

## Modifikacija vazdušnog kanala u cilju smanjenja vibracija i postizanja manjeg pada pritiska

MARTA R. TRNINIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Mašinski fakultet, Beograd

BOŠKO P. RAŠUO, Univerzitet u Beogradu,  
Mašinski fakultet, Beograd

MIRKO R. DINULović, Univerzitet u Beogradu,  
Mašinski fakultet, Beograd

*Originalni naučni rad*

UDC: 697.922

DOI: 10.5937/tehnika2004457T

*U ovom radu prikazana je metodologija proračuna strujanja vazduha u vazdušnim kanalima koji su modifikovani dodavanjem specijalnih usmerivača vazduha segmentnog oblika poprečnog preseka aeroprofila. Modifikacija vazdušnog kanala izvršena u cilju smanjenja pada pritiska na izlazu samog kanala kao i u cilju smanjenja vibracija koje se javljaju tokom strujanja radnog fluida kroz kanal. Predstavljena metodologija proračuna strujanja zasnovana je na savremenim numeričkim metodama proračuna strujanja (CFD) odnosno metodi konačnih elemenata (FEA) za proračun vibracija i čvrstoće konstrukcije.*

**Ključne reči:** *turbulento strujanje, vazdušni kanal, vibracije, aeroprofil*

### 1. UVOD

Problematika pojave turbulentnog strujanja i vibracija u vazdušnim kanalima, najčešće je razmatrana u oblasti ventilacije i klimatizacije [1-3]. Rezultati istraživanja ukazuju da se vibracije mogu pojaviti usled neefikasnog rada ventilatora i/ili konstrukcije vazdušnih kanala. Jedna od mera za smanjenje vibracija je smanjenje brzine strujanja vazduha, regulacijom rada ventilatora, kao i odvajanje ventilatora primenom elastičnih spojnika kako se ne bi vibracije prenele na ostali deo vazdušnog sistema. Takođe, analize vazdušnih kanala ukazuju da se pojava turbulentnog strujanja ublažava promenom radijusa na mestima „kolena“ (mestima promene smera strujanja vazduha) i primenom usmerivača.

Cilj optimizacije geometrije vazdušnih kanala je smanjiti vrtložne zone, čime bi se optimizovali padovi pritiska strujanja i uravnotežiti profil brzina na izlazu iz vazdušnog kanala. Ovo istraživanje sadrži, ne samo definisan optimalan radijus „kolena“ vazdušnog kanala, već i oblik usmerivača vazduha preseka aeroprofila.

Osnovni parametri prilikom analize efikasnosti i ocene rada kotlovskih postrojenja su karakteristike goriva, protok goriva, atomizacija, radna temperatura, emisije vrednosti dimnih gasova [4]. Svi ovi aspekti su od velike važnosti. Međutim, oni su nerazdvojno povezani sa jednim od glavnih elementa čistog sagorevanja, koji se često ne razmatra dovoljno: vazduh potreban za sagorevanje. Samo zasebno dimenzionisan sistem za dovod vazduha za sagorevanje može da obezbedi širok kontrolni opseg, stabilno sagorevanje i najpogodnije emisije vrednosti dimnih gasova. Shodno tome, u okviru projekta, poseban fokus je bio usmeren na ovaj na izgled sekundarni problem, na analizu sistema za dovod vazduha (dužinu i konstrukciju vazdušnih kanala).

Utvrđeno je da vazdušni kanali imaju veliki uticaj na kvalitet protoka vazduha, padove pritiska, a time i na efikasnost sagorevanja u kotlu. Naime, tokom rada kotla, strujanje vazduha u vazdušnim kanalima je turbulentno, uslovljeno ne samo brzinom strujanja vazduha već i samim oblikom vazdušnih kanala. Turbulentno strujanje vazduha, između ostalog, uslovljava pojavu vibracija koje ometaju optimalan rad kotla.

Rezultati analiza postojećih rešenja (koleno 90 stepeni i koleno sa umerenim radijusom), primenom tehnika CFD (Computational Fluid Dynamics), prikazani su na slikama 1-5.

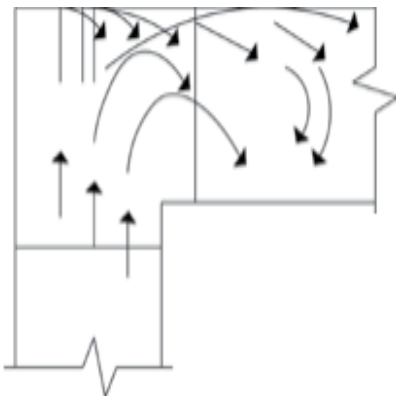
Adresa autora: Marta Trninić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16

e-mail: mtrninic@mas.bg.ac.rs

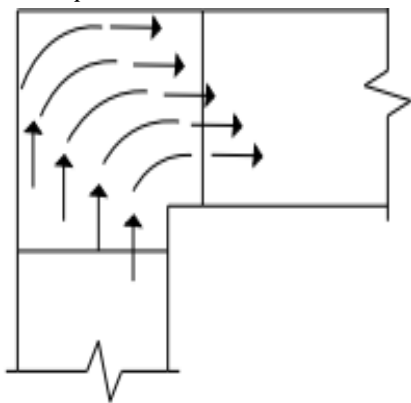
Rad primljen: 02.07.2020.

Rad prihvaćen: 21.07.2020.

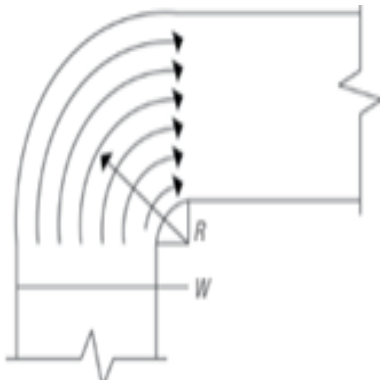
U cilju što efikasnijeg rada kotla, neophodno je obezbediti laminarno strujanje vazduha u vazдушnim kanalima, odnosno smanjiti otpore strujanju vazduha. Detaljnom analizom strujanja vazduha u postojećoj konstrukciji vazdušnog kanala, utvrđeno je da se otpori strujanju fluida kroz vazdušne kanale mogu postići promenom oblika konstrukcije samih vazdušnih kanala.



