, e in f. V primeru a so razlike premajhne, v primeru d pa mnogo prevelike, saj je maksimalna razlika med eksperimentalnimi vrednostmi KDS na posameznem merilnem mestu znašala 0,21 %, minimalna 0,00 % ter v povprečju 0,08 %.

Hkrati je s slike 3.2.2.15 razvidno, da v točkah 5c in 9e že če 10 % difuzne komponente pripisemo direktni vrednosti  $KDS_{rač}$ , uidejo izven eksperimentalnih vrednosti. Razlike v vrednostih  $KDS_{rač}$  med primeri osončenosti od a do f v posamezni točki pa nakažejo, da je bil v točkah 1a in 9a lahko delež direktne komponente enak do  $\pm 20\%$  difuzne, v točki e pa do  $+10\%$ . Rezultat za primer izračunov KDS z globalno osončenostjo ni neposredno relevanten za dani primer raziskave in se nahaja v prilogi 3.2.2.B.

### 3.2.2.10 Simulacija eksperimentalnih meritev dnevne osvetljenosti Športne dvorane Brezovica s pomočjo računalniškega programa DAYSIM

V prilogi 3.2.2.C so za konstantno difuzno osončenost in različne deleže direktne komponente (določene po enačbi (45)) podani rezultati izračuna globalne osvetljenosti in svetlosti zenita po Perezovem modelu svetlobne učinkovitosti globalnega sončnega sevanja [143], iz  $L_{vz}^{Perez}$  izračunane  $E_{o,calc,dif}$  s pomočjo faktorja  $7\pi/9$  (poglavlje 2.2.3) ter eksperimentalno izmerjene vrednosti  $E_{o,exp,glob}$ . Za primer osončenosti 35,0 W/m<sup>2</sup> je lepo razviden vpliv direktne komponente in če neposredno primerjamo računske vrednosti globalne osvetljenosti izračunane s Perezovim vse-vremenskim modelom [137]

$E_{o,calc,glob}^{Perez}$  z eksperimentalno izmerjenimi vrednostmi  $E_{o,exp,glob}$ , bi lahko rekli, da je bilo ob meritvi  $I_{o,glob}$  ob 12:45:30 prisotne od 6 % do 7 % direktne komponente. Hkrati je  $E_{o,calc,glob}^{Perez}$  pri  $I_{o,glob} = 35,0 \text{ W/m}^2$  za 333 lx (6 % direktne komponente) in 356 lx (7 % direktne komponente) višja kakor eksperimentalna vrednost  $E_{o,calc,dif}$ , razlika med eksperimentalnima vrednostma  $E_{o,exp,glob}$  in  $E_{o,calc,dif}$  med celotnim eksperimentom, izražena z RMSE (24), pa je enaka 271 lx (poglavlje 3.1.3).

Na podlagi predhodnih ugotovitev in slednjih rezultatov lahko sklepamo, da so bili v nadaljevanju upravičeno obravnavani primeri analize, pri katerih je delež direktne komponente n manjši ali enak 10 %. Novi primeri so se od prejšnjih (**preglednica 3.2.2.5**) razlikovali ne le v manjšem deležu direktne komponente n, ampak tudi v dejstvu, da osončenost ni več konstantna. Za določitev izhodiščne vrednosti osončenosti, za katere je bilo predpostavljeno, da velja  $I_{o,dir} = 0 \text{ W/m}^2$ , so bile uporabljene eksperimentalno dobljene vrednosti  $E_{o,calc,dif}$ . Te smo s pomočjo pretvornega faktorja, ki je bil prav tako določen na podlagi eksperimentalnih meritev, pretvorili v  $I_{o,glob} = I_{o,dif}$ . Vrednosti pretvornega faktorja oziroma svetlobne učinkovitosti  $K [\text{lm/W}]$  sta bili določeni za seta 1 in 2 ločeno kot srednja vrednost med vrednostmi razmerja med izmerjeno  $E_{o,exp,glob}$  in izmerjeno  $I_{o,exp,glob}$  na začetku in na koncu posameznega seta. Vrednosti so podane v **preglednici 3.2.2.7**, vrednosti osončenosti, ki so bile uporabljene kot vhodni podatek, pa v **prilogi 3.2.2.D (preglednici 3.2.2.D.1 in 3.2.2.D.2)**. Poleg vrednosti deleža direktne komponente n 0 in 10 % sta bili izbrani še vrednosti 4 % in 7 %.

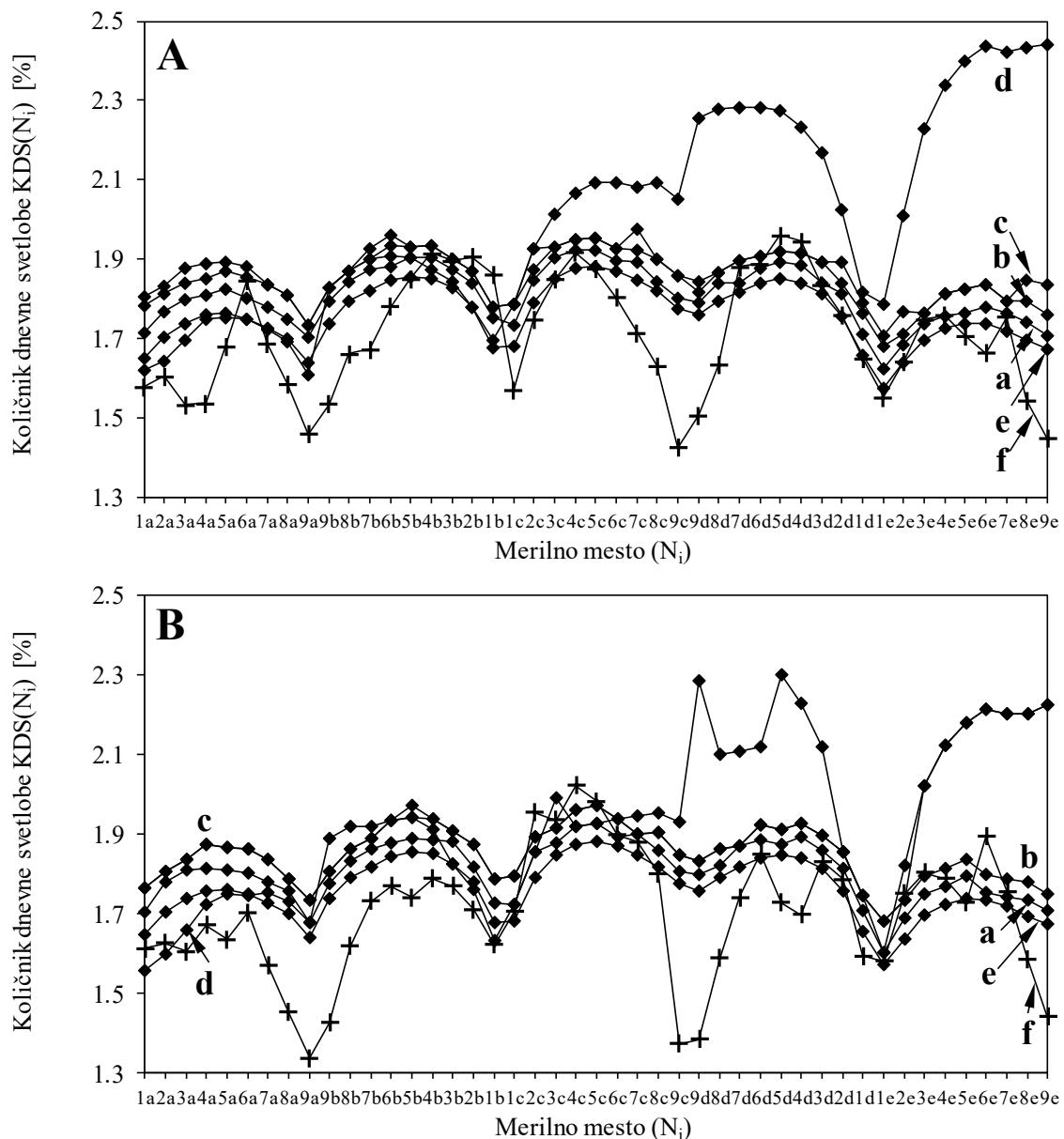
**Preglednica 3.2.2.7:** Eksperimentalno določene vrednosti svetlobne učinkovitosti sončnega sevanja  $K [\text{lm/W}]$  iz dne 29. 10. 2015 izmerjenih podatkov o globalni osvetljenosti  $E_{o,exp,glob} [\text{lx}]$  in osončenosti zunanje horizontalne površine  $I_{o,exp,glob} [\text{W/m}^2]$

**Table 3.2.2.7:** Experimental values of solar radiation luminous efficacy  $K [\text{lm/W}]$  on 29<sup>th</sup> Oct. 2015 determined from the measured values of global illuminance  $E_{o,exp,glob} [\text{lx}]$  and solar irradiance of external horizontal surface  $I_{o,exp,glob} [\text{W/m}^2]$

	Čas [hh:mm:ss]	$E_{o,exp,glob}$ [lx]	$I_{o,glob}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$K$ [lm/W]
I	12:10:00	5680	42,9	132,4
II	12:45:30	4510	35,0	128,9
III	13:24:00	2820	17,4	162,1
Set 1 (povprečje)		(K <sub>I</sub> +K <sub>II</sub> )/2	130,6	
Set 2 (povprečje)		(K <sub>II</sub> +K <sub>III</sub> )/2	145,5	

S **slike 3.2.2.16** je razvidno, da se rezultati simulacije zelo dobro ujemajo z eksperimentalno dobljenimi vrednostmi KDS. V **preglednici 3.2.2.8** so podane povprečne absolutne deviacije. Na podlagi teh rezultatov je mogoče tudi predvidevati, da je bil delež direktne komponente n v času izvedbe eksperimenta manjši od 10 %. Hkrati Perezov vse-vremenski model pri vrednostih n nad 7 % bistveno zmanjša svetlost zenita kljub podobni globalni osončenosti (**preglednica 3.2.2.C.1**), in sicer pod eksperimentalno dobljene vrednosti  $L_{vz}$ . Te lahko pridobimo iz vrednosti  $E_{o,calc,dif}$  kot je opisano v poglavju 2.2.3.

Prav tako je bilo ugotovljeno, da so bile razlike med  $E_{o,exp,glob}$  in  $E_{o,calc,dif}$  (**slika 3.1.3.3**) večje kakor bi jih predvideval Perezov vse-vremenski modeli in tudi DAYSIM. Iz tega lahko sklepamo, da je bil vpliv splošne porazdelitve svetlosti neba bolj merodajan. Posledično brez ustreznih meteoroloških podatkov kljub ujemaju posameznih eksperimentalnih in simuliranih vrednosti KDS na pripadajočih merilnih mestih ni mogoče zanesljivo določiti deleža direktne komponente n.



**Slika 3.2.2.16:** S programom DAYSIM simulirani količnik dnevne svetlobe  $KDS_{sim}$  [%], pripadajoč eksperimentalnim merilnim mestom dne 29. 10. 2015 v času med 12.15 in 12.45 (set 1) (A) ter med 12.56 in 13.22 (set 2) (B) za različne primere deleža direktne komponente ( $n = I_{o,dir,n} / I_{o,dif}$ ): 0 % (krivulja a), 4 % (krivulja b), 7 % (krivulja c), 10 % (krivulja d). Krivulja e pomeni izračun za CIE standardno oblačno nebo (tudi slika 3.2.2.10), krivulja f pa eksperimentalno določen KDS

**Figure 3.2.2.16:** The simulated (DAYSIM) daylight factor values  $KDS_{sim}$  [%] corresponding to experimental measurement sites on 29<sup>th</sup> October 2015 between 12.15 and 12.45 (set 1) (A) and between 12.56 and 13.22 (set 2) (B) for various cases of the direct normal solar radiation component proportions ( $n = I_{o,dir,n} / I_{o,dif}$ ): 0 % (curve a), 4 % (curve b), 7 % (curve c), 10 % (curve d). Curve e represents the calculation for CIE standard overcast sky (also Figure 3.2.2.10) and curve f represents the experimentally obtained KDS

**Preglednica 3.2.2.8:** Povprečna absolutna deviacija AAD [%] (poglavlje 2.2.3) med eksperimentalnimi in s programom DAYSIM simuliranimi vrednostmi KDS [%] za set 1 in set 2 eksperimentalnih meritev

**Table 3.2.2.8:** Average absolute deviation AAD [%] (chapter 2.2.3) between the experimental KDS [%] values and the DAYSIM simulated KDS values for set 1 and 2 of experimental measurements

	Povprečna absolutna deviacija AAD [%]				
	CIE	n = 0 %	n = 4 %	n = 7 %	n = 10 %
<b>Set 1</b>	0,10	0,10	0,10	0,11	0,21
<b>Set 2</b>	0,10	0,10	0,10	0,13	0,19

Za konec je potrebno še poudariti, da na rezultat vpliva tudi skladnost faktorja svetlobne učinkovitosti neba med eksperimentoma in svetlobne učinkovitosti po Perezovem vse-vremenskem modelu.

Kot je razvidno iz **preglednice 3.2.2.7**, v kateri so podani eksperimentalni podatki, in **preglednice 3.2.2.C.1 v prilogi 3.2.2.C**, je bila uporabljena svetlobna učinkovitost za pripravo vhodnih podatkov za izračune s programom DAYSIM zelo podobna in istega velikostnega razreda.

### 3.2.3 Raziskava rabe energije za ogrevanje in hlajenje Športne dvorane Brezovica

Poglavitni namen raziskave rabe energije za ogrevanje in hlajenje ŠDB je bil pridobiti podatke o učinku uvedbe 10 mm aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® v konstrukcijski sklop dvojnega membranskega ovoja ŠDB na energijo, potrebno za ogrevanje in hlajenje. Toplotni upor zračno podprtoga ovoja se ob upoštevanju dodatne aerogelne toplotne izolacije bistveno poveča tudi v primeru, ko pripišemo zunanjji strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE vrednost  $\epsilon_T$  0,96 (v povprečju z 0,31  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  na 0,98  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ , torej za kar približno 3,2-krat) hkrati pa je bilo izpostavljeno vprašanje ali je mogoče pričakovati sorazmerno zmanjšanje količine energije  $Q_{\text{heat}}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$ ], potrebne za ogrevanje, ter kaj se posledično zgodi z energijo, potrebno za hlajenje stavbe ( $Q_{\text{cool}}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$ ]). Primarni poudarek izračuna rabe energije je na ogrevalni sezoni, medtem ko se v maju, juniju in septembru stavba ŠDB uporablja le ob slabem vremenu, med najbolj vročimi mesci (čas najmočnejšega pregrevanja) julija in avgusta, pa je popolnoma zaprta.

#### 3.2.3.1 Simulacija toplotnega odziva Športne dvorane Brezovica in primerjava z eksperimentalnimi podatki

Kakor je navedeno v poglavju 2.3.3 je pri izvedbi simulacije toplotnega odziva in posledično tudi pri izračunu rabe energije s programom EnergyPlus potrebno upoštevati različne predpostavke in poenostavitev (geometrija stavbe, toplotne in optične lastnosti ovoja, vhodni vremenski podatki), ki pa lahko bistveno vplivajo na končni rezultat. Cilj predstavljenega dela je bil oceniti odstopanje simulirane temperature zraka v stavbi  $T_{\text{a},\text{i},\text{sim}}$  [ $^\circ\text{C}$ ] v primerjavi z eksperimentalno izmerjeno temperaturo zraka v stavbi  $T_{\text{a},\text{i}}$  [ $^\circ\text{C}$ ] v prostem teku (ang. »free-running mode«), ko je bil prisoten le konstanten mehanski dovod zraka za zagotavljanje tlačne razlike med notranjostjo in zunanjostjo stavbe, z izključenim ogrevanjem. Temperatura zraka je pogosto uporabljena kot parameter za regulacijo vžiga in delovanja sistema ogrevanja in tako je tudi v primeru ŠDB, ki nima možnosti za hlajenje, kot tudi ne sistema, najsiro aktivne ali dodatne pasivne protisončne zaščite.

Za oceno  $T_{\text{ta}}$  pod ŠDB s programom Therm [166] so bili uporabljeni podatki o povprečni mesečni temperaturi tal na globini 100 cm [167], rezultat pa je podan v **preglednici 3.2.3.1**. Podatki o sončnem obsevanju so bili za celotno obdobje eksperimentalnih meritev pridobljeni pri Laboratoriju za fotovoltaiko in optoelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani [168] (oddaljenost od analizirane ŠDB na Brezovici približno 6 km). Ostali vremenski podatki (temperatura zunanjega zraka, relativna vlažnost zraka v stavbi in zunaj nje, zračni pritisk v stavbi in zunaj nje, hitrost in smer vetra) pa so bili eksperimentalno pridobljeni na lokaciji ŠDB (poglavlji 2.2.4 in 3.1.4).

**Preglednica 3.2.3.1:** Temperatura tal pod ŠDB  $T_{\text{ta}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], po posameznih mesecih v letu ocenjena na podlagi povprečne mesečne temperature tal (globina 100 cm) [167] in povprečne mesečne temperature zunanjega zraka  $T_{\text{a},\text{o}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] za Ljubljano [164]

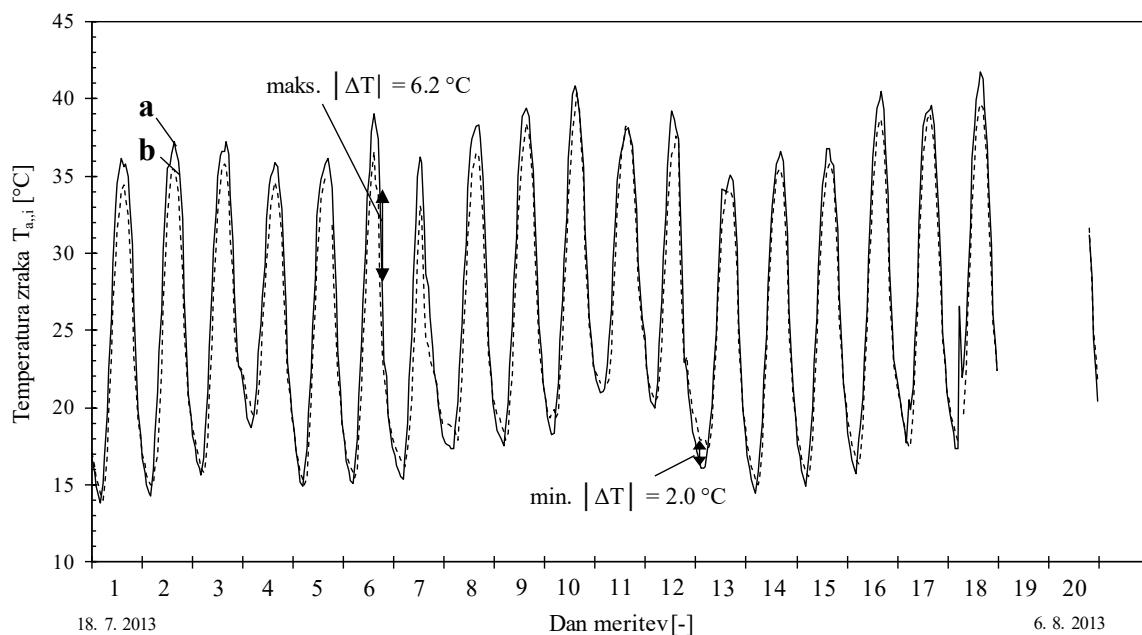
**Table 3.2.3.1:** The estimated temperature of soil underneath the air-supported dome at Brezovica  $T_{\text{ta}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], based on average monthly temperature of soil (100 cm below surface) [167] and the average monthly outdoor air temperature  $T_{\text{a},\text{o}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] in Ljubljana [164]

T <sub>tal</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]											
JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC
1,3	2,8	5,9	9,6	14,8	17,1	17,2	17,2	14,9	9,7	5,1	2,8

Geometrijski model ŠDB je predstavljen v poglavju 2.3.3, optične lastnosti upoštevane različice ovoja (PES(1)2009z/PES(2)2009z) (**preglednica 2.1.2.3**) pa so podane v **preglednici 3.1.1.3**. Privzete vrednosti topotne prevodnosti membran so bile: 0,091 W/m.K za PES(1)2009 in PES(2)2009, 0,24 W/m.K za ETFE, 0,45 W/m.K za PEfabric in 0,015 W/m.K za aerogel [53].

Za ponazoritev sistema dovoda zraka v programu EnergyPlus je bil uporabljen vnaprej pripravljen modul »ZoneHVAC:UnitVentilator« [155], ki vključuje tako ustrezni ventilator kot tudi možnost vključitve sistema ogrevanja. Lastnosti ventilatorja s konstantnim dovodom zraka (modul »Fan:ConstantVolume« [155]) ŠDB, kot so učinkovitost ventilatorja, tlačna razlika, maksimalni pretok zraka in učinkovitost motorja, so bile pripisane ventilatorju v vhodni datoteki programa EnergyPlus. Podatka o dejanskem pretoku zraka in dejanski izmenjavi zraka v ŠDB, ki vključuje vpliv njene tesnosti, je podalo podjetje DUOL, d. o. o., [169]. V času eksperimentalnih meritev je bil objekt prazen, v njem niso potekale nikakršne aktivnosti razen meritev, luči in preostali viri morebitnih notranjih dobitkov energije pa so bili izključeni.

Na **sliki 3.2.3.1** je predstavljen rezultat simulacije temperature zraka v ŠDB  $T_{\text{a},\text{i}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], izvedene s programom EnergyPlus, in eksperimentalno izmerjenih vrednosti. Izkaže se, da pri simulaciji  $T_{\text{a},\text{i}}$  nekoliko bolj niha, oziroma ima ta više oziroma nižje ekstreme, še zlasti maksimume. Povprečna absolutna deviacija razlike v  $T_{\text{a},\text{i}}$  med eksperimentom in simulacijo je enaka 1,2 °C, njene vrednosti pa se gibljejo v območju med -6,2 in 2,0 °C.



**Slika 3.2.3.1:** Primerjava rezultata simulacije ( $T_{a,i,sim}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], krivulja a) in eksperimentalne meritve (18. 7. 2013 do 6. 8. 2013) ( $T_{a,i}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], krivulja b) temperature zraka v ŠDB

**Figure 3.2.3.1:** Comparison of simulated (EnergyPlus) (18th July 2013 do 6th August 2013) ( $T_{a,i,sim}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], curve a) and experimentally measured ( $T_{a,i}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], curve b) air temperature inside the air-supported dome at Brezovica

### 3.2.3.2 Izračun energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje Športne dvorane Brezovica

Za izračun energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje ŠDB, je bila uporabljenava vremenska datoteka z urnimi podatki za celotno leto [164]. V modul »ZoneHVAC:UnitVentilator« [155] je bil vključen še plinski grelnik, podatki o moči grelnika in njegovi učinkovitosti pa so bili pridobljeni pri podjetju DUOL, d. o. o. [170]. Treba je omeniti, da predogrevanje zraka zaradi delovanja ventilatorja ni bilo upoštevano v nobenem od izračunov, saj je bilo predpostavljeno, da v kolikor bi se vsa električna energija ob delovanju elektromotorja pretvorila v toploto (vemo, da temu ni tako), bi to predstavljalo le 3,4 % toplotnih (transmisijskih in ventilacijskih) izgub na povprečen decembriski oziroma januarski dan [171] ter 2,2 % toplotne moči grelnika. Količina energije, potrebna za hlajenje stavbe, je bila izračunana s pomočjo v program EnergyPlus vgrajene funkcije, ki oceni rabo energije na podlagi razlike med izračunano temperaturo zraka v stavbi  $T_{a,i}$  in nastavljivo temperaturom termostata  $T_{setpoint}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Notranji dobitki v izračunih niso bili upoštevani, saj je bil cilj pridobiti podatek o učinku spremembe optičnih in toplotnih lastnosti obravnavanih različic dvojnega membranskega ovoja (poglavlji 3.1.1 in 3.2.1) na potrebo po energiji. Kljub temu je bil predviden urnik, v času katerega je bilo v ogrevalni sezoni (obdobje od 1. oktobra do 30. aprila (naslednje leto)) ogrevanje razpoložljivo (delavniki med 8<sup>h</sup> in 22<sup>h</sup>). Enako je bilo predvideno za sezono hlajenja ŠDB (od 1. maja do 30. septembra).

