

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

Mr Dragiša M. Skoko

UTICAJ STRUJNIH I GEOMETRIJSKIH PARAMETARA
NA PNEUMATSKU DIMENZIJSKU KONTROLU
MAŠINSKIH DELOVA

Doktorska disertacija

Beograd, 2021.

University of Belgrade
Faculty of Mechanical Engineering

Dragiša M. Skoko

INFLUENCE OF FLOW AND GEOMETRICAL PARAMETERS
ON PNEUMATIC DIMENSIONAL CONTROL
OF MACHINE PARTS

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021.

Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije

dr Milan Lečić, red. prof, **mentor**
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Mileta Ristivojević, red. prof, **mentor**
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Radivoje Mitrović, red. prof.
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Maša Bukurov, red. prof.
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

dr Jela Burazer, naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Datum odbrane:

Supruzi Dari i sinovima Žarku i Momčilu

PREDGOVOR...

Kolika je važnost pneumatske metrologije, generalni menadžer firme “Solex” C, J, Tanner na otvaranju naučnog skupa davne 1958. god. o istorijskom razvoju pneumatske metrologije i njene primene u budućnosti, rekao je: „**Elektronika će u budućnosti biti mozak automatskih mašina a pneumatska metrologija njihove oči**”. Sa ovom rečenicom počeo je istorijski pregled i budućnost pneumatske metrologije. Zahtevi kvaliteta finalnog proizvoda zahteva stalno usavršavanje i unapređivanje mernih uređaja sa mogućnošću merenja na mikro i nano nivou, pa čak i merenje do veličine atoma. Pneumatski uređaji za merenje i kontrolu su našli veliku primenu u kontroli precizne industrije, u automatskoj kontroli, u aktivnoj kontroli. Između ostalog, u merenju i kontroli predmeta dugačkih unutrašnjih mikro-dimenzija, nezamenljivi su.

Ova doktorska disertacija je konačan rezultat naučno istraživačkog rada i kruna višegodišnjeg pregalaštva i velike posvećenosti problematici pneumatske metrologije. U tom smislu ova oblast pruža neiscrpan izvor naučno istraživačkih izazova. U Magistarskom radu sam se bavio istorijskim razvojem pneumatske metrologije, njena primena u merenju i kontroli mašinskih delova, uticaji geometrijskih i strujnih faktora na pneumatsku osetljivost i izračunavanju prečnika merne glave za kontrolu spoljašnjih i unutrašnjih mera. Tek kada sam počeo da radim doktorat, kao nastavak magistarskog rada, uvideo sam koliko je to široka oblast i od koliko je važnosti u tehnici merenja. Takođe sam video koliko je veliki poznavalac ove oblast, mentor ovoga rada, prof. dr Cvetko Crnojević. Upoznavši njegove radove, uvideo sam da spada u sami vrh poznavalaca ove oblasti. Koliki je Cvetko bio veliki svestran naučnik, govori činjenica da je pneumatska metrologija samo jedna od oblasti kojom se bavio. Neizmerno sam zahvalan mentoru prof. dr Cvetku Crnojeviću, što mi je ukazao na mogućnost primene Mehanike fluida u oblasti merenja dužinskih veličina, uveo me je u svet jednodimenzijskog strujanja fluida, pneumatske metrologije i omogućio korišćenje inostrane malobrojne literature, pogotovo francuske. Pomagao mi je, davao sugestije, savete i usmeravao kod izrade instalacije za merenje pneumatskih veličina. Davao mi je sugestije i bodrio me tokom višegodišnjih napornih merenja da dođem do potrebnih naučnih rezultata. Strogi zahtevi su iziskivali ponavljanje celokupnih merenja, da bi se došlo do validnih ponovljivih rezultata. Na veliku žalost, veliki naučnik i profesor dr Cvetko Crnojević, nije dočekao završetak i konačno uobličenje ovog rada u koga je mnogo uložio znanja, vremena, energije, sistematičnosti i mukotrpnog rada.

Posle iznenadne smrti prof. dr Cvetka Crnojevića, mentorstvo su nastavili prof. dr Milan Lečić i prof. dr Mileta Ristivojević. Neizmernu zahvalnost im dugujem, uveli su me u strukturu pneumatske metrologije, mehanike fluida, mikromerenja, tolerancija i naleganja. Svojim sugestijama, dugotrajnom i gotovo svakodnevnom analizom, kako rada tako i rezultata merenja, pomogli su mi je u rasvetljavanju funkcionisanja pojedinih uređaja, primeni rezultata merenja i otkrili mi nove vidike beskrajne sveta merenja. Veliku zahvalnost im dugujem, što su koristeći ogromno znanje iz oblasti merenja, pomogli mi da nađem sponu pneumatskih veličina i dužinskih mera. Svojim sugestijama, usmeravanju ka konačnoj verziji, bodrenjem, predlozima i čestim kontaktima, omogućili su mi da rad dobije završni oblik.

Zahvalan sam dekanu Mašinskog fakulteta prof. dr Radivoju Mitroviću, koji me je nesebično, sve vreme, bodrio i pružao neophodnu pomoć iz oblasti merenja i analize dobijenih rezultata i njihovu primenu u oblasti merenja dužinskih veličina.

Takođe veliko hvala prof. dr Maši Bukurov, šefu Katedre za Mehanika fluida i hidropneumatske sisteme na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na ukazanim propustima u radu i tehničkim greškama.

Posebno veliko hvala dr Jeli Burazer, naučnom saradniku na Katedri za mehaniku fluida, na pomoći oko sređivanja i sistematizovanja doktorata, korisnim sugestijama i predlozima. Poznavanje materije, snaga, strpljenje koje je pokazivala u brojnim diskusijama koje smo imali pri svestranoj analizi rezultata merenja je za divljenje i veliko poštovanje. Davala mi je predloge proširenja razjašnjenja strujnih procesa, dijagrama, slika. Veliku zahvalnost joj dugujem, što je koristeći svoje znanje iz mehanike fluida, pomogla u razjašnjavanju uticaja strujnih veličina na kvalitet merenja i upotrebi stručne terminologije. Takođe veliko hvala dr Jeli Burazer na korisnim sugestijama i predlozima pri detaljnom čitanju završnog teksta disertacije.

Zahvaljujem se svim kolegama sa katedre za Opšte mašinske konstrukcije i fakulteta, na prijateljskim savetima i podršci koju su mi pružali nesebično, kako ličnoj tako i profesionalnoj, od samog početka rada.

Konačno, hvala svima na poverenju, izdvojenom vremenu i korisnim sugestijama kojima su doprineli da ova doktorska disertacija bude konačno uobličena kao vredan, stručan i naučni rezultat potsticajan i budućim generacijama.

UTICAJ STRUJNIH I GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NA PNEUMATSKU DIMENZIJSKU KONTROLU MAŠINSKIH DELOVA

Rezime

Sa sve većim zahtevima za što tačnijom obradom mašinskih delova dolazi do ubrzanog razvoja obradnih sistema. Samim tim, do izražaja dolazi i sve veća potreba za primenom pneumatske metrologije za proveru tačnosti dimenzija obrađenih delova. Upravo je to razlog za istraživanje sprovedeno u okviru ove doktorske disertacije.

Istraživanje strujnih i geometrijskih parametara koji su od značaja za ispravan rad diferencijalnog pneumatskog komparatora je sprovedeno eksperimentalnim putem. U tu svrhu je korišćena ekseprimentalna instalacija sa diferencijalnim pneumatskim komparatorom. U cilju određivanja raspodele pritiska na površi merenog komada u aksijalnom i radijalnom pravcu, osmišljen je mehanizam za fino pomeranje izlazne mlaznice u ovim pravcima. Meren je pritisak na površi merenog komada u zavisnosti od pritiska napajanja, prečnika prigušne mlaznice u mernoj komori diferencijalnog pneumatskog komparatora, položaja izlazne mlaznice u odnosu na površ merenog komada u pravcu normale i tangente na površ i ugla mlaznice u odnosu na normalu na mereni komad. Za merenja je korišćena standardna mlaznica sa ravnom čeonom površi, kao i specijalno napravljena mlaznica sa tangencijalnim ulazom vazduha u kojoj se formira vihorno strujanje. Vihorno strujanje je formirano i u standardnoj mlaznici postavljanjem zavojnih traka u istu. Na taj način je istraživao uticaj vrste strujanja u mlazu diferencijalnog pneumatskog komparatora na rad ovog uređaja. Takođe je istraživao i uticaj zakrivljenja površi merenog komada kroz merenje pritiska na površi dva cilindra različitih prečnika. Ovi rezultati su poređeni sa raspodelama pritiska na ravnoj površi. Konstruisane su i napravljene dve izlazne mlaznice sa zaobljenim zidom na unutrašnjoj strani mlaznice, za koje je takođe određivana raspodela pritiska na ravnoj površi merenog komada. Na čeonj površi standardne mlaznice su izbušena tri otvora koja su povezana sa manometrima. Na taj način je meren pritisak i na čeonj površi mlaznice.

Pokazano je da pneumatska osetljivost kao jedan od najvažnijih parametara pneumatskog komparatora zavisi od svih razmatranih parametara tj. vrste strujanja u mlazu izlazne mlaznice, udaljenost mlaznice od merenog komada, od ugla pod kojim je izlazna mlaznica postavljena u odnosu na mereni komad, radijusa krivine površi merenog komada. Međutim, ne postoji precizno uputstvo za povećanje ove veličine ako se neka od uticajnih veličina promeni. Potrebno je u svakom konkretnom slučaju odrediti da li je promena (pad ili porast) pneumatske osetljivosti opravdana s obzirom na promenu u opsegu primene pneumatskog komparatora koji se takođe menja. Ovo je takođe u vezi sa eliminisanjem zone potpritiska ispod čeonj površi izlazne mlaznice. Potrebna su dodatna merenja parametara vihornog strujanja, kao i merenja na površima različitih radijusa krivina, kako bi se došlo do preciznijih zakonitosti o uticajima ovih parametrima, budući da je ovo prvi put da se u literaturi prikazuju ovi rezultati.

Ključne reči: diferencijalni pneumatski komparator, eksperiment, pritisak, pneumatska osetljivost

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Mehanika fluida

UDK broj: 006.91:621.81(0.43.3)

531.7.082.3:621.81(0.43.3)

INFLUENCE OF FLOW AND GEOMETRICAL PARAMETERS ON PNEUMATIC DIMENSIONAL CONTROL OF MACHINE PARTS

Abstract

With increasing demands for the most accurate machining of machine parts, there is an accelerated development of machining systems. Therefore, the growing need for the application of pneumatic metrology to check the accuracy of the dimensions of machined parts comes to the fore. This is exactly the reason for the research conducted within this doctoral dissertation.

The research of flow and geometrical parameters that are important for the correct operation of the differential pneumatic comparator was carried out experimentally. For that purpose, an experimental installation with a differential pneumatic comparator was used. In order to determine the pressure distribution on the surface of the controlled part in the axial and radial directions, a mechanism for fine movement of the outlet nozzle in these directions has been designed. The pressure on the surface of the controlled part was measured depending on the supply pressure, the diameter of the damping nozzle in the measuring chamber of the differential pneumatic comparator, the position of the outlet nozzle in relation to the surface of the controlled part in the normal and tangential direction, nozzle inclination. A standard nozzle with a flat front surface was used for the measurements, as well as a specially made nozzle with a tangential air inlet in which a swirling flow is formed. The swirling flow is also formed in the standard nozzle by placing twisted strips in it. In this way, the influence of the flow type in the jet of the differential pneumatic comparator on the operation of this device was researched. The influence of the measured part surface curvature through the measurement of the pressure on the surface of two cylinders of different diameters was also researched. These results were compared with the pressure distributions on a flat surface. Two outlet nozzles with a rounded wall on the inner side of the nozzle were constructed and made, for which the pressure distribution on the flat surface of the controlled part was also determined. Three openings are drilled on the front surface of the standard nozzle, which are connected to manometers. In that way, the pressure on the front surface of the nozzle was also measured.

It has been shown that pneumatic sensitivity as one of the most important parameters of a pneumatic comparator depends on all considered parameters i.e. type of the flow in the nozzle jet, distance of the nozzle from the controlled part, the angle at which the outlet nozzle is placed in relation to the controlled part, the controlled part surface curvature. Precise instructions for increasing this value if any of the influential variables change are not determined. It is necessary to determine in a particular case whether the change (decrease or increase) of pneumatic sensitivity is justified given the change in the application range of the pneumatic comparator which also changes. This is also in relation with the disappearance of the vacuum zone under the front surface of the comparators outlet nozzle. Additional measurements of the swirling flow parameters, as well as measurements on surfaces of different curvature are necessary, in order to arrive at more precise laws on the effect of these parameters, since this is the first time that these results have been presented in the literature.

Keywords: differential pneumatic comparator, experiment, pressure, pneumatic sensitivity

Scientific field in general: Mechanical Engineering

Scientific field in particular: Fluid Mechanics

UDC: 006.91:621.81(0.43.3)

531.7.082.3:621.81(0.43.3)

SPISAK OZNAKA

$p=p_t$	-	pritisak na površi mašinskog dela
$p(\delta)$	-	pritisak u aksijalnom pravcu
$p(r)$	-	pritisak u radijalnom pravcu
δ	-	aksijalno rastojanje mlaznice i površi merenog komada
D	-	spoljašnji prečnik vrha mlaznice
d	-	unutrašnji prečnik vrha mlaznice
P	-	snaga elektromotora [KW]
n	-	broj obrtaja elektromotora [min^{-1}]
D	-	prečnik mlaznice u mernoj komori B_1
p_0	-	pritisak napajanja
$\dot{V}$	-	protok vazduha [l/min]
T_1	-	temperature vazduha na prvom senzoru
T_2	-	temperature vazduha na drugom senzoru
ΔT	-	promena temperature
l_1	-	dužina vrha mlaznice
$\Delta \delta$	-	promena aksijalnog rastojanja
α	-	ugao nagiba mlaznice
r	-	dužina u radijalnom pravcu
p^*	-	smanjen početni pritisak
δ^*	-	rastojanja sredine izlaznog preseka mlaznice
δ_0	-	aksijalne dužine smanjenog početnog pritiska p^*
p_p	-	pritisak na ulazu u merilo protoka vazduha
Z	-	oznaka zavojnice postavljene u izlaznu mlaznicu
p_1	-	pritisak na početku pravolinijskog dela dijagrama
p_2	-	pritisak na kraju pravolinijskog dela dijagrama
Δp	-	razlika pritisaka (pad pritiska) $\Delta p = p_1 - p_2$
δ_1	-	aksijalno rastojanje na početku pravolinijskog dela dijagrama
δ_2	-	aksijalno rastojanje na kraju pravolinijskog dela dijagrama
$\Delta \delta$	-	razlika aksijalnog rastojanja
r_2	-	radijalno rastojanje za koje natpritisak prelazi u potpritisak
r_2	-	radijalno rastojanje za koje potpritisak prelazi u natpritisak
Δr	-	razlika radijalnog rastojanja
$p_{\min}$	-	najmanji pritisak
$r_{\min}$	-	rastojanje u radijalnom pravcu gde je najmanji pritisak
S	-	pneumatska osetljivost [$\text{bar}/\mu\text{m}$]

x

ΔS	-	promena pneumatske osetljivosti [bar/ μm]
TU	-	oznaka mlaznice sa tangentnim ulazom vazduha
MH ₁₅₀	-	mlaznica zaobljena sa unutrašnje strane čija izvodnica je parabola $x*u=\text{const}$ površine $A=1,8849 \text{ mm}^2$
MH ₂₅₀	-	mlaznica zaobljena sa unutrašnje strane čija izvodnica je parabola $x*u=\text{const}$ površine $A=2,5132 \text{ mm}^2$
r_{M1}	-	$r_{M1}=1,65 \text{ mm}$ prečnik kružnice na kojoj se nalazi osa mernog mesta broj 1
r_{M2}	-	$r_{M2}=1,35 \text{ mm}$ prečnik kružnice na kojoj se nalazi osa mernog mesta broj 2
r_{M3}	-	$r_{M3}=1,50 \text{ mm}$ prečnik kružnice na kojoj se nalazi osa mernog mesta broj 3
d_c	-	prečnik cilindra
φ	-	ugao zakretanja cilindra
R_k	-	radijus krivine
φ_1	-	vrednost ugla zakretanja prelaska natpritiska u potpritisk
φ_2	-	vrednost ugla zakretanja prelaska potpritiska u natpritisk
r_z	-	vrednost radijalne komponente za $p=\text{const}$

SADRŽAJ

Rezime	vii
Abstract	viii
Spisak oznaka	ix
1 Uvod	1
2 Pregled dosadašnjih istraživanja	9
3 Eksperimentalna instalacija	47
3.1 Merna instalacija	47
3.1.1 Merna komora B ₁	50
3.1.2 Merilo protoka vazduha	50
3.1.3 Izlazna mlaznica M-1	53
3.2 Princip na kome se zasniva rad pneumatske metrologije	54
4 Raspodele pritiska na površi kontrolisanog dela u aksijalnom i radijalnom pravcu	57
4.1 Raspodela pritiska u radijalnom pravcu	57
4.2 Raspodela pritiska u aksijalnom pravcu	61
4.3 Pneumatska osetljivost	65
4.4 Nestabilnost mernog signala diferencijalnog pneumatskog komparatora	71
5 Uticaj nagiba izlazne mlaznice na raspodele pritiska na površi mašinskog dela	77
5.1 Uticaj nagiba mlaznice na radijalnu raspodelu pritiska na površi merenog komada	78
5.2 Uticaj nagiba mlaznice na aksijalnu raspodelu pritiska na površi merenog komada	82
5.3 Uticaj nagiba mlaznice na opseg primene i pneumatsku osetljivost diferencijalnog pneumatskog komparatora	86
5.4 Pritisak na ulazu u merilo protoka	89
5.5 Merenje protoka vazduha	91
6 Uticaj vihora u mlazu izlazne mlaznice na rad diferencijalnog pneumatskog komparatora	95
6.1 Vihorno strujanje u mlazu izlazne mlaznice formirano uvijenim trakama	97
6.2 Vihorno strujanje u mlazu izlazne mlaznice formirano tangencijalnim ulazom vazduha u mlaznicu	101
6.3 Pritisak na ulazu u merilo protoka za mlaznicu TU	103
6.4 Merenje protoka vazduha za mlaznicu TU	104

7 Uticaj zakrivljenosti površi merenog komada na raspodele pritiska u aksijalnom i radijalnom pravcu	105
7.1 Uticaj zakrivljenosti površi merenog komada na aksijalnu raspodelu pritiska	105
7.2 Uticaj zakrivljenosti površi merenog komada na radijalnu raspodelu pritiska	108
7.2.1 Uticaj pomeranja mlaznice duž ose cilindrične površi na radijalnu raspodelu pritiska	108
7.2.2 Uticaj zakretanja cilindričnog merenog komada na radijalnu raspodelu pritiska	113
8 Modifikacije geometrije izlazne mlaznice	117
8.1 Geometrija mlaznica MH ₁₅₀ i MH ₂₅₀	117
8.1.1 Aksijalna raspodela pritiska na merenom komadu za mlaznice MH ₁₅₀ i MH ₂₅₀	119
8.1.2 Radijalna raspodela pritiska na merenom komadu za mlaznice MH ₁₅₀ i MH ₂₅₀	120
8.2 Merenje pritiska na frontalnoj površi standardne mlaznice	121
9 Zaključak	123
Literatura	127

1 UVOD

Metrologija je nauka o merenju, poseban je deo pojedinih prirodnih i tehničkih nauka koja se bavi metodama merenja fizičkih veličina, razvojem i izradom mernih uređaja, reprodukcijom i uvođenjem mernih jedinica i svim ostalim aktivnostima koje omogućavaju merenje i usavršavanje mernih postupaka. Skup aktivnosti čiji je cilj dobijanje vrednosti merne veličine (fizičke veličine), predstavlja merenje. Značaj merenja kao praktične tehničke delatnosti od prvenstvene je važnosti kako u svakodnevnom životu tako i u svim područjima privrede i nauke

Industrijska proizvodnja zahteva česta merenja. U tehničkoj dijagnostici se vrše merenja u cilju utvrđivanja stanja tehničkih sistema. Nakon konstrukcije novog proizvoda vrše se ispitivanja karakteristika prototipnog rešenja. Kontrola i merenje se vrše u svrhu automatskog upravljanja procesima. Bez merenja se ne može zamisliti kontrola kvaliteta proizvoda kao uslova za njegovu prodaju. Sistematska merenja sa poznatim stepenom nesigurnosti predstavljaju osnov u industrijskom upavljanju kvalitetom. Uopšte govoreći, u većini savremene industrije troškovi merenja čine 10-15 % ukupnih troškova proizvodnje.

Eksperimentalna ispitivanja i studiozna analiza rezultata ispitivanja, su bitni uslovi za uspešan i brz razvoj nauke. Eksperimentima se dolazi do novih otkrića u nauci. U svakom eksperimentu merenja imaju veoma značajnu ulogu. Bez merenja eksperimenti bi imali daleko manji značaj. Ona daju uslove za daleko bolje i studiozno razmatranje pojava. Neophodnost velikog broja eksperimenata, zahteva uvek i obimna i mnogobrojna merenja. S obzirom na veoma brz razvoj savremene nauke, neophodno je sprovoditi brojna sistematska merenja, koja daju potrebnu tačnost a pored toga i veliku ekonomičnost u vremenu i sredstvima. Danas nije pitanje samo izmeriti neku veličinu, već je isto tako važno i kako je izmeriti, da bi se rezultati dobili najpovoljnijim putem. Ogroman progres tehnike i tehničkih nauka zahtevao je i odgovarajući razvoj metoda merenja i instrumenata i prateće opreme koja se koristi za merenje. Mnoge oblasti nauke razvile su se tek kada je ostvarena odgovarajuća mogućnost merenja. U nastojanju da se nađu sve mogućnosti istraživači su često pokazivali i vrhunac dovitljivosti ljudskog duha pa su uz vlastite eksperimente često doprineli razvoju metoda i tehnika merenja. Nove metode merenja razvijene u fizici, pokazali su se odlučujućim u razvoju tehnike. Mnoge oblasti savremene tehnike razvile su se zahvaljujući novim mogućnostima merenja. Merenje je povezano sa proizvodnim procesima. U tehničkoj dijagnostici merenja se vrše u cilju utvrđivanja stanja tehničkih sistema. Zavisno od vrste i cilja merenja, koriste se različiti merni instrumenti i prateća oprema. Merenje određenih parametara zaheva i korišćenje odgovarajuće metode i primerene opreme. Osnovna delatnost laboratorija je merenje, iz čega proizilaze nova naučna saznanja u različitim oblastima delatnosti.

Merenja čiji se rezultati koriste u naučne svrhe treba ponavljati određeni broj puta. Laboratorije služe da bi se merenjem potvrdile ili proverile odabrane ili željene veličine nekog proizvoda. Na rezultat merenja mogu uticati spoljni faktori. Zato su i propisani uslovi za merenja i potrebno ih je održavati na konstantnom nivou. Merenja koja se obavljaju u svrhu kontrole ili utvrđivanja kvantitativnog nivoa nekog radnog parametra ili neke veličine gotovog proizvoda ne zahtevaju isti

niz radnji koje se moraju provesti kod merenja za istraživačke svrhe. Faktori spoljne okoline kod proizvodnih merenja mogu se zanemariti ukoliko ne utiču na rezultat merenja. Praćenje toka proizvodnje i određivanje mere, određuje se korišćenjem merenja uz korišćenje namenske konvencionalne ili specijalne merne opreme. Bez merenja se ne može zamisliti kontrola kvaliteta proizvoda kao osnovnog uslova za njegovu prodaju i zadovoljenje potreba i želja kupca. Bez merenja se ne bi mogao ni ostvariti ni objasniti dosadašnji razvoj čovečanstva, a ni zamisliti buduću njegov napredak. Merenje i kontrola proizvoda, radnih predmeta, alata i uređaja predstavlja važnu tehnološku operaciju u procesu proizvodnje, jer omogućavaju izradu najsloženijih delova, podsklopova i sklopova koji će moći potpuno da odgovore strogo postavljenim zahtevima u pogledu odstupanja – tolerancija.

Zbog velike uloge u tehnološkom procesu proizvodnje, kontrole, montaže i održavanja, merenje i kontrola moraju uporedo da se razvijaju sa ostalim segmentima proizvodnje. Koliko je teško tačno izraditi neki mašinski deo, grubim ili finim struganjem i brušenjem, toliko je teško i izvršiti njegovo tačno merenje i kontrolu. Aparati i uređaji za merenje i kontrolu i merila se stalno usavršavaju. Merna jedinica se smanjuje sa razvojem savremenih uređaja i mašina, tolerancijska polja su uža a merenje tačnije.

Uređaji za merenje i kontrolu moraju da budu tačni, dugotrajni i jednostavni za upotrebu. Metode za merenje i kontrolu nisu iste za pojedinačnu kao za masovnu i serijsku proizvodnju, a samim tim i uređaji. Razlika se ogleda u samoj konstrukciji odgovarajućih pribora. Merni uređaji se dele na one koji vrše merenje po završetku procesa obrade i na one koji služe za merenje u toku samog procesa obrade, aktivno merenje. Prema prirodi merila postoje: mehanički, hidraulički, pneumatski, optički, električni, elektromagnetski i elektronski (laserski) merni uređaji.

Kvalitet svakog mašinskog dela u pogledu geometrijske tačnosti, dimenzija, oblika, položaja i hrapavosti, definiše se na tehničkoj dokumentaciji propisivanjem odgovarajućeg stepena tačnosti. Propisuje se na osnovu tehničkih i ekonomskih kriterijuma. Ostvareni kvalitet geometrijske tačnosti mašinskog dela posle izrade verifikuje se odgovarajućim metodama kontrole i merenja. Kontrola treba da da stvarnu sliku o stanju mašinskog dela sa aspekta geometrijske tačnosti. Svaka greška pri kontroli reflektuje se na dobijanje imaginarne slike o stanju geometrijske tačnosti. One se pre eksploatacije mašinskog dela mogu otkriti u fazi sklapanja (montaže) ili uhodavanja, ako je predviđeno. Ako se u ovim fazama, greške kontrole ne otkriju, onda će se u eksploatacionim uslovima reflektovati na radne performanse mašinske konstrukcije.

Razvojem industrije javila se potreba za kvalitetnom kontrolom površina proizvedenih komada, čime je nametnut i razvoj raznih metroloških sistema. Uporedo sa razvojem proizvodnih mašina razvija se tehnika kontrole i merenja proizvedenih komada. Prvi uređaji za kontrolu su bili mehanički. Mogli su da zadovolje potrebu u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji jednostavnih mašinskih delova. Naglim razvojem industrije krajem XVIII-og i kroz ceo XIX vek došlo je do ubrzanog razvoja nove nauke o merenju – metrologije. Mehanički uređaji za kontrolu i merenje se usavršavaju. Razvojem savremene industrije XX-og veka, koju karakteriše velikoserijska proizvodnja komplikovanih oblika i metoda izrade, mehanički uređaji ne mogu da zadovolje u svim segmentima proizvodnje. To naročito dolazi do izražaja u automobilskoj i avio industriji. Razvijeni su potpuno novi uređaji za merenje i kontrolu. Tu spadaju: mehanički, optički, električni, pneumatski, hidraulički i laserski uređaji. Svi ovi uređaji su složenog oblika i izrade. Najvažnija prednost savremenih uređaja u odnosu na mehaničke je njihova tačnost. Tačnost mehaničkih uređaja je 1 μm , a savremenim uređajima mogu se meriti i deseti i stoti delovi mikrometra.

Beskontaktnim metodama se vrši merenje ili kontrola objekata ili parametara bez fizičkog dodira sa njima. Ove metode su na primer: optičke metode merenja i kontrole.

Aktivna merenja se vrše s ciljem upravljanja i regulisanja procesa. Aktivni merni sistemi su funkcionalno povezani preko specijalnih upravljačkih jedinica sa izvršnim organima menjajući parametar na primer, režima obrade, odmicanje i primicanje alata. Osim toga aktivni merni sistemi mogu da vrše kompenzaciju greške obrade kao i korekciju dimenzija na osnovu rezultata merenja ili statističke ocene izmerenih vrednosti iz serije. Cilj pasivnih merenja je selekcija loših komada kada se merenja vrše u proizvodnim procesima. U postupku merenja sva korišćena merna oprema, merni uređaji i instrumenti moraju obezbediti da se merenje vrši: tačno, precizno i pouzdano.

Prilikom izbora merne i kontrolne opreme za odgovarajuća merenja prvo se analizira koliko je dozvoljeno odstupanje veličine koja se meri ili kontroliše i uzimaju podaci iz dokumentacije bitni za metrološka razmatranja. U postupku izrade proizvoda ili odvijanja procesa vrše se merenja s ciljem da se dobiju karakteristike proizvoda ili procesa onakve kakve su projektovane u dokumentaciji ili propisane za odvijanje procesa. Merenje se vrši u toku izrade proizvoda i da bi se proverile tehničko-tehnološke mogućnosti sistema za izradu jednostavnih i složenih proizvoda. U klasičnom merenju vrši se upoređivanje merene veličine sa usvojenom jedinicom mere.

Postupak kontrole se bitno razlikuje od merenja. Kontrolom se ne dobijaju apsolutne brožane vrednosti kontrolisanih veličina, već relativna vrednost odstupanja od nazivne mere. Dobija se samo informacija da li je neka dimenzija merenog objekta u granicama ili izvan granica tolerancije. Rezultati kontrole pomažu u donošenju odluka u procesu proizvodnje da li je neki komad dobar, loš ili za doradu. Kontrolom se dobija informacija o karakteru procesa kojim se izrađuje kontrolisani komad. Na osnovu rezultata kontrole zaključuje se o stabilnosti procesa ili potrebi korekcije upravljanja tehnološkim procesom. Kontrolom se identifikuju odstupanja kontrolisane veličine, od dokumentacijom predviđene. Kontrola je provera da li se kontrolisana veličina - dimenzija nalazi unutar propisanih granica tolerancije (gornje i donje). Vrednost kontrolisane veličine se izražava zaključcima: merena veličina je u granicama tolerancije i merena veličina je izvan granice tolerancije. Kontrolom se za razliku od merenja ne dobijaju vrednosti kontrolisanih veličina nego samo njihovo stanje koje se može porediti sa propisanim. Kontrola se može podeliti na: aktivnu i pasivnu. Aktivnom kontrolom se, osim utvrđivanja stanja kontrolisane veličine, vrši i automatsko upravljanje tj. promena parametara koji utiču na proces kako bi se proces odvijao prema propisanim parametrima. Pasivna kontrola se izvodi nakon završene obrade delova ili izrade proizvoda. Rezultati pasivne kontrole nemaju uticaja na proces. U procesu proizvodnje donose se odluke kada će se vršiti kontrola, a kada merenje? U principu, ako se radi o jednom mernom komadu ili jednom parametru koji se meri na manje od 20 komada vrši se merenje. Ako je broj komada veći od 20 vrši se kontrola predviđenog parametra. Ova granica je relativna, zavisi od odgovornosti mašinskog dela.

U tehničari su praktični, korisni i sve više se upotrebljavaju električni merni sistemi za merenje neelektričnih veličina. Posebno je važna ova vrsta merenja za merenja na mašinama i uređajima koji rade u dinamičkim uslovima. Merno informacioni sistemi su najsavremeniji oblik merenja. U njihovom radu koristi se teorija informacija, mikroelektronski sistemi, mikroprocesori i računari. Cilj je upravljanje obradnim centrima i tehnološkim procesima uz primenu fleksibilne automatizacije manipulacionim robotima.

Prema karakteru promene merne veličine u toku merenja, ova se dele na statička i dinamička. Statička merenja su ona kod kojih merna veličina ostaje konstantna u toku vremena. Dinamička merenja su ona kod kojih se merna veličina menja u toku vremena. Predprocesna merenja vrše se

pre procesa, primer: obrada u metaloprerađivačkoj industriji. Obuhvataju niz mernih i kontrolnih radnji, a cilj im je kontrola i zaštita. Kontrola podrazumeva otklanjanje loših komada. Zaštita u predprocesnim merenjima podrazumeva zaštitu mašina, pribora i alata od oštećenja koja mogu nastupiti used obrade neodgovarajućih komada. Procesna merenja se obavljaju u toku odvijanja procesa, postprocesna nakon završetka procesa (kontrola serije, klasiranje proizvoda, itd.).

Nastankom i razvojem numerički upravljanih mašina alatki (NUMA) nastaju i razvijaju se numerički upravljane merne mašine (NUMM). To su mašine koje predstavljaju kompleksne metrološke sisteme u kojima je proces merenja, obrade rezultata merenja i indikacije rezultata potpuno automatizovan i programiran. Uvođenjem automatizacije u maloserijskoj proizvodnji obrade delova složenih oblika, javila se potreba za istom takvom automatizacijom i efektivnim merenjem i kontrolom. Klasične metode merenja i merne tehnike, zbog nedovoljne tačnosti i niske produktivnosti, nisu mogli da odgovore ovom metrološkom zahtevu. Da bi se ovaj tehnološki jaz između obrade i merne tehnike eliminisao, bio je nužan razvoj novih mernih tehnika koje bi po efikasnosti i metrološkim performansama, odgovarale numerički upravljanoj tehnici kao što su: pneumatski, hidraulički, elektronski merni sistemi. Današnju fazu razvoja NUMM predstavljaju mašine sa direktnim računarskim upravljanjem. To je potpuno automatizovan metrološki sistem. Upravljanje svim osnovnim mernim i kontrolnim operacijama i pomoćnim operacijama kretanja, obavlja se pomoću odgovarajućeg softvera. Proces programiranja se izvodi pomoću računara koji je najčešće povezan sa mernim uređajem.

Merni roboti predstavljaju najnoviju klasu mernih sistema koji su nastali praćenjem razvoja industrijskih robota druge i treće generacije. Po definiciji, to je fleksibilni programirani sistem koji do određenog nivoa podržava neke osnovne funkcije čoveka. Razvoj numerički upravljanih obradnih sistema uticao je na razvoj mernih i kontrolnih robota. Veliki broj konstrukcija mernih robota su modifikacija numerički upravljanih mašina alatki, pri čemu se rezni alat zamenjuje mernom glavom ili mernim pipkom. Prelazak sa tradicionalne na fleksibilnu tehnologiju izrade proizvoda ne bi bio moguć bez odgovarajućeg razvoja fleksibilne tehnologije upravljanja kvaliteta konformnosti tih istih proizvoda. Ovaj razvoj karakteriše pojava i gradnja mernih robota koji se, automatizacijom metroloških procesa i operacija i svojom univerzalnošću, programabilnošću i fleksibilnošću, skladno uklapaju u nove visokofrekventne fleksibilne proizvodne sisteme i linije.