Slika 1 - Turbulentno strujanje u vazдушnom kanalu sa padom pritiska na izlazu

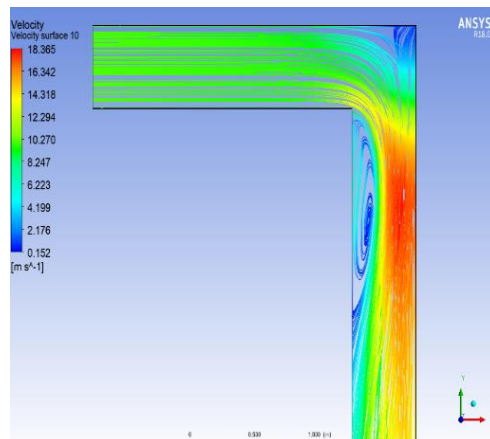


Slika 2 - Strujanje u vazдушnom kanalu sa usmerivačima vazduha tipa profilisanih ploča



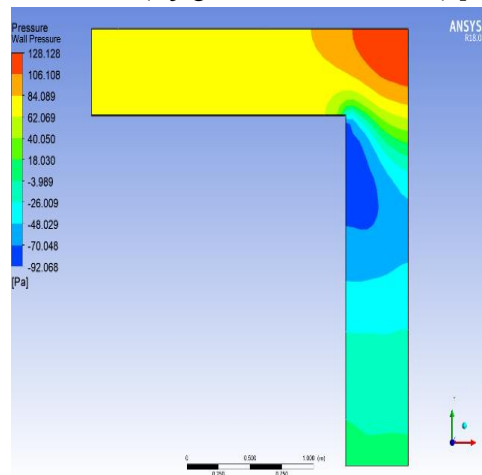
Slika 3 - Strujanje u vazдушnom kanalu sa radijusom

Predloženim konstruktivnim rešenjem (novom konstrukcijom vazdušnih kanala) omogućava se laminarno strujanje, obezbeđuju manji padovi pritiska, eliminiše pojava turbulencije, što su osnovni preduslovi za stabilnost rada kotla.



Slika 4 - Raspodela brzina strujanja u vazдушnom kanalu za brzinu na ulazu u vazdušni kanal od 10 m/s

Parametri i veličine koje karakterišu strujanje vazduha u vazдушnim kanalima, od bitnog su značaja za validnost rešenja koje se predlaže s obzirom na podržavanje normiranih veličina (brzine strujanja vazduha, pad pritiska, itd.). Rešenja koja se mogu razmatrati, zavisna su od niza uticajnih faktora, parametara i veličina, kao što su: količine vazduha koji se dovodi; parametri vazduha (pritisk, brzina); izgled, broj i karakteristike distributivnih elemenata za dovod vazduha (geometrijske veličine vazdušnih kanala - dužina, poprečni presek, itd.). Pri izradi projekata sistema za dovod vazduha (naš slučaj: vazdušni kanali), uobičajeno su korišćene uprošćene metode za definisanje pojedinih parametara i veličina strujanja vazduha u vazдушnim kanalima (dijagrami, tabele, formule) [5-6].



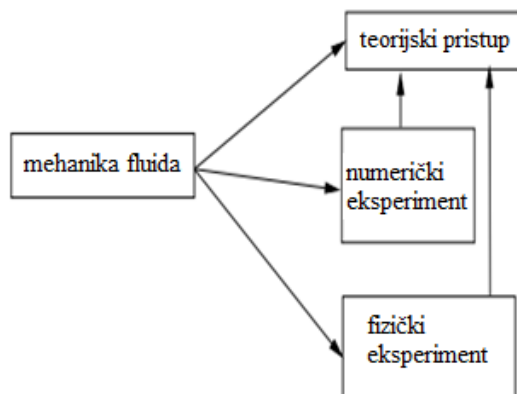
Slika 5 - Raspodela pritiska strujanja u vazдушnom kanalu za brzinu na ulazu u vazdušni kanal od 10 m/s

Savremene metode, korišćenjem tehnika CFD, omogućavaju dobijanje kompletnih strujnih slika, sa nizom detalja o pojedinim parametrima i veličinama strujanja. U fazi projektovanja sistema za dovod vazduha sa složenom geometrijom, u cilju dobijanja

tačnijih rezultata i optimizacije strujanja, korišćenje tehnika CFD danas je neophodno.

Budući da se u prirodi u većini slučajeva pojavljuje turbulento strujanje, koje nije u potpunosti moguće opisati analitički zbog njegovog haotičnog ponašanja, u prošlosti se pribegavalo fizičkim eksperimentima. Danas, sa razvojem računara, stvoreni su uslovi za numeričko rešavanje raznih matematičkih modela čime je omogućeno da se eksperimenti rade i numerički. Pomenuta podela, prikazana je na slici 8. Numerički eksperiment je eksperiment koji predstavlja rešavanje odgovarajućeg matematičkog modela numeričkim metodama. Fizički eksperiment se odvija u vazдушnim tunelima (bilo da je u pitanju prototip ili fizički model).

Eksperimentalna ispitivanja (primenom fizičkih modela) složenih pojava su skupa i dugotrajna, kako u pripremi tako i u izvođenju, te zahtevaju i veći broj ponavljanja. Posebno je potrebno voditi računa o zadovoljenju uslova sličnosti između fizičkog modela koji se često ne mogu zadovoljiti, za razliku od numeričkog pristupa kod kojeg tog problema nema. Razvoj i validacija numeričkih modela omogućava da numerički eksperimenti svakim danom postaju sve pouzdaniji inženjerski alat, a koji se uvek može dodatno verifikovati sa dostupnim fizičkim eksperimentima. Numeričke simulacije daju kompletnu sliku strujnog polja, te time skraćuju vreme i troškove projektovanja. Za razliku od fizičkog eksperimenta, u numeričkom eksperimentu je relativno jednostavno menjati geometriju posmatranog objekta ili uslove strujanja. Tok numeričke simulacije se može prikazati na sledeći način (slika 6):



Slika 6 - Podela pristupa rešavanja problematike mehanike fluida [7]

Definisanje problema i matematički model

- Izbor matematičkog modela fizikalnosti posmatranog problema
- Zadavanje graničnih uslova
- Numeričko rešavanje matematičkog modela
- Diskretizacija jednačina matematičkog modela.
- Numeričko rešavanje dobijenih sistema jednačina

Analiza rešenja

- Brojčana i vizuelna interpretacija rezultata.