Količine energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje, in pripadajoči prihranki oziroma pribitki so bili izračunani za šest različic konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ŠDB, tri prosojne in tri neprosojne (preglednica 3.2.3.2). Prosojne konstrukcije vključujejo obstoječo različico ovoja ŠDB PES(1)2009z/PES(2)2009z (primer a), ETFE/ETFE (primer b) in z aerogelom izolirano različico ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (privzeta vrednost termične emitivnosti  $e_T$  zunanje strani

notranje membrane je bila enaka 0,96 in enaka primeroma dvojnega membranskega konstrukcijskega sklopa a in b) (primer c). Za primerjavo in dodatno ponazoritev učinka uvedbe aerogelne izolacijske odeje so bili narejeni še izračuni o rabi energije za tri primere debeline aerogelne izolacijske odeje (10 mm (primer d), 20 mm (primer e), 40 mm (primer f)).

**Preglednica 3.2.3.2:** Rezultat izračuna letne energije, potrebne za ogrevanje  $Q_{heat,a}$  [kWh/m<sup>2</sup>.a] in hlajenje  $Q_{cool,a}$  [kWh/m<sup>2</sup>.a] ŠDB, s programom EnergyPlus za več različic prosojnosti sestave konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja (PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE)

**Table 3.2.3.2:** EnergyPlus calculation of yearly energy use for heating  $Q_{heat,a}$  [kWh/m<sup>2</sup>.a] and cooling  $Q_{cool,a}$  [kWh/m<sup>2</sup>.a] of the air-supported dome at Brezovica for different cases of transparent and translucent composition of the double membrane envelope constructional complex (PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE)

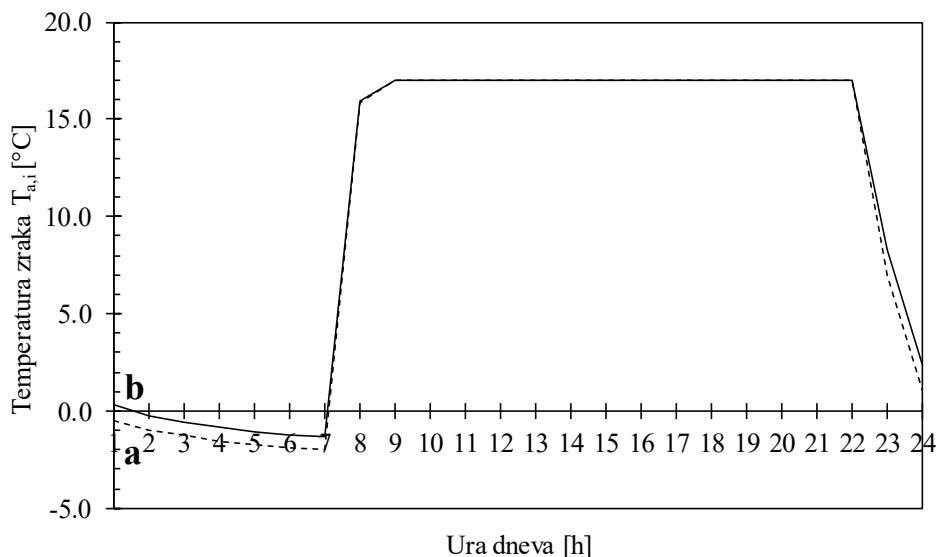
	Obdobje ogrevalne sezone	Debelina TI	Električna energija - ventilator	Energija zem. plina - ogrevanje	$\Delta$ ( $Q_{heat,a} - Q_{heat,a}^a$ )	$\Delta$ ( $Q_{heat,a} - Q_{heat,a}^a$ ) / $Q_{heat,a}^a$
<b>Primer</b>		[mm]	[kWh/m <sup>2</sup> .a]	[kWh/m <sup>2</sup> .a]	[kWh/m <sup>2</sup> .a]	[%]
	<b>Prosojno</b>					
a	PES(1)2009z/PES(2)2009z	brez	4,3	195,4		
b	ETFE/ETFE	brez	4,0	167,1	-28,3	-14
c	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	10 mm	4,2	151,6	-43,8	-22
	<b>Neprosojno</b>					
d	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	10 mm	4,3	179,0	-16,4	-8
e	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	20 mm	4,3	171,0	-24,4	-12
f	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	40 mm	4,3	165,1	-30,3	-15
	Obdobje ohlajevalne sezone	Debelina TI	Električna energija - ventilator	Energija - hlajenje – ocenjeno	$\Delta$ ( $Q_{cool} - Q_{cool,a}$ ) / $Q_{cool,a}$	$\Delta$ ( $Q_{cool} - Q_{cool,a}$ ) / $Q_{cool,a}$
<b>Primer</b>		[mm]	[kWh/m <sup>2</sup> .a]	[kWh/m <sup>2</sup> .a]	[kWh/m <sup>2</sup> .a]	[%]
	<b>Prosojno</b>					
a	PES(1)2009z/PES(2)2009z	brez	-	46,6		
b	ETFE/ETFE	brez	-	1053,8	1007,2	2161
c	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	10 mm	-	241,4	194,8	418
	<b>Neprosojno</b>					
d	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	10 mm	-	2,0	-44,6	-96
e	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	20 mm	-	1,7	-44,9	-96
f	ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	40 mm	-	1,6	-45,0	-97

Iz **preglednice 3.2.3.2** je razvidno, da je energija, potrebna za ogrevanje obstoječe obravnavane ŠDB (primer a), relativno velika (195,4 kWh/(m<sup>2</sup>.a)) glede na to, da je željena temperatura zraka 17 °C in da stavba ni stalno ogrevana, ob tem pa njena ultralahka konstrukcija ne omogoča shranjevanja topote. Tovrstne konstrukcije so sicer bolj primerne za prekinjeno ogrevanje (**slika 3.2.3.2**) v kolikor sistem ogrevanja omogoča hiter odziv na spremembo željene temperature zraka v stavbi, kot na primer toplozračni sistem s plinskim gorilnikom v analizirani ŠDB (poglavlje 2.1.1.3). Izračun energije za ogrevanje pokaže, da ob upoštevanju lokalnega podnebja, uporaba 10 mm debele prosojne aerogelne topotnoizolacijske odeje Spaceloft® (primer c) doprinese 22% prihranek energije potrebne za ogrevanje glede na izhodiščni primer (primer a, **preglednica 3.2.3.2**). Razvidno je tudi, da je ta prihranek (22 %, primer c) višji kakor v primeru b (14 %), ki predvideva uporabo le visoko prepustne folije ETFE. Na drugi strani ocena energije potrebne za hlajenje za primer c (**preglednica 3.2.3.2**) pokaže 5,2-kratno povečanje (s 46,6 na 241,4 kWh/m<sup>2</sup>.a) glede na izhodiščni primer a. V primeru c (**preglednica 3.2.3.2**) je povečanje količine energije, potrebne za hlajenje, še občutno večje (22,6-kratno povečanje, s 46,6 na 1053,8 kWh/m<sup>2</sup>.a).

Rezultat primera d pokaže, da je povečanje prepustnosti za sončno sevanje (z 2,3 % na 4,2 %, **preglednica 3.1.1.3**) in sočasno povečanje toplotnega upora konstrukcijskega sklopa ( $\sim 3,3$ -krat, **slika 3.2.1.2**) zaradi uporabe folije ETFE in aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® učinkovito, saj bi tedaj, ko aerogelna izolacijska odeja ne bi bila prosojna, bil prihranek energije za ogrevanje le 8 %. To pokaže, da so bistveni sončni dobitki v primeru ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, ki se jih zaradi povečanega toplotnega upora konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja lahko bolj učinkovito zadrži v stavbi (27,4 kWh/m<sup>2</sup>.a ali 14 % energije, potrebne za ogrevanje v primeru a). Ta rezultat dodatno potrdi dejstvo, da tudi uporaba 40 mm debele neprosojne aerogelne izolacijske odeje (15-odstotni prihranek glede na primer a) v danem primeru ŠDB ne bi imela enakovrednega učinka kakor uporaba 10 mm prosojne aerogelne izolacijske odeje z enako toplotno prevodnostjo. Nasprotno bi tekom poletja, ko sončni dobitki niso zaželeni, uporaba 40 mm aerogelne izolacijske odeje sicer bistveno zmanjšala čas in stopnjo pregrevanja stavbe, vendar bi s takim ukrepom poleg predhodno pojasnjenega neugodnega vpliva na rabo energije za ogrevanje v zimskem času onemogočili tudi dnevno osvetljevanje stavbe.

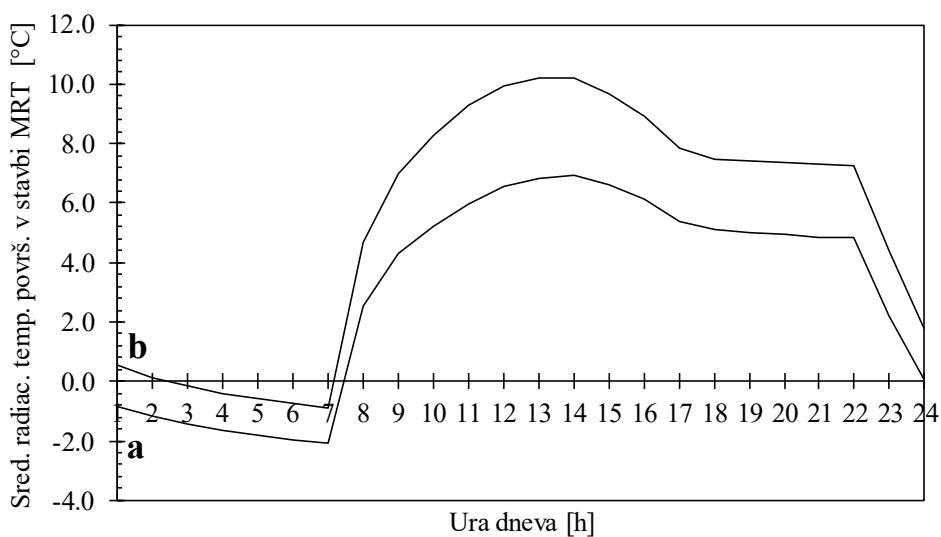
### 3.2.3.3 Toplotno ugodje v Športni dvorani Brezovica

Čeprav je vklapljanje ogrevalnega sistema najpogosteje vezano na željeno temperaturo zraka v stavbi (tudi v primeru ŠDB), temperatura zraka ni edini parameter, ki določa stopnjo toplotnega ugodja. V mehansko ogrevanih ali hlajenih stavbah je toplotno ugodje moč določiti po Fangerjevem modelu v skladu s standardom SIST EN ISO 7730:2006 [172]. Kljub tako rekoč enakemu povprečnemu dnevnu temperaturnemu profilu  $T_{a,i}$  za januar (**slika 3.2.3.2**) se učinek uvedbe 10 mm debele prosojne aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® odrazi tudi na višji temperaturi notranje površine dvojnega membranskega ovoja ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE MRT<sup>c</sup> (**slika 3.2.3.3**).



**Slika 3.2.3.2:** Januarsko mesečno povprečje temperature notranjega zraka  $T_{a,i}$  tekomo dneva v ŠDB za primer konstrukcijskega sklopa obstoječega dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z (krivulja a) in nove različice ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (krivulja b)

**Figure 3.2.3.2:** Monthly average interior air temperature during a January day  $T_{a,i}$  inside the Brezovica air-supported dome double membrane envelope constructional complex cases PES(1)2009z/PES(2)2009z (curve a) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (curve b)



**Slika 3.2.3.3:** Januarsko mesečno povprečje srednje radiacijske temperature površin v ŠDB (MRT [ $^{\circ}$ C]) tekom dneva za primer konstrukcijskega sklopa obstoječega dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z (krivulja a) in nove različice ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (krivulja b)

**Figure 3.2.3.3:** Monthly average mean radiant temperature (MRT [ $^{\circ}$ C]) of surfaces inside the air-supported dome at Brezovica during a January day for double membrane envelope constructional complex cases PES(1)2009z/PES(2)2009z (curve a) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (curve b)

**Preglednica 3.2.3.3:** Vhodni podatki in rezultat izračuna indeksov toplotnega ugodja PMV [-] in PPD [%] v skladu s standardom SIST EN ISO 7730:2006 z uporabo programa PMV Tool ter določitev kategorije stavbe po indeksih PMV in PPD, izračunanih v skladu s standardom SIST EN 15251:2007

**Table 3.2.3.3:** Input data and result of PMV [-] and PPD [%] thermal comfort indices in accordance with international standard SIST EN ISO 7730:2006 by using computer program PMV and determination of building category considering the calculated PMV and PPD according to European standard SIST EN 15251:2007

Čas	PES(1)2009z/ PES(2)2009z			ETFE/ PEfabric/ aerogel/ PEfabric/ ETFE			Toplotni upor oblačil	Stopnja aktivnosti	v
	MRT <sub>i,avg</sub> <sup>a</sup>	T <sub>i,avg</sub> <sup>a</sup>	RH <sub>i,avg</sub> <sup>a</sup>	MRT <sub>i,avg</sub> <sup>c</sup>	T <sub>i,avg</sub> <sup>c</sup>	RH <sub>i,avg</sub> <sup>c</sup>			
	[ $^{\circ}$ C]	[ $^{\circ}$ C]	[%]	[ $^{\circ}$ C]	[ $^{\circ}$ C]	[%]			
8h	3	16	28	5	16	27	0,3	4,0	0,13
12h	7	17	26	10	17	26	0,3	4,0	0,13
22h	5	17	26	7	17	26	0,3	4,0	0,13
8h	3	16	28	5	16	27	0,3	3,5	0,13
12h	7	17	26	10	17	26	0,3	3,5	0,13
22h	5	17	26	7	17	26	0,3	3,5	0,13
8h	3	16	28	5	16	27	0,3	3,0	0,13
12h	7	17	26	10	17	26	0,3	3,0	0,13
22h	5	17	26	7	17	26	0,3	3,0	0,13
Čas	PES(1)2009z/ PES(2)2009z			ETFE/ PEfabric/ aerogel/ PEfabric/ ETFE			Kategorija stavbe po SIST EN 15251:2007		
	Kategorija stavbe po SIST EN 15251:2007						Kategorija stavbe po SIST EN 15251:2007		

	PMV	PPD		PMV	PPD		
	[-]	[%]		[-]	[%]		
8h	0,11	5,2	I	0,24	6,2	II	
12h	0,49	10,1	II	0,71	15,7	IV	
22h	0,35	7,5	II	0,49	10,1	II	
8h	-0,44	9,0	II	-0,30	6,8	II	
12h	-0,05	5,1	I	0,17	5,6	I	
22h	-0,20	5,8	I	-0,05	5,1	I	
8h	-0,99	25,8	IV	-0,85	20,3	IV	
12h	-0,60	12,7	III	-0,38	8,0	II	
22h	-0,75	16,9	IV	-0,60	12,7	III	

MRT<sup>c</sup> je v januarju, ki je najhladnejši mesec v letu glede na obravnavane vremenske podatke [164], med 8. in 22. uro v povprečju višja od MRT<sup>a</sup> (primer PES(1)2009z/PES(2)2009z) za 2,7 °C, kar v nasprotju s pričakovanji nekoliko poslabša stopnjo toplotnega ugodja (**preglednica 3.2.3.3**) in s tem tudi klasifikacijo stavbe v skladu s standardom SIST EN 15251:2007 [173]. Pri tem je treba poudariti, da standard in uporabljeno programsko orodje za izračun indeksov PMV in PPD PMV Tool [174], ne obravnavata primerov stopnje aktivnosti nad 4,0 (tenis, ples, telovadba [155]). Na drugi strani je treba opozoriti, da bi že ob stopnji aktivnosti pod 3,5 bil rezultat nasproten in bi bilo izračunano povišanje MRT, podano v **preglednici 3.2.3.3**, ugodno.

V **preglednici 3.2.3.4** so podani še deleži ur v posameznem mesecu v letu upoštevajoč izbrano vremensko datoteko [164], ko je izpolnjen eden od treh pogojev  $T_{a,i} \geq 26^{\circ}\text{C}$ ,  $17^{\circ}\text{C} \leq T_{a,i} \leq 26^{\circ}\text{C}$  in  $T_{a,i} \leq 17^{\circ}\text{C}$  za posamezno različico konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja, stavba pa je v prostem teku (ni ogrevanja ali hlajenja). Iz teh podatkov je razvidno, da se delež ur v ogrevalni sezoni (obdobje od 1. oktobra do 30. aprila (naslednje leto)) in podrobneje v marcu, aprilu in oktobru v primeru sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE v primerjavi z izhodiščnim sklopom PES(1)2009z/PES(2)2009z, poveča za nekaj ogrevalnih dni (marec 30 h ali ~ 2 dni, april 50 h ali ~ 3,5 dni in oktober 45 h ali ~ 3 dni). Maja in oktobra ima uvedba aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® tudi ugoden vpliv, čeprav se zviša tudi stopnja pregrevanja stavbe, medtem ko v poletnih mesecih, juniju, juliju in avgustu, delež ur v ugodnem območju  $T_{a,i}$  med 17 in 26 °C opazno upade. Podatki v **preglednici 3.2.3.4** pokažejo tudi, da uporaba konstrukcijskega sklopa sestavljenega zgolj iz dveh folij ETFE, ne da želenega učinka, saj se poleti ŠDB močno pregreva, v prehodnih mesecih pa delež ugodne  $T_{a,i}$  ni večji kakor pri ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Februarja, oktobra in novembra je v primeru sklopa ETFE/ETFE, povečanje deleža ur, ko je  $T_{a,i}$  v ugodnem območju med 17 °C in 26 °C, večje kakor v primeru ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE za 4 %, 3 % in 2 %, kar ne odtehta neugodnega rezultata povečane stopnje pregrevanja ŠDB v mesecih od maja do septembra.

**Preglednica 3.2.3.4:** Delež časa v letu, ko je temperatura zraka v stavbi  $T_{a,i}$  [°C] nad, v in pod območjem nastavitev termostata, ko ogrevanje ozziroma hlajenje ni potrebno

**Table 3.2.3.4:** Percentage of time in a year, when the indoor air temperature  $T_{a,i}$  [°C] is above, in and under the range of thermostat settings, when heating or cooling is not required

	Št. Ur v mesecu	PES(1)2009z/ PES(2)2009z	ETFE/ ETFE	ETFE/ PEfabric/ aerogel/ PEfabric/ ETFE
$T_{a,i} \geq 26^{\circ}\text{C}$				
JAN	744	0 %	0 %	0 %
FEB	672	0 %	0 %	0 %
MAR	744	0 %	6 %	0 %
APR	720	0 %	15 %	2 %
MAJ	744	8 %	32 %	15 %
JUN	720	19 %	31 %	28 %

JUL	744	23 %	43 %	31 %
AVG	744	20 %	40 %	27 %
SEP	720	1 %	22 %	4 %
OKT	744	0 %	6 %	0 %
NOV	720	0 %	1 %	0 %
DEC	744	0 %	0 %	0 %
Letno povprečje	730	6 %	16 %	9 %
$17^{\circ}\text{C} \leq T_{a,i} \leq 26^{\circ}\text{C}$				
JAN	744	0 %	0 %	0 %
FEB	672	0 %	5 %	1 %
MAR	744	2 %	6 %	6 %
APR	720	13 %	20 %	20 %
MAJ	744	38 %	30 %	40 %
JUN	720	47 %	30 %	45 %
JUL	744	55 %	41 %	52 %
AVG	744	60 %	48 %	59 %
SEP	720	36 %	30 %	42 %
OKT	744	8 %	17 %	14 %
NOV	720	0 %	3 %	1 %
DEC	744	0 %	0 %	0 %
Letno povprečje	730	22 %	19 %	23 %
$T_{a,i} \leq 17^{\circ}\text{C}$				
JAN	744	100 %	100 %	100 %
FEB	672	90 %	85 %	90 %
MAR	744	98 %	83 %	94 %
APR	720	84 %	62 %	75 %
MAJ	744	53 %	39 %	45 %
JUN	720	30 %	39 %	24 %
JUL	744	23 %	15 %	17 %
AVG	744	21 %	87 %	15 %
SEP	720	60 %	45 %	51 %
OKT	744	92 %	78 %	86 %
NOV	720	97 %	93 %	96 %
DEC	744	100 %	100 %	100 %
Letno povprečje	730	71 %	69 %	66 %

### 3.2.3.4 Analiza vpliva optičnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja na sončne dobitke

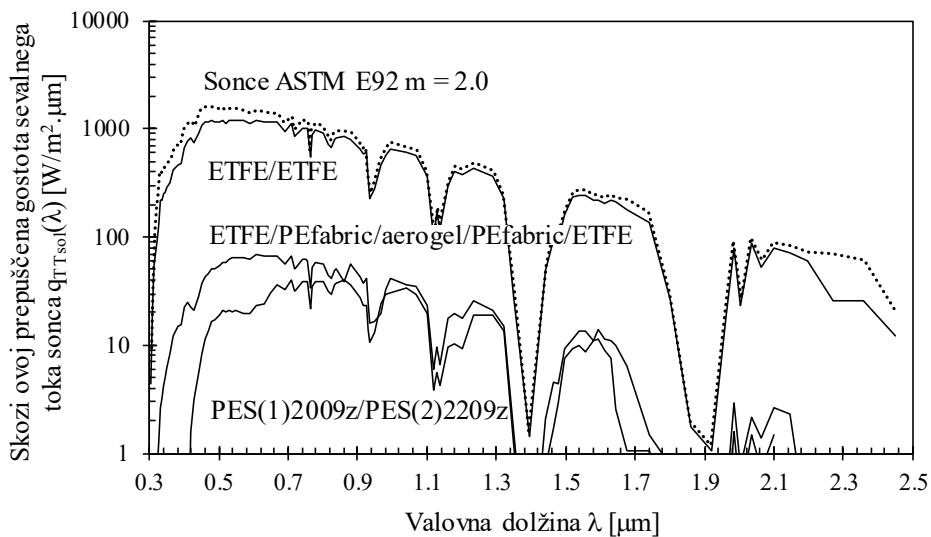
Spektri optičnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja ne podajo informacije o absolutni količini skozenj prepuščene, od njega odbite ali absorbirane energije. Zato so na **slikah 3.2.3.4** in **3.2.3.5** prikazani spektri gostote sevalnega toka sonca uteženi s totalno (hemisferično) spektralno prepustnostjo  $TT_{sol}(\lambda)$  (**46**), totalno (hemisferično) odbojnostjo  $TR_{sol}(\lambda)$  (**47**, **48**) ozziroma absorptivnostjo  $A_{sol}(\lambda)$  (**49**). Pri pripravi teh podatkov je bila upoštevana spektralna porazdelitev gostote sevalnega toka sonca  $\Phi_{e,ISO9845}(\lambda)$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$ ] v skladu s standardom ISO 9845-1:1992 [**86**], spektri  $TT_{sol}(\lambda)$ ,  $TR_{sol}(\lambda)$  in  $A_{sol}(\lambda)$  pa so bili predhodno interpolirani na ustrezne valovne dolžine na katerih je definiran  $\Phi_{e,ISO9845}(\lambda)$ . Ponovno je potrebno omeniti tudi, da so sončne optične lastnosti v splošnem odvisne od vpadnega kota svetlobe ozziroma sončnega sevanja, medtem ko so obravnavane le v okviru predpostavk in metodologije meritev predstavljenih v poglavju 2.2.1.

$$q_{TTsol}(\lambda) = TT_{sol}(\lambda) \Phi_{e,ISO9845}(\lambda) \quad (46)$$

$$q_{TRBsol}(\lambda) = TRB_{sol}(\lambda) \Phi_{e,ISO9845}(\lambda) \quad (47)$$