Savremeni uređaji za merenje i kontrolu mašinskih delova imaju veliki doprinos u metrologiji koji se ogleda u: maksimalnoj produktivnosti merenja (posebno proizvoda složenog oblika), smanjenju lošeg kvaliteta proizvoda, povećanju nivoa kvaliteta konformnosti merenja, smanjenju troškova merenja, smanjenju troškova izrade, brzom i jednostavnom izvođenju metroloških operacija, lakoj i prostoj primeni merne tehnike, jednostavnom i brzom izvođenju tehnologije merenja delova vrlo složenog oblika, prelazak na programirano i potpuno automatizovano merenje i aktivnu procesnu kontrolu proizvoda bez obzira na složenost geometrijskog oblika.

Celokupan razvoj merne i kontrolne tehnike ima za cilj da se dobiju što verodostojnije (pouzdanije) informacije o: dimenzijama, obliku, međusobnom položaju i stepenu površinske hrapavosti mašinskog dela.

Pneumatski merni sistemi se intenzivno razvijaju tridesetih godina XX-og veka, počev od najjednostavnijih, pa sve do savremenih uređaja. Zbog velike mogućnosti primene, jednostavne konstrukcije, lakog održavanja, jednostavnog rukovanja, a iznad svega velike tačnosti, ovi uređaji su dominantni u kontroli mašinskih delova. Prednost ovih uređaja, u odnosu na ostale, je što komprimovan vazduh koji izlazi iz mlaznice merne glave, velikom brzinom oduva mehaničke i ostale nečistoće i tanak sloj tečnosti za hlađenje komada. Na ovaj način se smanjuje mogućnost

pojave greške pri merenju i kontroli. Druga prednost je što se koriste za merenje i kontrolu više mera istovremeno, bilo spoljašnjih ili unutrašnjih ili i jednih i drugih istovremeno. Vrlo značajnu primenu ima dinamička pneumatska metoda koja se primenjuje kod obrtnih komada, u toku rada, bez zaustavljanja rada mašine, gde se vrši merenje i kontrola obratka. Savremene obradne mašine, ne samo da mere i kontrolišu mašinski deo u toku procesa obrade, već vrše upravljanje procesom izrade mašinskih delova signalom dobijenim iz pneumatskog mernog uređaja, sa ciljem da se proizvode mašinski delovi sa tačnom geometrijskom merom. Ovo znači da se stvarna mera dela koji se izrađuje nalazi u predviđenom tolerancijskom polju. Taj merni signal služi u povratnoj automatskoj sprezi, za zaustavljanje mašine i promene obratka.

Zbog velikog uticaja geometrijske tačnosti mašinskog dela na finalni kvalitet mašinske konstrukcije danas se u velikoserijskoj proizvodnji sve više primenjuje pneumatska metoda kontrole (pneumatska metrologija). Tačnost ove metode zavisi od fizičkih i strujnih karakteristika radnog fluida, geometrijskih karakteristika mlaznica i položaja čelone površine vrha izlazne mlaznice u odnosu na površinu kontrolisanog mašinskog dela. Pneumatska metrologija je našla svoju nezamenljivu primenu u kontroli kvaliteta površina mašinskih delova, naročito kod visokoserijske proizvodnje u automobilske industriji, ili tamo gde se traži velika tačnost kontrole kvaliteta izrade delova kao što je to u avio industriji. Primene pneumatske metrologije su brojne, i to za kontrolu spoljašnjih i unutrašnjih mera, paralelnosti, cilindričnosti ili konusnosti površina, mašinskih delova jednostavne ili složene geometrije. Detalji navedenih primena mogu se naći kod proizvođača pneumatskih metroloških sistema, npr. kod jedne od vodećih firmi iz ove oblasti – francuske firme „ETAMIC“, (<http://www.etamic.com>). Princip rada pneumatske metrologije je zasnovan na činjenici da kod mlaza komprimovanog vazduha koji udara u čvrstu pregradu, pritisak zavisi od rastojanja δ između mlaznice i zida kontrolisanog komada, s tim što se pri primeni koristi samo linearni deo krive $p(\delta)$. Nagib linearnog dela krive definiše pneumatsku osetljivost, koja predstavlja veoma važnu karakteristiku pneumatskog komparatora.

Uobičajeno je da se za pneumatsku kontrolu koristi diferencijalni pneumatski uređaj, koji ima mernu i regulacionu granu, čiji je princip rada dao Fortier (1950), a koji se sastoji u primeni kritičnog stišljivog strujanja vazduha koje je prisutno u grlu mlaznice A, prečnika D , merne grane, ili između mlaznice N kroz koju vazduh ističe i čvrste površine mašinskog dela koji se kontroliše. Na karakteristike pneumatskog komparatora utiču brojni parametri, i to: prečnik mlaznice u uređaju, prečnik i geometrija izlazne mlaznice, pritisak napajanja itd. Do konkretnog uticaja pojedinih veličina na kvalitet pneumatske kontrole može se doći eksperimentalno i numeričkom simulacijom. Zbog veoma malog rastojanja δ između izlazne mlaznice i zida, koje je pri realnoj primeni pneumatske metrologije manje od 500 μm , jedino je korektno meriti pritisak na zidu kontrolisanog dela i maseni protok kroz mlaznicu, Crnojevic et al (1997), tako da se eksperimentalne metode baziraju na merenju navedenih veličina. Do uticaja geometrije izlazne mlaznice na karakteristike pneumatskog komparatora dolazi se numeričkom simulacijom nestišljivog strujanja, Roy (1997) i Roy et al (2003). Za pneumatsku osetljivost je pokazano da zavisi od prečnika D mlaznice, i to tako da porast ovog prečnika smanjuje osetljivost, Crnojevic et al. (1997).

Pneumatski komparator služi za brzu kontrolu tolerancija dimenzija mašinskih delova, jednostavne ili složene geometrije, uglavnom u visokoserijskim proizvodnjama, i to do delova mikrometra, (<http://www.etamic.com>). Ključni parametar pneumatskog komparatora jeste osetljivost mernog uređaja, koja se dobija sa dijagrama promene pritiska izlaznog mlaza vazduha u funkciji udaljenosti izlazne mlaznice od kontrolisanog mašinskog dela. Tačnije, osetljivost je $S = \Delta p / \Delta \delta$, gde su Δp i $\Delta \delta$ linearni delovi dijagrama $p - \delta$, Roy et al (1994). Pneumatska osetljivost

S zavisi od brojnih parametara – prvenstveno od geometrije izlazne mlaznice, prečnika mlaznice merne glave i mlaznice merne komore, Roy et al (1994) i Crnojevic et al (1996), dok sa aspekta strujanja ključnu ulogu ima pritisak napajanja stišljivog vazduha Crnojevic et al (1995).

Geometrijska i kinematska tačnost delova energetskih sistema i tačnost njihovog međusobnog položaja direktno se reflektuju na njihovu radnu sposobnost, pouzdanosti, energetske i ekološke efikasnosti. Zato su istraživanja u cilju povećanja tačnosti kontrole i merenja geometrijskih i kinematskih karakteristika vitalnih delova energetskih postrojenja veoma značajna. U tom cilju u okviru ovog rada, predviđena su teorijska i eksperimentalna istraživanja uticaja parametara strujanja fluida i geometrije mlaznica na povećanje tačnosti kontrole primenom pneumatske metrologije.

Francuska firma („ETAMIC“) bavi se izradom diferencijalnih pneumatskih uređaja, usavršavanjem i primenom u kontroli mašinskih delova. Služe za kontrolu mašinskih delova u velikoserijskoj proizvodnji, kako spoljašnjih tako i unutrašnjih mera. Koriste se za kontrolu tolerancija dužinskih mera: visine, debljine, dubine, prečnika, promena prečnika, zbira i razlike dve ili više mera. Izrađuju uređaje za kontrolu tolerancija oblika i položaja: cilindričnosti, ovalnosti, paralelnosti, normalnosti. Izrađuju uređaje za istovremenu kontrolu više mera bilo spoljašnjih ili unutrašnjih, uređaji za aktivnu i pasivnu kontrolu, diferencijalni pneumatski uređaji rotametarskog i bolometrijskog tipa, uređaji za predprocesnu i posle procesnu kontrolu. „Etamik“ izrađuje automate za: kontrolu upravnosti spoljašnje cilindrične i čeon (bazne) površine, za kontrolu međusobnog rastojanja otvora, kontrolno selektivni automati, kontrolno sparujući automati itd. Poslednjih nekoliko godina fabrika usavršava elektro-pneumatske uređaje i merno kontrolne sisteme i merne robote.

Jedan od najvećih svetskih proizvođača mernih i kontrolnih uređaja je fabrika „Marpos“. Bavi se izradom svih vrsta merno kontrolnih uređaja pa imerno kontrolnih diferencijalnih pneumatskih uređaja. Takođe, firma „MAHR“ razvija diferencijalne pneumatske i elektropneumatske uređaje za kontrolu mašinskih delova izuzetno velikih i izuzetno malih dimenzija. „TESA“ Švajcarska firma bavi se izradom mehaničkih, optičkih, laserskih električnih, pneumatskih i elektro-pneumatskih uređaja.

U radu, u glavi 4 su postavljeni osnovi za izučavanje rada diferencijalnog pneumatskog komparatora. Određene su i prikazane raspodele pritiska na površi ravnog komada u aksijalnom i radijalnom pravcu za zadate prečnike mlaznice merne grane i izlazne mlaznice, D i d . Analizirani su uslovi u kojima se javlja skok pritiska na aksijalnoj raspodeli pritiska na površi merenog komada. Zavisnost totalnog pritiska od aksijalnog rastojanja δ izlazne mlaznice i površine mašinskih delova koji se kontroliše, $p(\delta)$ je kontinualna linija gledano makroskopski. Međutim, gledano mikroskopski ako se eksperiment radi sa manjim odmicanjem mlaznice od površine kontrolisanog komada, u jednom delu krive dobija se diskontinuitet, tj. javlja se skok pritiska. Ova pojava nastaje usled udarnog talasa. Proučavani su uslovi nastanka skoka pritiska, njegov intenzitet, vrednosti Mahovog broja i struktura mlaza vazduha između mlaznice i ravne površine. U delu u kojem je analizirana aksijalna raspodela pritiska na površini mašinskog dela koji se kontroliše, pomeranje mlaznice u odnosu na površ merenog komada je rađeno sa najmanjim korakom od 0,001 mm. Na dobijenom dijagramu je određivan pravolinijski deo dijagrama. Tražena je jednačina prave sa greškom do 1%. Određivan je uticaj pritiska napajanja p_0 i prečnika mlaznice D u mernoj komori na vrednost pneumatske osetljivosti.

U petoj glavi eksperimentalnim putem proučavan je uticaj ugla nagiba izlazne mlaznice i pritiska napajanja na pneumatsku osetljivost komparatora. U dosadašnjim istraživanjima navedeni efekti su obrađeni pri tzv. normalnim uslovima rada kada nema nagnutosti izlazne mlaznice, tj. pri uglu $\alpha=0^\circ$,

Roy et al (1994) , Crnojevic et al (1996), Crnojevic et al (1995). U odnosu na normalne uslove mogu se u praksi javiti i slučajevi kada je izlazna mlaznica postavljena pod uglom α u odnosu na kontrolisani komad, zbog eventualne greške u montaži merne grane ili istrošenosti njenih pozicionih elemenata usled dugotrajne upotrebe. Pri normalnim uslovima stišljivo strujanje u mlazu koji udara u pregradu je simetrično, dok je u slučaju nagnutosti mlaza strujanje nesimetrično i značajno složenije. Postoje proučavanja udara mlaza stišljivog fluida u nagnutu čvrstu podlogu, ali ne za potrebe pneumatske metrologije, već za neke druge primene kao npr. Crnojevic et al (1997). za: odvajanje stepena u višestepenoj raketi, pristajanje letećih objekata u svemiru, udaranje mlaza iz mlaznog motora, otkazivanje lopatice gasne turbine, lansiranje raketa sa zemlje itd. Proučavanje uticaja nagnutosti izlazne mlaznice, odnosno udara kosog mlaza, u odnosu na merni kontrolisani komad predstavlja novi efekat u proučavanju rada pneumatskog komparatora.

Vihorno strujanje je proučavano u šestom poglavlju. Ostvareno je na dva načina, umetanjem limene zavojnice u izlaznu mlaznicu M-1 i pomoću specijalno konstruisane mlaznice sa tangencijalnim ulazom vazduha. Promenom pritiska napajanja, prečnika mlaznice u mernoj komori, jačine vihora, meren je aksijalni pritisak na mernom mašinskom delu radi iznalaženja stepena tačnosti merenja mašinskog dela. Za sve parametre eksperimentalno je određivana pneumatska osetljivost uređaja. Takođe je meren pritisak na ulazu u protokomer i protok vazduha.

U poglavlju sedam proučavana je raspodela pritiska u aksijalnom pravcu za površi različitih radijusa krivine, smatrajući da je ravna površ ona koja, u teorijskom smislu, ima beskonačno veliki radijus krivine. Analize su sprovedene u zavisnosti od pritiska napajanja i dva radijusa krivine, pored ravne površi. Takođe je merena radijalna raspodela pritiska na površima zavisno od aksijalnog rastojanja mlaznice i površine. Proučavan je pritisak na površima različitih radijusa krivina u zavisnosti od ugla zakretanja i sprovedeno je njihovo poređenje.

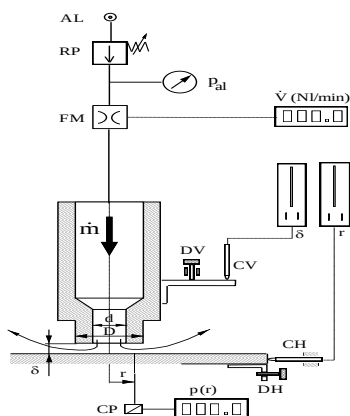
U poglavlju osam rađen je eksperiment sa posebno konstruisanim mlaznicama MH₁₅₀ i MH₂₅₀. To su mlaznice koje sa unutrašnje strane izvodnice imaju profil koji odgovara jednačini $y \cdot x = \text{const}$. Visina zaobljenog unutrašnjeg dela mlaznice je 150 μm i 250 μm . U prvom delu rada analiziran je uticaj pritiska napajanja p_0 na aksijalnu raspodelu pritiska na mašinskom delu i radijalnu raspodelu pritiska p_1 za $r=1000 \mu\text{m}$ za svako aksijalno rastojanje između merenog komada i izlazne mlaznice diferencijalnog pneumatskog komparatora. Dalje, meren je pritisak p_1 u radijalnom pravcu i protok vazduha za zadati pritisak u aksijalnom pravcu počev od 0,1 bar do 3,2 bar sa korakom 0,1 bar. U ovom delu rada je merena aksijalna raspodela pritiska za mlaznice MH₁₅₀ i MH₂₅₀ za opseg $\delta=0 \mu\text{m}$ –3000 μm . Takođe je izvršeno poređenje izmerenih vrednosti. Merena je radijalna raspodela pritiska za obe mlaznice za zadati pritisak napajanja i zadato aksijalno rastojanje δ . Meren je protok vazduha za zadato aksijalno rastojanje. Meren je pritisak u radijalnom pravcu za zadato aksijalno rastojanje na frontalnoj površini mlaznice na tri merna mesta - na sredini, uz spoljašnu i uz unutrašnju ivicu izlazne mlaznice. Zarad ovoga merenja, urađena je mlaznica sa zadatim mernim mestima.

Na kraju rada data je analiza dobijenih rezultata u vidu zaključka. Analiziran je uticaj pritiska napajanja p_0 i prečnika mlaznice u mernoj komori D na raspodele pritiska u radijalnom i aksijalnom pravcu sa odgovarajućim protocima vazduha.

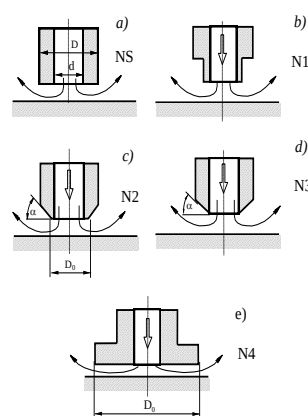
2 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Roy et al. (1994) u radu su numerički i eksperimentalno određivali uticaj geometrije vrha izlazne mlaznice na formiranje potpritiska ispod mlaznice promenom: pritiska napajanja p_0 , aksijalno odmicanje δ izlazne mlaznice od površine kontrolnog komada. Eksperimentalna instalacija, slika 2.1 za ispitivanje parametara strujanja, sastoji se od: AL kompresora sa bocama za skladištenje sabijenog vazduha, RP regulatora pritiska, FM protokomera, N izlazne mlaznice, DH i DV mikrometara za fino horizontalno i vertikalno pomeranje, CV i CH elektronskih pokazivača horizontalnog i vertikalnog pomeranja i CP elektronskog manometra. Meren je radijalan pritisak za aksijalna rastojanja $\delta=150\text{ }\mu\text{m}$ i $200\text{ }\mu\text{m}$ za pritisak napajanja $p_0=2,5, 3$ i $3,5$ bar i za pet mlaznica različite geometrije vrha, slika 2.2: NS (standardna mlaznica $D=4\text{ mm}$, $d=2\text{ mm}$ $D=2R=4\text{ mm}$ $d=2R_0=2\text{ mm}$), N1 sa smanjenom frontalnom površinom, ($D=3\text{ mm}$, $d=2\text{ mm}$), N2 delimično zakošena sa istom frontalnom površinom kao N1 mlaznica, ($D=3\text{ mm}$, $d=2\text{ mm}$, $D_0=3\text{ mm}$), N3 potpuno zakošena mlaznica sa malom frontalnom površinom ($D=4\text{ mm}$, $d=2\text{ mm}$, $D_0=d=2\text{ mm}$) i N4 sa povećanom frontalnom površinom, ($D=4\text{ mm}$, $d=2\text{ mm}$, $D_0=32\text{ mm}$). Polje pritiska ima veoma veliku ulogu u pneumatskoj kontroli.

Geometrija vrha izlazne mlaznice ima uticaj na formiranje polja pritiska na površini mernog komada, odnosno na intenzitet potpritiska ispod mlaznice. Malim modifikacijama vrha standardne mlaznice, rešava se problem eliminacije potpritiska. Mlaznica N4 ima najveću vrednost potpritiska $p_{NS} = -0,300$ bar, dok se potpuna eliminacija postiže kod mlaznice N3, $p_{N3} = 0,000$ bar. Utvrdili su da je vrednost potpritiska srazmerna veličini frontalne površine. Pritisak napajanja ima malu ulogu na intenzitet potpritiska. Povećanjem aksijalnog rastojanja smanjuje se vrednost potpritiska. Eksperiment je pokazao veliko slaganje eksperimentalnog rezultata sa numeričkim modelom.



Slika. 2.1. Merna instalacija



Slika. 2.2. Geometrija izlaznih mlaznica

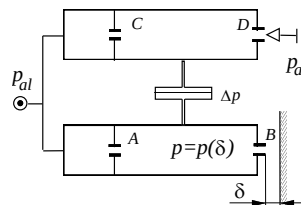
Crnojevic i drugi (1996) bavili su se problemom merenja pritiska na površini mernog mašinskog dela, promene pritiska napajanja p_0 . Pneumatski komparator, koji služi za veoma

preciznu kontrolu dimenzija, ima dve grane, jedna u kojoj je pritisak konstantan, referentna grana i druga u kojoj se pritisak menja u funkciji merene visine, merna grana. Razlika ovih pritisaka daje odstupanje merene veličine-visine u odnosu na referentnu vrednost. Na ulazu u mernu i/ili referentnu granu nalazi se konvergentno-divergentni mlaznik u čijem grlu je sonično strujanje vazduha, i koji zajedno sa komorom merne i/ili referentne grane čini jedno naglo proširenje u kome je dozvučno stišljivo strujanje. Na ulazu u naglo proširenje stvara se vrtložna zona u kojoj su prisutne značajne promene pritiska. Kako se iz industrijskih razloga traži da su dimenzije pneumatskog komparatora što manje, to se u razmatranom slučaju ne mogu ispoštovati u literaturi dobro poznati položaji mernih mesta za pritisak a koji zahtevaju dovoljno velika udaljenja posle naglog proširenja. Merodavni pritisci, koji govore o dimenziji kontrolisanih mašinskih delova, moraju se meriti upravo u vrtložnim zonama, a što znači da pulzacije pritiska iz vrtložnih zona izazivaju oscilacije merene veličine.

Da bi ispitali uticaj pulzacija merenog pritiska na odstupanje kontrolisane dimenzije vršili su laboratorijska merenja pulzacija pritiska pri različitim geometrijama naglog proširenja, pritiscima napajanja, protocima vazduha i položajima mernih mesta za pritisak. Promenu geometrije naglog proširenja vršili su promenom prečnika ulaznog konvergentno-divergentnog mlaznika (od 0,5 mm do 1,7 mm) i merne komore (od 4 mm do 8 mm). Merenje pulzacija pritiska vršili su davačima pritiska a njihov zapis jednim sistemom za akviziciju podataka.

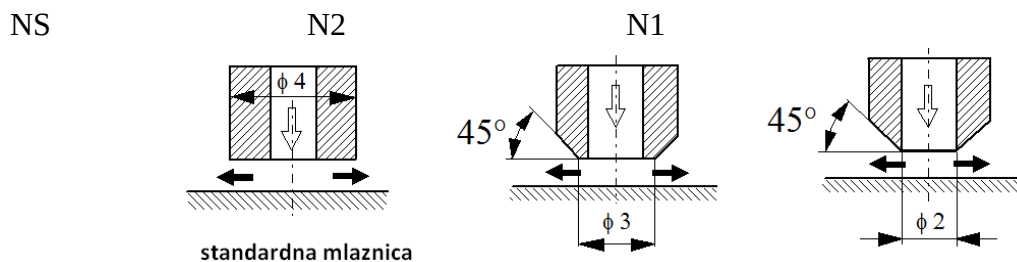
Rezultati merenja pokazuju da pulzacije pritiska rastu sa porastom protoka i da se sa promenom mikro geometrije naglog proširenja intenzitet pulzacija pritiska može značajno smanjiti. Dobijeni rezultati merenja daju odgovor gde se u datim uslovima geometrije naglog proširenja nalaze optimalni položaji mernih mesta.

Crnojevic i drugi (1997) u eksperimentu su merili aksijalni i radijalni pritisak na površini mašinskog dela primenom diferencijalnog pneumatskog manometra sa mernom i referentnom komorom (Fortier (1950)), slika 2.3.



Slika 2.3. Fortierov diferencijalni pneumatski uređaj

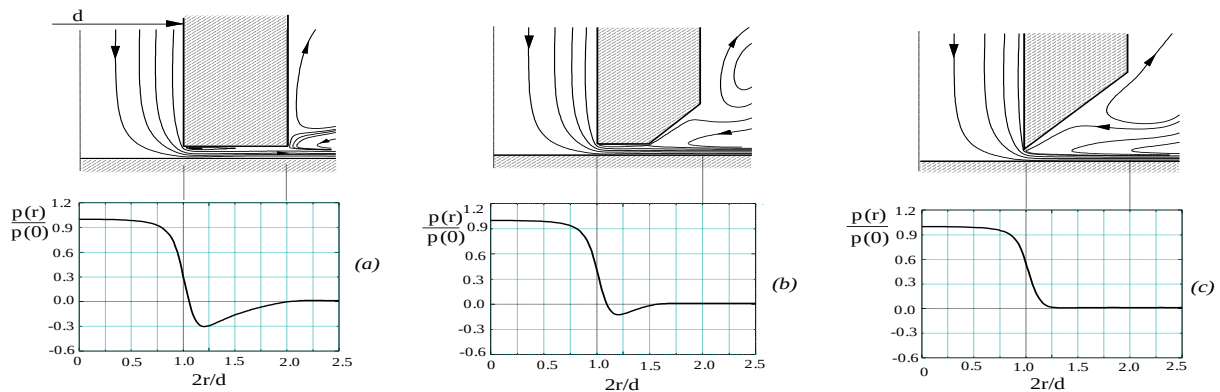
Merenje radijalnog pritiska su sprovedena da bi se utvrdio nastanak, kao i intenzitet potpritiska koji u ovom slučaju nastaje. Za stalni pritisak napajanja p_0 menjali su aksijalno rastojanje mlaznice od merne površine δ . Analizirali su uticaj pritiska napajanja p_0 , na veličinu potpritiska, za jedno aksijalno rastojanje mlaznice δ . Eksperiment su radili sa standardnom izlaznom mlaznicom NS, delimično N2 i potpuno zakošenim N1 slika 2.4.



Slika 2.4. Geometrija izlaznih mlaznica

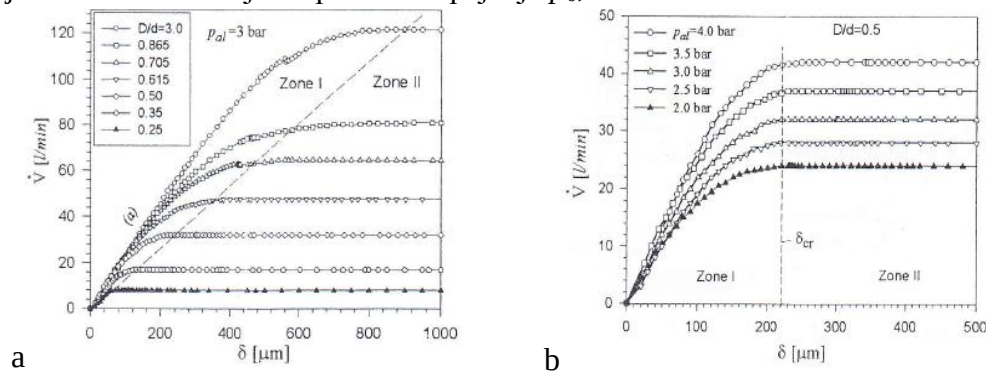
Radi analize pneumatske osetljivosti, merili su pritisak $p=p(\delta)$ u aksijalnom pravcu za odgovarajuće vrednosti pritiska napajanja p_0 i prečnike prigušnica u mernoj komori D/d . Ovim eksperimentom utvrđen je i skok pritiska koji pri tome nastaje. Analizirali su uticaj pritiska napajanja i veličine prečnika prigušnice na zapreminski protok vazduha i brzinu strujanja vazduha između izlazne mlaznice i površine mašinskog dela, u mikrokkanalu za mlaznice NS, N1 i N2.

Rezultati merenja radijalanog pritiska pokazuju da se vrednost potpritiska smanjuje sa povećanjem aksijalnog rastojanja δ izlazne mlaznice, a da je uticaj pritiska napajanja na veličinu potpritiska mali, za jedno aksijalno rastojanje i jedan prečnik mlaznice D u mernoj komori. Geometrija vrha mlaznice utiče na intenzitet potpritiska. Eksperimentom su pokazali na radijalnom dijagramu, slika 2.5 da za isto aksijalno rastojanje i isti pritisak napajanja za mlaznicu potpuno zakošene sa spoljašnje strane N1 nema potpritisk na mernom mašinskom delu. Za standardnu mlaznicu NS, najveći je potpritisk na mašinskom delu, slika 2.5 a.



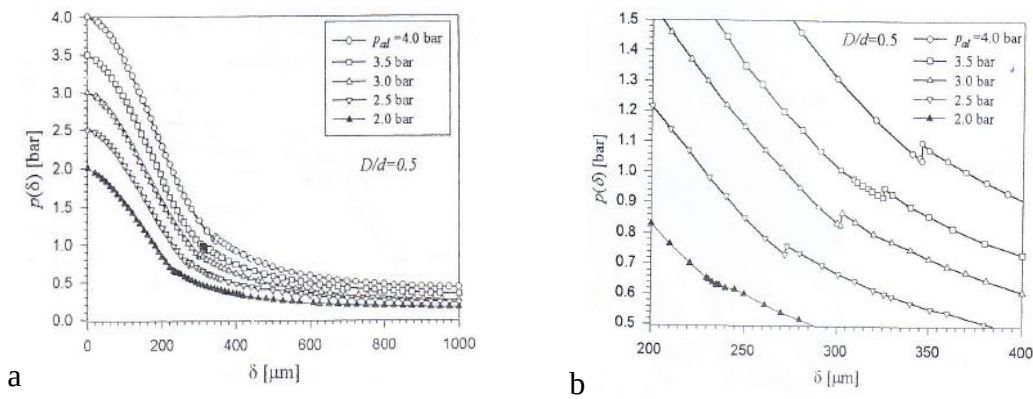
Slika 2.5. Radijalna raspodela pritiska na ravnoj površini za mlaznice NS, N1 i N2

Merenjem protoka vazduha $\dot{V}$ utvrdili su da je najveći protok za najveći prečnik mlaznice u mernoj komori D i za najveći pritisak napajanja p_0 , slika 2.6.



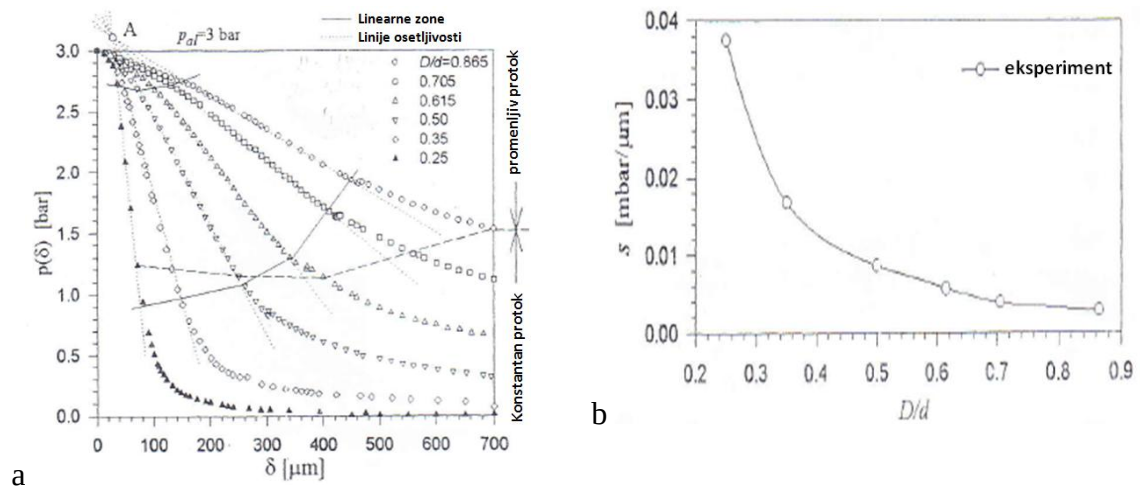
Slika 2.6. Protok vazduha: a) $p_0=3$ bar i različite vrednosti prečnika mlaznice u mernoj komori i b) $p_0 \neq \text{const}$, $D/d=0,5$ mm

Na aksijalnom dijagramu $p=p(\delta)$ određivali su uslove nastanka skoka pritiska. Skok pritiska je proporcionalan pritisku napajanja p_0 , slika 2.7. Većem pritisku napajanja odgovara veće aksijalno rastojanje δ mlaznice i površine mernog komada na kome se javlja skok pritiska.



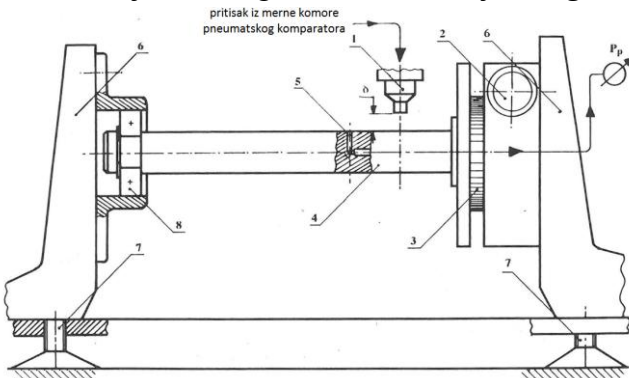
Slika 2.7. a) Skok pritiska za $p_0 \neq \text{const}$ b) uvećan deo dijagrama skoka pritiska

Utvdili su da je pneumatska osetljivost proporcionalna pritisku napajanja i smanjenju prečnika prigušnice D slika 2.8.

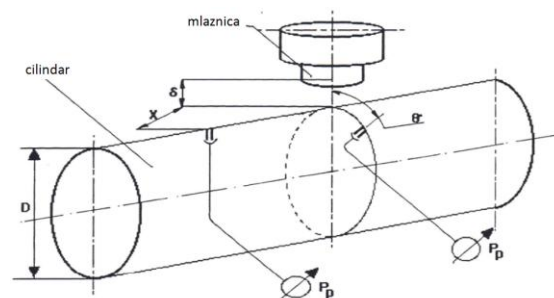


Slika 2.8. a) Pravolinijski deo dijagrama $p=p(\delta)$ za $p_0=3$ bar i $D/d \neq \text{const}$
b) Zavisnost pneumatske osetljivosti S od prečnika prigušnice u mernoj komori D

Betahar A. (1993) radio je doktorsku tezu iz oblasti primene pneumatske metrologije kako na ravne tako i na cilindrične površine mašinskih delova. Primena na cilindrične delove je komplikovana jer merno mesto je definisano u prostoru sa tri dimenzije: x - radijalno pomeranje mlaznice, δ – aksijalno pomeranje mlaznice i $\varnothing$ ugaono zakretanje cilindra na kome se nalazi merno mesto. Na slikama 2.9, i 2.10, prikazana je eksperimentalna instalacija, na kome je cilindar prečnika $D=7,5$ mm koji ima mogućnosti zakretanja za ugao $\varnothing$.



