

UTICAJ OBLIKA KONVERGENTNE MLAZNICE NA KVALITET STRUJANJA U TESTNOJ SEKCIJI ZRAČNOG TUNELA

INFLUENCE OF CONTRACTION SHAPE ON THE FLOW QUALITY IN WIND TUNNEL TEST SECTION

Ernad Bešliagić

Mašinski fakultet,
Univerzitet u Zenici
Fakultetska 1, Zenica

Ključne riječi:

Konvergentna mlaznica zračnog tunela, kvalitet strujanja, računarska dinamika fluida

Keywords:

Wind tunnel contraction, the flow quality, computation fluid dynamics

Paper received:

11.11.2018.

Paper accepted:

21.12.2018.

Stručni rad

REZIME

Konvergentna mlaznica je dio zračnog tunela koji ima najveći uticaj na kvalitet strujanja zraka u testnoj sekciji. Omjer suženja, oblik poprečnog presjeka, dužina i oblik konture zida mlaznice su konstruktivni parametri koji, između ostalog, utiču na uniformnost strujanja, intenzitet turbulencije strujanja, ugao zakretanja toka, pojavu odvajanja toka te debljinu graničnog sloja toka fluida u testnoj sekciji. Zbog toga je veoma važno izabrati optimalnu kombinaciju navedenih konstruktivnih parametara mlaznice. U ovom radu je za kvadratni poprečni presjek izlaza mlaznice $A_o=0,64 \text{ m}^2$, vrijednost omjera suženja $CR=4$ i dužinu mlaznice $L=1,88 \text{ m}$ izvršena analiza pet različitih oblika konture zida mlaznice. Pomoću kompjuterskog koda Flow Simulation provedeno je 25 numeričkih simulacija te su analizirani dobiveni rezultati.

Professional paper

SUMMARY

Contraction is a part of a wind tunnel that has the greatest impact on the air flow quality in the test section. The constriction ratio, the cross section shape, the length and wall shape are constructive parameters that influence the uniformity of the flow, the flow turbulence intensity, the flow rotation angularity, the appearance of the flow separation and the thickness of the fluid flow boundary layer in the test section. For this reason, it is very important to choose the optimal combination of the mentioned contraction design parameters. In this paper, an analysis of five different contours of the contraction wall was performed for the square outlet cross-section $A_o=0.64 \text{ m}^2$, the constriction ratio $CR=4$ and the contraction length $L=1.88 \text{ m}$. With the computer code of Flow Simulation, 25 numerical simulations were performed and the obtained results were analyzed.

1. UVOD

Razvoj široke lepeze proizvoda koji su u svom radu izloženi djelovanju aerodinamičkih sila bazirano je na teoretskim, eksperimentalnim i numeričkim metodama. Iako rezultati računarskih simulacija postaju sve tačniji i pouzdaniji, računarska dinamika fluida (CFD) još uvijek nije dostigla taj nivo da u potpunosti može eliminisati potrebu za eksperimentalnim podacima tokom razvoja spomenutih proizvoda. Ukoliko je to moguće, najuspješniji pristup razvoju nekog aerodinamičkog dizajna (novog ili postojećeg) temelji se na primjeni optimalne kombinacije rezultata dobivenih eksperimentalnim, teorijskim i računarskim putem.

Osnovni alat eksperimentalne aerodinamike jeste zračni tunel. Adekvatna i produktivna

1. INTRODUCTION

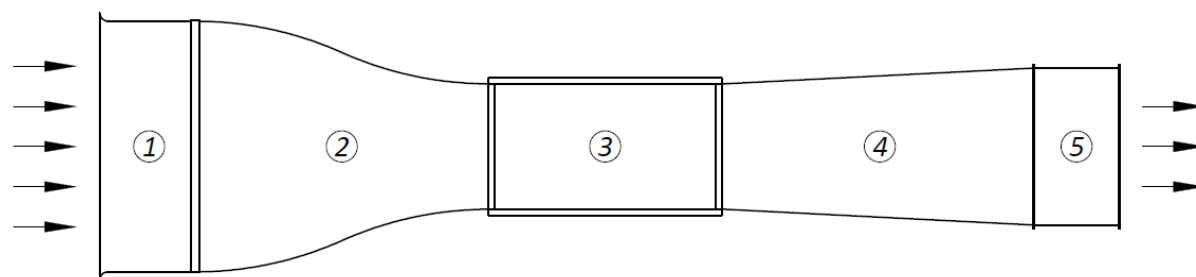
The development of a wide range of products that are exposed to aerodynamic forces in their work is based on theoretical, experimental and numerical methods. Although the results of computer simulations become more accurate and reliable, computer fluid dynamics has not yet reached that level to completely eliminate the need for experimental data during the development of the mentioned products. If possible, the most successful approach to the development of an aerodynamic design (new or existing) is based on the application of an optimal combination of results obtained by experimental, theoretical and computing method.

The basic tool of experimental aerodynamics is a wind tunnel. Adequate and productive use of

upotreba zračnih tunela zahtijeva primjenu aerodinamičke teorije i računarskih metoda u toku razvoja i izrade zračnog tunela, u planiranju eksperimenata i interpretaciji dobivenih podataka. U ovom radu je pokazano kako se računarska dinamika fluida može iskoristiti kao alat prilikom razvoja jednog segmenta zračnog tunela.

2. OTVORENI ZRAČNI TUNEL

Testiranja u zračnom tunelu su omogućila široku primjenu aerodinamike kao nauke u mnogim područjima tehnologije. Zračni tunel je fizički instrument, odnosno, postrojenje koje omogućuje da se u jednom od njegovih elemenata postigne ravnomjerna pravolinijska struja zraka određene brzine [2]. Na slici 1. prikazan je jednostavan otvoreni zračni tunel za male podzvučne brzine strujanja zraka.



Slika 1. Jednostavni otvoreni zračni tunel
Figure 1. Simple open-circuit wind tunnel

Okolni zrak se pomoću ventilatora (5), koji se nalazi na kraju zračnog tunela, usisava u komoru za regulaciju i podešavanje strujanja (1). U njoj se strujanje zraka usmjerava u pravcu ose zračnog tunela i umiruju se veće nestabilnosti koje su prisutne u struji zraka. Nakon toga zrak ulazi u konvergentnu mlaznicu (2) čiji poprečni presjek se postepeno smanjuje što dovodi do ubrzavanja zraka. Prolaskom kroz najuži dio mlaznice zrak dostiže svoju maksimalnu brzinu strujanja i ulazi u testnu sekciju (3) koja ima konstantan poprečni presjek. U testnoj sekciji se nalazi predmet ispitivanja oko kojeg zrak ravnomjerno struji konstantnom brzinom. Iza testne sekcije nalazi se difuzor (4) u kojem dolazi do usporavanja zraka uslijed povećanja poprečnog presjeka. Promjenom broja obrtaja ventilatora postiže se željena brzina strujanja zraka u testnoj sekciji. Postoji veliki broj različitih vrsta, veličina i konstrukcija zračnih tunela. Ipak, njihove glavne karakteristike su jednake, a prisutne razlike su posljedica specijalnih zahtjeva koje

wind tunnels requires the application of aerodynamic theory and computer methods during the development and construction of an air tunnel, in the planning of experiments and interpretation of the obtained data. This paper shows how computer fluid dynamics can be used as a tool in the development of one segment of the wind tunnel.

2. OPEN WIND TUNNEL

Wind tunnel testing has enabled a wide application of aerodynamics as a science in many areas of technology. The wind tunnel is a physical instrument, a machine that allows one of its elements to achieve a uniform straight line air flow at particular velocity [2]. Figure 1. shows a simple open air tunnel for low subsonic air flow velocities.

The ambient air is sucked in the control and the flow adjustment chamber (1) by the fan (5), located at the end of the wind tunnel. The flow of air is directed towards the axis of the air tunnel and the greater instabilities that are present in the air stream are calmed down in it. After that, the air enters the contraction (2), whose cross section gradually decreases, resulting in air acceleration. Passing through the contraction's narrowest part, the air reaches its maximum flow velocity and enters the test section (3) which has a constant cross-section. In the test section there is an object of testing around which the air flows uniformly at constant velocity. Behind the test section there is a diffuser (4) in which the air slows down due to cross-section increase. By changing the fan number of revolutions, the desired air velocity in the test section is achieved.

