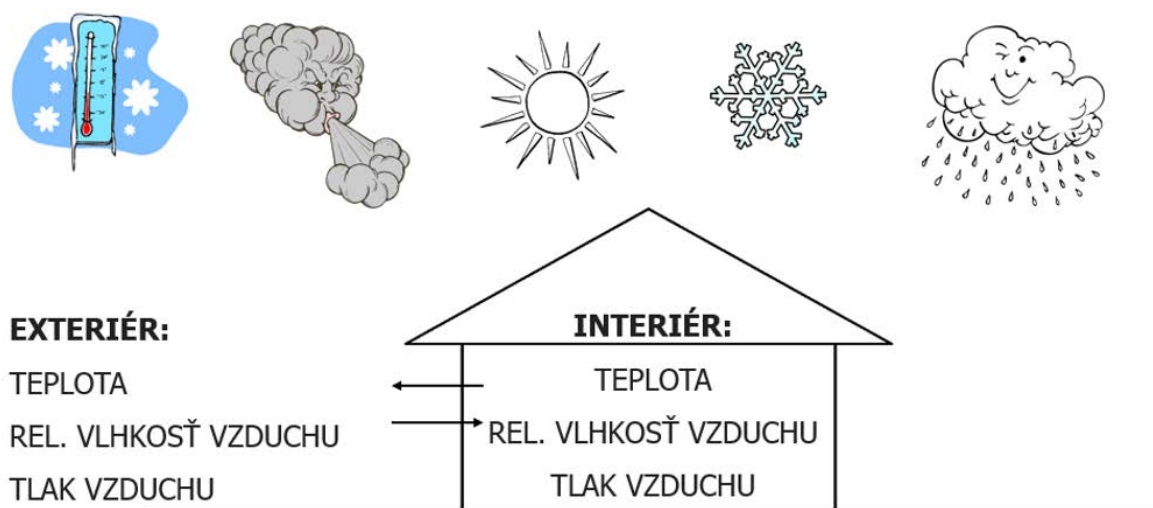


MERANIE VONKAJŠEJ KLÍMY V NADVÄZNOSTI NA POUŽITIE V STAVEBNÍCTVE

Ing. Peter Juráš, PhD.¹

¹ Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika

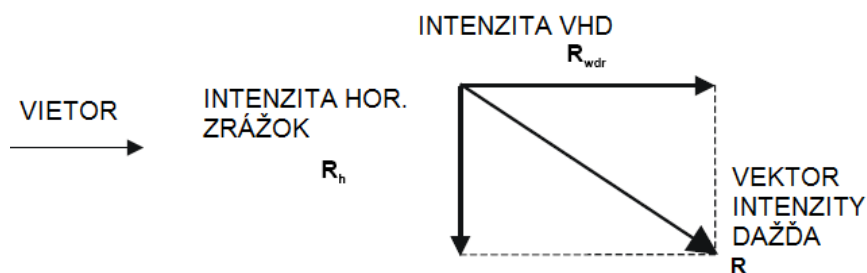
Obvodová stena je jednou z hlavných častí stavieb. Spolu so strešnou konštrukciou vytvára umeľé vnútorné prostredie budovy. Vnútorné prostredie je charakterizované tepelno-vlhkostným stavom, ktorý je rozdielny od tepelno-vlhkostného stavu vonkajšieho prostredia. Tepelno-vlhkostný stav prostredia (vonkajšieho aj vnútorného) je charakterizovaný teplotou, relatívnou vlhkosťou a tlakom vzduchu. Dôsledkom rozdielov medzi vnútorným a vonkajším prostredím je prenos tepla, vzduchu a vody v obalových konštrukciách. Tento prenos sa líši v priebehu rôznych ročných období a prevádzkových režimoch budovy. Charakteristickou vlastnosťou týchto javov je ich vzájomná spriahnutosť.



Obr. 84: Budova vytvárajúca chránené vnútorné prostredie a klimatické činitele, ktoré ho ovplyvňujú

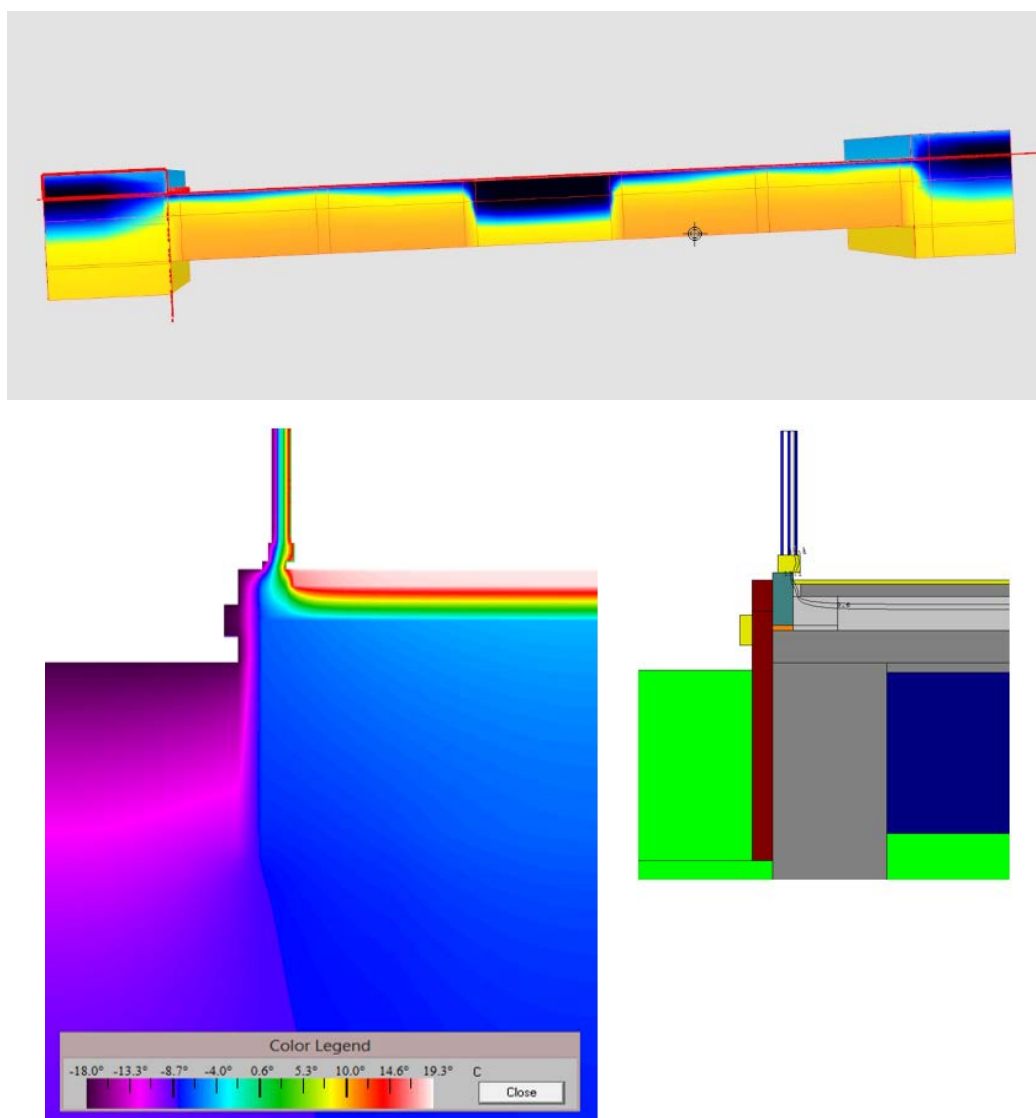
Pri rekonštrukciách a modernizáciách je dnes častým javom zateplovanie obvodových konštrukcií. Vyžaduje si to energetické aj ekologické hľadisko, keďže ceny energií a náklady na vykurovanie rastú každý rok. Spolu s nedostatočnou tepelnoizolačnou schopnosťou obvodových konštrukcií v rekonštruovaných budovách je častým problémom zvýšená vlhkosť v murive, ktorá môže byť spôsobená chýbajúcou, poškodenou alebo nefunkčnou hydroizoláciou, nevhodnou skladbou obvodového plášťa, nevhodne použitými materiálmi prípadne zmenou hydrogeologických pomerov.

Tepelno-vlhkostný režim obvodovej steny je do veľkej miery ovplyvnený vonkajšími poveternostnými podmienkami. Veľký vplyv na tento režim má u nechránených vonkajších konštrukcií vetrom hnaný dážď, ktorý vzniká pri súčasnom pôsobení vetra a dažďa a zaťažuje obvodové konštrukcie (obr. 85). Vetrom hnaný dážď je u nás v súčasnosti dosť zanedbaná problematika aj keď určité experimenty boli realizované už v 80-tych rokoch minulého storočia pre potreby navrhovania stykov panelových stavieb [1].