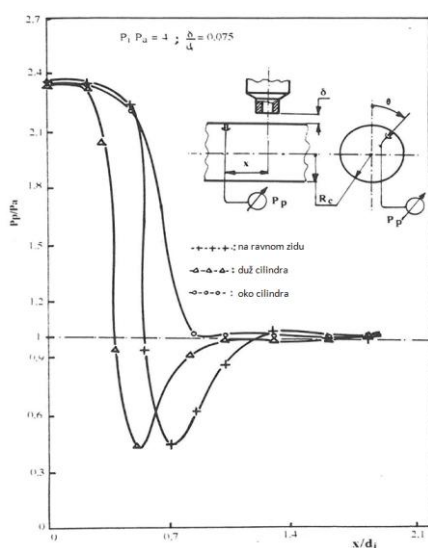
Slika. 2.9. Instalacija za merenje pritiska na cilindričnoj površini



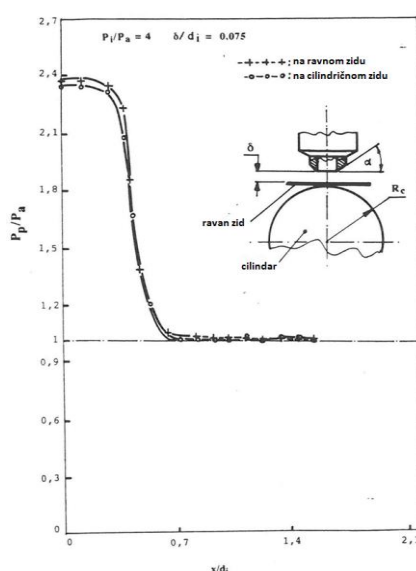
Slika. 2.10. Radijalno i aksijalno pomeranje mlaznice i ugaono zakretanje cilindra

Merno mesto je na cilindričnom radnom predmetu. Eksperiment je rađen sa: standardnom, delimično zakošenom sa spoljašnje strane, potpuno zakošenom i udubljenom mlaznicom. Meren je pritisak na ravnoj i cilindričnoj površini. Na cilindričnoj površini meren je pritisak duž cilindra i oko cilindra za neki ugao $\varnothing$. Pokazano je, slika 2.11, da sa radijalnim odmicanjem mlaznice, pritisak na cilindričnom mašinskom delu naglo počinje da opada za manje vrednosti x u odnosu na pritisak na cilindru i okolo cilindra. Smanjenje pritiska na ravnoj površini i pritiska oko cilindra nastaje za skoro isto radijalno rastojanje x . Najmanja vrednost r_{01} je za pritisak na cilindričnoj površini a najveća za pritisak okolo cilindra. Vrednost r_{02} je manja za pritisak na cilindričnoj površini u odnosu na ravnu površinu. Pritisak okolo cilindra je za svako radijalno odmicanje pozitivan. Najniži pritisak je $p_{\min}=0,450$ bar za cilindričnu i ravnu površinu, s tim što $r_{\min}$ manje za cilindričnu površinu. Poređenjem dijagrama $p=p(x)$ za ravnu i cilindričnu površinu, slika 2.12, vidi se da su vrlo slični, eliminisana je oblast potpritiska.

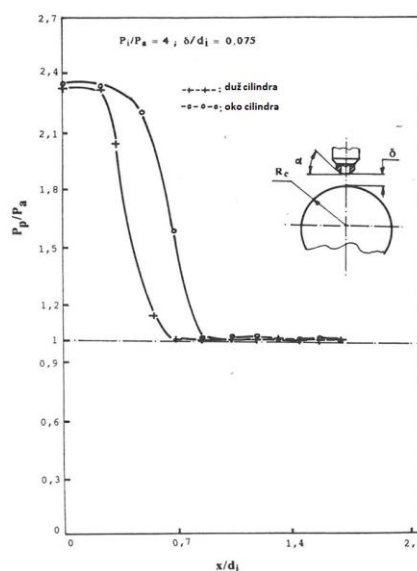
Poređenjem pritiska na cilindričnoj površini, slika 2.13, duž i okolo cilindra, utvrđeno je, da pritisak duž cilindrične površine, za manje vrednosti radijalnog pomeranja x počinje naglo da se smanjuje. Pritisci nemaju negativnu vrednost, s tim što je r_{01} manje za pritisak na cilindričnoj površini.



Slika 2.11. Poređenje pritiska $p=p(x)$ na ravnoj i cilind. površ. i pritiska za ugaono zakretanje $\varnothing$



Slika. 2.12. Poređenje pritiska $p=p(x)$ na ravnoj i cilindričnoj površini za zakošenu mlaznicu



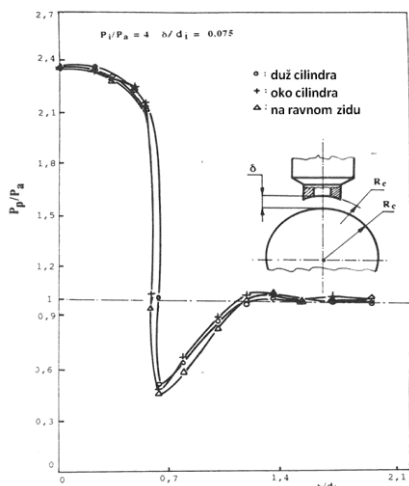
Slika. 2.13. Poređenje pritiska $p=p(x)$ sa pritiskom $p=p(\varnothing)$ na cilindričnoj površini za zakošenu mlaznicu

Eksperiment je rađen sa izlaznom mlaznicom čiji je vrh zakošen sa unutrašnje strane radi smanjenja uticaj trodimenzionalnosti. Poređenje dijagrama pritiska na ravnoj i cilindričnoj površini $p=p(x)$ i pritiska okolo cilindrične površine $p=p(\varnothing)$, za $\delta=150 \mu\text{m}$, dat je na slici 2.14. Dobijeni dijagrami su slični. Približno su jednaki svi elementi dijagrama: r_0 , r_1 , $r_{\min}$, r_2 i $p_{\min}$ a karakterističan je veliki potpritisak.

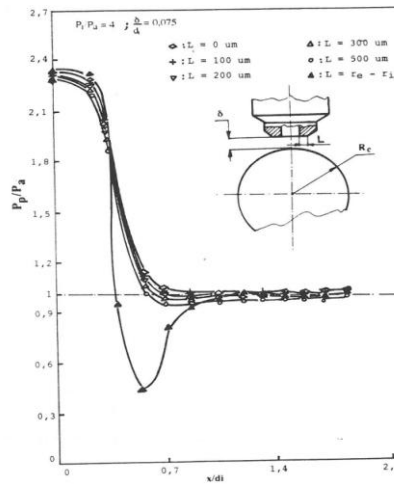
Eksperiment je rađen sa delimično zakošenom mlaznicom pod uglom $\alpha=45^\circ$ sa spoljašnje strane, promenljive frontalne površine. Frontalna površina je data dužinom zakošenja L . Eksperiment je rađen u cilju da se vidi za koje vrednosti L isčezava potpritisak, a rađen je sa šest mlaznica različite dužine $L=0 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ i $1000 \mu\text{m}$. Ova zadnja vrednost je standardna mlaznica bez zakošenja bočne ivice $L=r_e-r_i=1000 \mu\text{m}$. Došli su do zaključka da povećanjem

frontalne površine povećava se potpritisak na mernom komadu, slika 2.15. Kao što je ranije pokazano potpritisak isčezava za $L=0 \mu\text{m}$. Za sve ostale vrednosti frontalne površine, potpritisak je mali sem za $L=1000 \mu\text{m}$ gde je $p=-0,450 \text{ bar}$.

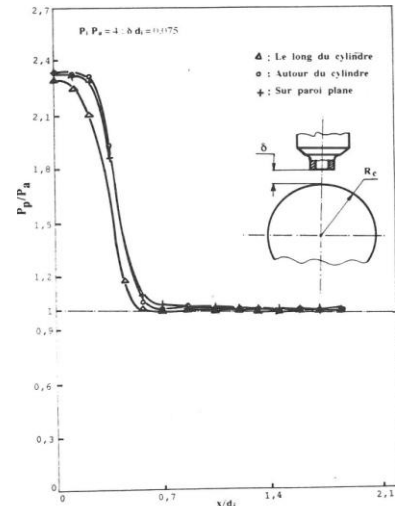
Isti eksperiment su radili sa suženom mlaznicom, tj mlaznicom čiji je spoljašnji prečnik $d_e=2,6 \text{ mm}$ a unutrašnji je isti $d_i=2 \text{ mm}$. Debljina zida je $L=300 \mu\text{m}$. Ovako tanka mlaznica sa malom frontalnom površinom skoro da nema primenu u pneumatskoj metrologiji sem za neka posebna merenja i u eksperimentalne svrhe. Dijagram pritiska duž cilindra na maloj dužini ima konstantan pritisak p_0 i radijalnim pomeranjem mlaznice pritisak naglo pada. Pritisak je pozitivan za $0 \leq x \leq 1000 \mu\text{m}$. Krive pritiska oko cilindra i za ravnu površinu su slične, skoro da se poklapaju slika 2.16.



Slika. 2.14. Poređenje $p=p(x)$ sa pritiskom $p=p(\delta)$ na cilindričnoj površini za udubljenu mlaznicu

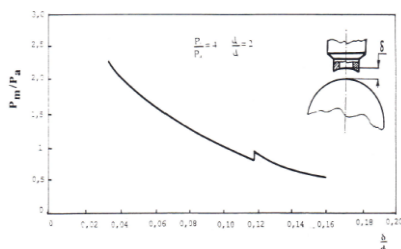


Slika. 2.15. Poređenje pritiska $p=p(x)$ na ravnoj i cilindričnoj površini za zakošenu mlaznicu za različitu frontalnu površinu

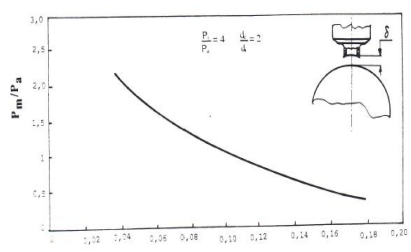


Slika. 2.16. Poređenje pritiska $p=p(x)$ sa pritiskom $p=p(\delta)$ na cilindričnoj površini za suženu mlaznicu

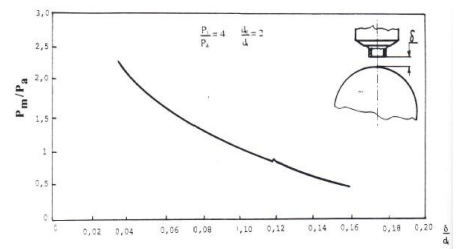
Kao kod krive pritiska $p=p(\delta)$ na ravnoj površini, i na krivoj pritiska na cilindričnoj površini javlja se diskontinuitet pritiska – skok pritiska. Skok pritiska se javlja kod udubljene mlaznice, slika 2.17, prečnik zaobljenja r_c za $\delta=220 \mu\text{m}$ i pritisak napajanja $p_0=4 \text{ bar}$. Potpuna eliminacija diskontinuiteta se dobija kada se tanka mlaznica zakosi sa unutrašnje strane, slika 2.18. Smanjenje diskontinuiteta se postiže koristeći tanku mlaznicu za $d_e=2,6 \text{ mm}$, $L=300 \mu\text{m}$. Mali diskontinuitet se javlja na $\delta=240 \mu\text{m}$, slika 2.19.



Slika 2.17. Aksijalni dijagram pritiska za udubljenu mlaznicu



Slika 2.18. Aksijalni dijagram pritiska za udubljenu tanku mlaznicu

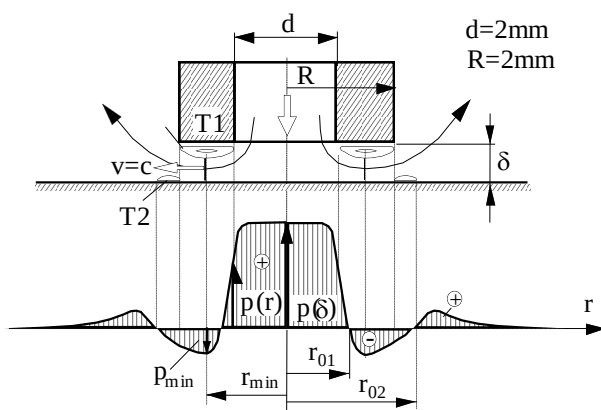


Slika 2.19. Aksijalni dijagram pritiska za tanku mlaznicu

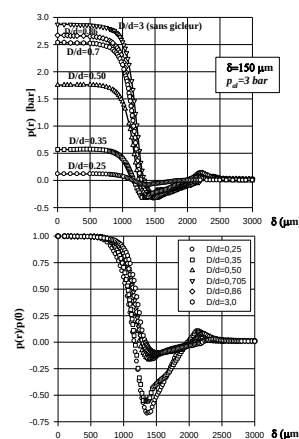
Roy G., Crnojevic C., i drugi (1995) bavili su se istraživanjem radijalnog strujanja fluida između dve koaksijalne površine. Inače ovo je oblast mnogih istraživačkih aktivnosti iz oblasti

mehanike fluida, u poslednjih nekoliko decenija. Međutim, istraživanje njene primene u pneumatskoj metrologiji je skoro zanemariva. Pneumatska kontrola se počela razvijati od 1928. u francuskoj u firmi Solex. U radu su istraživali strujanje vazduha eksperimentalno i numeričkom metodom.

Crnojevic i drugi (1995) eksperimentisali su sa izlaznom standardnom mlaznicom mereći radijalni i aksijalni pritisak na ravnoj površini, menjajući pritisak napajanja $p_{al}=3$ bar i 4 bar, i prečnik mlaznice u mernoj komori D . Definisali su elemente dijagrama $p=p(r)$: r_{01} - radijalno rastojanje kada natpritisak prelazi u potpritisak, vrednost pritiska $p=0$ bar, r_{02} -radijalno rastojanje kada potpritisak prelazi u natpritisak, vrednost pritiska $p=0$ bar, r_{min} – vrednost radijalnog rastojanja za pritisak $p=p_{min}$, slika 2.20. Za pritisak napajanja $p_{al}=3$ bar, aksijalno rastojanje mlaznice $\delta=150$ μm obrađivali su polje nastanka potpritiska i način njegove eliminacije, slika 2.21. Uočava se da sa povećanjem prečnika prigušnice D , povećava se pritisak na površini mernog komada i povećavaju se svi parametri dijagrama $p=p(r)$, r_{01} , r_{02} , r_{min} i p_{min} . Eliminacija potpritiska je moguća promenom geometrije izlazne mlaznice, promenom pritiska napajanja i menjanjem odnosa D/d , što je predmet ovog rada.

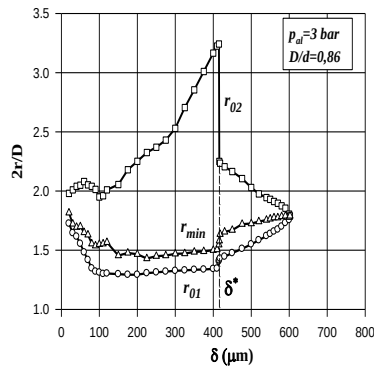


Slika. 2.20. Elementi radijalnog dijagrama

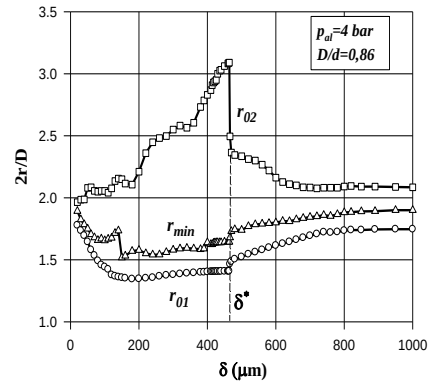


Slika. 2.21. Uticaj prečnika prigušnice na dijagram $p=p(r)$

Na slici 2.22 prikazan je dijagram promene veličina: r_{01} , r_{02} , r_{min} u zavisnosti od radijalnog i aksijalnog pomeranja. Na osnovu dobijenih rezultata proizilazi da se vrednosti r_{01} i r_{min} smanjuju za mala aksijalna rastojanja. Za $100 \mu m \leq \delta \leq 400 \mu m$ proizilazi da se vrednosti blago povećavaju, a na $\delta=400 \mu m$ postoji odgovarajući nagli porast dužine. Dalje, za $400 \mu m \leq \delta \leq 620 \mu m$ postoji porast r_{01} i r_{min} . Za $\delta \geq 620 \mu m$ ove vrednosti su $2r/D=0$. Za male vrednosti δ , r_{02} ima konstantnu vrednost, a za $100 \mu m \leq \delta \leq 420 \mu m$ se naglo povećava, da bi na $\delta=400 \mu m$ imala nagli pad. Za $400 \mu m \leq \delta \leq 620 \mu m$ proizilazi pad vrednosti do $\delta=620 \mu m$. Takođe, za dalja aksijalna odmicanja ne postoji vrednost r_{02} . Ova analiza je rađena za pritisak napajanja $p_{al}=3$ bar. Analizom dijagrama za pritisak napajanja $p_{al}=4$ bar, slika 2.23, utvrdili su da postoje vrednosti elemenata dijagrama za svako aksijalno rastojanje.

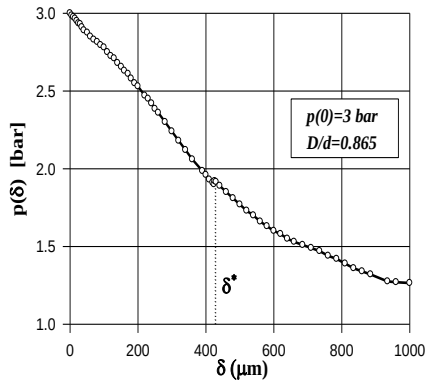


Slika 2.22. Dijagram vrednosti r_{01} r_{02} r_{min}
 $p=p(r)$ za $p_{al}=3 \text{ bar}$

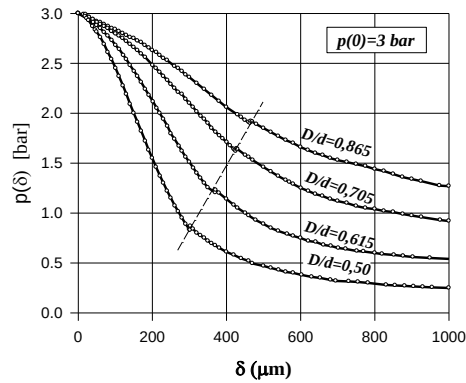


Slika. 2.23. Dijagram vrednosti r_{01} r_{02} i r_{min}
 $p=p(r)$ za $p_{al}=4 \text{ bar}$

Na osnovu slike 2.24 može se uočiti skok pritiska u intervalu $300 \mu m \leq \delta \leq 440 \mu m$ i to u oblasti koja se ne primenjuje u pneumatskoj metrologiji. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 2.25 proizilazi diskontinuitet pritiska na većoj distanci δ u odnosu na odgovarajući porast D/d .



Slika. 2.24. Dijagram pritiska u aksijalnom
pravcu $p=p(\delta)$ za $p_{al}=3 \text{ bar}$

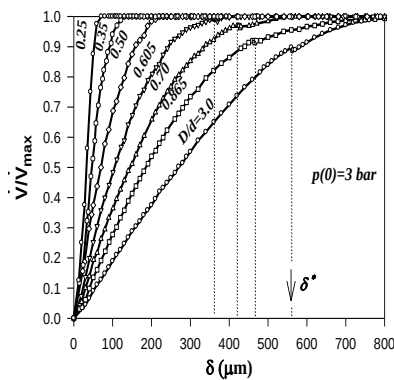


Slika. 2.25. Uticaj prečnika mlaznice D na
skok pritiska za $p_{al}=3 \text{ bar}$

Vrednost Mach-ovog broja pre i posle skoka pritiska se izračunava pomoću formula:

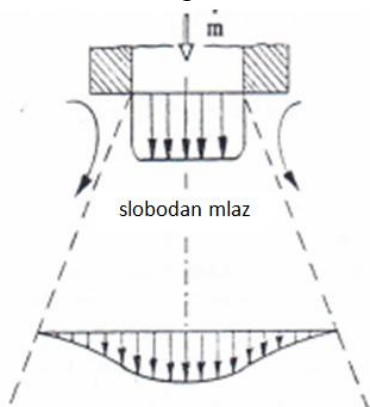
$$M_1 = \sqrt{1 + (p_2 / p_1 - 1)(\kappa + 1) / 2\kappa} ; \quad M_2 = \sqrt{1 + (p_1 / p_2 - 1)(\kappa + 1) / 2\kappa} \quad M_1 = 1,01 \text{ a } M_2 = 0,99 \quad (1)$$

Takođe je dat maksimalni protok vazduha u zavisnosti od δ za $D/d = 0,25, 0,35, 0,50, 0,605, 0,70, 0,865$ i $0,30$ i na kome se vidi da postojanje diskontinuiteta pritiska izaziva diskontinuitet protoka. Za manje odnose D/d protok vazduha brže postaje konstantan, slika 2.26.

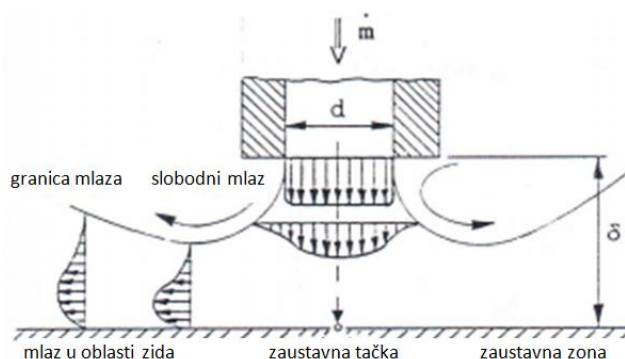


Slika. 2.26. Zapreminski protok vazduha u zavisnosti od prečnika mlaznice D i aksijalnog
rastojanja δ za $p_{al}=3 \text{ bar}$

P. Florent i C. Crnojević (1993) u radu su razmatrali dva slučaja kada: mlaz vazduha izlazi slobodno u atmosferu i kada mlaz vazduha nailazi na prepreku koja je normalna u odnosu na osu mlaznice. Kada komprimovni vazduh, izlazi kroz mlaznicu na atmosferski pritisak može imati: subsoničnu brzinu $M < 1$, soničnu $M = 1$ i super soničnu $M > 1$. Kod slobodno ističućeg vazduha, brzina strujanja vazduha je najveća na samom izlazu i jednaka je po celom profilu. Aksijalnim udaljavanjem od mlaznice brzina se smanjuje, najveća je na osi mlaznice, a smanjuje se radijalnim udaljavanjem od ose, slika 2.27. Mlaz vazduha izlazi u atmosferu i nailazi na prepreku koja je normalna u odnosu na osu mlaznice. Analizirana su tri slučaja: za $\delta \gg d$ brzina vazduha je najveća na osi i povećanjem δ se smanjuje, nailaskom na prepreku odbija se i pravi vrtložnu zonu malog zanemarivog intenziteta, slika 2.28. Drugi slučaj, $\delta > d$ smanjuje se brzina strujanja vazduha a povećava se vrtložna zona. I slučaj kada $\delta \ll d$ to je oblast primenjene pneumatske metrologije kada su aksijalna rastojanja mlaznice puno manja od unutrašnjeg prečnika mlaznice, slika 2.27. Strujanje se značajno menja, postoje vrtložne zone velikog intenziteta T_1 , T_2 , i T_3 . Kao što je poznato intenzitet vrtložnih zona zavisi od pritiska napajanja p_0 , δ i oblika vrha izlazne mlaznice. Brzina isticanja fluida i stvaranje vrtložnih zona za konstantno p_0 i δ zavisi od geometrije izlazne mlaznice. Najveća vrtložna zona je za široku mlaznicu, slika 2.29c, manja je brzina za standardnu mlaznicu, slika 2. 29b, a nema je za spolja zakošenu mlaznicu, slika 2.29a. Kritična zona, tj. zona sa najvećom brzinom strujanja nalazi se na osi i ispod mlaznice. Brzina strujanja vazduha u mlaznici je konstantna a pritisak je najveći. Izlaskom iz mlaznice brzina se naglo povećava van frontalne površine mlaznice a pritisak opada. Radijalnim udaljavanjem od ose mlaznice, pritisak i brzina se smanjuju. Mahov broj se skokovito povećava, izlaskom vazduha van frontalne površine. Najveći je na granici frontalne površine, a smanjuje se radijalnim odmicanjem od ose, slika 2.28.

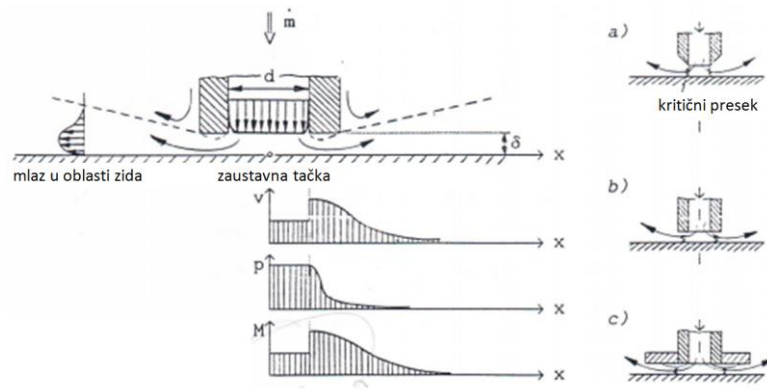


Slika 2.27. Brzina strujanja za veliku udaljenost mlaznice od zida $\delta \gg d$

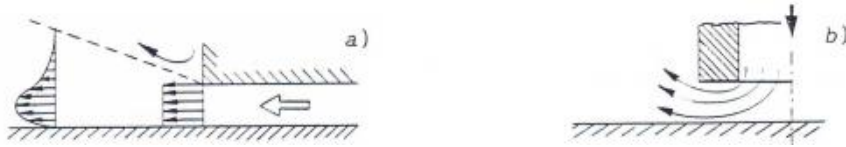


Slika 2.28. Brzina strujanja za udaljenost mlaznice od zida $\delta > d$

Na slici 2.27, predstavljeno je strujanje vazduha bez prepreke. Profil brzina se ne menja. Kada vazдушna struja nailazi na prepreku, na slici 2.30, profil brzina se menja. Ovo je slučaj kod strujanja vazduha između mlaznice i površine mernog komada i koje je prisutno u pneumatskoj metrologiji. Profil brzina se menja usled vrtložnog strujanja koje nastaje u mikrokanalu.



Slika 2.29. Brzina strujanja za malu udaljenost mlaznice od zida $\delta \ll d$



Slika 2.30. Jako mala udaljenost mlaznice od prepreke $\delta \ll d$

Na osnovu Bernulijeve jednačine (2) i jednačine kontinuiteta uz odgovarajuće zamene, dobija se brzina strujanja fluida (3).

$$\frac{p_a + p_{mo}}{p_o} + c_v T_1 + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2} = \frac{p_a + p_m}{\rho} + c_v T + \alpha \frac{v^2}{2} + \zeta \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]} / \sqrt{\alpha + \zeta - \alpha_0 \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{2/\gamma}} \quad (3)$$

Maseni protok vazduha je:

$$\dot{m} = \rho A v = A \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]}}{\sqrt{\alpha + \zeta - \alpha_0 \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{2/\gamma}}} \quad (4)$$

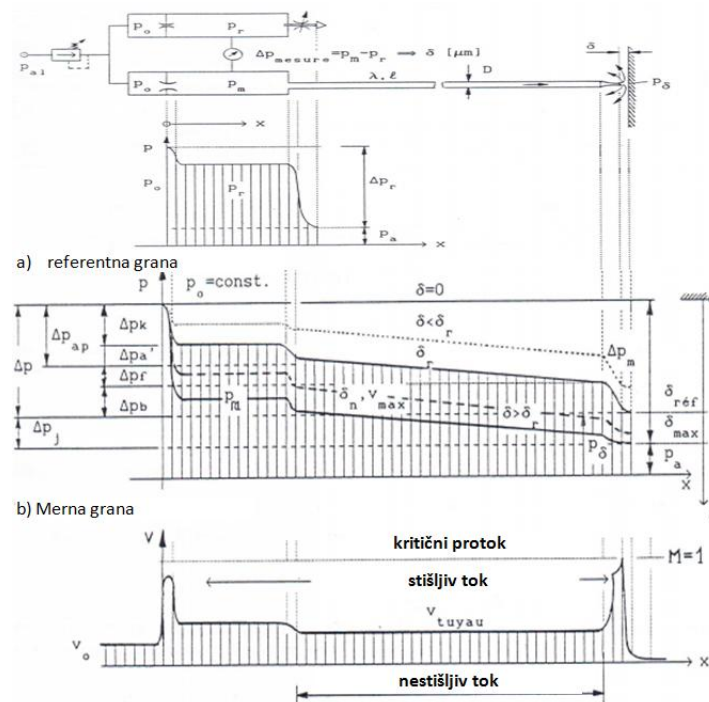
Protok vazduha napisan u drugom obliku, gde μ predstavlja koeficijent masenih gubitaka (6).

$$\dot{m} = \mu \cdot \rho_0 \cdot A \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]} \quad (5)$$

$$\mu = 1 / \sqrt{\alpha + \zeta - \alpha_0 \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{2/\gamma}} \quad (6)$$

Koeficijent protoka gasa zavisi od: koeficijenta faktora energije, koeficijenta gubitaka pritiska mlaznice, odnos prečnika i odnos pritisa. Dat je maseni protok za kritično strujanje na primeru za standardnu mlaznicu.

P. Florent i C. Crnojević (1993) merili su pad pritiska, brzinu strujanja i protok vazduha u mernoj komori i izlaznoj mlaznici, u zavisnosti od aksijalnog rastojanja mlaznice δ i površine mašinskog dela. Na ulazu u referentnu granu, slika 2.31, pritisak napajanja je p_0 , prolaskom vazduha kroz mlaznicu, pritisak pada na vrednost p_r a na izlazu referentne grane pritisak je p_a . Na ulazu u mernu granu, takođe je pritisak jednak pritisku napajanja p_0 , prolaskom kroz prigušnicu, pritisak se smanjuje usled gubitaka na p_m . U cevovodu od merne grane do izlazne mlaznice pritisak opada. U izlaznoj mlaznici zbog suženja opada pritisak na vrednost p_δ . To je pritisak koji zavisi od aksijalnog rastojanja δ . Brzina strujanja vazduha se menja tako da na ulazu u komparator ima vrednost v_0 , i to je najmanja brzina. Prolaskom kroz mlaznicu se povećava do subsonične brzine. Na izlazu iz mlaznice se naglo smanjuje a još se smanjuje prolaskom kroz cevovod. Kroz izlaznu mlaznicu brzina se naglo povećava i dostiže vrednost koja odgovara Mahovom broju $M=1$. Posle mlaznice brzina naglo opada. Gubici pritiska su u: mernoj komori Δp_m i referentnoj komori Δp_r u mlaznicama merne i referentne komore, u izlaznoj mlaznici i cevovodu izlazne mlaznice: Δp_k – gubici pritiska u mlaznici merne komore, $\Delta p_{a'}$ – gubici pritiska na ulaznoj mlaznici pneumatskog komparatora, $\Delta p_a = \Delta p_k + \Delta p_{a'}$ – ukupan pad pritiska u mernoj grani, Δp_f – gubitak pritiska u cevi od komparatora do izlazne mlaznice usled trenja, Δp_b – gubitak pritiska usled udarnog talasa, Δp_j – gubitak pritiska u mlazu vazduha.



Slika 2.31. Ukupni gubici pritiska u mernoj instalaciji

Ukupan gubitak pritiska u mernoj grani:

$$\Delta p = \Delta p_k + \Delta p_a + \Delta p_f + \Delta p_b = p_0 - p_a \quad (7)$$

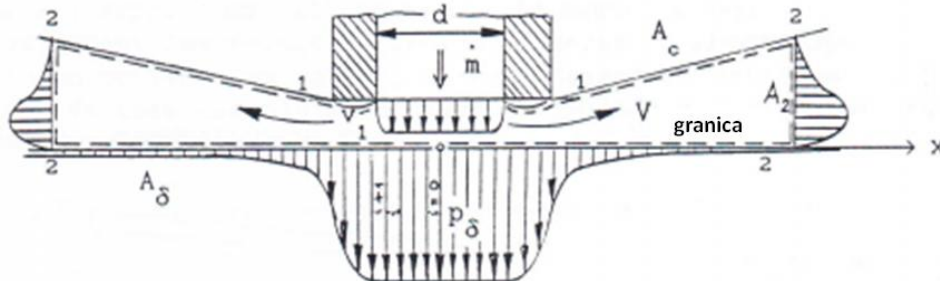
Ako nema promene pritiska napajanja, $p_0 = \text{const}$, nema ni pada pritiska $\Delta p = 0$. Gubici pritiska zavise od aksijalnog rastojanja mlaznice i površine mernog komada. Analizirali su četiri slučaja:

$\delta=0$ – nema protoka vazduha

$\delta=\delta_r$ – uslov za referentnu visinu

$\delta>\delta_r$ ili $\delta_r>\delta$ – radni uslovi komparatora za pravolinijski deo dijagrama

$\delta>>\delta_r$ – nisu uslovi za kontrolu, merni komad je udaljen od izlazne mlaznice i tada je najveći protok.



Slika 2.32. Raspored pritiska na površini mernog dela

Ispod mlaznice, slika 2.32, na celom prečniku d , pritisak p_δ je maksimalan. Pritisak se smanjuje povećanjem radijalnog rastojanja r . Pritisak naglo opada na delu $d/2 \leq r \leq D/2$, tj ispod referentne površine, a na delu $D/2 \leq r$, pritisak postepeno opada. Na velikom udaljenju od ose pritisak p_δ je minimalan. Pritisak se smanjuje udaljavanjem od ose mlaznice. Najveći pritisak je na $1/3 \delta$ od površine mašinskog dela. Reaktivna sila mlaza zavisi od: pritiska, površine poprečnog preseka, brzine strujanja vazduha i stvarnog masenog protoka.

Gilles Roy (1997) je radio doktorsku disertaciju u oblasti pneumatske metrologije, izučavajući strujanje stišljivog i nestišljivog fluida između mlaznice i ravne površine. Rezultate dobijene eksperimentom poredio je sa teoretskim rezultatima koji su dobijeni numeričkim metodama. Merio je aksijalnu brzinu strujanja vazduha duž ose mlaznice w , normalno na osu mlaznice radijalnu brzinu u zavisno od aksijalnog rastojanja izlazne mlaznice i površine mernog mašinskog dela. Merio je brzinu u proširenom i suženom delu mlaznice kao i u mikrokanalu zavisno od Reynoldsovog broja i aksijalnog rastojanja δ . Eksperimentalno je merio aksijalni $p(\delta)$ i radijalni pritisak $p(r)$ na površini mernog komada u zavisnosti od aksijalnog rastojanja δ , pritiska napajanja p_0 , prečnika prigušne mlaznice D i geometrije vrha izlazne mlaznice. Za tu svrhu koristio je mlaznice: promenljivog zaobljenja sa spoljašnje strane, promenljivog zaobljenja sa unutrašnje strane, promenljivog zakošenja sa spoljašnje i promenljivog zakošenja sa unutrašnje strane, promenljive debljine zida vrha mlaznice, promenljive frontalne površine vrha mlaznice. Za definisanja strujanja neviskoznog fluida, primenjuju se jednačine mehanike fluida.

