

PEDESTRIAN LEVEL WIND NEAR RECTANGULAR BUILDINGS

M. Jirsák, D. Zacho, P. Michálek

Summary: *The presentation deals with experiments modeling the pedestrian wind exposure over critical area in front of single rectangular building and along the passage created by two identical objects, including their results. By modifying basic dimensions the analysis gives look on influence of their proportions on flow characteristics in critical areas. The building models being tested in a simulated suburban boundary layer at two main wind angles had fixed base aspect ratio $a/b=1/3$ and height of $h=b$ or $h=2b$. Influence of buildings orientation prevailed above that of the building height on wind effects in front of single building as well as that along the passage where the passage width played considerable role, too.*

1. Úvod

Modelování větrné situace osob v exteriérech kolem rozměrných staveb je další pohnutkou, která přivádí projektanty k větrným tunelům se simulovanou strukturou atmosférického větru. Při měřítku odpovídajícímu dostatečně velkým modelům zástavby (nejčastěji 1:300 až 1:400) mívá mezní vrstva dle simulované drsnosti terénu tloušťku kolem 1 m. Při dané aplikaci je kladen důraz na detailní dodržení geometrie v přízemních výškách nevyjímaje drobné terénní nerovnosti, zatímco struktura vyšších partií mezní vrstvy se v přízemní úrovni (na jmenovitých 1,5 m výšky chodce) projevuje menší měrou. Jako adekvátní měřicí prostředek vyhovují všesměrové Irwinovy sondy.

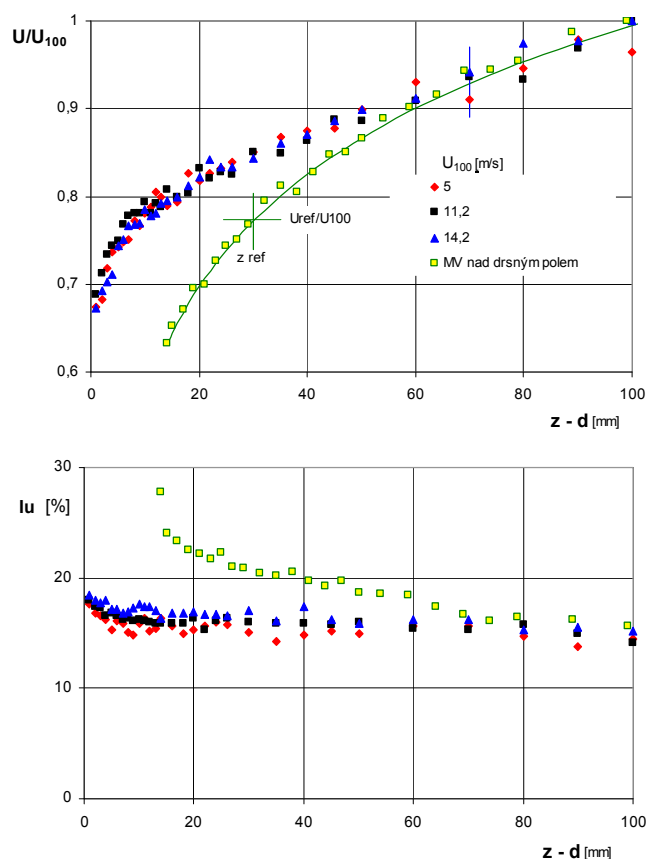
Pozn.: Za splnění určitých podmínek lze ze záznamu tlakového signálu zpracovat střední rychlost, standardní odchylky (fluktuační), případně špičky rychlosti. Postup kontroly větrné pohody napojuje tato data na meteorologické údaje lokality. Vypočtená sumární pravděpodobnost překročení efektivní rychlosti každého bodu pro všechny směry větru (efektivní rychlost je definována systémem kritérií) je posuzována tabulkami náročnosti různých aktivit s ohledem na předpokládané využití.

Prezentovaná práce provedená jako součást grantového úkolu (Jirsák & kol. 2008) se odlišuje od situačních studií finálním zájmem, jímž je získání orientace v míře některých nežádoucích jevů. Je sledována situace v blízkosti vysokých budov za extrémně jednoduchých okrajových podmínek při obměně jejich rozměrů. Jde o izolovaný model kvádřové budovy a jejich dvojici v plochem terénu s rovnoměrnou drsností. Sledování větrné expozice se přitom omezuje pouze na symetrály základů orientované ve směru nabíhajícího větru. Dvě výškové varianty budov byly kombinovány s oběma základními směry větru; při sledování větrné situace mezi dvojicí budov byla též modifikována šířka průchodu. Výsledky v bezrozměrném

* PhD. Ing. Milan Jirsák, Mgr. David Zacho, PhD. Ing. Petr Michálek. The Aeronautical Research and Test Institute (VZLÚ), Beranových 130, 199 050 Praha 9 Letňany; tel.: +420 225 115 530, +420 225 115 513, +420 225 115 344, fax: +420 286 920 518; e-mail: jirsak@vzlu.cz, zacho@vzlu.cz, michalek@vzlu.cz

tvaru demonstrují, jak jednotlivé proporce modifikují rozložení střední rychlosti, standardních odchylek okamžité rychlosti a špiček příslušných hodinovému záznamu v plném měřítku.

