

## VYUŽITÍ CFD MODELOVÁNÍ PŘI NÁVRHU DVOUPLÁŠŤOVÝCH STŘECH

Zbyněk Svoboda

Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze  
e-mail: svobodaz@fsv.cvut.cz

### ABSTRAKT

Příspěvek ukazuje možnosti využití CFD modelování při návrhu složitých dvouplášťových střech s provětrávanou vzduchovou vrstvou.

V úvodní části je zrekapitulován dosavadní běžně používaný výpočtový postup z ČSN 730540 a jeho limity. Dále je provedeno porovnání výsledků normové metodiky a CFD výpočtu pro základní typy dvouplášťových střech, přičemž pro pultovou dvouplášťovou střechu je toto srovnání uvedeno podrobněji s pomocí výsledků kompletní parametrické studie.

V závěrečné části příspěvku je uveden příklad použití CFD analýzy při ověření návrhu větrání konkrétní dvouplášťové střechy nad krytým plaveckým areálem.

### ÚVODEM

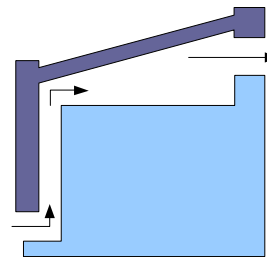
Dvouplášťové střešní konstrukce jsou v českých normách tradičně doporučovány jako ideální střechy do vlhkých provozů. Vzduchová vrstva mezi spodním, tepelně izolujícím pláštěm a horním, ochranným pláštěm je větrána venkovním vzduchem, který má bezpečně odvést do vnějšího prostředí vodní páru difundující přes spodní plášť z interiéru. Je-li dvouplášťová střecha dobře navržena a zrealizovaná, nedochází pak v její skladbě v žádném místě ke kondenzaci vodní páry.

Kvalitní návrh dvouplášťové střechy však není vůbec jednoduchým projekčním úkolem. V posledních letech se u nových dvouplášťových střech velmi často objevují závažné vlhkostní poruchy, které se v dřívějších letech prakticky nevyskytovaly. Příčinou je kontinuální zvyšování požadavků na tepelnou ochranu budov, kvůli kterému se v posledních letech výrazně zvýšil tepelný odpor spodních plášťů střech. Do větraných vzduchových dutin nově projektovaných střech tak proniká podstatně méně tepla, než tomu bývalo u střech starších. Vzduch ve větraných vrstvách je tudíž podstatně studenější a mnohem snadněji dosáhne stavu nasycení. Moderní dvouplášťové střechy musí být proto navrženy velmi zodpovědně a s větší mírou pečlivosti než v minulosti tak, aby bylo zajištěno dokonalé větrání vzduchové vrstvy.

Pro výpočtové posouzení návrhů dvouplášťových střech se v ČR tradičně používá metodika ČSN 730540-4, která je sice poměrně jednoduchá a snadno aplikovatelná, ale na druhou stranu má řadu omezení.

### ZÁKLADNÍ NORMOVÝ POSTUP

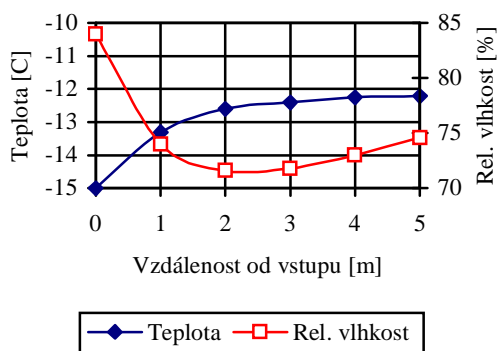
Výpočtové posouzení tepelně vlhkostního chování dvouplášťových střech podle ČSN 730540-4 se provádí v několika navazujících krocích. Nejprve je třeba vytvořit 2D model větrané vzduchové vrstvy. V tomto modelu může vzduch proudit jak svisle, tak vodorovně, ale stále jen v jedné rovině (obr. 1). Pro většinu střešních konstrukcí to postačí, ale objevují se i komplikovanější střešní pláště, které je pak nutné pro výpočet často radikálně (a někdy i ne zcela vhodně) zjednodušit.



Obr. 1 – Schéma 2D modelu větrané vrstvy

V dalším kroku se stanovuje z tlakové rovnováhy rychlost proudění vzduchu v jednotlivých úsecích větrané vrstvy. Při výpočtu rychlosti proudění se zjednodušeně zohledňují jak tlakové ztráty třením a vřazenými odpory, tak tlakové rozdíly způsobené větrem a výškovým rozdílem mezi vstupním a výstupním otvorem (počítá se tedy s vlivem přirozeného i nuceného proudění vzduchu). Výsledná rychlost proudění vzduchu je samozřejmě jen určitou průměrnou hodnotou v jednotlivých úsecích - nijak se nezohledňuje proměnné rozložení rychlosti proudění v průřezu větrané vrstvy.