Diferencijalna jednačina za definisanje strujanja fluida u radijalnom pravcu,

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right] \quad (8)$$

diferencijalna jednačina za definisanje strujanja fluida u aksijalnom pravcu,

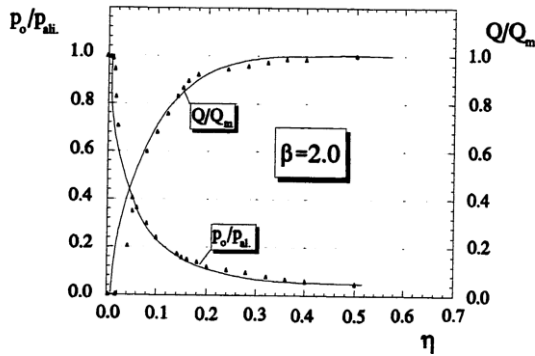
$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (9)$$

i jednačina kontinuiteta,

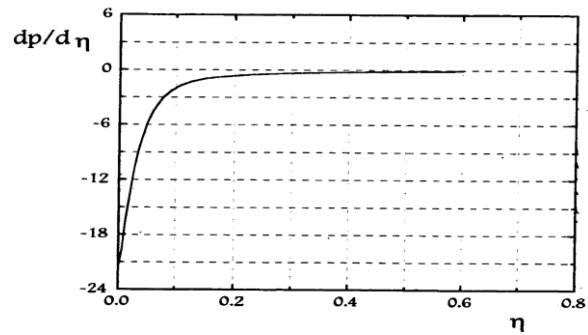
$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(rw)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Eksperiment je radio na diferencijalnom pneumatskom uređaju, mlaznicama različite geometrije vrha, menjajući vrednost Reynoldsovog broja Re , rastojanje $\eta = \delta/R_i$, frontalnu površinu $\beta = R_e/R_i$, visinu mlaznice $\lambda = h/R_i$, širinu mlaznice $\beta_d = R_d/R_i$ i pritisak napajanja p_{am} .

Došao je do rezultata da povećanjem aksijalnog rastojanja povećava se protok vazduha Q a pritisak se smanjuje, slika 2.33. Povećanjem aksijalnog rastojanja δ smanjuje se priraštaj pritiska, slika 2.34.

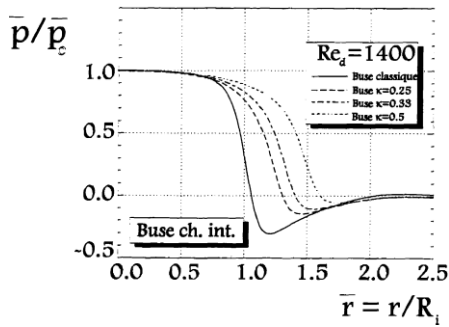


Slika 2.33. Uticaj veličine frontalne površine β na pritisak na ravnoj površini za mlaznicu bez nagiba

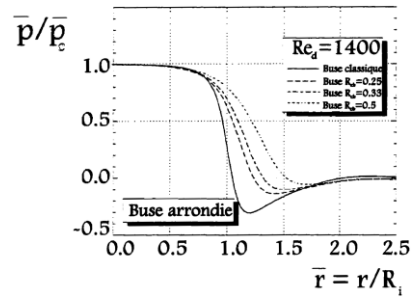


Slika 2.34. Uticaj veličine ugla nagiba α na pritisak na ravnoj površini

Potpritisak se smanjuje povećanjem unutrašnjeg zakošenja k i veličine zaobljenja sa unutrašnje strane R_{cb} , i aksijalno se udaljava od ose mlaznice, slika 2.35 i slika 2.36.

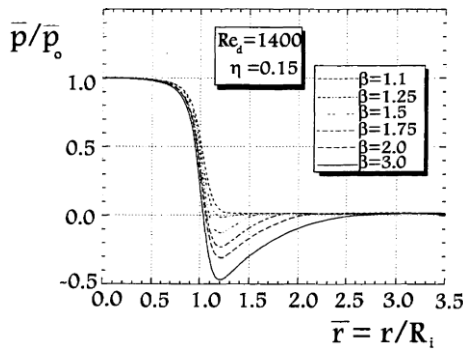


Slika 2.35. Pritisak na ravnoj površini za zakošenu mlaznicu sa unutrašnje strane

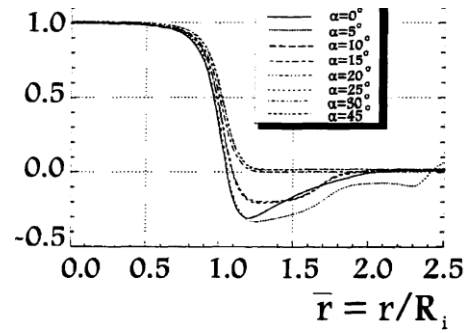


Slika 2.36. Pritisak na ravnoj površini za zaobljenu mlaznicu sa unutrašnje strane

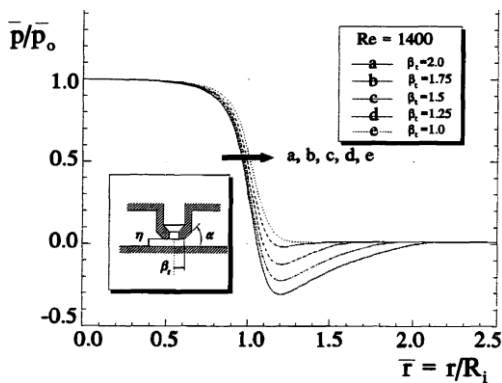
Utvrдио je da se pritisak i potpritisak smanjuju smanjenjem frontalne širine za mlaznice bez nagiba, slika 2.37. Takođe se smanjuje pritisak i potpritisak smanjenjem frontalne površine za zakošene mlaznice, slika 2.38 i 2.39. Poređenjem eksperimentalnih i numeričkih rezultata dato je na slici 2.38 i vidi se da se rezultati približno isti.



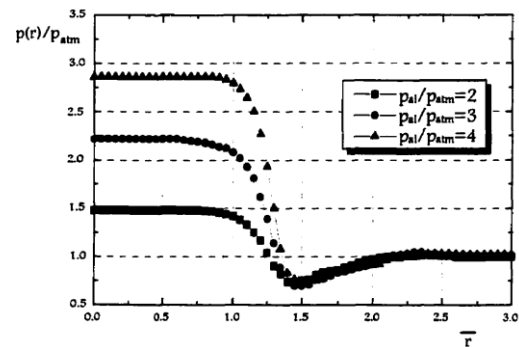
Slika 2.37. Uticaj veličine frontalne površine β na pritisak na ravnoj površini za mlaznicu bez nagiba



Slika 2.38. Uticaj veličine ugla nagiba α na pritisak na ravnoj površini



Slika 2.39 Uticaj veličine frontalne površine β_i na pritisak na ravnoj površini za mlaznicu sa nagibom

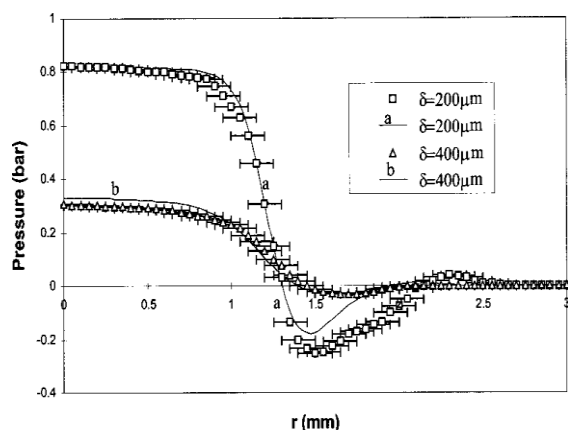


Slika 2.40 Uticaj pritiska napajanja p_{am} na pritisak na ravnoj površini

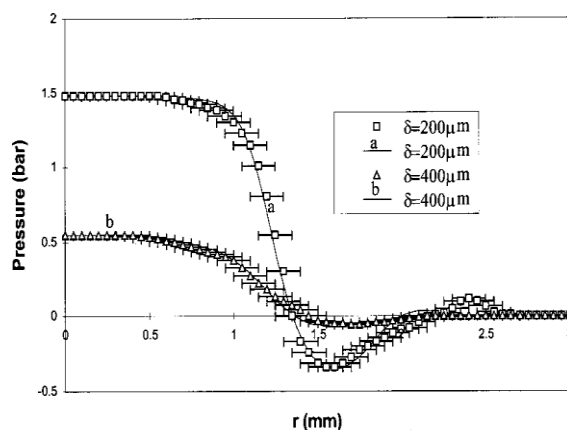
Zaključio je da povećanjem pritiska napajanja p_{am} , povećava se radijalni pritisak ali se ne smanjuje veličina potpritiska, slika 2.40.

S. C. M. Yu et al. (2000) radili su numeričku simulaciju strujanja vazduha kroz izlaznu mlaznicu pneumatskog komparatora metodom konačnih razlika. Ova studija razmatra promene brzine i pritiska oko mlaznice kao i mlaz koji udara u ravnu prepreku. Rad analizira uticaj geometrije izlazne mlaznice na karakter strujanja vazduha. U radu su poređeni numerički rezultati sa eksperimentalnim rezultatima koje su dobili grupa autora (Crnojevic, C., Roy, G., Bettahar, A., and Florent, P., "The Influence of the Regulator Diameter and Injection Nozzle Geometry on the Flow Structure in Pneumatic Dimensional Control Systems," ASME J. Fluids Eng., 119,23). Istraživanje je sprovedeno sa menjanjem dimenzija vrha izlazne mlaznice. Želja autora je bila da se izborom odgovarajućeg vrha izlazne mlaznice, eliminiše potpritisak na mernom komadu. Ugao nagiba divergentne mlaznice je menjan od 0° – 25° . Takođe je bio cilj autora, da se povoljnim izborom vrha mlaznice, pritiska napajanja, dobija najveća pneumatska osetljivost pneumatskog uređaja.

Na slikama 2.41 i 2.42 dato je poređenje pritiska koji je dobijen eksperimentom sa pritiskom dobijenim numeričkom simulacijom za pritisak napajanja $p_{al}=2$ bar i 3 bar i aksijalno rastojanje $\delta=200\ \mu\text{m}$ i $400\ \mu\text{m}$. Evidentno je poklapanje rezultata za $p_{al}=3$ bar za svako radijalno pomeranje. Kod rezultata za $p_{al}=2$ bar postoji odstupanje krivih za $\delta=200\ \mu\text{m}$ u oblasti potpritiska.



Slika. 2.41. Poređenje pritiska na mernom komadu dobijenog eksperimentom i numeričkom simulacijom za $p_{al}=2$ bar



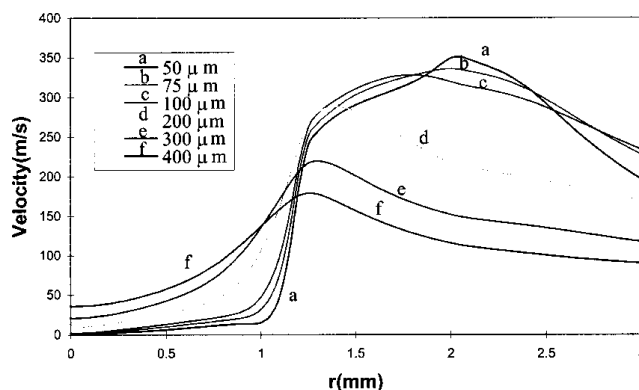
Slika. 2.42. Poređenje pritiska na mernom komadu dobijenog eksperimentom i numeričkom simulacijom za $p_{al}=3$ bar

Smer kretanja strujnica dat je na slici 2.43, gde se uočava oblast vrtložnog strujanja i to ispod mlaznice, na zidu vrha mlaznice i na mernom mašinskom delu.

Simulacija brzine strujanja vazduha u kritičnoj zoni data je na slici 2.44 za aksijalno rastojanje $\delta=75 \mu\text{m}$; $100 \mu\text{m}$; $200 \mu\text{m}$; $300 \mu\text{m}$ i $400 \mu\text{m}$. Može se zaključiti da je brzina mala ispod mlaznice i naglo se povećava kada izađe iz kritične zone. Najveće brzina je za $\delta=50 \mu\text{m}$. Povećanje aksijalnog rastojanja δ , izaziva smanjenje brzina strujanja vazduha.



Slika. 2.43. Simulacija strujnica vazduha oko i ispod mlaznice



Slika. 2.44 Brzine strujanja vazduha u kritičnoj zoni u zavisnosti od δ

Rezultati poređenja protoka vazduha dobijenih eksperimentom i simulacijom za pritisak napajanja $p_{al}=3$ bar, poklapaju se za manje aksijalno rastojanje. Pri većim rastojanjima dolazi do malih odstupanja i ono se povećava povećanjem δ .

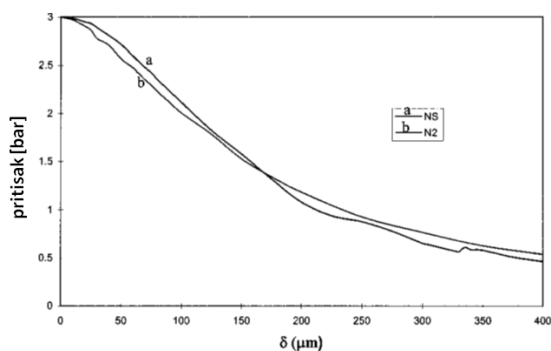
U radu je analiziran uticaj pritiska napajanja p_{al} na stvaranje zone potpritiska, za uslove $\delta=200 \mu\text{m}$, a prečnik mlaznice $D=1$ mm. Najveća zona potpritiska je za najveći pritisak napajanja p_{al} .

Posebno su analizirali uticaj oblika vrha mlaznica na pritisak na površini mernog komada, za uslove $\delta=200 \mu\text{m}$, prečnik mlaznice $D=1$ mm $p_{al}=3$ bar. Kod konvergentnih mlaznica, slika 2.46a, mala je razlika pritiska na površini mernog komada. Najveći potpritisak je za standardnu mlaznicu NS, a najmanji za N2, slika 2.45. Pri istim uslovima, kod konvergentnih mlaznica veća je razlika u pritiscima, slika 2.46b. Mlaznica INV N2 je bez frontalne površine, a pritisak je pozitivan za svako rastojanje r .

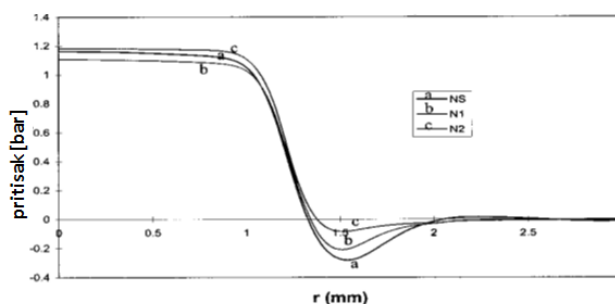
Numerička simulacija diskontinuiteta pritiska, slika 2.47, pokazuje da se skok pritiska javlja kod standardne mlaznice NS, za uslove $\delta=200 \mu\text{m}$, prečnik mlaznice $D=1 \text{ mm}$, $p_{a1}=3 \text{ bar}$ za aksijalno rastojanje $\delta=340 \mu\text{m}$.

Glava mlaznice	opis
	(a) Naziv: NS Standardna mlaznica
	(b) Naziv: N1 Mlaznica sa kosim ivicama (45°) i malom frontalnom površinom
	(c) Naziv: N2 Mlaznica sa kosim ivicama (45°) bez frontalne površine
	(d) Naziv: INV N1 Izlaz divergentnog oblika (45°) sa malom frontalnom površinom
	(e) Naziv: INV N2 Izlaz divergentnog oblika (45°) bez frontalne površine
	(f) Naziv: TIP Izlaz divergentnog oblika sa kosim ivicama (45°) bez frontalne površine

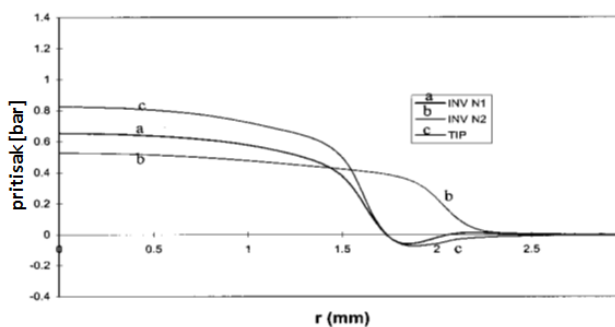
Slika. 2.45. Oblici vrha izlazne mlaznice



Slika. 2.47. Simulacija nastanka diskontinuiteta pritiska

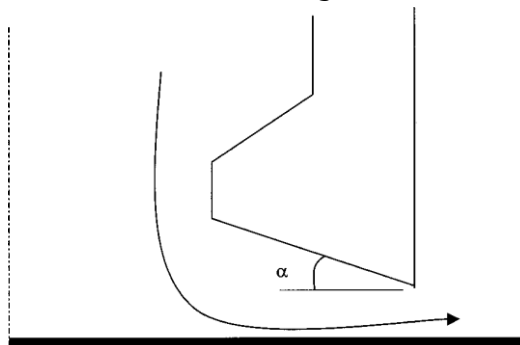


a



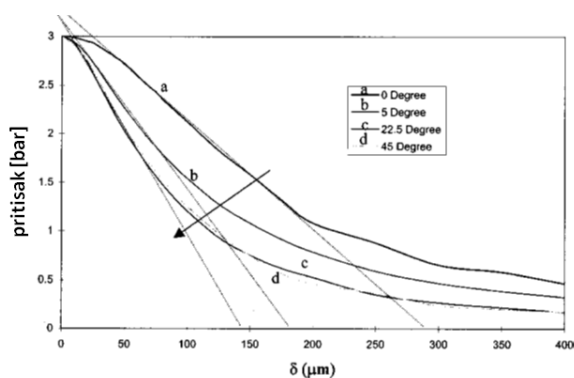
b

Slika. 2.46. a - pritisak za konvergentne mlaznice, b- za divergentne mlaznice

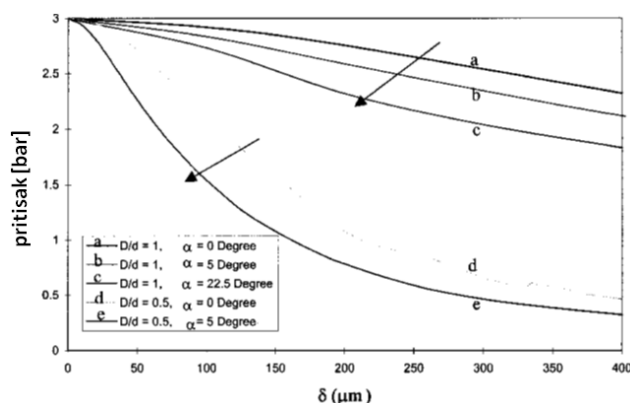


Slika. 2.48. Ugao nagiba konvergentnih mlaznica

Uticaj α - ugla konvergencije, slika 2.49, na pneumatsku osetljivost prikazan je na slici 2.50. Povećanjem ugla konvergencije povećava se pneumatska osetljivost. Povećanje pneumatske osetljivosti može da se postigne povećanjem ugla konvergencije i smanjenjem prečnika prigušnice D , slika 2.55, za $D/d=0,5$ i $\alpha=5^\circ$. Najmanja pneumatska osetljivost je za standardnu mlaznicu NS gde je $\alpha=5^\circ$ i $D/d=1,0$.



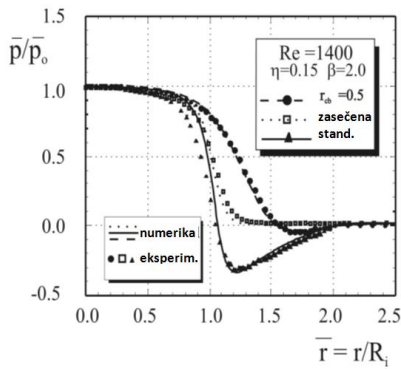
Slika. 2.49. Uticaj ugla konvergencije na pneumatsku osetljivost



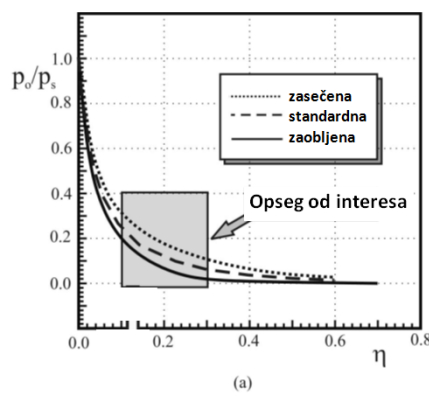
Slika. 2.50. Uticaj ugla konvergencije i D na pneumatsku osetljivost

Numeričkom simulacijom strujanja vazduha u pneumatskoj kontroli dimenzija došlo se do sledećih rezultata: upravljački sistem se najbolje modelira pomoću k - ϵ modela zajedno sa jednačinom strujanja stišljivog fluida. Nastanak potpritiska prouzrokuje nagomilavanje nečistoća i ulja na frontalnoj površini mlaznice i na mašinskom delu koji se kontroliše koji se nalazi van frontalne površine mlaznice. Nagomilavanje nastaje dugotrajnim radom pneumatskog komparatora. Promenom nagiba ugla izlazne mlaznice sa unutrašnje strane došlo se do rezultata da se mogu eliminisati vrtložne zone ali se ne može povećati pneumatska osetljivost. Takođe, izlaznom divergentnom mlaznicom INV N2 može se eliminisati oblast potpritiska i može se poboljšati pneumatska osetljivost uređaja. Primer: za pritisak napajanja $p_{al}=3$ bar i odnos $D/d=0,5$ oblast primene je od 10 do 60 μm i pneumatska osetljivost $S=0,02$ bar/ μm , dok je za konvencionalnu mlaznicu oblast primene od 60 – 220 μm sa duplo manjom pneumatskom osetljivošću. Menjanjem odnosa D/d može se povećati oblast primene pneumatskog komparatora. Primer: za pritisak napajanja $p_{al}=3$ bar i odnos $D/d=1$ oblast primene je veoma velika ali je mala pneumatska osetljivost. Menjanjem oblika vrha izlazne mlaznice može se poboljšati pneumatska osetljivost za 50 % sa istim pritiskom napajanja i aksijalnim rastojanjem mlaznice i ravne površine.

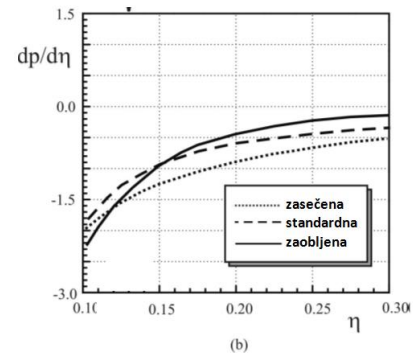
Gilles Roy i drugi (2003) analizirali su fenomen skupljanja nečistoća ispod mlaznice diferencijalnog pneumatskog komparatora u industrijskoj dugotrajnoj primeni. Ovo je nepoželjna pojava i dovodi do greške merenja. Nečistoće se deponuju u vrtložnoj zoni. Ove zone su nepoželjne u pneumatskoj metrologiji i treba ih eliminisati ili smanjiti. Jedan od načina smanjenja vrtložne zone je promena geometrije vrha izlazne mlaznice. U tom smislu su koristili izlazne mlaznice: zaobljene sa unutrašnje strane mlaznice, zakošene sa spoljašnje strane mlaznice, promenljive debljine mlaznice i promenljivog ugla zakošenja mlaznice. Na slici 2.51 prikazali su radijalni dijagram pritiska na mernom mašinskom delu za $p_0=3$ bar. Kod standardne mlaznice najveći je potpritisak, prelazi vrednost $p=0,300$ bar. Taj veliki potpritisak izaziva veliko vrtloženje vazduha i dolazi do deponovanja nečistoća. Potpuna eliminacija potpritiska ostvaruje se zakošenom mlaznicom sa najmanjom frontalnom površinom. Kod zaobljene mlaznice javlja se mali potpritisak koji je pomećen ka periferiji frontalne površine mlaznice.



Slika 2.51. Uticaj geometrije mlaznice na veličinu potpritiska



Slika 2.52. Uticaj geometrije mlaznice na pneumatsku osetljivost



Takođe su određivali pneumatsku osetljivost. Došli su do zaključka da najveću pneumatsku osetljivost ima zaobljena mlaznica, zatim standardna i najmanje zakošena mlaznica, slika 2.52. Poseban fenomen o kome se mora voditi računa je da najviše zakošena mlaznica sa spoljnjie strane $\beta_t=1,0$ tzv. šiljata mlaznica, nema kontakt po površini već po liniji. Ima dobru pneumatsku osetljivost i na $p=p(r)$ dijagramu nema oblasti potpritiska. Mora se voditi računa da posle dugotrajne upotrebe i kontakta sa merenim mašinskim delovima, dolazi do habanja tako male kontaktne površine što menja geometrijske karakteristike mlaznice. To govori da se ipak mora voditi računa da vrh mlaznice ima kontaktnu površinu na račun pneumatske osetljivosti. Iz priloženog se vidi da je najbolji izbor, za dugotrajnu industrijsku upotrebu, standardna mlaznica. Ima dobru pneumatsku osetljivost a veliki potpritisak se smanji ili potpuno eliminiše povoljnim odabirom pritiska napajanja p_0 i odgovarajućim vertikalnim rastojanjem η .

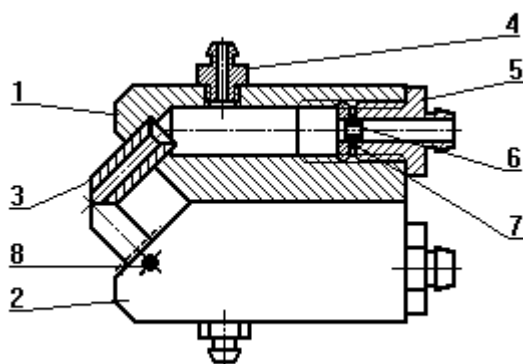
Gilles Roy et al. (2004) proučavali su turbulentno stišljivo strujanje između mlaznice i ravne površine u oblastima koje se primenjuju u pneumatskoj metrologiji. Definisali su nastanak recirkulacione zone i njene zavisnosti od pritiska napajanja. Veoma su retki slučajevi udara mlaza na ravnu površinu za slučaj male distance mlaznice i ravne površine. Pošto je to strujanje u mikrokanaalu, jedino što može da se meri je pritisak na ravnoj površini zida. Informacije o celom polju radijalnog pritiska između ploče i mlaznice može se lakše dobiti numeričkom simulacijom, koja je predstavljena u ovom radu. Pneumatska kontrola je izuzetno velike tačnosti, do dela mikrometra, beskontaktna je i oduva nečistoće sa mernog mašinskog dela. Primenuje se za kontrolu spoljašnjih i unutrašnjih dimenzija. Pritisak napajanja je od $p_0=0,015$ bar do 4 bar. I pored velike industrijske primene postoje problemi kao što je nagomilavanje nečistoća ispod mlaznice na mernom komadu u vidu metalnih opiljaka, rashladne tečnosti i prašine, tzv. prljanje mlaznice. Zaprljanost frontalne površine mlaznice nije dobro jer komparator daje pogrešne rezultate kontrole. Zbog toga mlaznica mora da se redovno čisti i ponovo da se etalonira. Potpritisak se javlja ispod frontalne površine mlaznice. Brzina strujanja vazduha je manja od Mach broja. Jasno se vidi da sa povećanjem frontalne površine povećava se potpritisak. Povećanjem pritiska napajanja povećava se intenzitet potpritiska, i povećava se površina zahvaćena potpritisakom.

Janusz Jermak et al. (2001) predstavili su glavne statičke metrološke osobine složene pneumatske izlazne mlaznice, sastavljene od dve međusobno spojene mlaznice pod uglom 90° . Složena mlaznica je dizajnirana da poboljša metrološke karakteristike pneumatskog diferencijalnog uređaja, sa ciljem da se izbegne osno simetrično rasipanje mlaza, slika 2.53. Istraživanjem su pokazali, da su uglavnom statičke karakteristike diferencijalnih pneumatskih uređaja sa složenom izlaznom mlaznicom povoljnija u odnosu na pneumatske uređaje sa jednostavnom izlaznom

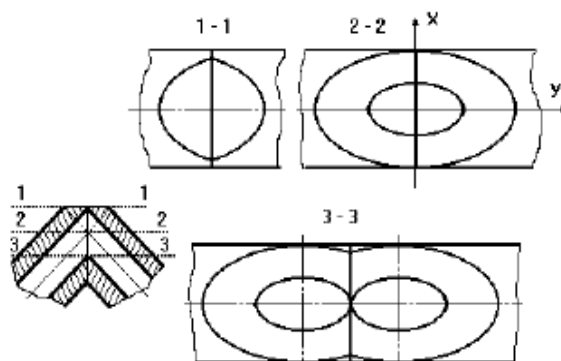
mlaznicom. Pokazali su da im je veća pneumatska osetljivost za isti merni opseg. Takođe postoji više mogućnosti formiranja karakteristike složene izlaze mlaznice u zavisnosti od zahteva aplikacije. Dobre osobine pneumatskog uređaja je jednostavna konstrukcija, merenja bez kontakta, visoka preciznost i visoka osetljivost sistema merenja, uklanjanje čestice nečistoća sa površine izmerene površine komprimovanom vazduhom itd. Neki nedostaci, međutim, ograničavaju područje primene. Ovi problemi su uglavnom povezani sa proširenjem mernog opsega (širi se opseg, manja je osetljivost) i nedostataka u osetljivosti. Za kontrolu mašinskih delova manjeg prečnika, koristi se mlaznica koja u mernoj komori ima manji prečnik prigušnice D . Takav uređaj ima veliku pneumatsku osetljivost ali mali opseg merenja. Za kontrolu mašinskih delova većih dimenzija, koristi se mlaznica, u mernoj komori, većeg prečnika što daje i veći opseg merenja uređaja ali i manju pneumatsku osetljivost. Predlog za poboljšanje ovog nedostatka je složena izlazna mlaznica, tj dvostruka mlaznica.

Izlazna mlaznica se sastoji od dve mlaznice međusobno postavljene pod 90° , odnosno pod 45° u odnosu na ravnu površinu. Svaka mlaznica ima svoju komoru u kojoj se meri pritisak. Mlaznice su postavljene u telu mlaznice tako da se mogu pomerati. Svaka mlaznica ima priključak za napajanje vazduhom pod pritiskom. Pomeranjem obeju mlaznica, moguće je formirati frontalne površine u obliku: tačke, kruga, elipse i dva kruga jedan do drugog, slika 2.54. Udaljavanjem mlaznica povećava se otvor za prolaz vazduha. Vazdušne struje iz mlaznica se mešaju zavisno od njihovog položaja. Ako je položaj mlaznica između položaja 1-1 i 2-2 vazduh se u potpunosti meša van tela mlaznice. Ako je položaj mlaznica između položaja 2-2 i 3-3 vazduh se meša i u telu mlaznice i van njega. U položaju 3-3 vazduh se uopšte ne meša u telu mlaznica već tek na površini mernog komada. Rastojanje između položaja 2-2 do rastojanja 1-1 i rastojanja 3-3, označava se sa h_c . Rastojanje h_c je pozitivno od 2-2 ka 1-1 a negativno od 2-2 do 3-3.

Istraživanjem su došli do rezultata da pneumatska osetljivost zavisi od prečnika mlaznice u komori, prečnika izlazne mlaznice i aksijalnog rastojanja izlazne mlaznice i ravne površine. Pokazali su da sa većom vrednošću h_c proširuje se opseg merenja a smanjuje se pneumatska osetljivost. Najbolji rezultati su postignuti za površinu mlaznice između položaja 2-2 i položaja 3-3. Složena izlazna mlaznica može da ima dve mlaznice različitih prečnika koje imaju različit pritisak napajanja. Merenjem pritiska u komorama se dobije različit statički pritisak $p_1=f(s)$ i $p_2=f(s)$. Takođe se dobijaju različite vrednosti pneumatske osetljivosti za svaku komoru. Ovom kombinacijom se dobija veliki opseg merenja sa takođe velikom pneumatskom osetljivošću.