## 2. NUMERIČKI MODEL

Ključnu ulogu u rešavanju i opisivanju interakcije vazduha i vazдушnih kanala ima strujna slika, koja je po svojim fizičkim osobinama prostornog i turbulentnog karaktera [8]. Definisanje ovako složenog strujanja, nastalog kao posledica geometrije vazдушnog kanala, bazira se na osnovnim principima mehanike fluida sadržanim u bilansnim jednačinama.

Osnovne bilansne jednačine za slučaj neustaljenog strujanja u numeričkom smislu nestišljivog fluida, imaju sledeće oblike:

Osrednjena jednačina kontinuiteta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

Rejnoldsova vektorska jednačina:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_f S_{ij} + \tau_{ij}) + \rho F_i \end{aligned} \quad (2)$$

i osrednjena jednačina energetske bilansa:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i H) &= \\ &= U_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu_f \psi_\mu (U_i) + \mu_f \psi_\mu (u_i) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_f \frac{\partial H}{\partial x_i} - \rho \overline{h u_i} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Budući da je vazduh, kao osnovni medijum smatran idealnim gasom, njegova gustina je određena jednačinom stanja idealnog gasa:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (4)$$

a vrednost specifične entalpije definisana je izrazom:

$$H = c_p T \quad (5)$$

U skladu sa uopštenom i korigovanom Bousinesqovom (Bousinesq) hipotezom, koja uvodi pojam turbulentne (vrtložne) dinamičke viskoznosti  $\mu_t$  povezujući Rejnoldsove napone i tenzor brzine deformisanja  $S_{ij}$  i koja za, u numeričkom smislu nestišljiva strujanja Njutnovskih fluida, glasi:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = \\ &= \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

Polazna Rejnoldsova vektorska jednačina, sada modelirana se svodi na oblik:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_f + \mu_t) S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] + \rho F_i \quad (7)$$

Takođe, pri svim numeričkim simulacijama funkcije viskozne disipacije u jednačini energetskog bilansa,  $\mu \Psi \mu(U_i)$  i  $\mu \Psi \mu(u_i)$ , modelirane su pomoću turbulentne dinamičke viskoznosti:

$$\mu_f \psi_\mu(U_i) + \mu_f \psi_\mu(u_i) = 2\mu_t S_{ij} S_{ij} \quad (8)$$

Vektor entalpije fluktuacionog toka, u skladu sa prostom gradijentom metodom modeliran je kao:

$$\rho \overline{h u_i} = \frac{\mu_t}{Pr_h} \frac{\partial H}{\partial x_i} \quad (9)$$

što je omogućilo da se jednačina energetskog bilansa modelira kao:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j H) &= \\ &= U_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \rho a_f + \frac{\mu_t}{Pr_h} \right) \frac{\partial H}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Za zatvaranje sistema jednačina (1-10) i određivanje kinetičke energije turbulencije upotrebljen je tzv. dvojednačinski k-ε model turbulentnih napona [10-11]. Ovaj univerzalni model turbulentnih napona izabran je zbog svoje potvrđene pouzdanosti u predviđanju strujnih polja, pri strujanjima Mahovog broja značajno manjeg od 1.

Kao što mu i ime kaže, model je definisan sa dve dopunske bilansne jednačine:

jednačinom prenošenja kinetičke energije turbulencije  $k$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) &= \\ &= \mathcal{P}_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_f + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \\ &- \rho \frac{\mu_t g_i}{\sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (11)$$

i jednačinom prenošenja disipacije kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \varepsilon) &= C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mathcal{P}_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ &+ C_{\varepsilon 3} \rho \frac{\mu_t g_i}{\sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_f + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

U gore napisanim jednačinama, u skladu sa standardnim načinom označavanja sa  $S_{ij}$  je označen tenzor brzine deformisanja:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (13)$$

dok je sa  $\mathcal{P}_k$  označen član stvaranja kinetičke energije turbulencije usled deformisanja osrednjenog toka:

$$\mathcal{P}_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (14)$$

Rejnoldsovi naponi, modelirani su na osnovu Businesskove hipoteze o turbulentnim naponima:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \\ &\frac{2}{3} k \delta_{ij} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \end{aligned} \quad (15)$$

pri čemu je dinamička turbulentna viskoznost  $\mu_t$  određena izrazom:

$$\mu_t = (C_D C_\mu) \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (16)$$

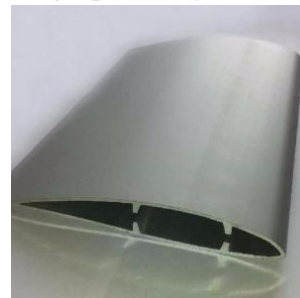
Vrednosti empirijskih konstanti ovog modela, zajedno sa vrednostima Prandtlovog (za entalpiju), odnosno Šmitovog turbulentnog broja dati su u tabeli 1. Definisana su tri granična uslova za proračunski domen [10]:

Na ulazu, poznate su izmerena ulazna brzina  $U_{in}$ , kinetička energija turbulencije,  $k_{in} = 1.5(I \times U_{in})^2$  ( $I = 0.16(R_e)^{0.125} \times 100\%$ , intenzitet turbulencije) i stepen specifične disipacije:

$$\varepsilon_{in} = \frac{C_\mu k^{\frac{3}{2}}}{(0.3D)}$$

- Na granicama sa zidom nema klizanja.
- Na izlazu, gradijenti parametara strujanja, u smeru strujanja, treba da su jednaki nuli.