Obr. 85: Vektor intenzity dažďa a jeho rozklad na horizontálnu a vertikálnu zložku pri kombinovanom pôsobení vetra a dažďa [4].

Už desaťročia sa v oblasti projektovania a navrhovania konštrukcií uvažuje so zjednodušeným šírením tepla a vlhkosti v konštrukcii, ktorého ukážkou je stacionárny stav. To znamená, že okrajové podmienky, ktorým je konštrukcia vystavená sa nemenia (teplota a relatívna vlhkosť, ktorej zodpovedá tlak vodnej pary). Príkladom takéhoto riešenia sú bežné tepelnotechnické posúdenia konštrukcií pre splnenie požadovaných parametrov napr. podľa platnej normy STN 73 0540:2012 [2]. V tejto skupine programov sú napríklad programy z balíka Svodoba software pre jednorozmerné šírenie (Teplo) alebo dvojrozmerné (Area, Therm, KI real). Výsledkom je rozloženie teploty v konštrukcii (obr. 86) a posúdenie kondenzácie, či už pri návrhových teplotách alebo mesačnou metódou pre modelový rok, kedy sa berú do úvahy mesačné priemerné teploty vzduchu.



Obr. 86: Príklad rozloženia v nehomogénnych konštrukciách pri dvojrozmernom šírení tepla, hore program KI real a dole Therm. Stacionárne okrajové podmienky

So zvyšovaním vedeckého poznania sa dostávajú do popredia rôzne simulácie, ktoré dokážu reálnejšie ukázať, čo sa deje v konštrukciách, a tak sa vyhnúť rôznym poruchám na stavebných konštrukciách, pretože spolu s nástupom nových a modernejších materiálov dochádza paradoxne k vzrastaniu problémov na budovách. Tento jav je zapríčinený nasledujúcimi faktormi: používanie nedostatočne overených materiálov, nakoľko používanie materiálov v stavebníctve kladie vysoké nároky na životnosť, čo u nových materiálov ešte nie je overené ako sa budú správať po niekoľkých desaťročiach, druhým je vzájomná nekompatibilita medzi materiálmi ktorá sa môže prejavovať časom a je ťažké ju predpovedať pre prakticky neobmedzenú ponuku materiálov a tretím je celková komplexnosť budov a ich častí spojená s pracovnou disciplínou robotníkov pri zhotovovaní a údržbe počas životnosti.

Tvorbu simulačných programov môžeme zhruba rozdeliť na dva typy: programy na simuláciu spotreby energie a na riešenie prenosu tepla a vlhkosti. Programy na simuláciu spotreby energie v budovách (napr. ESP-r, vyvíjaný od roku 1974 na Glasgowskej univerzite alebo Energy Plus) riešia súčasný prenos tepla a vzduchu v rámci celej budovy, neskoršie verzie aj prenos vodnej pary cez konštrukcie. Väčšina simulačných programov umožňuje zahrnúť komplexné vonkajšie okrajové podmienky až na úrovni prúdenia vzduchu okolo budovy. Výsledkom týchto simulácií je ročný priebeh spotreby energie a parametrov vnútorného prostredia. Tieto programy sa však nedajú použiť na riešenie rôznych detailov a prenos vodnej pary a vzduchu v konštrukciách berú veľmi zjednodušene.

Na riešenie detailov a 1-rozmerného, prípadne 2-rozmerného prenosu tepla a vody cez konštrukcie (HAM) bolo vyvinutých tiež viacero simulačných programov (napr. WUFI, Delphin). Tieto programy dokážu zohľadniť okrem prenosu tepla a vody vo forme difúzie vodnej pary aj prenos vody vo forme kapilárneho transportu cez pórový systém. Vďaka tomu dokážu zohľadniť počiatočnú vlhkosť a následné vysychanie s priebehom času, prípadne navlhčenie pri nevhodnom návrhu skladby, okrajových podmienkach alebo vlastnostiach materiálov. Veľmi dôležitá vlastnosť je, že tieto programy sú schopné brať do úvahy vplyv vetrom hnaného dažďa.

V ďalšom období bolo cieľom vytvoriť komplexný simulačný nástroj na celú budovu (Annex 41), čo bolo možné dosiahnuť rozšírením programov na simuláciu spotreby energie o podrobnejší model tepelno-vlhkostného transportu v obvodovom plášti, rozšírením programov na simuláciu detailov alebo ich kombináciou. Výsledkom sú napríklad programy WUFI Plus, BSim alebo NPI.

Výsledkom Annexu 24 [3] bol koncept, ktorý by mal byť využívaný pri tepelno-vlhkostných simuláciách obvodového plášťa, pri stanovení vnútorných a vonkajších okrajových podmienok vo forme referenčných rokov. Podmienky na programy pre tepelno-vlhkostné simulácie a použité okrajové podmienky vo forme referenčných rokov vrátane vetrom hnaného dažďa udáva norma STN EN 15026:2007.

Rozvoj vedeckého poznania v oblasti stavebnej fyziky, aerodynamiky, osvetlenia a ďalších vedných odborov v teórii konštrukcií pozemných stavieb, spolu s presnejšími a zložitejšími simulačnými modelmi, prináša potrebu väčšieho rozsahu a častejších meraní vonkajšej klímy. V minulosti meteorologické služby merali vybrané klimatické veličiny jedenkrát denne, neskôr trikrát denne, využívané aj dnes pri mnohých staniaciach (7:00, 14:00, 21:00). S nástupom automatických staníc sa zaviedol kratší interval a v súčasnosti teoreticky zapisujú všetky merané veličiny v minútových intervaloch, ktoré sa následne priemerujú podľa potreby. Napriek tomu je rozsah meraných veličín týchto meteorologických staníc patriacich Slovenskému hydrometeorologickému ústavu obmedzený. V základe merajú úhrn zrážok, teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu, rýchlosť a smer vetra.

Simulačné programy, zaoberajúce sa prenosom tepla a hmoty v stavebných konštrukciách a budovách používajú ako vonkajšie okrajové podmienky súbory klimatických dát vo forme referenčných rokov (v angličtine TRY- test reference year). Pre jednu lokalitu môže existovať viacero referenčných rokov, výber veličín závisí od účelu zostrojenia referenčného roku. Týmto účelom môže byť simulácia celoročnej spotreby energie, simulácie tepelno-vlhkostného režimu obvodových stien atď. V našich podmienkach sa slovom referenčný zvykne označovať rok, ktorý je priemerný, resp. sa na jeho vytvorenie používali rôzne korelačné a syntetické metódy, kedy sa vlastne extrémny vylučovali zo súboru a takto zhotovený rok vlastne nebol ani reálny, lebo napríklad každý mesiac, ktorý ho tvoril bol prevzatý z iného kalendárneho roku.

Táto metodika sa v súčasnosti už neaplikuje, resp. v menšej miere a napríklad práve pre simulácie transportu tepla a vlhkosti v konštrukcii je žiadúce použiť extrémny rok, tzv. návrhový (z angličtiny DRY – design reference year).

Pre praktické použitie by mal byť tento rok modifikovaný, tak aby štatisticky zohľadňoval všetky podstatné záťažové situácie, tzn. mal by to byť štatisticky najchladnejší a najteplejší rok z 10-ročného obdobia. Z bezpečnostných dôvodov by sa mali v budúcnosti v rámci tepelno-vlhkostných simulácií používať dva hygrotermické referenčné roky (HRY). Najteplejší rok slúži na posúdenie možnosti letnej kondenzácie a najnepriaznivejší na kondenzáciu v zime a určenie ďalších problémov ako navlhčenie atď. Percentuálne vyjadrené, HRY – 10 % je najchladnejší resp. najnepriaznivejší rok s 10 % pravdepodobnosťou (najchladnejší rok z obdobia desať rokov) a HRY – 90 % je najteplejší za 10-ročné obdobie (90 % rokov je chladnejších). Zároveň by mal tento referenčný rok obsahovať čo najviac reálne nameraných klimatických údajov [4].

Na Slovensku boli takéto klimatické referenčné roky (najchladnejšie za posledných 10 rokov) spracované len na báze denných hodnôt pre Bratislavu – Koliba a Žilinu – Dolný Hričov. V doterajšej inžinierskej praxi na Slovensku absentuje používanie dynamických simulačných metód. Referenčný (návrhový) rok by mal zodpovedať požiadavkám Európskej normy STN EN 15026:2009 [5].

Keďže simulačné metódy pracujú s nestacionárnym tepelným stavom, potrebujú mať nestacionárne vyjadrenú i vonkajšiu klímu s krátkym časovým krokom (zvyčajne 1 hodina) ako súčasť okrajových podmienok. Referenčný rok (ďalej len RR) v plnom rozsahu 365 dní (neskrátený) je tvorený 8760 údajmi pre každý klimatický činiteľ. Referenčný rok predstavuje súbor celoročných hodinových chodov uvažovaných veličín, zohľadňujúce náhodný charakter jednotlivých prvkov, osobitosti ale aj vzájomné vzťahy medzi jednotlivými veličinami.

