

# Visokoturbulentno mešanje vazduha ubačenog kroz sistem UnoDuct

Christian Heschl, visoka tehnička škola Burgenland GmbH

## **Ukratko o sadržaju**

*Do sada sprovedena ispitivanja o širenju slobodnih mlazeva najčešće su bila ograničena na aksijalno-simetrične i dvodimenzionalne difuzore za vazduh. Pored toga poznati su eksperimentalni nalazi niza mlazeva. Višestruki mlazevi u formi niza mlazeva ili niza linijskih difuzora su se ipak samo pojedinačno podvrgavali sistematskom ispitivanju. Pomoću numeričke simulacije strujanja diskutuju se turbulentni procesi razmena koji se pritom pojavljuju. Pokazuje se, da rastojanje susednih difuzora značajno utiče na opadanje brzine i temperature kao i turbulentnih procesa razmena.*

## **Uvod**

Glavni zadatak jednog ventilacionog postrojenja je taj, da korisniku obezbedi zahtevani kvalitet vazduha u prostoriji, kao i zahtevanu termičku klimu. Da bi ovi zahtevi mogli da se zadovolje, neophodno je da se već u fazi projektovanja izabere i dimenzioniše pogodan sistem za dovod vazduha.

Ukoliko treba da se upotrebi mehanička ventilacija na izboru stoje ventilacija istiskivanjem, ventilacija mešanjem ili izvorna ventilacija. U najvećem broju slučajeva upotrebljava se koncept ventilacije mešanjem, pri kojoj se dovodni vazduh uvodi pomoću jakog impulsa. Da bi se zahtevi korisnika mogli održati u pogledu termičke klime u prostoriji, difuzori se pri tome tako koncipiraju, da se obezbedi brzo opadanje brzine i temperature između dovodnog vazduha i vazduha u prostoriji. Zato se teži tome, da se garantuje intenzivno mešanje sa okolnim vazduhom. Pritom, značajne uticajne parametre predstavljaju turbulentni procesi razmena između mlaza dovodnog vazduha i vazduha u prostoriji.

Eksperimentalna i numerička ispitivanja pokazuju da ovi procesi razmene značajno zavise od nivoa turbulencije i brzine strujanja na izlazu iz difuzora [1, 2, 3]. Pored toga poznate su prostorno uslovljene uticajne veličine kao što su geometrija prostorije, prirodna konvektivna strujanja, slojevitosti temperatura itd. [4, 5]. Da bi postigli najbolje moguće uslove za korisnika, proizvođači difuzora moraju na jednoj strani da optimizuju turbulentne procese razmena, a na drugoj da projektantu stave na raspolaganje odgovarajuća pravila za izbor ka ciljnom iskorišćenju prostorno uslovljenih uticajnih veličina.

Iskusni tehničar ventilacije zato pokušava da iskoristi naročite fenomene strujanja, kao što je npr. Coanda-efekat, za poboljšanje uslova strujanja u klimatizovanim prostorijama. On se zasniva na činjenici, da mlaz sa svoje ivice povlači sa sobom okolni vazduh putem turbulentnog procesa razmene (Entrainment). Ukoliko iz razloga postojanja plafona ne može

da se dovede dovoljno vazduha iz okoline, nastaje potpritisak koji skreće mlaz ka plafonu. Ukoliko se dodatno spreči usisavanje vazduha sa strane, preko relativno dugog uvođenja vazduha kroz linijske difuzore, ovaj efekat se može značajno pojačati. Zbog toga se pojačano upotrebljavaju linijski difuzori i difuzori u formi niza mlazeva.

Uprkos iskorišćenju Coanda-efekta, u slučajevima hlađenja često dolazi do upada hladnog vazduha. Ako se ovo dogodi u zoni boravka, to može da dovede do pojave promaje a time i do termičke neugodnosti. Ovaj neželjeni efekat prouzrokovan je Arhimedovim uzgonom. On značajno zavisi od temperaturske razlike između okoline (temperatura vazduha u prostoriji) i jezgra mlaza. Tehničar ventilacije zato teži da što brže smanji ovu temperatursku razliku.