Po stanovení rychlosti proudění vzduchu následuje výpočet rozložení teplot vzduchu v dílčích úsecích ve směru jeho proudění. Používaný vztah byl odvozen z jednoduché tepelné rovnováhy větrané vrstvy (zisky prostupem z interiéru přes spodní plášť, ztráty prostupem do exteriéru přes horní plášť a teplo odváděné proudícím vzduchem). Výsledná teplota ve větrané vrstvě má více či méně výrazný exponenciální průběh v závislosti na tepelných odporech obou plášťů a na rychlosti proudění vzduchu (obr. 2). Posledním krokem normové metodiky je stanovení relativní vlhkosti vzduchu ve větrané vrstvě. I zde se vychází z rovnováhy difuzních toků mířících do větrané vrstvy a ven z ní, včetně zohlednění vlivu proudícího vzduchu.



Obr. 2 – Typický průběh teploty a rel. vlhkosti vzduchu proudícího ve větrané vrstvě stanovený výpočtem dle ČSN 730540-4

Cílem výše popsaného výpočtu je ověřit, zda relativní vlhkost ve větrané vrstvě nepřesahuje limit 90 % (požadavek ČSN 730540-2).

Jak je z popisu metodiky zřejmé, jedná se o nepřilíš náročný postup, který byl původně vytvořen i pro použití při ručním výpočtu [1], [2]. Jeho hlavní nevýhodou jsou jen velmi omezené možnosti přesnějšího modelování vřazených odporů, složitějších tvarů střešů či vlivu různých moderních ventilačních prvků (např. turbíny typu Lomanco). Zohlednit samozřejmě nelze ani všechny klimatické vlivy, např. není možné hodnotit působení slunečního záření, noční výměnu tepla sáláním s oblohou nebo vliv větru vanoucího proti převažujícímu směru přirozeného proudění.

## CFD MODELOVÁNÍ

Pro výpočtové hodnocení důsledků podobných komplikovanějších okrajových podmínek a pro hodnocení složitějších střešů lze použít pokročilejší programy zaměřené na CFD modelování. Možnosti modelování jsou u těchto nástrojů velmi široké a projektanta tak omezuje spíše náročnější práce s příslušným softwarem a podstatně delší doba potřebná k získání výsledků. Modely střešních konstrukcí totiž nelze obvykle natolik zjednodušit, aby se v nich mohla vyskytovat jen pravouhlá geometrie. Velmi často je bohužel nutné zadat do výpočtu různé šikmé vrstvy (především horní plášť), což obecně vede k velkému počtu neznámých a k velmi pomalému postupu iteračního výpočtu.

Další komplikací je to, že CFD programy obvykle nepočítají s difuzí vodní páry přes stavební konstrukce. Je-li cílem výpočtu stanovení pole relativních vlhkostí, musí se proto difuzní tok vodní páry přes spodní plášť modelovat ve výpočtu jako plošný vlhkostní zdroj. Tento zdroj je třeba umístit na vnější povrch spodního pláště a jeho výkon stanovit výpočtem.

To nemusí být právě snadné, protože hustota toku vodní páry spodním pláštěm závisí mimo jiné i na neznámých hodnotách teploty a vlhkosti vzduchu ve větrané vrstvě. Ne všechny CFD programy si s tímto problémem dovedou uspokojivě poradit. Například

známý program Flovent [3] sice umožňuje zadat vlhkostní zdroj jako lineární funkci, ale využívá k tomu příliš jednoduchou rovnici

$$g_d = \beta \cdot (x_p - x_a), \quad (1)$$

která předpokládá, že teplota a relativní vlhkost vzduchu na povrchu vlhkostního zdroje je konstantní (a tedy že zadaná hodnota měrné vlhkosti vodní páry na povrchu zdroje  $x_p$  v kg/kg se nemění). To ovšem v případě dvouplášťových střešů není zcela korektní. U těchto konstrukcí je nutné hustotu toku vodní páry přes spodní plášť (a tedy velikost vlhkostního zdroje zatěžujícího větranou vrstvu) stanovit z obecného vztahu

$$g_d = \frac{p_i - p_a}{Z_{pt}}, \quad (2)$$

který lze dále s pomocí měrných vlhkostí vyjádřit jako

$$g_d = \frac{R_{H_2O}}{Z_{pt}} (x_i T_i \rho_i - x_a T_a \rho_a). \quad (3)$$

Ze srovnání vztahů (1) a (3) je zřejmá chybějící teplotní závislost (závislost na hustotě vzduchu by bylo možné pro běžné případy vzhledem k nevelkému významu zanedbat).

Pro praktické výpočty však naštěstí není uvedená komplikace zásadní. Spokojíme-li se s výpočtem na straně bezpečnosti, lze použít jednoduchý vztah (2) a za parametry vzduchu ve větrané vrstvě dosadit parametry venkovního prostředí. Jak ukazuje tab. 1, nejsou navíc rozdíly mezi reálně možnými hustotami difuzního toku do větrané vrstvy v obvyklých případech příliš velké (pro uvažovanou běžnou dvouplášťovou střeš max. 8 %). Zbývá dodat, že vztah (2) platí za předpokladu, že ve spodním plášti nedochází ke kondenzaci voní páry, což lze prakticky bez výjimek snadno splnit.