Orograficky veľmi členitá prevažná časť územia Slovenska sa prejavuje v charaktere jeho podnebia, pre ktoré je typická veľká zmena v závislosti od nadmorskej výšky, šírková pásmovitosť a charakteristický denný a ročný režim meteorologických prvkov. Karpaty sa vyznačujú veľkou morfológickou diverzitou a pásmovitým usporiadaním. Zložité orografické podmienky ovplyvňujú bezprostredne výskyt a rozloženie jednotlivých meteorologických prvkov.

Výber meteorologických staníc, ktorých údaje sú využité pre vytvorenie RR musí spĺňať určité predpoklady. Medzi kritériá výberu patria: hodinové údaje, minimálny počet rokov 10 (podľa [3] treba uvažovať s periódou opakovania 10 rokov), dostatočne reprezentatívna poloha pre určitú oblasť a samozrejme meranie požadovaných klimatických činiteľov. Príklad údajov zo širšieho obdobia je v tab. 12.

Je potrebné zdôrazniť, že nie všetky meteorologické stanice majú rovnako rozsiahly pozorovací program. Preto sa napríklad súbor klimatických údajov dopĺňa medzi relevantnými stanicami, napr. pre meteorologickú stanicu Bratislava – Letisko sa dopĺňa globálne a difúzne žiarenia zo stanice Bratislava – Koliba. Medzi meranými údajmi chýbajú hodnoty vetrom hnaného dažďa, ktorý sa u nás štandardne nemeria na žiadnej meteorologickej stanici.

		1996	1997	1998	1999	2000	2004	2005	2008	2009	2010	2011	2012
Teplota vzduchu (°C)	priem.	8.6	10.0	10.9	10.8	11.8	10.5	10.3	11.7	11.2	9.5	10.6	10.9
	max.	32.1	32.7	35.2	33.9	37.4	32.3	35.0	32.8	34.4	34.6	34.8	36.2
	min.	-19.9	-13.6	-11.7	-10.2	-10.9	-14.1	-13.7	-7.9	-16.7	-13.8	-11.2	-16.7
Rel. vlhkosť vzduchu (%)	priem.	77	74	73	74	69	73	73	71	72	76	72	69
	max.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	min.	16	22	22	22	15	24	22	23	18	17	18	17
Úhrn zrážok (mm/m²)		513	477	520	558	521	528	534	582	587	1012	674	599

Tab. 12: Základné údaje o jednotlivých klimatických rokoch pre meteorologickú stanicu Bratislava - Letisko

Úplný referenčný rok pozostáva z hodinových klimatických údajov (pre každý klimatický prvok 8 760 hodinových údajov) pre dvanásť mesiacov, minimálne požiadavky na rozsah napr. pre simulačný program WUFI tvoria:

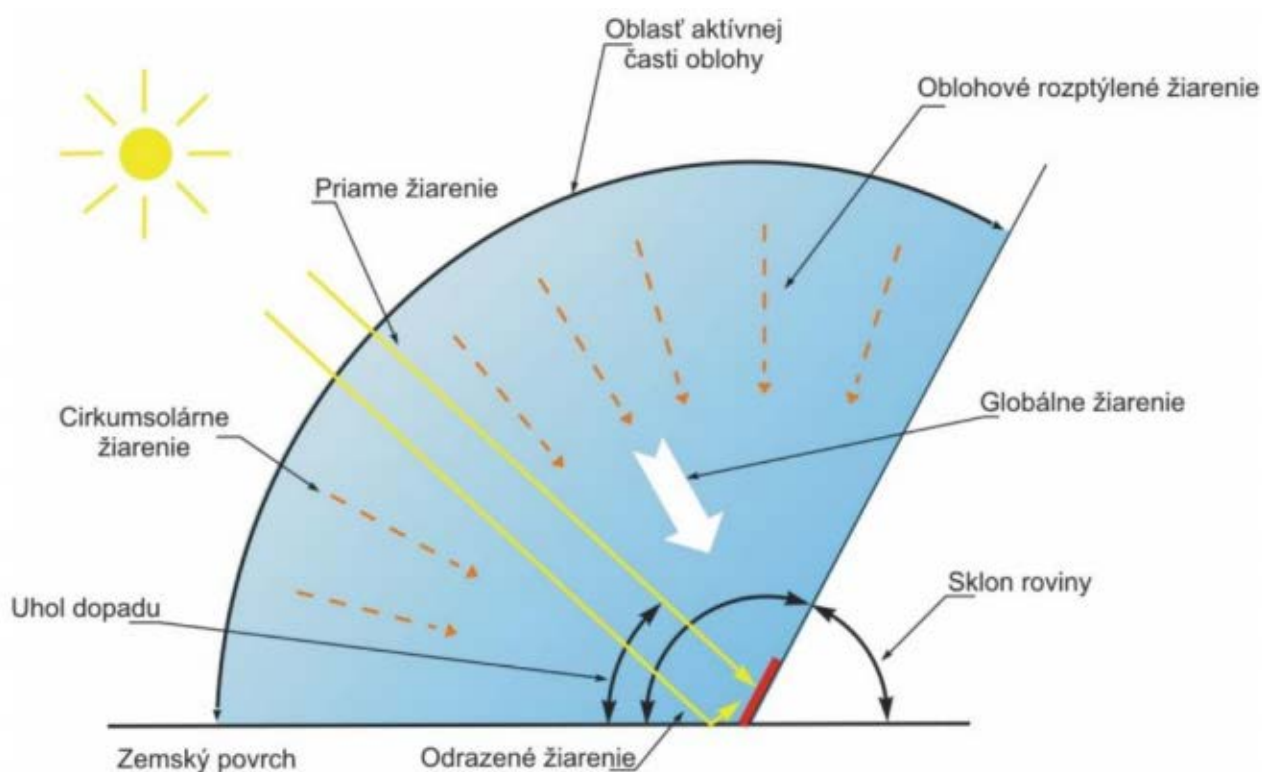
- teplota vonkajšieho vzduchu,
- relatívna vlhkosť vonkajšieho vzduchu,
- tlak vzduchu,
- globálne solárne žiarenie,
- difúzne solárne žiarenie,
- úhrn zrážok,
- rýchlosť a smer vetra.

Vplyv dôležitosti merania difúzneho žiarenia a vetrom hnaného dažďa bude zhodnotený v osobitných podkapitolách.

Slnčné žiarenie

Všetky vyššie uvedené parametre sú u nás merané štandardne Slovenským hydrometeorologickým ústavom s výnimkou difúzneho solárneho žiarenia, ktoré sa meria iba na niekoľkých staniách a jeho spracovanie má na starosti špecializované pracovisko SHMÚ v Poprade – Gánovciach – Aerologické a radiačné centrum (ARC), ktoré robí súčasne aj výskum spodných vrstiev atmosféry pomocou meteorologických balónov s rádiovými sondami.

Slnčné žiarenie môžeme rozdeliť na krátko a dlhovlnné. Pokiaľ sa jedná o krátkovlnné, delí sa z celkového globálneho na priame a potom difúzne, ktoré je odrážané rôznymi povrchmi a takisto z oblohy (obr. 87).



Obr. 87. Rozdelenie globálneho krátkovlnného slnečného žiarenia

Zvyčajné hodnoty globálneho žiarenia pre jednotlivé dni v závislosti od oblačnosti a ročného obdobia (mení sa výška slnka nad horizontom) sú na obr. 88). Takisto sa mení pomer medzi priamym a difúznym žiarením. Počas slnečného dňa je podiel difúzneho žiarenia asi 10% z globálneho, pri zamračenom alebo polooblačnom počasí je to výrazne nad 50%.



Obr. 88: Hodnoty globálneho slnečného žiarenia v závislosti od počasia

Na meranie krátkovlnného žiarenia sa používa pyranometer. Pre meranie obidvoch zložiek (globálne a difúzne) potrebujeme pyranometre dva, pričom jeden je tienení, zvyčajne manuálne ovládaným prstencom. Tento prstenec sa prestavuje v závislosti od blízkosti slnovratov zvyčajne každé dva až tri dni a počas celého dňa zakrýva dennú dráhu slnka na oblohe (obr. 89). Vzhľadom nato, že zakrýva aj časť oblohy, nielen samotné slnko tak je potrebné robiť následnú korekciu zvyšného tienenia.



Obr. 89. Pyranometer tienený prstencom pre meranie difúzneho slnečného žiarenia vyžaduje každodennú údržbu, najmä v zimnom období

Druhá možnosť pre meranie je použiť takzvaný pyrhelimeter, ktorý meria priame slnečné žiarenia, tzn. musí byť vždy natočený priamo na slnko. Často je súčasťou tzv. Solar trackeru (obr. 90), čo je zariadenie, ktoré na základe svojej presnej polohy sleduje pohyb slnka po oblohe a je plne automatizované. Difúzne žiarenia sa v tomto prípade meria taktiež pyranometrom, ten však nie je tienený prstencom ale guľou na ramene, ktorá vždy zakrýva priamo iba slnečný kotúč. Práve takéto zariadenie používajú v ARC v Gánovciach.