2. Větrný tunel a vlastnosti mezní vrstvy

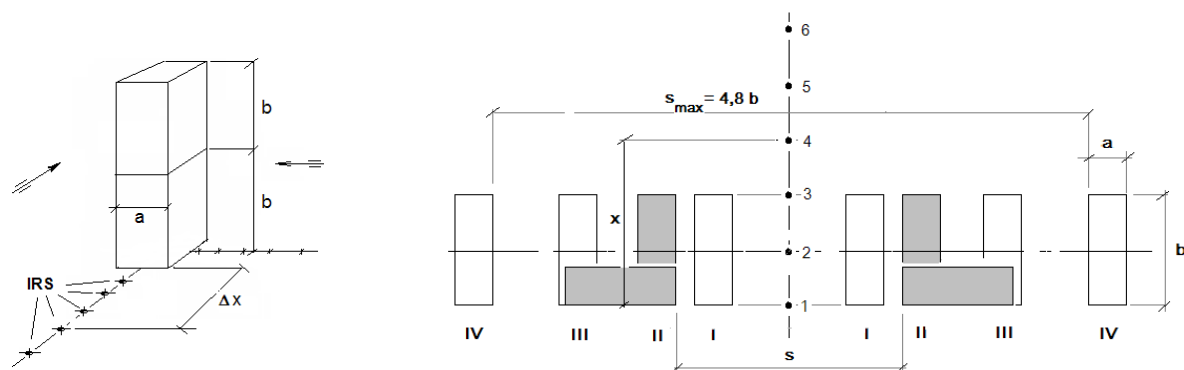


Charakteristiky modelové mezní vrstvy produkované větrným tunelem VZLÚ, a.s. s pracovní částí průřezu 1,8 x 1,5 m a délky 15,6 m, jsou doloženy ve zprávě Jirsák & kol. (2008). Modelová mezní vrstva nad předměstskou drsností (simulována hydroizolační folií se 7 mm kuželovitými výčnělky) má před modelovým prostorem tloušťku asi 1 m a vykazuje zde rovnovážný stav s logaritmickým profilem střední rychlosti ($z_0=0,46$ mm) a s mocninným průběhem výkonového spektra v tzv. inerciální podoblasti. Přechodem na hladký terén před modelem se tato rovnováha porušuje a mezní vrstva je v přízemní vrstvě urychlena, stejně, jako je tomu ve volném prostoru mezi skutečnými objekty (obr. 1).

Pozn.: Míra změn v mezní vrstvě dle obr. 1 závisí na vzdálenosti mezi ukončením drsného pole a daný místem. Pro její volbu neexistují opěrné hodnoty; měla by však odrážet vzdálenost mezi objekty v poměru k jejich velikosti.

Obr. 1 a, b Změna rozložení střední rychlosti a intenzity turbulence v mezní vrstvě vyvolaná vstupem na hladký terén. Jde o profily při třech rychlostech v rovině čelní fasády (d.. posunutí povrchu)

3. Modely kvádrových staveb

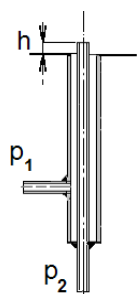


Obr. 2, 3 Sledování větrné expozice chodců před izolovanou kvádrovou budovou a na ose průchodu rovnoběžné s hlavním směrem větru při dvojí orientaci a výšce objektů.

Pro experimenty uskutečněné v rámci grantového projektu byla vyrobena sada 6 shodných kvádrů o rozměrech 58 x 175 x 175 mm z extrudovaného syntetického Cibatoolu. Závítová spojení umožňují propojení elementů na modely s výškou 350 mm. Při měřítku 1:333, které odpovídá proporci efektivní výšky sondy $h_e \approx 4,5$ mm ke jmenovité výšce chodce (1,5 m) reprezentuje model budovu s podstavou 19,3 x 58,3 m a s výškou 58,3 m, alternativně 116,6 m. Při měřítku 1:400 (bližší modelu struktury AMV) je výška jednoho elementu zhruba rovna tloušťce povrchové vrstvy atmosféry. Při zdvojení na 350 mm model sahá asi do třetiny tloušťky mezní vrstvy, jejíž vlastnosti jsou zcela přijatelné až do $z=500$ mm (logaritmický profil střední rychlosti, 2D rozložení na 2/3 rozpětí, intenzita turbulence, výkonové spektrum). Odchytky vyšší části mezní vrstvy vůči AMV by již situaci chodců neměly ovlivňovat.

4. Měřicí technika a provedení experimentu

K snímání okamžitých rychlostí bylo aplikováno pět, resp. šest Irwinových sond s výškou centrální trubice $h=4$ mm (obr. 4), rozmístěných dle obr. 2, 3. Tlaková difference byla měřena odpovídajícím počtem snímačů Honeywell DC001NDC4 s pracovním rozsahem 250 N/m² připojených polyethylenovými hadičkami světlosti 2 mm s délkou 900 mm. Referenční rychlost byla kontrolována sondou Dantec 54T28 umístěnou nad mezní vrstvou před vstupem do modelového prostoru (U_∞) a digitálním otáčkoměrem.



Analogový signál po dolnoproustné filtraci 300 Hz byl vzorkován frekvencí 3 kHz. Při dosazení měřítka délek a gradientových rychlostí (U_G .. rychlost na okraji mezní vrstvy) vyplývá měřítka času z identity Strouhalova čísla pro model a plné měřítka. Požadavku $T_p=1$ h záznamu v prototypovém (= plném) při měřítku zmenšení délek $L_m/L_p=1/333$ a měřítka gradientových rychlostí

Obr. 4

$$U_{G,p}/U_{G,m} \approx 2,5 (=37,5/15) \quad \text{odpovídá čas záznamu u modelu}$$

$$T_m = T_p (L_m/L_p)(U_{G,p}/U_{G,m}) = 3600(1/333)2,5 = 27 \text{ s} \approx 0,5 \text{ min.}$$

Experiment s izolovanou budovou byl uskutečněn při referenční rychlosti $U_\infty=15$ m/s, měření v průchodu při třech rychlostech dle tabulky. Reynoldsova čísla modelu $Re_a=a U_{175}/\nu$ a $Re_b=b U_{175}/\nu$ přísluší zde střední rychlosti U_{175} [m/s] v rovnovážné mezní vrstvě na $z=b=175$ mm.