Tab. 1 – Hustota difuzního toku do větrané vrstvy spodním pláštěm s dif. odporem  $2,7 \cdot 10^{10}$  m/s (žb deska 200 mm) při běžných parametrech vnitřního vzduchu (20 °C, 50 %)

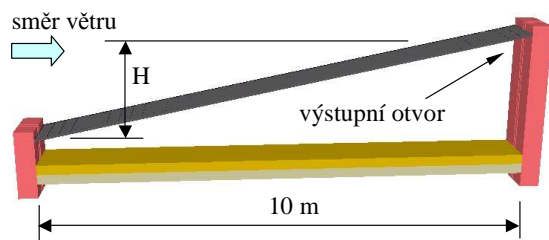
Teplota ve větrané vrstvě	Rel. vlhkost ve větrané vrstvě	Hustota dif. toku vodní páry do větrané vrstvy
[°C]	[%]	[kg/(m <sup>2</sup> .s)]
-12	90	$3,9 \cdot 10^{-8}$
	80	$4,0 \cdot 10^{-8}$
	70	$4,1 \cdot 10^{-8}$
-15	90	$4,1 \cdot 10^{-8}$
	80	$4,1 \cdot 10^{-8}$
	70	$4,2 \cdot 10^{-8}$

Hustotu toku vodní páry z větrané vrstvy přes horní plášť do exteriéru lze obvykle zanedbat vzhledem k většinou velmi vysokému difuznímu odporu horního pláště (toto zanedbání je navíc samozřejmě na straně bezpečnosti výpočtu).

Přes výše zmíněné nevýhody se mohou CFD výpočty výhledově stát neocenitelným pomocníkem při projektování náročnějších střech. V této souvislosti je samozřejmě velmi zajímavé, jaké lze očekávat rozdíly ve výsledcích dosažených CFD výpočtem a standardní normovou metodikou.

## POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ METODIK

Velmi názorně lze shody a rozdíly obou postupů ukázat na základním nejjednodušším typu dvouplášťové střechy – na pultové střeše s výškově posunutými větracími otvory (obr. 3). Tepelně vlhkostní chování této střechy závisí především na tepelném odporu spodního pláště, na převýšení větracích otvorů a na rychlosti větru.



Obr. 3 – Modelová pultová střecha

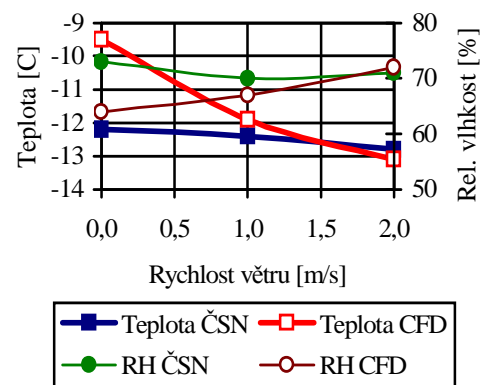
V provedené parametrické studii byla uvažována pro všechny varianty jednotná geometrie větrané vrstvy i jednotná velikost větracích otvorů (100x100 mm v osové vzdálenosti 1 m). Shodné byly i okrajové podmínky (vnitřní vzduch 21 °C a 50 %, vnější vzduch –15 °C a 84 %). Proměnný byl tepelný odpor spodního pláště a převýšení větracích otvorů. Ty byly předpokládány zcela volně, aby se předešlo rozdílným způsobem odlišným modelováním vřazených otvorů (síťky, mřížky).

Sledována byla teplota a relativní vlhkost vzduchu před výstupním otvorem. Výsledky srovnávací analýzy jsou shrnuty v tab. 2. Je zřejmé, že ve většině případů poskytuje normová metodika výsledky na straně bezpečnosti výpočtu. Zvláště to pak platí o případech bezvětrí, pro které dává metodika ČSN 730540-4 výsledky opravdu výrazně nepříznivější. Na druhou stranu lze naopak očekávat, že pro vyšší rychlosti proudění větru (od 2 m/s) budou výsledky normové metodiky mírně příznivější než výsledky CFD analýzy. Nejlepší shoda mezi výsledky obou metodik panuje v případě rychlostí větru kolem 1 m/s.

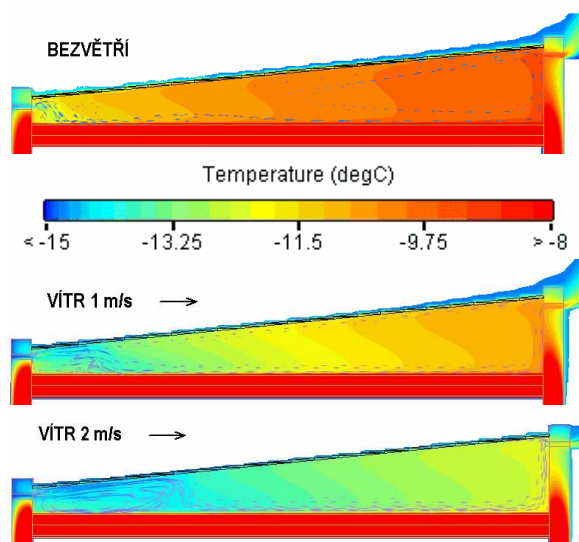
Příčiny velkých rozdílů ve výsledcích pro případy bezvětrí jsou pravděpodobně způsobeny tím, že normový postup nijak nezohledňuje vedení tepla svislými stěnami, které se projevuje nejvíce u slabého proudění vzduchu dutinou. Svou roli samozřejmě sehrává i to, že v ČSN 730540-4 je zanedbán skutečný komplexní charakter proudění vzduchu ve větrané vrstvě, který je velmi dobře vidět na obr. 5.