There are many different types, sizes and designs of wind tunnels. However, their main characteristics are the same, and the present differences are the consequence of the special

određeni zračni tunel mora ispuniti. Dizajn zračnog tunela treba prilagoditi tako da on zadovoljava specifične ciljeve istraživanja sa jedne, te raspoložive finansijske i prostorne resurse sa druge strane.

Osnovni zahtjev koji mora ispuniti zračni tunel jeste obezbjeđenje ravnomjernog pravolinijskog strujanja u testnoj sekciji. Strujanje mora biti uniformno i pravolinijsko u što je moguće većem dijelu poprečnog presjeka testne sekcije. Takva raspodjela brzine treba biti zadržana po skoro cijeloj dužini testne sekcije. Ispunjenje ovog zahtjeva se postiže adekvatnim oblikom i dimenzijama osnovnih dijelova zračnog tunela, pri čemu najveći uticaj imaju elementi koji se nalaze neposredno prije i poslije testne sekcije.

3. KONVERGENTNA MLAZNICA

Konvergentna mlaznica koja se nalazi sa ulazne strane testne sekcije ima najveći uticaj na kvalitet strujanja u testnoj sekciji. Ubrzanje strujanja koje se događa u mlaznici utiče na uniformnost strujanja, intenzitet turbulencije, pojavu separacije i debljinu graničnog sloja. U zavisnosti od konkretnih zahtjeva koje mora ispuniti zračni tunel, vrijednosti navedenih karakteristika strujanja moraju biti u određenim granicama.

3.1. Konstrukcioni parametri mlaznice

Konstrukcioni parametar koji najviše utiče na ispunjenje navedenih kriterija koje konvergentna mlaznica mora ispuniti jeste omjer suženja CR, koji se najčešće izražava kao odnos ulazne i izlazne površine. Pored njega, na kvalitet strujanja utiču oblik poprečnog presjeka, oblik konture zida i dužina mlaznice [3]. Dizajniranje konvergentne mlaznice svodi se na pronalaženje najoptimalnije kombinacije ova četiri nezavisna parametra. U većini slučajeva se *a priori* odrede omjer CR i oblik poprečnog presjeka, a nakon toga dužina mlaznice, te se proces dizajniranja svodi na jednoparametarski problem, odnosno, bira se najpovoljniji oblik konture zida za izabrane poprečne presjeke i dužinu mlaznice.

3.1.1. Omjer suženja CR

Izlazni poprečni presjek konvergentne mlaznice A_e je velikim dijelom određen poprečnim presjekom testne sekcije. Ulazni poprečni presjek A_i se određuje na osnovu usvojenog omjera suženja $CR=A_e/A_i$. Prilikom izbora omjera suženja moraju se uzeti u obzir i prostorna i finansijska ograničenja.

requirements that a certain wind tunnel must achieve. The design of the wind tunnel should be adapted so that it meets the specific objectives of the research from the one, and the available financial and spatial resources on the other end. The basic requirement that the wind tunnel must achieve is to ensure a uniform straight line flow in the test section. Such kind of flow must be in as large as possible part of the cross section of the test section. Such a speed distribution should be retained in almost the entire length of the test section. Fulfilment of this requirement is achieved with the adequate shape and dimensions of the basic parts of the wind tunnel, with the greatest influence on the elements that are located immediately before and after the test section.

3. CONTRACTION

The contraction located on the input side of the test section has the greatest influence on the flow quality in the test section. The flow acceleration provided in the nozzle affects the uniformity of the flow, the turbulence intensity, the appearance of separation and the thickness of the boundary layer. Depending on the specific requirements that the air tunnel must fulfill, the values of the specified flow characteristics must be within certain limits.

3.1. Contraction construction parameters

The construction parameter that most affects the fulfilment of the specified criteria that the contraction must meet is the contraction ratio CR, which is the most often expressed as the ratio of the input and output surfaces. In addition to this, the shape of the cross-section, the wall shape and the length have influence on the flow quality [3]. The design of a contraction is targeted to finding the most optimal combination of these four independent parameters. In most cases, it is a priori to determine the ratio of the CR and the shape of the cross-section, followed by the length of the contraction, and the design process is targeted to a one-parameter problem, ie. the optimal wall shape.

3.1.1. The contraction ratio CR

The output cross-section of the contraction A_e is largely determined by the cross-section of the test section. The input cross-section A_i is determined on the basis of the adopted constriction ratio $CR=A_e/A_i$. When selecting the constriction ratio, space and financial constraints must be taken into

U savremenim zračnim tunelima omjer suženja se kreće u rasponu od 4 do 25, zavisno od vrste tunela [2]. Omjer suženja mlaznice određuje se u zavisnosti od tražene brzine u testnoj sekciji i od konstrukcijskih ograničenja. Za većinu malih, nisko brzinskih zračnih tunela prikladni su omjeri suženja od 6 do 10. To su tuneli sa površinom poprečnog presjeka testne sekcije manjom od $0,5 \text{ m}^2$ i srednjom brzinom manjom od 40 m/s [3].

3.1.2. Oblik poprečnog presjeka

Osim omjera suženja, drugi parametar koji se mora odabrati *a priori* je oblik poprečnog presjeka. Tok u uglu mlaznice obično je podložniji separaciji uslijed vrlo malih brzina koje se javljaju u ovom području. Pored toga, poprečna i sekundarna strujanja također imaju tendenciju da se razvijaju u uglovima. Kako bi se izbjegli ti neželjeni uticaji, idealni oblik poprečnog presjeka suženja je kružni. Zbog toga je u početku većina mlaznica imala ili kružni ili osmougaoni poprečni presjek koji je bio pokušaj kompromisa između pravouglog i kružnog poprečnog presjeka. Naknadna istraživanja [5] su pokazala da za kvadratne ili pravokutne poprečne presjeke, u odsustvu odvajanja, uticaji kutnog toka ostaju lokalizirani te da se oblik poprečnog presjeka može odabrati tako da odgovara ostalim dijelovima tunela, prvenstveno testnoj sekciji.

3.1.3. Dužina konvergentne mlaznice

Dizajn konvergentne mlaznice za dati omjer suženja i oblik poprečnog presjeka se svodi na određivanje adekvatne dužine i oblika konture zida mlaznice u cilju dobijanja uniformne i stabilne struje zraka na izlazu iz mlaznice i sprječavanja pojave razdvajanja toka.

Također, bitno je postići minimalnu debljinu graničnog sloja na izlazu iz mlaznice što upućuje na to da se dužina mlaznice treba što je moguće više minimizirati. Kraća mlaznica je poželjna i sa aspekta smanjenja prostora i troškova.

Međutim, rizik pojave odvajanja graničnog sloja raste sa smanjivanjem dužine. Odvajanje graničnog sloja u mlaznici dovodi do pojave nejednakosti i nestabilnosti toka na izlazu, što dovodi do smanjenja efektivnog omjera suženja. Ta pojava se izbjegava dovoljnim povećanjem dužine mlaznice, pod uslovom adekvatnog oblika konture zida, tako da granični sloj ne raste previše u blizini izlaza.

Dužina mlaznice L se najčešće izražava u odnosu na karakterističnu dimenziju ulaznog poprečnog presjeka - prečnik D_i kod kružnog ili

consideration. In modern wind tunnels, the constriction ratio is between 4 and 25, depending on the type of tunnel [2]. The constriction ratio is determined depending on the required velocity in the test section and the design constraints. For most small, low-speed air tunnels, the appropriate ratio is between 6 and 10. These are tunnels with a cross-sectional area of the test section of less than 0.5 m^2 and with an average velocity of less than 40 m/s [3].