U ovom članku se analiziraju parametri turbulencije jednog difuzora u formi niza mlazeva i jednog linijskog difuzora i diskutuje njihovo dejstvo na raspodelu brzine i temperature. Da bi se omogućio proizvoljan periodičan prekid niza mlazeva, ispitivanja se baziraju na UNO-DUCT kanalskom sistemu sa mlaznicama fabrike Lufttechnik J. Pichler GmbH. Za ispitivanje linijskog difuzora usvojen je konvencionalni sistem.

## **Metodika**

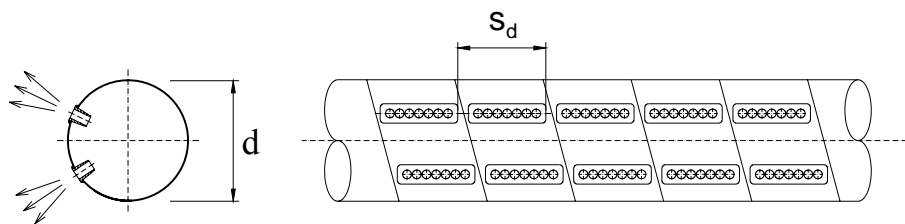
Pored klasičnih eksperimenata pristup ka potrebnim parametrima mogu da omoguće i numeričke simulacije (npr. CFD – Computational Fluid Dynamics). Obe metode pokazuju različite sposobnosti iskazivanja, ali su usko povezane i dopunjuju jedna drugu. Prednost numeričkog eksperimenta, da pripremi unapred sve informacije o svim značajnim fizičkim veličinama u prostoriji, se gubi zbog toga što mu nedostaje uopšteno važenje. Koliko ovaj nedostatak uopštenog važenja ima uticaj na kvalitet rezultata, zavisi od modeliranja i upotrebljenih numeričkih metoda.

Zato je neophodno da se validiraju numerički rezultati preko eksperimentalnih nalaza. Da bi se ovom zahtevu unutar predmetnih ispitivanja udovoljilo, sprovedeni su opsežni validacioni proračuni [6, 7]. Za proračune se koristio komercijalni CFD-Code FLUENT 5.5 [9].

## **Ispitivani sistemi za dovod vazduha**

Ispituju se dva sistema za dovod vazduha, koji omogućuju uvođenje vazduha preko celokupne širine prostorije. Konkretno se ocenjuju i interpretiraju značajni strujni parametri za konvencionalni linijski difuzor i UNO-DUCT kanalski sistem sa mlaznicama.

Kod UNO-DUCT kanalskog sistema sa mlaznicama dovodni vazduh se uvodi pomoću takozvanog „mlazničkog kanala“. On se sastoji od spiro cevi, u koju se ugrađuju tela mlaznica. Raspored tela mlaznica je pritom proizvoljan. Iz razloga čvrstoće utvrđeno je minimalno rastojanje tela mlaznica od  $s_d \geq 89\text{mm}$  u aksijalnom pravcu i 30mm u tangencijalnom pravcu. Svako telo mlaznice sadrži sedam otvora prečnika ca. 8.6 mm. Tako nastaje jedna vrsta sistema ugradnog sklopa, koji omogućava veliki broj kombinacija i može se veoma lako prilagoditi lokalnim uslovima.



**Slika 1: Detalj – telo mlaznice i UNO-Duct mlaznički kanal**

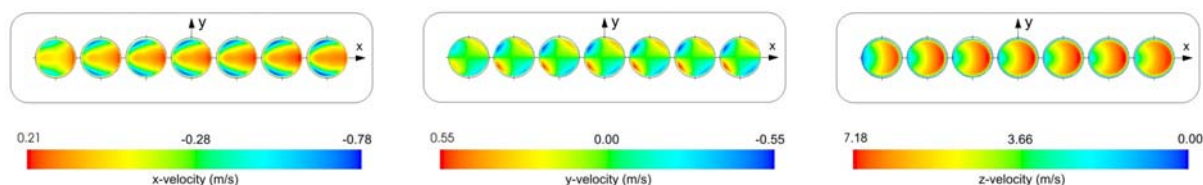
Preko istovremenog korišćenja spiro cevi kao nosećeg sistema i sistema za snabdevanje, moguće je da se dopusti dovođenje vazduha u skoro svim pravcima (diffus). Pritom proizvedeni mali pojedinačni mlazevi osetno povećavaju količinu sveukupno povučenog sekundarnog vazduha već nakon kraćeg rastojanja od difuzora. Time se brzina i temperaturska razlika između dovodnog vazduha i okoline značajno brže smanjuje nego što je to moguće sa jednim velikim pojedinačnim mlazom.