$U_{ref}=U_\infty$	U_{175}	$10^{-3} Re_a$	$10^{-3} Re_b$
7	4,88	19,0	56,9
11	7,67	29,8	89,5
15	10,46	40,6	122,0

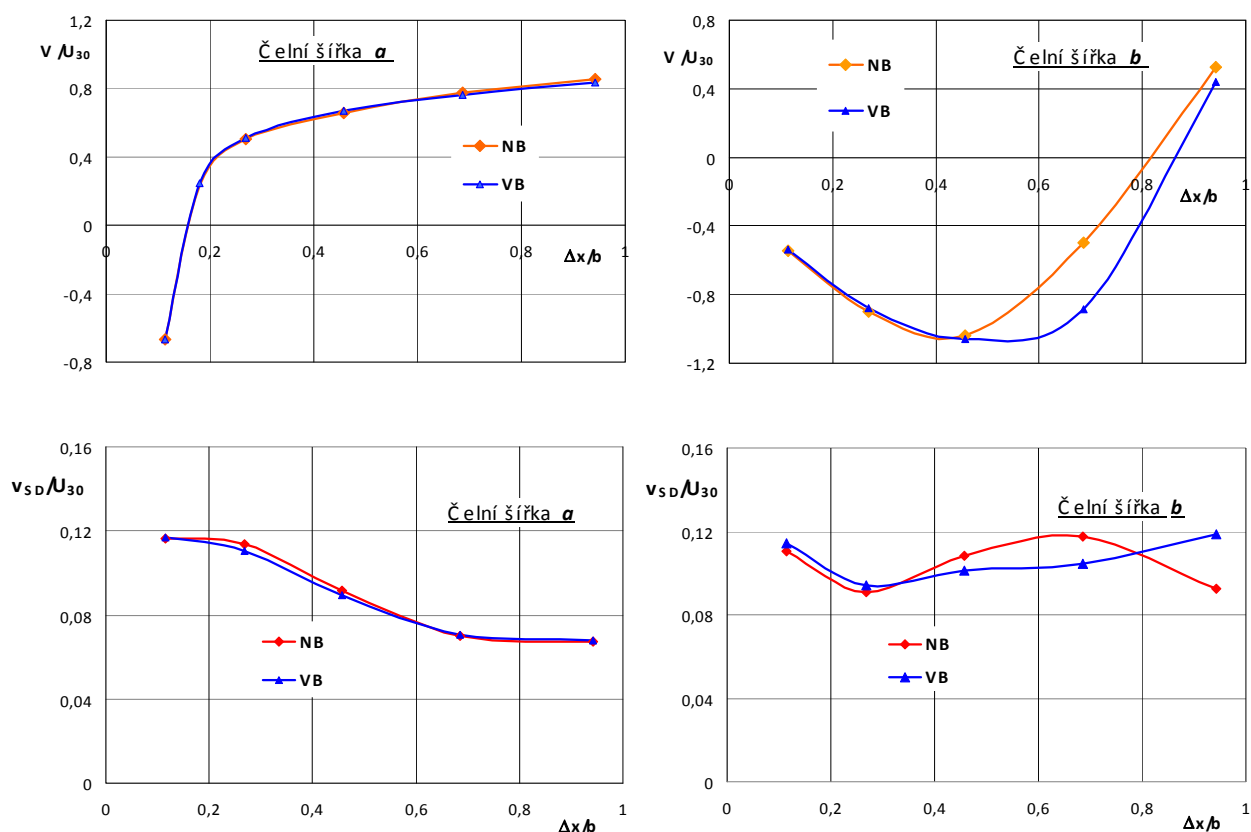
Pozn.: Kritické Reynoldsovo číslo hranatého objektu obtékaného mezní vrstvou (definované příčným rozměrem a střední rychlostí na úrovni jeho výšky) uvádí se orientačně jako $1,0 \cdot 10^4$ až $4 \cdot 10^4$ dle ASCE Manual (1999). Kritické hodnoty kolísají dle podmínek experimentu, jako jsou geometrie a poměrná velikost objektu k tloušťce mezní vrstvy, orientace vůči hlavnímu směru proudění a jeho struktura formovaná blízkým i vzdálenějším terénem.

5. Výsledky

Pro oba experimenty jsou výsledné hodnoty uvedeny poměrem ke střední rychlosti na výšce $z = 10$ m plného měřítka (v této podobě jsou dostupné meteorologické údaje) k přepočtu na absolutní hodnoty. V případě modelu odpovídá tomu střední rychlost $U_{30} = 7,35$ m/s v mezní vrstvě za stavu rovnováhy na výšce $z-d = 30$ mm, což je asi 0,52- násobek rychlosti na okraji mezní vrstvy (bod vyznačen v obr. 1 a).