Slika 2.53. Dvostruka mlaznica



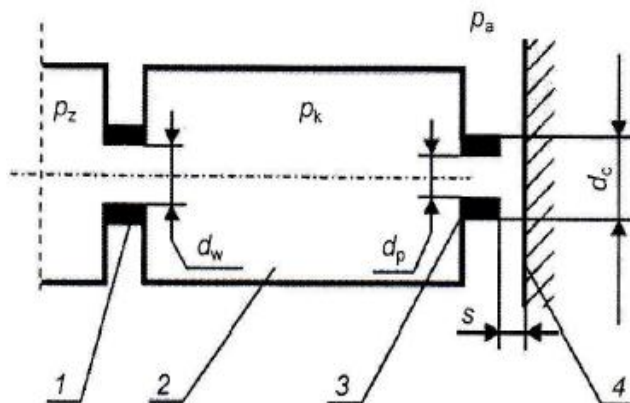
Slika 2.54. Profili frontalne površine izlazne mlaznice

Janusz Jermak et al. (2015) u radu su izložili istorijski razvoj pneumatske metrologije. Počela je da se razvija pre 100 godina, a naročito u godinama Drugog svetskog rata. Do danas se zadržala i

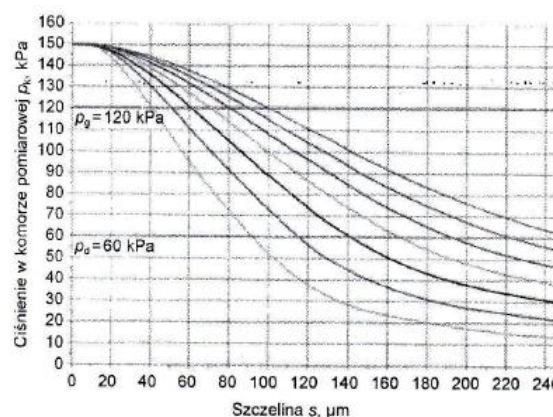
u mnogim oblastima merenja je neprevaziđena. Na otvaranju naučnog skupa 1958. god. o istorijskom razvoju pneumatske metrologije i njene primene u budućnosti, naučnik Tanner je rekao „**Elektronika će u budućnosti biti mozak automatskih mašina a pneumatska metrologija njihove oči**”. Sa ovom rečenicom počeo je istorijski pregled i budućnost pneumatske metrologije. Zahtevi kvaliteta finalnog proizvoda zahteva stalno usavršavanje i unapređivanje mernih uređaja sa mogućnošću merenja na mikro i nano nivou, pa čak i merenje do veličine atoma. Pneumatski uređaji za merenje i kontrolu su našli veliku primenu u kontroli precizne industrije, u automatskoj kontroli, u aktivnoj kontroli. U merenju i kontroli predmeta dugačkih unutrašnjih mikro-dimenzija su nezamenljivi. Za merenje i kontrolu mašinskih delova, uglavnom mora da se izvrši priprema dela za kontrolu, u smislu čišćenja. Kod pneumatske kontrole mašinskog dela, ne dolazi do izražaja priprema, jer pri kontroli, vazduh pod pritiskom oduva nečistoće sa površine mernog predmeta. Za merenje dimenzija se koristi brzina strujanja vazduha i pritisak na površini mašinskog dela koji se kontroliše. Brzina strujanja vazduha se primenjuje u rotameterskim metrološkim uređajima i isključivo je funkcija dimenzija. Pneumatski uređaji za merenje dimenzija pomoću sabijenog vazduha, funkcionišu tako što vazduh određenog pritiska izlazi kroz mlaznice, a pritisak zavisi od dimenzija mernog komada. Zavisnost aksijalnog rastojanja mlaznice i neke površine je takva da udaljavanjem mlaznice smanjuje se pritisak. Pritisak je najveći za najmanje rastojanje. U jednom delu dijagrama je direktna zavisnost pritiska od aksijalnog zazora, i taj deo dijagrama se koristi u pneumatskoj metrologiji. Za kontrolu dimenzija koriste se merne glave za kontrolu spoljašnjih i kontrolu unutrašnjih dimenzija. Pritisak u mlaznici se pretvara u električni signal. Primena pneumatskih uređaja je počela za vreme Prvog svetskog rata ili ubrzo posle rata. Početkom 20. veka dolazi do naglog razvoja automobilske i avio industrije koji je zahtevao brzo i efikasno merenje. Naučnik Marcel Mennesson iz Francuske, je primenio ovaj metod za brzu kontrolu mašinskih delova. Uređaj je nazvan „Solex” i kao takav je predstavljen na tržištu. Marcel Mennesson je 1932. godine prvi put opisao rad ovog uređaja u Francuskoj akademiji nauka. Ovo je bio uređaj gde vazduh prolazi kroz zazor merne glave i predmeta koji se kontroliše. Kod prvih pneumatskih komparatora, pritisak na izlaznoj mlaznici, koji zavisi od: pritiska napajanja vazduha, zazora merne glave i kontrolisanog mašinskog dela, se merio visinom nivoa vodenog stuba u vertikalnoj staklenoj cevi. U Drugom svetskom ratu dolazi do naglog razvoja pneumatskih uređaja. E. Göthel je 1947. dao nepotpuno objašnjenje za rad uređaja. R. Molle je 1950. godine pokušao da sumira zakone koji regulišu pneumatsku metrologiju. U prošlom veku, između 60. i 70. godine, pneumatski merni uređaji se uveliko primenjuju u velikoserijskoj proizvodnji mašinskih delova. Produktivnost pneumatske metrologije se ogleda u brzini i tačnosti kontrole mašinskih delova. Primenom pneumatskog komparatora, može se prekontrolisati i do 1000 komada za jedan sat, sa tačnošću od nekoliko mikrometara. Poslednje dve dekade dvadesetog veka, dolazi u zastoju razvoja pneumatskih uređaja. Istraživači su se okrenuli drugim vrstama mernih uređaja. Kod pneumatskih uređaja problem nastaje kod pretvaranja signala pritiska u električni signal i uvođenje kompjutera radi obrade i čuvanja podataka. Pretvaranje pritiska u električni signal, sa današnjeg stanovišta, dugo traje. Generisanje stabilnog signala pritiska traje po nekoliko sekundi, što je predugo u odnosu na druge vrste uređaja. Zastoj interesovanja za ove uređaje ogleda se i u malom broju naučnih radova. Početkom 21. veka ponovo se javlja interesovanje za pneumatske merne uređaje. Veliki svetski proizvođači mernih i kontrolnih uređaja, Solex, Neberding i drugi, razvijaju nove savremene pneumatske uređaje. Istraživanjem se dolazi do novih rešenja. Posebno se razvijaju nove vrste pretvarača pritiska u električni signal i novi oblici izlazne mlaznice. Izlazne mlaznice su poligonalne ili konusne. Eksperimentiše se sa asimetričnim mlaznicama i sa dve spojene mlaznice.

Primena piezoelektričnih pretvarača pritiska omogućava integraciju sa pneumatskim mernim sistemima za merenje i kontrolu kvaliteta. Jedan od primera unapređenja ovih uređaja je novi Pneutronic pretvarač pritiska, razvijen u Poljskoj u Institutu za napredne tehnologije. Na Varšavskoj izložbi inovacija nagrađen je zlatnom medaljom 2010. godine. Uvođenjem novih piezoelektričnih pretvarača pritiska, dobija se vreme odziva signala od 0,1 milisekunda, čime je rešen problem dinamike uređaja. To omogućava da ponovo pneumatski merni sistemi zauzmu mesto koje im pripada. Pneumatski uređaji su još dominantni u kontroli rotacionih mašinskih delova. To pokazuju radovi Shiraishi i Pudovkina. Najnoviji pneumatski uređaji se koriste za detekciju poroznosti odlivaka, rad Menzies i Koshy. I na kraju se može reći da pneumatski uređaji za merenje i kontrolu, ne da stagniraju u primeni, nego baš naprotiv sve više se koriste i nalaze nove primene.

Janusz Jermak et al. (2016) analizirali su primenu pneumatskog komparatora na ravnu površinu. Pneumatski uređaji za kontrolu dimenzija mašinskih delova prvi put su bili upotrebljeni 1917. godine. Tridesetih godina dvadesetog veka počinju da se koriste u Francuskoj, SAD, Australiji i Velikoj Britaniji. Četrdesetih godina prošlog veka počinju da se primenjuju u SSSR i Nemačkoj. Veliku primenu imaju u mašinskoj industriji. Ovo su bezkontaktni uređaji. Koriste se za kontrolu dimenzija mašinskih delova i kontrolu oblika i položaja. Danas se dosta koriste pneumatski uređaji sa dodatim električnim komponentama. Elektronika se koristi za pretvaranje pneumatskog signala u električni i dalje se može koristiti za obradu statističkih podataka. U tu svrhu se koriste induktivni i optoelektronski senzori. U praksi se najčešće koristi pritisak napajanja vazduha $p_0=1,5$ bar. U radu je korišćen jednokomorni pneumatski uređaj, slika 2.55, sa promenljivim prečnikom u mernoj komori d_w , promenljivim unutrašnjim prečnikom vrha izlazne mlaznice d_p , spoljašnjim prečnikom izlazne mlaznice d_c , sa pritiskom u mernoj komori p_k i pritiskom na ulazu u mernu komoru p_z .



Slika 2.55. Jednokomorni pneumatski komparator



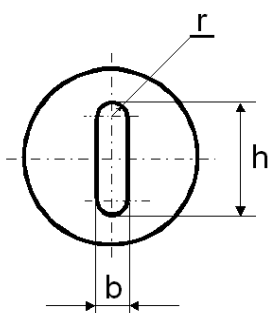
Slika 2.56. Aksijalni pritisak zavisno od prečnika unutrašnje mlaznice d_w

Pritisak na površini mašinskog dela zavisi od: pritiska napajanja p_0 , prečnika mlaznice na ulazu u komoru d_w , prečnika mlaznice na izlazu iz merne komore d_p i rastojanja mlaznice i radnog predmeta s . U radu su dati dijagrami, slika 2.56, pritiska na površini radnog predmeta za jedan pritisak napajanja $p_0=1,5$ bar, zavisno od prečnika mlaznice u mernoj komori d_w . Pritisak u mernoj komori p_k , koji može da se izračuna datom formulom (11), zavisi od: pritiska napajanja p_z , prečnika mlaznica na ulazu i izlazu komore d_w i d_p , aksijalnog rastojanja vrha izlazne mlaznice i merne površine s i koeficijenata protoka vazduha na ulazu i izlazu komore α_{ps} i α_w .

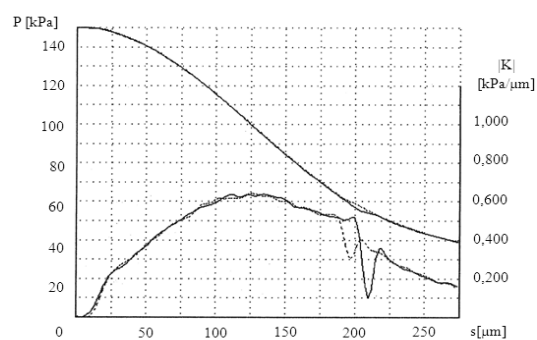
$$p_k = \frac{p_z}{1 + 4 \frac{a_{ps}^2 \cdot d_p^2 \cdot s^2}{a_w^2 \cdot d_w^2}} \quad (11)$$

Najstrmija kriva je za najveće prigušenje i ona ima najveću pneumatsku osetljivost. Pneumatski jednokomorni merni uređaj se koristi za kontrolu: spoljašnjih, unutrašnjih cilindričnih mera sa dve i tri izlazne mlaznice, kontrolu cilindričnosti sa 4 mlaznice, kontrolu konusnosti, za istovremenu kontrolu dva prečnika različitih dimenzija. Takođe veliku primenu ima pri istovremenoj kontroli spoljašnje i unutrašnje mere za njihovo uparivanje. Imaju veliku primenu u aktivnoj kontroli rotacionih mašinskih delova. Merni signal se koristi za upravljanje rada mašinom. Kada je dimenzija obradnog mašinskog dela u tolerancijskom polju, rad mašine se zaustavlja radi promene obratka.

Janusz Jermak et al. (2012) obrađivali su distribuciju aksijalnog polja pritiska na mernom komadu, za mlaznicu sa prorezom, slika 2.57. Parametri za poređenje izlazne mlaznice sa prorezom i kružne mlaznice su pneumatska osetljivost, opseg primene za grešku nelinearnosti krive do 1,5%. Mlaznica kružnog poprečnog preseka koristi se kao referentna, u ovom slučaju. U radu su koristili mlaznicu dimenzija $b=0,385$ i $h=1,020$ mm, i $b=0,427$, $h=1,441$ mm, slika 2.57. Takođe su koristili više ulaznih mlaznica različitog prečnika i na taj način su dobili veliki broj dijagrama sa različitim parametrima. Rezultati pokazuju da mlaznice sa prorezom imaju veću pneumatsku osetljivost u odnosu na mlaznice sa kružnim otvorom. Kod izlazne mlaznice sa kružnim otvorom dolazi do skoka pneumatske osetljivosti što je nepoželjno, slika 2.58. Diskontinuitet pritiska i pneumatske osetljivosti, nastaje zbog histereze uređaja i zbog samog procesa promene pritiska sa promenom zazora izlazne mlaznice i mašinskog dela. Skok pritiska nastaje zbog udarnog talasa. Takođe može da nastane na određenom pritisku napajanja i usled odnosa prečnika mlaznice na ulazu i na izlazu iz merne komore. To nije poželjna pojava u pneumatskoj metrologiji. Međutim pojava skoka pritiska, odnosno skoka pneumatske osetljivosti je van opsega primene u pneumatskoj metrologiji. Jedan od načina eliminacije skoka osetljivosti je uvođenje mlaznice sa prorezom. U radu je dat primer gde je prečnik ulazne mlaznice $d_w=0,830$ mm, prečnik izlazne mlaznice $d_p=1,441$ mm i odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika $D_c=d_c/d_p=3$.



Slika 2.57. Izlazna mlaznica sa prorezom



Slika 2.58. Raspodela pritiska u aksijalnom pravcu i pneumatska osetljivost

Na aksijalnom rastojanju mlaznice $S=180 \mu\text{m} - 230 \mu\text{m}$ javlja se diskontinuitet pritiska, što se odražava na diskontinuitet pneumatske osetljivosti. Eksperiment je rađen sa velikim brojem različitih ulaznih i izlaznih mlaznica i menjan je pritisak napajanja radi eliminisanja skoka pritiska. Korišćene su ulazne mlaznice $d_w=0,556$ mm; $0,608$ mm; $0,720$ mm; $0,830$ mm i $1,020$ mm. Takođe su korišćene četiri izlazne mlaznice, dve sa prorezom D_{sz1} ($2,671 \times 0,386$), D_{sz2} ($3,518 \times 0,427$) i dve cilindrične $d_{p1}=1,015$ i $d_{p2}=1,441$ mm. Dobijeni rezultati pokazuju da može da se eliminiše skok

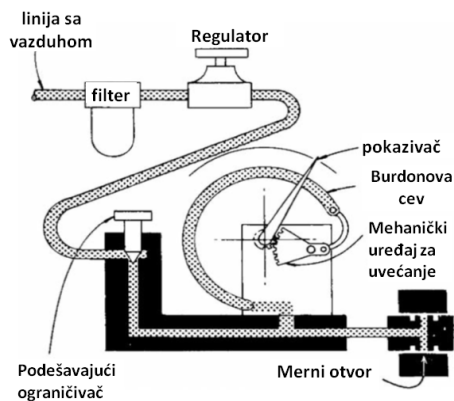
pritiska i poveća pneumatska osetljivost. Primer, za $d_w=0,556$ mm pneumatska osetljivost se povećala za 180 % ako se poredi pneumatska osetljivost za mlaznicu sa prerezom Dsz1 i mlaznica $d_{p1}=1,015$ mm. Povećanje pneumatske osetljivosti je za 187 % veće za izlaznu mlaznicu sa prerezom Dsz2 u odnosu sa mlaznicom prečnika $d_{p1}=1,441$ mm. Takođe je u radu dato poređenje pneumatske osetljivosti za ostale vrednosti prečnika ulazne mlaznice. Merni opseg se smanjuje povećanjem pneumatske osetljivosti. Najveći merni opseg ima mlaznica $d_{p1}=130$ μ m, zatim $d_{p2}=105$ μ m. Kod mlaznice sa prerezom smanjuje se opseg merenja za oko 30 % i ima vrednost 80 μ m za mlaznicu Dsz2 i 65 μ m za mlaznicu Dsz1.

Miroslaw Rucki et al. (2007) eksperiment su radili jednokomornim komparatorom, slika 2.60. Na instalaciji sa klasičnim manometrom dobija se nestabilan signal, merni signal odstupa od neke zadate vrednosti. Pojava nestabilnog signala je detektovana primenom najsavremenijeg piezoelektričnog manometara velike tačnosti. Klasična laboratorijska oprema ima uređaj za merenje i snimanje podataka „Micro bar unit“ i glavni kompjuter za obradu podataka. U radu se daju preporuke za stabilan signal. Radili su na poboljšanju kvaliteta merenja mašinskog dela. To su postigli merenjem vremena koje je potrebno da se stabilizuje pritiska u mernoj komori p_k i smanjivanjem tog vremena. U radu se ispituje strujanje vazduha u mikrokanalu, tj. prostoru između izlazne mlaznice i ravne površine komada koji se kontroliše. Razvijen je novi piezoelektrični senzor pritiska, sastoji se iz pneumatskog dela i električnog. Rezolucija merenja pritiska je 0,010 bar i to mu daje tačnost od 0,1 μ m, 0,2 μ m i 0,5 μ m što zavisi od pneumatske osetljivosti uređaja. Ovaj uređaj se naziva „pneumotronik“ a opisan je u radu: Z. Khukhro, Y. Jermak, M. Rucki, Pneumatic Devices for Length Measurement “Pneutronik” Kharkov, 2002. Takođe su pomoću piezomanometra merili pritisak na ravnoj površini mernog komada, zavisno od: pritiska napajanja, prečnika mlaznice u mernoj komori i rastojanja mlaznice i ravne površine. Posle stabilizacije pritiska napajanja vazduh pritiska p_z ulazi u mernu komoru kroz mlaznicu zadatog prečnika D . Pritisak se smanjuje na vrednost p_k . Pritisak u komori p_k zavisi od: pritiska napajanja p_z , prečnika mlaznice u komori d_w i rastojanja mlaznice od ravne površine s . Kriva $p_k=f(s)$, slika 2.63 je u jednom delu približno pravolinijska i taj deo se primenjuje u pneumatskoj metrologiji. U radu se razmatraju dva krajnja slučaja, kada je $S=0$ pritisak u komori je najveći i jednak je pritisku napajanja $p_{k,max}=p_z$ i kada je izlazna mlaznica maksimalno otvorena $S=S_{max}$ tada je pritisak u komori minimalan $p_{k,min}$ i zavisi od prečnika ulazne mlaznice d_w i prečnika izlazne mlaznice d_p . Ako je $d_p=1,2$ mm a $d_w=0,9$ mm i $p_z=1,5$ bar, dobijaju se sledeće vrednosti $p_{k,max}=p_z=1,5$ bar i $p_{k,min}=0,32$ bar. Interesantan je slučaj kada je izlazna mlaznica zatvorena pa se naglo otvori. Tada pritisak u komori skoči sa $p_{k,min}=0,32$ bar na veći pritisak od pritiska napajanja p_z i posle kratkog vremena se stabilizuje na vrednost pritiska napajanja $p_{k,max}=p_z=1,5$ bar. Vreme stabilizacije je vrlo kratko i za prethodnu konfiguraciju instalacije je $T_u=0,0399$ sec. U radu se dalje nastavlja istraživanje ovoga fenomena. Stabilizacija pritiska se postiže korišćenjem asimetrične mlaznice umesto simetrične okrugle. Takođe merenje pritiska treba da bude sa piezoelektričnim manometrom sa digitalnim očitavanjem vrednosti. Pritisak u mernoj komori se izračunava formulom (12), datom preko površina ulazne i izlazne mlaznice:

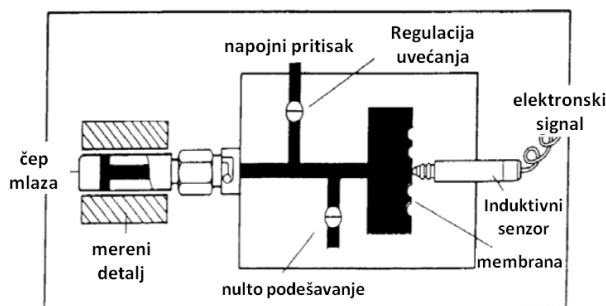
$$p_k = \frac{p_z}{1 + \left(\frac{\alpha_p A_p}{\alpha_w A_w} \right)} \quad (12)$$

gde su: p_z [bar] - pritisak napajanja, A_p [mm²] - površina mlaznice u mernoj komori, A_w [mm²] - površina izlazne mlaznice, α_p – koeficijent protoka merne komore i α_w – koeficijent protoka izlazne mlaznice.

Miroslaw Rucki et al. (2009) opisali su standardni pneumatski uređaj za merenje dimenzija mašinskih delova, koji se primenjuje u mnogim tehnološkim procesima. Sabijen vazduh prolazi kroz mernu granu i generiše pritisak u diferencijalnom pneumatskom uređaju. Danas nije dovoljno da se ukaže da li je neka dimenzija u tolerancijakom polju ili ne. Sistem zahteva beleženje podataka i njihovu obradu. Istraživanja su dovela do razvoja pneumatskih uređaja integrisanih sa piezo pretvaračima. Izmerena veličina se pretvara u digitalni signal podesan za dalju evidenciju i obradu. Integrisane karakteristike merenja su pogodnije za obradu. Rastući zahtevi za poboljšanje kvaliteta merenja zahtevaju poboljšanje mernih karakteristika mernih uređaja. U mnogim slučajevima izgleda nemoguće da se poboljšaju metrološka svojstva uređaja, jer merni opseg zavisi od pneumatske osetljivosti. Što je veća pneumatska osetljivost merenje je kraće i obrnuto. Mnoge prednosti pneumatskih uređaja nisu prevaziđene već su poboljšane. Pneumatski uređaji su tačni, jeftini za održavanje, jednostavni za rukovanje. Povremeno je potrebno očistiti izlaznu mlaznicu kada se zaprlja. Zaprljanost mlaznice uzrokuje netačno merenje. To se proverava etalon mlaznicom. Mlaznica se čisti i ponovo podešava uređaj. Ovo je bezkontaktno merenje. Mašinski deo koji se kontroliše ne mora posebno da se priprema u smislu brisanja itd. Iz merne glave izlazi vazduh određenom brzinom koji oduva nečistoće na mašinskom delu.



Slika 2.59. *Pneumatski komparator sa klasičnim manometrom*



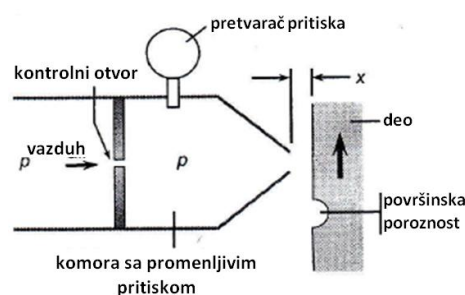
Slika 2.60. *Pneumatski komparator sa piezoelektričnim manometrom*

Zbog svih dobrih osobina ovih uređaja, još uvek je velika potražnja za njima. I pored toga što postoje tačnije metode merenja, u nekim merenjima pneumatski uređaji su nezamenljivi. Princip rada se zasniva na tome da povećanje rastojanja mašinskog dela od izlazne mlaznice izaziva smanjenje pritiska na površini mašinskog dela. Pad pritiska je utoliko veći ukoliko se povećava razmak mlaznice i ravne površine. U jednom delu dijagrama pritisak je linearan, ima pravolinijski deo koji se koristi u pneumatskoj metrologiji. Klasični pneumatski uređaji bazirani su na tradicionalnom membranskom senzoru pritiska, slika 2.59. Pneumatski signal merenja može da se konvertuje u elektronski signal i da se dalje obrađuje, slika 2.60. Postoje različite metode za dobijanje električnog signala, direktno merenjem pritiska ili pneumatski merni konvertori direktno povezani u pneumatski uređaj. Klasični pneumatski uređaji sa membranom imaju loše dinamičke karakteristike zbog velikih dimenzija unutrašnje mrtve zapremine. S druge strane, uređaji čija je osnova piezoelektrični senzor imaju brz odziv signala i izlazni signal je električni. U pneumatronik uređajima ima ugrađena elektronska jedinica koja predstavlja mikroprocesor koji analogni signal pretvara u digitalni i na taj način omogućuje kontrolu svih potrebnih funkcija mernog sistema. U drugim sistemima tu funkciju vrši spoljašnji procesor. Izlazni signal može da se koristi kao kontrolni signal, kao znak za operatera, može se snimati za statističku analizu.

Menzies Koshy et al. (2009) ispitivali su površinsku poroznost odlivaka, slika 2.61 koja predstavlja veliki problem koji nastaje pri livenju. Jedan od načina detektovanja površinske poroznosti je promenom zvuka pri mašinskoj obradi odlivaka. Pojava poroznosti je štetna pojava za funkciju i učinak mašinskog dela, pogotovo ako se desi na odgovornom delu kao što je ležaj ili zaptivna površina. U tom cilju, u ovom radu predstavljena je nova bezkontaktna pneumatska tehnika za otkrivanje srednjeg i makro nivoa poroznosti. Pneumatski merni sistem omogućava inspekciju površina, otkrivajući mikroporoznost, rupe. Postupak je veoma jeftin, fleksibilan i pogodan za praćenje mašinske obrade. Mlaz vazduha odnosi mehaničke nečistoće i rashladnu tečnost sa površine radnog predmeta. U radu je pokazana sposobnost sistema za primenu. Livenje metala ima veliku primenu u auto i avio industriji, pogotovo gde se liju komadi velikih gabarita. Proces livenja je komplikovan tehnološki postupak.



Slika 2.61. Mikroporoznost na površini mašinskog dela



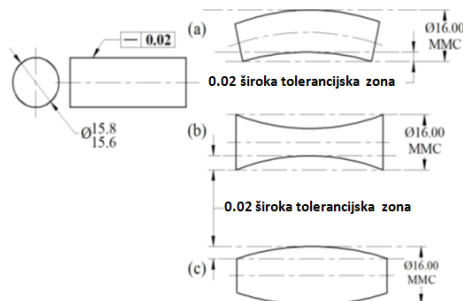
Slika 2.62. Izlazna mlaznica i mikroporozna površina

Eksperiment se radi sa mlaznicom manjih dimenzija, slika 2.62. Mlaznica se primakne rotacionom mašinskom delu na distanci 50 μm i 100 μm . Obimna brzina radnog predmeta je 100 m/min, a pritisak napajanja je $p_0=0,7$ bar i 2,8 bar. Senzor pritiska registruje svaku promenu rastojanja mlaznice i rotacione površine smanjenjem pritiska. Dobijeni signal se obradi tako da se dobije jasan pik signala u vremenskom domenu. Ovaj rad predstavlja novu primenu pneumatskih mernih uređaja. Ovo je brz i siguran način za detekciju poroznosti u livenom mašinskom delu koji se rotira. Senzor pritiska mora da bude izuzetno osetljiv, da brzo reaguje na geometrijsku promenu promenom pritiska. Ova metoda se koristi za sve materijale. Inače, optička metoda se primenjuje za detekciju prslina. I jedna i druga metoda se koriste kod mašinskih delova koji rotiraju, detektuju signal, a ne ugrožavaju stabilan rad mašine.

Vladimir B. Bokov (2009) zasniva rad na proceni odstupanja merenja od stvarne mere. U prvom delu, dao je teorijsko i eksperimentalno istraživanje modela pneumatskih mernih uređaja. Teorijski model zasniva se na opisivanju strujanja fluida energetske jednačinama. U jednačini stanja ograničavajući faktor je koeficijent pražnjenja. Da bi dobio stabilan model koeficijenta pražnjenja mora se istraživati za različite protoke fluida. Ovaj model empirijskih jednačina je predložio Nakayama. U drugom delu je dao novi prošireni model metodologije merenja, koji je simbioza teorijskog i empirijskog modela. U proučavanju pneumatskih mernih uređaja, prvo je korišćen teoretski a posle empirijski model.

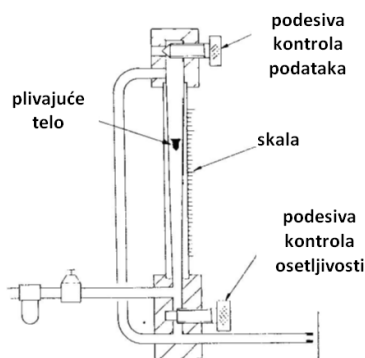
H. Saglam (2011) vršio je merenje dimenzija cilindričnih mašinskih delova pomoću diferencijalnog pneumatskog manometra. Pored kontrole dimenzija, vršena je kontrola oblika i položaja. Površine dobijene mašinskom obradom odstupaju od zadate (predviđene) mere. Standardom ANSI Y14.5 je predviđeno dozvoljeno odstupanje greške obrađene površine i greška mora da bude manja od maksimalno dozvoljene. Pošto je merenje vršio različitim metodama, svaka

će dati rezultate sa greškom, i oni neće biti isti. Pneumatski merni uređaji mogu da se koriste ne samo za merenje dimenzija mašinskih delova koji miruju, već i u kontroli dinamičkih mašinskih delova. U velikoserijskoj proizvodnji vrši se snimanje i analiza podataka. Tradicionalna inspekcija se uglavnom bavi kontrolom dimenzija mašinskih delova i uglova. Tačnost dimenzija svakog mašinskog dela i njegovog oblika i položaja ima veliku ulogu u konačnom spoju i radu mašine.



Slika. 2.63. Primeri odstupanja oblika i pravosti mašinskog dela

Za svaki mašinski deo su propisane dimenzije i njihove tolerancije. Pored toga mora da bude propisana kontrola oblika i položaja koje se nalaze na radioničkom crtežu. Tolerancije dimenzija, dozvoljena odstupanja oblika i položaja od propisanog, treba navesti na crtežu, slika 2.63. Propisana mera ograničava dimenzije mašinskih delova, ravnost, cilindričnost itd. Većina mašinskih delova sastoji se od spoljašnje i unutrašnje cilindrične površine. Dve osnovne karakteristike koje se koriste za kontrolu cilindričnih mašinskih delova su normalnost i pravost osa. Greška pravosti se definiše kao razlika maksimalnog pika od idealne veličine. Kontrolu pravosti moguće je vršiti pomoću libele, elektronskog i pneumatskog komparatora. Kontrola pneumatskim diferencijalnim uređajem se vrši tako što se postavi nosač mlaznice koja može da klizi po ravnoj površini. Odstupanje od zadatog se manifestuje udaljavanjem ili približavanjem izlazne mlaznice površini radnog predmeta, što izaziva smanjenje ili povećanje pritiska u mlaznici. Na komparatoru su postavljeni graničnici za dozvoljena odstupanja, slika 2.64. Statističkom obradom izmerenih veličina, došao je do rezultata da je merenjem elektronskim komparatorom i pneumatskom metodom, najpribližnije. Pri ovim metodama merenja javljaju se najmanje greške merenja i najmanja odstupanja. Ovim radom je pokazano da pneumatska metoda merenja i kontrole oblika i položaja ima još uvek veliku primenu.



Slika. 2.64. Pneumatski uređaj koji radi na principu protokomera

V.R. Burrows (2013) je opisao osnovne principe pneumatske metrologije koji su poznati još u 19. veku, a praktična upotreba 1917. godine. U početku se koristila tečnost a kasnije vazduh pod pritiskom. U Francuskoj je nastao prvi merni pneumatski uređaj u fabrici karburatora Solex. Od 1940 godine, pneumatski uređaji se koriste u vojne svrhe. U SAD se koriste u auto industriji. U Engleskoj je u Nacionalnom institutu za fiziku počelo istraživanje i upotreba od 1938. do 1945.

godine. Princip funkcionisanja je da se vazduh pod zadatim pritiskom, propušta kroz mernu glavu i udara u zid mašinskog dela koji se kontroliše.

Pritisak, koji se meri u izlaznoj mlaznici zavisi od zazora između mlaznice i ravne površine. U radu je prikazan pneumatski uređaj koji radi na principu protokomera, slika 2.69. Izlazna mlaznica se postavi iznad predmeta čija se dimenzija kontroliše. Zazor utiče na pritisak u mlaznici i prozirnoj cevi sa lebdećim telom. Ako je zazor veći, pritisak je manji i telo će imati manju visinu i obratno. Kasnije su se razvili sistemi za merenje sa diferencijalnim pneumatskim komparatorom. U novije vreme se koriste elektro-pneumatski merni sistemi, kod kojih se koristi elektro pretvarač pritiska. U radu je dat dijagram u aksijalnom pravcu za jedan pritisak napajanja, a različite mlaznice u mernoj komori. Pokazano je da je najveći pritisak na površini mašinskog dela za najmanje prigušenje i obratno.

Dao je primere primena pneumatskog diferencijalnog uređaja za kontrolu hrapavosti. Zbog nesrazmerno velike dimenzije mlaznice u odnosu na korak neravnina, može da se kontroliše srednja vrednost neravnina. Pneumatski merni uređaji mogu da se koriste za merenje mašinskih delova malih dimenzija. Međutim, za merenje velikih dimenzija koristi se isti uređaj sa adekvatnom mernom glavom i drugom pneumatskom osetljivošću. Tada se promeni mlaznica (prigušnica) u mernoj komori. Manje prigušenje ima mlaznica većeg prečnika i ima veći opseg kontrole.

Pneumatski komparatori se mogu koristiti za merenje debljine mekih tankih predmeta, kao što je plastična folija. Plastična folija pri proizvodnji, prolazi sve vreme kroz mernu glavu i na taj način se kontroliše njena debljina. U slučaju promene debljine u odnosu na zadatak, uključuje se alarm i zaustavlja proces proizvodnje ili se aktiviraju mehanizmi koji vrše korekciju debljine folije. Takođe ovi uređaji imaju veliku primenu pri mašinskoj obradi delova, pri finom i grubom brušenju. Merna glava se podesi tako da kontroliše odstupanje dimenzija predmeta koji se obrađuje. Kada je dimenzija predmeta van tolerancijskog polja, mašina se ili zaustavlja, ili se vrši korekcija obrade.

Michał Jakubowicz (2014) opisao je primenu pneumatske metrologije u auto industriji, industriji proizvodnje ležaja na tačnost kontrole dimenzija, oblika i položaja. Savremeni merni uređaji moraju da budu jednostavni, tačni, brzi, da omoguće kontrolu mašinskih delova u toku procesa proizvodnje. Prvi put se ova metoda počela da koristi posle Prvog svetskog rata. Francuska firma Etamic je prva počela da proizvodi pneumatske merne uređaje. Veliku primenu su našli u kontroli mašinskih delova. Neosetljivi su na vlagu i kontaminaciju merne površine, bezkontaktno je merenje, veliki vek trajanja merne grane, velika osetljivost uređaja. Nepovoljnosti pneumatskih uređaja je mali merni opseg (oko 200 μm), treba obezbediti prečišćen vazduh bez mehaničkih nečistoća, vode i ulja. Dobra je osobina da se koriste pri kontroli više mera istovremeno. Pneumatski uređaji imaju pneumatski i elektronski deo. Elektronski deo podrazumeva pneumotronik, uređaj za pretvaranje pritiska vazduha u električni signal, koji dalje ide u računar radi obrade i skladištenja. Institut u Poljskoj je razvio novi uređaj za kretanje mlaznice pomoću step motora koji se upravlja kompjuterom. Bira se korak step motora, opseg merenja, vreme promene položaja mlaznice i na ovaj način se dobijaju dobri ponovljivi rezultati. Primena pneumatske metrologije je za neka merenja nezamenljiva, kao npr. za merenje dubokih otvora i rupa malog prečnika i velike dužine.