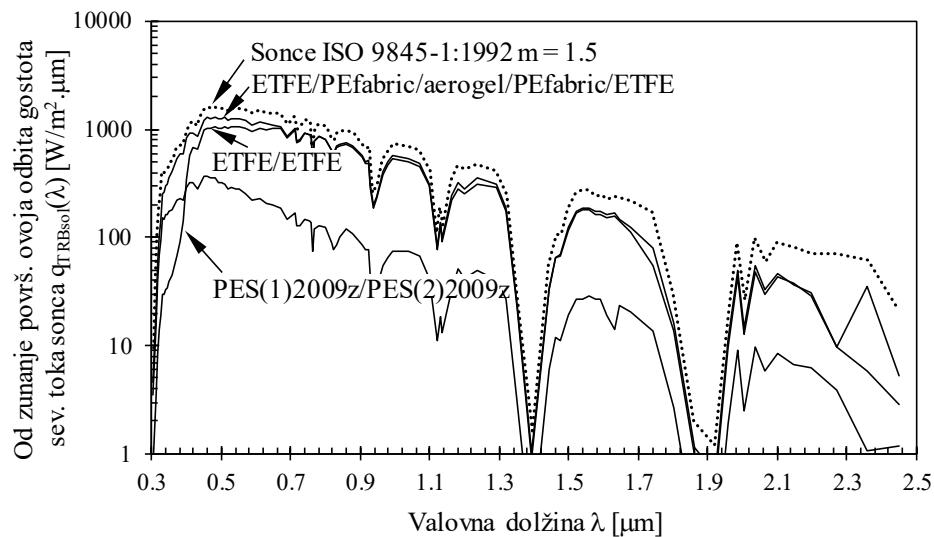
$$q_{TRWsol}(\lambda) = TRW_{sol}(\lambda) \Phi_{e,ISO9845}(\lambda) \quad (48)$$

$$q_{Asol}(\lambda) = A_{sol}(\lambda) \Phi_{e,ISO9845}(\lambda) \quad (49)$$



**Slika 3.2.3.4:** Sončni spekter  $\Phi_{e,ISO9845}$  [ $W/m^2 \cdot \mu m$ ], utežen s totalno spekralno prepustnostjo  $TT_{sol}(\lambda)$  [-] za vzorce PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/ PEfabric/ETFE

**Figure 3.2.3.4:** Solar spectrum  $\Phi_{e,ISO9845}$  [ $W/m^2 \cdot \mu m$ ] weighted by total spectral transmittance  $TT_{sol}(\lambda)$  of samples PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE



**Slika 3.2.3.5:** Sončni spekter  $\Phi_{e,ISO9845}$  [ $W/m^2 \cdot \mu m$ ], utežen s totalno spekralno odbojnostjo na črni podlagi  $TRB_{sol}(\lambda)$  [-] za vzorce PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE

**Figure 3.2.3.5:** Solar spectrum  $\Phi_{e,ISO9845}$  [ $W/m^2 \cdot \mu m$ ] weighted by total spectral reflectance on black background  $TRB_{sol}(\lambda)$  [-] of samples PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE

V preglednici 3.2.3.5 so podane vrednosti skozi konstrukcijski sklop prepuščene, od njega odbite ali v njem absorbirane energije ob prehodu sončnega sevanja in vpadnem kotu v skladu z metodologijo meritev optičnih lastnosti z celotno, UV; VIS in NIR območje sončnega spektra med 300 in 2500 nm. Integral spekralne porazdelitve gostote toka uporabljenega sončnega spektra  $\Phi_{e,ISO9845}$  med 300 in 2500

nm znaša  $1000 \text{ W/m}^2$ , na posamezna območja UV, VIS in NIR pa odpadejo deleži energije 3 % (UV), 55 % (VIS) in 42 % (NIR).

**Preglednica 3.2.3.5:** Gostota prepuščenega ( $q_{TTsol}$ ), odbitega ( $q_{TRBsol}$  in  $q_{TRWsol}$ ) in absorbiranega ( $q_{Asol}$ ) sevalnega toka sonca [ $\text{W/m}^2$ ] na celotnem sončnem spektru (od 300 nm do 2500 nm), na valovnem območju ultravijoličnega sevanja (UV), na valovnem območju vidne svetlobe (VIS) in valovnem območju kratkovalovnega infrardečega sevanja (NIR) za vzorce dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE

**Table 3.2.3.5:** Radiative flux density [ $\text{W/m}^2$ ] of solar radiation transmitted ( $q_{TTsol}$ ), reflected ( $q_{TRBsol}$  and  $q_{TRWsol}$ ) or absorbed ( $q_{Asol}$ ) by the double membrane envelope samples PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE in full solar spectrum (from 300 nm to 2500 nm), in the ranges of ultraviolet (UV), visible (VIS) and infrared (NIR) radiation

Vzorec	$q_{TTsol}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRBsol}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRWsol}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{Asol}$ [ $\text{W/m}^2$ ]		
PES(1)2009z/PES(2)2009z	23	666	671	311		
ETFE/ETFE	810	151	781	39		
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	42	730	742	228		
Vzorec	$q_{TTsol,UV}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TTsol,VIS}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TTsol,NIR}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRBsol,UV}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRBsol,VIS}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRBsol,NIR}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
PES(1)2009z/PES(2)2009z	0	9	14	3	367	295
ETFE/ETFE	18	431	361	11	98	42
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	0	22	20	22	433	274
Vzorec	$q_{Asol,UV}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{Asol,VIS}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{Asol,NIR}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRWsol,UV}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRWsol,VIS}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$q_{TRWsol,NIR}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
PES(1)2009z/PES(2)2009z	27	174	111	3	370	297
ETFE/ETFE	2	21	16	14	439	328
ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE	8	94	126	22	441	279

Rezultati v **preglednici 3.2.3.5** pokažejo, da se razmerja prepuščene energije med posameznimi območji UV, VIS in NIR za različice konstrukcijske sklope razlikujejo in da se ob uporabi na novo predlagane različic konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE močno poveča delež energije v vidnem delu sončnega spektra ( $q_{TTsol,VIS}$ ), iz 39 % na 52 %, skoraj na delež VIS osnovnega sončnega spektra. Poleg količine prepuščene energije se poveča tudi količina odbite energije v UV- in VIS-območju, kar pokažejo vrednosti  $q_{TRBsol,UV}$ ,  $q_{TRBsol,VIS}$ . V območju NIR pa količina odbite energije  $q_{TRBsol,NIR}$  upade, kar posledično pomeni, da se poveča količina absorbirane energije ( $q_{Asol,NIR}$ ) v območju NIR. Povečanje absorbiranega energijskega toka v območju NIR ( $q_{Asol,NIR}$ ) za primer ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE glede na primer PES(1)2009z/PES(2)2009z je manjše kakor je povečanje odbite energije v VIS območju ( $q_{TRBsol,VIS}$ ), na podlagi česar lahko domnevamo, da je v celoti kombinacija optičnih lastnosti ugodna. Zvišanje stopnje in podaljšanje časa pregrevanja analizirane ŠDB pa je bilo pričakovano, saj se z uporabo folije ETFE v kombinaciji s toplotnoizolacijsko odejo Spaceloft® poviša tako količino prepuščene sončne energije, kakor zmanjšajo transmisijiske toplotne izgube skozi dvojni membranski ovoj.

**Preglednica 3.2.3.6:** Razpoložljiva sončna energija [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ] po mesecih izračunana iz osončenosti horizontalne zunanje površine upoštevajoč letne vremenske podatke za Ljubljano [164] ( $Q_{\text{sol,mo}}$ ) ter s totalno prepustnostjo za sončni spekter med 300 nm in 2500 nm ( $TT_{\text{sol}}$ ) konstrukcijskih sklopov PES(1)2009z/PES(2)2009z ( $Q_{\text{sg,mo}}^a$ ), ETFE/ETFE ( $Q_{\text{sg,mo}}^b$ ) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ( $Q_{\text{sg,mo}}^c$ ) utežene vrednosti

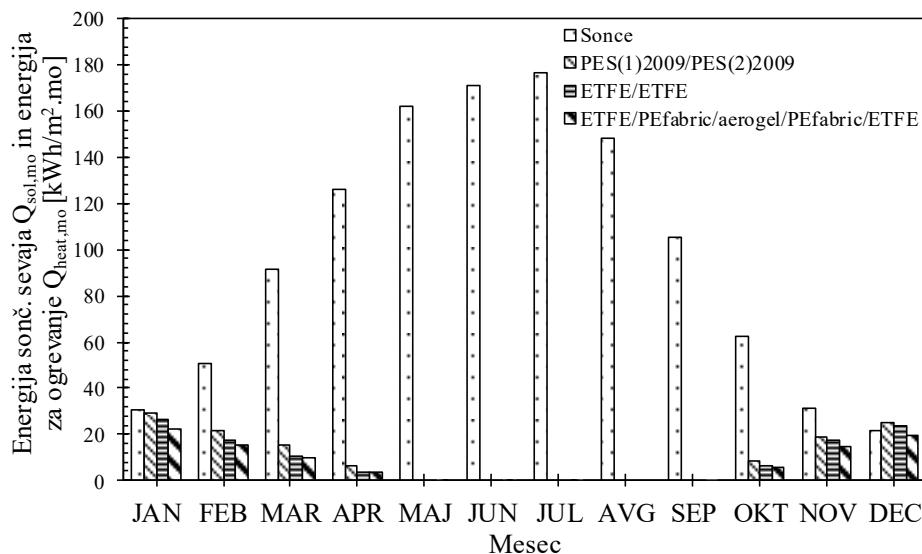
**Table 3.2.3.6:** The available solar energy [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ] by months calculated from outdoor horizontal surface irradiance considering the yearly weather data for Ljubljana [164] ( $Q_{\text{sol,mo}}$ ) and its values weighted by the total solar transmittance ( $TT_{\text{sol}}$ ) of the double membrane envelope constructional complex variants PES(1)2009z/PES(2)2009z ( $Q_{\text{sg,mo}}^a$ ), ETFE/ETFE ( $Q_{\text{sg,mo}}^b$ ) and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ( $Q_{\text{sg,mo}}^c$ )

	Horizontalna zunanja površina	Primer konstrukcijskega sklopa (preglednica 3.2.3.2)		
		Primer a	Primer b	Primer c
Mesec	$Q_{\text{sol,mo}}$	$Q_{\text{sg,mo}}^a$	$Q_{\text{sg,mo}}^b$	$Q_{\text{sg,mo}}^c$
	[ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ]	[ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ]	[ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ]	[ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ]
JAN	30,5	0,7	24,7	1,3
FEB	51,0	1,2	41,3	2,1
MAR	91,4	2,1	74,1	3,8
APR	125,9	2,9	102,0	5,3
MAJ	162,0	3,7	131,2	6,8
JUN	171,4	3,9	138,8	7,2
JUL	176,3	4,1	142,8	7,4
AVG	148,1	3,4	119,9	6,2
SEP	105,1	2,4	85,1	4,4
OKT	62,5	1,4	50,6	2,6
NOV	31,0	0,7	25,1	1,3
DEC	21,6	0,5	17,5	0,9
LETO	1176,7	27,1	953,1	49,4

V **preglednici 3.2.3.6** so poleg letne podane še mesečne vrednosti potencialnih sončnih dobitkov  $Q_{\text{sg,mo}}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ], pri čemer je upoštevana le horizontalna površina. Za izračun so bili uporabljeni vremenski podatki za Ljubljano [164], uporabljeni pa sta bili enačbi (50) (za  $Q_{\text{sol,mo}}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ]) in (51) (za  $Q_{\text{sg,mo}}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{mo}$ ]), kjer  $I_{o,\text{glob}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] pomeni globalno osončenost zunanje horizontalne površine,  $\Delta t$  časovni interval dolžine 1 h in  $TT_{\text{sol}}$  totalno prepustnost ovoja za sončno sevanje (poglavlje 3.1.1). Vrednosti v **preglednici 3.2.3.6** še niso pomnožene z absorptivnostjo notranjih površin, saj je bil namen pokazati razlike med primeri konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009/PES(2)2009 (Primer a), ETFE/ETFE (Primer b) in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (Primer c).

$$Q_{\text{sol,mo}} = I_{o,\text{glob}} \Delta t \quad (50)$$

$$Q_{\text{sg,mo}} = TT_{\text{sol}} Q_{\text{sol,mo}} \quad (51)$$



**Slika 3.2.3.6:** Mesečna količina sončnega sevanja na zunanji horizontalni površini  $Q_{sol,mo}$  [kWh/m<sup>2</sup>.mo] in mesečna energija, potrebna za ogrevanje ŠDB  $Q_{heat,mo}$  [kWh/m<sup>2</sup>.mo], izračunana s programom EnergyPlus za obravnavane različice konstrukcijskega sklopa njenega dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE

**Figure 3.2.3.6:** Monthly amount of solar energy incident on outdoor horizontal surface  $Q_{sol,mo}$  [kWh/m<sup>2</sup>.mo] and monthly energy demand for heating of the air-supported dome at Brezovica  $Q_{heat,mo}$  [kWh/m<sup>2</sup>.mo] calculated with EnergyPlus software considering the three studied double membrane envelope constructional complexes PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE and ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE

Primerjava vrednosti mesečne energije, potrebne za ogrevanje ŠDB,  $Q_{heat,mo}$  [kWh/m<sup>2</sup>.mo] ter količine na zunanjou horizontalno površino vpadne sončne energije v posameznem mesecu  $Q_{sol,mo}$  [kWh/m<sup>2</sup>.mo] (slika 3.2.3.6) pokaže, da je v času ogrevalne sezone (obdobje od 1. oktobra do 30. aprila (naslednje leto)) kljub idealiziranemu primeru vse mesece razen decembra (primer a in primer b) na voljo več sončne energije, kot bi je v ŠDB dejansko potrebovali za ogrevanje.

## 4 RAZPRAVA

Rezultati raziskave optičnih in topotnih lastnosti obravnavanih vzorcev materialov in primerov konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja so pokazali, da je mogoče sestaviti topotno izoliran konstrukcijski sklop, v našem primeru z uvedeno aerogelno izolacijsko odejo Spaceloft® debeline 10 mm, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, ki ima celo večjo totalno prepustnost za dnevno svetlubo  $TT_{vis}$ , hkrati pa je ta tudi bistveno bolj topotno izolativen kot izhodiščni konstrukcijski sklop PES(1)2009z/PES(2)2009z dvojnega membranskega ovoja obstoječe ŠDB. Učinek uporabe konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE na dnevno osvetljenost, topotno ugodje uporabnika in energetsko učinkovitost vzorčne stavbe ŠDB je bilo glede na omejeno dostopnost do materiala in stroškov prototipne izvedbe mogoče opredeliti le s pomočjo računskih in simulacijskih metod, pri uporabi katerih pa je treba sprejeti tudi njihove omejitve. Poleg tega je bilo treba zagotoviti vse potrebne vhodne podatke (podnebne razmere, lastnosti materialov, geometrija stavbe in ovoja), opravljene pa so bile tudi terenske meritve okoljskih parametrov na obstoječi stavbi ŠDB. Tako pridobljeni rezultati so bili uporabljeni pri primerjavi z rezultati računskega oziroma simulacijskega dela, s čimer smo ocenili njihovo ustreznost za nadaljnjo uporabo.

Pridobljeni rezultati določitve svetlobnih lastnosti pomenijo mejne vrednosti totalne prepustnosti dvoslojnih prosojnih konstrukcijskih sklopov za vidno svetlubo, saj ima uporabljena folija ETFE enakovredno  $TT_{vis}$  ( $TT_{vis} = 89\%$ ) kot 3 mm debelo čisto steklo (enoslojno  $TT_{vis} = 90\%$ , dvoslojno  $TT_{vis} = 81\%$  [48]),  $TT_{vis}$  s PVC prevlečenih tkanin PES(1)2009 in PES(2)2009 pa je tako nizka ( $TT_{vis,PES(1)2009z} = 4,1\%$ ,  $TT_{vis,PES(2)2009z} = 8,9\%$ ), da konstrukcijski sklop PES(1)2009z/PES(2)2009z ( $TT_{vis} = 1,4\%$ ) ne zagotavlja zadovoljive dnevne osvetljenosti igrišča na standardno oblačen dan (priporočene vrednosti v [110]). Izmerjene vrednosti  $TT_{vis}$  s PVC prevlečenih poliestrskih tkanin in folije ETFE sovpadajo z vrednostmi, ki so jih pred tem pridobili drugi avtorji [32] [22], medtem ko je izmerjena vrednost  $TT_{vis}$  z aerogelno odejo Spaceloft® izolirane različice sklopa ETFE/ETFE, ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, tehnološka novost na področju membranske arhitekture, ne pa tudi konceptualne [42] [43]. Kot je bilo že omenjeno, predstavljena rešitev konstrukcijskega sklopa vključuje 10 mm debel sloj aerogelne izolacijske odeje Spaceloft®, v raziskovalnem delu pa je bilo s pomočjo Beerovega zakona pokazano, da že enkrat debelejši sloj (20 mm) ne bi prepustil tako rekoč nič svetlobe ( $TT_{vis} = 0,16\%$ ). Pri debelini 13,2 mm bi se  $TT_{vis}$  aerogelne izolacijske odeje ( $TT_{vis} = 4,0\%$ ) izenačila s  $TT_{vis}$  izhodiščne različice dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z ( $TT_{vis} = 1,4\%$ ). Pomembno je še poudariti, da so vsi materiali in sklopi razen prozorne folije ETFE in prozornega sklopa ETFE/ETFE prosojni in imajo visoko motnost. Ravno zaradi te lastnosti pa je bila uporaba programa DAYSIM omejena na enoslojni geometrijski model ovoja vzorčne stavbe ŠDB, saj program RADIANCE omogoča le simulacije primerov prosojnih materialov oziroma sklopov, pri katerih sipanje svetlobe nastopi enkrat. Za določitev totalne prepustnosti  $TT_{vis}$  je bila uporabljena ustrewna metoda, da je bilo mogoče uporabiti te eksperimentalno določene lastnosti tudi v računalniškem orodju DAYSIM.

Eden osnovnih povodov za raziskavo uvedbe aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® v dvojni membranski ovoj zračno podprtih stavb so bile njene topotne lastnosti. Aerogeli so na splošno (velja tudi v našem primeru aerogelne odeje Spaceloft®) materiali, ki poleg vakuumskih topotnoizolacijskih proizvodov zagotavljajo najnižje vrednosti topotne prehodnosti oziroma U-faktorja konstrukcijskega sklopa pri najmanjši debelini. Hkrati se aerogeli uvrščajo med topotne izolacije, prepustne za sončno sevanje (»transparent insulation material«), ki so jih v 90. letih intenzivno preiskovali člani Goetzbergerjeve skupine raziskovalcev na Fraunhofer Institutu v Freiburgu [49]. Monolitni prozorni aerogel izkazuje prepustnost vidne svetlobe  $TT_{vis}$  primerljivo s čistim stekлом (npr.: od 84 % do 87 %

v primerjavi z vrednostjo 90 % za čisto steklo [47] [48]). Vendar je toplotna prevodnost ( $\lambda$  [W/m.K]) aerogela najnižja med vsemi znanimi trdnimi materiali (npr. od 0,011 W/(m.K) do 0,018 W/(m.K)) [45] [46]. Kljub izjemnim toplotnim lastnostim oken z vgrajenim aerogelom (Airglass AB na Švedskem, U faktor 0,66 W/m<sup>2</sup>.K, totalna prepustnost za sončno energijo (faktor g) 76-80 % [46]), ima monolitni aerogel nizko natezno trdnost in bi se kaj hitro zdrobil, če bi ga izpostavili mehanskim obremenitvam, ki nastajajo v zračno podprtih stavbah kot je ŠDB. V preteklih raziskavah so avtorji pokazali [50] [51] [45], da uporaba aerogelnih kroglic in zrn [51] med dvema stekloma ali plastikama lahko zagotovi bolj robustne, vendar vseeno dobro prosojne sisteme. V tem pogledu so aerogelne izolacijske odeje pomemben napredok v praktični uporabi aerogelov v zračno podprtih konstrukcijah. Odeja je sestavljena iz nanoporoznega aerogela iz silike, ki deluje kot toplotna izolacija, metilirane silike, ki povečuje hidrofobnost odeje, in poliestrskih ter steklenih vlaken, ki delujejo kot armatura. Upogljivost aerogelne odeje Spaceloft® je glavna prednost, ki omogoča uporabo Spacelofta® (toplota prevodnost  $\lambda_D$  je enaka 0,015 W/m.K) za toplotnoizolacijski sloj kompozita.

Za predstavitev toplotnih lastnosti in medsebojno primerjavo različnih konstrukcijskih sklopov strokovnjaki poleg  $T_{vis}$  in totalne prepustnosti za sončno energijo, faktor g [-], pogosto uporabljajo toplotni upor  $R$  [m<sup>2</sup>.K/W] oziroma še pogosteje toplotno prehodnost  $U$  [W/m<sup>2</sup>.K] kot ključni parameter [50] [48] [175] [176] [46], čeprav ti dve na splošno ne popišeta podrobnega toplotnega odziva konstrukcijskega sklopa in vpliva na toplotni tok skozi ovoj stavbe. Še zlasti slabo popišeta dinamične, s časom spremenljive toplotne tokove, ki pa niso značilni za tako lahke in s tem slabo toplotno akumulativne stavbe. Zaradi specifične geometrije obravnavane stavbe ŠDB je bilo treba ugotoviti še, ali je mogoče privzeti enakomerne toplotne lastnosti dvojnega membranskega ovoja po celotni strešni konstrukciji. Vzdolž nje se namreč močno spreminja njen naklon, na splošno pa je toplotna prehodnost konstrukcijskih elementov z zračnimi kanali ali žepi odvisna od njihovega naklona [162].

Na podlagi izračunov se je pokazalo, da naklon konstrukcijskega sklopa le malo vpliva na celoten toplotni upor  $R$  [m<sup>2</sup>.K/W]. Njegove vrednosti se za neizolirani različici dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z in ETFE/ETFE v odvisnosti od naklona (**preglednica 2.3.2.1**) gibljejo v območju med 1,5 in 2,0 % glede na minimalno izračunano vrednost toplotnega upora in med 0,8 in 1,1 % pri konstrukcijskem sklopu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Z eksperimentalno določenimi primeri hitrosti zraka v zračnem kanalu med membranama (v [m/s]) pa je bilo pokazano, da izmerjeno spremjanje njene vrednosti bolj vpliva na spremembo toplotnega upora kot sprememba naklona. Relativna sprememba toplotnega upora sklopa med primeri vhodnih podatkov a, b in c (**preglednica 3.2.1.1**), izračunana glede na minimalno vrednost upora, znaša pri neizoliranih različicah dvojnega membranskega ovoja PES(2)2009z/PES(2)2009z in ETFE/ETFE povprečno 6,8 % (od 6,7 % do 7,3 %) in pri izolirani različici ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE (termična emitivnost  $e_T$  zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila enaka 0,60) povprečno 2,9 % (od 2,8 % do 3,2 %), kar nakazuje ugoden vpliv in zmanjšanje odvisnosti od naklona ovoja in hitrosti zraka v kanalu. Torej v povprečju obravnavanih primerov naklona konstrukcijskega sklopa (**preglednica 2.3.2.1**) in hitrosti zraka (primeri a, b in c v **preglednici 3.2.1.1**) je toplotni upor za PES(1)2009z/PES(2)2009z in ETFE/ETFE enak 0,31 m<sup>2</sup>.K/W ter 1,02 m<sup>2</sup>.K/W za ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE pri vrednosti termične emitivnosti zunanje strani notranje membrane 0,60. Povprečna absolutna deviacija toplotnega upora  $R$  med izmerjenimi primeri hitrosti zraka a, b in c (**preglednica 3.2.1.1**) je pri neizoliranih različicah dvojnega membranskega ovoja PES(2)2009z/PES(2)2009z in ETFE/ETFE 0,009 m<sup>2</sup>.K/W oziroma 2,8 % povprečne vrednosti toplotnega upora ter v primeru izolirane različice ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE ( $e_T$  zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila enaka 0,60) 0,012 m<sup>2</sup>.K/W oziroma manj kot 1,2 %. V stacionarnem izračunu transmisijskih toplotnih izgub pa bi bil vpliv še manjši, saj stavbni ovoj sestavlja

poleg dvojnega membranskega ovoja med drugim tudi konstrukcijski sklop tal na terenu. Še več, pretok zraka v zračnem kanalu, ocenjen na podlagi izmerjenih hitrosti, je dovolj majhen ( $169 \text{ m}^3/\text{h}$ ) v primerjavi z izmenjavo zraka zaradi zagotavljanja tlačne razlike med notranjostjo in zunanjostjo ŠDB (1,6 ach oziroma  $14520 \text{ m}^3/\text{h}$ ), da je bilo mogoče zanemariti njegov vpliv na temperaturo zraka v ŠDB v nasprotju z aerogelom izoliranega zračnega solarnega kolektorja v obliki Tromb-Michellove stene, kot je na primer prikazana v raziskavi Marka Dowsona [122]. Pri tem je treba poudariti, da je zračni tlak znotraj kanala med membranama višji od tistega v dvorani, torej povratni tok iz dvorane v zračni kanal brez dodatnega mehanskega dovajanja ni mogoč. Posledično je bilo za namen simulacije temperature zraka v ŠDB in izračune energije, potrebne za ogrevanje, predpostavljeno, da je zračni kanal zaprt, morebitna izmenjava zraka z notranjostjo ŠDB pa zanemarjena. Z vidika varovanja zdravja uporabnika [177] bi bilo ob dejanski uporabi konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE kljub temu, da je aerogelna izolacijska odeja Spaceloft® vstavljena med dve zaščitni plasti PEfabric, priporočljivo, da je zaradi morebitnega odnašanja aerogelne hidrofobnega prahu s površine kompozita PEfabric/aerogel/PEfabric v notranjost dvorane z zračnim tokom zračni kanal zaprt.