Radi smanjenja pada pritiska, vibracija u zidovima, deformacija zidova kao i turbulencije pri strujanju radnog fluida (vazduha) kroz vazdušne kanale, postavljeni su usmerivači vazduha, na mestima koja su se, analizom postojećih rešenja pokazala kao kritična. Analizirani su slučajevi kod kojih su usmerivači vazduha poprečnog preseka aeroprofila. Segment sa poprečnim presekom aeroprofila, korišćen u ovom konstruktivnom rešenju, prikazan je na slici 7.



Slika 7 - Segment poprečnog preseka aeroprofila, kao usmerivač vazduha u vazdušnom kanalu

Imajući u vidu primenu predloženog rešenja sa inženjerskog aspekta, kao i ekonomske aspekte, korišćene su komponente vazdušnih kanala koje se danas koriste i mogu se naći u standardnim dimenzijama kao

ponuda raznih proizvođača. Komercijalne komponente vazdušnog kanala, koje mogu biti korišćene u integraciji vazdušnih kanala prikazane su na slici 8.



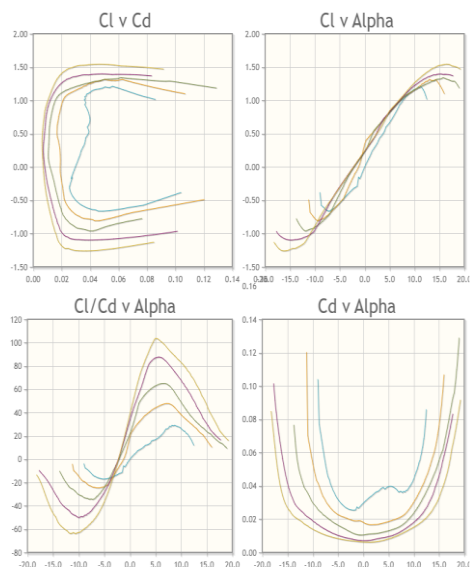
Slika 8 - Komercijalne komponente vazdušnog tunela

Tabela 1. Empirijske konstante  $k$  – $\varepsilon$  modela turbulentnih napona [7]

$Pr_k$	$Pr_\varepsilon$	$C_D C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$k$	$Pr_h$	$Sh_t$
1,0	1,314	0,09	1,44	1,92	1,0	0,41	0,41	0,81

### 3. ANALIZA STRUJANJA OKO AEROPROFILA NACA 2412

Kao što je već napomenuto, za potrebe ovog istraživanja, a u cilju smanjenja vibracija, predložena je integracija aeroprofila u sistem cirkulacije.

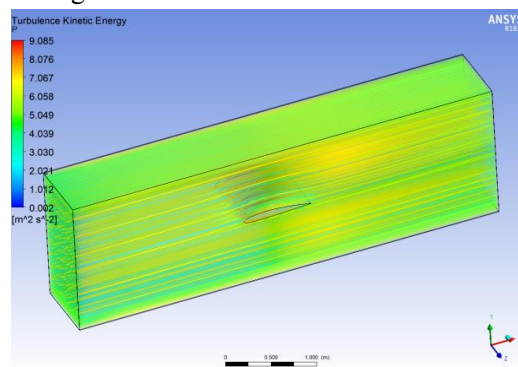


Slika 9 - Aerodinamičke karakteristike Aeroprofila NACA 2412.

U tom smislu, kao najoptimalnije rešenje, mogu se usvojiti aeroprofil za opstrujavanje pri malim Rejnoldsovim brojevima. Konkretno, analizira se strujanje segmenta poprečnog preseka aeroprofila NACA 2412. Aerodinamičke karakteristike ovog aeroprofila predstavljene su na slici 9.

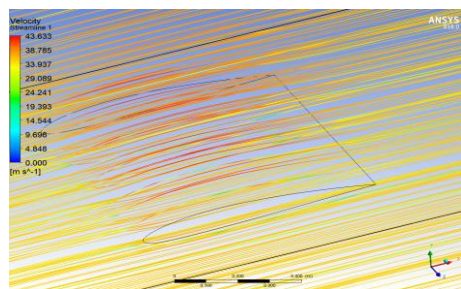
Prethodno navedene vrednosti proverene su za navedeni aeroprofil, koji bi potencijalno bio korišćen za izradu usmerivača u vazdušnom kanalu. Takođe, na osnovu ovog proračuna proveren je primenjen model turbulencije kao i kvalitet pretpostavljene podele domena strujanja za zadate konturne uslove (brzina ulazne struje i izlaznog pritiska vazdušnog kanala).

Na slici 10, prikazano je, na osnovu numeričkog modela, strujanje vazduha kao i kinetička energija turbulencije, za aeroprofil NACA 2412 u ravnom delu vazdušnog kanala.



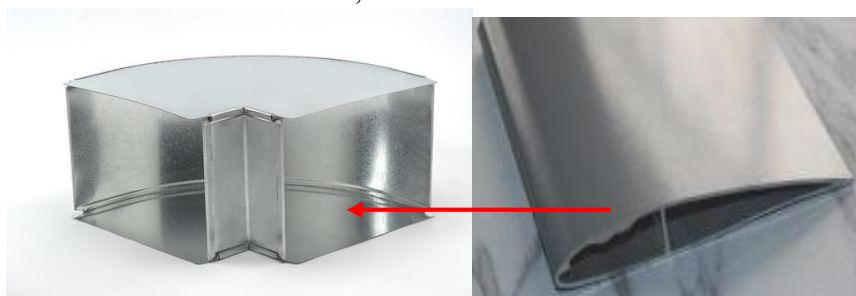
Slika 10 - Strujanje vazduha oko aeroprofila NACA 2412.