Tab. 2 – Výsledky srovnávacího výpočtu CFD/ČSN pro pultovou střechu

Rozdíl výšek větracích otvorů	Souč. prostupu tepla spodního pláště	Rychlost větru	Teplota vzduchu před výstupem		Rel. vlhkost vzduchu před výstupem	
			$\theta$ [°C]		$\phi$ [%]	
			CFD	ČSN	CFD	ČSN
2,0	0,4	0,0	-8,3	-10,2	53	58
		1,0	-10,9	-10,5	60	60
		2,0	-12,2	-11,1	67	61
	0,2	0,0	-10,3	-12,2	63	71
		1,0	-12,3	-12,4	69	70
		2,0	-13,2	-12,8	73	71
	0,1	0,0	-11,5	-13,5	69	81
		1,0	-13,4	-13,6	76	78
		2,0	-14,0	-13,8	78	78
1,0	0,4	0,0	-6,6	-10,1	48	51
		1,0	-10,5	-10,4	58	58
		2,0	-11,8	-11,1	65	61
	0,2	0,0	-9,5	-12,2	64	73
		1,0	-11,9	-12,4	67	70
		2,0	-13,1	-12,8	72	71
	0,1	0,0	-11,1	-13,5	71	85
		1,0	-13,1	-13,6	74	78
		2,0	-13,8	-13,8	76	78
0,3	0,4	0,0	-4,9	-10,1	45	64
		1,0	-9,4	-10,3	56	58
		2,0	-11,4	-11,0	63	60
	0,2	0,0	-7,2	-12,2	54	80
		1,0	-11,3	-12,3	64	70
		2,0	-12,7	-12,8	70	71
	0,1	0,0	-10,0	-13,5	67	94
		1,0	-12,5	-13,6	71	78
		2,0	-13,6	-13,8	75	78

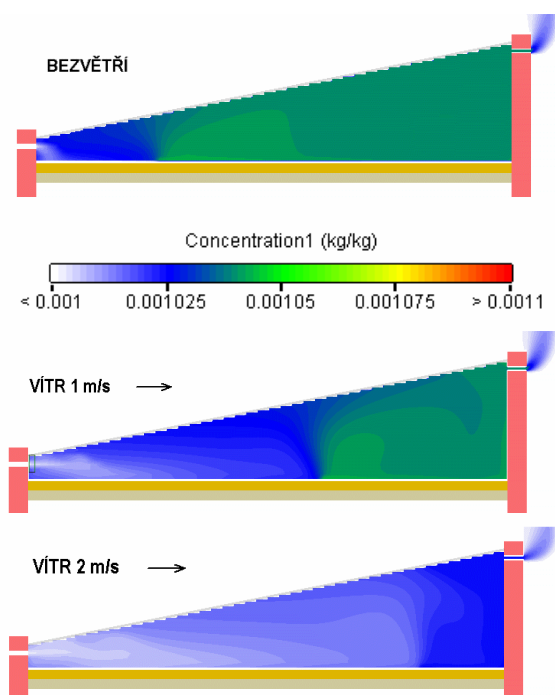


Obr. 4 – Teplota a rel. vlhkost u výstupu z pultové střechy s převýšením otvorů 1 m a součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m<sup>2</sup>.K)



Obr. 5 – Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě pultové střechy s převýšením otvorů 1 m a součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m<sup>2</sup>.K)

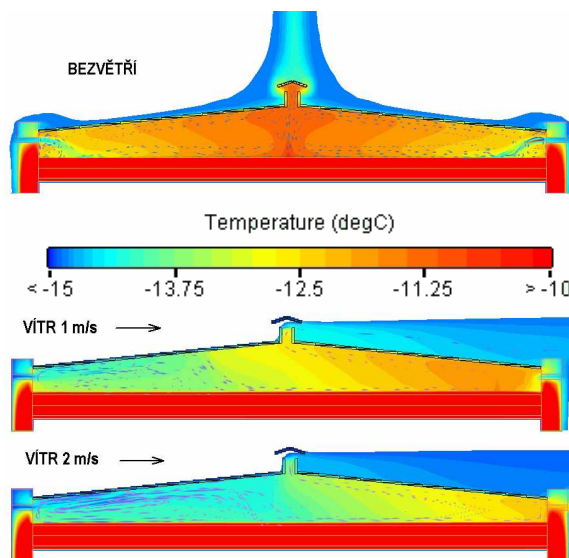
Za drobnou poznámku stojí i prostorové rozložení měrných vlhkostí vzduchu ve větrané vrstvě modelové pultové střechy (obr. 6), které je zřetelně závislé na rychlosti větru (podobně jako rozložení teplot na obr. 5).