Prečo je práve difúzna zložka žiarenia dôležitá a nestačí iba globálne žiarenie je ukázané na nasledujúcom príklade v simulačnom programe WUFI Pro.



Obr. 90: Solar tracker používaný v ARC Gánovce. Pozostáva z pyrhelimetra (vpravo) a pyranometra (hore), ktorý je tienený guľou

Simulácia priebehu povrchovej teploty v programe WUFI Pro v závislosti od použitých okrajových podmienok

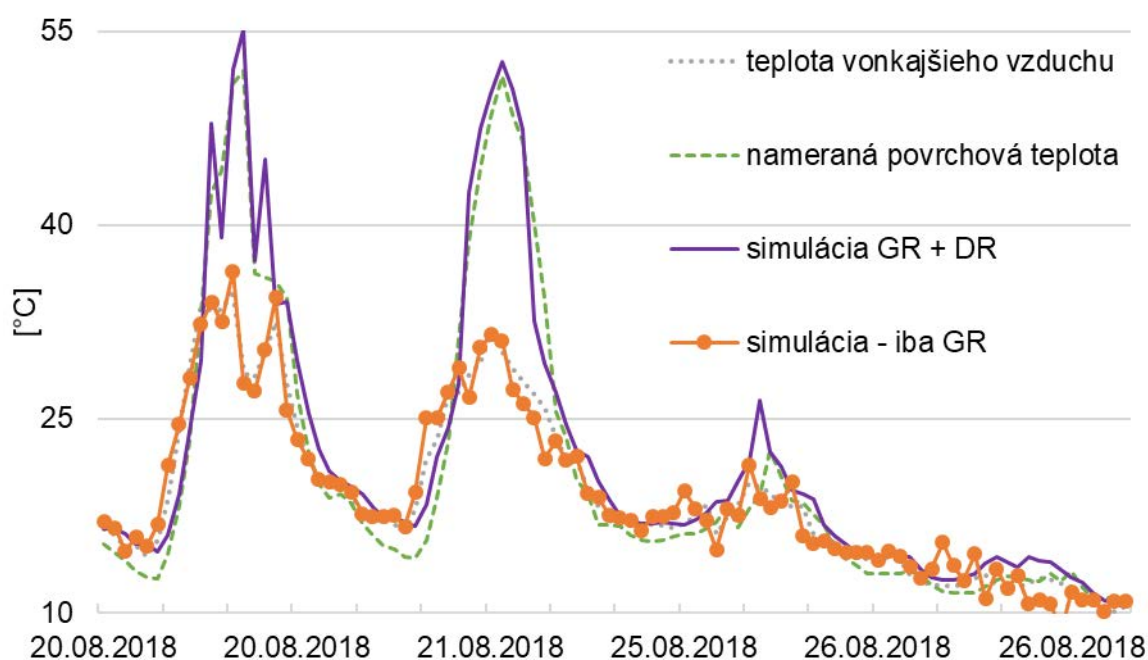
Pre zistenie vplyvu rôznych klimatických činiteľov zahrnutých do súboru vonkajších klimatických činiteľov bola realizovaná jednoduchá simulácia v programe WUFI Pro s použitím experimentálnej steny drevostavby v rámci výskumu realizovaného na Katedre pozemného staviteľstva a urbanizmu SvF UNIZA. Pohľad na túto stenu spolu s použitou skladbou je na obr. 91.



Obr. 91: Výskumná stena s južnou orientáciou a skladba použitého fragmentu pre simuláciu povrchovej teploty

Výsledky tejto simulácie sú na obr. 92. Vďaka dostupnosti reálne meraných povrchových teplôt a takisto vonkajšej klímy pomocou vlastnej meteostanice je možné exaktné porovnanie. Simulované varianty sú:

- iba globálne slnečné žiarenie,
- globálne aj difúzne slnečné žiarenie.



Obr. 92: Porovnanie meraných a simulovaných priebehov povrchových teplôt ukazuje výbornú zhodu pri použití difúzneho žiarenia a výrazne nižšie teploty počas prvých dvoch slnečných dní iba s použitím globálneho žiarenia

Výsledok ukazuje, že s použitím oboch zložiek sa výsledky simulácie podobajú veľmi dobre reálne nameranému priebehu na rozdiel od iba použitého globálneho žiarenia. Dôvod je v tomto prípade jednoduchý. Pomer medzi globálnym a difúznym žiarením určuje charakter oblačnosti. Pokiaľ je slnečný deň, priame žiarenie výrazne zohrieva povrchy stavebných konštrukcií. V tomto prípade nehrá celkom rolu absolútna hodnota ale pomer. Pokiaľ je nízky, deň je

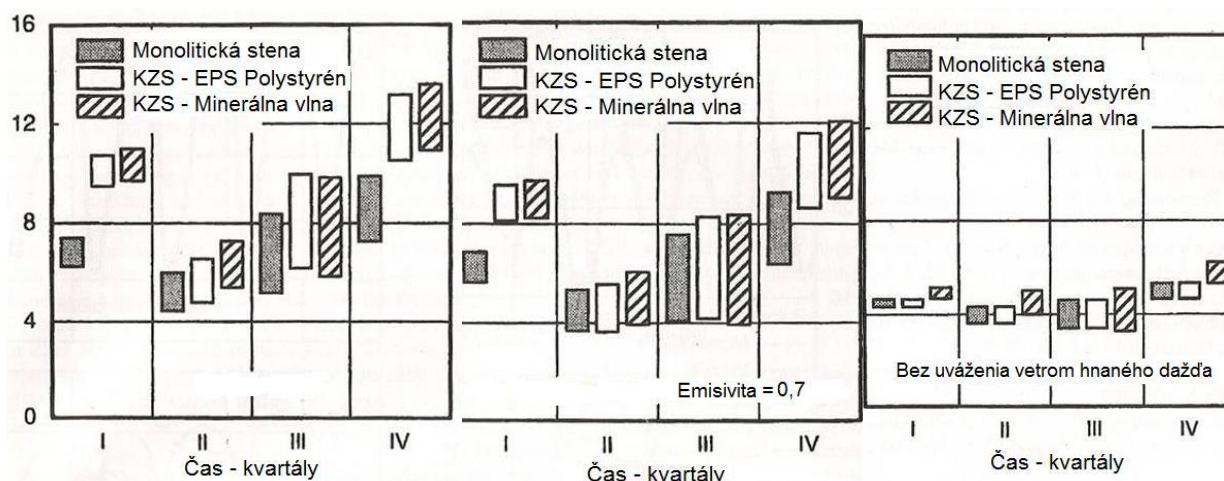
slnečný, naopak pokiaľ je vysoký tak teplota povrchov bude podobná vonkajšiemu vzduchu. To je zrejmé z porovnania, kde prvé dva dni sú slnečné a dva sú zamračené.

Výsledkom je, že pokiaľ nie je k dispozícii difúzne žiarenie, program funguje ale jeho výsledky sú výrazne podhodnotené. Vďaka tomu zostávame na strane bezpečnosti, pretože vyššia povrchová teplota zrýchľuje difúzny tok a možné odparovanie vody z konštrukcie.

Vplyv vetrom hnaného dažďa na obvodový plášť

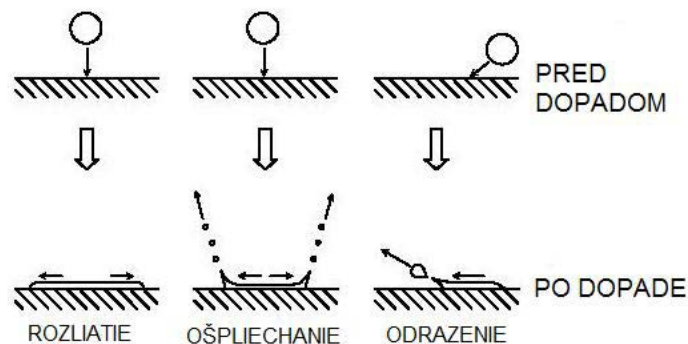
Pokiaľ skúmame tepelno-vlhkostné správanie obvodového plášťa alebo iných stavebných konštrukcií ktoré sú vystavené vplyvom poveternosti je nutné brať do úvahy vplyv vetrom hnaného dažďa, pretože ako je znázornené na obrázku (obr. 93) má hlavný vplyv na obsah vody v konštrukcii a tým ovplyvňuje nielen tepelný tok ale aj životnosť konštrukcie. Preto sú v norme STN EN 15 026, ktorá udáva požiadavky na simulačné programy požadované aj hodnoty vetrom hnaného dažďa pri tepelno-vlhkostných simuláciách. Okrajové podmienky sú nutné vo forme referenčných rokov. V súčasnosti existuje množstvo simulačných programov, ktoré tento vplyv dokážu zahrnúť, spomeňme napríklad WUFI (Fraunhoferov Inštitút pre stavebnú fyziku, Nemecko) alebo DELPHIN (TU v Drážďanoch, Nemecko). Možnosti získania intenzity vetrom hnaného dažďa sú nasledujúce:

- namerané hodnoty (u nás sa intenzita vetrom hnaného dažďa nemeria)
- konverzia nameraných hodnôt zrážok dopadajúcich na vodorovnú plochu (hodinové alebo denné úhrny)
- CFD simulácie



Obr. 93: Porovnanie obsahov vody v hmot.% pre rôzne druhy obvodových stien. Vľavo pohltivosť povrchu 0,3, v strede 0,7. Na obrázku vpravo sú obsahy vody bez uvažovania vplyvu vetrom hnaného dažďa [6]

Určenie zaťaženia vetrom hnaným dažďom na vertikálnych, alebo naklonených povrchoch stavebných prvkov je veľmi komplexná úloha pretože ak aj poznáme zaťaženie vetrom hnaným dažďom, nie je známe skutočné množstvo absorbovaného dažďa. Toto množstvo sa môže líšiť v závislosti na materiálových vlastnostiach povrchu a a type dažďa, pokiaľ používame hodinové hodnoty miesto skutočných dochádza buď k zvýšeniu alebo zníženiu zaťaženia vetrom hnaným dažďom a následnej absorpcii dažďovej vody do obvodovej konštrukcie a takisto po počiatočnom nasýtení povrchovej vrstvy často dochádza k stekaniu prebytočnej vody po povrchu steny. V závislosti od rýchlosti vetra kvapky dopadajú na fasádu pod rôznym uhlom a môže dochádzať k javom, ktoré sú znázornené na obrázku (obr. 94). Z tohto je zrejmé, že samotné zaťaženie konštrukcie vetrom hnaným dažďom nie je rovnaké ako je množstvo vody, ktorá penetruje do konštrukcie. Pri odraze dažďovej kvapky od fasády sa veľká časť vody odrazí a iba malá časť penetruje do konštrukcie.



Obr. 94: Znázornenie troch javov, ku ktorým môže dôjsť pri dopade dažďovej kvapky na konštrukciu [7]

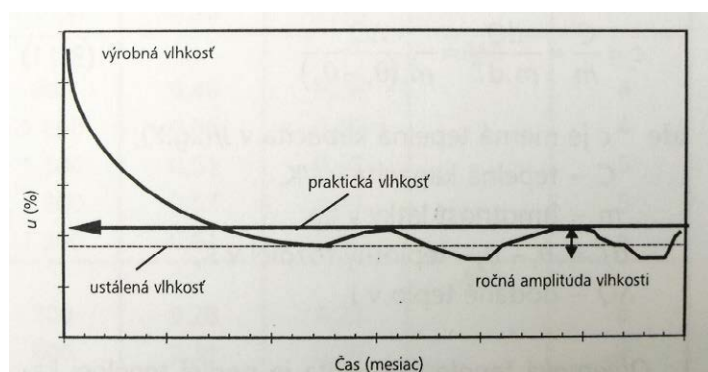
Pokiaľ je známe zaťaženie povrchu obvodovej konštrukcie vetrom hnaným dažďom, hustota povrchového toku je počítaná ako súčin normálneho zaťaženia dažďom a pohltivosti dažďa. Použitie pohltivosti dažďovej vody umožňuje brať do úvahy fakt, že časť vetrom hnaného dažďa sa pri dopade odráža od konštrukcie späť. Hodnoty tohto faktora závisia od drsnosti povrchu a typu dažďa. Pohltivosť dažďovej vody je priamo úmerná pórovitosti povrchu materiálov [8]. Po počiatocnom nasýtení povrchu konštrukcie sa však okrajová podmienka druhého druhu mení na okrajovú podmienku prvého druhu, pri ktorej uvažujeme relatívnu vlhkosť povrchu rovnú jednej [8].

Pokiaľ na obalovú konštrukciu pôsobí súčasne dážď a súčasne sila spôsobujúca pohyb vody po povrchu, sú vytvorené podmienky na prenikanie vody v obalovej konštrukcii. Toto prenikanie vody sa môže vyskytnúť medzi stykmi prvkov obalových konštrukcií, medzi škárami a stykmi transparentných konštrukcií s netransparentnými atď. Sily, ktoré spôsobujú penetráciu dažďovej vody sú nasledujúce:

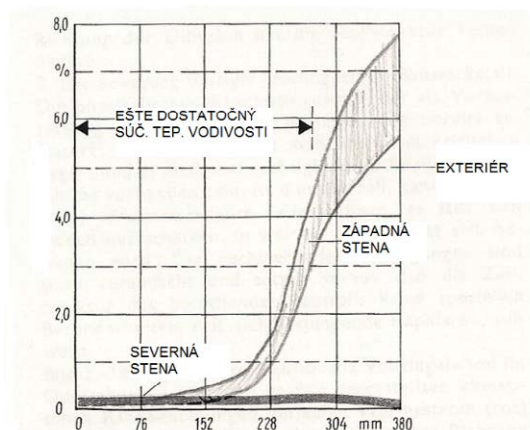
- kapilárne nasávanie trhlínami (šírka trhliny $\leq 0,5$ mm),
- tlak vetra v trhlínach ($0,01 < \check{s} < 5$ mm),
- vzduchové prúdy v trhlínach (so šírkou $> 0,5$ mm),
- gravitačná sila v trhlínach (so šírkou $< 0,5$ mm),
- kinetická energia (so šírkou $> 4\sim 5$ mm) |.

Z hľadiska hydrodynamiky je kritickým zaťažením budov vetrom hnaný dážď, t.j. spoločné pôsobenie vetra a dažďa [1].

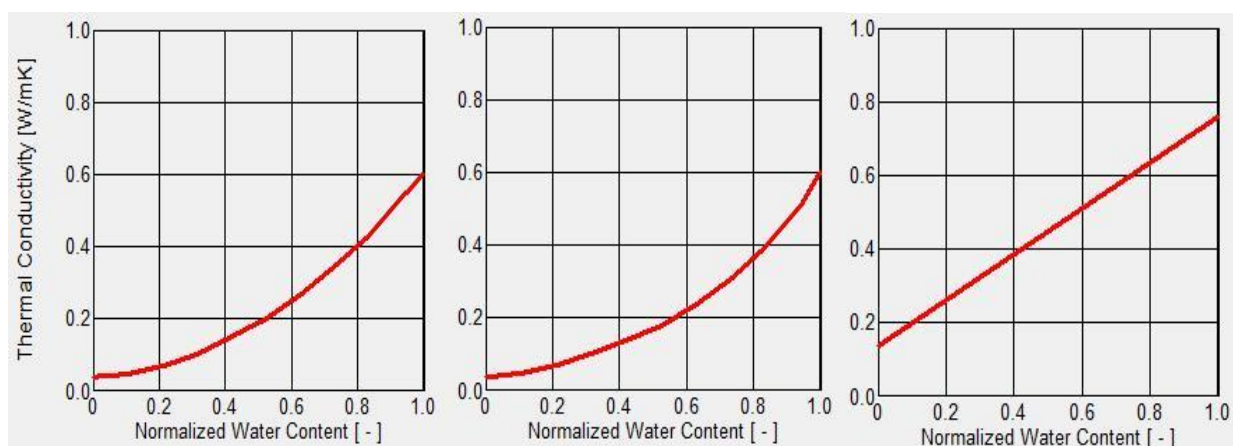
Väčšina obvodových plášťov je zhotovených tradičnou technológiou z kusových tvaroviek (keramické alebo pórobetónové). Pri výstavbe sa preto do konštrukcie zabudováva technologická vlhkosť. Postupom času dochádza k vysušovaniu muriva a zlepšovaniu tepelnoizolačných vlastností jednotlivých materiálov (obr. 95). Pri zlom návrhu skladby konštrukcie môže dôjsť aj k opačnému javu. Príčinou problémov môže byť prenikanie vetrom hnaného dažďa do konštrukcie (obr. 96) alebo kondenzácia na povrchu alebo vo vnútri konštrukcie, vztlínanie vody pri poškodenej hydroizolácii atď. Pórovité materiály sú nasiakavé a voda, ktorá je v ich póroch ovplyvňuje súčiniteľ tepelnej vodivosti. Takisto tepelnoizolačné materiály je nutné chrániť pred vodou a vlhkosťou (obr. 97).