5.1 Větrná situace před izolovanou budovou

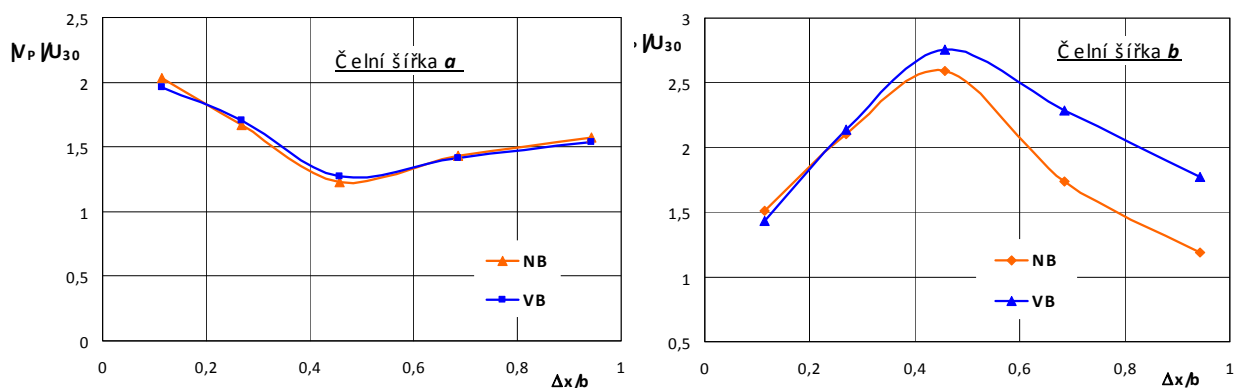
Účinkem gradientu střední rychlosti a velkých vírů s nimiž mezní vrstva dopadá na čelní fasádu, vzniká zde neustálené vertikální proudění, tzv. „downwash“, které se za silných větrů projevuje nebezpečnými horizontálními poryvy při zemi. Sledována byla pouze situace podél osy půdorysu při postupném nastavení obou fasád kolmo k nabíhajícího větru (šířka $b = 3a$).



Obr. 5. Izolovaná budova, účinky „downwash“ před čelními fasádami : a, b – střední rychlost, c, d – standardní odchylky okamžitých rychlostí. NB ..výška budovy $H=b=3a$, VB ..zdvojená výška $2H$.

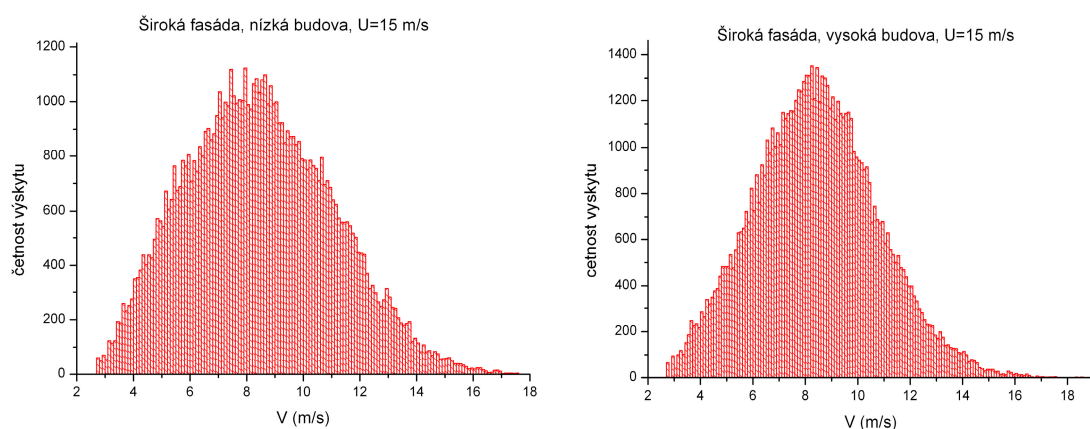
Na rozložení střední rychlosti V v úrovni chodců nedaleko návětrné fasády pozorujeme vratné proudění vytvářené patním vírem. Jde vlastně o střední partii známého podkovovitého víru (znaménko stanoveno z vizualizace). Jeho rozsah značně závisí na šířce fasády; závislost na výšce budovy se projevuje pouze u široké fasády za lokálním minimem, tj. pro $\Delta x/b > 0,45$.

Standardní odchylky okamžitých rychlostí pro úzkou fasádu monotónně klesají se vzdáleností od budovy téměř bez závislosti na její výšce. U široké fasády je situace složitější. Ve středních partiích, kde se protiproud střetává s nabíhajícím prouděním, fluktuace převyšují úroveň pro úzkou fasádu a se vzdáleností nejprve rostou. Trend růstu pro nízkou budovu končí při odstupu $\Delta x/b \approx 0,7$; u budovy zdvojené výšky je nárůst mírnější, avšak jeho oblast rozsáhlejší.



Obr. 6. Rozložení špiček pro tentýž případ. Špičky odpovídají hodinovému záznamu u prototypu.

Za silného větru je stabilita osob v návětrném prostoru kriticky ohrožena špičkami rychlosti vznikajícími střetáváním vírů nesených nabíhajícím větrem s impulsy od „downwash“. Silné protisměrné poryvy u země byly potvrzeny vizualizací. Rozdíl mezi šířkami fasád působících jako odrazné plochy se projevuje polohou i úrovní kulminace špiček, neboť úhrnná energie flukuačního pohybu na celé fasádě je značně rozdílná. Hodinové špičky rychlosti pro širokou fasádu, dosahující v odlehlosti $\Delta x/b = 0,46$ úroveň $(2,6 \div 2,7)U_{30}$, činily na modelu téměř 20 m/s (72 km/h), což je asi 1,43 násobek hodnoty gradientové rychlosti mezní vrstvy.