Ni še dolgo tega, ko sta bila na trgu dostopna dva tipa komercialnih sistemov dnevnega osvetljevanja, zasnovana na aerogelih, Okagel® in Scoba-lit [41]. Toplotna prevodnost aerogela, uporabljenega pri teh zasteklitvah, je enaka  $0,018 \text{ W/m.K}$ , izdelovalec oken pa ponuja svetlobnike s topotno prehodnostjo med  $0,60 \text{ W/m}^2\text{.K}$  in  $0,3 \text{ W/m}^2\text{.K}$  za  $30 \text{ mm}$  in  $60 \text{ mm}$  debela sloja Okagel®. Prepustnost za vidno svetlobo je bila  $0,40$  in zmanjšanje zaščite pred hrupom za  $52 \text{ dB}$ . Za primer Okagela izdelovalec Okalux podaja tudi podatke o odvisnosti topote prehodnosti z aerogelom izolirane zasteklitve [176], ki kažejo, da v nasprotju s klasično dvojno zasteklitvijo z zračnim kanalom med notranjo in zunanjim šipo naklon ne vpliva. Če bi topotno prehodnost omenjenih dveh debelin zasteklitve Okagel® pretvorili v topotni upor, bi dobili vrednosti  $1,67 \text{ m}^2\text{.K/W}$  za  $30 \text{ mm}$  debelo različico in  $3,33 \text{ m}^2\text{.K/W}$  za  $60 \text{ mm}$  debelo plast. Tak rezultat je pričakovani, saj kljub nekoliko višji topotni prevodnosti aerogela njegova debelina zadostuje.

Pri zasteklitvah z uvedenim aerogelom je treba omeniti tudi ameriško podjetje Kalwall, ki prav tako ponuja fasadne in strešne sisteme zasteklitev z uvedenim aerogelom, katerih topotna prehodnost se giblje med  $0,28 \text{ W/m}^2\text{.K}$  in  $3,01 \text{ W/m}^2\text{.K}$  [178]. Zanimivo je, da se totalna prepustnost za dnevno svetlobo (ASTM E-972) teh zasteklitev giblje od le 3 % do maksimalno 53 %, pri čemer se njihov faktor g spreminja med 0,10 ter 0,68. Hkrati, pa proizvajalec navaja, da za večino aplikacij ne priporočajo zasteklitev z več kot 30-odstotno prepustnostjo za dnevno svetlobo. Z obravnavano različico dvojnega membranskega ovoja z uvedenim aerogelom ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE najbolj primerljiva varianta zasteklitve Kalwall ima topotno prehodnost  $1,02 \text{ W/m}^2\text{.K}$ , prepustnost za vidno svetlobo 5 % in totalno prepustnost sončne energije 0,11. Izmed teh treh podatkov najbolj odstopa prav zadnji, saj je faktor g sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE enak 0,23 in tako 2,1-krat višji od izpostavljene Kalwallove zasteklitve. Hkrati je faktor g obstoječega ovoja ŠDB (PES(1)2009z/PES(2)2009z) enak 0,11, kar pomeni, da ta ni osamljen primer in je za konstrukcije z velikim deležem prosojnih površin zunanjega ovoja stavbe treba ustrezno (lokacija, podnebje) izbrati optične in topotne lastnosti tako, da bi čim bolj smotorno omejili možnost pregrevanja stavbe. Za izračun faktorja g je treba imeti tako podatke o topotnih lastnostih materialov, ki sestavljajo sklop, kot tudi spektra totalne prepustnosti za sončno sevanje  $TT_{sol}(\lambda)$  in absorptivnosti  $A_{sol}(\lambda)$  zunanje in notranje plasti dvojnega ovoja z zračnim kanalom.

Eksperimentalno določene vrednosti totalne prepustnosti za sončni spekter sevanja  $TT_{sol}$  vseh treh vzorcev konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z, ETFE/ETFE in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE so bile za 64,3 %, 1,5 % ter 13,5 % višje od

njihovih totalnih prepustnosti za vidno svetlobo  $TT_{vis}$ . V primerjavi z obstoječo različico sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z je  $TT_{vis}$  sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE višja, hkrati pa je razmerje med  $TT_{sol}$  in  $TT_{vis}$  manjše in ugodnejše, saj za enako količino prepuščene svetlobe spustimo v stavbo relativno manj sevanja v preostalih dveh valovnih območjih (UV in NIR). Podrobnejša analiza optičnih lastnosti, kot so totalna prepustnost, totalna odbojnost na črni in beli podlagi in absorptivnost, na valovnih območjih UV-, VIS- in NIR-sevanja je pokazala, da je sklop PES(1)2009z/PES(2)2009z topel na UV-območju in hladen na območjih VIS in NIR, sklop ETFE/ETFE pa na celotnem sončnem spektru hladen. Sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je hladnejši od sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z na valovnih območjih UV- in VIS-svetlob, na območju NIR-svetlobe pa je nekoliko toplejši. Upoštevajoč celoten spekter je sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE hladnejši kot PES(1)2009z/PES(2)2009z in toplejši kot sklop ETFE/ETFE. Torej je mogoče pričakovati, da se na novo predlagana različica dvojnega membranskega ovoja pod vplivom sonca manj segreje kot izhodiščna različica, kar ugodno vpliva na potencialno pregrevanje stavbe.

Kot so pokazale terenske meritve, začne temperatura zraka ob notranji površini zunanje membrane  $T_{a,k,h,o}$  hitreje naraščati kot temperatura zunanjega zraka  $T_{a,o}$  takoj, ko nanjo posije (direktno) sonce (pod dovolj majhnim vpadnim kotom) in doseže celo dobrej 14 °C (v povprečju meritev 14,2 °C) višje vrednosti kot temperatura zraka zunaj stavbe in 13 °C (v povprečju meritev 13,5 °C) kot temperatura zraka v stavbi. Čeprav maksimalna razlika med temperaturo zraka ob zunanji stranici notranje membrane  $T_{a,k,h,i}$  in temperaturo zraka v stavbi  $T_{a,h,i}$  časovno ne sovpada z maksimumom razlike med  $T_{a,k,h,o}$  in  $T_{a,h,i}$ , tudi ta v času, ko je obsijana s soncem, zavzame kar visoko vrednost, 9,6 °C. Torej s soncem obsijana in pregeta membrana deluje kot vir toplotne energije in kot pokaže preprost izračun (52) v primerih sklopa, PES(1)2009z/PES(2)2009z in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, močnejši vir toplotne energije kot skozi ovoj prepuščeno sončno sevanje. Za primer obstoječega ovoja ŠDB:

$$\begin{aligned} I_{dir,n} \times TT_{sol} &= 1367 \frac{W}{m^2} \times 0,023 \frac{W}{m^2} = 31,4 \frac{W}{m^2} < \\ &< \frac{1}{R_{si}} \times \Delta T = 11,26 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 13,5 K = 152 \frac{W}{m^2} \end{aligned} \quad (52)$$

Tudi pri izračunu faktorja  $g$  se za ta dva primera konstrukcijskega sklopa izkaže, da je člen  $q_i$  v enačbi (38) večji od  $TT_{sol}$ . Ti rezultati lahko deloma pojasnijo relativno majhno razliko med izmerjenima temperaturama zraka v stavbi in zunaj nje, ki se je gibala med -2,6 °C in 1,8 °C. Sicer je bila izmenjava zraka med notranjostjo in zunanjim okoljem stavbe ŠDB visoka (1,6 ach) vendar je bila totalna prepustnost za sončno sevanje očitno dovolj nizka ( $g = 0,11$ ), da se objekt ni bolj pregrel. To domnevno potrjuje rezultat ocene pregrevanja ŠDB s programom EnergyPlus za primer sklopa ETFE/ETFE, saj kljub temu, da je vzorec hladnejši glede na optične lastnosti v primerjavi s sklopom PES(1)2009z/PES(2)2009z, število ur, ko je temperatura zraka v stavbi  $T_{a,i}$  višja od 26°C pri enaki stopnji izmenjave zraka z okolico (1,6 ach), močno naraste. Tako je mogoče sklepati, da pri sklopu ETFE/ETFE  $TT_{sol}$  bistveno in odločilno vpliva na količino solarnih energijskih dobitkov in s tem na pregrevanje stavbe. Ta rezultat se sklada tudi z dejstvom, da v danem primeru  $TT_{sol}$  bolj vpliva na vrednost faktorja  $g$  kot  $q_i$  ( $TT_{sol} = 0,81$ ,  $q_i = 0,02$ ), kar je ravno nasprotno kot v drugih obravnavanih dveh primerih dvojnega membranskega sklopa.

Pomembno je tudi poudariti, da so bili rezultati meritev pridobljeni poleti, ko je temperatura zunanjega zraka v celotnem obdobju meritev dosegala ekstremne vrednosti v primerjavi z dolgoletnim povprečjem maksimalnih dnevnih temperatur v obdobju med letoma 1981 in 2010 [179]. Povprečna izmerjena

maksimalna temperatura zraka v okolici ŠDB je bila 34,7 °C, njena maksimalna izmerjena vrednost pa je dosegla celo 42,9 °C. Povprečni maksimum za obdobje med letoma 1981 in 2010 za julij znaša 27,3 °C, za avgust pa 26,7°C [179], kar je za julij 7,4 °C za avgust pa 8,0 °C pod izmerjeno vrednostjo. Izračunana povprečna dnevna temperatura iz vrednosti kontinuiranih meritev znaša 24,9 °C, povprečni mesečni temperaturi za julij in avgust, ki ju podaja Agencija za okolje in prostor [179], pa 21,3 °C in 20,6 °C. Tako razlika za avgust znaša kar 4,3 °C. Na podlagi podatkov za obdobje med letoma 1996 in 2005 [164] je povprečna dnevna temperatura za julij in avgust 2,6 °C in 2,5 °C pod izračunano vrednostjo 24,9 °C.

Nasprotno pa se je v času terenskih meritev temperature zraka ob površinah membran v kanalu pokazalo naslednje. Temperatura zraka v zračnem kanalu ob zunanjji stranici dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z je bila po 14. uri nižja ne le od temperature ob notranji stranici (maksimalno 8,0 °C) zračnega kanala in temperature zraka v stavbi (maksimalno 6,1 °C), ampak tudi od temperature zraka zunaj stavbe (maksimalno 14,2 °C). To sovpada tudi s solarno geometrijo in orientacijo študijskega primera stavbe ŠDB, saj po tem času ni bilo več direktnega sončnega sevanja na mestu meritev na JJV stranici stavbe. Videti je tudi, da se notranja membrana izpostavljena notranjemu zraku v stavbi, ki ima zelo podobno temperaturo kot zrak zunaj stavbe, bistveno počasneje ohlaja kot zunanjega membrana (notranja pa ne more služiti kot ponor toplove). Na podlagi tega je mogoče sklepati, da je neto sevalni topotni tok (valovno območje med 2,5 μm in 25 μm) med zunanjim površino membrane PES(1)2009z in nebom (atmosfero in črnim ozadjem ozziroma okolico) večji kot dobitki energije zaradi absorpcije (difuznega) sončnega sevanja (valovno območje med 0,3 μm in 2,5 μm). Z drugimi besedami, hlajenje s sevanjem na valovnem območju nizkotemperturnega IR-sevanja je intenzivnejše kot segrevanje zaradi absorpcije sevanja na valovnem območju sončnega spektra. V raziskavi je bilo s pomočjo Planckovega zakona tudi pokazano, da temperatura površine ( $T_{s,o} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}, 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ in } 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) vzorcev PES(1)2009, PES(2)2009, ETFE in PEfabric na valovnem območju od 2,5 μm do 16 μm ne vpliva bistveno na emitivnost površin materialov, ki so izpostavljene okoliškemu zraku. Ikrati so rezultati pokazali, da so emitivnosti materialov PES(1), ETFE in aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® zelo podobne, zato lahko trdimo, da vsi trije enako dobro izmenjujejo topoto z okoliškimi površinami z dolgovalovnim IR-sevanjem.

Obravnava prepustnosti za dolgovalovno infrardeče sevanje različnih plastičnih folij, čeprav nizka (razred nekaj odstotkov, kot je pričakovano za PES(1), ETFE in Spaceloft®), ni nepotrebna [28], vendar je v danem primeru zaradi zahtevnosti obravnave presegala predvideni obseg dela. Posledično je bilo tudi pri simulaciji temperature znotraj obstoječe ŠDB z ovojem, sestavljenim iz PES(1)2009z in PES(2)2009Z, in izračunih rabe energije za ogrevanje in hlajenje dodatno topotno izolirane ŠDB (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) s programom EnergyPlus predpostavljenlo, da je zunanjji prosojni ovoj neprepusten za nizko temperaturno infrardeče sevanje na valovnem območju od 2,5 μm do 25 μm.

Izkazalo se je, da pri simulaciji topotnega odziva in rabi energije za ogrevanje ozziroma hlajenje ni problematična le natančna specifikacija tehničnih lastnosti prosojnega elementa stavbnega ovoja na podlagi analiz občutljivosti, kot navajajo Wong, Eames in Perera [47], ampak so problematične tudi omejitve uporabe simulacijskih orodij. Kot je bilo že omenjeno, je bila povprečna absolutna deviacija razlike v  $T_{a,i}$  med eksperimentom in simulacijo enaka 1,2 °C, kar je več, kot je bila pričakovana napaka merilne opreme, in bistveno več od same resolucije meritve, njene vrednosti pa so se gibale v območju med -6,2 in 2,0 °C, čeprav so bili rezultati simulacije temperature v stavbi glede na rezultate raziskave topotnega odziva testne sobe z dvojno zastekljenim škatlastim oknom z uporabo programa EnergyPlus

[156] v okviru mogočih in pričakovanih odstopanj. V nadaljevanju dela je bil pridobljen tudi podatek o porabi zemeljskega plina za ogrevanje ŠDB sorodne športne dvorane v Novem mestu, v kateri so teniška igrišča. Podatki o stavbi v Novem mestu in njenem obratovanju so podani v **preglednici 4.A.1**. Rezultat izračuna energije, potrebne za ogrevanje ŠDB z obstoječo različico dvojnega membranskega ovoja PES(1)2009/PES(2)2009 s programom EnergyPlus ter pretvorbe v porabo zemeljskega plina (**preglednica 4.A.2**), ob upoštevanju želene temperature zraka v stavbi  $T_{a,i}$  15 °C v urniku obratovanja stavbe v Novem mestu, pokaže sicer večjo porabo zemeljskega plina za ogrevanje (približno 5000-6000 m<sup>3</sup>), vendar istega velikostnega razreda. Skrajšanje kurilne sezone na obdobje od novembra do marca bi prihranilo približno 1300 m<sup>3</sup> zemeljskega plina, kar je še vedno manj, kot znaša razlika med poročano porabo energenta za ogrevanje in izračunano vrednostjo. Poudariti je treba, da je pričakovanje o enaki porabi energije neupravičeno, saj se med primeroma stavb razlikujejo tudi okolica stavbe, oblika stavbe, stopnja izmenjave zraka, regulacija sistema ogrevanja in na koncu tudi mikroklima.

Rezultati izračuna energije ( $e_T$  zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE enaka je bila enaka 0,96), potrebne za ogrevanje ŠDB, so pokazali prednost uporabe prosojne topotne izolacije, kot je na primer obravnavana aerogelna izolacijska odeja Spaceloft®, saj naj bi ta zagotovila poleg ustrezne *dnevne osvetljenosti igrišča tudi večji prihranek energije za ogrevanje* (48,3 kWh/m<sup>2</sup>.a oziroma 22 %) kot jo zagotavlja celo 4-kratna debelina neprosojne izolacije z enakimi topotnimi karakteristikami (30,3 kWh/m<sup>2</sup>.a oziroma 15 %). Poleg tega se med ogrevalno sezono za športne dejavnosti s stopnjo aktivnosti, nižjo od 3,5 MET, izboljša tudi topotno ugodje uporabnikov in s tem tudi klasifikacija stavbe v skladu z mednarodnim standardom SIST EN 15251:2007. *Posledično je, upoštevajoč sezonsko rabo zračno podprtih stavb v danih podnebnih razmerah, uporaba prosojne topotne izolacije evidentno bolj smotrna in ekonomična kot uporaba neprosojne topotne izolacije, predlagana rešitev konstrukcijskega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE pa večplasten pasiven ukrep za zagotavljanje energetske učinkovitosti topotno in vizualno udobnih zračno podprtih stavb.* Preprosta ocena povratne dobe stroška aerogelne topotne izolacijske odeje (**preglednica 4.B.1**) v odvisnosti od njene cene in cene energenta za ogrevanje pokaže tudi, da s programom EnergyPlus izračunani prihranek energije za ogrevanje ni zanemarljiv. V večini izbranih primerov (35 od 60) cene obravnavanega topotnoizolacijskega proizvoda (od 5 EUR/m<sup>2</sup> do 50 EUR/m<sup>2</sup>) in cene energenta (od 0.03 EUR/kWh do 0.18 EUR/kWh) je povratna doba stroška prosojneg topotnoizolacijskega proizvoda (v povprečju 11,6 leta) krajša ali enako dolga kot minimalna pričakovana življenska doba (10 let) poliestrskih tkanin, prevlečenih s PVC-jem [22], in bistveno krajša (55 primerov od 60) od maksimalne pričakovane življenske dobe folije ETFE 25 let [22].

Aerogelno izolacijsko odejo Spaceloft® bi lahko umestili med kvazihomogene [47] transparentne izolacije, od preostalih splošno znanih oziroma transparentnih topotnih izolacij, ki jih omenja/primerja Wong [47], pa se razlikuje predvsem po tem, da je prosojna in ne prozorna (ima visoko stopnjo motnosti,  $H > 99\%$ ) ter da ima veliko nižjo prepustnost  $TT_{sol}$  (4,2 %, pri vpadnem kotu 0° pa več kot 90 % [47]). Kot je bilo že omenjeno za stavbe z velikim deležem za sončno sevanje prepustnega ovoja, je to lahko tudi zaželeno. Wong, Eames in Perera [47] so za primer stavbe v kraju Salzgitter v Nemčiji ocenili povratno dobo investicije v TIM na podlagi rezultatov raziskovalnega projekta številka 20 v okviru raziskovalnega programa na temo solarnega ogrevanja in hlajenja mednarodne agencije za energijo IEA (»International Energy Agency«) [47]. Pokazali so, da bi se začetna investicija vključujoč stroške vzdrževanja povrnila v nekaj manj kot osmih letih obratovanja, če bi privzeli prihranek energije 72 kWh/m<sup>2</sup>.a in strošek energije 0.03 EUR/kWh. Treba je opozoriti tudi na računski rezultat Marka Dowsona [122], ki je v svoji doktorski disertaciji na primeru stanovanjske hiše, katere del zunanje stene deluje kot zračni kolektor (v obliki Tromb-Michellove stene), izoliran z monolitno aerogelno topotno izolacijo, pokazal, da uporaba s prosojnim aerogelom izolirane šipe kolektorja prihrani 26 % energije,

potrebne za ogrevanje, medtem ko energijo za hlajenje v juliju in avgustu bistveno poveča. Povratna doba investicije v sistem solarnega kolektorja, izoliranega z aerogelom, je bila ocenjena na 17 let, pri čemer je bil prihranek energije enak 206 kWh/m<sup>2</sup>.a, cena energenta približno 0.046 EUR/kWh, diskontna stopnja pa 2-odstotna. Čeprav se tipologija, materiali in vzorec uporabe stavbe ŠDB bistveno razlikujejo od omenjenih primerov obravnave TIM-materialov v predhodnih raziskavah, so jim rezultati dela te disertacije podobni in v okviru mogočih pričakovanj. Pri izračunu povratne dobe ni bil upoštevan strošek povečanja količine energije, potrebne za morebitno hlajenje stavbe, saj se obravnavana stavba v poletnih mesecih ne uporablja in nima sistema za hlajenje. Sicer pa je povečano pregrevanje stavb in drugih stavbnih elementov pri uporabi prosojnega stavbnega ovoja, izoliranega s TIM-materiali pričakovano in tudi poudarjeno kot ena poglavitnih ovir pri širšem razvoju in uporabe TIM-materialov [47].

## 5 SKLEPI

Pri predstavljenem raziskovalnem delu so bile raziskane optične (totalna prepustnost vidne svetlobe; totalna odbojnost vidne svetlobe; motnost; totalna prepustnost, totalna odbojnost za belo in črno ozadje ter absorptivnost sončnega sevanja) in toplotne (emitivnost dolgovalovnega infrardečega sevanja, toplotni upor, totalna prepustnost za sončno energijo) lastnosti obstoječega dvojnega membranskega ovoja stavbe ŠDB, PES(1)2009z/PES(2)2009z. Na novo je bila zasnovana inovativna izolirana različica konstrukcijskega sklopa ETFE/ETFE. Zanjo je bil teoretično in eksperimentalno ocenjen učinek uvedbe aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® na dnevno osvetljenost, toplotno ugodje in rabo energije za ogrevanje oziroma hlajenje vzorčne ZPS.

Rezultati spektroskopije so razkrili, da imata in situ odvzeta vzorca tkanin PES(1)2009 in PES(2)2009, ki sestavlja konstrukcijski sklop obstoječe stavbe ŠDB, nizko prepustnost za vidno svetlogo  $TT_{vis}$  (4,0 % in 8,8 %). Nižjo prepustnost ima pričakovano debelejši vzorec (PES(1)2009), odbojnost  $TR_{vis}$  pa je za stranici, obrnjeni v notranjost zračnega kanala (PES(1)2009n in PES(2)2009z), zelo podobna (87,1 % in 88,0 %). Zunanja stranica zunanje membrane PES(1)2009z in notranja stranica notranje membrane sta bili opazno onesnaženi, odbojnosti pa enaki 66,5 % in 78,3 %. Izkaže se, da je prepustnost  $TT_{vis}$  sklopa, sestavljenega iz očiščenega vzorca zunanje membrane in notranje membrane PES(1)2009z, očiščen/PES(2)2009, enaka 2,3 % in je višja (64 %) kot za sklop PES(1)2009z/PES(2)2009z, za katerega je  $TT_{vis}$  enaka 1,4 %. Analiza sončnih optičnih lastnosti ( $TT_{sol}$ ,  $TRB_{sol}$ ,  $TRW_{sol}$  in  $A_{sol}$ ) na valovnih območjih UV-, VIS- in NIR-sevanja sončnega spektra pokaže, da je obstoječi konstrukcijski sklop topel na UV-območju in hladen na VIS- in NIR-območjih.