U podnetom radu ispitivanja su ograničena na mlazničke elemente raspoređene jedan pored drugog u jednom redu. Prema veličini rastojanja  $s_d$  se, pri ovom rasporedu takođe, očekuje veća indukcija a time i brže opadanje temperature i brzine u odnosu na konvencionalne linijske difuzore. Da bi se moglo ispitati dejstvo pojedinačnih mlazeva na širenje mlaza, sastavljena su dva simulaciona modela sa različitim graničnim uslovima na ulazu.

### **Simulacioni model**

Rezultat proračuna značajno zavisi od graničnih uslova na ulazu, tj. od uslova dovođenja vazduha za svaki difuzor. Zato su sprovedena posebna numerička i eksperimentalna ispitivanja za određivanje stanja na izlazu UNO-DUCT sistema kanala sa mlaznicama.

Pritom je moglo da se pokaže, da se srednja brzina na izlazu, pravac dovođenja i intenzitet turbulencije veoma dobro podudaraju sa izmerenim rezultatima. Pored toga se preko promene pravca posmatralo nastajanje duplog vrtloga – slično kao kod prostrujavanja cevnih kolena. Demonstrativno je za ove rezultate ispitivanja prikazana (Slika 2) konturna slika komponenti brzine.

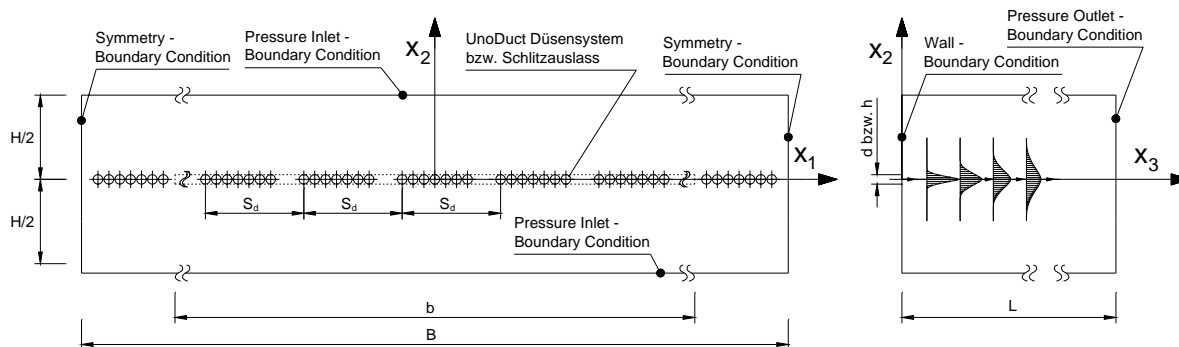


**Slika 2: Prikaz duplog vrtloga na difuzoru na sistemu Uno-Duct ( $p_{star}=20Pa$ ,  $u_{Kanal}=4m/s$ )**

Neophodni granični uslovi na ulazu za Uno-Duct sistem kanala sa mlaznicama generisani su iz ovih numeričkih ispitivanja. Iz razloga dobrog podudaranja između izmerenih rezultata i rezultata simulacije, izabran je isti način postupka za određivanje graničnih uslova na ulazu

linijskog difuzora. Time je obezbeđeno identično ispunjenje jednačina modela u ulaznoj oblasti.

Slika 3 pokazuje principijelni prikaz upotrebljenog simulacionog modela. Ulazni otvor se sastoji od jedanaest mlazničkih elemenata svaki sa po sedam otvora, odnosno jednog preseza širine  $b = 520\text{mm}$ . Prečnici otvora iznose  $d = 8.6\text{mm}$  a visina preseza iznosi  $h = 8.6\text{mm}$ . Dimenzije oblasti za proračun su utvrđene sa  $L \times B \times H = 3.6 \times 0.979 \times 2.5\text{m}^3$ .