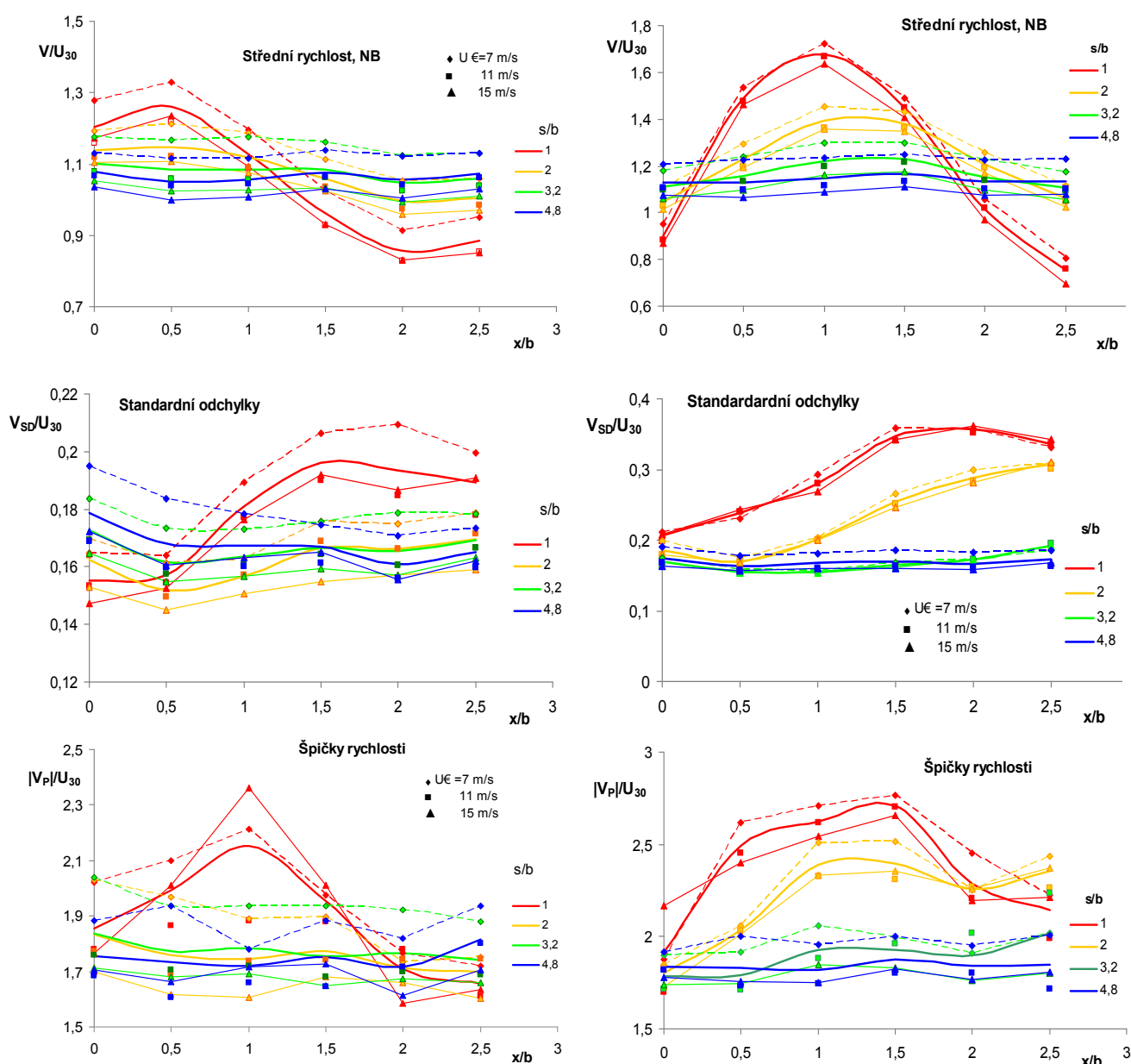
Obr. 7. Četnost výskytu špiček dle záznamu z Irwinovy sondy č.3 ($\Delta x/b=0,46$) pro dvojí výšku budov s příčnou orientací. Referenční rychlost $U_{\text{ref}}=15$ m/s, vzorkovací frekvence $f_{\text{vz}}=3$ kHz, $T=30$ s.

Slabý vliv výšky budovy na úroveň nejvyšších špiček může mít příčinu v délkovém měřítku podélné složky turbulence, které ve větrném tunelu vrcholí na výšce asi 0,2 m (tj. cca 70 m u prototypu), zatímco u atmosférických modelů $L_{u,x}$ vzrůstá až do $z=200 \div 250$ m. Špičky u vyšší budovy mohou proto být podhodnoceny. Histogramy dle obr. 7 odpovídají Weibullovu

rozložení hustoty pravděpodobnosti. Jemné změny jeho parametrů mohou způsobovat rozdíly v turbulentní struktuře při překročení tloušťky povrchové vrstvy; příčinu lze však hledat i v nedokonalosti odezvové charakteristiky měřicích linek, která může mít vliv i na uvedená rozložení standardních odchylek a špiček (v současnosti již je zdokonalována).