Obr. 95: Priebeh vlhkosti v čase od výroby konštrukcie do ustálenia vlhkosti [10]



Obr. 96: Porovnanie obsahu vody v murovanej stene hrúbky 380 mm v závislosti od orientácie k svetovým stranám [11]



Obr. 97: Hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti λ v závislosti od obsahu vody v materiály. Vľavo minerálna vlna, v strede expandovaný polystyrén, vpravo pórobeton. Grafy pochádzajú zo simulačného programu WUFI

So zvýšením tepelnej vodivosti k dochádza k zníženiu tepelného odporu obvodovej konštrukcie, čo môže mať za následok napríklad zníženie povrchovej teploty, zvýšený tepelný tok cez konštrukciu a zvýšenie tepelných strát objektu, vznik plesní na vnútornom povrchu, mechanické poškodenie povrchovej úpravy v dôsledku mrazu a estetické poruchy. Na obr. 98 je zobrazená stena panelového bytového domu dlhodobo vystavená účinku vetrom hnaného dažďa.

Vetrom hnanému dažďu je v najväčšej miere vystavená náveterná strana objektu. Zaťaženie vetrom hnaným dažďom narastá so vzrastajúcou výškou objektu. Aby sme zabránili penetrácii vody do konštrukcie je potrebné venovať zvýšenú pozornosť povrchovej úprave náveternej strany. Môže byť napríklad chránená vodonepriepustným obkladom, ktorý sa používal už v minulosti na základe empirických skúseností (obr. 99), presahom odkvapu alebo geometriou fasády, použitím vhodného materiálu na vonkajšiu povrchovú úpravu alebo hydrofobizáciou povrchu.



Obr. 98: Fasáda panelového bytového domu vystavená účinkom vetrom hnaného dažďa

Pre zistenie vplyvu vetrom hnaného dažďa na referenčné skladby stien sa zohľadnili nasledujúce faktory:

- orientácia k svetovým stranám (S, J, V, Z, SZ)
- bez dažďa
- rozdielna výška budovy (pozícia fragmentu na fasáde)
- faktor absorpcie dažďovej vody (rain reduction factor r.r.f.: 0,2; 0,5; 0,7)
- pohltivosť povrchu (0,2; 0,4; 0,7)
- polymérna omietka (mikrotrhliny)

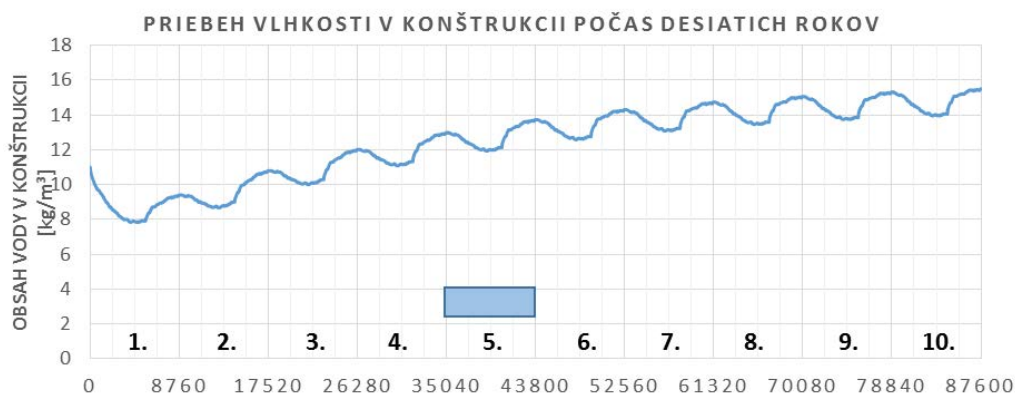
Samotné simulácie začínali dátumom 1.10. Počiatočné podmienky v konštrukcii boli teplota 20 °C a relatívna vlhkosť 80 %. Dĺžka simulácie bola nastavená na obdobie piatich rokov (5 krát za sebou rovnaký vybraný klimatický rok), kedy už bolo jasné, že ročný priebeh vlhkosti v konštrukcii je prakticky rovnaký (ročná amplitúda vlhkosti) a nedochádza už k akumulácii ďalšej vlhkosti alebo vysychaniu (obr. 100). Samozrejme, že takáto simulácia vyjadruje viac-menej najhorší priebeh, pretože sa väčšinou v skutočnosti pravidelne striedajú lepšie (priaznivejšie) a horšie roky.



Obr. 99: Azbestocementové šablóny na drevenom rošte ako ochrana náveternej strany fasády proti vetrom hnanému dažďu



Obr. 100: Znáznornenie priebehu vlhkosti v konštrukcii počas piatich rokov. Pre podrobné porovnanie jednotlivých rokov bol uvažovaný práve piaty rok, kedy už bola ročná amplitúda vlhkosti ustálená (nedochádza k ďalšej akumulácii vlhkosti ani k výraznému vysychaniu)

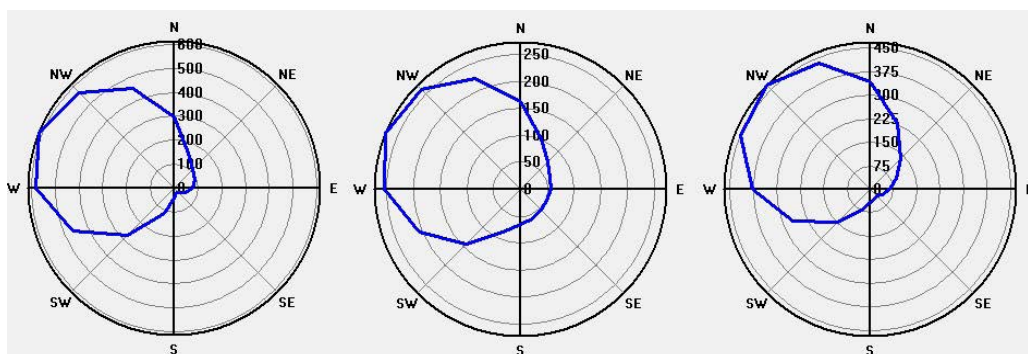


Obr. 101: Znáznornenie priebehu vlhkosti v konštrukcii zateplenej KZS počas desiatich rokov s uvažovaním penetrácie 1 % vetrom hnaného dažďa za rovinu tepelnej izolácie. Pre podrobné porovnanie jednotlivých rokov bol uvažovaný piaty rok aj keď sa nejednalo ešte o celkom ustálenú ročnú amplitúdu vlhkosti

Pre vnútorné okrajové podmienky bol použitý rok odvodený pomocou modelu zodpovedajúceho norme STN EN 15026:2007 z klimatického referenčného roku (podľa použitého ref. roku – 2010, 2008,...) Produkcia vodnej pary bola zvolená normálna.

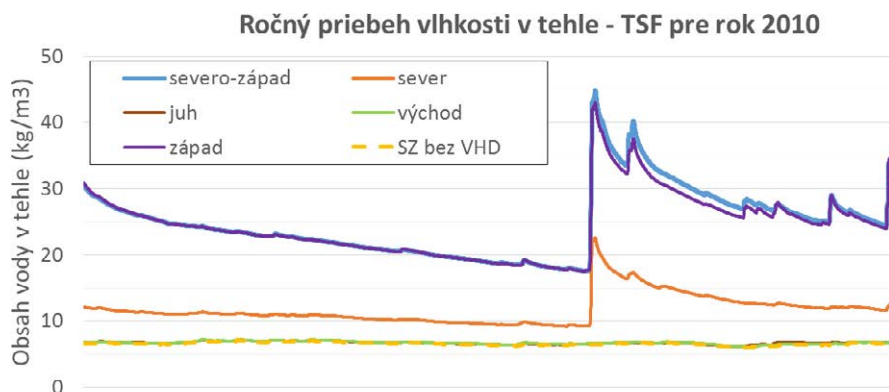
Podrobnejší opis jednotlivých faktorov a výsledkov je nasledujúcich obrázkoch.

- 1) orientácia k svetovým stranám zohráva dôležitú úlohu, pretože zatiaľ čo náveterná strana je zaťažená VHD, ostatné strany sú prevažne suché. Porovnanie jednotlivých strán je vhodné na zistenie vplyvu VHD na tepelno-vlhkostný režim. Obr. 97 znázorňuje veternú ružicu vetrom hnaného dažďa – z ktorej svetovej strany koľko prichádza vetrom hnaného dažďa.



Obr. 102: Veterná ružica vetrom hnaného dažďa pre lokalitu BA – Letisko. Vľavo rok 2010 (najvlhkejší), v strede 1997 (najsuchší), vpravo 2008 (najteplejší)

- 2) Porovnanie simulácie náveternej strany s pôsobením vetrom hnaného dažďa a bez neho za účelom znázornenia vplyvu.



Obr. 103: Výsledky simulácie nezateplenej tehlovej steny s orientáciami k rôznym svetovým stranám ukazujú výrazne vyšší obsah vody pri náveternej orientácii.