Na podlagi spektra odbojnosti v območju dolgovalovnega IR-sevanja je bila s pomočjo Planckovega zakona določena emitivnost  $e_T$  s PVC in PVDF prevlečene poliestrske tkanine, ki je v celotnem območju pričakovanih temperatur stavbnega ovoja enaka in ima vrednost 0,96. To je posledica dobre absorpcije IR-sevanja, rezultat pa je bil uporabljen tudi kot vhodni podatek za izračun toplotnega upora dvojnega zračno podprtga membranskega ovoja. Toplotni upor R konstrukcijskega sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z je v povprečju obravnavanih primerov naklona konstrukcijskega sklopa in hitrosti zraka v kanalu enak  $0,31 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Slabo polovico njegove vrednosti pomeni toplotni upor zračnega kanala iz česar sledi, da je v primerjavi z enojnimi membranskimi ovoji uporaba dvojnega ovoja smiselna. Totalna prepustnost za sončno energijo g sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z je bila nizka in enaka 0,11. Za izvedbo teh izračunov so bile pred tem opravljene terenske meritve temperature  $T_{a,k}$  in hitrosti zraka  $v_w$  v zračnem kanalu, ki so bile najprej uporabljene za pripravo vhodnih podatkov za izračun toplotnega upora. Hkrati je bilo na podlagi teh mogoče v primerjavi z znano izmenjavo zraka med notranjostjo in zunanjostjo stavbe (1,6 ach) oceniti, da v obstoječi izvedbi dvojnega membranskega ovoja pretok zraka skozi zračni kanal med membranama ni dovolj velik, da bi ga lahko izkoristili za pasivno ogrevanje dvorane, nadaljnja analiza odvisnosti od klimatskih parametrov pa je bila opuščena.

Na podlagi eksperimentalnih rezultatov lahko povzamemo, da uvedba 10 mm debele aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® ob ustrejni kombinaciji optičnih lastnosti konstrukcijske in spremnih membran (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) zagotovi večjo prepustnost vidne svetlobe (povečanje  $TT_{vis}$  za ~2,6-krat, z vrednosti 1,4 % na 3,7 %) v primerjavi z neočiščenim vzorcem sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z, kot tudi v primerjavi z očiščenim (povečanje  $TT_{vis}$  za ~1,6-krat, z vrednosti 2,3 % na 3,7 %). Totalna odbojnost  $TR_{vis}$  vzorca ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila tako rekoč enaka odbojnosti sklopa PES(1)2009n/PES(2)2009n v smeri vpadne svetlobe iz notranjosti dvorane navzven. Na podlagi terenske spektroskopije je bilo ugotovljeno, da je totalna prepustnost aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® (aerogel) v nasprotju z vzorci tkanin in folij, neodvisno od

motnosti, odvisna od kota vpadne svetlobe in višja od laboratorijske vrednosti, ki pa je bila na varni strani in zato tudi uporabljena pri nadalnjem delu. S pomočjo Beerovega zakona je bilo ocenjeno, da je z vidika dnevnega osvetljevanja stavb uporabna le osnovna debelina aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® 10 mm. Analiza sončnih optičnih lastnosti ( $TT_{sol}$ ,  $TRB_{sol}$ ,  $TRW_{sol}$  in  $A_{sol}$ ) na valovnih območjih UV-, VIS- in NIR-spektra sončnega sevanja, je pokazala, da je novi konstrukcijski sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE hladnejši od sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z na valovnih območjih UV- in VIS-sevanja, na območju NIR-sevanja pa nekoliko toplejši. Pomembno je tudi, da je razmerje med  $TT_{sol}$  in  $TT_{vis}$  manjše in ugodnejše kot pri sklopu, saj za enako količino prepuščene svetlobe spustimo v stavbo relativno manj sevanja v preostalih dveh valovnih območjih (UV in NIR).

Enako kot za poliestrske tkanine prevlečene s PVC in PvDF, so bile določene emitivnosti  $e_T$  polietilenske tkanine PEfabric, folije ETFE (0,96) in aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® (0,96). Termografske meritve so potrdile dejstvo, da je tkanina PEfabric prosojna ne le za vidno sevanje, temveč tudi za toplotno IR-sevanje, eksperimentalno določena vrednost  $e_T$  0,60 pa pripada kombinaciji PEfabric in za toplotno IR-sevanje visokoodbojnega (t.j. nizko emisijskega) ozadja, kar ponazarja primer kombinacije z nizkoemisijskim materialom. Posledično je toplotni upor zračnega kanala sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, zaradi nižjega koeficienta prenosa toplote s sevanjem  $h_r$ , v primerjavi s sklopom PES(1)2009z/PES(2)2009z narastel za približno tretjino. Toplotni upor celotnega sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bil v povprečju obravnavanih primerov naklona konstrukcijskega sklopa in hitrosti zraka v kanalu enak  $1,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  (brez mejnih zračnih plasti  $0,85 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), vrednost toplotnega upora zračnega kanala pa je še vedno pomenila slabih 20 %. Pri tem je treba poudariti, da izračun toplotnega upora novega konstrukcijskega sklopa ne upošteva dejanskega učinka uvedbe toplotne izolacije na naravo zračnega toka v kanalu med membranama, temveč so za izhodišče primerjave privzeti enaki eksperimentalno določeni vhodni podatki o temperaturi površin in temperaturi ter hitrosti zraka v kanalu kot za primer PES(1)2009z/PES(2)2009z. Totalna prepustnost za sončno energijo, faktor g, sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila enaka 0,23 in 2,1-krat višja od vrednosti za PES(1)2009z/PES(2)2009z, kar je ugodno z vidika izkoriščanja pasivnih sončnih dobitkov za ogrevanje stavb in negativno z vidika preprečevanja pregrevanja. Povečanje debeline aerogelne polsti na 20 ali 40 mm bi povzročilo izgubo prosojnosti sklopa, toplotni upor aerogelne odeje bi pri debelini 20 mm znašal  $1,33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  in pri 40 mm  $2,67 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ .

Na podlagi eksperimentalno in računsko pridobljenih optičnih in toplotnih lastnosti je mogoče sklepati, da je uporaba tipologije dvojnega membranskega ovoja zračno podprtih konstrukcij kljub uvedbi visokoizolativne aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® ( $\lambda_D = 0.015 \text{ W/m.K}$ ) smiselna. Z vidika prenosa toplote uporaba zračnega kanala zmanjša območje fizičnega kontakta med membranama, s čimer je mogoče, da poleg uvedbe toplotne izolacije (aerogel), po pretežnem delu zračno podprte konstrukcije, pride do izraza tudi nižja emitivnost stranic zračnega kanala. Poleg ugodnega učinka obeh ukrepov, t.j. uvedba aerogela in površine z nizko emitivnostjo, je bilo še ugotovljeno, da uvedba toplotnoizolacijske odeje Spaceloft® bolj vpliva na povečanje vrednosti toplotnega upora sklopa kot predvideno znižanje emitivnosti zunanje strani notranje membrane. Razlika toplotnega upora zračnega kanala med različicama PES(1)2009z/PES(2)2009z in ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je enaka približno  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ , kar pa je približno 13-krat manj od vrednosti toplotnega upora 10 mm debele aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® ( $0,67 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ). Nadaljnja študija uporabe spektralno selektivnega materiala v kombinaciji ali namesto zunanjega sloja PEfabric ( $TT_{sol} > 0.80$ ,  $e_T < 0.40$ ) [180], ki bi zagotovil nizko termično emitivnost zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, hkrati pa bi bil ustrezno prepusten za spekter sončnega sevanja, bi dodatno obogatila razumevanje učinkovitosti uporabe izolacijske odeje Spaceloft®, kot je predstavljeno v tem delu.

Mogoče je tudi sklepati, da bi imela opustitev zračnega kanala negativen učinek posredno tudi na totalno prepustnost za sončno energijo g sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, saj bi se ta na račun nižjega topotnega upora sklopa še bolj zvišala. Ugotovljeno je še bilo, da je za ohranjanje nizkega faktorja g dvojnega ovoja ugodno, če je zunanjega membrana bolj absorptivna za sončno sevanje kot notranja, saj se ta laže ohlaja proti zunanjemu okolju kot notranja. Pri sklopu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE zmanjšani prehod topote oteži ohlajanje membrane proti zunanjosti stavbe, hkrati pa je bila absorptivnost notranje membrane višja od absorptivnosti zunanjega membrane, zato je bil vpliv topotnega toka tudi večji kot pri PES(1)2009z/PES(2)2009z. Izkaže se še, da je vpliv topotnega toka proti notranjosti stavbe pri ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE večji od vpliva  $TT_{sol}$ , kar je ravno nasprotno kot pri PES(1)2009z/PES(2)2009z. Te ugotovitve sovpadajo z rezultatom podrobne analize solarnih lastnosti, ki je pokazala, da je sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE hladnejši od sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z.

Poleg problematike uvedbe aerogelne izolacijske odeje v sestavo zunanje membrane dvojnega zračno podprtoga membranskega ovoja je treba poudariti, da bi bila analiza topotnih lastnosti take sestave konstrukcijskega sklopa še naprej smiselna le, če bi lahko eksperimentalno natančno določili temperaturo stranic zračnega kanala in hitrosti zraka v njem, saj je topotni upor oziroma prehod topote skozi zračni kanal odvisen od teh vrednosti, posredno pa tudi faktor  $g$ , kar je zaradi zahtevnosti izvedbe presegalo predvideni obseg dela. Uporaba na terenu pridobljenih eksperimentalnih vrednosti hitrosti zraka v kanalu med notranjo in zunanjim membrano sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z kot vhodnih podatkov pri izračunu koeficiente konvekcijskega prenosa topote pokaže, da vpliv konduktionsko/konvekcijskega prenosa topote v primerjavi s prenosom topote z radiacijo (vrednosti  $h_{c,i}$  enake od 57 % do 75 % vrednosti  $h_r$ ) sicer ni zanemarljiv in ga je treba upoštevati, na drugi strani pa pokaže, da je vpliv sprememjanja v danem primeru eksperimentalno določene hitrosti zraka (med 0,01 m/s in 0,09 m/s) na topotni upor celovitega konstrukcijskega sklopa majhen. Za primer sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je ta vpliv manjši od 1 %.

Za izvedbo simulacije dnevne osvetljenosti obstoječe ŠDB in računsko napoved dnevne osvetljenosti ŠDB, katere ovoj je bil topotno izoliran, z računalniškim programom DAYSIM, je bilo najprej uspešno dokazano, da pri pripravi geometrijskega modela izvedene poenostavitve (odsekoma ravnih elementov, enoslojni geometrijski model dvojnega membranskega ovoja, enakomerna porazdelitev njegovih svetlobnih lastnosti) niso bistveno vplivale na končni rezultat. S pomočjo analize vsot koeficientov dnevne svetlobe je bilo ugotovljeno, da je orientacija posameznih segmentov modela zračno podprtoga ovoja glede na vir svetlobe res poljubna. Na podlagi majhnega odstopanja eksperimentalno pridobljenih vrednosti količnika dnevne svetlobe (KDS) ter izračunanih vrednosti s programom DAYSIM za obstoječo različico membranskega ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z (AAD vrednosti KDS < 0,09%) smo lahko sklepali, da je računalniški program DAYSIM bilo mogoče uporabiti za napoved dnevne osvetljenosti ŠDB (zem. š.: 46,01° S) z novo različico ovoja ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Izračun je pokazal, da je z uporabo ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE dnevna osvetljenost igrišča v ŠDB udobnejša oziroma je delež ur, ko je izpolnjen pogoj minimalne dnevne osvetljenosti skoraj za tretjino (32,6 %) večji. Zaradi boljše prepustnosti sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE za dnevno svetobo in dovolj intenzivne osvetljenosti v notranjosti stavbe je bilo mogoče ohraniti enakomerno razporeditev  $TT_{vis}$  po celotnem membranskem ovoju in da delne prekinutve topotne izolacije po površini kupole (kot da bi navidezno vgradili okno z namenom zvišanja  $TT_{vis}$  ovoja) niso potrebne.

Na podlagi ocene časa v katerem se v homogenem sloju materiala ob spremembah robnih pogojev vzpostavi stacionarno stanje, je bilo ugotovljeno, da je ta za 10 mm debelo aerogelno izolacijsko odejo

manjši od časovnega koraka ene ure, uporabljenega v izračunih z računalniškim programom EnergyPlus. Tako je bila potrjena tudi ustreznost uporabe programskih modulov računalniškega orodja EnergyPlus, namenjenih podajanju zasteklitev, ki pri prenosu toplotne ne obravnavajo vpliva toplotne difuzivnosti.

Terenske meritve klimatskih parametrov julija in avgusta 2013 so pokazale, da se stavba ŠDB v t. i. prostem teku, ob visokih temperaturah zunanjega zraka in veliki izpostavljenosti sončnemu sevanju, močno pregrevata ( $T_{a,i}$  v času dnevnega viška v povprečju višja od 26 °C tudi za 9 °C), tako da aktivnosti v njej podnevi niso mogoče. Vendar sta bili kljub vsemu temperaturi zraka zunaj in v notranjosti stavbe podnevi zelo podobni, razlika se je gibala med -2,6 °C in 1,8 °C. Sklepamo lahko, da je bilo to posledica dovolj nizkega faktorja g obstoječega konstrukcijskega sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z, na drugi strani pa dovolj velike izmenjave zraka med notranjostjo stavbe in zunanjim okolico, kot posledice zagotavljanja stabilnosti zračno podprte konstrukcije. Že na podlagi teh ugotovitev in rezultata določitve toplotnih lastnosti ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bilo mogoče predvideti, da uporaba nove različice konstrukcijskega sklopa stopnjo pregrevanja še poslabša. Primerjava že omenjenih rezultatov eksperimentalnih meritev temperature zraka v ŠDB in zunaj nje poleti 2013 s programom EnergyPlus simuliranih vrednosti za isto obdobje sicer pokaže, da simulacija še posebej čez dan nekoliko preceni višino temperature zraka  $T_{a,i}$ , vendar je bilo kljub temu število ur, ko je bila  $T_{a,i}$  višja od 26 °C, za primer dvojnega membranskega ovoja ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE bistveno večje kot za obstoječi primer ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z. Za posamezen mesec je bila absolutna razlika med omenjenima primeroma celo največ 21 % časa (september), daljše pa je bilo tudi obdobje tekom leta, ko v prostem teku prihaja do pregrevanja. Poudariti je treba, da se tovrstne stavbe v lokalni klimi že v osnovi po navadi uporabljajo sezonsko, v številnih primerih objektov, namenjenih športnim aktivnostim, ki potekajo tudi na prostem, pa se zračno podprta konstrukcija v poletnem času začasno odstrani. Zračno podprta konstrukcija ŠDB je postavljena vse leto, saj pokriva športno igrišče namenjeno dvoranskim športom z žogo (odbojka, rokomet), vendar se poleti ne uporablja in posledično nima predvidenega sistema hlajenja. V skladu s cilji in hipotezami disertacije je bila ocenjena tudi količina energije potrebne za njeno hlajenje v lokalni klimi [164] hlajenje  $Q_{cool}$ , ki se pri toplotno izolirani ŠDB v primerjavi z obstoječo različico poveča približno za 4,2-krat (s 46,6 na 241,4 kWh/m<sup>2</sup>.a). Analiza sončnih lastnosti je pokazala, da bi bilo za morebitno zmanjšanje stopnje pregrevanja smiselno senčiti (predvsem z odbojem) kratkovalovno infrardeče sevanje med 780 nm in 2500 nm.

Analiza toplotnega odziva v zimskem času, izračunanega s programom EnergyPlus, pokaže, da se toplotno ugodje za uporabnike ŠDB, oblečene primerno športnim aktivnostim (toplotni upor oblačil enak 0,3 clo), majhne hitrosti zraka v dvorani (približno 0,1 m/s) ter stopnji aktivnosti MET nižji od ali enaki 3,5 MET poveča. Za dejavnosti s stopnjo aktivnosti, višjo od 3,5 MET, bi lahko na račun zmanjšane razlike med  $T_{a,i}$  in MET znižali nastavitev temperature termostata  $T_{setpoint}$ . Kljub temu je treba poudariti, da vpliva na toplotno ugodje ni mogoče posplošiti, saj je močno vezano na trenutne klimatske razmere in kombinacijo parametrov, ki določajo toplotno ugodje po standardu SIST EN ISO 7730:2006. Izkazalo se je tudi, da se pri stopnji aktivnosti 3,0 MET in manj toplotno izolirana stavba ŠDB v skladu z določili standarda SIST EN 15251:2007 umesti v višji razred kakovosti toplotnega ugodja kot obstoječa različica. Kljub velikemu zvišanju toplotnega upora (3,2-krat) (et zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila enaka 0,96) in posledičnemu zmanjšanju transmisijskih izgub skozi konstrukcijski sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je faktor zmanjšanja rabe energije, potrebne za ogrevanje, nižji. Količina energije, potrebna za ogrevanje, se je glede na uporabljene vremenske podatke [164] za lokalno podnebje in ob uporabi 10 mm debelega sloja aerogelne odeje zmanjšala za 22 % (s 195,4 na 151,6 kWh/m<sup>2</sup>.a). Še več, rezultati so pokazali, da tudi uporaba štirih slojev (40 mm, s toplotnim uporom  $R^{Spaceloft}$  ( $d = 40\text{mm}$ ) = 2,67 m<sup>2</sup>.K/W) aerogelne

izolacijske odeje Spaceloft® ni zagotovila enakega (celo 7 % manjšega) prihranka energije za ogrevanje. Tako debel sloj aerogelne odeje Spaceloft® je namreč popolnoma neprepusten za sončno sevanje, potencialnih sončnih dobitkov pa ni bilo mogoče izkoristiti. Popolnoma neprosojen ovoj bi sicer skoraj izničil energijo, potrebno za hlajenje, vendar bi hkrati onemogočil dnevno osvetljenost v notranjosti stavbe. Na podlagi izračunanih prihrankov energije za ogrevanje je bila ocenjena tudi povratna doba stroška toplotne izolacije, za katero se je izkazalo, da je sprejemljiva in bistveno krajsa od pričakovane življenske dobe uporabljenih materialov v sklopu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE.

Če povzamemo, smo izvedli vse v uvodu in tudi v dispoziciji doktorskega dela zastavljene cilje raziskovalnega dela (poglavlje 1.2). Na podlagi ustreznega eksperimentalnega dela so bile določene optične in toplotne lastnosti več različic dvojnega membranskega ovoja, ki so bile uporabljene tudi v primerjavnih izračunih oziroma simulacijah dnevne osvetljenosti, toplotnega odziva in energije, potrebne za ogrevanje študijskega primera stavbe. Določena je bila ustreznata debelina prosojne aerogelne izolacije ob enakomerni porazdelitvi optičnih in toplotnih lastnosti po celotnem zračno podprttem ovoju, ki izpolnjuje pogoje notranjih bivanjskih razmer za uporabnika (dnevna osvetljenost igrišča in toplotno ugodje), pri čemer je bil izračunan tudi prihranek energije za ogrevanje Športne dvorane Brezovica. Ocenjen je bil tudi vpliv na energijo, potrebno za hlajenje, ki je ob predvideni uvedbi prosojne aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® bistveno narasla, vendar se tovrstni objekti v lokalnem podnebju pogosto uporabljajo le sezonsko (v stavbah ni aktivnosti ali pa se zračno podprta konstrukcija v poletnih mesecih celo odstrani). Upoštevajoč le potrebno energijo za ogrevanje je bilo ugotovljeno, da je povratna doba investicije v samo izolacijo sprejemljiva.

Na podlagi dobljenih rezultatov lahko prvo hipotezo:

'Z uvedbo aerogelne izolacijske odeje je mogoče izboljšati toplotno ugodje in vizualne razmere uporabnikov v stavbah z zračno podprtto različico dvojnega, lahkega zunanjega ovoja,'

v celoti potrdimo, saj smo z računskeimi simulacijami dokazali pozitivne vplive uvedbe dodatne aerogelne toplotne izolacije v prosojni konstrukcijski sklop športne dvorane.

Drugo hipotezo:

'Z uvedbo aerogelne izolacijske odeje je mogoče zmanjšati količino energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje stavbe z zračno podprtto različico dvojnega, lahkega zunanjega ovoja,'

lahko le delno potrdimo. Kot je bilo že omenjeno, nova različica konstrukcijskega sklopa izkazuje manjšo potrebo po energiji v zimskem ogrevalnem obdobju (v tem primeru je druga hipoteza potrjena), v nasprotju s poletnim režimom, ko se potreba po energiji znatno poveča (v tem primeru je druga hipoteza zavrnjena).

V okviru namena rabe študijskega primera stavbe ŠDB lahko pritrdirno odgovorimo tudi na poglavito znanstveno vprašanje, saj smo s pasivnim ukrepom modifikacije optičnih in toplotnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja izboljšali vizualno in toplotno ugodje uporabnika ter hkrati zagotovili občutno zmanjšanje porabe energije, potrebne za ogrevanje obravnavane stavbe, ki celo upraviči povratno dobo stroška toplotne izolacije v sprejemljivem in bistveno krajsem času, kot je pričakovana življenska doba uporabljenih materialov. Pri tem je bila uporabljena 10 mm debela aerogelna izolacijska odeja Spaceloft®, enakomerno razporejena po celotnem dvojnem membranskem ovoju, oblečena v prosojno polietilensko tkanino ter vstavljena v dvojni membranski ovoj, sestavljen iz etilen tetrafluoroetilenske folije z debelino zračnega kanala 20 cm, ki je visoko prepustna za sončno sevanje.

## 6 POVZETEK

Predstavljeno raziskovalno delo obravnava vpliv uvedbe aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® v dvojni membranski ovoj zračno podprtih konstrukcij na parametre, ki opisujejo optične in toplotne lastnosti prosojnih stavbnih ovojev, ter parametre, ki opisujejo delovanje stavb, kot na primer: dnevno osvetljenost, toplotni odziv, rabo energije za ogrevanje in hlajenje ter toplotno ugodje.

Zračno podprte konstrukcije se dandanes kot pomemben predstavnik pnevmatskih konstrukcij oziroma plaskovno stabiliziranih membranskih nosilnih konstrukcij [14] pogosto uporabljajo za prekrivanje športnih objektov, kot so igrišča, bazeni ipd. Prvi znani patent iz leta 1918 [3] predvideva njihovo uporabo v vojaške namene, drugi, objavljen leta 1920, pa že uporabo tudi za prekrivanje prizorišč družabnih dogodkov [7]. Poglavitna prednost zračno podprtih konstrukcij je poleg preproste montaže in možnosti večkratne postavitev ta, da so tako rekoč v celoti prosojne in zato omogočajo naravno dnevno osvetljevanje, pri načrtovanju pa je treba smotrno izbrati optične lastnosti tovrstnega ovoja, kar je bilo poudarjeno tudi že na prvem mednarodnem kolokviju na temo pnevmatske arhitekture v Stuttgartu leta 1967 [4]. Uravnotežiti je treba količino prepuščenega vidnega sevanja za zagotavljanje ustrezne dnevne osvetljenosti (brez bleščanja) in količino solarnih dobitkov, da se stavba ne oziroma čim krajše obdobje pregrevi. Kljub možnosti izkorisčanja solarnih dobitkov je treba v zmernem klimatskem razredu, v hladnem obdobju leta ter v delih dneva, ko pasivno sončno ogrevanje ni mogoče, tovrstne stavbe ogrevati. Ideja o uporabi primerne transparentne toplotne izolacije za izboljšanje energetske učinkovitosti membranskih [42] in bolj specifično pnevmatskih konstrukcij [43] ni nova.