Obr. 6 – Rozložení měrných vlhkostí vzduchu ve větrané vrstvě pultové střechy s převýšením otvorů 2 m a součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m<sup>2</sup>.K)

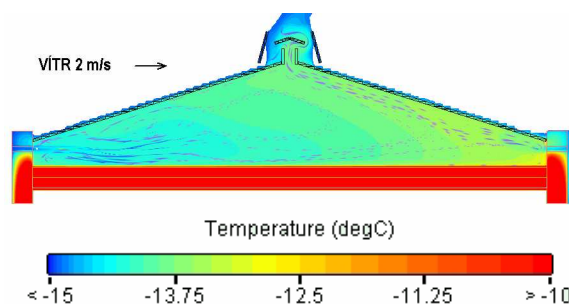
Z měřítka grafického výstupu na obr. 6 je nicméně zřejmé, že reálné rozdíly mezi měrnými vlhkostmi v různých místech větrané vrstvy jsou minimální. Dokladem toho, že návrh modelové střechy je funkční, je pak skutečnost, že měrná vlhkost ve

větrané vrstvě se v rámci celého jejího průřezu pohybuje jen těsně nad 1 g/kg (měrná vlhkost venkovního vzduchu). Pokud by vnitřní plášť střechy byl méně těsný či vzduchová vrstva hůře větraná, přesahovala by měrná vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě měrnou vlhkost venkovního vzduchu daleko výrazněji.



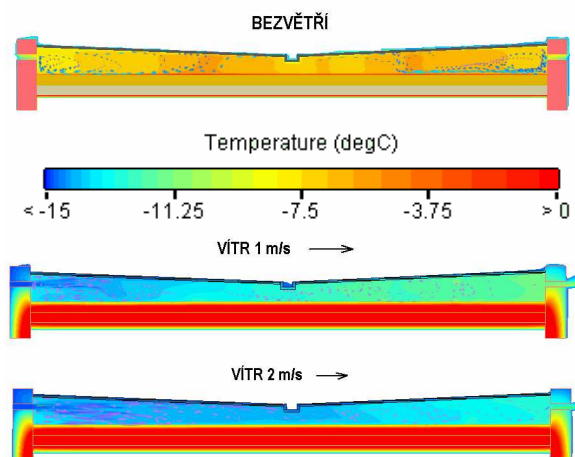
Obr. 7 – Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě střechy s dýmníkem, s převýšením otvorů 1 m a součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m<sup>2</sup>.K)

Výše popsané shody a rozdíly mezi CFD výpočtem a metodikou ČSN 730540 lze vysledovat i u dalšího základního typu dvouplášťové střechy – u střechy s průběžným středovým dýmníkem (obr. 7), a to přesto, že pro výpočet normovou metodikou je třeba hodnotit jen ideální polovinu střechy. U tohoto typu střechy je zajímavý vliv větru. Z CFD výpočtu totiž vychází poměrně uspokojivé větrání vzduchové vrstvy i pro větší rychlosti větru, což vyvrací občasné obavy praktiků z chování tohoto typu střechy za větrného počasí. Poměrně snadnou úpravou dýmníku – přidáním bočních šikmých krycích desek – lze ovšem obraz proudění i při větru změnit tak, aby vzduch stále odcházel převážně dýmníkem (obr. 8).



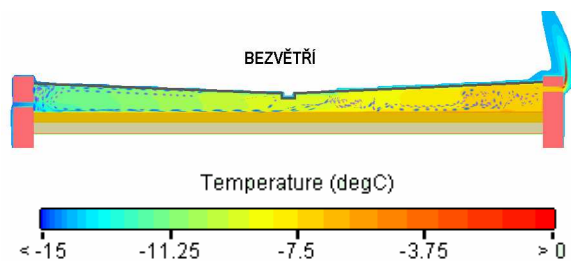
Obr. 8 – Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě střechy s dýmníkem opatřeným bočními krycími deskami (převýšení otvorů 2 m, souč. prostupu tepla 0,2 W/(m<sup>2</sup>.K))

Podívejme se ještě závěrem srovnávací studie na poslední častější typ dvouplášťové střechy. Jedná se o tzv. motýlkovou střechu, která patří z hlediska větrání mezi dosti problematická řešení a většinou odborníků není doporučována. Z obr. 9 je jasně patrné, proč je tomu tak. Za bezvětří se totiž tato střecha chová v podstatě jako jednoplášťová – vzduch prakticky jen cirkuluje v rámci vzduchové vrstvy a výměna do exteriéru je minimální. Důsledkem je pak nasycení vzduchu vodní párou a následná kondenzace na vnějším plášti. Chování střechy se samozřejmě radikálnělepší, jakmile začne na střechu působit vítr, což potvrzují obě srovnávané metodiky (shody a rozdíly metodik jsou i pro tuto střechu obdobné).