Crnojević C., Skoko D. (2005): u radu su analizirali neke pojave koje utiču na rad pneumatskog komparatora koji služi za kontrolu visokoserijski proizvedenih mašinskih elemenata. Posebno se analiziraju: domen primene, pojava diskontinuiteta pritiska, uslovi formiranja naslaga prljavština na izlaznoj mlaznici i pojava fluktuacije merene geometrijske veličine usled fluktuacija pritiska u diferencijalnom pneumatskom komparatoru. U tom cilju napravljena je laboratorijska instalacija

koja omogućava analizu navedenih pojava. Eksperimentalni rezultati koji su dobijeni u potpunosti odgovaraju u literaturi poznatim podacima i analizama. Intenzivan razvoj pneumatskih mernih sistema za kontrolu dimenzija počinje pedesetih godina XX-og veka. Od tada do danas princip merenja ostaje isti, a uređaji koji se koriste u mernom sistemu stalno se usavršavaju, tako da je danas postignut zavidan nivo razvijenosti ovih sistema, a ostvarena preciznost merenja-kontrole dimenzija je do delova mikrometra. Osnovu ovih uređaja čini pneumatski komparater, tzv. diferencijalni merni uređaj, sastavljen od merne i referentne grane, sa stišljivim strujanjem vazduha. U mernoj grani pritisak vazduha se menja u funkciji kontrolisane dimenzije komada, a referentni pritisak ostaje konstantan. Pneumatski komparateri ne daju apsolutnu vrednost neke merene dužine već njenu relativnu vrednost u odnosu na etalon, tako da su ovi merni uređaji veoma praktični za kontrolu proizvedenih mašinskih elemenata. Primene pneumatske metrologije za kontrolu dimenzija mašinskih elemenata ili sklopova su brojne, a nezamenljivu ulogu imaju u kontroli visokoserijskih industrijskih proizvoda, kao npr. u automobilske industriji. Sa ovim sistemima mogu se podjednako dobro kontrolisati ravne i zakrivljene površine, spoljašnje i unutrašnje mere, jednostavne i složene geometrije, cilindričnost, konusnost i paralelnost površina. Brojni klasični i aktuelni primeri primene pneumatskih metroloških sistema mogu se naći na sajtu jednog od vodećih svetskih proizvođača ovih mernih sistema – francuske firme »ETAMIC« (ref. [3]).

Iako je princip rada pneumatskog komparatera jednostavan brojna istraživanja su pokazala da na kvalitet i opseg merenja, osetljivost, kvalitet mernog signala i odziv sistema i td. utiču mnogi faktori. Tako u radu je dat uticaj geometrije izlazne mlaznice za vazduh na polje pritiska, uticaj prečnika mlaznice merne komore na osetljivost i pozicije kritičnog preseka (strujni presek u kome je Mahov broj jednak jedinici. Ukazano je na problem intenziteta šuma mernog signala pritiska nastalog u mernoj komori diferencijalnog uređaja izazvanog promene položaja mernog mesta pritiska. Dobro je poznato da se pneumatska metrologija koristi za veoma mala rastojanja između izlazne mlaznice i kontrolisanog komada, u intervalu 100 do 300 mikrometara. Povećavanjem ovog rastojanja, polje pritiska postaje nelinearno, a može doći do diskontinuiteta na krivoj pritiska, što upućuje na zaključak da je primena pneumatske metrologije u području rastojanja na kojima se javljaju diskontinuiteti pritiska nesvrshodna. U ovom radu su izvršena eksperimentalna merenja koja proširuju saznanja o navedenim efektima koji se javljaju u pneumatskom komparateru i koja u značajnoj meri mogu uticati na pouzdanost njegovog rada.

Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih rezultata ukazuje se na neke važne fenomene vezane za rad pneumatskog komparatera i to: potvrđen je domen primene pneumatske metrologije i ukazuje se na neupotrebljivost ove metode za veće udaljenosti mlaza vazduha od kontrolisanog komada iz razloga pojave diskontinuiteta pritiska. Zbog prisustva nečistoća na kontrolisanom komadu ili u komprimovanom vazduhu moguće je formiranje na izlaznoj mlaznici tankog sloja nečistoća koje menjaju strujnu sliku vazduha, a samim tim i utiču na smanjenje pouzdanosti pneumatskog komparatera. Da bi se fluktuacioni karakter mernog signala pritiska $\Delta p(\delta, t)$, odnosno kontrolisane dimenzije $\Delta \delta(t)$, sveo na minimum neophodno je merno mesto za pritiske merne i referentne grane postaviti što bliže ulazima odgovarajućih naglih proširenja ovih grana, a protok vazduha koliko dozvoljavaju ostali geometrijski parametri komparatera svesti na minimum.

Dragiša Skoko (2007) u magistarskom radu objasnio je da na stepen tačnosti (osetljivosti) pneumatske kontrole zavisi od geometrijskog oblika vrha izlazne mlaznice, njegove udaljenosti od površine koja se kontroliše, pritiska napajanja i prečnika prigušnice. U delu rada, dati su rezultati merenja aksijalnog pritiska na mašinskom delu sa promenom pritiska napajanja, prečnika mlaznice

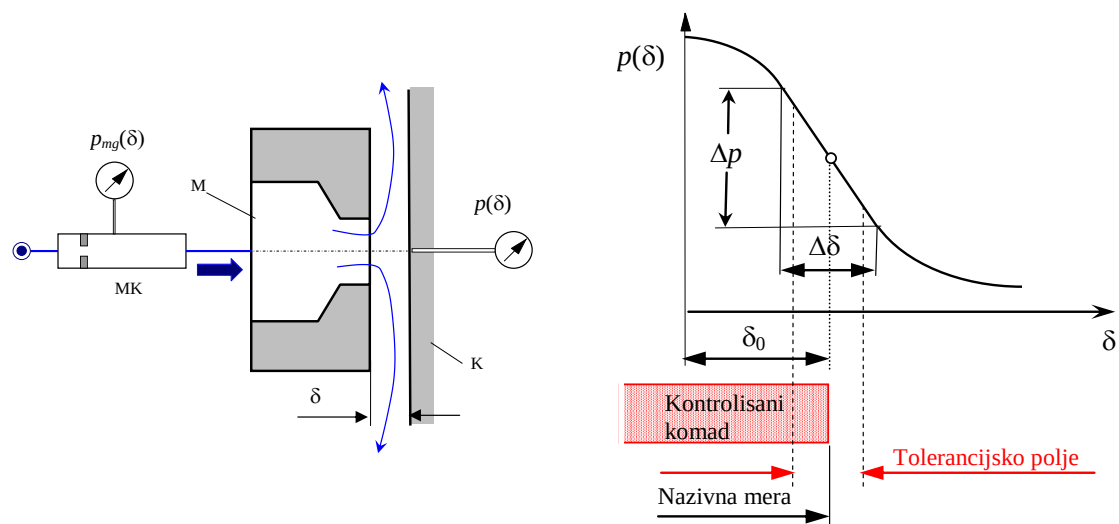
D u mernoj komori radi sagledavanja njihovog uticaja na pneumatsku osetljivost. U cilju sagledavanja i ostvarenog uticaja ovih veličina na stepen tačnosti pneumatske kontrole, u radu su sprovedena eksperimentalna istraživanja. Za različite oblike vrha izlazne mlaznice, pet različitih oblika, i različite prečnike prigušnice, šest veličina, mereni su pritisci na vrhu izlazne mlaznice u zavisnosti od aksijalnog rastojanja vrha mlaznice i površine koja se kontroliše. Takođe su dati rezultati merenja radijalnog pritiska sa izlaznim mlaznicama različite geometrije vrha. Na osnovu dobijenih rezultata merenja formirane su odgovarajuće zavisnosti. Uspostavljena je zavisnost pneumatske osetljivosti od veličine izlaznog pritiska, geometrijskih karakteristika mlaznica i rastojanja vrha mlaznice od površine koja se kontroliše. Na osnovu ovih zavisnosti za svaki stepen geometrijske tačnosti i svaku širinu tolerancijskog polja može se definisati optimalna geometrija mlaznice i položaj vrha izlazne mlaznice od kontrolne površine u cilju dobijanja najveće tačnosti (osetljivosti) pneumatske metode. Veliki pritisci napajanja merne instalacije nalažu velike energetske inpute i generišu veliku buku na izlaznoj mlaznici. Istovremeno kompresori, generišu buku i vibracije. Na osnovu dobijenih rezultata eksperimentalnih istraživanja, za propisani stepen geometrijske tačnosti, mora se uspostaviti odgovarajuća kompatibilnost između geometrijskih karakteristika mlaznice, pritiska napajanja i rastojanja vrha mlaznice od kontrolisane površine, sa aspekta optimalne ekološke i energetske efikasnosti.

Dragiša Skoko i drugi (2007) u radu su analizirali pneumatsku osetljivost diferencijalnog pneumatskog komparatora koji služi za kontrolu kvaliteta dimenzija i oblika mašinskih delova. Vrednost pneumatske osetljivosti određuje se eksperimentalnim putem merenjem promene pritiska između izlazne mlaznice i kontrolisanog komada. U toku eksperimenata variran je pritisak napajanja komprimovanog vazduha, geometrija izlazne mlaznice i prečnik mlaznice merne komore komparatora. Rezultati eksperimenata pokazuju da pneumatska osetljivost raste porastom pritiska napajanja i smanjenjem prečnika mlaznice merne grane, dok važan uticaj ima i geometrija izlazne mlaznice.

Na slici 2.65 prikazan je mlaz komprimovanog vazduha, koji ističe kroz izlaznu mlaznicu M, i koji udara u čvrstu pregradu-kontrolisani komad K. Pritisak p koji se meri na radnoj površini-komadu K zavisi od udaljenja mlaznice od kontrolisanog komada, tj. važi neka funkcionalna zavisnost $p(\delta)$ čiji je grafik šematski dat na Sl. 2.65. U konkretnim izvodjenjima pneumatskih komparatora ne meri se pritisak $p(\delta)$ na kontrolisanom komadu već pritisak u komori merne grane $p_{mg}(\delta)$, koji je zbog malih strujnih gubitaka približno jednak pritisku $p(\delta)$. Na dijagramu zavisnosti $p(\delta)$ postoji jedan linearni deo koji se po pravilu koristi pri primeni pneumatskih komparatora i koji definiše tzv. pneumatsku osetljivost, kao:

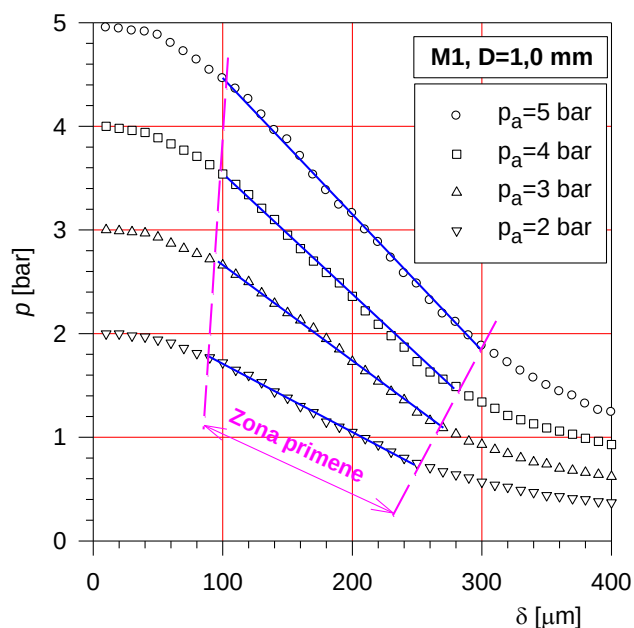
$$s = \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (1)$$

gde je Δp promena pritiska i $\Delta \delta$ promena udaljenja linearnog dela krive. Veličina s , ustvari, matematički predstavlja nagib uočene prave linije. Pri kontroli nekog mašinskog dela, prema linearnom delu zavisnosti krive $p(\delta)$, podesi se »nula instrumenta«, na rastojanju δ_0 , koje odgovara nominalnoj dimenziji mernog komada, i daljom kontrolom utvrđuje se da li je kontrolisana dimenzija u ili van tolerancijskog polja zadate dimenzije.

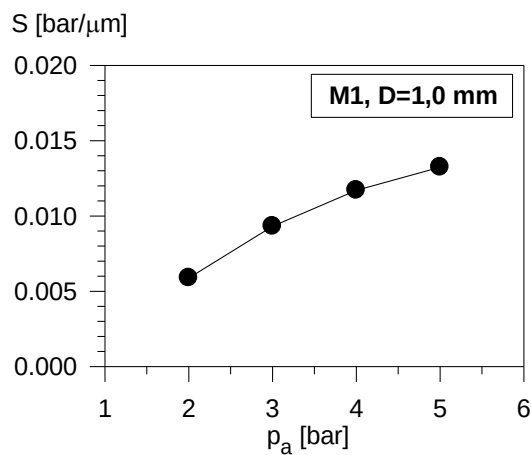


Slika 2.65. Shematski prikaz izlazne mlaznice i dijagram zavisnosti pritiska od udaljenja mlaznice od mernog komada.

Na slici 2.66 prikazana je promena pritiska na mernom komadu u funkciji rastojanja δ za pritiske napajanja pneumatskog komparatora $p_a = 2, 3, 4$ i 5 bar, respektivno, za geometriju izlazne mlaznice M1 i prečnik konvergentno-divergentne mlaznice merne grane $D=1$ mm. Merenjem su dobijene tipične krive za



Slika 2.66. Zavisnost pritiska na mernom komadu u funkciji različitih pritisaka napajanja, za mlaznicu M1 i prečniku $D=1$ mm.

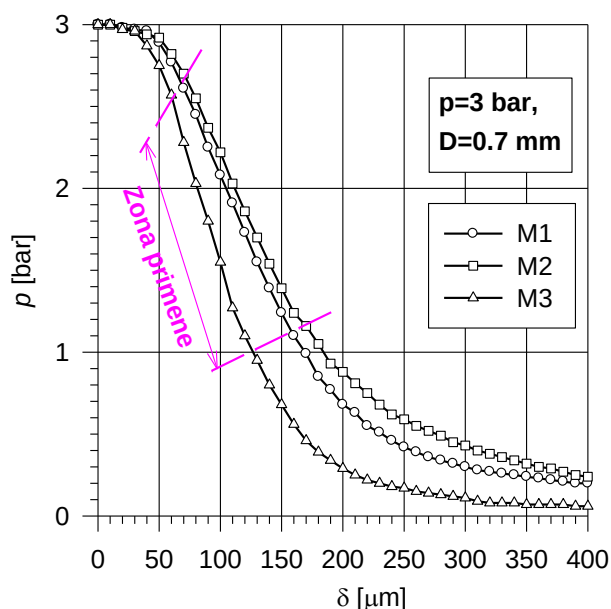


Slika 2.67. Pneumatska osetljivost komparatora za mlaznicu M1 i prečniku $D=1$ mm.

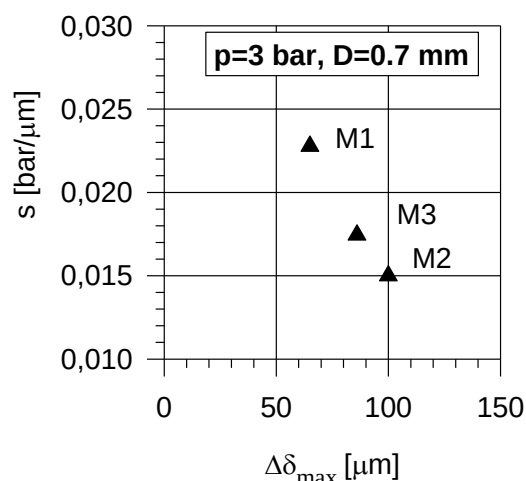
promenu pritiska u funkciji rastojanja δ . Uočavanjem linearnih delova krivih $p(\delta)$, i na osnovu njih određujući pneumatsku osetljivost izrazom (1), čija je promena prikazana na dijagramu sa Sl.2.67, dobija se oblast primene iz koje se zaključuje da je pri istim parametrima M1 i D , pneumatska

osetljivost u direktnoj zavisnosti od pritiska napajanja i da je ona utoliko veća ukoliko je pritisak napajanja veći. Rezultati merenja sa Sl. 2.66 takodje upućuju na zaključak da se pri istim parametrima M i D , na linearnim delovima krivih porastom pritiska napajanja komprimovanog vazduha povećava rastojanje $\Delta\delta$, što znači da se ovim efektom mogu kontrolisati i merni komadi koji imaju veće tolerancijsko polje neke nazivne mere.

Na Sl. 2.68 prikazani su eksperimentalni rezultati merenja pritiska komprimovanog vazduha $p(\delta)$ pri jednom pritisku napajanja pneumatskog komparatora ($p_a = 3 \text{ bar}$), za jedan prečnik ($D=0,7 \text{ mm}$) konvergentno-divergentne mlaznice i pri različitim geometrijama izlazne mlaznice. Sa ove slike se vidi da geometrija izlazne mlaznice utiče na oblast primene, što je bolje vidljivo na drugačije predstavljenim rezultatima datim na Sl. 2.69. Na ovoj slici sa $\Delta\delta_{\max}$ označeno je maksimalno udaljenje na pravom delu krive $p(\delta)$, koji odgovara maksimalnom tolerancijskom polju neke merene dužine. Očigledno je da pri svim ostalim strujnim i geometrijskim parametrima, geometrijom izlazne mlaznice može se menjati pneumatska osetljivost komparatora.



Slika 2.68. Zavisnost pritiska na mernom komadu u funkciji od geometrije izlazne mlaznice, pri parametrima $p_a = 3 \text{ bar}$ i $D=0.7 \text{ mm}$.

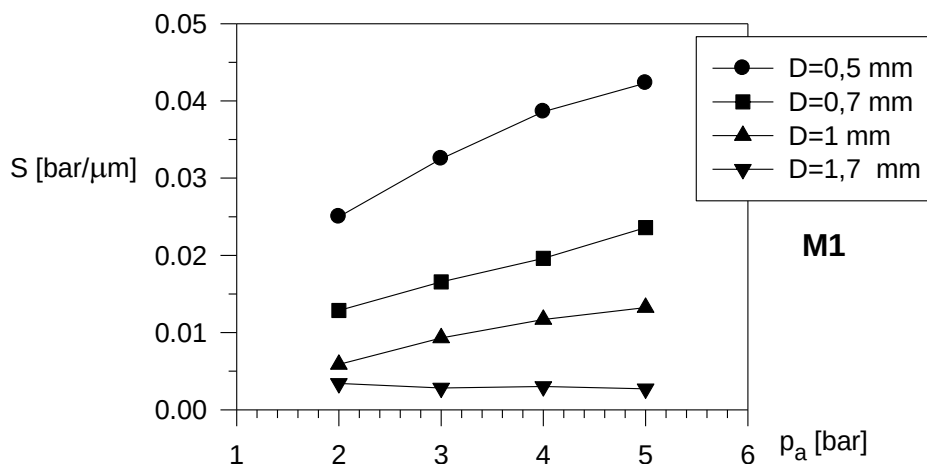


Slika 2.69. Pneumatska osetljivost komparatora za različite izlazne mlaznice i pri parametrima $p_a = 3 \text{ bar}$ i $D=0.7 \text{ mm}$.

Na Sl. 2.70 za mlaznicu M1 prikazana je zavisnost pneumatske osetljivosti u funkciji pritiska napajanja i za različite prečnike konvergentno-divergentne mlaznice. Sa slike se vidi da se pri prečniku $D=1.7 \text{ mm}$ pneumatska osetljivost relativno sporo menja, dok se smanjenjem prečnika D i povećanjem pritiska napajanja pneumatska osetljivost povećava. Ovo je veoma važan rezultat jer se upravo ovim efektom u konkretnim izvodjenjima pneumatskih komparatora postiže ostvarivanje željene osetljivosti mernog sistema.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata prikazanih u ovom radu dolazi se do opštih zaključaka: da iako se različita geometrija izlazne mlaznice prvenstveno koristi radi eliminisanja vrtložne zone između mlaznice i kontrolisanog komada, dati rezultati merenja pokazuju da se geometrijom izlazne mlaznice može uticati i na pneumatsku osetljivost komparatora i na promenu maksimalnog

tolerancijskog polja kontrolisanog komada. Na pneumatsku osetljivost pneumatskog komparotera se prvenstveno utiče promenom prečnika konvergentno-divergentne mlaznice merne grane. Povećanje pneumatske osetljivosti se povećava smanjenjem prečnika mlaznice merne komore, ali se i na taj način i sužava maksimalno tolerancijsko polje kontrolisane mere. Za iste geometrijske parametre izlazne mlaznice i konvergentno-divergentne mlaznice merne grane pneumatska osetljivost se povećava porastom pritiska napajanja komprimovanog vazduha.



Slika 2.70. Pneumatska osetljivost konfiguracije sa mlaznicom M1 i različitim prečnicima mlaznice u mernoj grani.

Skoko D., Crnojević C. (2008) obradili su primenu pneumatske metrologije za kontrolu mašinskih delova. Poslednjih nekoliko decenija kontrola kvaliteta obrade površina i izrade oblika mašinskih delova, najčešće se obavlja primenom pneumatskih metroloških sistema, a naročito u visokoserijskoj proizvodnji što je i tema ovoga rada. Usled jednostavnog principa rada, preciznog merenja i velike primene, postoji veliki broj konstrukcija pneumatskih metroloških uređaja. Kod pneumatskih diferencijalnih komparatora, strujanje vazduha je veoma složen proces na koji utiče mnogo faktora. Strujni prostor između mlaznice i mernog kanala predstavlja mikrokanal. Uporedo sa razvojem proizvodnih mašina razvija se tehnika kontrole i merenja proizvedenih komada. Prvi uređaji za kontrolu su bili mehanički. Ovi uređaji su mogli da zadovolje potrebu u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji jednostavnih komada. Razvojem savremene industrije XX-tog veka, koju karakterišu velikoserijska proizvodnja komplikovanih oblika i velika tačnost izrade, mehanički uređaji nisu mogli da zadovolje u svim segmentima proizvodnje. To naročito dolazi do izražaja u automobilske i avio industriji. Za merenje i kontrolu razvijeni su potpuno novi uređaji: mehanički, optički, električni, pneumatski, hidraulički i laserki uređaji. Najvažnija prednost u odnosu na mehaničke je njihova tačnost. Tačnost mehaničkih uređaja je $1 \mu\text{m}$, a pomoću savremenih uređaja mogu se meriti i deseti i stoti delovi mikrometra.

Pneumatski merni sistemi se intenzivno razvijaju tridesetih godina XX-tog veka, počev od najjednostavnijih pa sve do vrlo savremenih uređaja. Zbog velike mogućnost primene, jednostavne konstrukcije, lakog održavanja, jednostavnog rukovanja a iznad svega velike tačnosti, ovi uređaji su dominantni u kontroli mašinskih delova. Prednost ovih uređaja, u odnosu na ostale, je što komprimovani vazduh koji izlazi iz mlaznica merne glave velikom brzinom, oduva mehaničke nečistoće i tanak sloj tečnosti za hlađenje komada i ostalih nečistoća. Na ovaj način se smanjuje mogućnost pojave greške pri merenju i kontroli. Druga prednost je što se može kontrolisati više mera istovremeno, bilo spoljašnjih ili unutrašnjih. Vrlo značajnu primenu ima dinamička

pneumatska metoda koja se primenjuje kod obrtnih komada, znači u toku rada, bez zaustavljanja rada mašine, vrši se merenje i kontrola obratka.

Stepen tačnosti kontrole mašinskih delova zavisi od: izbora izlazne mlaznice, pritiska napajanja, prečnika prigušnice u mernoj komori i prečnika merne glave. U radu su prikazani vrste diferencijalnog pneumatskog komparatora i njihova primena za kontrolu mašinskih delova. Analiziran je uticaj pritiska napajanja, oblika vrha izlazne mlaznice i odstojanja vrha mlaznice od kontrolisane površine na polje pritiska. U radu su dali osnovne podele pneumatskih komparatora u zavisnosti od principa rada. Postoje: jenokomorni pneumatskom komparatori sa pijeometrijskom cevi, pneumatski komparator sa manometrom, komparator sa rotametrom, diferencijalni pneumatski komparator itd.

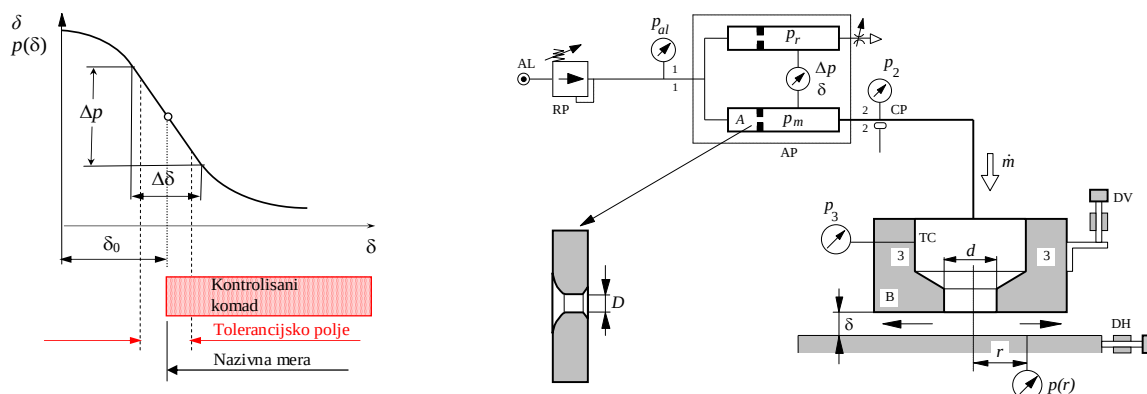
Zbog velike tačnosti, jednostavnog rukovanja, lakog održavanja, ovi uređaji su dominantni u velikoserijskoj proizvodnji za kontroli mašinskih delova. Koriste se za kontrolu: visine, debljine, dubine, krivine, prečnika, prečnika žice, promene debljine, ovalnosti, trogranosti, poligonalnosti, normalnosti površina normalnosti ose otvora, normalnosti ose čeonu površine, iskošenje čeonu površine, srednjeg prečnika otvora, ovalnost otvora – razlika prečnika $x_1 - x_2$, konusnost i rastojanje osa vratila, zbira $x_1 + x_2$ i razlike $x_1 - x_2$ dveju geometrijskih veličina. Pored toga što se diferencijalni komparatori koriste za kontrolu pojedinačnih mašinskih delova, takođe se koriste kao deo uređaja koji kontroliše više mera istovremeno radi sparivanja. Tako postoje uređaji za izradu sparujućih delova, primer izrada klipa za već urađen cilindar. Takođe su osnova kod preprocesnih i posle procesnih uređaja, sparujućih automata itd. To su selektori za razvrstavanje kuglica kotrljajnih ležaja na osnovu mera spoljašnjeg i unutrašnjeg prstena.

Na kvalitet kontrole mašinskih delova pneumatskim komparatorom dominantan uticaj imaju pritisak napajanja i geometrija izlazne mlaznice. Sprovedena eksperimentalna istraživanja pokazuju da vrtložna zona strujanja vazduha koja se javlja ispod vrha izlazne mlaznice se povećava sa povećanjem pritiska napajanja p_a . Takođe, smanjenje ove zone ili njeno potpuno eliminisanje se postiže promenom vrha izlazne mlaznice.

Dragiša Skoko i drugi (2008) dali su razvoj diferencijalnih pneumatskih uređaja i njihova upotreba u metrologiji. Diferencijalni pneumatski uređaj se koristi za kontrolu kvaliteta mašinskih delova u pogledu tačnosti dimenzija, položaja i oblika. Ovi uređaji imaju dominantnu primenu u kontroli mašinskih delova u velikoserijskoj proizvodnji, zbog velike tačnosti, pouzdanosti, jednostavnog rukovanja i održavanja. Tačnost i pouzdanost kontrole ovih uređaja zavisi od geometrije izlazne mlaznice i dimenzija merne glave. U radu je dat postupak određivanja dimenzija merne glave za kontrolu spoljašnjih mera. Analiziran je uticaj pneumatske osetljivosti i odstupanja kontrolisanog mašinskog dela na izbor dimenzija merne glave.

Za dobijanje karakteristika pneumatskog komparatora koristi se instalacija koja predstavlja diferencijalni pneumatski uređaj - komparator. Strujni prostor δ između izlazne mlaznice i površine mašinskog dela koji se kontroliše, predstavlja mikrokanal slika 2.72. Strujanje u mikrokanalima je vrlo komplikovano, zbog toga, sva eksperimentalna merenja u pneumatskoj metrologiji se baziraju na merenju polja pritiska na površini mašinskog dela koji se kontroliše. Detaljan opis instalacije je dat u radu. Vazduh pod pritiskom izlazi iz mlaznice M i udara o površinu komada K čija se dimenzija kontroliše, slike 2.71. Pritisak p koji se meri na površini komada (totalni ili zaustavni pritisak), zavisi od više faktora i to od: pritiska napajanja p_a , prečnika prigušnice merne glave D , geometrijskog oblika izlazne mlaznice M, radijalne kordinate r i aksijalnog rastojanja izlazne mlaznice od površine mernog komada δ .

Dijagram zavisnosti $p(\delta)$ prikazan na slici 2.71. Za $\delta=0$, pritisak ima maksimalnu vrednoost, tj. ima vrednost p_a . Sa povećanjem rastojanja δ pritisak naglo opada. Najveći pad pritiska je na **linearnom** delu zavisnosti $p(\delta)$ slika 2.72. Dalje, sa povećanjem vrednosti δ pritisak opada, zavisnost je nelinearna. Upravo, pravolinijski deo dijagrama $p(\delta)$, gde je linearna zavisnost pritiska od rastojanja δ , tj. dimenzija komada, koristi se u pneumatskoj metrologiji za kontrolu mašinskih delova. U pneumatskoj metrologiji može da se koristi i nelinearni deo dijagrama ali nije našao primenu radi potrebe uvođenja (poznavanja) funkcije $p(\delta)$.

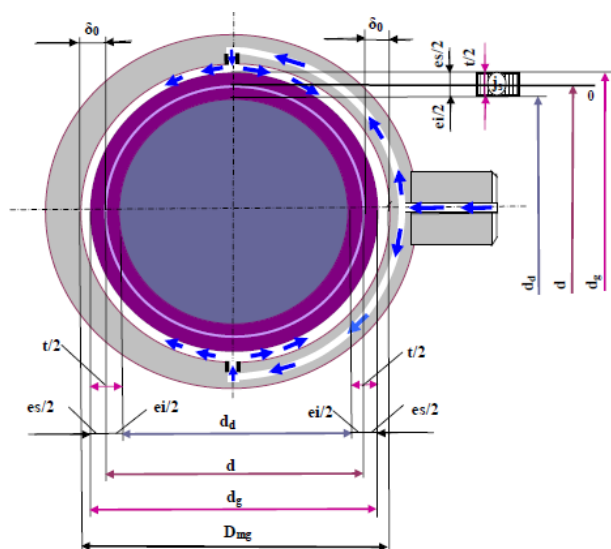


slika 2.71. Prikaz izlazne mlaznice i Slika 2.72 Šema merne instalacije
dijagram zavisnosti pritiska od rastojanja
mlaznice i mernog komada

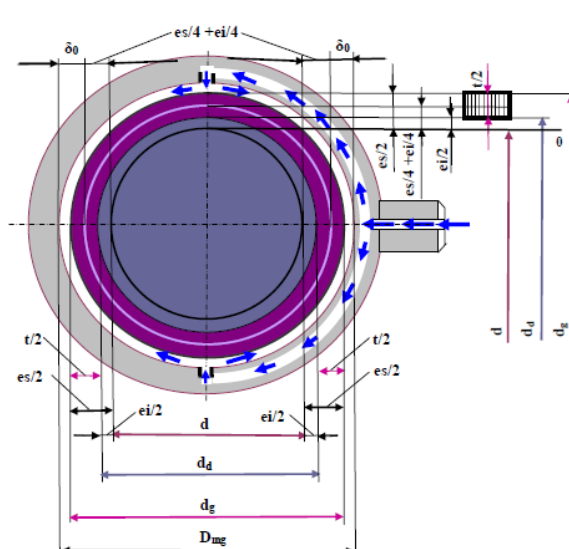
Pneumatski uređaj za kontrolu dimenzija je specijalan manometar sa skalom, koji umesto skale pritiska ima skalu za očitavanje zazora δ (rastojanje vrha mlaznice i površine komada koji se kontroliše). Pneumatski komparator je transformisani manometar. Za zadati pritisak napajanja p_a , izabrani prečnik prigušnice D i izabranu mlaznicu M , na uređaju se očitava vrednost zazor kome odgovara vrednost pritiska. Polje pritiska na površini mašinskog dela koji se kontroliše zavisi od geometrije izlazne mlaznice. Analizom uticajnih faktora na polje pritiska, bira se takva mlaznica da se potpuno eliminiše potpritisak na komadu koji se kontroliše ili da taj pritisak bude, ako je moguće, što manji. Pojava potpritiska na mernom komadu je nepoželjna zbog skupljanja nečistoća, koje remeti ispravan rad komparatora. Takođe pogodnim odabirom geometrije izlazne mlaznice teži se da polje potpritiska bude što dalje od ose mlaznice. Analiza polja pritiska na rad pneumatskog diferencijalnog komparatora je data u radu.

U radu je data skica određivanje prečnika merne glave za kontrolu spoljašnjih mera i to:

- kada je tolerancijsko polje iznad nulte linije, slika 2.74
- kada je tolerancijsko polje ispod nulte linije i.
- kada je nulta linija prolazi kroz tolerancijsko polje, slika 2.73



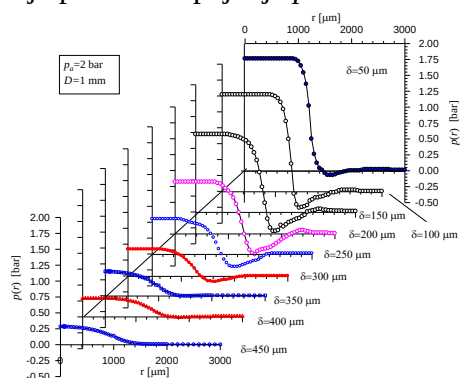
Slika 2.73 Prikaz simetričnog tolerancijskog polja spoljašnje mere [5]



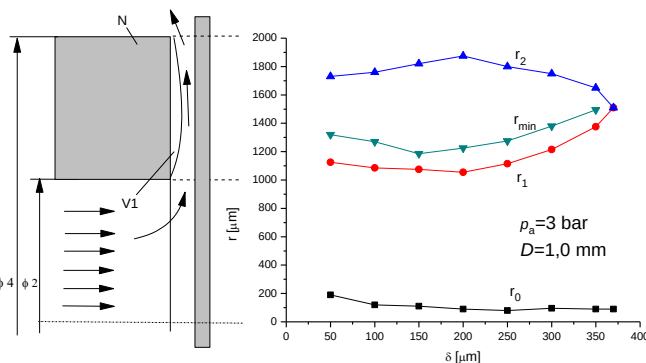
Slika 2.74 Prikaz nesimetričnog tolerancijskog polja spoljašnje mere [5]

D. Skoko i drugi (2011) su analizirali uticaj različitih parametara na rad pneumatskog komparatora. U tu svrhu koristi se eksperimentalna instalacija koja omogućava variranje pritiska napajanja komprimovanog vazduha p_0 i prečnika mlaznice merne grane pneumatskog komparatora. Merenjem su dobili tipične raspodele pritiska na kontrolisanom komadu u aksijalnom i radijalnom pravcu i odredili gde su moguća mesta deponovanja finih nečistoća zaostalih u procesu obrade i kolika je veličina ove zone. Posebno je obrađena pneumatska osetljivost i utvrdili su da zavisi od prečnika mlaznice merne grane i pritiska napajanja, i da je pri jednom prečniku ta zavisnost linearna sa pritiskom napajanja i da raste njegovim povećanjem. Takođe su utvrdili da pneumatska osetljivost raste sa smanjenjem prečnika mlaznice merne grane.