Pripravljen je bil predlog nove sestave konstrukcijskega sklopa dvojnega membranskega ovoja ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE. Pri tem je bila uporabljena 10 mm debela aerogelna izolacijska odeja Spaceloft® (aerogel - toplotna izolacija izredne učinkovitosti; toplotna prevodnost le 0,015 W/(m.K)), oblečena v prosojno polietilensko tkanino (PEFabric) ter vstavljena v dvojni membranski ovoj, sestavljen iz etilen tetrafluoroetilenske folije (ETFE) z debelino zračnega kanala 20 cm, visoko prepustne za sončno sevanje. Za oceno vpliva uporabe predlaganega konstrukcijskega sklopa na delovanje stavb z dvojnim zračno podprtym membranskim ovojem je bila izbrana Športna dvorana Brezovica (ŠDB), katere ovoj je sestavljen iz dveh s PVC in PVDF prevlečenih [62] poliestrskih tkanin (PES(1)2009z/PES(2)2009z).

Optične lastnosti (svetlobne:  $TT_{vis,n-h}(\lambda)$  [%],  $DT_{vis,n-h}(\lambda)$  [%]); sončne:  $TT_{sol}(\lambda)$  [%],  $TRW_{sol}(\lambda)$  [%],  $TRB_{sol}(\lambda)$  [%]) vzorcev tekstilij, folij in toplotnoizolacijske odeje so bile določene računsko na podlagi spektrov, posnetih s pomočjo spektrometra Perkin Elmer Lambda 950 UV-Vis, opremljenega z integracijsko sfero. Motnost (H [%]) je bila izračunana po postopku B, podanem v standardu ASTM D1003 [83]. Spektralno povprečne vrednosti so bile izračunane z integracijo (Riemannovo vsoto) pripadajočih spektralnih vrednosti, pri čemer so bile glede na valovno območje obravnave uporabljene še ustrezne relativne spektralne porazdelitve moči vira svetlobe (območje vidne svetlobe vir D65 [85]; celoten sončni spekter v skladu z ISO 9845-1 [86]; CIE standardni vir svetlobe tipa A) in pri določanju svetlobnih lastnosti in barv še funkcija relativne barvne občutljivosti človeškega očesa za fotopičen vid CIE standardnega opazovalca po definiciji iz leta 1931  $V(\lambda)$  [85] oziroma kolorimetrične funkcije  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  [91]. Terenska spektroskopija (določitev vpliva geometrije spektroskopskih meritev (normalno-hemisferično; hemisferično-hemisferično) na vrednost totalne prepustnosti ( $TT_{vis,h-h}(\lambda)$  [%]) in določitev odbojnognostnega faktorja  $R_{vis,dif}(\lambda)$  [%]) je bila opravljena s prenosnim spektrometrom Black Comet izdelovalca StellarNet [88]. Emitivnost vzorcev materialov je bila določena na podlagi meritev odbojnosti na območju dolgovalovnega infrardečega sevanja  $R_{eT}(\lambda)$  [%], za kar je bil uporabljen

spektrometer Bruker Optics IFS 66/S FT-IR. S pomočjo meritve temperature površine vzorcev  $T_s$  [°C] z infrardečo kamero Testo 881-3 [89] je bila ocenjena prepustnost vzorcev za dolgovalovno infrardeče sevanje. Temperatura zraka v zračnem kanalu  $T_{a,k}(t)$  [°C] in hitrost zraka  $v_k(t)$  [m/s] sta bili izmerjeni s pomočjo digitalnega večfunkcijskega toplotnega anemometra TESTO 0560.4450 [93]. Dnevna osvetljenost ŠDB je bila eksperimentalno ocenjena s pomočjo KDS [%]. V ta namen so bile narejene meritve globalne osvetljenosti znotraj  $E_{i,exp,glob}$  [lx] in meritve prispevka zenitnega segmenta neba  $E_{o,exp,tube}$  [lx] z merilnikoma osvetljenosti izdelovalca Voltcraft [111], izmed katerih je imel eden ( $E_{o,exp,tube}$ ) zmanjšan kot opazovanja (~ 1 sr). Na te vrednosti je bila normalizirana difuzna osvetljenost nezasenčene horizontalne površine  $E_{o,calc,dif}$  [lx], pri čemer je bilo privzeto CIE standardno oblačno nebo [102]. Kontrola normalizacije je bila izvedena s pomočjo spektroradiometra MS-711 izdelovalca Eko Instruments [114]. Eksperimentalne meritve klimatskih parametrov ( $v_w$  [m/s],  $T_{a,i}$  [°C],  $T_{a,o}$  [°C],  $RH_{a,o}$  [%],  $RH_{a,i}$  [%]) za oceno toplotnega odziva ŠDB so bile opravljene z vremensko postajo Conrad [117]. Toplotni upor  $R$  [ $m^2 \cdot K/W$ ] dvojnega membranskega ovoja je bil določen v skladu z mednarodnim standardom ISO 15099:2003 [119], medtem ko je bila totalna prepustnost za sončno energijo  $g$  [-] določena v skladu s standardom ISO 9050:2003 [126]. Računska napoved dnevne osvetljenosti ŠDB z ovojem ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila pripravljena z računalniškim programom DAYSIM [129], ki temelji na metodah vzvratnega sledenja žarkov in koeficientov dnevne svetlobe DC [-]. Za študijo vpliva direktne komponente na količnik dnevne svetlobe je bil uporabljen še Perezov vsevremenski model porazdelitve svetlosti neba [137]. S programom DAYSIM je bila izvedena tudi simulacija eksperimentalnih meritev dnevne osvetljenosti pri kateri je bila svetlobna učinkovitost sončnega sevanja določena tudi na podlagi meritev z merilnikom globalne osončenosti izdelovalca Voltcraft [113]. Simulacija toplotnega odziva ŠDB v času eksperimentalnih meritev, izračun toplotnega odziva za namen določitve toplotnega ugodja v ŠDB in izračun potrebne energije za ogrevanje in hlajenje ŠDB so bili izvedeni z računalniškim orodjem EnergyPlus. Ti izračuni temeljijo na toplotnih bilancah med površinami, na katere vplivajo sevalni in konvekcijski toplotni tokovi. Toplotno ugodje uporabnika pozimi in kategorija stavbe pa sta bila določena v skladu s standardoma SIST EN ISO 7730:2006 [172] in SIST EN 15251:2007 [173].

Raziskava optičnih lastnosti tkanin (PES(1)2009, PES(2)2009, PEfabric), folije (ETFE) in aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® (aerogel) je pokazala, da je njena totalna prepustnost vidne svetlobe  $TT_{vis}$  [%] podobna (4 %) prepustnosti osnovne konstrukcijske membrane PES(1)2009z (4,1 %), kar je ob izkazani visoki prepustnosti  $TT_{vis}$  folije ETFE nakazalo možnost višje  $TT_{vis}$  tudi za konstrukcijski sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, predlagan na novo. Nadaljnja spektrometrija je potrdila, da je za vidno svetlobo sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE 2,6-krat bolj prepusten kot obstoječi sklop PES(1)2009z/PES(2)2009z in tako rekoč enako moten. Podobno velja za totalno prepustnost sončnega sevanja  $TT_{sol}$  [%] na valovnem intervalu med 300 nm in 2500 nm, na katerem je sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE 1,8-krat bolj prepusten kot izhodiščna različica sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z. Upoštevajoč celoten sončni spekter je sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE hladnejši kot PES(1)2009z/PES(2)2009z, zato je mogoče pričakovati, da se pod vplivom sonca tudi manj segreje. Na valovnem območju dolgovalovnega infrardečega sevanja med 2,5 μm in 16 μm se emitivnost  $e_T$  [-] za materiale PES(1), ETFE, PEfabric in aerogel s spremembijo temperature v območju med -20 °C in +50 °C ni spremenila in je bila za PEfabric enaka 0,60, za preostale tri vzorce pa 0,96.

Izvedene so bile tudi meritve spektrov na terenu za analizo vpliva smeri vpadne svetlobe na prepustnost za vidno svetlobo ter meritev odbojnognostnega faktorja  $R_{vis,dif}$ , [%], na podlagi katerega je bila določena odbojnost različnih barv tal. Pri prvem je preizkus pokazal, da obravnavana aerogelna izolacijska odeja Spaceloft® pod drugimi (zmernimi) vpadnimi koti, kot je normalni vpadni kot, prepušča več vidne

svetlobe. Torej je bila uporaba normalne-hemisferične vrednosti pri nadaljnjem delu na temo dnevne osvetljenosti na varni strani.

Eksperimentalno delo na vzorčnem primeru ZPS, Športni dvorani Brezovica (ŠDB), je bilo razdeljeno na dva poglavitna dela: terensko delo na temo dnevne osvetljenosti ŠDB in terensko delo na temo toplotnega odziva ŠDB, ki je vključevalo tudi meritve hitrosti in temperature zraka v zračnem kanalu dvojnega membranskega ovoja ŠDB.

Eksperimentalno določene vrednosti KDS za merilna mesta na igrišču so bile razmeroma nizke (od 1,1 % do 1,7 %), na podlagi česar je mogoče sklepati, da je ŠDB pogosto treba dodatno umetno osvetljevati. V danih razmerah neba in pri vrednostih difuzne osvetljenosti zunanje površine v času eksperimenta (npr. ~3000-4000 lx) bi zagotovili vrednosti osvetljenosti 300 lx na igrišču v stavbi tedaj, ko bi bil KDS večji ali enak 10 %. Hkrati lahko na obravnavani zemljepisni širini (~ 46° S) pričakujemo osvetljenost zunanje površine 5000 lx vsaj 90 % časa med 9. in 17. uro v letu [142] kar pomeni, da bi za izpolnitve pričakovane vrednosti  $E_{i,exp,glob} = 300$  lx zadostoval 6-odstotni KDS. Pomembno je opozoriti, da nizke vrednosti KDS v obravnavani vrsti pnevmatskih konstrukcij, kakršna je na Brezovici, pripomorejo tudi k preprečevanju problema z bleščanjem.

Na podlagi meritev določene vrednosti hitrosti gibanja zraka  $v_h$  [m/s] za različne pozicije sonde v zračnem kanalu so se gibale med 0,01 m/s in 0,12 m/s, izkazalo pa se je, da je njihov potek tekom dneva odvisen od izpostavljenosti stavbe sončnemu sevanju. Tako so vrednosti  $v_h$  dosegle svoj maksimum ob približno 11. uri, ko je vpadni kot sončnega sevanja na mesto meritev na ovoju najmanjši. Ekstremne vrednosti temperature zraka v zračnem kanalu  $T_{a,k,h}$  [°C] ne sovpadajo z ekstremnimi vrednostmi hitrosti zraka v kanalu  $v_h$ . Njeni maksimumi se povzpnejo nad 40 °C, hkrati pa je bila vrednost temperature  $T_{a,k,h}$  ob zunani stranici zračnega kanala višja kot ob notranji stranici v času, ko je stranica stavbe, na kateri je bilo merilno mesto, neposredno obsijana s soncem, višje pa so bile tudi njene maksimalne vrednosti ob zunani stranici. Pripravljena sta bila še povprečna profila temperature v ( $T_{a,i}^{povp}$  [°C]) in zunaj ( $T_{a,o}^{povp}$  [°C]) ŠDB, na podlagi katerih je bilo razvidno, da se je stavba v t. i. prostem teku ob visokih temperaturah zunanjega zraka in visoki izpostavljenosti sončnemu sevanju sicer močno pregrevala (aktivnosti v njej niso bile mogoče, maksimalna  $T_{a,i}^{povp}$  je bila enaka 35,1 °C), vendar relativno zmerno, saj sta bili temperaturi zraka zunaj stavbe in v njej podnevi zelo podobni. Domnevno zaradi relativno visoke izmenjave zraka za vzdrževanje tlačne razlike med notranjostjo in zunanjostjo stavbe in nizkega faktorja  $g$ . Zabeleženo je bilo tudi radiacijsko hlajenje zunanje membrane proti nebu, ki je pomenilo ponor toplote [77], saj je bila temperatura ob zunani stranici zračnega kanala med membranama  $T_{a,k,h,i}$  nižja od vseh drugih temperatur ( $T_{a,i}$ ,  $T_{a,o}$ ,  $T_{a,k,h,o}$ ) med 24. in 6. uro ter med 16. in 24. uro.

V skladu s pričakovanji se je prehod toplote skozi toplotno izolirani konstrukcijski sklop ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE bistveno zmanjšal oziroma toplotni upor bistveno povečal (ne upoštevajoč  $R_{se}$  in  $R_{si}$ , v povprečju 6,5-krat, z 0,13 na 0,85 m<sup>2</sup>.K/W). Vrednost  $g$  se je zaradi spremembe optičnih lastnosti tako notranje (s PES(2)2009z na PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) kot zunanje membrane (s PES(1)2009z na ETFE) spremenila. Pri sklopu ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, predlaganem na novo, je bila večja (~ 2,1-krat,  $g$  je enak 0,23 namesto 0,11). Obravnavani primeri izračuna toplotnega upora ne ponazarjajo dejanskega učinka uvedbe toplotne izolacije na naravo zračnega toka v kanalu med membranama, ampak za izhodišče primerjave vzamejo enake eksperimentalno določene podatke o temperaturi površin in temperaturi ter hitrosti zraka v kanalu. Zato je bil koeficient konvekcijskega prenosa toplote  $h_{ci}$  neodvisen od primera sklopa. Rezultati pokažejo, da ima znižanje emitivnosti et zunanje stranice notranje membrane z vrednosti 0,96 (PES(2)2009z) na 0,60, in s tem znižanje koeficiente radiacijskega prenosa toplote  $h_r$  (ob predpostavki o nepropustnosti za

toplotno IR-sevanje), za posledico porast toplotnega upora zračnega kanala z  $\sim 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  na  $0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$ , kar je približno 13-krat manj, kot znaša vrednost toplotnega upora 10 mm debele aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® ( $0,67 \text{ m}^2\text{K/W}$ ). Nadaljnja študija uporabe spektralno selektivnega materiala v kombinaciji ali namesto zunanjega sloja PEfabric ( $\text{TT}_{\text{sol}} > 0.80$ ,  $\epsilon_{\text{T}} < 0,40$ ) [180], ki bi zagotovil nizko termično emitivnost zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, hkrati pa bi bil ustrezno prepusten za spekter sončnega sevanja, bi dodatno obogatila razumevanje učinkovitosti uporabe izolacijske odeje Spaceloft®, kot je predstavljeno v tem delu. Eksperimentalno pridobljene vrednosti hitrosti zraka v kanalu med notranjo in zunanjim membrano sklopa PES(1)2009z/PES(2)2009z pokažejo, da vpliv konvekcijskega prenosa topote ni zanemarljiv (vrednosti od 57 % do 75 % vrednosti  $h_r$ ), vendar je vpliv izmerjenega sprememjanja hitrosti zraka zanemarljiv. Za primer sklopa ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je ta vpliv na vrednost toplotnega upora sklopa manjši od 1 %. Zato, je bil pri nadalnjem računskem eksperimentalnem delu s programom EnergyPlus privzet zaprt zračni kanal.

Za izvedbo izračunov in simulacije dnevne osvetljenosti ŠDB z računalniškim programom DAYSIM je bilo najprej treba dokazati, da pri pripravi geometrijskega modela narejene poenostavite ne vplivajo bistveno na končni rezultat. Hkrati je bilo dokazano, da je orientacija posameznih segmentov modela zračno podprtrega ovoja glede na vir svetlobe res poljubna. Primerjava eksperimentalno pridobljenih vrednosti količnika dnevne svetlobe KDS ter izračunanih s programom DAYSIM za oblačno nebo je pokazala majhno odstopanje (AAD vrednosti KDS  $< 0,09 \%$ ). Z istim računalniškim programom je bilo tudi pokazano, da je bil delež direktne komponente globalne osončenosti med eksperimentom res majhen (manjši od 10%) in s tem predpostavka o standardno oblačnem nebu upravičena. Natančna določitev deleža direktne komponente je mogoča le z ustrezno merilno opremo. Na podlagi teh rezultatov, je bilo predpostavljeno, da je program DAYSIM mogoče uporabiti tudi za napoved dnevne osvetljenosti ŠDB, katere ovoj je bil toplotno izoliran z aerogelno izolacijsko odejo Spaceloft® (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE), izračun pa je pokazal, da je v tem primeru mogoče pričakovati višjo stopnjo dnevne osvetljenosti, saj je bilo povprečje vrednosti KDS za vsa merilna mesta kar za 3,2-krat večje od povprečja za izhodiščni primer. Poleg tega je bila pripravljena tudi študija vpliva barve tal (prevladujoče beli oziroma črni vzorci ter bela in črna tla) na razporeditev KDS po igrišču dvorane za obstoječo različico dvojnega membranskega ovoja, ki za ovoj z majhno prepustnostjo pokaže precejšen vpliv odbojnosti tal in njene porazdelitve na vrednosti KDS na vseh mestih opazovanja.

Preden so bili opravljeni izračuni toplotnega odziva in energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje ŠDB, je bila s programom EnergyPlus izvedena simulacija toplotnega odziva ŠDB v času eksperimentalnih meritev poleti leta 2013. Primerjava eksperimentalnih in s programom EnergyPlus simuliranih rezultatov  $T_{a,i}$  pokaže, da simulacija še zlasti podnevi nekoliko preceni temperaturo zraka  $T_{a,i}$ .

Kljub velikemu povečanju toplotnega upora ( $\sim 3,2$ -krat) ( $\epsilon_{\text{T}}$  zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila enaka 0,96) in posledičnemu zmanjšanju transmisijskih izgub skozi toplotno izolirani dvojni membranski ovoj (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) je faktor zmanjšanja rabe energije nižji, saj ventilacijske izgube ostanejo enake. Količina energije, potrebne za ogrevanje  $Q_{\text{heat}}$  [ $\text{kWh/m}^2\text{.a}$ ], se glede na uporabljene podatke [164] za lokalno klimo in pri uporabi 10 mm debelega sloja aerogelne odeje, zmanjša za 22 % (s 195,4 na 151,6  $\text{kWh/m}^2\text{.a}$ ) ( $\epsilon_{\text{T}}$  zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila enaka 0,96). Rezultati še pokažejo, da tudi uporaba štirih slojev (40 mm) aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® ne zagotovi enakega (celo 7 % manjšega) prihranka energije za ogrevanje v primerjavi z izhodiščno različico ovoja PES(1)2009z/PES(2)2009z. Domnevno na račun izgube sončnih dobitkov. Popolnoma neprosojen ovoj bi sicer skoraj izničil energijo, potrebno za hlajenje, vendar bi hkrati, kot je bilo že omenjeno,

onemogočil dnevno osvetljenost stavbe. Uvedba prosojnega 10 mm debelega sloja aerogelne izolacijske odeje Spaceloft® bi, kot je bilo izračunano, bistveno povečala (za 4,2-krat, s 46,6 na 241,4 kWh/m<sup>2</sup>.a) porabo energije za morebitno hlajenje ŠDB,  $Q_{cool}$  [kWh/m<sup>2</sup>.a].

V razpravi je bila narejena še primerjava eksperimentalno in računska določenih optičnih in topotnih lastnosti predlagane sestave izoliranega dvojnega membranskega ovoja ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE z obstoječimi rešitvami prosojnih zasteklitev, ki imajo prav tako uvedeno aerogelno izolacijo v monolitni obliki, obliki granul ali zrnati obliki. Podana je bila primerjava podatka o porabi zemeljskega plina za ogrevanje ŠDB sorodne športne dvorane v Novem mestu ter na podlagi s programom EnergyPlus ocenjene porabe za ŠDB. Navedena je bila tudi ocena povratne dobe stroška topotne izolacije v odvisnosti od cene energenta (zemeljskega plina) in cene topotne izolacije ter podkrepljena z rezultati sorodne raziskave Marka Dowsona [122], ki je v svoji doktorski disertaciji na primeru stanovanjske hiše, katere del zunanje stene deluje kot zračni kolektor (v obliki Tromb-Michelllove stene), izoliran z monolitno aerogelno topotno izolacijo, prav tako pokazal stroškovno upravičenost uporabe transparentne izolacije.

Uvedba kvazihomogene 10 mm debele aerogelne transparentne izolacijske odeje Spaceloft® v konstrukcijski sklop dvojnega zračno podprtga membranskega ovoja ob ustrezni kombinaciji optičnih lastnosti konstrukcijske folije in drugih slojev ( $e_T$  zunanje strani notranje membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE je bila enaka 0,96) zmanjša energijo, potrebno za ogrevanje, podaljša prehodno sezono v kateri je stavba v prostem teku, ter izboljša dnevno osvetljenost stavbe. Izboljša tudi topotno ugodje v ogrevalni sezoni za uporabnike oblečene primerno športnim aktivnostim (topotni upor oblačil enak 0,3 clo), majhne hitrosti zraka, ter stopnje aktivnosti nižje od 3,5 MET. Za dejavnosti s stopnjo aktivnosti, višjo od 3,5 MET, bi lahko na račun zmanjšane razlike med  $T_{a,i}$  in MET znižali nastavitev temperature termostata  $T_{setpoint}$ . Kljub temu je treba poudariti, da vpliva na topotno ugodje ni mogoče posplošiti, saj je močno vezan na trenutne podnebne razmere in kombinacijo parametrov, ki določajo topotno ugodje. Kot je bilo pričakovano, notranjih klimatskih razmer v stavbi poleti v lokalni klimi dodatek topotne izolacije, pri kateri se poveča prepustnost za sončno energijo, ne izboljša. Nasprotno, bistveno bi povečal potencialno potrebo po hlajenju. Na drugi strani pa je res, da lokalno podnebje omogoča letne aktivnosti na prostem, raba obravnavane tipologije stavb pa je tipično sezonska.

Doktorska disertacija je prispevek in podpora uporabi transparentnih izolacij v stavbnem ovoju in ugodnih učinkov na njihovo delovanje tudi na splošno. Poleg območij pričakovanih optičnih in topotnih lastnosti dvojnega membranskega ovoja je z eksperimentalnimi rezultati podprtta tudi uporaba računalniških orodij, kot sta DAYSIM in EnergyPlus, za napovedovanje dnevne osvetljenosti, topotnega odziva in energetske učinkovitosti pnevmatskih stavb z zračno podprtим ovojem.

»Ta stran je namenoma prazna«

## 7 SUMMARY

The presented research work explores the optical and thermal properties of the double membrane envelope of air-supported structures with implemented translucent aerogel blanket Spaceloft® and their influence on daylighting, thermal response, energy use for heating and cooling and the occupants' thermal comfort for the study case building, sports hall Brezovica.

Air-supported structures, an important representative of pneumatically stabilized membrane structures [14], are often used to cover sport facilities such as various courts, pools, etc. The first known patent [3] published in 1918, deals with air-supported structures for military purposes, but the second [7], published in 1920, and already discusses the use for covering public venues. Beside their relatively easy erection and the possibility of multiple re-erection their main advantage is that almost the whole area of the double membrane envelope can be translucent. This makes the natural daylighting somewhat easier. However, it is necessary to balance the daylighting requirements and the solar gain in order to decrease or even prevent the possibility of building overheating, which was already discussed during the first international colloquium on pneumatic structures [4]. Nevertheless, the possibility of utilizing solar gains, in local temperate climate, it is necessary to additionally heat the building during the cooler period of the year and in the day hours when solar passive heating is not possible. The double membrane envelope is not thermally insulated, which is why the use of a suitable thermal insulation should improve the energy performance of air-supported structures. The idea of using transparent insulation materials (TIM) for improving thermal performance of lightweight membrane structures [42] and more specifically also pneumatic structures [43] is not new.