Obr. 9 – Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě motýlkové střechy se souč. prostupu tepla spodního pláště  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Projektanti se obvykle u tohoto typu střechy snaží zajistit větrání i při bezvětří tím, že od sebe mírně vertikálně posunou protilehlé větrací otvory. Toto posunutí nemůže být obvykle příliš velké, nicméně výsledky CFD analýzy ukazují, že i to může pomoci (obr. 10). Vždy samozřejmě záleží na konkrétní situaci, protože velmi významnou roli hraje skladba střechy, vzdálenost mezi větracími otvory a parametry mikroklimatu pod střešou. Zde uvedené výsledky je proto pochopitelně nutné vnímat jako ilustrativní a pouze ukazující určité tendence. Každá

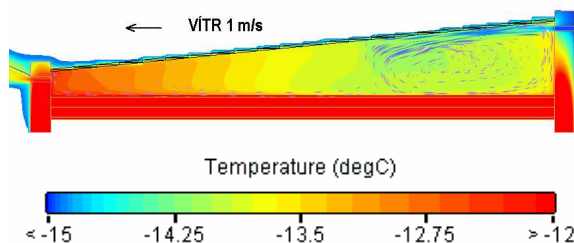


Obr. 10 – Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě motýlkové střechy se souč. prostupu tepla spodního pláště  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  a s větracími otvory posunutými o 300 mm

specifická střecha by měla být konkrétně posouzena, jak bude ještě ukázáno v závěru příspěvku.

Závěry srovnávací studie tří základních typů dvouplášťových střech vyznívají pro jednoduchou metodiku ČSN 730540-4 velmi pozitivně. Její výsledky mají u všech hodnocených střech pro normou požadovaný případ bezvětří spolehlivou bezpečnostní rezervu a mohou tak sloužit k bezproblémovému ověření návrhu podobných jednodušších střešních konstrukcí.

Normová metodika ovšem není zcela universální, jak již bylo zmíněno v úvodu příspěvku. Kromě toho, že nezohledňuje vliv slunečního záření či působení výměny sáláním s oblohou, nelze s její pomocí modelovat ani situaci, kdy je vítr orientován proti směru přirozenému proudění vzduchu ve větrané vrstvě. V podobných případech je CFD modelování neocenitelným pomocníkem. Jen s použitím CFD programů lze například ověřit, jaký z faktorů působících na proudění vzduchu ve větrané vrstvě bude rozhodující (obr. 11).

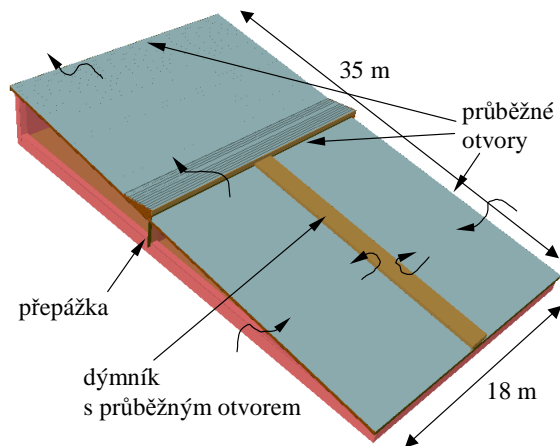


Obr. 11 – Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu v pultové střeše s převýšením otvorů 1 m a souč. prostupu tepla spodního pláště  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  při opačné orientaci větru

## VYUŽITÍ CFD VÝPOČTŮ PŘI NÁVRHU STŘECHY PLAVECKÉHO BAZÉNU

Nedostatkem normové metodiky je také to, že s ní nelze dostatečně přesně posoudit střechy, v nichž proudí vzduch skutečně všemi třemi směry. Typickým příkladem takové střechy je nedávno projektovaná dvouplášťová střešní konstrukce krytého plaveckého bazénu (obr. 12). Finální návrh – v podstatě intuitivně vytvořený projektantem – byl s pomocí CFD výpočtu prověřen teprve následně. Pro srovnání byly rovněž vyhodnoceny i ostatní původně uvažované varianty řešení střechy.

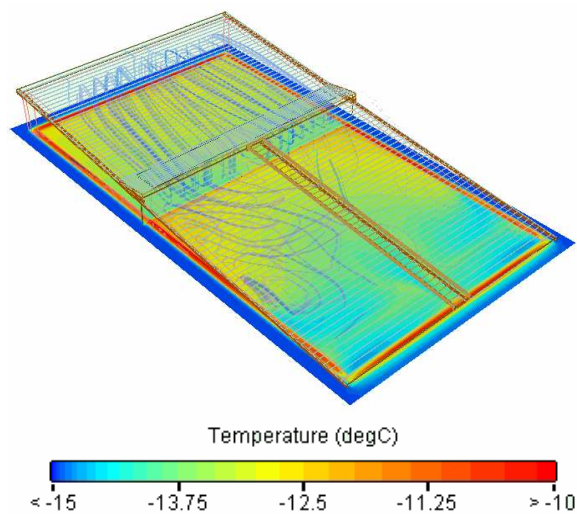
Ve výpočtu byl uvažován navržený spodní plášť s difuzním odporem  $8,6 \cdot 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}$  a s tepelným odporem  $5,0 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$  (hodnota sice nesplňuje požadavek ČSN 730540-2, ale to je nicméně z hlediska vlhkostního chování dvouplášťové střechy příznivější – vzduch ve větrané vrstvě bude teplejší a pohltí více vodní páry). Při hodnocení finální verze střechy byl zohledněn orientačně i vliv případných netěsností v parozábraně s pomocí redukce jejího difuzního odporu na 10 % laboratorní hodnoty. Hustota toku vodní páry přes spodní plášť do větrané vrstvy byla uvažována  $4,0 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  pro stav