3.1.2. Cross-section shape

In addition to the constriction ratio, the second parameter that must be selected a priori is a cross-sectional shape. The flow in the nozzle corner is usually more susceptible to separation due to very low velocities occurring in this area. In addition of this, transverse and secondary flows also have tendency to develop in corners. To avoid these unwanted effects, the ideal shape of the cross-section constriction is circular. For this reason, in the beginning, most nozzles had either a circular or octagonal cross section which was a compromise between a rectangular and circular cross-section. Subsequent studies [5] showed that for squared or rectangular cross sections, in the absence of separation, the angular flow effects remain localized and that the shape of the cross section can be selected to correspond to other parts of the tunnel, primarily to the test section.

3.1.3. Contraction length

The design of a contraction for a given constriction ratio and a cross-section shape is targeted to determining the adequate length and wall shape in order to obtain a uniform and stable air flow at the outlet of the nozzle and to prevent the appearance of the flow separation.

Also, it is important to achieve a minimum thickness of the boundary layer at the outlet, which suggests that the length should be minimized as much as possible. A shorter contraction is desirable from the aspect of reduced space and cost.

However, the risk of separation of the boundary layer increases with length decreasing. Separation of the boundary layer in the nozzle leads to the inequality and instability of the outlet flow, which leads to a reduction in the effective contraction ratio. This phenomenon is avoided by a sufficient increase in the length of the nozzle, provided the appropriate wall shape in such way that the boundary layer does not grow too much near the exit. The length L is most often expressed in relation to the characteristic dimension of the inlet cross-

visina H_i kod kvadratnog poprečnog presjeka. Taj odnos se najčešće kreće u granicama od 0,75 do 1,25.

3.1.4. Oblik konture zida mlaznice

Kontura zida mlaznice se obično sastoji od dvije spojene krive linije. Svaka od njih ima svoj vrh na jednom od krajeva mlaznice. Prva kriva linija je konkavnog oblika i poželjno je da se taj dio produži što je više moguće kako bi se izbjeglo razdvajanje graničnog sloja od zida. Drugi dio krive ima konveksan oblik koji može zbog pozitivnog gradijenta pritiska uzrokovati razdvajanje toka u blizini testne sekcije. I za ovu pojavu rješenje je povećanje dužine mlaznice, što zbog prostornih i finansijskih ograničenja nije uvijek moguće. Zbog toga je neophodno odrediti optimalnu dužinu mlaznice. Ukoliko je dužina mlaznice ranije određena onda treba odrediti optimalan oblik konture zida mlaznice. Postoji veliki broj različitih oblika zida, od kružnih lukova, preko krivih linija trećeg ili četvrtog reda do Bézier-ovih krivih višeg reda. Kako je uticaj oblika zida mlaznice na kvalitet strujanja dosta kompleksan, neophodna je upotreba računarske dinamike fluida u cilju određivanja optimalnog omjera suženja, dužine i oblika zida mlaznice. U ovom radu je CFD analiza iskorištena za određivanje parametara strujanja na izlazu iz mlaznice za različite oblike konture zida i definisane ulazne i izlazne poprečne presjeke i dužinu mlaznice.

4. CAD MODEL MLAZNICE

Poprečni presjek testne sekcije zračnog tunela, čija mlaznica se ispituje u ovom radu, je kvadrat sa stranicom dužine 0,8 m. To je ujedno i veličina izlaznog poprečnog presjeka mlaznice ($H_e=0,8$ m). Raspoloživi prostor i finansijska sredstva su imala dominantu ulogu kod određivanja omjera suženja i dužine mlaznice. Usvojen je omjer suženja $CR=4$ tako da je stranica ulaznog otvora $H_i=1,6$ m. Dužina mlaznice iznosi 1,88 m tako da se odnos između dužine mlaznice i karakteristične dužine ulaznog otvora ($L/H_i=1,175$) nalazi unutar preporučenih vrijednosti.

4.1. Parametrizacija oblika konture zida mlaznice

U prethodnom tekstu je navedeno da je oblik mlaznice određen sa velikim brojem različitih parametara. Usvajanjem osnovnih dimenzija mlaznica ostalo je samo da se definiše profil

section - the diameter D_i at the circular or the height H_i at square cross-section. This ratio usually ranges from 0.75 to 1.25.

3.1.4. The contraction wall shape

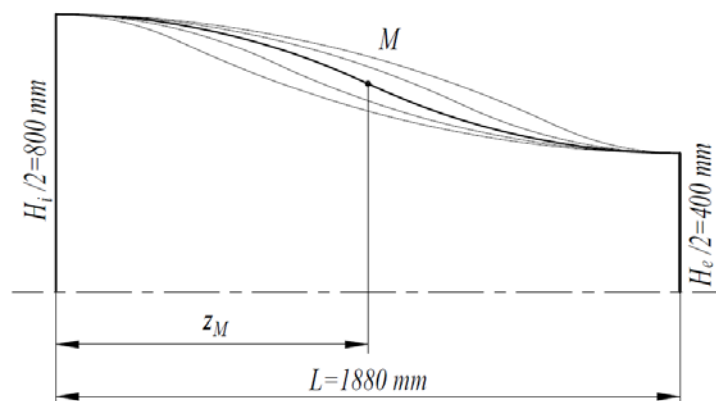
The nozzle wall contour usually consists of two connected curved lines. Each of them has its apex at one of the nozzle ends. The first curve has a concave shape and it is desirable that this part be extended as much as possible to avoid separating the boundary layer from the wall. The second curve has a convex shape which can, due to a positive pressure gradient, cause a separation of the flow near the test section. And for this phenomenon, the solution is to increase the length, which due to space and financial constraints is not always possible. It is therefore necessary to determine the optimum length. If the length is earlier determined, then the optimum wall shape should be determined. There are many different wall shapes, from circular arcs, through the curves of the third or fourth order to the Bézier's higher-order curves. Since the influence of the wall shape on the flow quality is rather complex, it is necessary to use computer fluid dynamics in order to determine the optimal constriction ratio, length and wall shape. In this paper, the CFD analysis was used to determine the flow parameters at the nozzle outlet for different wall contours and defined the inlet and outlet cross sections and the nozzle length.

4. CAD MODEL OF CONTRACTION

The cross section of the air tunnel test section, whose contraction is examined in this paper, is a square with a side length of 0.8 m. It is also the size of the outlet cross-section of the nozzle ($H_e=0,8$ m). The available space and financial resources had a dominant role in determining the constriction ratio and the length of the nozzle. The $CR = 4$ ratio was accepted so that the side of the inlet opening is $H_i=1,6$ m. The contraction length is 1.88 m so that the ratio between the nozzle length and the characteristic length of the inlet opening ($L/H_i=1,175$) is within the recommended values.

4.1. Parameterization of the contraction wall shape

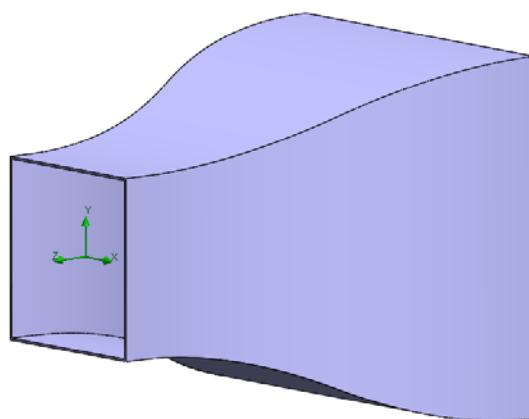
The preceding text it is stated that the shape of the nozzle is determined by a large number of different parameters. By accepting the basic dimensions of the nozzles, only the wall shape



Slika 2. Kontura zida mlaznice koju čine dva spojena kružna luka
Figure 2. Nozzle wall contour constructed of two matched arcs

zida mlaznice. Uvođenjem dodatnih relacija i pojednostavljenja oblik mlaznice se može učiniti zavisnim od samo jednog parametra. U našem slučaju usvojeno je da se profil zida mlaznice sastoji od konkavnog i konveksnog kružnog luka koji se spajaju u tački M (slika 2.). Između kružnih lukova je postavljena relacija tangentnosti tako da je prelazak sa jednog na drugi kružni luk neprimjetan. Također, vrhovi kružnih lukova se poklapaju sa krajevima mlaznice što osigurava fin prijelaz sa mlaznice na susjedne komponente zračnog tunela. Uvođenjem odnosa između z koordinate spojne tačke M i ukupne dužine mlaznice oblik krive profila zida mlaznice postaje zavisna samo od tog jednog parametra: $p_z = z_M/L$.

need to be defined. By introducing additional relationships and simplifying, the shape of the nozzle can be made dependent on only one parameter. In our case, it was accepted that the wall shape consists of a concave and a convex circular arc that meeting each other at point M (Figure 2.). A relationship of tangency is set between the circular arches in such way that the transition from one circular arc to other is invisible. Also, the circular arcs apexes coincide with the ends of the nozzle, which ensures a fine transition from the contraction to the adjacent components of the air tunnel. By introducing a relationship between the z coordinate of the joint point M and the total length, the contraction wall shape becomes dependent only on that one parameter ($p_z = z_M/L$).