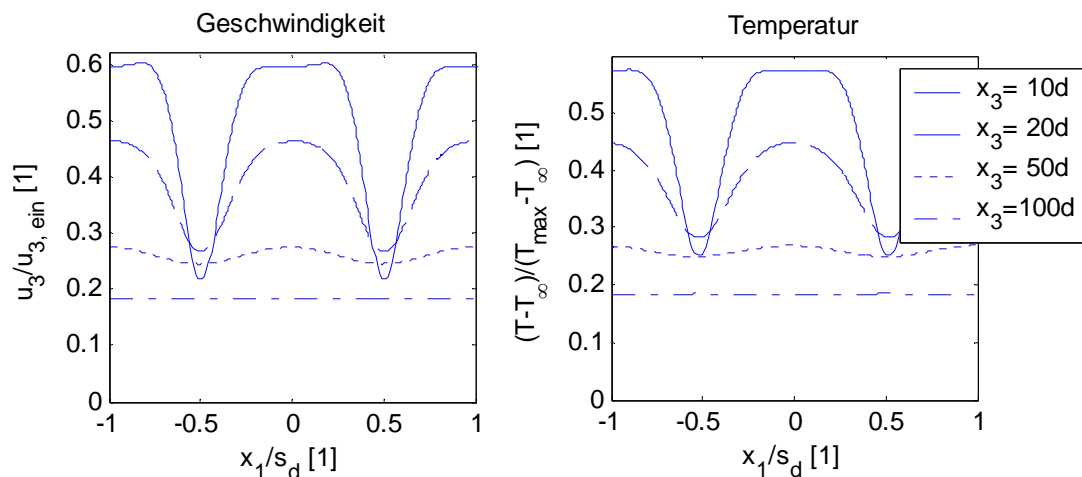


**Slika 3: Prikaz upotrebljenih graničnih uslova unutar simulacionog modela**

Izabrane geometrijske dimenzije ulaznih otvora garantuju identična strujanja, tj. oba sistema za dovođenje vazduha pokazuju iste masene, impulsne i energijske protoke u poprečnom preseku na ulazu. Time su ispunjene značajne osnovne pretpostavke za objektivno upoređivanje sistema.

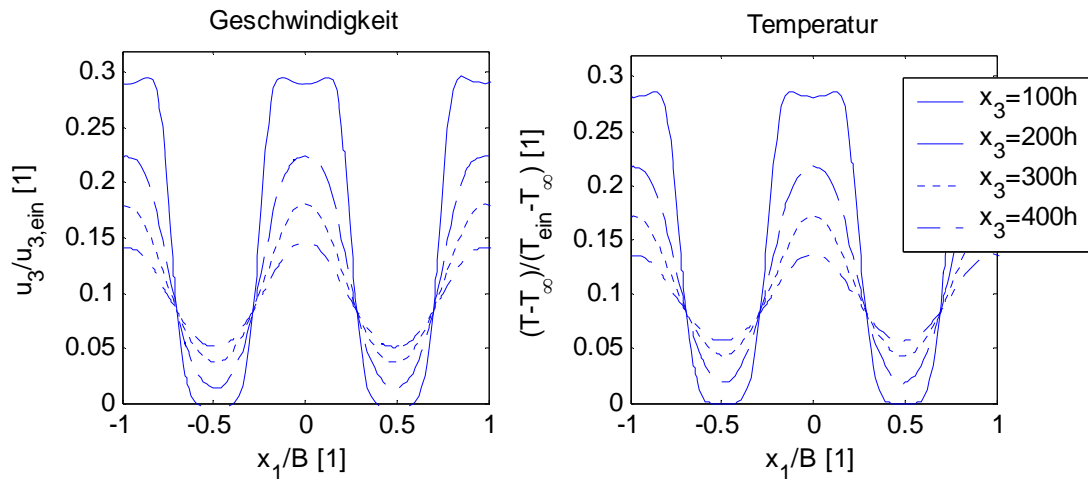
## Diskusija rezultata

Da bi se rezultati opšte važeće interpretacije napravili pristupačnim, vrši se bezdimenzioni prikaz karakterističnih veličina. Iz razloga trodimenzionalnog strujanja vrši se izračunavanje u ravni  $x_1 = 0$  (Slika 3). Kao osnova za proračun poslužilo je rastojanje između tela mlaznica od  $s_d = 89\text{mm}$  i rastojanje preseza od  $B = 979\text{mm}$ .