Obr. 12 – Střecha plaveckého bazénu s vyznačením orientací proudění vzduchu předpokládaných projektem

s těsnou parozábranou a  $3,9 \cdot 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>.s) pro variantu s mírně netěsnou parozábranou (obě hodnoty byly stanoveny pro vnitřní vzduch o teplotě 28 °C a relativní vlhkosti 85 %). Posouzení bylo provedeno pro teplotu venkovního vzduchu -15 °C a relativní vlhkost 84 %.

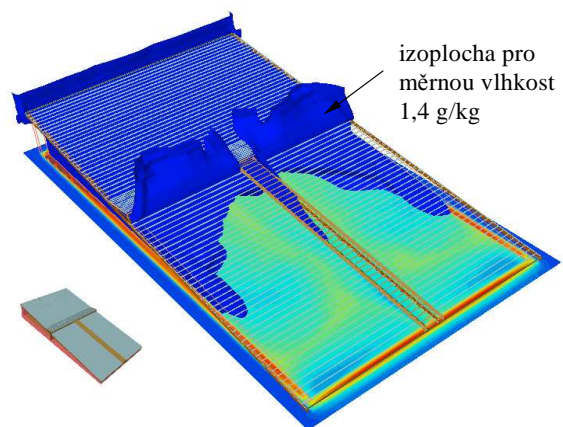
Konečný, poměrně rozsáhlý CFD výpočtový model pro posouzení finálního návrhu střechy sestával z celkem 502 740 buněk o minimálních rozměrech 0,17 m ve směru podélného řezu střechou, 0,08 m ve směru příčného řezu a 0,03 m ve směru svislém. Okrajové podmínky standardního Newtonova typu byly zadány tak, aby působily jak na celý vnější povrch střechy (exteriér), tak na celý vnitřní povrch nosné stropní konstrukce a stěn (interiér). V místě řezů stěnami byla předpokládána adiabatická podmínka – rozložení teplot a vlhkosti nebylo tedy zadáno, ale určeno až v rámci výpočtu. Pro samotný výpočet byl použit model turbulence k-ε, stabilní řešení bylo nalezeno po 760 iteracích (pro základní analýzu bez vlivu větru).



Obr. 13 – Orientace proudění vzduchu a teplotní pole v úrovni 500 mm nad spodním pláštěm ve střechě bazénu za bezvětrí

Na obr. 13 je vidět výsledné teplotní pole ve vodorovné rovině 500 mm nad úrovní tepelné izolace (a orientačně také směry proudění vzduchu) pro finální návrh střechy. Maximální relativní vlhkost ve větrané vrstvě vyšla velmi pozitivně v rozmezí od 72 do 79 % (podle těsnosti parozábrany). Proudění vzduchu ve větrané vrstvě spodní části střechy nicméně neprobíhá podle předpokladů projektanta – vzduch ze spodní úrovně spíše stoupá ve směru podélné osy střechy, než aby odcházel středovým dýmníkem v jeho spodní části. Celkově je ale spodní část střechy větrána lépe než část horní, která se vyznačuje poměrně vysokou vzduchovou vrstvou a nepříliš výhodným umístěním vstupních větracích otvorů.

Přepážka, navržená mezi spodní a horní částí střechy, se ukázala jako velmi pozitivní opatření. Pokud by nebyla provedena, střecha by sice za předpokladu dokonale těsné parozábrany fungovala také vyhovujícím způsobem (maximální relativní vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě 86 %), ale jakmile by parozábrana byla již jen mírně netěsná, situace by byla podstatně horší. Relativní vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě by dosáhla ve značné části střechy 100 % a střecha by byla tedy ohrožena kondenzací vodní páry (obr. 14). Příčinou je pravděpodobně to, že podélný dýmník není ve spodní části funkční a vzduch z této části střechy proudí až do části horní a přináší tam vodní páru (obr. 15).

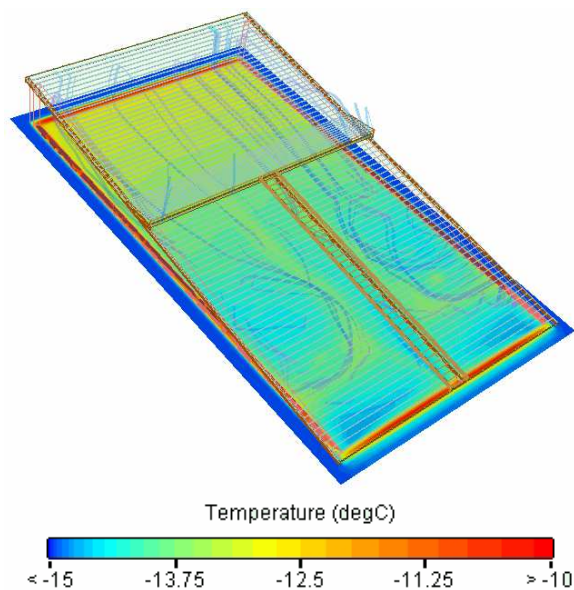


Obr. 14 – Rozsah zóny s příliš vysokou vlhkostí vzduchu u střechy bez přepážky s mírně netěsnou parozábranou za bezvětrí