Slika 3. 3D model konvergentne mlaznice
Figure 3. 3D model of contraction

5. NUMERIČKA SIMULACIJA STRUJANJA ZRAKA KROZ MLAZNICU

5.1. SolidWork Flow Simulation

Numeričke simulacije strujanja zraka kroz mlaznicu su izvršene pomoću kompjuterskog koda Flow Simulation koji je dio softverskog

5. NUMERICAL AIR FLOW SIMULATION THROUGH THE NOZZLE

5.1. SolidWorks Flow Simulation

Numerical air flow simulations through the nozzle were computed using the computer code of Flow Simulation, which is part of the

paketa SolidWorks Premium. Flow Simulation rješava *Navier-Stokes*-ove jednačine, koje predstavljaju primjenu zakona o održanju mase, momenta i energije na strujanje fluida. Te jednačine se dopunjavaju jednačinama stanja fluida koje opisuju ponašanje fluida, te empirijskim zavisnostima gustoće fluida, viskoznosti i toplotne provodljivosti od temperature. Neelastični *ne-Newton*-ovi fluidi razmatraju se uvođenjem zavisnosti njihove dinamičke viskoznosti o smicanju i temperaturi, dok se stišljivi fluidi razmatraju uvođenjem zavisnosti njihove gustoće od pritiska. Dati problem je konačno određen definisanjem njegove geometrije, te graničnih i početnih uslova.

Flow Simulation može predvidjeti i laminarna i turbulentna strujanja. Laminarna strujanja javljaju se pri niskim vrijednostima Reynoldsovog broja, koji se definiše kao proizvod reprezentativnih vrijednosti brzine i dužine podijeljen kinematskom viskoznošću. Kada *Reynolds*-ov broj pređe određenu kritičnu vrijednost, protok postaje turbulentan, tj. parametri protoka se počinju nasumično mijenjati.

Većina strujanja fluida u inženjerskoj praksi je turbulentna, tako da je Flow Simulation uglavnom razvijen kako bi se simulirala i proučavala turbulentna strujanja. Za predviđanje turbulentnih strujanja koriste se vremenski usrednjene *Navier-Stokes*-ove jednačine, gdje se uzimaju u obzir vremenski usrednjeni uticaji turbulencije na parametre strujanja, dok se drugi, tj. veliki, vremenski zavisni fenomeni direktno uzimaju u obzir. Kroz ovaj postupak, u jednačinama se pojavljuju dodatni izrazi, poznati kao *Reynolds*-ovi naponi, za koje se moraju obezbijediti dodatne informacije. Kako bi se zatvorio ovaj sistem jednačina, Flow Simulation koristi transportne jednačine za kinetičku energiju turbulencije i brzinu njene disipacije, tzv. *k- ϵ* model [6].

Flow Simulation na osnovu 3D modela kreiranog u SolidWorksu automatski kreira pravougaonu računarsku mrežu u okviru računarske domene. Odgovarajuća računarska domena generiše se u obliku pravougaonog paralelopipeda koji sadrži model za 3D i 2D analizu. Njene granice su paralelne sa ravninama globalnog koordinatnog sistema. Tokom postupka kreiranja mreže, računarska domena se dijeli u jednake pravougaone ćelije oblika paralelopipeda i na taj način se formira

SolidWorks Premium software package. Flow Simulation solves the *Navier-Stokes* equations, which are formulations of mass, momentum and energy conservation laws for fluid flows. The equations are supplemented by fluid state equations defining the nature of the fluid, and by empirical dependencies of fluid density, viscosity and thermal conductivity on temperature. Inelastic non-Newtonian fluids are considered by introducing a dependency of their dynamic viscosity on flow shear rate and temperature, and compressible liquids are considered by introducing a dependency of their density on pressure. A particular problem is finally specified by the definition of its geometry, boundary and initial conditions.

Flow Simulation is capable of predicting both laminar and turbulent flows. Laminar flows occur at low values of the Reynolds number, which is defined as the product of representative scales of velocity and length divided by the kinematic viscosity. When the Reynolds number exceeds a certain critical value, the flow becomes turbulent, i.e. flow parameters start to fluctuate randomly.

Most of the fluid flows encountered in engineering practice are turbulent, so Flow Simulation was mainly developed to simulate and study turbulent flows. To predict turbulent flows, the Favre-averaged *Navier-Stokes* equations are used, where time-averaged effects of the flow turbulence on the flow parameters are considered, whereas the other, i.e. large-scale, time-dependent phenomena are taken into account directly. Through this procedure, extra terms known as the Reynolds stresses appear in the equations for which additional information must be provided. To close this system of equations, Flow Simulation employs transport equations for the turbulent kinetic energy and its dissipation rate, the so-called *k- ϵ* model [6].

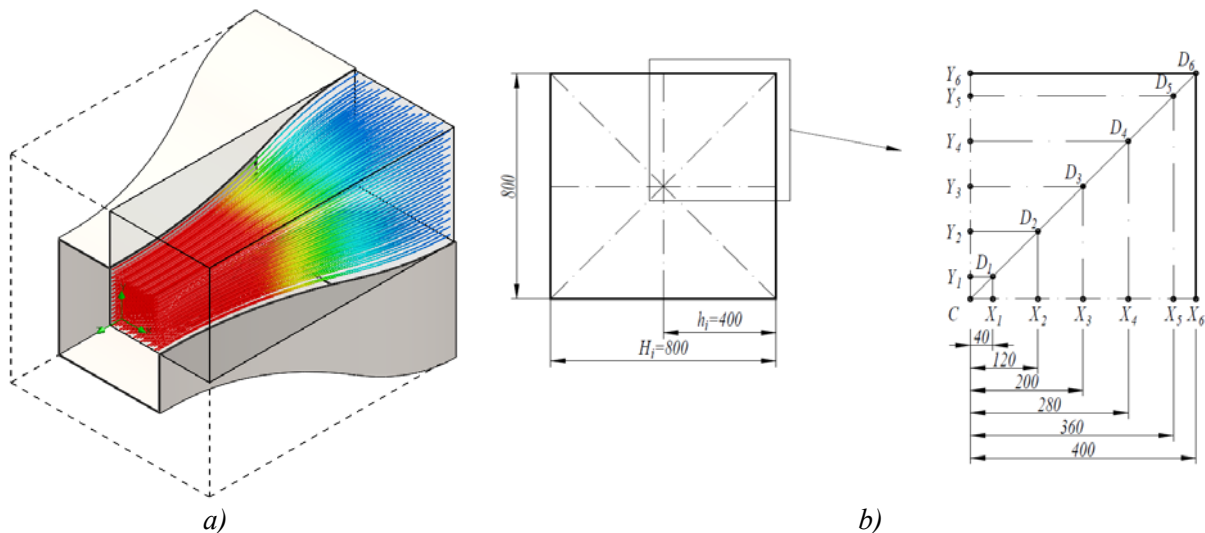
Flow Simulation considers the real model created in SolidWorks and automatically generates a rectangular computational mesh in the Computational Domain. The corresponding Computational Domain is generated in the form of a rectangular parallelepiped enclosing the model for both the 3D analysis and 2D analysis. Its boundaries are parallel to the Global Coordinate System planes. In the mesh generation process, the computational domain is divided into uniform rectangular parallelepiped-shaped cells, which form a so-called basic mesh. Then, using information about the model geometry, the specified