- 3) Zataženie budovy VHD vzrastá s výškou od terénu. Odporúčané hodnoty faktora úmernosti, ktorý program používa pri konverzii dažďa dopadajúceho na horizontálny povrch na vetrom hnaný dážď sú od 0,05 do 0,2. Na obr. 104 je uvažovaná hodnota 0,2, čo znamená výrazne vyššie zataženie a obsah vody ako na obr. 103.



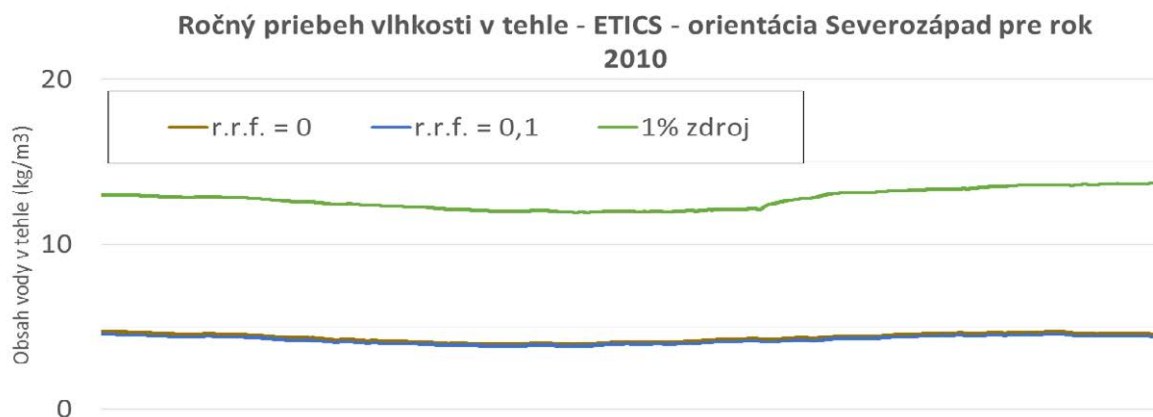
Obr. 104: Výsledky simulácie nezateplenej tehlovej steny pre miesto vo výška do 20 m nad terénom s uvažovaním vetrom hnaného dažďa a bez.

- 4) Faktor absorpcie dažďovej vody (r.r.f.) je dôležitým parametrom, ktorý určuje koľko vody sa dostane do konštrukcie kapilárnym transportom z povrchu a koľko sa jej odrazí. Je závislý od intenzity VHD, dĺžke trvania dažďa (saturácia povrchovej vrstvy). Štandardne je v simulačnom programe predvolená hodnota 0,7, nakoľko jeho hodnota nie je bežne udávaná pre stavebné materiály.



Obr. 105: Výsledky simulácie nezateplenej tehlovej steny pri použití rôznych faktorov absorpcie dažďovej vody. Každá omietka má vlastnú hodnotu.

- 5) Pohltivosť povrchu ovplyvňuje vysychanie konštrukcie pokiaľ na ňu pôsobí priame slnečné žiarenie, nakoľko má vplyv na povrchovú teplotu. Tmavší povrch (vyššia pohltivosť) dosahuje vyššiu teplotu povrchu a tým rýchlejšie vysychanie konštrukcie (obr. 93).
- 6) Riešenie zateplených konštrukcií pomocou vonkajšieho kontaktného zateplovacieho systému (ETICS) je v dvoch variantoch: priepustnosť dažďa povrchovou úpravou na úrovni 10 %, čo zodpovedá napr. mikrotrhlinám a simulácia s použitím vnútorného zdroja vlhkosti na úrovni 1 % množstva VHD za rovinou tepelnej izolácie ako príklad nesprávneho izolácie ostenia okna a penetrácia dažďa do konštrukcie prasklinami (WUFI Tutorial 2012).



Obr. 106: Výsledky simulácie steny zateplenej ETICSom s polymérnou omietkou a uvažovaním penetrácie vody trhlinami.

Ako ukazujú výsledky simulácie či už povrchových teplôt alebo vplyv vetrom hnaného dažďa, jedná sa o dôležité činitele, ktoré ovplyvňujú reálnosť výsledkov simulácií. Z tohto dôvodu a takisto z dôvodu absencie, dostupnosti a kvality klimatických údajov od SHMÚ disponuje katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu vlastnými meteostanicami a takisto komplexným systémom pre monitorovanie vonkajšej klímy okolo budovy Výskumného centra.

Samostatne stojaca meteorologická stanica umiestnená na streche budovy stojacej severne od budovy Výskumného centra (obr. 107) umožňuje meranie rozšíreného súboru klimatických veličín. Oproti pôvodnej meteorologickej stanici, ktorá je v súčasnosti umiestnená v meteozáhradke na voľnom priestranstve, prináša meranie difúzneho žiarenia, ktorého absencia vnáša veľkú neistotu pri simuláciách počas zamračených jesenných dní najmä pri programoch, ktoré majú prepracované modelovanie slnka, ako napríklad Esp-r. Takisto bude možné merať dlhovlnné žiarenie oblohy pomocou pyrgeometra, ktoré nájde uplatnenie takisto pri simuláciách napríklad v programe WUFI. Ďalším benefitom je porovnanie výsledkov v rámci areálu Žilinskej univerzity, ktorý je pomerne rozľahlý a ponúka možnosť porovnania mestských teplotných ostrovov.

Pokus o odstránenie problémov zmeny klímy v okolí budovy oproti voľnému priestranstvu bola vybudovaná unikátna pozorovacia meteorologická základňa, ktorá je tvorená 36-timi fasádovými meteostanicami (obr. 108). Táto unikátna základňa, nielen na slovenské pomery, ale zrejme aj svetové, umožňuje dôkladnú analýzu vonkajšej klímy v lokalite sídla komplexu Žilinskej Univerzity na Veľkom Dieli v Žiline. Merania sa dajú rozdeliť na meranie klímy a vlastností v kvázi voľnom prúde (vietor) a meranie na 5. podlažnej budove Výskumného centra ŽUŽ. Práve meranie na fasáde budovy je do veľkej miery unikátne, pretože merania v reálnej mierke v takomto rozsahu sú zriedkavé aj vo svete pre svoju finančnú náročnosť.



Obr. 107: Samostatne stojaca meteorologická stanica, umiestnená na streche budovy laboratórií, severne od budovy Výskumného centra

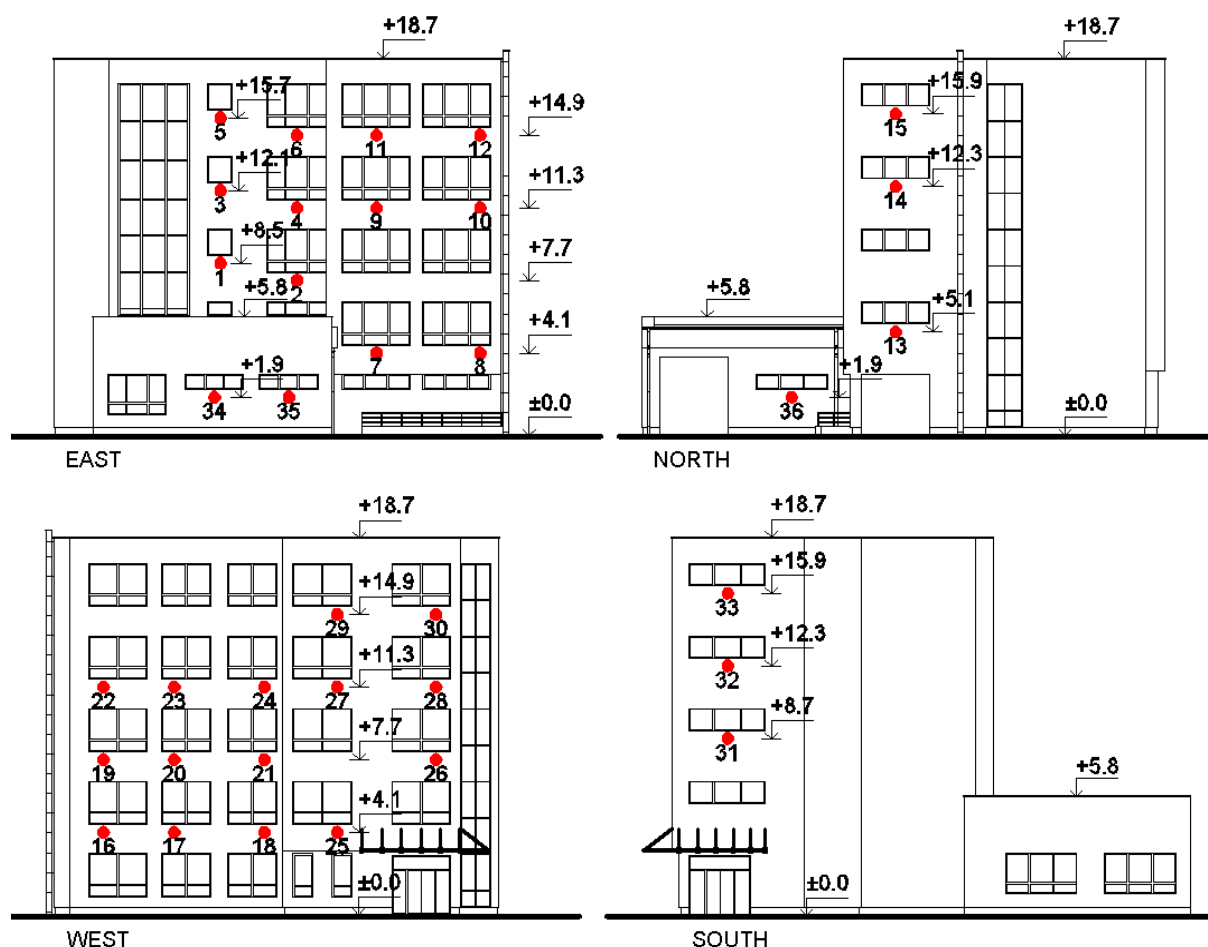
Meranie množstva klimatických veličín vo vysokom rozlíšení (krátky časový interval) prináša možnosť dôkladnej analýzy vonkajšej klímy a vplyvu budovy na jednotlivé veličiny. V tomto článku sú prezentované počiatkové merania teploty v okolí budovy a účinkov vetra. Prvá fasádna meteostanica (obr. 108) bola osadená na budovu v auguste 2016. Schéma umiestnenia jednotlivých staníc je na obr. 109.