In the course of the presented research work, a proposal of a new double membrane constructional complex ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE was introduced. The composition included a 10 mm aerogel insulation blanket Spaceloft® put in-between two layers of polyethylene fabric (PEfabric) and inserted into double membrane envelope composed of, for solar radiation, highly transparent ethylene tetrafluoroethylene foil (ETFE). The thickness of the air channel used was 20 cm. For the purpose of investigating the influence of the proposed constructional complex implementation on the air-supported structure performance, the air-supported sports hall at primary school at Brezovica (Ljubljana, SI) was chosen as a case study building. Its envelope is composed of two PVC and PVDF coated [62] polyester fabrics (PES(1)2009/PES(2)2009).

The optical properties (luminous:  $TT_{vis,n-h}(\lambda)$  [%],  $DT_{vis,n-h}(\lambda)$  [%]); solar:  $TT_{sol}(\lambda)$  [%],  $TRW_{sol}(\lambda)$  [%],  $TRB_{sol}(\lambda)$  [%]) of fabrics (PES(1)2009, PES(2)2009, PEfabric), foils (ETFE) and the aerogel insulation blanket Spaceloft® were determined from the spectra, measured with Perkin Elmer 950 UV-Vis spectrometer equipped with integrating sphere. The samples' haze ( $H$  [%]) was determined according to procedure B given in American standard ASTM D1003 [83]. Spectral average values were calculated by integrating (Riemann sums) their spectral values, where suitable relative spectral power distribution of radiation source was applied depending on the wavelength range (source D65 [85] for visible light range; solar spectrum in accordance with ISO 9845-1 [86]; CIE standard source A). In case of luminous properties additionally the spectral luminous efficiency function for photopic vision of CIE 1931 standard observer  $V(\lambda)$  [85] or instead of it the colorimetric functions  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  [91]. The field spectrometry (determination of the geometry of experimental measurements of total transmittance  $T_{vis,h-h}(\lambda)$  [%] (normal-hemispherical; hemispherical-hemispherical) and the determination of reflection factor  $R_{vis,dif}(\lambda)$  [%]) were conducted using the portable spectrometer StellarNet Black Comet [88]. To obtain the thermal emissivity ( $e_T$ ) of the samples, measurements of longwave IR radiation reflectance  $R_{eT}(\lambda)$

[%] were done. Spectrometer Bruker Optics IFS 66/S FT-IR was used for this purpose. The infrared camera Testo 881-3 [89] was used to evaluate the transmittance of longwave IR radiation. The air temperature inside the channel between the membranes  $T_{a,k}(t)$  [ $^{\circ}$ C] and its velocity  $v_k(t)$  [m/s] were measured with multi-functional thermal anemometer TESTO 0560.4450 [93]. The daylighting of indoor playground of the sports dome at Brezovica was experimentally evaluated using daylight factor KDS [%]. Accordingly, global illuminance measurements  $E_{i,exp,glob}$  [lx] inside the dome and the contributions of zenithal sky element to the outdoor horizontal surface  $E_{o,exp,tube}$  [lx] were performed using two Voltcraft lightmeters [111], one of which ( $E_{o,exp,tube}$ ) had its angle of view narrowed ( $\sim 1$  sr). The diffuse illuminance of outdoor horizontal surface  $E_{o,calc,dif}$  [lx] was normalized on later values, taking into account the CIE standard overcast sky [102]. The inspection of the normalized illuminance values  $E_{o,calc,dif}$  [lx] was performed by using Eko Instruments spectroradiometer MS-711 [114]. The experimental measurements of climatic parameters ( $v_w$  [m/s],  $T_{a,i}$  [ $^{\circ}$ C],  $T_{a,o}$  [ $^{\circ}$ C],  $RH_{a,o}$  [%],  $RH_{a,i}$  [%]) for the evaluation of the thermal response of the sports hall Brezovica were achieved with weather station Conrad [117]. The thermal resistance  $R$  [ $m^2.K/W$ ] and the total transmittance of solar radiation  $g$  [-] of the double membrane envelope were determined in accordance with international standards ISO 15099:2003 [119] and ISO 9050:2003 [126] respectively. The daylighting predictions of the sports dome Brezovica with the new constructional complex ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE applied were made with the computer programme DAYSIM [129], which is based on backward raytracing method and daylight coefficient method. For the study of how the direct component of solar radiation influences the daylight factors, also the Perez all-weather sky luminance model [137] was used. DAYSIM also served as a tool for the simulation of the experimental illuminance measurements inside the sports dome Brezovica. The luminous efficacy of solar radiation was determined using also the Voltcraft irradiance meter [113]. EnergyPlus software was exploited for the simulation of the thermal response of the sports dome Brezovica and for the calculation of energy use for heating and cooling of the studied dome. The calculation of the dome's thermal response was used to evaluate occupants' thermal comfort. These calculations are based on the evaluation of the heat balance between surfaces, taking into account also radiative and convective heat fluxes. Thermal comfort (PMV [-] and PPD [%] indices) of the occupants in winter and the building's class were established in accordance with international standards SIST EN ISO 7730:2006 [172] and SIST EN 15251:2007 [173].

The outcomes of the research of fabrics' (PES(1)2009, PES(2)2009, PEfabric), foil's (ETFE), aerogel blanket's (aerogel) and various constructional complex compositions revealed that the total transmittance of visible light  $TT_{vis}$  [%] of aerogel blanket Spaceloft® is sufficiently high (4 %) to enable the improvement of the  $TT_{vis}$  of the double membrane envelope constructional complex. Further results confirmed that the envelope option ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE had approximately 2,6 times higher  $TT_{vis}$  than the original option PES(1)2009z/PES(2)2009z and had the same haze. Similar is true for the total transmittance of solar radiation  $TT_{sol}$  [%], which is about 1,8 times higher for ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE than the one for the existing envelope option PES(1)2009z/PES(2)2009z. Considering the full solar spectrum, it can be concluded that the envelope option ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE is cooler than the option PES(1)2009z/PES(2)2009z, meaning that it assumingly heats up less than PES(1)2009z/PES(2)2009z. In the range of longwave IR radiation between 2,5  $\mu$ m and 16  $\mu$ m, the emissivity  $\epsilon_T$  [-] of all material samples did not change in the surface temperature range between -20  $^{\circ}$ C in +50  $^{\circ}$ C and was equal to 0,60 for PEfabric and 0,96 for the remaining samples.

Field spectrometry was conducted in order to examine the influence of the incident light direction on the total transmittance of light and to obtain the reflection factor  $R_{vis,dif}$  [%], based on which the reflectance of coloured floor in the sports dome Brezovica was determined. The test of full hemisphere

light incidence in overcast sky conditions showed that aerogel blanket Spaceloft® transmitted more light than in case of only normal incidence. Therefore, further use of laboratory  $TT_{vis}$  value in daylighting calculations was considered to be on the safe side.

The field work at the case study of the air-supported building, sports hall Brezovica, was divided into two main parts: experimental work on the topic of daylighting of the studied building and experimental work on the topic of its thermal response, which included also the measurements of air temperature and its velocity in the double membrane envelope.

The experimentally determined daylight factor values (KDS [%]) were, over the whole grid of measurement sites, somewhat low (from 1,1 % to 1,7 %), leading to the conclusion that the sports dome Brezovica often requires additional artificial lighting. In the given sky conditions and values of sky illuminance between approximately 3000 lx and 4000 lx, sufficient illuminance of 300 lx or more of the floor in the dome would be achieved, if the daylight factor was higher than 10 %. At the same time, at the latitude of about 46° north it is possible to expect the sky illuminance of 5000 lx at least 90 % of the time in a year, between 9 AM and 8 PM [142]. This indicates that daylight factor of 6 % would be necessary to meet the criterion of  $E_{i,exp,glob} = 300$  lx. It is important to stress that low daylight values also help to prevent glare.

The velocity of air  $v_h$  [m/s] inside the air channel between the membranes, determined on the basis of field measurements, attained values between 0.01 m/s and 0.12 m/s and their fluctuations were found to be dependent on the building's exposure to solar radiation. The value of  $v_h$  achieved its maximum at about 11 AM, when the incidence angle of solar radiation on the part of the double membrane envelope, where the measurements were performed, was the lowest. The time when the extremes of the air temperature inside the channel  $T_{a,k,h}$  [°C] were observed did not overlap with the time the extremes of  $v_h$ . When the part of envelope, where the measurements were conducted, was directly insulated, the maximum values of  $T_{a,k,h}$  reached temperatures above 40 °C and are higher next to the external side of the channel than next to the inner side of the channel. Further on, average time profiles of temperature inside ( $T_{a,i}^{POVP}$  [°C]) and outside ( $T_{a,o}^{POVP}$  [°C]) the sports dome Brezovica were prepared. From the two, it was clear that the building was strongly overheating in free-running mode, when it was exposed to high outdoor air temperature and strong solar radiation. The overheating was so great that activities inside the dome were not possible, with the average maximum indoor air temperature  $T_{a,i}^{POVP}$  equal to 35.1 °C. On the other hand, the overheating was not so strong, when the air temperatures inside and outside the dome were similar. Assumingly, this was the consequence of high air change rate and, as later found, low g-value. During the time of measurement also the phenomenon of radiative sky cooling of the external membrane was recorded and observed, as the temperature next to external side of the air channel  $T_{a,k,h,i}$  was the lowest of all other temperatures ( $T_{a,i}$ ,  $T_{a,o}$ ,  $T_{a,k,h,o}$ ), between 24 AM and 6 AM and between 4 PM and 24 PM.

In line with expectations, the thermal resistance of the double membrane envelope was substantially improved by implementing 10 mm aerogel insulation blanket Spaceloft®. Its value, neglecting the contributions of indoor and outdoor boundary air layers ( $R_{si}$  and  $R_{se}$ ), increased on average by 6,5 times, from 0,13 to 0,85 m<sup>2</sup>.K/W. The g value increased in comparison to PES(1)2009/PES(2)2009, mainly due to the change of optical properties of the inner (from PES(2)2009z to PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) and outer (from PES(1)2009z to ETFE) membrane. In case of the new constructional complex ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, it was higher (~ 2,1 times, g equals 0,23 instead of 0,11). It is important to point out that the calculated thermal resistance values do not represent the actual thermal resistance of the new constructional complex, as the input data for its

calculation, prepared on the basis of in situ measurements in the existing air-supported dome at Brezovica, were taken as the same for all cases. Thus, this enables the analysis of how the same changes of convective heat transfer coefficient influence the thermal resistance of the double membrane complex. The results of thermal resistance calculations also show that the decrease in emissivity of the outer surface of inner membrane from 0.96 (PES(2)2009z) to 0,60 results in the increase of the air channel thermal resistance from  $\sim 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  to  $0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$ , which equals to approximately 13 times lower thermal resistance contribution than the contribution of 10 mm thick aerogel insulation blanket Spaceloft® ( $0,67 \text{ m}^2\text{K/W}$ ). Further study of the use of spectrally selective material in combination with or instead of PEfabric ( $TT_{sol} > 0,80$ ,  $e_T < 0,40$ ) [180], that would provide low thermal emissivity of the external side of the inner membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE and would at the same time have appropriate transmittance for solar spectrum, would expand the understanding of the influence that implementation of aerogel blanket Spaceloft®, as presented in this research work. The experimentally obtained values of air velocity inside the channel of PES(1)2009z/PES(2)2009z reveal that the heat transfer by convection is not to be neglected ( $h_{c,i}$  equals to 57 % do 75 %  $h_r$  value), whereas the influence of the range of measure air velocity fluctuations is negligible. In case of ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, its thermal resistance value varies less than 1 % of its value. Therefore, a closed air gap was presumed in the subsequent work based on EnergyPlus calculations.

To perform calculations and simulation of daylighting in the sports hall Brezovica using simulation software DAYSIM, it was first necessary to prove that the simplifications of the studied building geometry do not influence considerably the calculation's end result. At the same time, it was proved that the orientation of individual and planar building geometry model segments can be random. Comparison of the experimentally obtained daylight factors and their values calculated with DAYSIM for the case of overcast sky showed small difference between them (AAD values KDS  $< 0,09 \%$ ). On the basis of DAYSIM calculations it was also indicated that the ratio between the direct component of global solar radiation and its global value was in fact small (lower than 10 %) during the experimental measurements, confirming that the assumption of the CIE standard overcast sky conditions in the performed daylight factor calculations was justified. The precise determination of the mentioned ratio is possible only with the use of suitable measuring equipment. On basis of these findings, the use of DAYSIM for predicting the daylighting inside the sports dome Brezovica, with its initial constructional complex PES(1)2009z/PES(2)2009z substituted by ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE, was confirmed. As expected, the calculations revealed that daylight levels inside the air-supported dome Brezovica were improved. In case of ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE the average value of daylight factor at all calculation sites is about 3,2 times higher than in the calculation base case, PES(1)2009z/PES(2)2009z. Additionally, a study of how floor colour pattern influences the daylight factors' values and their distribution inside the existing dome was made. It was concluded that in case of an envelope with low visible light transmittance and high reflectance the daylight factor values and their distribution are highly dependent on the choice of the dome's floor colour pattern.

Before any EnergyPlus predictions of thermal response and energy use were made, the simulation of the thermal performance of the sports hall Brezovica during the in situ measurements of experimental environmental parameters in the summer 2013 was run. The comparison of fieldwork and simulation results showed that simulation, especially during daytime, somewhat overestimates the indoor air temperature  $T_{a,i}$ .

Even though the thermal resistance of ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE was substantially improved (by 3,2 times) ( $e_T$  of the external side of inner membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE was equal to 0,96) and the transmission heat losses through it lowered, the decrease in energy use for

heating in comparison with the case of PES(1)2009z/PES(2)2009z is not that high. This result is the consequence of the fact that the floor of the analysed sports dome (representing about 40 % of the building's external envelope) remained uninsulated and the air change rate was kept the same as it is for the sports dome Brezovica. Accordingly, for local weather data [164], the heating energy ( $Q_{heat}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ]) savings amounted to 22 % (from 195,4 to 151,6  $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ). Moreover, the results of the opaque case of ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE with 4 layers or 40 mm of aerogel insulation blanket Spaceloft® showed that the savings could be even lower (7 %) than in the case of translucent 10 mm thick insulation layer, assumingly due to the loss of solar gains. At the same time, the use of 40 mm of aerogel blanket Spaceloft® would almost eliminate the necessity for cooling  $Q_{cool}$  [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ], but would, on the other hand, prevent the building daylighting. It was calculated that the use of translucent, 10 mm thick aerogel blanket Spaceloft® would drastically (4,2 times) increase the use of energy for cooling in comparison with the existing envelope version, PES(1)2009z/PES(2)2009z.

In the discussion a comparison of the obtained optical and thermal properties of the ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE envelope with the optical and thermal properties of existing, aerogel insulated transparent glazing solutions was made. Comparison of gas heating energy consumption for heating the air-supported dome in Novo mesto and the estimated calculations based on EnergyPlus for the sports hall in Brezovica was also presented. Furthermore, the results of the calculated estimation of the aerogel blanket insulation cost return period, taking into account the price of the heating agent and the price of the insulation blanket, were disclosed. Similarly, as shown by Dowson [122], who investigated the performance of a solar air collector incorporating a granular aerogel cover, the results revealed that also in case of our results the use of transparent insulation material is cost justified.

Implementation of the quasi homogenous, 10 mm thick optically translucent aerogel insulation blanket Spaceloft® into constructional complex of double membrane air-supported envelope with correct choice of optical properties of other materials ( $e_T$  of the external side of inner membrane PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE was equal to 0,96) leads to improvement of building energy efficiency, prolongs the free-running period and improves the daylighting conditions inside the building. It also improves the thermal comfort of its occupants, dressed suitably (thermal resistance of clothes  $< 0,3 \text{ clo}$ ) for performing sports activities (activity level  $< 3,5 \text{ MET}$ ), and lowers air velocity in the dome. For activities with higher activity level than 3,5 MET even reduction of setpoint temperature may be considered due to lowered difference between  $T_{a,i}$  and MRT. Nevertheless, it is necessary to stress that the influence of implementing thermal insulation into the double membrane envelope on thermal comfort conditions cannot be generalised for other climates and domes. As expected, the indoor climate during summer in local, temperate climate is not improved by the proposed envelope solution, assumingly due to the increase in total solar radiation transmittance  $g [-]$ . Consequently, during summer time, also the energy use for cooling is increased. However, the use of air-supported structures is typically seasonal and the local climate allows for outdoor sport activities in summer.

The obtained range of values of optical and thermal properties of the double membrane envelope represent a contribution and support to the use of transparent insulation materials, such as aerogel blanket Spaceloft®, in building envelopes. The advantageous impact of carefully selected envelope materials (ETFE/PEfabric/aerogel/PEfabric/ETFE) on the daylighting, thermal performance and energy efficiency predictions of the Sports dome Brezovica was shown using computer simulation tools DAYSIM and EnergyPlus, supported by experimentally obtained data.

»Ta stran je namenoma prazna«

## VIRI

- [1] Otto, F., & Trostel, R. (1962). *Zugbeanspruchte Konstruktionen vol 1 : Pneumatische Konstruktionen*. Frankfurt: Ullstein Fachverlag.
- [2] Otto, F. (1995). *IL 35 Pneu und Knochen: Pneu and Bone*. Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart: Institut für leichte Flächentragwerke
- [3] Lanchester, F. W. (1918). *An Improved Construction of Tent Field Hospitals, Depots and Like Purposes*. British Patent No.: 119339.
- [4] McLean, W. (2014). Air Apparent: Pneumatic Structures. *The Architectural Review*, 235(1406), 104-109.
- [5] LeCuyer, A. W. (2008). *ETFE: Technology and design*. Basel: Birkhäuser.
- [6] Forster, B. (1980). A brief history of cable and membrane roofs. *Arup Journal*, 15(3), 6-10.
- [7] Lanchester, F. W. (1920). *Improvements on Construction and Roofings of Buildings for Exhibitions and like Purposes*. British Patent No.: 145193.
- [8] Dietz, A. E., Proffitt, R. B., Chabot, R. S., & Moak, E. L. (1969). *Design Manual for Ground Mounted Air-Supported Structures (Single- and Double-Wall) (Revised)*. Birmingham: Hayes International Corporation.  
[https://www.researchgate.net/publication/235160777\\_DESIGN\\_MANUAL\\_FOR\\_GROUND-MOUNTED\\_AIRSUPPORTED\\_STRUCTURES\\_SINGLE-AND\\_DOUBLE-WALL\\_REVISED](https://www.researchgate.net/publication/235160777_DESIGN_MANUAL_FOR_GROUND-MOUNTED_AIRSUPPORTED_STRUCTURES_SINGLE-AND_DOUBLE-WALL_REVISED) (Pridobljeno 20. 8. 2015).
- [9] Otto, F., & Drüsedau, H. (1983). *IL 15 Lufthallenhandbuch = Air hall handbook*. Stuttgart: Institut für leichte Flächentragwerke.
- [10] Pauletti, R.M.D.O. (2010). Some issues on the design and analysis of pneumatic structures. *International Journal of Structural Engineering*, 1(3-4), 217-240.  
<https://doi.org/10.1504/IJStructE.2010.03348>
- [11] Koch, K.M., Habermann, K.J., & Forster, B. (2004). *Membrane structures: innovative building with film and fabric*. Munich ; London: Prestel Publishing.
- [12] Gorman, M.J. (2005). *Buckminster Fuller : designing for mobility*. Milan: Skira ; London : Thames & Hudson [distributor].
- [13] The Estate of R. Buckminster Fuller (2005). *ABOUT FULLER – R. BUCKMINSTER FULLER, 1895 - 1983*.  
<https://www.bfi.org/about-fuller/biography> (Pridobljeno 29. 11. 2018).
- [14] Debeljak, M. (1975). *Ploskovno stabilizirane membranske nosilne konstrukcije : diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Gradbeni oddelek, Konstrukcijski odsek, [M. Debeljak].
- [15] Herzog, T. (1976). *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*. Stuttgart: Gerd hatje.
- [16] Architectural Association Publications (2016). *Cedric Price Works*.  
<http://cedricpriceworks.com/> (Pridobljeno 8. 6. 2017).
- [17] Paech, C. (2016). Structural Membranes Used in Modern Building Facades. *Procedia Engineering*, 155, 61-70. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.007>
- [18] Columbia University (2017). *Housing the Spectacle – Dome Case Studies*.  
[www.columbia.edu/cu/gsapp/BT/DOMES/dome1st.html](http://www.columbia.edu/cu/gsapp/BT/DOMES/dome1st.html) (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [19] Kostick, M. (2012). *Hubert H. Humphrey Metrodome Roof Snow Collapse of 2010*.  
<https://failures.wikispaces.com/Hubert+H.+Humphrey+Metrodome+Roof+Snow+Collapse+of+2010> (Pridobljeno 8. 6. 2017).
- [20] DUOL (2017). *Company website*.  
[http://www.duol.eu/duol\\_air\\_domes\\_1.html](http://www.duol.eu/duol_air_domes_1.html) (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [21] Vector Foiltec (2017). *Company website*.  
<http://www.vector-foiltec.com/> (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [22] Pohl, G. ed. (2010). *Textiles, polymers and composites for buildings*. Oxford [etc.]: Woodhead Publishing Limited.
- [23] Poirazis, H., Kragh, M., & Hogg, C. (2009). *Energy modelling of ETFE membranes in building applications*. Paper presented at the 11th International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.

- [24] Gómez-González, A., Neila, J., & Monjo, J. (2011). Pneumatic Skins in Architecture. Sustainable Trends in Low Positive Pressure Inflatable Systems. *Procedia Engineering*, 21, 125-132. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.1995>
- [25] Campbell, J. (1980). Environmental considerations of lightweight structures. *Arup Journal*, 15(3), 22-26.
- [26] Croome, D. (1983). Environmental and Energy Aspects of Flexible Structures. In F. Otto & H. Drüsedau (Eds.), *Lufthallenhandbuch = Air hall handbook*. Stuttgart: Institut für leichte Flächentragwerke.
- [27] Fernandes, L. L., Lee, E. S., & Ward, G. (2013). Lighting energy savings potential of split-pane electrochromic windows controlled for daylighting with visual comfort. *Energy and Buildings*, 61, 8-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.057>
- [28] Burek, S. A. M., Norton, B., & Probert, S. D. (1987). Air-supported greenhouses. *Applied Energy*, 26(4), 245-313. doi:[https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(87\)80001-6](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(87)80001-6)
- [29] Sanders, I., & Probert, S. D. (1990). Energy performances of air-supported habitable structures. *Applied Energy*, 37(3), 189-214. doi:[https://doi.org/10.1016/0306-2619\(90\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0306-2619(90)90032-9)
- [30] Krainer, A. (1993). *Toward Smart Buildings*. London: European Comission.
- [31] Scheuermann, R., & Boxer, K. (1996). *Tensile architecture in the urban context*. Oxford: Butterworth Architecture.
- [32] Mainini, A. G., Poli, T., Paolini, R., Zinzi, M., & Vercesi, L. (2014). Transparent Multilayer ETFE Panels for Building Envelope: Thermal Transmittance Evaluation and Assessment of Optical and Solar Performance Decay due to Soiling. *Energy Procedia*, 48, 1302-1310. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.147>
- [33] Vector Foiltec (2008). *The TEXLON® SYSTEM Technical Info Packet*. Bremen: Vector Foiltec.
- [34] Granqvist, C. G. (2008). Oxide electrochromics: Why, how, and whither. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(2), 203-208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.10.027>
- [35] Granqvist, C. G. (2007). Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(17), 1529-1598. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.031>
- [36] Gorgolis, G., & Karamanis, D. (2016). Solar energy materials for glazing technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 559-578. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.040>
- [37] Mihelčič, M., Šurca Vuk, A., Jerman, I., Orel, B., Švegl, F., Moulki, H., Faure, C., Campet, G., Rougier, A. (2014). Comparison of electrochromic properties of Ni<sub>1-x</sub>O in lithium and lithium-free aprotic electrolytes: From Ni<sub>1-x</sub>O pigment coatings to flexible electrochromic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120, 116-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.025>
- [38] Hoffmann, S., Lee, E. S., & Clavero, C. (2014). Examination of the technical potential of near-infrared switching thermochromic windows for commercial building applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123, 65-80. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.12.017>
- [39] Seeboth, A., Schneider, J., & Patzak, A. (2000). Materials for intelligent sun protecting glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 60(3), 263-277. doi:[https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00087-2)
- [40] Kiruthika, S., & Kulkarni, G. U. (2017). Energy efficient hydrogel based smart windows with low cost transparent conducting electrodes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 163, 231-236. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.039>
- [41] Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761-769. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>
- [42] Huntington, C. G. (1987). Permanent architectural fabric structures — performance of the new materials technology. *Construction and Building Materials*, 1(2), 63-70. doi:[https://doi.org/10.1016/0950-0618\(87\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(87)90001-8)
- [43] Zhang, L., Herzog, T., & Hauser, G. (2006). *Transparent thermal insulating multi-layer membrane structure for building envelope*. Paper presented at the International Conference on Adaptable Building Structures, the Netherlands.