tzv. osnovna mreža. Nakon toga, na osnovu geometrije modela, definisanih graničnih uslova i postavljenih ciljeva, Flow Simulation nastavlja proces kreiranja mreže putem brojnih dorada, odnosno, dijeljenja osnovnih mrežnih ćelija. Na taj način se postiže bolje predstavljanje područja koje ispunjavaju model i fluid. Ta tzv. početna mreža je u potpunosti definisana osnovnom mrežom i postavkama dorade mreže. Svaka dorada mreže ima svoje kriterije i nivo. Kriteriji dorade definišu koje ćelije će se dijeliti, dok nivo dorade definiše najmanju veličinu do koje će se ćelije dijeliti. Ta najmanja veličina ćelija uvijek je definisana u odnosu na veličinu ćelije osnovne mreže, tako da je osnovna mreža od velike važnosti za konačnu računarsku mrežu.

Flow Simulation nudi opciju dorade mreže tokom samih izračuna. Rezultatima prilagodljiva dorada mreže je proces dijeljenja ćelija računarske mreže u područjima gdje greške računanja (pogotovo lokalne greške uzrokovane skraćivanjem, odnosno, pojednostavlivanjem matematičkih procedura) mogu biti dosta velike te spajanjem ćelija u područjima gdje su te greške zanemarive [6].

boundary conditions and goals Flow Simulation further constructs the mesh by means of various refinements, i.e. splitting of the basic mesh cells into smaller cells, thus better representing the model and fluid regions. The mesh, which the calculation starts from, so-called initial mesh, is fully defined by the generated basic mesh and the refinement settings. Each refinement has its criterion and level. The refinement criterion denotes which cells have to be split, and the refinement level denotes the smallest size, which the cells can be split to. Regardless of the refinement considered, the smallest cell size is always defined with respect to the basic mesh cell size so the constructed basic mesh is of great importance for the resulting computational mesh.

Flow Simulation offers the option of mesh refinement during the calculation itself. Solution-adaptive refinement of the computational mesh during the calculation is a process of splitting the computational mesh cells in areas where the calculation error (specifically, the local truncation error (LTE)) may be sufficiently large and merging of the computational mesh cells in areas where the calculation error is definitely small [6].



Slika 4. Računarska domena (a) i položaj kontrolnih tačaka na izlaznom otvoru mlaznice (b)
Figure 4. Computational domain (a) and the position of the control points at the nozzle outlet (b)

5.2. Postavke numeričke simulacije

Prvo je napravljen okvirni plan eksperimenta. Planirano je da se za pet različitih brzina strujanja ispita pet različitih oblika konture zida mlaznice. Prilikom kreiranja 3D modela vođeno je računa da jedna dimenzija mlaznice upravlja oblikom konture mlaznice. Usvojeno je da se

5.2. Numerical simulation settings

First of all, a general plan of the experiment is made. It is planned to examine five different wall shapes for five different flow rates. While creating a 3D model of the nozzle, it is considered that one dimension controls the shape of the contour of the nozzle. It was

izvrši testiranje za pet različitih vrijednosti parametra p_z : 0,2; 0,35; 0,5; 0,65 i 0,8 (slika 2.) za pet srednjih brzina v_m na izlasku iz mlaznice: 4, 8, 12, 16 i 20 m/s.

Mlaznica je simetričnog oblika te je računarska domena prilagođena tako da obuhvata samo jednu četvrtinu mlaznice (slika 4.a). Na taj način je znatno smanjeno vrijeme potrebno za proračune. Postavke mreže su postavljene tako da je u blizini zida mlaznice dobivena dovoljno sitna mreža koja će obezbijediti dobijanje pouzdanih preliminarnih rezultata na osnovu kojih će biti moguće donijeti odluku o tome koja oblik konture je najpovoljniji. Dobivena je mreža sa oko 750 hiljada ćelija. U cilju određivanja kvaliteta strujanja na izlazu iz mlaznice, na izlaznoj ravnini su postavljene kontrolne tačke u kojima su definisani ciljevi simulacije: ukupna brzina strujanja i njene tri komponente. Odabrane su tačke na horizontalnoj i vertikalnoj osi, te na dijagonali izlaznog poprečnog presjeka. Definisan je parametar položaja tih tačaka kao odnos x koordinate tačke i polovine ukupne širine izlaznog poprečnog presjeka: $p_x = x/h_i$. Ukupno je odabrano 19 tačaka za sedam vrijednosti parametra p_x : 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 i 1 (slika 4.b).

accepted to test five different values of the parameter p : 0,2; 0,35; 0,5; 0,65 and 0,8 (Figure 2.) for five average velocity values v_m at the outlet of the nozzle: 4, 8, 12, 16 i 20 m/s.

The contraction is symmetrical, and the computer domain is accepted in that way to cover only one-fourth of the nozzle (Figure 4.a). In this way, the time required for the calculations has been considerably reduced. Mesh settings have been set in way that a sufficiently small mesh is created near the wall of the nozzle, which will provide reliable preliminary results, based on which it will be possible to decide which form of contour is most favorable. A mesh with 750 thousand cells was obtained. In order to determine the flow quality at the exit, control points are defined at the output plane, in which the objectives of the simulation are defined: the total flow velocity and its three components. Points at the horizontal and vertical axes were selected and at the diagonal of the output cross-section. The position parameter of these points is defined as the ratio of the x coordinate of the point and half of the total width of the output cross-section: $p_x = x/h_i$. A total of 19 points were selected for the seven values of the p_x parameter: 0; 0.1; 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 and 1 (Figure 4.b).

| Summary | * Design Point 1 | * Design Point 2 | * Design Point 3 | * Design Point 4 |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Volume flow rate (Inlet Volume Flow 1) [m ³ /h] | 2304 | 4608 | 6912 | 9216 |
| Match point length@Sketch00@WT_Contraction.Part [m] | 0.376470588 | 0.376470588 | 0.376470588 | 0.376470588 |
| PG X Velocity 1 [m/s] | 3.89871644 | 7.78172707 | 11.6643733 | 15.5541644 |
| PG X Velocity (X) 1 [m/s] | -0.0125778982 | -0.0249566657 | -0.0373120172 | -0.0498500228 |
| PG X Velocity (Y) 1 [m/s] | -0.012580287 | -0.0249633129 | -0.0373176487 | -0.0498600228 |
| PG X Velocity (Z) 1 [m/s] | 3.89867582 | 7.78164695 | 11.6642538 | 15.5541644 |
| PG X Velocity 2 [m/s] | 3.90082419 | 7.78590992 | 11.6706278 | 15.56352419 |
| PG X Velocity (X) 2 [m/s] | -0.0148915415 | -0.0297918481 | -0.0446462443 | -0.0598800228 |
| PG X Velocity (Y) 2 [m/s] | -0.014088893 | -0.027954478 | -0.0417845607 | -0.0558000228 |
| PG X Velocity (Z) 2 [m/s] | 3.90076866 | 7.78579931 | 11.6704624 | 15.5621644 |
| PG X Velocity 3 [m/s] | 3.91664176 | 7.81728896 | 11.7175287 | 15.6251644 |
| PG X Velocity (X) 3 [m/s] | -0.0245925129 | -0.0491850258 | -0.0737775387 | -0.0983600228 |
| PG X Velocity (Y) 3 [m/s] | -0.0245925129 | -0.0491850258 | -0.0737775387 | -0.0983600228 |
| PG X Velocity (Z) 3 [m/s] | 3.91652176 | 7.81716896 | 11.7174087 | 15.6251644 |

Slika 5. Postavke What If Analysis

Figure 5. What If Analysis settings

Kao granični uslovi definisani su protok na ulazu i atmosferski pritisak na izlazu. Ulazni protok je određen tako da na izlazu obezbijedi željene brzine strujanja. Pri tome je podijeljen sa četiri pošto je analizirano strujanje samo kroz jednu četvrtinu mlaznice. Preostale tri četvrtine mlaznice su uzete u obzir definisanjem uslova simetričnosti na ravninama *front* i *top*. Opcija *Parametric Study* je iskorištena za pravljenje jedne *What If Analysis* pomoću koje

The boundary conditions define flow at the input and atmospheric pressure at the exit. The inlet flow is determined in such way that at the output it provides the desired flow velocities. In that way, it is divided by four, since only one quarter of the nozzle is analyzed. The remaining three-quarters of the nozzle were taken into count by defining the conditions of symmetry on the front and top planes.