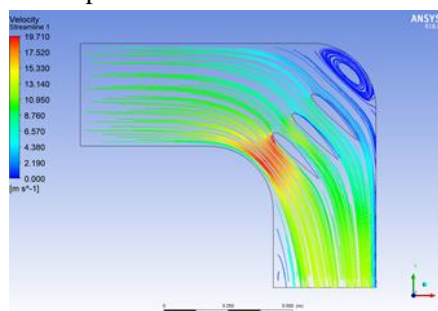
Slika 11 - Otcepljenje strujnica pri opstrujavanju oko aeroprofila NACA 2412 pri brzini strujanja od 10 m/s

Na osnovu ove analize jasno je da aeroprofil NACA 2412 predstavlja zadovoljavajućeg kandidata za izradu usmerivača vazduha u vazdušnom kanalu, iz

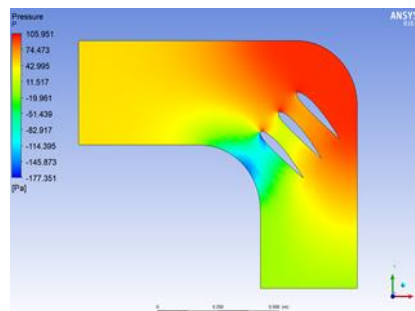


Slika 12 - Koleno vazdušnog kanala sa usmerivačem vazduha sa poprečnim presekom aeroprofila

Polje brzina i pritiska strujanja, prikazano na slikama 13-15, pokazuje „mirnije“ strujanje, manje vrtložne zone i ujednačene brzine strujanja na izlazu iz „kolena“ u poređenju sa strujanjem u kolenom vazdušnog kanala sa jednim usmerivačem vazduha sa poprečnim presekom aeroprofila.



Slika 13 - Raspodela brzina u vazdušnom kanalu za brzinu na ulazu u vazdušni kanal od 10 m/s

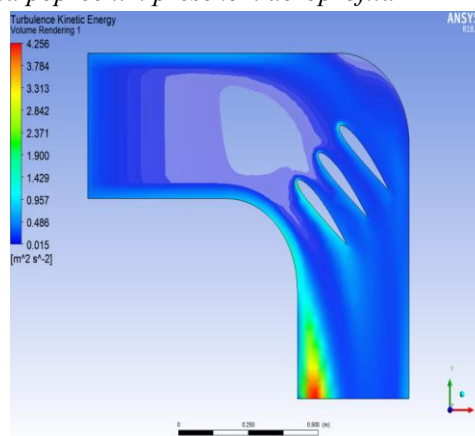


Slika 14 - Raspodela pritiska u vazdušnom kanalu za brzinu na ulazu u vazdušni kanal od 10 m/s

razloga što za režime strujanja koji se u praksi javljaju ima prihvatljivo otcepljenje strujanja (slika 11) u sistem unosi mali pad pritiska kao i zadovoljavajuću kinetičku energiju turbulencije.

#### 4. STRUJANJE FLUIDA U DELU VAZDUŠNOG KANALA SA RADIJUSIMA I SKRETANJEM STRUJE USMERIVAČEM VAZDUHA

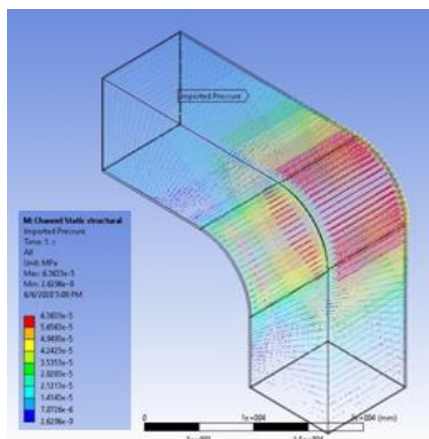
Na osnovu prethodne analize, u deo vazdušnog kanala, gde je neophodno izvršiti skretanje struje za 90 stepeni, postavljen je usmerivač vazduha (slika 12), tipa segmenta poprečnog preseka aeroprofila NACA 2412. Posmatrane su brzine strujanja, raspodele pritiska kao i raspodele kinetičke energije turbulencije.



Slika 15 - Raspodela kinetičke energije turbulencije u vazdušnom kanalu za brzinu na ulazu u vazdušni kanal od 10 m/s

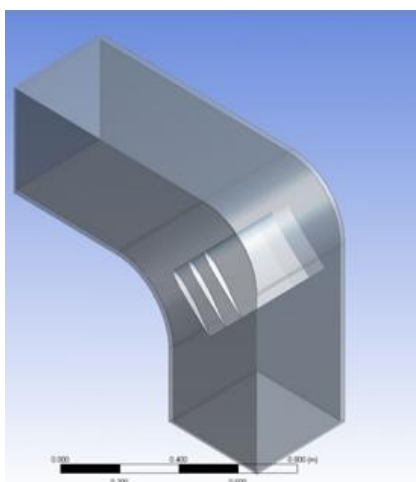
Opterećenje u vazdušnom kanalu određeno je na osnovu prethodne analize strujanja. Dobijeno polje pritiska, za različite geometrije i brzine strujanja na ulazu vazdušnog kanala preračunato je u odgovarajuće sile koje pored načina oslanjanja predstavljaju konturne uslove za koje se rešavaju prethodne jednačine u cilju izračunavanja naponsko-deformacionog stanja (polja napona, deformacija i pomeranja).

Zbog same složenosti strukture, koja se analizira, neophodno je koristiti numerički metod. U ovom slučaju, korišćena je metoda konačnih elemenata, za numeričko rešavanje jednačina koje opisuju naponsko-deformaciono stanje za zadate konturne uslove [9].



Slika 16 - Polje pritiska na zidovima vazdušnog kanala pri brzini strujanja radnog fluida (vazduha, u analiziranom slučaju) od 10 m/s.

Na slici 16 prikazano je opterećenje vazdušnog kanala bez usmerivača vazduha dobijeno na osnovu analize strujanja i preračunato u odgovarajuće sile koje opterećuju zidove vazdušnog kanala pri brzini strujanja radnog fluida (vazduha, u analiziranom slučaju) od 10 m/s.



Slika 17 - Model sa usmerivačima vazduha

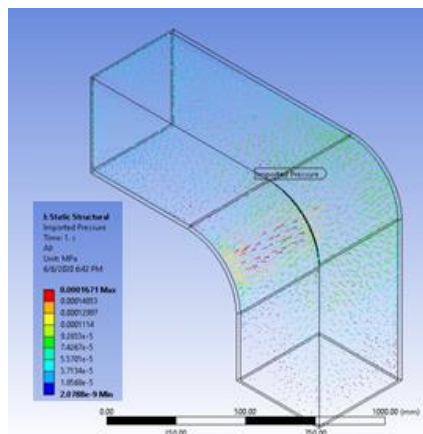
Ukoliko se u vazdušni kanal uvedu profilisani usmerivači vazduha dolazi do preraspodele pritiska u vazdušnom kanalu naročito u zonama u kojima su usmerivači uvedeni.