Obr. 108: Pohľad na fasádnu meteostanicu pozostávajúcu z ultrasonického anemometra, pyranometra, pyrgeometra a integrovaného snímača teploty, relatívnej vlhkosti a tlaku vzduchu

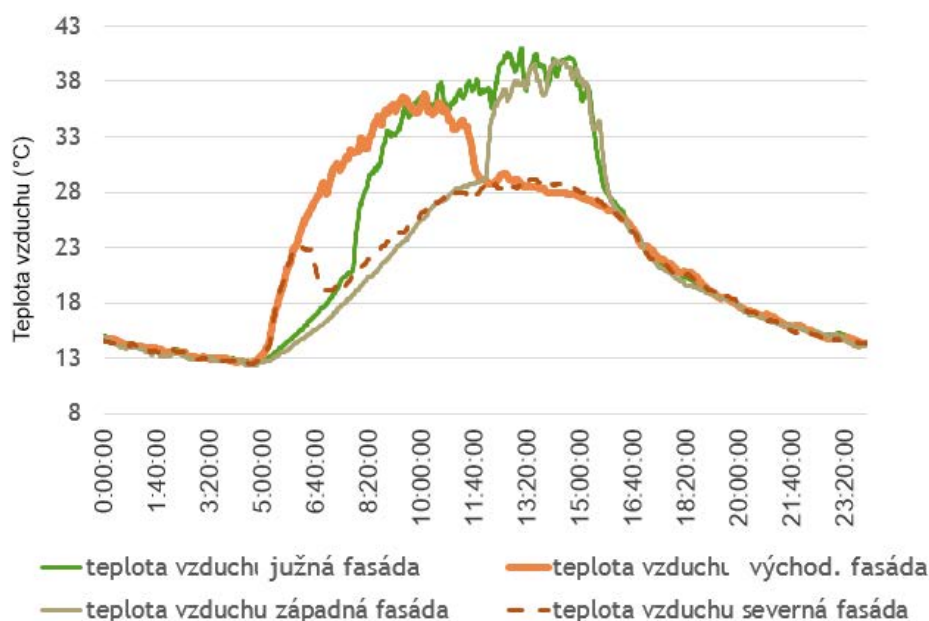
Fasádna meteostanica (ďalej FMS) pozostáva z ocelového rámu, na ktorom sú namontované jednotlivé snímače. Základom je snímač teploty, relatívnej vlhkosti a atmosférického tlaku vzduchu, umiestnený pod protidažďovým a protislnečným krytom, pyranometer pre meranie krátkovlnného slnečného žiarenia a pyrgometer pre meranie dlhovlnného slnečného žiarenia a nočného sálania oblohy. Na krátkom ramene je osadený ultrasonický anemometer (jeho os je 270 mm pred fasádou). FMS je napájaná káblom a samotný zber dát je bezdrôtový. Každá stena fasády má na streche budovy umiestnený prijímač. Následne sú dáta v minútovom intervale zapisované do databázy na centrálné dátové úložisko.

Na obr. 109 je znázornené umiestnenie jednotlivých FMS. Pre severnú hemisféru prevláda severozápadné prúdenie preto je najviac staníc umiestnených na západnej strane. Pre analýzu vplyvu a intenzity slnečného žiarenia je zase dôležité porovnanie východ – juh – západ, s vplyvom pohybu slnka po oblohe na teplotu v okolí fasády. Rozmery hlavnej časti budovy Výskumného centra sú približne $16 \times 20,6$ m, výška bez technologického vybavenia je približne 18,7 m nad upraveným terénom. K budove patrí nízka prístavba laboratórnej haly. Najvyšší rad FMS je vo výške 15,9 m. Kvôli umiestneniu staníc spravidla pod parapetmi okien sú stanice v rovnakej výške na východnej a západnej strane a zase na južnej a severnej strane (úzke pásové okná).



Obr. 109: Pohľady budovy Výskumného centra so zaznačením polohy jednotlivých FMS

Výsledky merania počas slnečného dňa sú zobrazené na obr. 110. Z obrázku je zrejmý nárast, maximum a pokles teploty pre východnú, južnú a nakoniec západnú fasádu. Priebeh teplôt je sínusový, sleduje pohyb slnka po oblohe a pôsobenie priameho slnečného žiarenia na jednotlivé strany fasády. Keď sa fasáda dostane do tieňa tak jej teplota postupne klesá na úroveň teploty vzduchu (zhodná približne s teplotou nameranou na severnej fasáde). Lokálne maximá teplôt boli porovnateľné na východnej a západnej fasáde okolo 42 °C o 15:00. Teplota vzduchu sa pohybovala okolo 28 °C.



Obr. 110: Denný priebeh teplôt vzduchu pre jednotlivé svetové strany na meranej budove pre 12. september 2016

Záver

S klimatickými zmenami v posledných rokoch a existenciou mestských tepelných ostrovov dochádza stále častejšie k otázke adekvátnosti použitých okrajových podmienok. Čo platí pre jednu lokalitu už neplatí pre druhú, dokonca niektoré klimatické veličiny sa menia signifikantne v rámci jednotlivých mestských častí.

Pre takmer všetky simulácie používané v oblasti stavebníctva sú dôležité správne okrajové podmienky (vnútorné a vonkajšie) a materiálové parametre. Práve získanie správnych, použiteľných a dostatočne presných vonkajších okrajových podmienok (klimatických údajov) je stále problematické pre obmedzený rozsah meteorologickej siete, jej rozsahu meraných parametrov, intervalu merania a takisto dostupnosti údajov (financie, voľný prístup).

Použitá literatúra

- [1] BIELEK, M. et al. 1984. *Konštrukcie pozemných stavieb IV: Problémy aerodynamiky a hydrodynamiky v teórii konštrukčnej tvorby budov – návody na cvičenia*. Bratislava: Alfa.
- [2] STN 730540-2 + Z1 + Z2. 2019. *Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- [3] SANDERS, C. 1996. *IEA ANNEX 24, Final report, Vol. 2, Task 2: Environmental conditions*. Leuven. ISBN 90-75741-03-0
- [4] KÜNZEL, H. M.; SCHMIDT, T. 2000. Wetterdatum für rechnerische Feuchteschutzbeurteilungen. *IPB-Mitteilung*, 27: 364.
- [5] STN EN 15026:2009. 2009. *Tepelno-vlhkostné vlastnosti stavebných konštrukcií a ich častí. Stanovenie šírenia vlhkosti numerickou simuláciou*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- [6] KÜNZEL, H.M. 2004. Energetische Altbausanierung durch Innendämmung. *WTA-Journal*, 2(4), 361–374.
- [7] ABUKU, M. et al. 2009. Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades. *Building and Environment*, 44(1), 113–124.
- [8] MATIAŠOVSKÝ, P. et al. 2007. *Komplexný prenos tepla, vzduchu a vody v konštrukciách budov*. Bratislava: STU. 123s. ISBN 978-80-227-2794-5
- [9] CHMÚRNY, I. 2003. *Tepelná ochrana budov*. Bratislava: JAGA.
- [10] EICHLER, F.; ARNDT, H. 1981. *Bauphysikalische Entwurfslehre*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.

Kontakty

Ing. Peter Juráš, PhD.: peter.juras@uniza.sk