The *Parametric Study* option was used to create one *What If Analysis* and it is used for a plan of

je kreiran plan od 25 numeričkih eksperimenata. Parametri na osnovu kojeg je kreiran scenarij eksperimenta su bili granični uslov zapreminskog protoka na ulazu i geometrijski parametar oblika konture mlaznice (slika 5). Nakon toga je pokrenuta analiza i dobiveni su određeni rezultati.

6. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

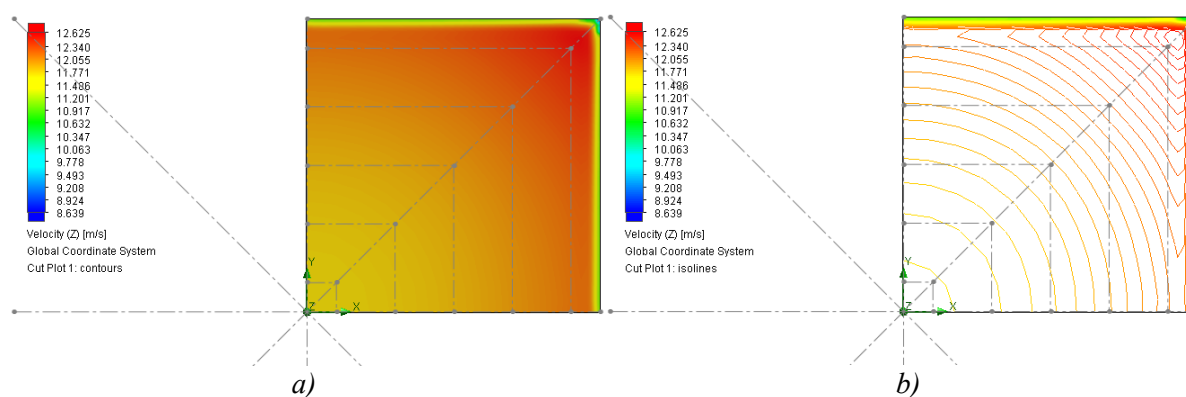
Dobiveni rezultati su pokazali da je vrijednost brzine u horizontalnom i vertikalnom pravcu skoro identična, što se moglo i očekivati. Zbog toga ćemo analizirati samo raspored brine duž horizontalne ose. Na slici 6. prikazan je raspored z komponente brzine. To je komponenta koja je u pravcu ose konvergentne mlaznice. Prikazane su vrijednosti koje su dobivene u okviru eksperimenta broj 8 (D.P. 8). To je slučaj kada je ulazni zapreminski protok toliki da obezbjeđuje brzinu na izlazu 12 m/s, a parametar p_z ima vrijednost 0,35. Brzina je prikazana na dva načina, pomoću kontura i izolinija. Kod prikaza brzina pomoću linija koje povezuju sve tačke u kojima je brzina ista, jasno se može vidjeti koliki je uticaj ugla kvadratnog poprečnog presjeka na raspored brzina. Potvrđeno je da taj uticaj nije toliko veliki i da je opravdano korištenje kvadratnog poprečnog presjeka. Na slici 7. prikazan je profil brzine za ovu tačku eksperimenta. Dobiveni profil brzine ima djelomično očekivani oblik, pošto brzina neznatno opada kako se približavamo centru mlaznice. Na slici 8. prikazani su 3D profili brzina za različite kombinacije ulaznih parametara. Pri tome nisu uzimane u obzir nulte brzine u tačkama koje se poklapaju sa zidom mlaznice.

25 numerical experiments creation. The parameters on the basis of which the experiment script was created were the boundary condition of the volume flow at the inlet and the geometric parameter of the contour shape of the nozzle (Figure 5). After that the analysis was performed and some results were obtained.

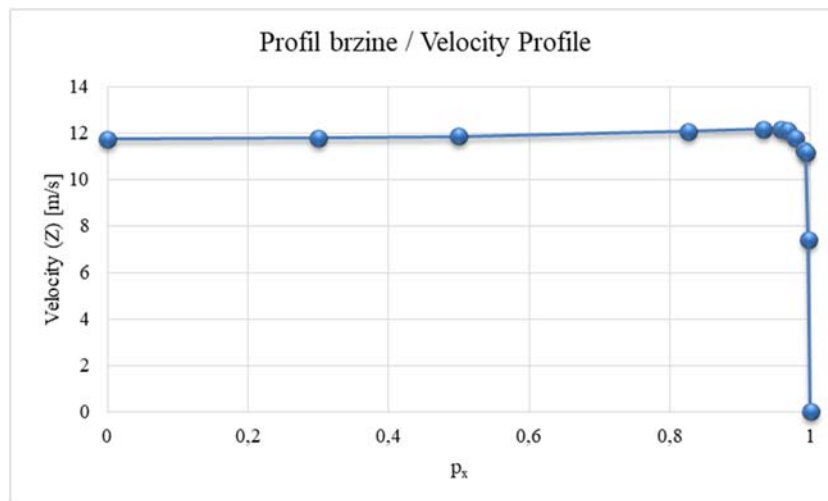
6. ANALYSIS OF OBTAINED RESULTS

The obtained results showed that the velocity value in the horizontal and vertical directions is almost identical. And that could be expected. Therefore, we will analyze only the velocity spreading along the horizontal axis. Figure 6. shows the z component of velocity spreading. It is a component that is in the direction of the convergent nozzle axis. The values obtained under experiment No. 8 (D.P. 8) are displayed. This is the case where the input volume flow is such that it provides a velocity of 12 m/s at the output, and the parameter p_z has a value of 0.35. Velocity is shown in two ways, using contours and isolines. When displaying velocities using lines that connect all the points in which the velocity has the same value, one can clearly see the effect of the angle of the square cross-section on the velocity spreading. It was confirmed that this effect is not so large and it is justified to use a square cross-section.