**Slika 4: Profili srednjih brzina i temperatura – difuzor UnoDuct**

Nakon izlaska mlaza okolni vazduh pritiče odozgo i odozdo u pravcu srednje ravni mlaza. Već nakon kraćeg rastojanja od otvora kroz koji izlazi mlaz, okolni vazduh takođe pritiče i sa strana. Iz razloga izabrane postavke modeliranja vazduh ne može da struji preko ravni simetrije, tako da se naniže od struje obrazuje kvazi-ravanski slobodni mlaz. Koliko brzo se vrši ovaj prelaz iz višestrukog mlaza u pojedinačni mlaz, zavisi od rastojanja između elemenata difuzora i turbulentnih procesa razmena.

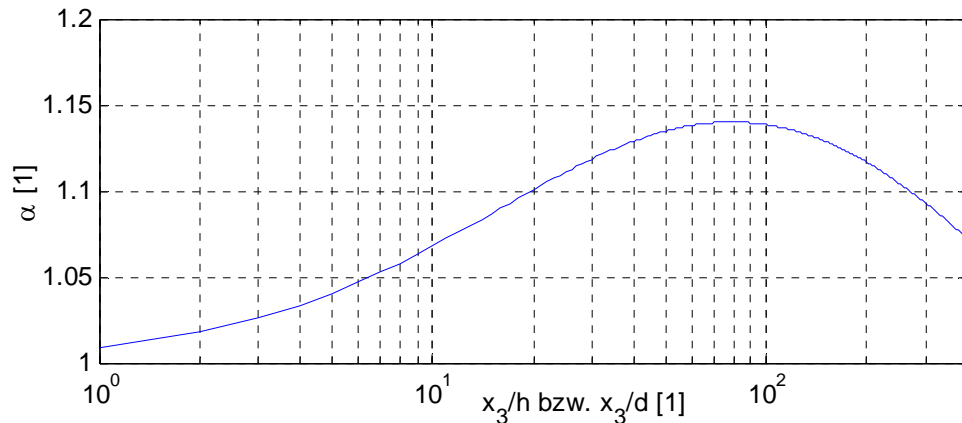


**Slika 5: Profili srednjih brzina i temperatura – konvencionalni difuzori**

Slika 4 i Slika 5 pokazuju bezdimenzione srednje brzine kao i srednje temperature u ravni  $x_2 = 0$ . Unutar dužine mlaza od  $x_3 < 100d$  jasno se prepoznaju gradijenti brzine kod sistema UnoDuct. Oni proizvode poprečno prema pravcu glavnog strujanja u ravni  $x_2 = 0$  dodatnu turbulentnu razmenu impulsa i toplote.

Kod linijskih difuzora takođe postoje u ravni  $x_2 = 0$  na ivicama stranica turbulentna poprečna kretanja. Iz razloga većeg rastojanja između dovodnih elemenata, ipak se značajno sporije smanjuju periodični maksimumi brzina. Ovakvo ponašanje pri prelazu iz višestrukog u pojedinačni mlaz se i očekivao.

Da bi se mogla analizirati globalna dejstva različitih turbulentnih transportnih procesa, na Slika 6 je prikazan odnos između zapreminskog protoka na ulazu i mlazom odvedenog zapreminskog protoka duž toka mlaza.