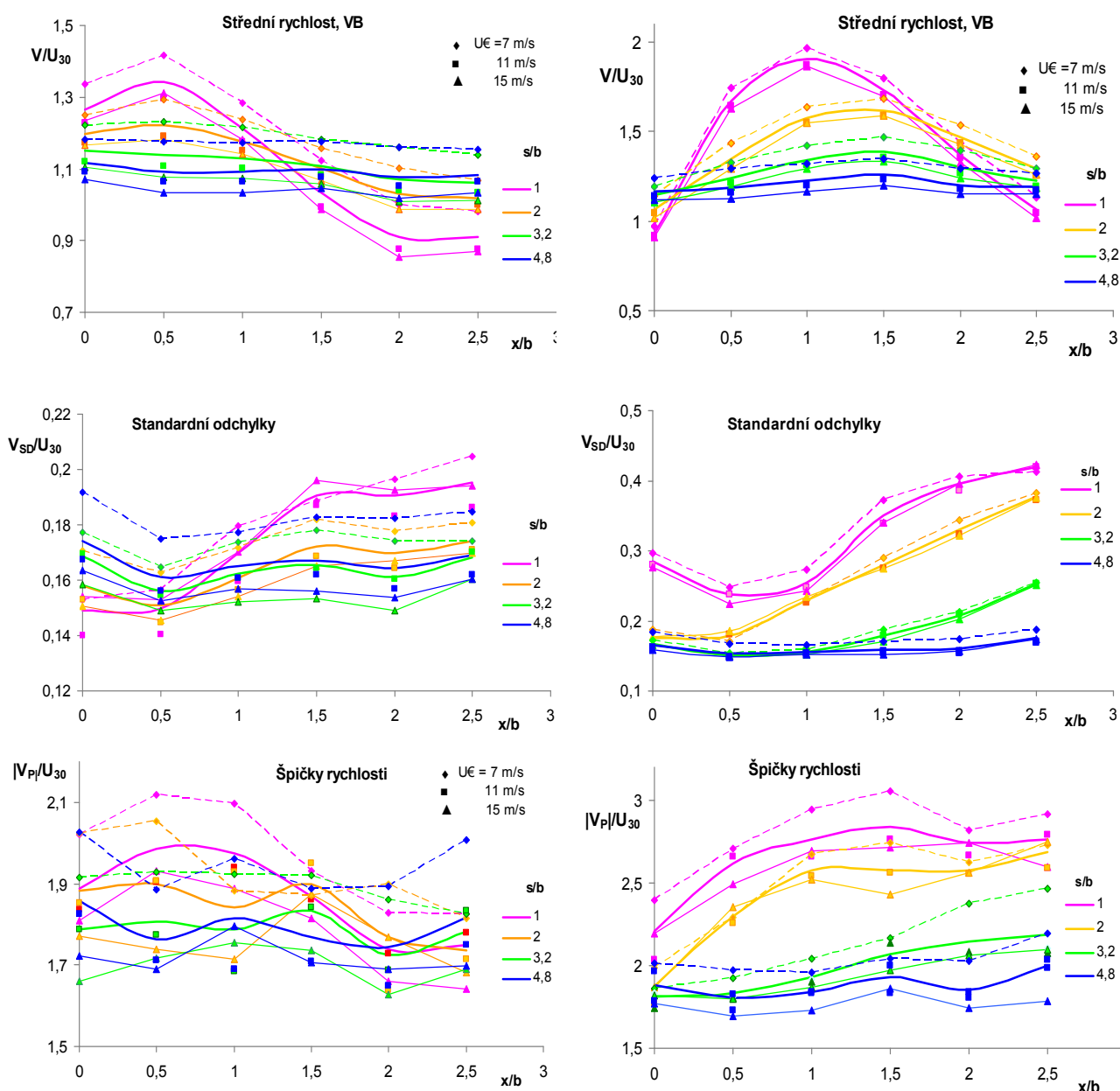
5.2. Průchod mezi dvěma izolovanými budovami

Mimo oblasti zvýšené větrné expozice u všech návětrných nároží je důležitým případem proudění v mezeře mezi dvěma budovami při osovém směru větru. Podnětem byl příspěvek Blocken et al.(2005) konfrontující proudění mezi krychlemi s jeho CFD řešením.



Obr. 8 Průběhy charakteristických veličin podél osy průchodu pro nízké budovy při podélné (vlevo) a příčné orientaci jejich půdorysu (vpravo) vůči hlavnímu směru nabíhajícího větru.

V experimentu byly použity tytéž kvádrové modely jako při testech s osamocenou budovou; shodná byla též mezní vrstva, uspořádání v modelovém prostoru a technika měření. Volený rozsah šířky průchodu čerpal z výtěžku práce Timofejev & Kuzněcov (2001). Obr. 8 znázorňuje výsledky pro obě orientace nízkých budov při čtyřech šířkách průchodu (jež jsou barevně odlišeny). Hladké silné křivky odpovídají průměrům pro tři nastavené rychlosti, lomené čáry se značkami vyznačují data pro krajní referenční rychlosti (indikují vliv Re-číslo).



Obr. 9. Průběhy veličin podél osy průchodu pro vysoké budovy při podélné (vlevo) a příčné orientaci půdorysu (vpravo) vůči hlavnímu směru nabíhajícího větru.

V obr. 9 jsou analogické výsledky pro vysoké budovy. Zdvojnásobení výšky budov má na větrnou situaci chodců opět slabší účinek, než změna *orientace*, která na rozložení střední

rychlosti a špiček pro malá s/b způsobuje nápadné kvalitativní rozdíly. Při podélné orientaci delších fasád vůči nabíhajícímu větru se rozložení obou veličin blíží celé vlně harmonického průběhu proti půlvlně s větší amplitudou a délkou při orientaci příčné. Standardní odchylky při příčné orientaci vzrůstají téměř na dvojnásobek a s výškou objektů tato změna ještě sílí.