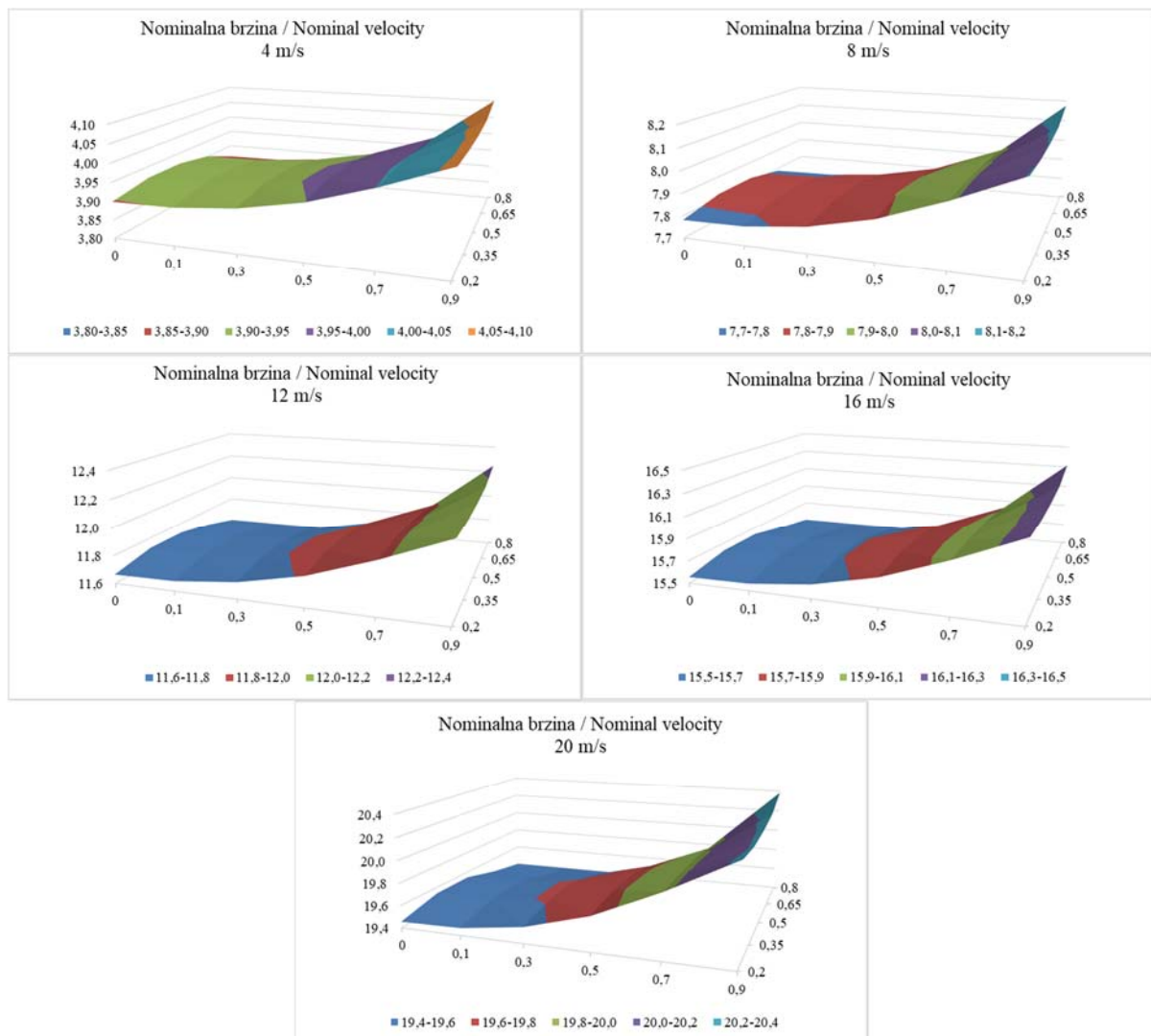
Figure 7. shows the velocity profile for this experiment point. The obtained velocity profile has a partially expected shape, as the velocity slightly drops as we get closer to the center of the nozzle. Figure 8. shows 3D velocity profiles for different combinations of input parameters. Zero speeds were not taken into consideration at points that match the nozzle wall.



Slika 6. Raspored z komponente brzine na izlazu iz mlaznice
Figure 6. The z -component velocity contour at the nozzle output



Slika 7. Profil z komponente brzine duž horizontalne ose na izlazu iz mlaznice (D.P. 8)
Figure 7. The z-component velocity profile along the horizontal axis at the nozzle output (D.P. 8)



Slika 8. 3D profil z komponente brzine duž horizontalne ose na izlazu iz mlaznice
Figure 8. The 3D z-component velocity profile along the horizontal axis at the nozzle output

Urađene numeričke analize su stacionarne, odnosno, neovisne o vremenu tako da nije moguće odrediti uniformnost strujanja i intenzitet turbulencije.

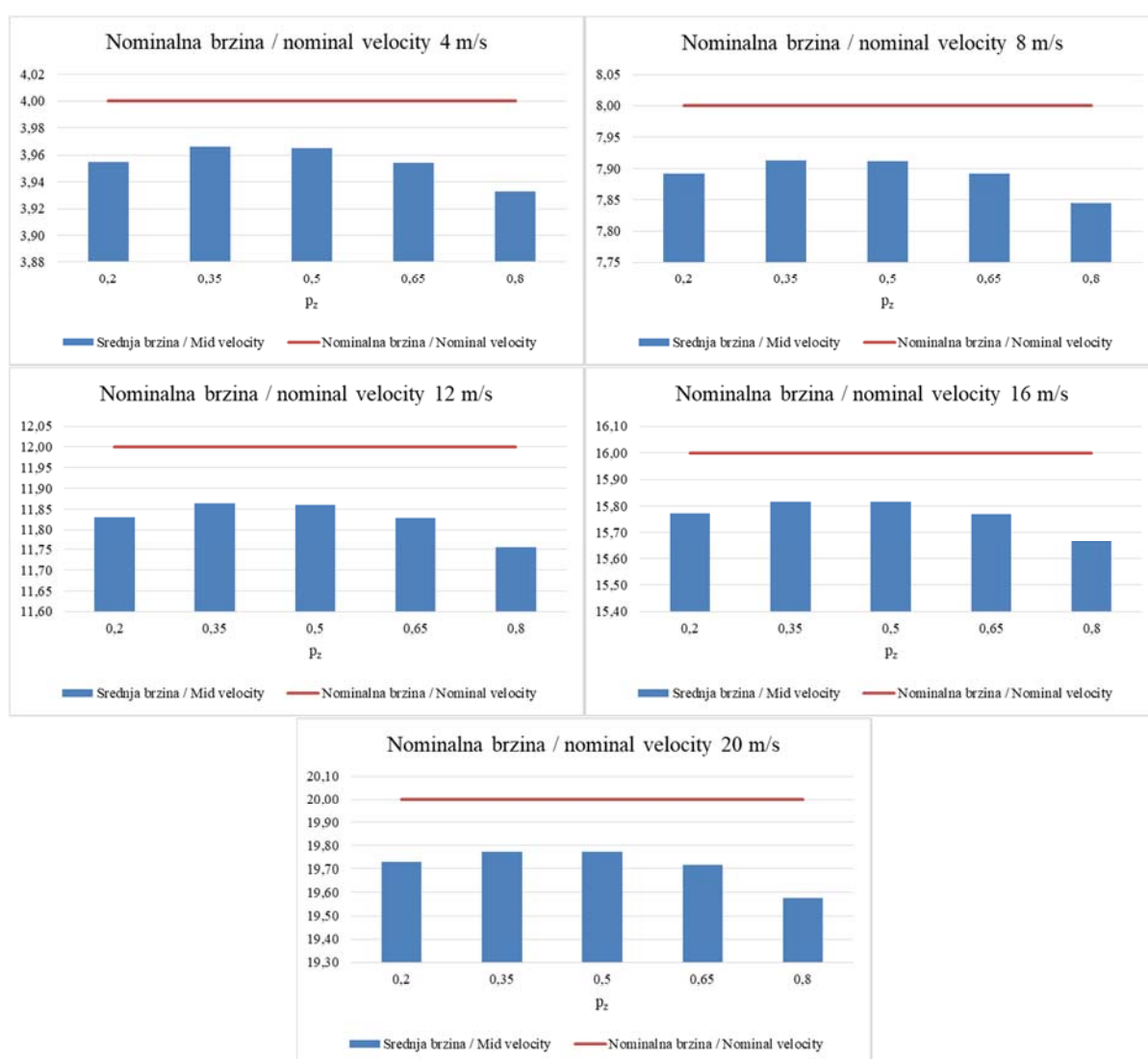
Procjena koji od analiziranih profila mlaznice je najprihvatljiviji izvršena je na osnovu srednjih brzina strujanja duž horizontalne ose na izlazu iz mlaznice. Iz analize je izuzeta tačka koja se nalazi na samom kraju jer je brzina u njoj jednaka nuli. Na slici 9. dat je grafički prikaz srednjih brzina za sve analizirane brzine.

Odavde se vidi da su, prema ovom kriteriju, najprihvatljivije mlaznice kod kojih parametar oblika p_z ima vrijednost 0,35 i 0,5.

The performed numerical analyzes are stationary, that means that they are independent of time so that it is not possible to determine the flow uniformity and the turbulence intensity.