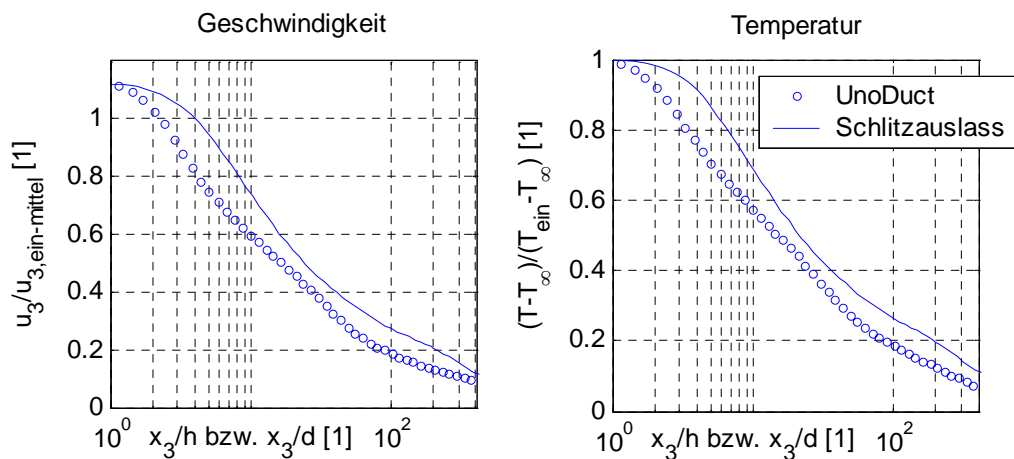


Slika 6: Odnos mlazom povučenih zapreminskih protoka

Parametar  $\alpha$  se pritom definiše na ovaj način

$$\alpha = \frac{\dot{V}_{UnoDuct}(x_3)}{\dot{V}_{Schlitzauslass}(x_3)}. \quad (7)$$

Jasno se prepoznaje, da se u posmatranoj oblasti (dužina toka mlaza ca. 100d do 400d) preko UnoDuct sistema kanala sa mlaznicama odvodi sa mlazom do 15% više vazduha. Sa povećanjem rastojanja odnos  $\alpha$  se smanjuje i asimptotski se približava vrednosti 1. Ovo se može time obrazložiti, da se nakon određene dužine toka, takođe i kod linijskih difuzora obrazuje kvazi-ravansko strujanje slobodnog mlaza.



Slika 7: Tok srednje brzine i temperature na osi glavnog mlaza

Na osnovu intenzivnog mešanja sa okolnim vazduhom i bržeg obrazovanja kvazi-ravanskog slobodnog mlaza, omogućuje se osetno veće opadanje brzine i temperature. Prema Slika 7 se unutar dužine toka mlaza od 100d do 400d računa sa za ca. 25% manjom srednjom brzinom i temperaturom na osi glavnog mlaza.

## **Rezime**

Vrsta i način uvođenja vazduha imaju značajan uticaj na termičku ugodnost korisnika. Za obezbeđivanje zahteva, projektantu ventilacionih instalacija stoje na raspolaganju najrazličitiji sistemi za dovođenje vazduha. U slučajevima hlađenja se specijalno često upotrebljavaju sistemi koji obezbeđuju optimalno iskorišćenje Coanda-efekta. Pored linijskih difuzora sve više se primenjuju tela mlaznica, koja se raspoređuju u jednom redu jedna pored druge. Preko jednostavne konstrukcije ovi mlaznički elementi se mogu direktno umetnuti u spiro cevi.

Suprotno u odnosu na linijske difuzore, vazduh se u prostoriju dovodi kroz veliki broj otvora. Nakon ulaska dovodnog vazduha obrazuju se mali pojedinačni mlazevi, koji ne dopuštaju kvazi-dvodimenzionalno posmatranje strujanja u blizini izlaza. Sem toga, tela mlaznica raspoređenih jedna pored druge, poseduju iz razloga čvrstoće minimalno rastojanje. Ove geometrijske pretpostavke dovode, neposredno nakon uvođenja vazduha, do relativno velikih gradijenata brzine i temperature, čija su dejstva bila ispitivana.

Za ispitivanje su usvojene numeričke metode, koje su validirane u drugim radovima sa merenjima. Sprovedena su uporediva ispitivanja između konvencionalnih linijskih difuzora i opisanog sistema za dovod vazduha UnoDuct fabrike Lufttechnik J. Pichler GmbH. Pritom se pretpostavljalo da se visina preseka podudara sa prečnikom otvora tela mlaznice. Da bi se pritom mogao isključiti uticaj parametara turbulencije mlaza dovodnog vazduha, putem geometrijskog obrazovanja zatvorenih površina u prostoriji, sprovedo se modeliranje zasnovano na uslovima slobodnog mlaza, tj. da se može povući dovoljno vazduha iz okoline. Osim toga bilo je isključeno krivljenje mlaza na osnovu Arhimedovog potiska, odnosno uzgona.