Šířka průchodu má rovněž podstatný vliv. Specifický průběh profilu střední rychlosti s výrazným maximem na sondě č. 2 (s pozicí $x/b=0,5$) a minimem na sondě č. 5 (pozice $x/b=2$) přísluší u nízkých i vysokých budov nejužší mezeře $s/b=1$, zatímco případ $s/b=2$ je přechodem k rovnoměrnějším průběhům pro největší šířky, které se s výškou budov příliš neliší. Odlišnost průběhu pro nejužší mezeru je způsobena kontrakcí zatopeného proudu s větší disipací energie před zpětným vyrovnaním profilu rychlosti s okolím. Při velkých mezích mezi objekty inklinuje obraz obtékání budov k souměrnému bez vzájemné interference. V těchto případech se přilnutí posouvá návětrným hranám a u největší mezery se typicky na sondě č. 2 např. objevuje lokální minimum střední rychlosti namísto maxima pro malá s/b .

S výškou objektů maximum střední rychlosti poněkud vzrůstá a přesouvá se směrem po větru. Pozoruhodný je vliv výšky na rozložení špiček u podélné orientace objektů při nejmenší šířce. Ovlivnění špiček při mezeře $s=b$ je zde opačné, než ovlivnění střední rychlosti. Nejvyšší průměrná hodnota 2,15 pro nízké budovy s podélnou orientací klesá na 2,0 u jejich dvojnásobné výšky, což je případ nejnižších špiček při $s=b$. Největší špičky 2,8 a 2,7 byly naopak zjištěny u vysokých budov v příčné orientaci.

Změny sledovaných veličin s rychlostí indikují jistý vliv Reynoldsova čísla, které zvláště v případě podélné orientace patrně omezuje zobecnění modelových výsledků. Vliv Re-čísla by neměl být podstatný u příčné orientace budov. Charakteristické hodnoty rozložení opět vztahované ke střední rychlosti větru na 10 m výšce (v rovnovážné mezní vrstvě) uvádí následující tabulka:

Orientace půdorysu vůči větru Výška budov	PODÉLNÁ		PŘÍČNÁ	
	Nízká	Vysoká	Nízká	Vysoká
STŘEDNÍ RYCHLOST 1) rozpětí intervalu průměrné hodnoty 2) max.průměrná a max.individuál.hodnota	0,4037	0,4318	0,9204	0,9713
	1,2606	1,3287	1,3411	1,4161
	1,6749	1,7235	1,9021	1,9682
STANDARDNÍ ODCHYLKY	0,0392	0,0462	0,1508	0,1815
	0,1962	0,2095	0,1951	0,2047
	0,3567	0,3614	0,4187	0,4234
ŠPIČKY	0,4971	0,2452	0,7955	0,6359
	2,1521	2,3605	1,9845	2,0979
	2,7101	2,7662	2,8426	3,0559

Důsledky pro projekci. Při návrhu seskupení budov s malou plošnou hustotou je třeba se vyvarovat příliš malým šířkám mezery ($s/b \approx 2$ a menším), kdy se v průchodu vytváří zatopený proud se silným nárůstem kinetické energie v jádru s následným rozvířením, kde lze očekávat standardní odchylky o 50 až 100 % vyšší, než např. u poměrné šířky mezery $s/b \approx 5$.

6. Závěr

Prezentovaná data naznačují, že Irwinovy sondy ve spojení s větrným tunelem generujícím strukturu atmosférického větru mají uplatnění i pro studie větrné expozice chodců obecného zaměření. Testy soustředěné v tomto případě na osamocené budovy tvaru kvádra o typickém stranovém poměru, a na sledování situace podél os v hlavních směrech nabíhajícího větru,

poskytly přibližnou velikost středních rychlostí, standardních odchylek a špiček při dvojím situování a dvojí výšce budov. Výsledky pro průchod mezi budovami upozorňují na jistý vliv Reynoldsova čísla budov při experimentu. Je však možné, že Re-číslo ovlivňuje i pole proudění v okolí referenční sondy.

Při volbě určitého systému kritérií lze prezentované průběhy primárních veličin redukovat na rozložení efektivní rychlosti definované vybranými kritérii pohody chodců. K plošné studii pro vytipování kritických míst větrné expozice u složitějších seskupení budov se lépe hodí klasická posypová metoda. Ačkoliv je v současnosti různými pracovišti rozvíjena, zůstává být metodou semikvantitativní, vhodnou pro první fázi rozborů.

Na závěr shrnutí je třeba podotknout, že větrným jevům v exteriérech musí být věnována zvýšená pozornost především u nově vyvíjených území, neboť mezi ojedinělými vysokými budovami či jejich skupinami umístěnými do nižší zástavby je třeba počítat s větší aerodynamickou interferencí, stejně jako při jejich umístění v otevřeném terénu (*ASCE Manual*, 1999).

7. Poděkování

Autoři vyjadřují své uznání za podporu GAČR v rámci projektu 103/06/1522, za organizační spolupráci KÚ ČVUT i VZLÚ, a.s., jenž také práci spolufinancoval a též děkují všem dalším kolegům, kteří mají na splnění grantového úkolu svůj podíl.