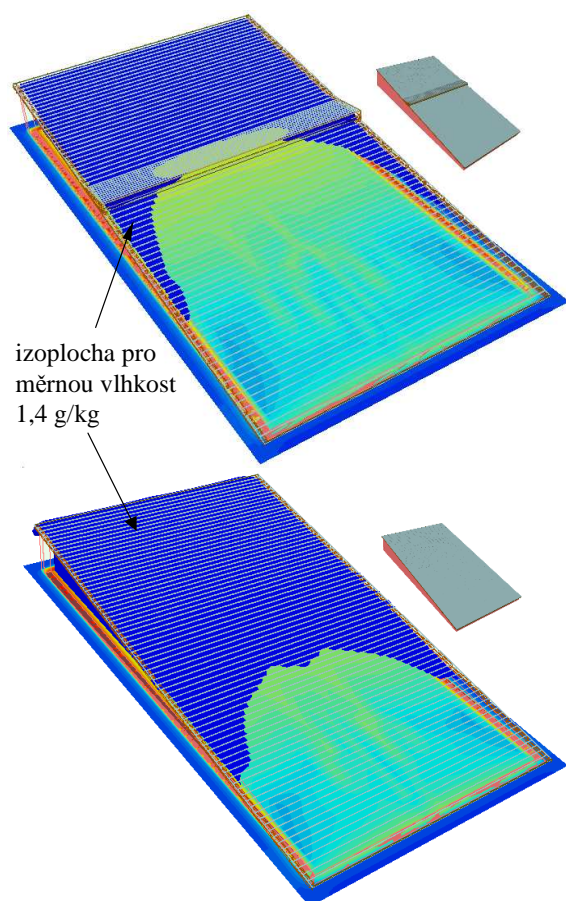
Podobně nevyhovující stav nastane dokonce i s dokonale těsnou parozábranou u střechy bez podélného dýmníku a samozřejmě i u střechy jednoduchého pultového typu (obr. 16).

Na všech grafických výstupech je znázorněna zóna s měrnou vlhkostí vzduchu nad 1,4 g/kg. To je totiž zhruba hranice, od které hrozí při daných teplotách vzduchu ve větrané vrstvě jeho nasycení.

Z výsledků posouzení tedy vyplývá, že finální návrh řešení střešní konstrukce je skutečně tou nejlepší variantou z uvažovaných možností. Intuice zkušeného projektanta byla v tomto případě evidentně správná.



Obr. 15 - Orientace proudění vzduchu a teplotní pole v úrovni 500 mm nad spodním pláštěm ve střeše bazénu bez přepážky za bezvětrí



Obr. 16 - Rozsah zóny s příliš vysokou vlhkostí vzduchu u původních variant střechy za bezvětrí (stav s dokonale těsnou parozábranou)

## ZÁVĚREM

Příspěvek ukázal možnosti využití podrobnějších CFD výpočtů pro ověření návrhů dvouplášťových střech. Přes drobné komplikace lze stávající CFD programy k tomuto účelu s výhodou použít a rozšířit tak záběr výpočtového hodnocení i na střechy, které jednoduchá metodika ČSN 730540-4 nemůže postihnout.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl podpořen výzkumným záměrem MSM 6840770005.

## LITERATURA

- [1] ČSN 730549 *Tepelně technické vlastnosti konstrukcí a budov – Výpočtové metody*. Praha: ÚNM, 1977.
- [2] ČSN 730540-4 *Tepelná ochrana budov – Výpočtové metody*. Praha: ČNI, 2005.
- [3] Flomerics Ltd. *Flovent 6.1*, 2005.

## PŘEHLED OZNAČENÍ

$g_d$	hustota difuzního toku vodní páry [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
$p_i$	část. tlak vodní páry ve vnitřním vzduchu [Pa]
$p_a$	část. tlak vodní páry ve větrané vrstvě [Pa]
$R_{H_2O}$	plynová konstanta vodní páry [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]
$T_a$	abs. teplota vzduchu ve větrané vrstvě [K]
$T_i$	abs. teplota vnitřního vzduchu [K]
$x_a$	měrná vlhkost ve větrané vrstvě [ $\text{kg}/\text{kg}$ ]
$x_i$	měrná vlhkost ve vnitřním vzduchu [ $\text{kg}/\text{kg}$ ]
$x_p$	dtto na horním líci spodního pláště [ $\text{kg}/\text{kg}$ ]
$Z_{pl}$	difuzní odpor vnitřního pláště [m/s]
$\beta$	součinitel přestupu vodní páry [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
$\rho_a$	hustota vzduchu ve větrané vrstvě [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_i$	hustota vnitřního vzduchu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]