Kod UnoDuct sistema sa mlaznicama vrši se, iz razloga smanjenih rastojanja između difuzora, značajno brži prelaz ka kvazi-ravanskom slobodnom mlazu nego kod adekvatnog toka višestrukih mlazeva (identični maseni, impulsni i toplotni protok). Pored toga su posmatrani osetno intenzivniji turbulentni procesi razmena sa okolnim vazduhom u posmatranoj oblasti (dužina toka mlaza ca. 100d do 400d). Moglo se pokazati, da brži prelaz ka kvazi-ravanskom slobodnom mlazu i veći parametri turbulencije vode ka boljem mešanju vazduha.

Pod opisanim graničnim uslovima je, u poređenju sa adekvatnim tokom višestrukih mlazeva, relativno povedeni zapreminski protok kod UnoDuct sistema kanala sa mlaznicama veći do 15%. Smanjenje srednje brzine i temperaturne razlike vrši se na osi glavnog mlaza brže za ca. 25%. Zato su, naročito u slučaju hlađenja, date bolje pretpostavke za održanje zahtevane termičke klime u prostoriji.

## **Korišćena literatura**

- [1] Hanel, B., Beitrag zur Berechnung von Freistrahlen mit erhöhter Anfangsturbulenz, *Luft- und Kältetechnik*, (1977), 63-67.
- [2] Hanel, B., Richter, E., Das Verhalten von Freistrahlen in verschiedenen Reynolds-Zahlenbereichen, *Luft- und Kältetechnik*, (1979), 12-17.
- [3] Regenscheit, B., Einfluss der Reynoldszahl auf die Geschwindigkeitsabnahme turbulenter Freistrahlen, *HLH 27*, (1976), 122-126.
- [4] Peng, S., Modelling of Turbulent Flow and Heat Transfer for Building Ventilation, *PhD-Thesis*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, (1998).
- [5] Zhang, G., Morsing, S., Bjerg, B., Sviidt, K., A Study on the characteristics of airflow in a full scale room with a slot wall inlet beneath the ceiling, *Proceedings of RoomVent'2000*, (2000), 199-204.
- [6] Heschl, H., Fesharaki, M., Raumlufströmungssimulation, *Internationaler Kongress e.nova.2001*, Pinkafeld, (2001).
- [7] Hanel, B., Die Berechnung der Mischungszone eines axialsymmetrischen turbulenten Freistrahls, *Luft- und Kältetechnik*, (1976), 193-197.
- [8] Heschl, H., Fesharaki, M., Steinkellner M., Validation der CFD-Analyse von Raumlufströmungen mittels Messungen, *Fluent Anwenderkonferenz*, Frankenthal, (2002).
- [9] FLUENT, FLUENT 5.0 User's Guide, *Fluent Inc. Centerra Resource Park*, Lebanon, (1998).



## **Nomenklatura**

$b$	Širina proreza [m]
$B$	Širina oblasti za proračun [m]
$d$	Prečnik otvora, prečnik kanala [m]
$h$	Visina proreza [m]
$p_{stat}$	Statički pritisak u kanalu [Pa]
$s_d$	Rastojanje između dva susedna mlaznička elementa [m]
$t$	Vreme [s]
$T$	Temperatura [K]
$T_{ein}$	Srednja temperatura na ulazu [K]
$T_{max}$	Maksimalna temperatura u posmatranoj ravni [K]
$T_{\infty}$	Temperatura okoline [K]
$u_i$	Srednja brzina po x, y odnosno z-osi ( $i = 1,2$ odnosno 3) [m/s]
$u_{i,ein}$	Srednja brzina na ulazu [m/s]
$u_{i,max}$	Maksimalna brzina u posmatranoj ravni [m/s]
$x_i$	Koordinatne ose x, y odnosno z ( $i = 1,2$ odnosno 3) [m]
$\alpha$	Parametar – odnos zapreminskih protoka [1]