Zona potpritiska koja se javlja na dijagramima radijalne raspodele pritiska $p(r, \delta)$, odgovara veličini vrtložne zone V1 u kojoj usled dugotrajnog rada nastaje deponovanje nečistoća zaostalih od procesa obrade kontrolisanih komada. Ova zona se uglavnom nalazi ispod prstenastog dela izlazne mlaznice, tj ispod frontalne površine mlaznice. Najveća je pri najmanjem aksijalnom rastojanju mlaznice δ . Povećanjem δ zona potpritiska se smanjuje i za $\delta = 370 \mu\text{m}$ potpuno isčezava za uslove da je pritisak napajanja $p = 2 \text{ bar}$ i $D = 1 \text{ mm}$.



Slika. 2.75 Raspored pritiska na ravnom zidu za $p_0 = 2 \text{ bar}$ i $D = 1 \text{ mm}$



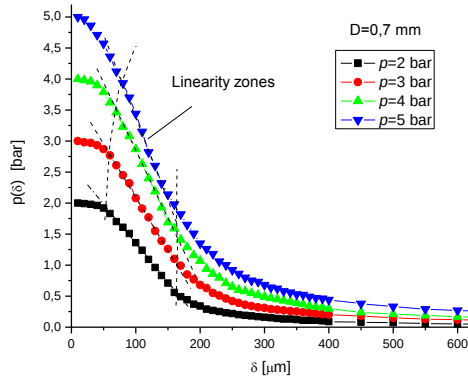
Slika. 2.76 Veličina parametara dijagrama $p = p(r)$ u zavisnosti od aksijalnog rastojanja mlaznice δ

Veličina zaustavne zone r_0 , slika 2.75, na kontrolisanom komadu, u kojoj je pritisak približno konstantan, opada sa porastom rastojanja δ , ali pri rastojanjima δ navedenim u ovom radu zaustavna oblast se ne svodi na zaustavnu tačku, slika 2.76. Pneumatska osetljivost zavisi od pritiska napajanja vazduha p_0 i od prečnika mlaznice merne grane D , slika 2.77.

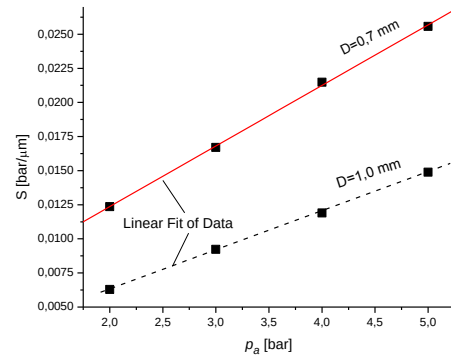
Pneumatska osetljivost je veća pri manjem prečniku mlaznice merne grane i za jednu vrednost prečnika D linearno raste sa porastom pritiska napajanja, slika 2.78, a te funkcionalne zavisnosti za prečnike $D=0,7$ mm i $D=1,0$ mm definisane su izrazima (35) i (36).

$$S = (3,659 + 4,442 \cdot p_a) 10^{-3} \quad [\text{bar}/\mu\text{m}], \quad \text{za } D=0,7 \text{ mm} \quad (35)$$

$$S = (0,50 + 2,869 \cdot p_a) 10^{-3} \quad [\text{bar}/\mu\text{m}], \quad \text{za } D=1,0 \text{ mm.} \quad (36)$$



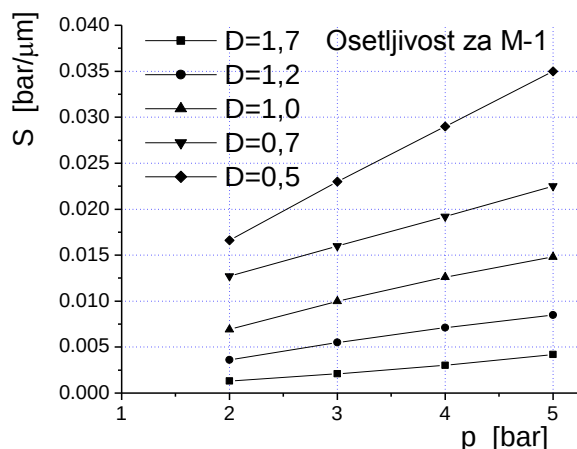
Slika. 2.77 Aksijalna raspodela pritiska $p(\delta)$ za pritiske napajanja $p_0=2,3,4$ i 5 bar



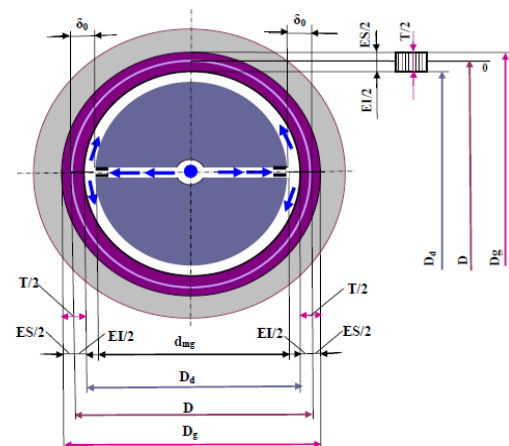
Slika. 2.78 Pneumatska osetljivost u funkciji pritiska napajanja za $D=0,7$ i $D=1,0$ mm.

D. Skoko i drugi (2013) analizirali su uticaj faktora na rad pneumatskog komparatora. Instalacija koja se koristi u ovu svrhu omogućava promenu pritiska napajanja, promenu izlazne mlaznice i prečnika mlaznice merne komore komparatora. Posebna pažnja su posvetili pneumatskoj osetljivosti i zaključili da zavisi od pritiska napajanja i prečnika mlaznice u mernoj komori. Utvrđeno je da pneumatska osetljivost raste sa smanjenjem prečnika mlaznice u mernoj komori. Analizirali su uticaj pneumatske osetljivosti i odstupanja kontrolisanog mašinskog dela na izbor dimenzija merne glave. Na dijagramu slika 2.79 pokazali su da se pneumatska osetljivost povećava povećanjem pritiska napajanja p_0 i smanjenjem prečnika prigušnice u mernoj komori. Takođe su dali izbor prečnika merne glave pneumatskog komparatora za kontrolu unutrašnjih mera mašinskih delova. Prvi slučaj je određivanja prečnika merne grane za simetrično tolerancijsko polje, slika 2.80, gde su gornje i donje granično odstupanje iste veličine po apsolutnoj vrednosti, $ES = EI$. Prečnik merne glave je dat izrazom

$$d_{mg} = D - 2 \delta_0 \quad (37)$$



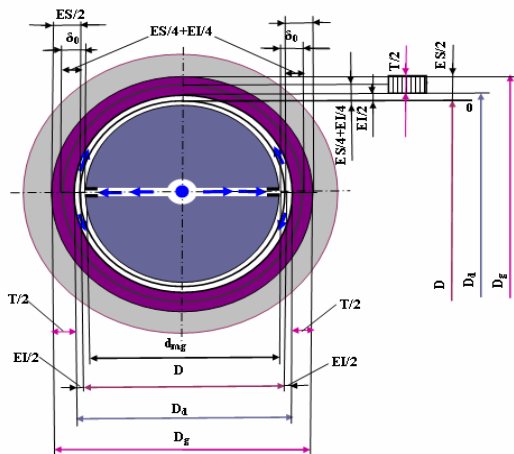
Slika. 2.79 Pneumatska osetljivost izlazne mlaznice M-1



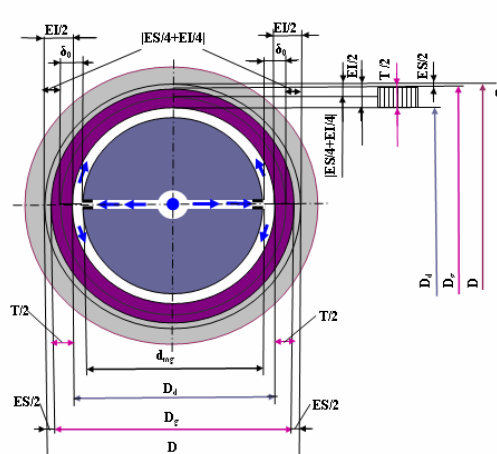
Slika 2.80 Prečnik merne glave za simetrično tolerancijsko polje unutrašnje mere

Kada je u pitanju nesimetrično tolerancijsko polje koje se nalazi iznad nazivne mere, slika 2.81, radi se preslikavanje tolerancijskog polja na tolerancijsko polje J_S . Ovo polje se naziva ekvivalentno tolerancijsko polje, a postiže se povećanjem prečnika merne glave za vrednost $C = EI/2 + ES/2$. Izraz za prečnik merne glave je

$$d_{mg} = D - 2\delta_0 + (EI/2 + ES/2) \quad (38)$$



Slika.2.81 Prečnik merne glave za nesimetričnog tolerancijskog polja unutrašnje mere - tolerancijsko polje iznad nulte linije



Slika 2.82 Prečnik merne glave za nesimetričnog tolerancijskog polja unutrašnje mere - tolerancijsko polje ispod nulte linije

Za nesimetrično tolerancijsko polje koje se nalazi ispod nazivne mere, slika 2.82, odstupanja su negativna. Dato tolerancijsko polje se preslikava u tolerancijskog polja i naziva se ekvivalentno tolerancijsko polje, a postiže se smanjenjem prečnika merne glave za vrednost:

$$E = |EI/2 + ES/2|.$$

Prečnik merne glave je:

$$d_{mg} = D - 2\delta_0 - |ES/2 + EI/2| \quad (39)$$

3 EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA

Pneumatska metrologija je našla svoju nezamenljivu primenu u kontroli kvaliteta dimenzija mašinskih delova, naročito kod visokoserijske proizvodnje u automobilske industriji, ili gde se traži velika tačnost kontrole kvaliteta izrade delova kao što je to u avio industriji. Primene pneumatske metrologije su brojne, i to za kontrolu spoljašnjih i unutrašnjih mera, paralelnosti, cilindričnosti ili konusnosti površina, mašinskih delova jednostavne ili složene geometrije. Detalji navedenih primena mogu se naći kod proizvođača pneumatskih metroloških sistema, npr. kod jedne od vodećih firmi iz ove oblasti – francuske firme „ETAMIC“. Princip rada pneumatske metrologije je zasnovan na činjenici da kod mlaza stišljivog vazduha koji udara u čvrstu pregradu, slika 3.1, pritisak zavisi od rastojanja δ između mlaznice i zida kontrolisanog komada, s tim što se pri primeni koristi samo linearni deo krive $p(\delta)$. Nagib linearnog dela krive definiše pneumatsku osetljivost, koja predstavlja veoma važnu karakteristiku pneumatskog komparatora.

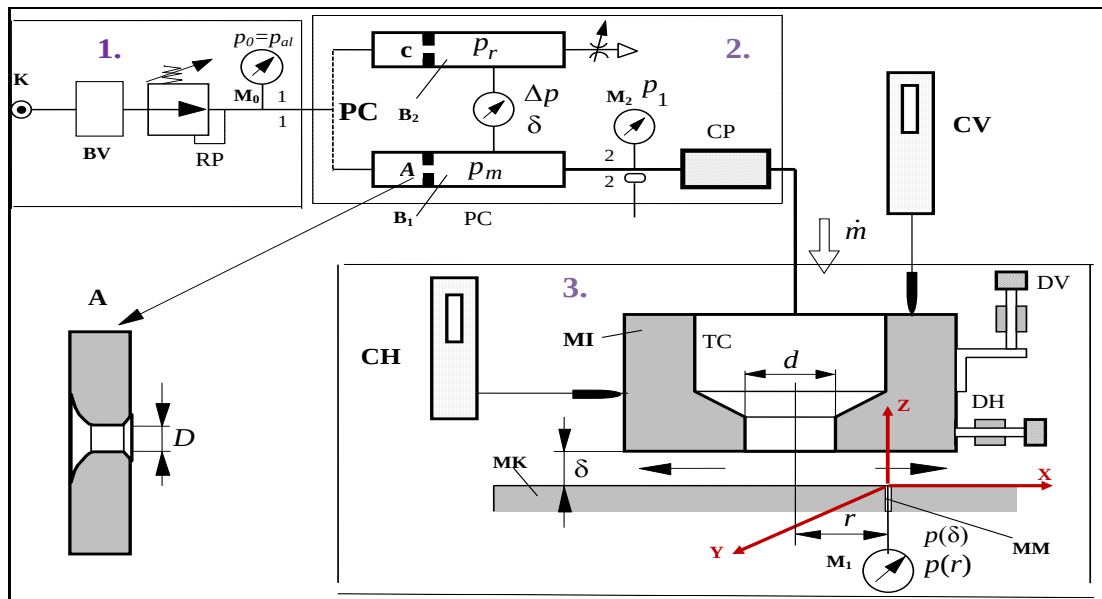
Uobičajeno je da se za pneumatsku kontrolu koristi diferencijalni pneumatski uređaj, koji ima mernu (B_1) i regulacionu granu (B_2), slika 3.1, čiji je princip rada dao Fortier (1950). Princip rada se sastoji u primeni kritičnog stišljivog strujanja vazduha u grlu mlaznice A, prečnika D , merne grane, ili između mlaznice MI kroz koju vazduh ističe i čvrste površine mašinskog dela koji se kontroliše. Na karakteristike pneumatskog komparatora utiču brojni parametri i to: prečnik mlaznice u uređaju, prečnik i geometrija izlazne mlaznice, pritisak napajanja itd. Do konkretnog uticaja pojedinih veličina na kvalitet pneumatske kontrole može se doći eksperimentalno i numeričkom simulacijom. Zbog veoma malog rastojanja δ između izlazne mlaznice i površine mernog komada MK, koje je pri realnoj primeni pneumatske metrologije manje od $\delta < 300 \mu\text{m}$, jedino je korektno meriti pritisak na površini mernog komada MK i maseni protok kroz mlaznicu, Crnojević et al (1997), tako da se eksperimentalne metode baziraju na merenju navedenih veličina. Do uticaja geometrije izlazne mlaznice na karakteristike pneumatskog komparatora dolazi se numeričkom simulacijom nestišljivog strujanja, Roy (1997) i Roy i dr. (2003). Za pneumatsku osetljivost, pokazano je da zavisi od prečnika D mlaznice, i to tako da porast ovog prečnika smanjuje osetljivost, Crnojević et al. (1997).

3.1 Merna instalacija

Za (proveru) utvrđivanje karakteristika pneumatskog mernog sistema osmišljena je i napravljena instalacija koja predstavlja diferencijalni pneumatski uređaj za merenje polja pritiska. Strujni prostor između mlaznice i površine mašinskog dela koji se kontroliše, predstavlja mikrokanal. Strujanje u mikrokanalu je vrlo komplikovano, a pouzdano merenje brzine, do sada poznatim metodama je izuzetno teško. Zbog toga, sva eksperimentalna merenja u pneumatskoj metrologiji su merenja polja pritiska na površini mašinskog dela koji se kontroliše. Istraživanja u radu su sprovedena pod pretpostavkom da su površine mašinskih delova ravne i glatke, tj. zanemaren je uticaj hrapavosti površina. Eksperimentalna istraživanja u okviru ove doktorske disertacije

obavljena su u laboratoriji Katedre za Opšte mašinske konstrukcije na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

Instalacija za merenje, prikazana na slika 3.1, sastoji se iz više delova. Prvi deo čine: kompresor K, regulator pritiska RP, manometar M_0 i boce BV za skladištenje sabijenog vazduha. Ovaj segment treba da obezbedi vazduh konstantnog pritiska bez čestica prašine i vode. Kompresor je klipni dvocilindrični „Prva petoljetka“ TIP KAA 022, koji ima mogućnost sabijanja vazduha do $p=8$ bar. Pogoni ga elektromotor $P=2,2$ KW i $n=1430$ min⁻¹. Eksperiment je rađen sa pritiscima napajanja: $p_0=p_{al}=1$ bar; 2 bar; 3 bar; 4 bar i 5 bar. U stranoj literaturi pritisak napajanja se obeležava sa p_{al} . Ovaj interval pritiska se koristi u praksi u pneumatskoj metrologiji. Za prečišćavanje vazduha od mehaničkih nečistoća koristi se grubi filter na usisnoj grani kompresora i fini uljni filter na prečistaču. Prečistač je „Prva petoljetka“ TIP RA1 06 Z, Industrija hidraulike i pneumatike Trstenik, Srbija. Na istom prečistaču je boca za sakupljanje čestica vode. Prečišćen vazduh ulazi u regulator pritiska kojim se reguliše i zadaje radni pritisak. Regulator pritiska je „NORGREN“ TIP 11 – 818 – 981 tačnosti 0,001 bar, sa radnim opsegom od $p_0=0$ bar do 5 bar. Ulazni pritisak u diferencijalni komparator p_0 meri se M_0 elektronskim manometrom KELLER EL – 73 opsega merenja $p_0=-0,5$ bar do 5 bar, sa tačnošću očitavanja $p=0,001$ bar. Pritisci u radijalnom i aksijalnom pravcu se mere manometrom DMI 04 P čiji su tačnost 0,001 bar i opseg merenja $p=-0,5$ bar do 5 bar.



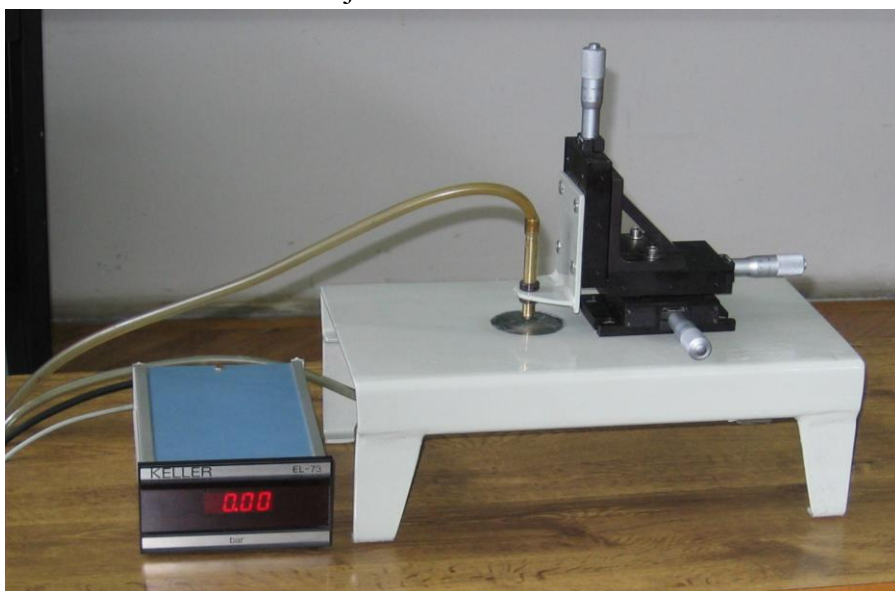
Slika 3.1. Shematski prikazi merne instalacije: K - kompresor, BV – Rezervoar za vazduh, RP – regulator pritiska, M_0 –manometar na ulazu u komparator, PC – diferencijalni pneumatski komparator, B_1 – merna komora, A – mlaznica u mernoj komori, C – mlaznica u referentnoj komori B_2 – referentna komora, M_2 – manometar na ulazu u merilo protoka, CP – merilo protoka, DV – mikrometar za vertikalno pomeranje, DH – mikrometar za horizontalno pomeranje, CV – akvizicija vertikalnog pomeranja, CH akvizicija horizontalnog pomeranja, MK – merni komad (mašinski deo), MI – izlazna mlaznica, MM – merno mesto, M_1 - manometar za merenje pritiska na površini mernog komada

Drugi deo instalacije je diferencijalni pneumatski komparator PC, čiji je proizvođač francuska firma ETAMIC tip TPE 901. Sastoji se iz referentne i merne komore. Na ulazu u diferencijalni pneumatski komparator, deo vazduha odlazi u referentnu granu B_2 u kojoj je mlaznica C. Drugi deo vazduha odlazi u mernu granu B_1 sa mlaznicom A prečnika D . U referentnoj grani pritisak se održava konstantnim i zavisi od pritiska napajanja p_0 . U mernoj grani je mlaznica A prečnika D u čijem grlu se ostvaruje kritično strujanje. Mlaznica A je promenljivog prečnika i ima vrednosti:

$D=0,5$ mm; 0,7 mm; 1,0 mm; 1,2 mm; 1,4 mm i bez mlaznice ($D=4,0$ mm). Promenom prečnika mlaznice A menja se pneumatska osetljivost uređaja. Za potrebe nekih merenja, između izlazne mlaznice i pneumatskog komparatora, postavlja se merilo protoka CP kojim se meri zapreminski protok vazduha i manometar M_2 za merenje pritiska vazduha na ulazu u merilo protoka.

Treći deo je pozicioner sa izlaznom mlaznicom MI, slika 3.2. Pozicioner je mehanički mikrometerski uređaj sastavljen od tri mikrometra postavljena po tri međusobno upravna pravca. DH - mikrometar pomera izlaznu mlaznicu IM u horizontalnom pravcu tj. u pravcu x-ose. DU - mikrometar pomera izlaznu mlaznicu IM u uzdužnom pravcu tj. u pravcu ose y, a DV- mikrometar pomera izlaznu mlaznicu u vertikalnom pravcu tj. u pravcu z-ose. Pozicioner omogućava dovođenje mlaznice u potrebnu tačku sa tačnošću 0,001 mm. Na ravnoj glatkoj površini postolja je merno mesto MM, slika 3.1 definisano prečnikom $d=0,2$ mm, koje je sa donje strane spojeno plastičnim cevovodom za manometar. Manometar M_1 pokazuje pritisak p na ravnoj površini glatkog mašinskog dela. Prečišćen vazduh, zdatog pritiska, plastičnim cevovodom se sprovodi u diferencijalni pneumatski komparator PC, deo 2. slika 3.1. Iz merne komore B_1 diferencijalnog pneumatskog komparatora, vazduh prolazi kroz merilo protoka CP a odatle u izlaznu mlaznicu MI i dalje na površinu mernog komada.

Za potrebe eksperimenta upotrebljava se standardna mlaznica M-1 sa spoljašnjim prečnikom vrha $D=4$ a unutrašnji $d=2$ mm. Za kontrolu finog pomeranja mlaznice, koristi se elektronski kontrolni uređaj fabrike ETAMIC TIP CZS 400, koji omogućava očitavanje pomeranja sa tačnošću 0,0005 mm ($0,5 \mu\text{m}$), opsega 0,500 mm. Za merenje pritiska na površini mernog komada koristi se elektronski manometar DMI 04P, opsega merenja $p=-0,5$ bar do 5 bar. Tačnost manometra je 0,001 bar. Za potrebe merenja protoka koristi se merilo protoka: Gas Mass Flow Controllers GFC-2106. Oblast primene merila protoka je, za pritiske $p=0,35$ bar–4,5 bar. Opseg merenja protoka je od $\dot{V}=0$ l/min - 500 l/min sa tačnošću očitavanja $\dot{V}=1$ l/min.



Slika 3.2. Fotografija dela pneumatskeog uređaja

Instalacija omogućava merenje polja pritiska na površini mernog komada u zavisnosti od: pritiska napajanja p_0 , rastojanja izlazne mlaznice od površine mernog komada δ , prečnika mlaznice A u mernoj komori B_1 diferencijalnog pneumatskog komparatora i geometrije izlazne mlaznice MI. Polje pritiska na površini mernog komada zavisi od promene položaja izlazne mlaznice MI od površine mernog komada, odnosno od njenog odmicanja u pravcu osa z i x. Merenjem pritiska radijalnim (horizontalnim) pomeranjem izlazne mlaznice MI, u pravcu x-ose, u odnosu na merno

mesto, nastaje radijalno polje pritiska. Aksijalno polje pritiska nastaje pomeranjem izlazne mlaznice u pravcu z-ose, za aksijalno rastojanje δ . Postojeća instalacija omogućuje zakretanje izlazne mlaznice u odnosu na pravac upravan na površinu mernog komada, položaj $\alpha=0^0$. Merenje pritiska je vršeno za slučajeve da izlazna mlaznica odstupa od normalnog položaja za 1^0 redosledno do 7^0 , sa korakom 1^0 . Eksperiment je rađen i sa vihornim strujanjem vazduha u izlaznoj mlaznici. Za dobijanje vihornog strujanja vazduha u izlaznu mlaznicu su postavljeni zavojni elementi različitog koraka. U eksperimentu su korišćeni zavojni elementi sa jednim i više zavoja, $h=1$ do $h=7$ koraka. Da bi se dobilo što jače vihorno strujanje, urađena je mlaznica sa komorom u koju vazduh ulazi tangentno - ciklon. Vrh mlaznice ima geometrijske karakteristike standardne izlazne mlaznice.

U toku eksperimenta mereni su: pritisak u radijalnom pravcu $p=p(r)$, pritisak u aksijalnom pravcu (totalni) $p_{tot}=p_t=p(\delta)$, pritisak napajanja p_0 , protok vazduha, pritisak na ulazu u merilo protoka, temperatura vazduha u izlaznoj mlaznici MI i temperatura mernog mašinskog dela. Pomeranjem mlaznice MI od mernog mesta MM u horizontalnom pravcu, odnosno u pravcu ose x , određuje se raspodela pritiska u radijalnom pravcu $p=p(r)$. Pomeranjem mlaznice MI od mernog mesta MM u vertikalnom pravcu, odnosno u pravcu ose z , određuje se raspodela pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$, u odnosu na geometriju mlaza.

3.1.1 Merna komora B_1

Merna komora je osnovni deo diferencijalnog pneumatskog uređaja. U mernoj komori je mlaznica A prečnika D koja ima ulogu prigušnice. Za eksperimentalna istraživanja u ovom radu korišćeno je sedam prigušnica sa unutrašnjim prečnikom: $D=0,5$ mm; 0,7 mm; 1,0 mm; 1,2 mm; 1,4 mm; 1,7 mm i 4,0 mm. Prigušenje je obrnuto proporcionalno prečniku prigušnice D . Prigušnica ima ulogu da smanji protok vazduha kroz diferencijalni pneumatski komparator i ulazni pritisak vazduha u mernoj komori koji se dalje prenosi na izlaznu mlaznicu. Smanjenje pritiska u mernoj komori se manifestuje promenom pritiska na površini komada koji se kontroliše. Krive zavisnosti totalnog pritiska i rastojanja vrha izlazne mlaznice od površine mernog komada $p=p(\delta)$ su direktna funkcija geometrije prigušnice. Oblast primene pneumatske metrologije je ograničena pravolinijskim delom ovog dijagrama zbog tehnoeekonomskih razloga. Pogodnim odabirom prigušnice dobija se odgovarajuća karakteristika pneumatskog diferencijalnog uređaja - osetljivost uređaja.

3.1.2 Merilo protoka vazduha

Pri merenju zaustavnog pritiska $p=p_t$ na površini mašinskog dela koji se kontroliše meren je protok vazduha merilom protoka Gas Mass Flow Controllers GFC-2106 proizvođa Dwyer iz SAD. Oblast primene merila protoka je za pritiske $p=0,35-4$ bar. Opseg merenja protoka je od $\dot{V}=1$ l/min - 500 l/min sa tačnošću očitavanja $\dot{V}=1$ l/min. Protok vazduha je meren istovremeno kada je meren zaustavni pritisak za sve vrednosti pritiska napajanja, $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar. Takođe protok je meren za sve vrednosti prečnika prigušnice, $D_{1...7}=4$ mm; 1,7 mm; 1,4 mm; 1,2 mm; 1,0 mm; 0,7 mm i 0,5 mm. Merenje pritiska je vršeno za slučajeve da izlazna mlaznica odstupa od normalnog položaja za 1^0 redosledno do 7^0 . Eksperiment je rađen sa vihornim strujanjem vazduha na izlaznoj mlaznici. Za dobijanje vihornog strujanja, u izlaznu mlaznicu se umeće zavojnica različitog koraka. U eksperimentu je korišćena zavojnica sa korakom od 0 do 7 koraka. Da bi se dobilo što jače vihorno strujanje, urađena je mlaznica sa komorom u koju vazduh ulazi tangentno. Vrh mlaznice ima geometrijske karakteristike standardne izlazne mlaznice.

Princip rada merila protoka

Merila protoka su uređaji koji služe za merenje protoka fluida. U ovom slučaju meri se protok vazduha zapreminskim merilom protoka, mada može da se meri i maseni protok. Princip rada zapreminskog merila protoka zasniva se na merenju brzine ili zapremine fluida. Upravo, ovde leži i nedostatak zapreminskih merila protoka jer su osetljivi na promenu temperature, pritiska i vlažnosti fluida. Upotrebom masenih merila protoka ovi nepoželjni efekti se izbegavaju ili smanjuju. Princip rada zapreminskog merila protoka zasniva se na promeni električnih veličina sa promenom protoka. Ovde je primenjeno merilo protoka sa by-pass toplom kapilaram, (enr. By-pass type of a thermal mass flowmeter). Metoda se zasniva na indirektnom merenju protoka vazduha.

Osnovne fizičko tehničke karakteristike merila protoka su: obezbeđuje tačno merenje, imaju tačnost do 0,1% od merene zapremine, imaju dobru ponovljivost merenja, veliki korisni merni opseg, obezbeđuju visoku pouzdanost i dugotrajnu eksploataciju, malo osetljiv na kontaminaciju, pad pritiska je veoma mali (zanemarljiv), koristi se i za korozivne gasove, imaju mogućnost digitalne komunikacije.

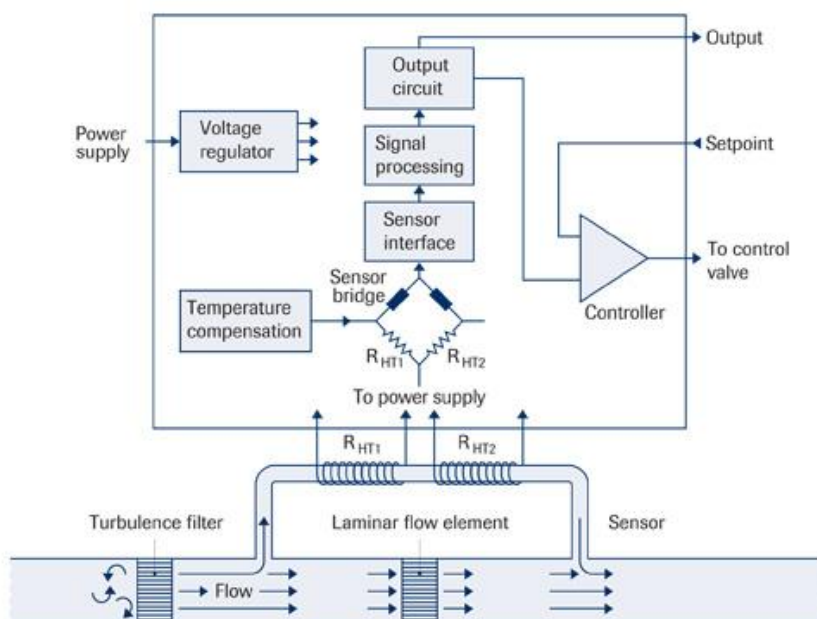
Vazduh koji ulazi u merilo protoka ima složeno kretanje, laminarno i turbulentno. Na ulazu u merilo protoka složeno kretanje vazduha se prevodi u laminarno posredstvom specijalno konstruisanog uređaja, bilo da se vazduh provodi kroz cevčice ili sprovodne pravougaone kanale određenih dimenzija. Vazduh koji ulazi u merilo protoka se deli na dva dela. Manji deo struji kroz sekundarni kanal, kroz kapilarnu čeličnu cev. Ostatak vazduha struji kroz primarnu cev. Kapilara je tankog zida i na ulazu i izlazu nalaze se senzori temperature R_{HT1} i R_{HT2} , slika 3.4. Na sredini kapilare, između senzora temperature, smešten je mikrogrejač, koji zagreva sredinu kapilarne cevčice. To su fino namotani grejači povezani sa Vitstonovim mostom. Na ulazu u primarni i sekundarni kanal nalaze se mlaznice. Geometrija mlaznica primarnog i sekundarnog kanala su tako koncipirani da je uvek obezbeđeno laminarno strujanje.



Slika 3.3. Fotografija merila protoka Dwyzer GFC – 2106

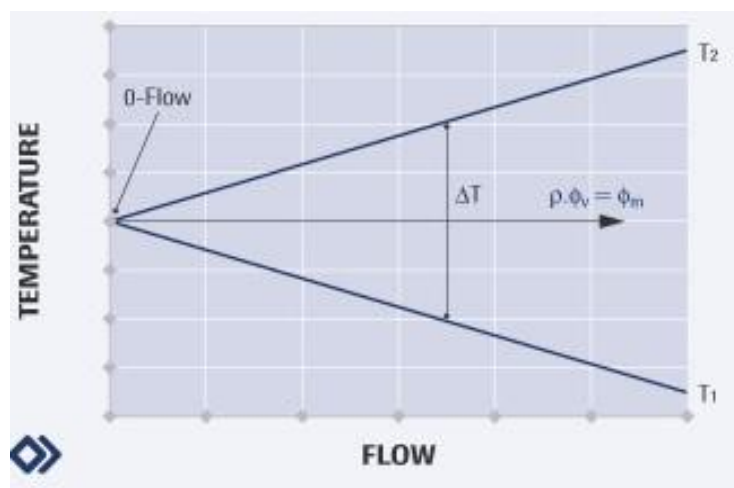
Saglasno principima mehanike fluida strujne veličine u komorama su proporcionalne prečnicima mlaznica na ulazu u komore. Strujne veličine u komorama su direktno proporcionalne totalnom pritisku vazduha kroz merilo protoka. Vazduh u sekundarnom kanalu, kanalu sa senzorom, prolazi kroz dva polja u kojima se meri temperatura gasa i polja u kojima se gas zagreva. Na senzorima temperature R_{HT1} i R_{HT2} temperatura se menja sa promenom protoka. Kada nema protoka kroz merilo protoka, temperatura je ista na oba senzora, a toplotni fluks je nula. Temperatura vazduha na

prvom senzoru je T_1 a na drugom senzoru T_2 . Temperatura gasa na mestu grejača je T_G i ona je uvek veća od temperature na mestu senzora. Temperature na grejačima su iste, tj. $T_1 = T_2$ a $\Delta T = T_1 - T_2 = 0$.