Za usvojene usmerivače vazduha, poprečnog preseka aeroprofila, za koje je analiza strujanja pokazala da obezbeđuju najmanji pad pritiska meren na izlazu iz vazdušnog kanala, model i polje pritiska prikazani su na slikama 15-17.

U cilju dobijanja naponsko-deformacionog polja (napona, deformacija i pomeranja u svim tačkama strukture) napravljen je strukturalni model konačnih elemenata, za slučaj vazdušnog kanala bez usmerivača vazduha i model konačnih elemenata sa usmerivačima vazduha [10]. Kompletan model (u oba slučaja) diskretizovani su elementima tipa ploče koje u

potpunosti zadovoljavaju sve uslove ravanskog stanja napona koje je inicijalno pretpostavljeno.

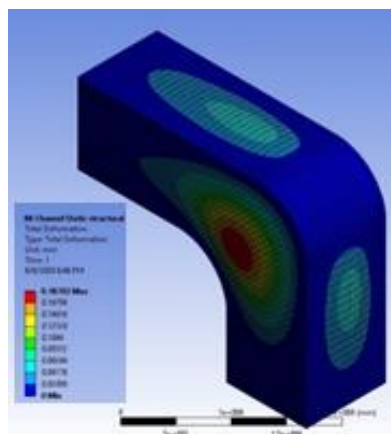
Model konačnih elemenata, sa poljem deformacija zidova vazdušnog kanala, bez usmerivača vazduha, a za brzinu strujanja radnog fluida od 10 m/s prikazan je na slikama 18-21.



Slika 18 - Polje pritiska na zidovima vazdušnog kanala sa usmerivačima vazduha pri brzini strujanja radnog fluida (vazduha, u analiziranom slučaju) od 10 m/s

Na osnovu ove analize, uočeno je maksimalno pomeranje od 0.2 mm, pod dejstvom strujanja vazduha od 10 m/s, što ne predstavlja kritičnu vrednost uzimajući u obzir karakteristike materijala od kojih je vazdušni kanal napravljen a takođe ova veličina pomeranja ne utiče bitno na promenu slike strujanja s obzirom da je promena geometrije kanala zanemarljiva.

Za istu geometriju kao i za iste konturne uslove a na osnovu teorije Fon-Misesa (Fon Mises) izračunato je polje napona. Rezultati naponske analize prikazani su na slikama 19-22.

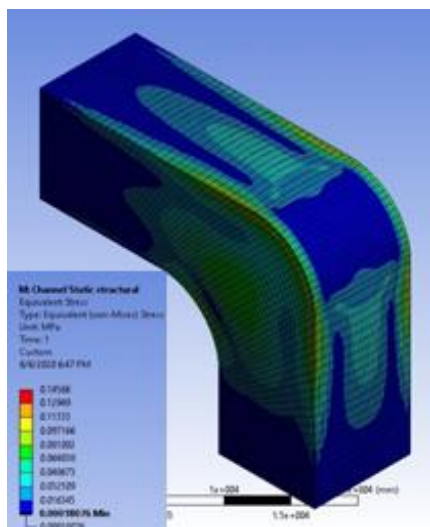


Slika 19 - Polje deformacija zidova vazdušnog kanala, bez usmerivača vazduha, a za brzinu strujanja radnog fluida od 10 m/s

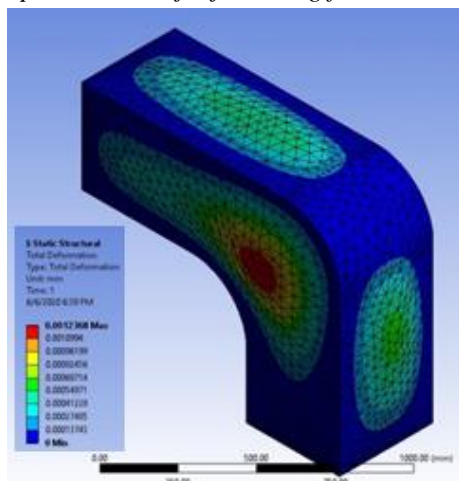
Naponska analiza pokazala je sledeće: Dobijeni maksimalni ekvivalentni naponi ( $\sigma_{max}=0.15$  MPa)

manji su od maksimalno dozvoljenih ( $\sigma_{\text{doz}}=227$  MPa), tako da se sa sigurnošću može tvrditi da pod zadatim uslovima strujanja ne dolazi do pojave plastičnih deformacija ni razaranja strukture.

Uvođenjem usmerivača vazduha u vazdušni kanal dolazi do preraspodele pritiska kao i do povećanja krutosti strukture što dovodi i do lokalne preraspodele napona i deformacija u zoni vazdušnog kanala gde su usmerivači vazduha postavljeni. Provereno je naponsko-deformaciono stanje u vazdušnom kanalu sa postavljenim usmerivačima vazduha, a za brzinu strujanja radnog fluida od 10 m/s. Na sledećim slikama prikazana su polja pomeranja i ekvivalentnih napona u vazdušnom kanalu sa usmerivačima vazduha za brzinu strujanja od 10 m/s.



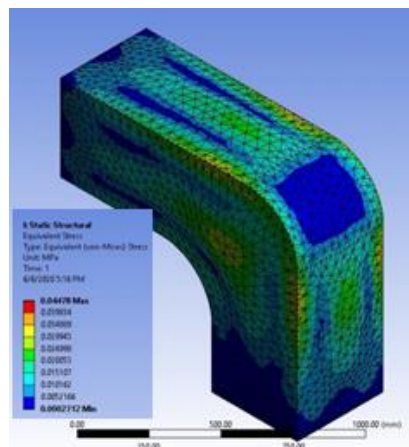
Slika 20 - Polje ekvivalentnih (Fon Mises) napona u vazdušnom kanalu bez usmerivača vazduha, pri brzini strujanja radnog fluida od 10 m/s



Slika 21 - Polje pomeranja u vazdušnom kanalu sa usmerivačima vazduha za brzinu strujanja od 10 m/s

Na osnovu sprovedene naponsko-deformacione analize vazdušnog kanala sa usmerivačima vazduha

može biti zaključeno sledeće: Postavljanje usmerivača vazduha u vazdušni kanal dovodi do preraspodele napona u samom kanalu i ima za posledicu dodatno rasterećenje konstrukcije u zonama postavljanja usmerivača kao i manje deformacije u odnosu na kanal bez usmerivača vazduha za iste uslove strujanja radnog fluida.