An estimate of which of the analyzed nozzle profiles is most acceptable is based on the average flow velocities along the horizontal axis at the outlet of the nozzle. The analysis excluding the point that is placed at the very end because the velocity at this point is zero. Figure 9. gives a graphical representation of average velocities for all analyzed velocities.

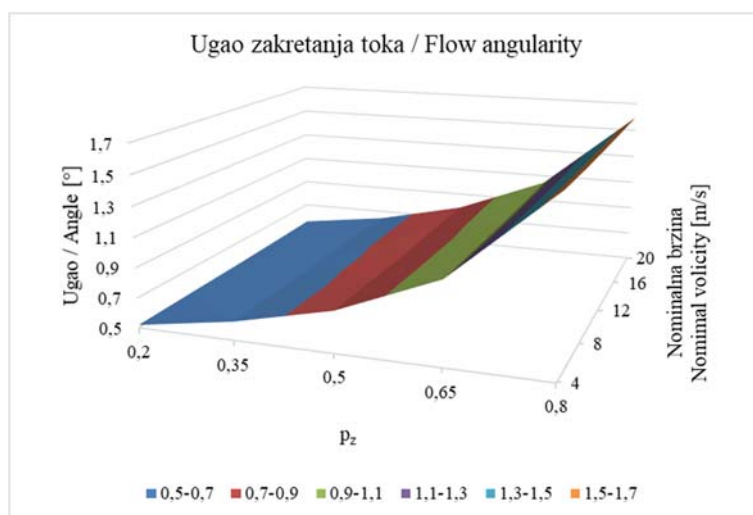
From this it can be seen that, according to this criterion, the most acceptable nozzles in which the parameter of the form p_z has a value of 0.35 and 0.5.



Slika 9. Srednje brzine strujanja za pet analiziranih vrijednosti brzina
Figure 9. Mid flow velocities for five analysed velocity values

Na osnovu dobivenih vrijednosti tri komponente brzine i ukupne brzine u svim tačkama izlaznog poprečnog presjeka, moguće je odrediti ugao zakretanja toka. Ugao zakretanja toka je mjera ravnosti toka, odnosno, to je odnos između dvije poprečne komponente brzine i glavne komponente brzine. U ovom radu je ugao zakretanja toka računat kao ugao između vektora ukupne brzine i komponente brzine u pravcu ose mlaznice. U svakoj analiziranoj tački na horizontalnoj osi izlaznog poprečnog presjeka izračunat je ugao zakretanja za svih 25 provedenih numeričkih simulacija. Zatim su izračunate srednje vrijednosti uglova zakretanja toka duž horizontalne ose. Dobivene vrijednosti su prikazane grafički na slici 10. Može se vidjeti da na ugao zakretanja toka neznatno utiče povećanje brzine strujanja, dok ugao primjetno raste sa povećavanjem geometrijskog parametra p_z .

On the basis of the obtained values of the three velocity components and the total velocity at all points of the output cross-section, it is possible to determine the flow angularity. The flow angularity is the measure of the straightness of the flow, i.e., the ratio between the two cross flow velocities and the streamwise velocity. In this paper, the angularity of flow rotation is calculated as the angle between the total velocity vector and the velocity component in the direction of the nozzle axis. In each of the analyzed points on the horizontal axis of the output cross-section, the flow angularity was calculated for all 25 numerical simulations that were performed. Then, the average values of the flow rotation angles along the horizontal axis are calculated. The obtained values are shown graphically in Figure 10. It can be seen that the angle of flow rotation is slightly affected by an increase in the flow velocity, while the angle is noticeably increasing with the increase of geometric parameter p_z .



Slika 10. 3D prikaz vrijednosti ugla zakretanja toka
Figure 10. The 3D view of flow angularity

7. ZAKLJUČAK

Konstrukcija konvergentne mlaznice je složen postupak pošto postoje četiri konstruktivna parametra koja u većoj ili manjoj mjeri utiču na kvalitet strujanja u testnoj komori zračnog tunela. U većini slučajeva se postupak pronalaska optimalne kombinacije navedena četiri parametra svede na analizu uticaja samo jednog parametra. Postoje više razloga za to, a najčešći su prostorna i finansijska ograničenja. U ovom radu je za kvadratni poprečni presjek izlaza mlaznice $A_o=0,64 \text{ m}^2$, vrijednost omjera suženja $CR=4$ i dužinu mlaznice $L=1,88 \text{ m}$ izvršena analiza pet različitih oblika konture zida

7. CONCLUSION

The construction of a contraction is a complex process because there are four constructive parameters that greater or lesser influence the flow quality in the test section of the wind tunnel. In most cases, the process of finding an optimal combination of these four parameters are reduced to the analysis of the only one parameter impact. There are several reasons for this and the most common are space and financial constraints. In this paper, an analysis of five different contours of the nozzle wall was performed for the square cross-section of the nozzle outlet $A_o=0.64 \text{ m}^2$, the contraction ratio

mlaznice. Kontura zida mlaznice se sastojala od dva kružna luka koja su spojeni u jednoj tački i između kojih je uspostavljena relacija tangencnosti. Pomoću kompjuterskog koda Flow Simulation provedeno je 25 numeričkih simulacija. Analizom dobivenih rezultata se može zaključiti da je za zadane konkretne vrijednosti tri geometrijska parametra najoptimalnija kontura zida mlaznice u kojoj se dva kružna luka spajaju na 35% ukupne dužine mlaznice. Varijanta sa spojnom tačkom na sredini mlaznice također nije loše rješenje, pogotovo što takav oblik mlaznice izgleda kao lakši za izradu. Kompjuterski kod Flow Simulation se pokazao kao dobar alat za donošenje preliminarnih odluka u ranoj fazi dizajna mlaznice. Iako su tokom numeričkih simulacija snimani i rezultati na vertikalnoj osi i duž dijagonale izlaznog poprečnog presjeka, u ovom radu su analizirane samo vrijednosti dobivene na horizontalnoj osi. Raspored brzina na izlazu iz mlaznice navodi na zaključak da je ta analiza dovoljna i da se na osnovu nje može zaključiti u kojem dijelu poprečnog presjeka je ostvaren zadovoljavajući kvalitet strujanja zraka.

$CR=4$ and the length $L=1.88 m$. The contraction wall shape consisted of two circular arcs connected at one point and between which the relation of tangency was set. Using the computer code of Flow Simulation, 25 numerical simulations were performed. By analyzing the obtained results, it can be concluded that, for the given concrete values of three geometric parameters, most optimal contour of the nozzle wall is that in which two circular arcs connected at the 35% of the total length of the nozzle. The variant with a connected point at the center of the nozzle is also not a bad solution, especially because this kind of contraction looks easier to produce. The Flow Simulation computer code proved to be a good tool for making preliminary decisions in the early stage of the design of the contraction. Although during numerical simulations the results on the vertical axis and along the diagonal of the output cross-section were recorded, only the values obtained on the horizontal axis were analyzed in this paper. The velocities distribution at the nozzle outlet leads to the conclusion that this analysis is sufficient and on this basis it can be concluded that in which section of the cross section the satisfactory air flow quality has been achieved.

8. REFERENCES

- [1] J.B. Barlow, W.H. Rae JR., A. Pope: *Low Speed Wind Tunnel Testing*, 3rd edition, John Wiley and Sons, New York, 1999.
- [2] S.M. Gorlin, I.I. Slezinger: *Wind tunnels and their Instrumentation*, Translated form Russian, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 1969.
- [3] J.H. Bell, R. D. Metha: *Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels*, NASACR- 182747, April 1988.
- [4] T. Morel: *Comprehensive Design of Axisymmetric Wind tunnel Contraction*, Journal of Fluids Engineering, ASME, june 1975.
- [5] R.D. Mehta: *The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with Wide-Angle Diffusers*, Prog. Aerospace Sci., Vol. 18, No.1, 1977, pp. 54-120.
- [6] *SolidWorks Flow Simulation 2018 Technical Reference*, Dassault Systems,

Corresponding author:

Ernad Bešliagić

University of Zenica, Faculty of Mechanical Engineering

Email: ebeslagic@mf.unze.ba

Phone: +387 61 61 20 61