8. Literatura

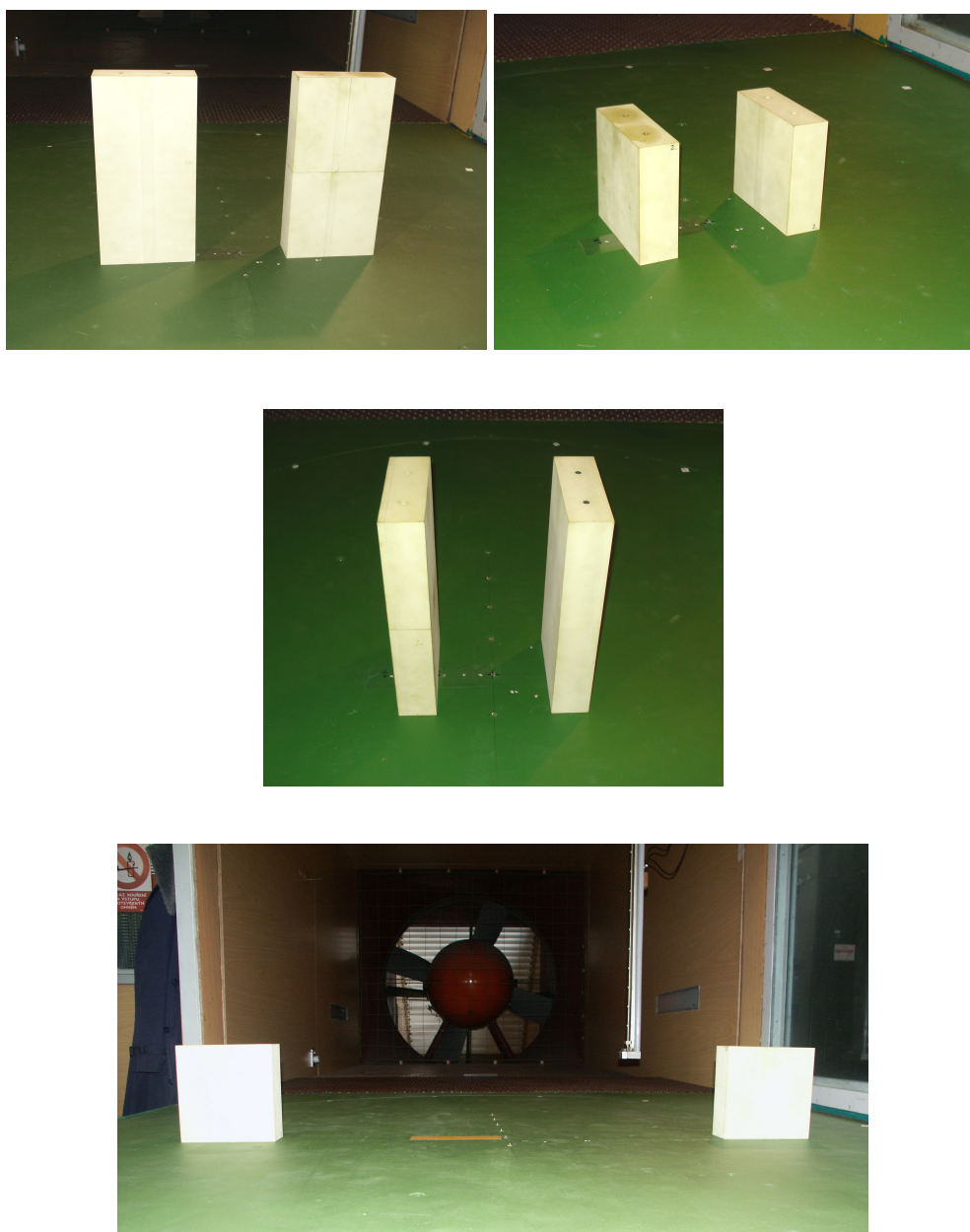
- Jirsák, M. & kol. (2008) Modelování větrných podmínek chodců s použitím Irwinových sond, R-4361 VZLÚ
- Irwin, H. P. A. H. (1981) A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodyn.*, Vol. 7, 219-239
- Jirsák, M. & Zachoval, D. (2008) Experimental study of pedestrian wind comfort over railway-station platforms, Engineering mechanics conf., Svratka 2008, CR, 112,113
- Wu, H. & Stathopoulos, T. (1994) Further experiments on Irwin's surface wind sensor, *J. of Wind Eng. and Ind. Aerod.*, Vol. 53, 441-452
- ASCE Manuals & Reports on Eng. Practice, No.67* (1999) *Wind Tunnel Studies of Buildings & Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia
- Blocken, B., Carmelet, J., Stathopoulos, T. (2005) A numerical study of the wind speed conditions in passages between buildings and the Venturi effect, *4 EACWE Prague*, 42-43, #112
- Timofeyev, M. & Kuznetsov, S. (2001) Pedestrian level wind conditions around two high-rise buildings, *Proc. 3EACWE Eindhoven*, 503-506.
- Jirsák, M. (2007) Větrné podmínky chodců v okolí rozměrných staveb (rešerše), R-3927 VZLÚ
- Jirsák, M., Zacho, D., Michálek, P., Jandová, K. (2008) : Irwin probe calibration and its use at modelling of pedestrian wind conditions in vicinity of high buildings. Col. on Fluid Dynamics, IT CAS, 23-24

Jirsák, M. & Zachoval, D. (2008) Experimental study of pedestrian wind comfort over railway-station platforms, Engineering Mechanics Conf., Svratka (CR) 2008, 112-113

Jirsák, M., Kabrhel, M., Zachoval, D. (2008) Modelování znečištění vzduchu větracím systémem, Vytápění, větrání, instalace 2/2008, s.74-77

Blocken, B., Carmelet, J., Stathopoulos, T. (2005) A numerical study of the wind speed conditions in passages between buildings and the Venturi effect, 4 EACWE, 42-43, #112

Semprich, S. (2004) Impact of wind storm on city life and built environment. COST C14 final evaluation report, EU May, 2004



Měření Irwinovými sondami na ose průchodu mezi budovami dvojí orientace a výšky při čtyřech různých šířkách mezery (pohled ve směru proudění vzduchu)