Slika 22 - Polje ekvivalentnih napona u vazdušnom kanalu sa usmerivačima vazduha za brzinu strujanja od 10 m/s

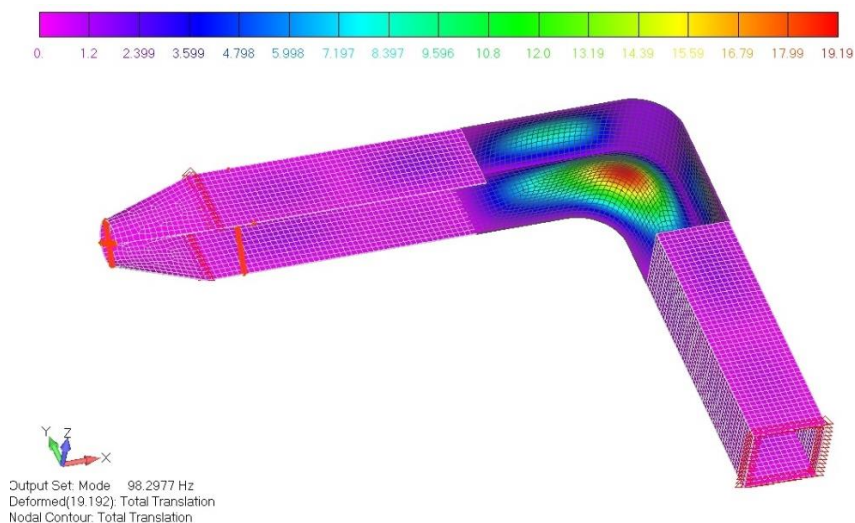
Imajući u vidu da je analizirana konfiguracija usmerivača vazduha koja obezbeđuje najmanji pad pritiska na izlazu iz vazdušnog kanala, kao i vrednosti ekvivalentnih napona i pomeranja dobijenih naponsko-deformacionom analizom za ovu konfiguraciju, ostale potencijalne konfiguracije nisu analizirane sa aspekta naponsko-deformacionog stanja.

Opisanom metodologijom određene su frekvencije slobodnih oscilacija za oba razmatrana sistema (vazdušnog kanala bez usmerivača vazduha i vazdušnog kanala sa usmerivačima vazduha i elementima za prigušenje vibracija). Na sledećim slikama prikazan je prvi oblik oscilovanja za obe vrste analiziranih vazdušnih kanala (slika 23–24).

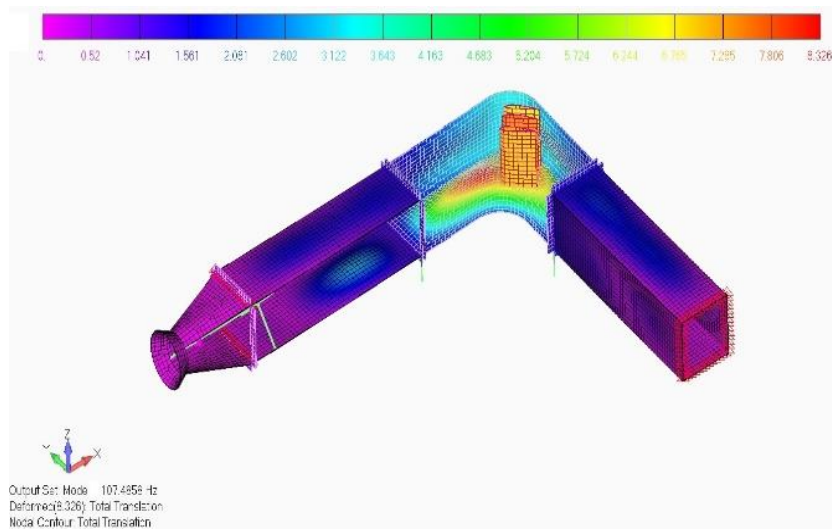
Analizom prethodno dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće: dodavanje usmerivača vazduha u vazdušni kanal ne utiče bitno na oblike oscilovanja vazdušnog kanala (za analizirane slučajeve  $f_1=98.3$  Hz u kanalu bez usmerivača vazuha i  $f_1=107.5$  Hz) u kanalu sa usmerivačima). Pozitivno je što su pomeranja u zoni u kojoj su usmerivači vazduha postavljeni manja u odnosu na vazdušni kanal bez usmerivača ( $\delta_{\text{max}}=8.33$  mm u kanalu sa usmerivačima, odnosno  $\delta_{\text{max}}=19.19$  mm u vazdušnom kanalu bez usmerivača vazduha) što direktno utiče na smanjenje vibracija i buke.

Na ulazu u vazdušni kanal dodat je adapter ulazne struje tipa „zvono“ u cilju daljeg smanjenja vibracija i buke. Strujna slika na ulazu u vazdušni kanal prikazana je slici 25.