- [44] Pierre, A. C., & Rigacci, A. (2011). SiO<sub>2</sub> Aerogels. In M. A. Aegeuter, N. Leventis, & M. M. Koebel (Eds.), *Aerogels Handbook* (pp. 21-45): Springer.
- [45] Buratti, C., & Moretti, E. (2012). Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems. *Applied Energy*, 97, 430-437. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.055>
- [46] Schultz, J. M., & Jensen, K. I. (2008). Evacuated aerogel glazings. *Vacuum*, 82(7), 723-729. doi:<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.10.019>
- [47] Wong, I. L., Eames, P. C., & Perera, R. S. (2007). A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. *Solar Energy*, 81(9), 1058-1071. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.004>
- [48] Hutchins, M. G., & Platzer, W. J. (1996). The thermal performance of advanced glazing materials. *Renewable Energy*, 8(1), 540-545. doi:[https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88914-2](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88914-2)
- [49] Schmidt, C., Goetzberger, A., & Schmid, J. (1988). Test results and evaluation of integrated collector storage systems with transparent insulation. *Solar Energy*, 41(5), 487-494. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90022-9)
- [50] Wittwer, V. (1992). Development of aerogel windows. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, 233-236. doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(05\)80462-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(05)80462-4)
- [51] Reim, M., Körner, W., Manara, J., Korder, S., Arduini-Schuster, M., Ebert, H. P., & Fricke, J. (2005). Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting. *Solar Energy*, 79(2), 131-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.032>
- [52] Aspen Aerogels (2008). *Safety Data Sheet – Spaceloft*. Northborough, Massachusetts: Aspen Aerogels.
- [53] Zavod za Gradbeništvo Slovenije (2012). *European Technical Approval ETA 11/0471*. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije.
- [54] Duol (2012). *Slica (sic.) membrane*. Duol. Brezovica pri Ljubljani.
- [55] Elnokaly, A., Chilton, J., & Wilson, R. (2002). Environmental aspects of tensile membrane enclosed spaces. Paper presented at Lightweight Structures in Civil Engineering LCSE 2002 IASSS PC, Warsaw, Poland.
- [56] Altomonte, S. (2009). Daylight for energy savings and psycho-physiological well-being in sustainable built environments. *Journal of Sustainable Development*, 1(3), 3-16. <http://dx.doi.org/10.5539/jsd.v1n3p3>
- [57] Figueiro, M. G., Rea, M. S., Stevens, R. G., & Rea, A. C. (2002). *Daylight and productivity-a possible link to circadian regulation*. Paper presented at the Fifth International LRO Lighting Research Symposium.
- [58] Zrim, G. (2009). *Preizkus uvedbe novega nanotehnološkega toplotno izolacijskega materiala spaceloft v gradbene konstrukcije : diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, [G. Zrim].
- [59] Aerogel CARD (2012). *Thermal transmittance report*. Aerogel CARD. Ljubljana.
- [60] Komplast (2012). *Poročilo o merjenje (sic.) toplotne prevodnosti šotor na OŠ Brezovica*. Komplast. Brezovica.
- [61] VTT Technical Research Centre of Finland (2008). *Determination of the thermal transmittance Um of the air pocket (two layers) structure*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- [62] Zrim, G., Mihelčič, M., Perše, L. S., Orel, B., Simončič, B., & Kunič, R. (2017). Light distribution in air-supported pneumatic structures: Comparison of experimental and computer calculated daylight factors. *Building and Environment*, 119, 110-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.005>
- [63] Krainer, A. (1991). Smart bioclimatic house. Paper presented at the Proceedings of the 9th annual conference on Passive and low energy architecture.
- [64] Krainer, A. (2008). *SUSTAINABLE? ARCHITECTURE, bioclimatic architecture*. [http://www.sara-project.net/article.php3?id\\_article=108](http://www.sara-project.net/article.php3?id_article=108). (Pridobljeno 13. 4. 2009)
- [65] Duol (2009). *Načrt objekta - tloris*. Duol. Brezovica pri Ljubljani.
- [66] Duol (2009). *Načrt objekta – pogledi*. Duol. Brezovica pri Ljubljani.
- [67] Google (2010). Google Sketchup (8.0.4811). Google.
- [68] Serge Ferrari (2017). *Company website*.

- [69] http://en.sergeferrari.com/ (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [70] Duol (2009). *Načrt objekta – prerez cevastega segmenta*. Duol. Brezovica pri Ljubljani.
- [71] Duol (2013). *Strojnica Športne dvorane Brezovica*.
- [71] Kistler, S. S. (1931). Coherent Expanded-Aerogels. *The Journal of Physical Chemistry*, 36(1), 52-64. doi:10.1021/j150331a003
- [72] Lee, K. P., Gould, G. L., Gronemeyer, W., & Stepanian, C. J. (2010). Advanced gel sheet production. USA Patent No.: US7780890.
- [73] Wei, G., Liu, Y., Zhang, X., & Du, X. (2013). Radiative heat transfer study on silica aerogel and its composite insulation materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 362, 231-236. doi:https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.11.041
- [74] Zhao, J.-J., Duan, Y.-Y., Wang, X.-D., & Wang, B.-X. (2012). Radiative properties and heat transfer characteristics of fiber-loaded silica aerogel composites for thermal insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(19), 5196-5204. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.022
- [75] Kraner Zrim, P., Mekjavić, I. B., & Rijavec, T. (2015). Properties of laminated silica aerogel fibrous matting composites for footwear applications. *Textile Research Journal*, 86(10), 1063-1073. doi:10.1177/0040517515591781
- [76] Lenzing (2017). *Company website*.  
http://www.lenzing-plastics.com/lenzing-plastics/home.html (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [77] Lampret, V., Peternelj, J., & Krainer, A. (2002). Luminous flux and luminous efficacy of black-body radiation: an analytical approximation. *Solar Energy*, 73(5), 319-326. doi:https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00119-6
- [78] Smith, G. B., & Granqvist, C. G. (2010). *Green nanotechnology : solutions for sustainability and energy in the built environment*. Boca Raton, Fla.: CRC ; London : Taylor & Francis [distributor].
- [79] Waldner, R., Flamant, G., Prieus, S., Erhorn-Kluttig, H., Farou, I., Duarte, R., Blomqvist, C., Kiossefidi, N., Geysels, D., Guerracino, G., & Moujalled, B. (2007). *BESTFACADE: Best Practice for Double Skin Facades EIE/04/135/S07.38652: WP5 Best Practice Guidelines*. Brusseles: European Comission.  
http://www.bestfacade.com/pdf/downloads/WP5%20Best%20practice%20guidelines%20report%20v17final.pdf (Pridobljeno 16. 2. 2011).
- [80] 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. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.011
- [81] Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilloye, P., & Stoffers, J. A. (2000). Review Paper (SE—Structures and Environment): Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(1), 7-38. doi:https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525
- [82] Orel, B., Jerman, I., Koželj, M., Perše, L.S., & Kunič, R. (2013). Materials Aspects of Solar Paint Coatings for Building Applications. *Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment*, 54, 120-173.
- [83] ASTM (2000). ASTM D 1003-00 Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing Materials.
- [84] Mihelčič, M., Jerman, I., Švegl, F., Šurca Vuk, A., Slemenik Perše, L., Kovač, J., Orel, B., & Posset, U. (2012). Electrochromic Ni<sub>1-x</sub>O pigment coatings and plastic film-based Ni<sub>1-x</sub>O/TiO<sub>2</sub> device with transmissive light modulation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 175-187. doi:https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.08.012
- [85] SIST (2011). SIST EN 410:2011 - Steklo v stavbah – Določevanje svetlobnih in sončnih karakteristik stekla. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.
- [86] ISO (1992). ISO 9845-1:1992 - Solar energy-Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions-Part 1. Geneva: International Organization for Standardization.

- [87] Griffiths, P. R., & De Haseth, J. A. (2007). *Fourier transform infrared spectrometry* (2nd ed / Peter Griffiths, James A. De Haseth, James D. Winefordner. ed.). Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience ; Chichester : John Wiley [distributor].
- [88] StellarNet (2010). *StellarNet Fiber Optic Spectrometer Manual*. Tampa, Florida: StellarNet.
- [89] Testo (2014). Testo 881 Thermal Imager for Preventive and Predictive Maintenance.
- [90] CIE (1984). CIE 63-1984 The Spectroradiometric Measurement of Light Sources. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage.
- [91] CIE (2004). CIE 015 – 2004 Colorimetry. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage.
- [92] ASTM (2007). ASTM D3464 Standard Test Method for Average Velocity in a Duct Using a Thermal Anemometer. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing Materials.
- [93] Testo (2013). Product Brochure Testo 0560.4450.
- [94] Testo (2013). Product Brochure Testo 0635.1041.
- [95] Testo (2013). *Handling instructions - Velocity measuring probe (thermal) 0635.1041*.
- [96] Tregenza, P. R. (1980). The daylight factor and actual illuminance ratios. *Lighting Research & Technology*, 12(2), 64-68. doi:10.1177/096032718001200202
- [97] Reinhart, C., & Breton, P.-F. (2009). Experimental Validation of Autodesk® 3ds Max® Design 2009 and Daysim 3.0. *LEUKOS*, 6(1), 7-35. doi:10.1582/LEUKOS.2009.06.01001
- [98] Hu, J., Konradi, C., & Place, W. (2012). *Using coefficient of utilization as a performance indicator for climate-based daylight modelling by physical experiments*. Paper presented at the ASES National SOLAR conference, Denver, Colorado.
- [99] Aiziewood, M. E. (1993). Innovative daylighting systems: An experimental evaluation. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 25(4), 141-152. doi:10.1177/096032719302500401
- [100] Reinhart, C. F., & Andersen, M. (2006). Development and validation of a Radiance model for a translucent panel. *Energy and Buildings*, 38(7), 890-904. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.006>
- [101] Reinhart, C. F., Bourgeois, D., Duburus, F., Laouadi, A., Lopez, P., & Stelescu, O. (2007). *Daylight 1-2-3—a state-of-the-art daylighting/energy analysis software for initial design investigations*. Paper presented at the 11th IBPSA Buildings Simulation Conference, Bejing, China.
- [102] Moon, P., & Spencer, D.E. (1942). Illumination from a non-uniform sky. *Illuminating Engineering*, 37(10), 707-726.
- [103] BSI (2008). BS 8206, 2008. Part 2: Lighting for Buildings. Code of Practice for Daylighting. London: British Standards Institution.
- [104] Boubekri, M. (2008). *Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies*. Oxford: Architectural Press.
- [105] Li, D. H. W. (2010). A review of daylight illuminance determinations and energy implications. *Applied Energy*, 87(7), 2109-2118. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.004>
- [106] Simm, S., & Coley, D. (2011). The relationship between wall reflectance and daylight factor in real rooms. *Architectural Science Review*, 54(4), 329-334. doi:10.1080/00038628.2011.613642
- [107] Yarham, R. E. (1999). *Daylighting and window design: Lighting guide LG 10, 1999*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers.
- [108] Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*, 3(1), 7-31. doi:10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001
- [109] Fakra, A. H., Boyer, H., Miranville, F., & Bigot, D. (2011). A simple evaluation of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate. *Renewable Energy*, 36(1), 298-306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.042>
- [110] Rea, M. S. (2000). *The IESNA lighting handbook : reference & application* (9th ed.). New York: Illuminating Engineering Society of North America.
- [111] Voltcraft (2014). Multifunctional Environment Measuring Instrument 4 in 1.Voltcraft.
- [112] Testo (2013). Product Brochure Testo 0560 0540.
- [113] Voltcraft (2009). PL-110SM Solar radiation measuring instrument. Voltcraft.
- [114] Eko Instruments (2015). New MS-711 Spectroradiometer. Eko Instruments.

- [115] CIE (2005). S 010/E: 2004 Photometry—The CIE System of Physical Photometry. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage.
- [116] Eko Instruments (2015). Pyranometer MS-410. Eko Instruments.
- [117] Conrad, 2011. *Navodilo za Namestitev in Uporabo Št. izd. : 672286 – Conrad USB Profesionalna brezžična vremenska postaja*. Conrad.
- [118] Krainer, A. in Perdan, R., 2013. *Računalniški program TOST Uporabniški priročnik*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente.
- [119] ISO (2003a). ISO 15099:2003 Thermal performance of Windows, Doors and Shading Devices – Detailed Calculations. Geneva: International Organization for Standardization.
- [120] Kladnik, R. (1983). *Nestacionarni temperaturni pojavi v ovojnem sklopu zgradbe*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente.
- [121] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1991). *Solar engineering of thermal processes*. New York: John Wiley & Sons.
- [122] Dowson, M., 2012. *Novel Retrofit Technologies Incorporating Silica Aerogel for Lower Energy Buildings : doctoral thesis*. London Brunel University, School of Engineering and Design [M. Dowson].  
<http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/7075> (Pridobljeno 6. 4. 2017).
- [123] Lienhard, J. H. , & Lienhard, J. H. (2001). *A heat transfer textbook: 3rd edition*. Cambridge, Mass.: Phlogiston Press.
- [124] Pinterić, M. (2018). *BUILDING PHYSICS: From physical principles to international standards*. Cham ; Springer International Publishing.
- [125] Davies, M.G. (2004). *Building heat transfer*. Chichester: John Wiley & Sons.
- [126] ISO (2003b). ISO 9050:2003 Glass in building -- Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors. Geneva: International Organization for Standardization.
- [127] Lighting Analysts Inc. (2017). *Lighting design software website*.  
<http://www.agi32.com> (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [128] Lighting Technologies Inc. (2017). *Company website*.  
<http://www.lighting-technologies.com> (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [129] Reinhart, C. F. (2006). *Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design*. Ottawa, Ontario: Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.
- [130] Ward, G. J. (1994). *The RADIANCE lighting simulation and rendering system*. Paper presented at the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Orlando, Florida.
- [131] Laouadi, A., Reinhart, C. F., & Bourgeois, D. (2007). *The daylight coefficient method and complex fenestration*. Paper presented at the 10th IBPSA Building Simulation Conference, Beijing, China.
- [132] Reinhart, C. F., & Herkel, S. (2000). The simulation of annual daylight illuminance distributions — a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods. *Energy and Buildings*, 32(2), 167-187. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00042-6)
- [133] Janak, M. (1997). *Coupling building energy and lighting simulation*. Paper presented at the International IBPSA Conference, Prague, Czech Republic.
- [134] Tsangrassoulis, A., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996). Theoretical and experimental analysis of daylight performance for various shading systems. *Energy and Buildings*, 24(3), 223-230. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00981-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00981-4)
- [135] Mardaljevic, J. (2000). Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 32(3), 111-118. doi:[10.1177/096032710003200302](https://doi.org/10.1177/096032710003200302)
- [136] Tregenza, P. R., & Waters, I. M. (1983). Daylight coefficients. *Lighting Research & Technology*, 15(2), 65-71. doi:[10.1177/096032718301500201](https://doi.org/10.1177/096032718301500201)
- [137] Perez, R., Seals, R., & Michalsky, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235-245. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I)

- [138] ISO (2004). ISO 15469:2004 (CIE S 011/E:2003) Spatial distribution of daylight -- CIE standard general sky. Geneva: International Organization for Standardization.
- [139] Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2011). Daylight performance predictions. In J. Hensen & R. Lamberts (Eds.), *Building Performance Simulation for Design and Operation*. London ; New York: Spon Press.
- [140] Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), 683-697. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00058-5)
- [141] Mardaljevic, J. (1995). Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 27(4), 181-188. doi:10.1177/14771535950270040701
- [142] CIE (1970). CIE 016 – 1970 Daylight. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage.
- [143] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- [144] Ward, G., & Shakespeare, R. (1998). *Rendering with Radiance : the art and science of lighting visualization*. San Francisco: Morgan Kaufmann.
- [145] Ehrlich, C. (1998). Modelling Transmitting media. In G. Ward & R. Shakespeare (Eds.), *Rendering with RADIANCE, The Art and Science of Lighting Visualization*. San Francisco: Morgan Kaufmann.
- [146] Ward, G. J., Rubinstein, F. M., & Clear, R. D. (1988). *A ray tracing solution for diffuse interreflection*. Paper presented at the Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.
- [147] Ward, G. (2013). *A Comprehensive Index of Manual Pages*. Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/manpages.pdf> (Pridobljeno 6. 4. 2017).
- [148] Modest, M. F. (2003). *Radiative heat transfer* (2nd ed. ed.). Amsterdam ; Boston: Academic Press.
- [149] Weisstein, E. W. (2018). Monte Carlo Method. *MathWorld--A Wolfram Web Resource*. <http://mathworld.wolfram.com/MonteCarloMethod.html> (Pridobljeno 7. 1. 2018).
- [150] Bourgeois, D., Reinhart, C. F., & Ward, G. (2008). Standard daylight coefficient model for dynamic daylighting simulations. *Building Research & Information*, 36(1), 68-82. doi:10.1080/09613210701446325
- [151] Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- [152] EnergyPlus, 2017. *EnergyPlus*. <https://energyplus.net/> (Pridobljeno 25. 5. 2017).
- [153] Bojić, M., Nikolić, N., Nikolić, D., Skerlić, J., & Miletić, I. (2011). Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions. *Applied Energy*, 88(7), 2407-2419. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.011>
- [154] LBNL (2011). *EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [155] LBNL (2011). *The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [156] Kim, D.-W., & Park, C.-S. (2011). Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus. *Energy and Buildings*, 43(12), 3635-3645. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.038>
- [157] Stegmaier, T., Schneider, P., Vohrer, A., & Planck, H. (2010). Developing and testing textiles and coatings for tensioned membrane structures. In G. Pohl (Ed.), *Textiles, polymers and composites for buildings* (pp. 129-188). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- [158] Testo (2013). VAC Measuring Instrument – Testo 445 – The Service Instrument for Ventilation and Air Conditioning Systems.
- [159] SunEarthTools (2017). *Tools for consumers and designers of solar*.

- [160] http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\_sun.php (Pridobljeno 26. 5. 2017).  
 Rakovec, J., Žagar, M., Bertalanic, R., Cedilnik, J., Gregoric, G., Skok, G., & Žagar, N. (2009). *Vetrovnost v Sloveniji*. Ljubljana: Založba ZRC SAZU.
- [161] Metais, B., & Eckert, E.R.G. (1964). Forced, mixed, and free convection regimes. *Journal of Heat Transfer*, 86(2), 295-296. doi:10.1115/1.3687128
- [162] Hollands, K.G.T., Unny, T.E., Raithby, G.D., & Konicek, L. (1976). Free convective heat transfer across inclined air layers. *Journal of Heat Transfer*, 98(2), 189-193. doi:10.1115/1.3450517
- [163] LBNL (2017). *RAL Colours*.  
<https://www.radiance-online.org/share/materials/ral-colors.html> (Pridobljeno 19. 1. 2017).
- [164] Meteotest (2009). Meteonorm (6.1). Meteotest.
- [165] SunEarthTools (2017). *Sun Position*.  
[https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=en](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en) (Pridobljeno 19. 9. 2016).
- [166] LBNL (2011). *Therm 6.3 / Window 6.3 NFRC Simulation Manual*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [167] ARSO (2015). *Povprečja mesečnih temperatur tal v različnih globinah v obdobju 1971-2000*. Ljubljana: ARSO.  
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/soiltemp/> (Pridobljeno 15. 5. 2015).
- [168] LVPO (2014). *Sončno obsevanje 2013 – Obdobje od 15.07.2013 do 15.08.2013*.
- [169] Duol (2015). *Meritve Balon Brezovica*. Duol. Brezovica pri Ljubljani.
- [170] Duol (2015). *TK PESIM 041*.
- [171] ARSO (2017). *Klimatološka povprečja 1971-2000 (izmerjene vrednosti)*. Ljubljana: ARSO.  
[http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by\\_location/ljubljana/climate-normals\\_71-00\\_ljubljana.pdf](http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_location/ljubljana/climate-normals_71-00_ljubljana.pdf) (Pridobljeno 10. 2. 2018).
- [172] SIST (2006). SIST EN ISO 7730:2006 - Ergonomija topotnega okolja – Analitično ugotavljanje in interpretacija topotnega ugodja z izračunom PMV in PPD vrednosti ter merili za lokalno topotno ugodje (ISO 7730:2005). Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.
- [173] SIST (2007). SIST EN 15251:2007 - Merila notranjega okolja za načrtovanje in ocenjevanje topotnih lastnosti stavb z upoštevanjem notranje kakovosti zraka, topotnega okolja, svetlobe in hrupa. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.
- [174] Marsh, S. J. (2005). Predicted Mean Vote Tool (Version v2): Square One
- [175] Scobalit (2008). *Scobatherm ISO Isolationselemente*. Scobalit.  
<https://www.yumpu.com/de/document/view/3637888/scobatherm-iso-isolationselemente-scobalit-ag> (Pridobljeno 22. 3. 2017).
- [176] Okalux (2008). *OKALUX Light Diffusing Insulating Glass*.  
[https://www.okalux.com/fileadmin/user\\_upload/aktuell/Downloads/Infotexte/Infotext\\_OKALUX\\_en.pdf](https://www.okalux.com/fileadmin/user_upload/aktuell/Downloads/Infotexte/Infotext_OKALUX_en.pdf) (Pridobljeno 15. 3. 2018).
- [177] Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
- [178] Kalwall (2008). *Light Transmission & Solar Heat Gain Coefficient*.  
[http://www.kalwall.com/wp-content/uploads/2015/03/Kalwall\\_VLT-SHGC-Chart.pdf](http://www.kalwall.com/wp-content/uploads/2015/03/Kalwall_VLT-SHGC-Chart.pdf) (Pridobljeno 13. 1. 2018).
- [179] ARSO (2014). *Klimatološka povprečja 1981-2010 (homogenizirane vrednosti) LJUBLJANA BEŽIGRAD*. Ljubljana: ARSO.  
[http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by\\_location/ljubljana/climate-normals\\_81-10\\_ljubljana.pdf](http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_location/ljubljana/climate-normals_81-10_ljubljana.pdf) (Pridobljeno 22. 1. 2018).
- [180] LBNL (2017). International Glazing Database No: 29.0. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory.  
<https://windows.lbl.gov/software/igdb> (Pridobljeno 19.05.2017)
- [181] SIST (2008). SIST EN ISO 6946:2008 Gradbene komponente in gradbeni elementi - Topotna upornost in topotna prehodnost - Računska metoda. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo.
- [182] Ribič, I. (2018). Kontaktne podatki stranke podjetja DUOL d. o. o. ter dimenzije tlorisca zračno podprte stavbe v Novem mestu. Message to: Zrim, G. 12. 4. 2018. Osebna komunikacija.

- [183] Volt, J. (2018). Delovanje in poraba zemeljskega plina za ogrevanje zračno podprte stavbe v Novem mestu. Telephone call to Zrim, G. 17. 4 2018. Osebna komunikacija.
- [184] Ribič, I. (2018). Volumen zračno podprte stavbe v Novem mestu. Message to: Zrim, G. 23. 4. 2018. Osebna komunikacija.

»Ta stran je namenoma prazna«