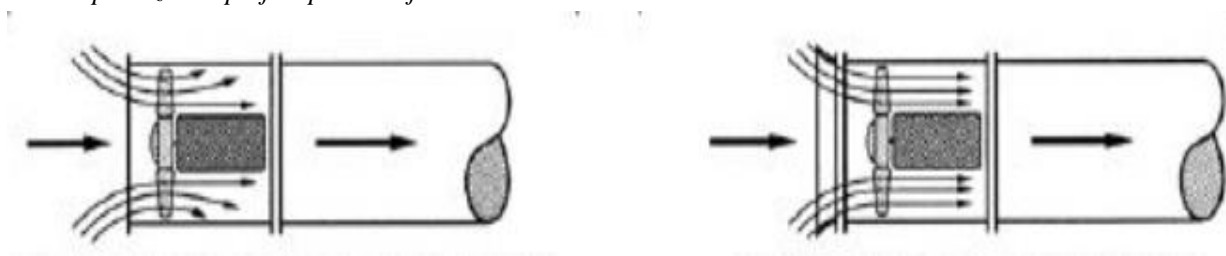




Slika 23 - Prvi oblik oscilovanja vazdušnog kanala bez usmerivača vazduha sa prikazanim poljem pomeranja strukture



Slika 24 - Prvi oblik oscilovanja vazdušnog kanala sa usmerivačima vazduha i elementima za prigušenje sa prikazanim poljem pomeranja strukture



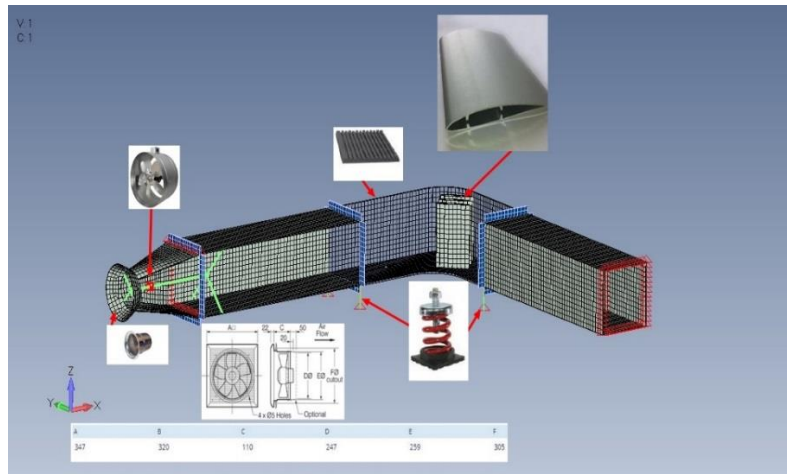
Slika 25 - Izmenjen oblik ulaznog dela kanala

Na proračunskom modelu adapter ulazne struje u vazdušni kanal modeliran je elementima tipa „ploča“.

Zona vazdušnog kanala u kojoj su dodati usmerivači vazduha oblaže se neoprenskom oblogom debljine 5 mm, i može se nabaviti od raznih proizvođača sa svim parametrima potrebnim za dinamičke proračune (gustina materijala, elastični koeficijenti, temperaturne karakteristike). Neoprenska obloga korišćena u ovom proračunu i deo mreže modela gde

je postavljena, a u cilju smanjenja vibracije prikazani su na sledećim slikama:

U zoni vazdušnog kanala, gde su postavljeni usmerivači vazduha dodati su pasivni amortizeri u cilju boljeg oslanjanja samog vazdušnog kanala kao i smanjenja vibracija u celokupnom kanalu. Modelirani su elementima tipa CBUSH sa šest stepeni slobode pri čemu su sve potrebne krutosti elemenata amortizera dobijene od proizvođača opreme.



Slika 26 - Vazdušni kanal sa usmerivačima vazdušne struje i elementima za smanjenje vibracija

Kompletan model vazdušnog kanala sa svim potrebnim elementima za smanjenje vibracija prikazan je na slici 26.

## 5. ZAKLJUČAK

Postavljanjem usmerivača vazduha poprečnog preseka aeroprofila u vazdušni kanal, moguće je ostvariti bolju kontrolu strujanja, koja može dovesti do manjeg pada pritiska na izlazu iz samog kanala, odnosno do smanjenja vibracija kanala kao i buke koja pri tome nastaje.

Savremene metode projektovanja i analize kao što su CFD odnosno FEA mogu uspešno biti primenjene u problemima koji se javljaju u slučajevima strujanja u vazdušnim kanalima.

## LITERATURA

- [1] M. Mihajlović, P. Kolendić i I. Đinović, *Rešenje za eliminisanje buke iz postrojenja za klimatizaciju*, u Međunarodni kongres u procesnoj industriji – Processing 2017, Beograd, 2017.
- [2] B. Bekavac, *Problemi buke klimati-zovanih postrojenja*, u *Klimatizacija, grejanje i hlađenje -KGH*, Beograd, 2017

- [3] M. Tobias, *Troubleshooting Vibration and Noise in HVAC Systems*, 2020. <https://www.ny-engineers.com/blog/troubleshooting-vibration-and-noise-in-hvac-systems>.
- [4] A. Bhatia, *Improving Energy Efficiency of Boiler Systems: Quick Book*, Create Space Independent Publishing Platform, 2015
- [5] R. W. Haines i M. E. Myers, *HVAC Systems Design Handbook*, McGraw-Hill Education, 2009.
- [6] R. Vandagriff, *Practical Guide to Industrial Boiler Systems*, CRC Press, 2001.
- [7] F. Harlow i P. Nakayama, *Transport of turbulence energy decay rate*, Los Alamos Scientific Lab., N. Mex., United States, 1968.
- [8] M. J. Banjac, *Application of Computational Fluid Dynamics in Cooling Systems design for Special Purpose Objects*, *FME Transactions*, 42, 26-33, 2014
- [9] A. Morassi i R. Paroni, *Classical and Advanced Theories of Thin Structures: Mechanical and Mathematical Aspects*, Wien: Springer-Verlag, 2008
- [10] Ž. V. Despotović, *Vibration Control of Resonant Vibratory Feeders With Electromagnetic Excitation*, *FME Transactions*, 42, 281-289, 2014

## SUMMARY

### AIR DUCT MODIFICATION TOWARDS OUTLET PRESSURE DROP AND VIBRATION LEVEL REDUCTION

*In this work complete methodology for calculation and analysis of fluid flow in air ducts is presented. In order to minimize outlet pressure drop and to reduce the duct vibrations the plates with airfoil cross sections are added to duct critical zones. It was observed that airfoil stream plates efficiently contribute to outlet pressure drop, duct vibration and noise reduction. Modern methods such as CFD and FEA can be efficiently deployed in numerical treatise of flow and vibration analysis in air ducts.*

**Key words:** *turbulent flow, air duct, vibrations, airfoil*