Slika 3.4. Šematski prikazi merila protoka (www.dwyer-inst.com)

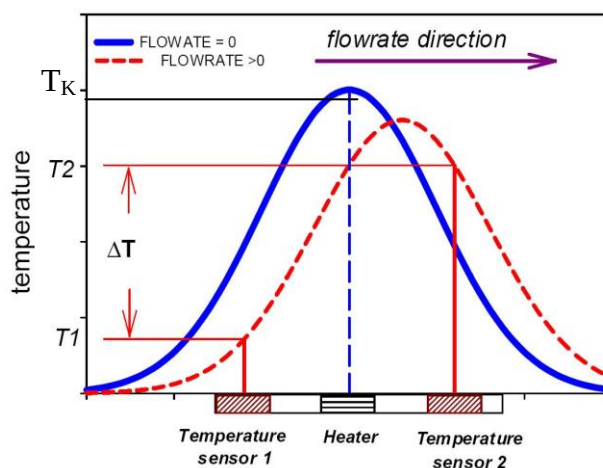
Na slici 3.4 dat je dijagram zavisnosti temperature na senzorima R_{HT1} i R_{HT2} . Kada nema protoka gasa kroz merilo protoka, temperature na senzorima su iste i razlike temperatura nema. Na dijagramu je ovo predstavljeno početnom tačkom 0. Zavisnost temperature gasa duž kapilare je data na dijagramu, slika 3.5, punom linijom. Temperaturska zavisnost odgovara liniji normalne raspodele – Gausova linija. Vidi se da je najveća temperatura na mestu grejača T_G . Temperatura sa grejača se podjednako prenosi duž kapilare, tako da se na senzorima očitava ista temperatura, za slučaj kada nema protoka.



Slika 3.5. Temperaturska razlika $\Delta T = T_1 - T_2$ u zavisnosti od protoka gasa (www.dwyer-inst.com)

Kada vazduh prolazi kroz merilo protoka, jedan mali proporcionalni deo vazduha struji kroz kapilarnu cev. Na mernom mestu R_{HT1} gas se zagreva, ali zbog brzine strujanja ne dostiže temperaturu T_1 već T_1' . Ta temperatura je znatno niža od temperature kada nema strujanja. Molekuli

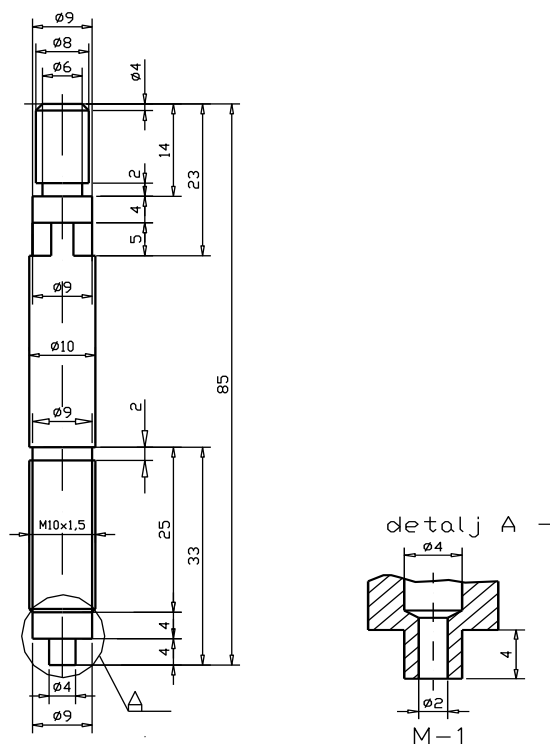
vazduha dalje se kreću kroz kapilaru i nailaze na polje grejanja. Tu je najveća razmena toplote, tako da se temperatura vazduha naglo povećava. Zbog brzine strujanja maksimalna temperatura nije u polju grejanja već je pomerena u pravcu strujanja. Sa povećanjem protoka vazduha maksimalna temperatura se udaljava od grejača ka mernom mestu 2. Za najveće protoke, temperatura T_1 je najmanja a temperatura T_2 je najveća. Takođe je najveća temperaturska razlika $\Delta T = T_2 - T_1$. Maksimalna temperatura vazduha je najniža ali je veća od temperature T_2 . Kod maksimalnog protoka vazduha najveće je odvođenje toplote sa prvog senzora, najveća je razlika zagrejanosti senzora, i najveći je toplotni fluks. Toplotni fluks koji se formira u grejačima je proporcionalan protoku fluida. Zavisnost toplotnog fluksa i protoka je linearna. Izlazni signal iz mernog uređaja je u direktnoj zavisnosti od toplote odvedene iz vazduha koji prolazi kroz mernu komoru. Izlazni signal se šalje u mikroprocesor a zatim na displej na kome se očitava protok.



Slika 3.6. Temperaturske krive pri mirovanju i kretanju gasa (www.dwyer-inst.com)

3.1.3 Izlazna mlaznica M-1

U eksperimentu je korišćena standardna kratka izlazna mlaznica M-1, Skoko (2008). Spoljašnji prečnik vrha mlaznice je $D=4$ mm, unutrašnji prečnik $d=2$ mm, dužina vrha $l_1=4$ mm, slika 3.7. Izlazna mlaznica se pričvršćuje pomoću dva zavrtnja sa finim milimetarskim navojem, koji omogućavaju stabilno pričvršćivanje na nosač mlaznice i fino podešavanje u odnosu na nosač, a samim tim u odnosu na mernu površinu. Vrh mlaznice je bez spoljašnjeg i unutrašnjeg zaobljenja i zakošenja. Ovo je osnovna mlaznica koja se koristi u eksperimentima i u literaturi je nazivaju standardna normalna mlaznica.



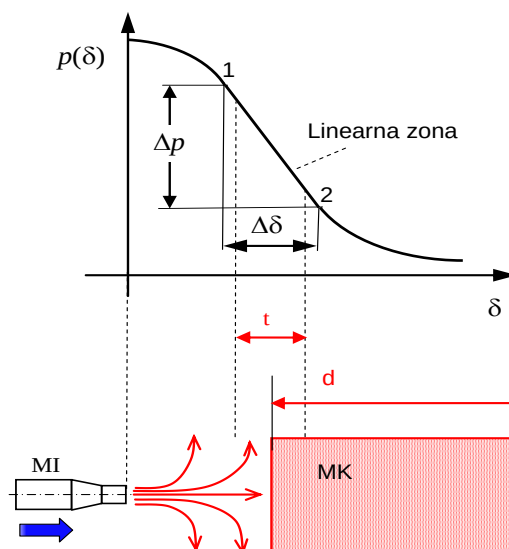
Slika 3.7. Geometrija izlazne mlaznice M-1, Skoko (2008)

3.2 Princip na kome se zasniva rad pneumatske metrologije

Vazduh pod pritiskom iz diferencijalnog pneumatskog uređaja dolazi u izlaznu mlaznicu MI. Iz nje izlazi i udara o površinu komada MK čija se dimenzija kontroliše, slika 3.8. Pritisak p koji se meri na mernom mestu MM na površini mašinskog dela MK (totalni ili zaustavni pritisak), zavisi od: pritiska napajanja p_0 , prečnika D prigušnice merne grane A, geometrijskog oblika izlazne mlaznice MI, radijalne kordinate r i aksijalnog rastojanja izlazne mlaznice od površine mernog komada δ . Merenjem pritiska u zavisnosti od vertikalnog položaja δ izlazne mlaznice MI, dobija se načelni dijagram prikazan na slici 3.8. Pritisak $p=p(\delta)$ na površini mernog komada ima najveću vrednost za vrednost aksijalnog položaja mlaznice $\delta=0$, tj. kada je mlaznica u početnom položaju. Vrednost pritiska $p=p(\delta)$ je p_0 . Za male vrednosti rastojanja δ , dijagram ima oblik krive linije, a pritisak na površini mernog komada postepeno se smanjuje i manji je od pritiska napajanja p_0 . Za veće vrednosti δ pritisak naglo opada. Povećanjem δ nastaje **linearna** zavisnost $p(\delta)$ čiji početak zavisi od stepena prigušenja tj. prečnika prigušnice u mernoj komori D i pritiska napajanja p_0 . Dalje, sa povećanjem vrednosti δ pritisak opada, zavisnost je nelinearna. Upravo, pravolinijski deo dijagrama $p(\delta)$, gde je linearna zavisnost pritiska od rastojanja δ , tj. dimenzija komada, koristi se u pneumatskoj metrologiji. U pneumatskoj metrologiji može da se koristi i nelinearni deo dijagrama ali nije našao primenu radi potrebe uvođenja (poznavanja) funkcije $p(\delta)$.

Stvarno odstupanje dužinskih mera mašinskih delova od nazivne veličine direktno utiče na veličinu rastojanja δ između izlazne mlaznice MI i površine mernog komada MK koja se kontroliše. Saglasno veličini stvarnih odstupanja dužinskih mera menja se rastojanje δ a time i veličina pritiska na površini mernog komada. Na ovaj način uspostavljena je zavisnost između pneumatske veličine pritiska fluida i mehaničke veličine stvarnih odstupanja mašinskih delova. Takođe u konkretnim izvođenjima pneumatskih komparatora ne meri se pritisak $p(\delta)$ na površini komada koji se

kontrolirše, već pritisak u komori merne grane $p_{mg}(\delta)$, koji je zbog malih strujnih gubitaka približno jednak pritisku $p(\delta)$.



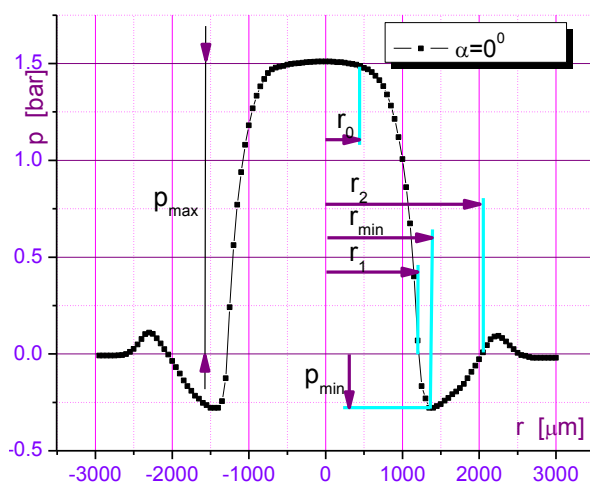
Slika 3.8 Dijagram zavisnosti pritiska na površini mernog komada od rastojanja mlaznice i merenog komada: MK - mereni komad, MI - izlazna mlaznica, Skoko (2008)

4 RASPODELE PRITISKA NA POVRŠINI KONTROLISANOG DELA U AKSIJALNOM I RADIJALNOM PRAVCU

Mlaz sabijenog vazduha izlazi iz mlaznice, udara u ravnu površinu i na njoj izaziva pritisak. Zavisno od pravca pomeranja izlazne mlaznice, raspodela pritiska može biti u radijalnom i aksijalnom pravcu. Dijagram raspodele pritiska u radijalnom pravcu dobija se kada se izlazna mlaznica, na rastojanju od ravne površine δ , pomera paralelno sa ravnom površinom duž x -ose, za veličinu r , slika 3.1. Dijagram raspodele pritiska u aksijalnom pravcu dobija se kada se izlazna mlaznica pomera aksijalno duž ose mlaznice po y -osi.

4.1 RASPODELA PRITISKA U RADIJALNOM PRAVCU

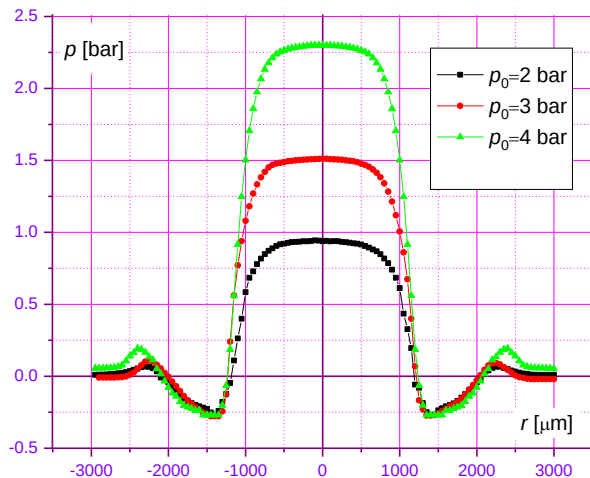
Veličina i raspored pritiska na ravnoj površini u **radijalnom** pravcu zavisi od pritiska napajanja p_0 , aksijalnog rastojanja između mlaznice i ravne površine δ , prečnika mlaznice D u radnoj komori B_1 diferencijalnog pneumatskog komparatora, oblika i dimenzija vrha izlazne mlaznice.



Slika 4.1. Osnovne veličine raspodele pritiska u radijalnom pravcu: r_0 -radijalno rastojanje za $p=p_{max}$, r_1 - i r_2 - radijalno rastojanje za $p=0$ bar, r_{min} -radijalno rastojanje za $p=p_{min}$

Uticaj oblika i dimenzije izlazne mlaznice na raspored pritiska u aksijalnom i radijalnom pravcu, obrađen je u magistarskom radu, Skoko (2008). Na slici 4.1, dat je dijagram raspodele pritiska u radijalnom pravcu sa osnovnim veličinama pritiska i odgovarajućim radijalnim veličinama. Na slici 4.2 prikazan je dijagram pritiska $p(r)$ u radijalnom pravcu pri pritisku napajanja komprimovanim vazduhom $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar za stalno aksijalno rastojanje $\delta=250$ μ m. Oblast radijalnog pomeranja mlaznice je $-3000 \mu\text{m} \leq r \leq 3000 \mu\text{m}$. Dati dijagram je referentni dijagram raspodele pritiska u radijalnom pravcu $p(r, \alpha) = p(r, 0^\circ)$, tj. to je osnova za analizu dijagrama sa nagnutom mlaznicom i mlaznicom sa vihornim strujanjem vazduha, što će biti predmet razmatranja

u nastavku disertacije. Referentna kriva radijalnog pritiska $p(r,0^0)$ je simetrična u odnosu na osu mlaza vazduha.

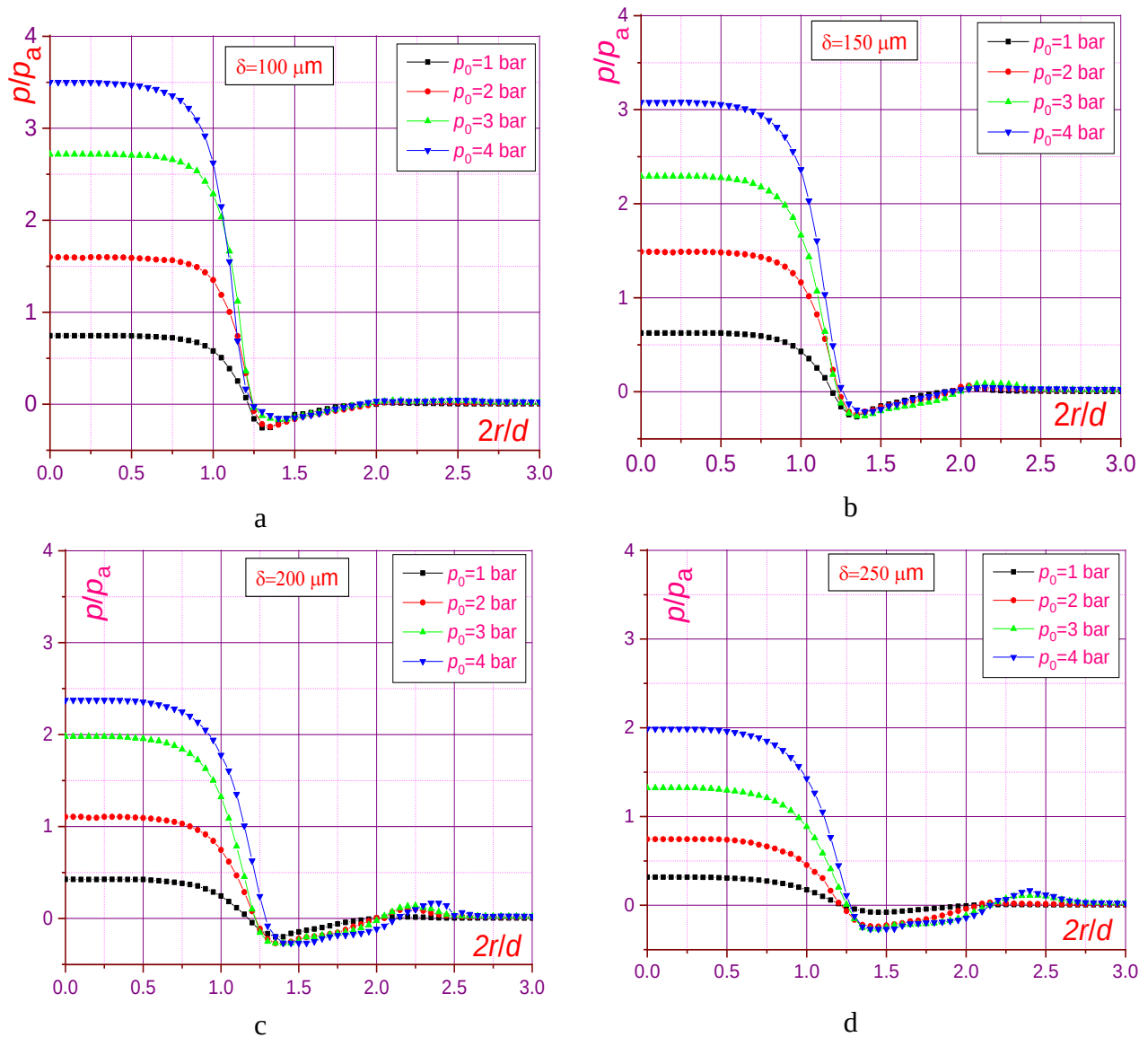


Slika 4.2. Raspored pritiska na ravnoj površini u radijalnom pravcu $p(r)$ pri pritisku napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar i aksijalnom rastojanju između izlaznog preseka mlaznice M-1 i ravne površine $\delta=250$ μm, prečnik prigušne mlaznice je $D=1$ mm.

Raspodele pritiska u radijalnom pravcu pokazuju da pritisak ima maksimalnu vrednost u položaju $r=0$ i $\delta=250$ μm, $p=p(0,\delta)$. Pomeranjem mlaznice u radijalnom pravcu, pritisak zadržava početnu vrednost pritiska napajanja p_0 u oblasti $0 \leq r \leq r_0$. Povećanjem radijalnog rastojanja pritisak blago opada da bi u oblasti 750 μm $\leq r \leq 1400$ μm počeo naglo da se smanjuje i prelazi u potpritisak na radijalnom rastojanju r_1 , $p=p(r_1,\delta)$. Najmanji pritisci $p_{\min}$ su ispod frontalne površine mlaznice u oblasti $d/2 \leq r \leq D/2$. To je zona vrtložnog strujanja u oblasti $r_1 \leq r \leq r_2$. Daljim povećanjem radijalnog rastojanja r pritisak se povećava i na rastojanju r_2 prelazi u natpritisak. Na rastojanju mlaznice $r \geq r_2$ pritisak blago raste a zatim opada do asimptotske vrednosti $p \approx 0$ bar. Ovo je tipičan dijagram raspodele pritiska u radijalnom pravcu. Dobija se ista radijalna raspodela pritiska pomeranjem izlazne mlaznice u negativnom smeru x -ose. Na dijagramima prikazanim na slici 4.2 vidi se uticaj pritiska napajanja p_0 na veličinu pritiska na površini mašinskog dela. Najveći pritisak je proporcionalan pritisku napajanja. Sa datog dijagrama se vidi da pritisak napajanja ne utiče na veličinu potpritiska. Vrednosti pritisaka i odgovarajućih radijalnih veličina u karakterističnim tačkama dijagrama radijalne raspodele pritiska date su u tabeli 4.4. Rastojanje $\Delta r=r_2-r_1$ je oblast potpritiska na delu dijagrama $r_1 \leq r \leq r_2$. Dijagram raspodele pritiska u radijalnom pravcu služi za eksperimentalno određivanje oblasti i veličine potpritiska. Sa gledišta pneumatske metrologije nepoželjna je oblast potpritiska jer je tu vrtložno strujanje i dolazi do nagomilavanja čestica prašine. Dugotrajnim radom diferencijalnog pneumatskog komparatora čestice prašine se deponuju na frontalnoj površini mlaznice što menja geometriju mlaznice. Dolazi do smanjenja visine mikrokanaala δ i samim tim do pojave greške merenja.

Na slici 4.3 prikazani su eksperimentalni rezultati promene pritiska u radijalnom pravcu na mernom komadu pri aksijalnom rastojanju mlaznice i ravne površine $\delta=100$ μm, $\delta=150$ μm, $\delta=200$ μm i $\delta=250$ μm za pritisak napajanja $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar. Rezultati merenja pokazuju da je dobijen tipičan dijagram promene pritiska u radijalnom pravcu na kome se jasno uočavaju tri karakteristična dela. Prvi deo dijagrama je horizontalni deo i nalazi se u okolini ose mlaznice koji odgovara zaustavnoj oblasti $p=p(r_0,\delta)$, tzv. zaustavna zona. Drugi deo je oblast nagle promene – pad pritiska na mernom mašinskom delu ispod frontalne površine izlazne mlaznice. I treći deo je oblast potpritiska koja je u vrtložnoj zoni, zona potpritiska, $p_{\min}=p_{\min}(r_{\min},\delta)$. Promenom aksijalnog rastojanja mlaznice δ želi se sagledati: r_0 - veličina zaustavne zone, Δr - veličina zone potpritiska,

r_1 – radijalno rastojanje nastanka potpritiska, r_2 – radijalno rastojanje nastanka natpritiska (nestanak potpritiska), $r_{\min}$ – radijalno rastojanje najmanjeg pritiska, $p_{\max}$ – maksimalni pritisak i $p_{\min}$ – najmanji pritisak (potpritisak). Uočava se da porastom pritiska napajanja p_0 , na istom aksijalnom rastojanju između izlaznog preseka mlaznice i ravne površine, dolazi do smanjenja oblasti maksimalnog pritiska r_0 , vrlo malo se povećavaju r_1 , r_2 , povećava se rastojanje nastanka $p_{\min}$, a vrednost $p_{\min}$ se smanjuje. Takođe se smanjuje oblast potpritiska Δr . Karakteristično za ovaj dijagram je da su radijalna rastojanja r_1 nastanka potpritiska skoro jednaka nezavisno od pritiska napajanja. Takođe i radijalna rastojanja r_2 prelaska potpritiska u natpritisak, su na skoro jednakom rastojanju r .



Slika 4.3. Dijagram raspodele pritiska u radijalnom pravcu $p=p(r)$ za: a) $\delta=100 \mu\text{m}$, b) $\delta=150 \mu\text{m}$, c) $\delta=200 \mu\text{m}$, d) $\delta=250 \mu\text{m}$, za $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar i $D=1,0 \text{ mm}$

Povećanjem aksijalnog rastojanja mlaznice δ od ravne površine smanjuje se najveći pritisak $p_{\max}$ u oblast radijalnog rastojanja r_0 , povećava se oblast najmanjeg pritiska Δr , tj. povećava se širina zone vrtložnog strujanja, što nije poželjno. Povećanjem aksijalnog rastojanja δ znatno se povećava mesto nastanka najmanjeg pritiska $p_{\min}$, odnosno mesto za stvaranje uslova za deponovanje nečistoća – kritičan presek. Sve vrednosti elemenata dijagrama date su u tabelama 4.1 do 4.4.

Tabela 4.1 Karakteristične vrednosti sa dijagrama radijalne raspodele pritiska za $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar pri aksijalnom rastojanju izlaznog preseka mlaznice i kontrolisanog dela $\delta=100\ \mu\text{m}$

p_0 , bar	r_0 , μm	r_1 , μm	r_2 , μm	r_{min} , μm	Δr , μm	p_{max} , bar	p_{min} , bar
1	450	1210	1950	1300	750	0,744	-0,256
2	400	1220	1970	1350	730	1,596	-0,245
3	300	1230	1980	1380	630	2,717	-0,164
4	250	1240	1970	1400	560	3,500	-0,152

Tabela 4.2 Karakteristične vrednosti sa dijagrama radijalne raspodele pritiska za $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar pri aksijalnom rastojanju izlaznog preseka mlaznice i kontrolisanog dela $\delta=150\ \mu\text{m}$

p_0 , bar	r_0 , μm	r_1 , μm	r_2 , μm	r_{min} , μm	Δr , μm	p_{max} , bar	p_{min} , bar
1	500	1180	1950	1300	720	0,625	-0,265
2	450	1220	1960	1350	700	1,465	-0,265
3	400	1250	1970	1370	680	3,676	-0,256
4	250	1300	1960	1400	600	3,500	-0,211

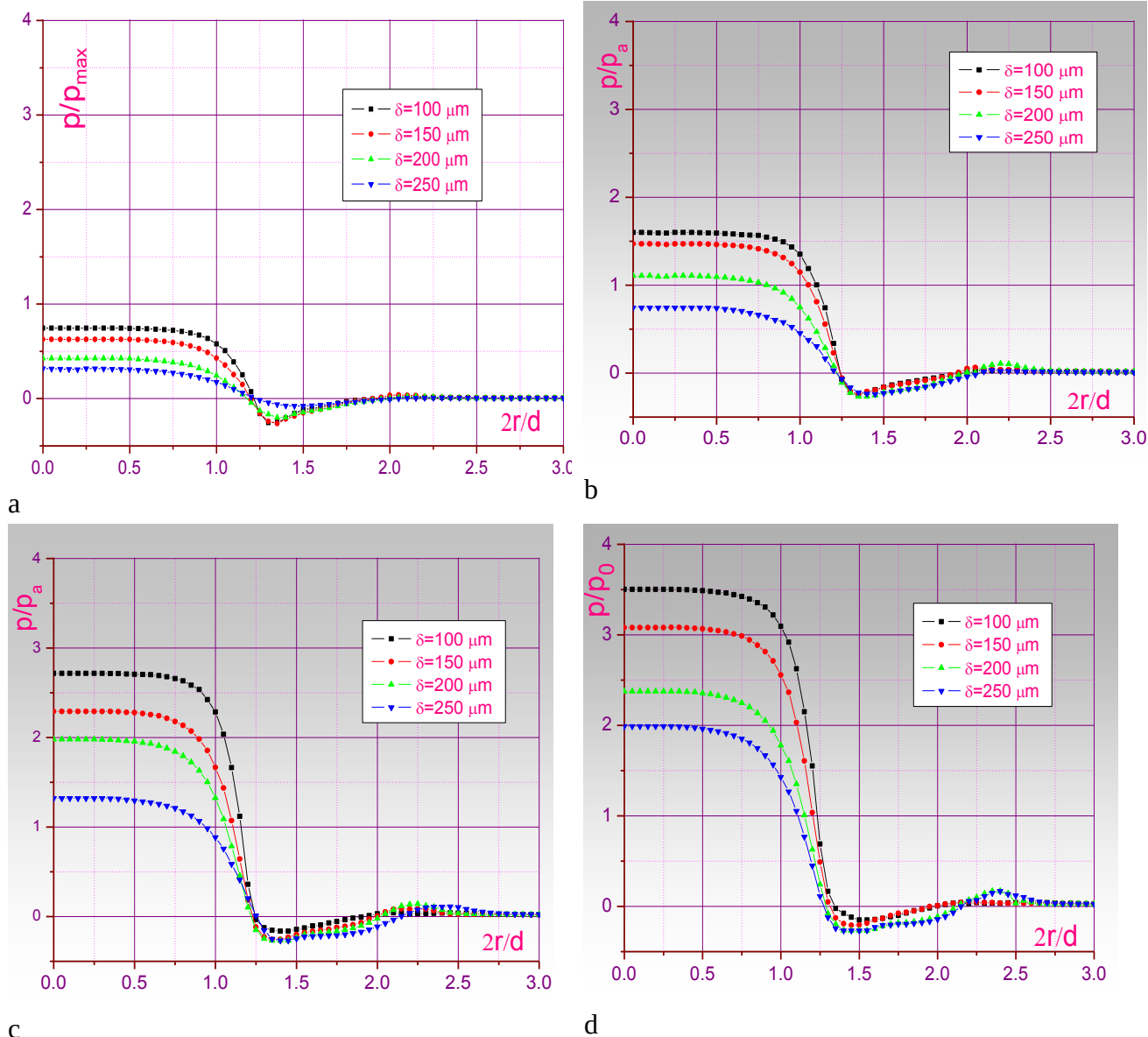
Tabela 4.3 Karakteristične vrednosti sa dijagrama radijalne raspodele pritiska za $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar pri aksijalnom rastojanju izlaznog preseka mlaznice i kontrolisanog dela $\delta=200\ \mu\text{m}$

p_0 , bar	r_0 , μm	r_1 , μm	r_2 , μm	r_{min} , μm	Δr , μm	p_{max} , bar	p_{min} , bar
1	500	1200	2000	1380	710	0,424	-0,200
2	400	1250	2010	1400	750	1,102	-0,269
3	350	1270	2020	1450	760	1,975	-0,269
4	340	1300	2080	1500	800	2,374	-0,269

Tabela 4.4 Karakteristične vrednosti sa dijagrama radijalne raspodele pritiska za $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar pri aksijalnom rastojanju izlaznog preseka mlaznice i kontrolisanog dela $\delta=250\ \mu\text{m}$

p_0 , bar	r_0 , μm	r_1 , μm	r_2 , μm	r_{min} , μm	Δr , μm	p_{max} , bar	p_{min} , bar
1	370	1210	2050	1400	740	0,317	-0,076
2	380	1220	2070	1410	850	0,749	-0,236
3	400	1260	2150	1420	880	1,322	-0,269
4	420	1280	2170	1450	890	1,980	-0,269

Prethodni dijagrami su dati za jedno aksijalno rastojanje δ i sve pritiske napajanja p_0 . Na slici 4.4 su dati dijagrami uticaja aksijalnog rastojanja između izlaznog preseka mlaznice i površine mašinskog dela za različite pritiske napajanja p_0 . Ordinata je bez dimenzija, dobija se deljenjem pritiska napajanja p_0 sa atmosferskim pritiskom $p_a=1$ bar. Na ovim dijagramima se jasnije uočavaju vrednosti pritiska na površini mernog komada za zadate uslove p_0 i δ .

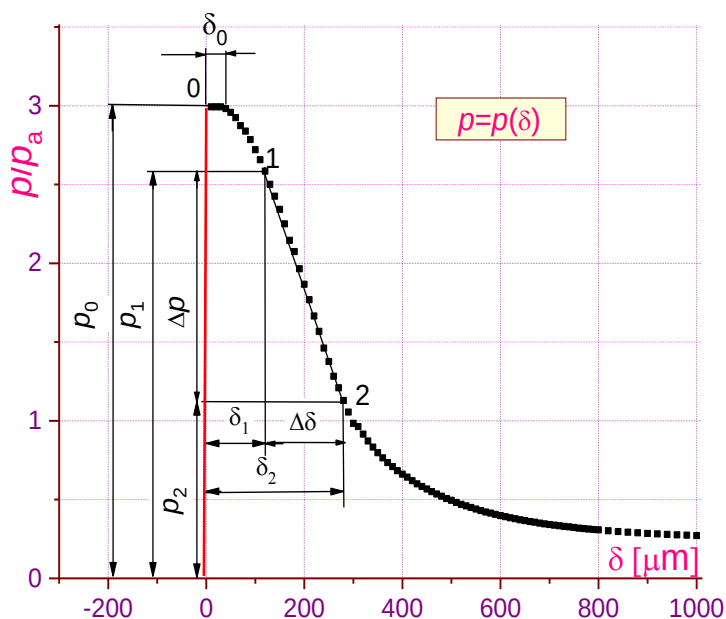


Slika 4.4. Dijagrama raspodele pritiska u radijalnom pravcu $p=p(r)$ za: a) $p=1$ bar, b) $p=2$ bar μm , c) $p=3$ bar, d) $p=4$ bar, za $\delta=100 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}$ i $D=1,0$ mm

Kao kod prethodnih raspodela pritiska, na dijagramima prikazanim na slici 4.4 uočava se da povećanjem rastojanja δ pritisak se smanjuje. Takođe, sa promenom pritiska napajanja malo se menja vrednost potpritiska i položaj kritičnog preseka. Pritisak napajanja znatno utiče na veličinu zone vrtložnog strujanja, tako što porastom pritiska napajanja, širina vrtložne zone se povećava.

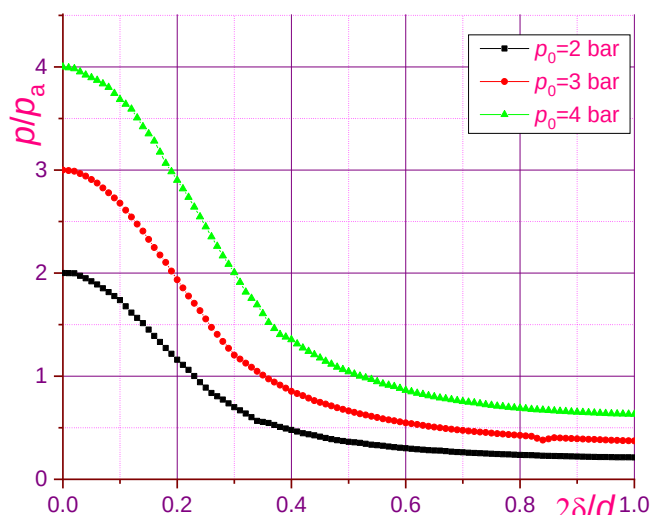
4.2 RASPODELA PRITISKA U AKSIJALNOM PRAVCU

Dijagram raspodele pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$ dobija se aksijalnim pomeranjem izlazne mlaznice od ravne površine duž ose mlaznice po z -osi. Pritisak na površini mašinskog dela zavisi od pritiska napajanja p_0 , aksijalnog rastojanja δ i prečnika mlaznice D u radnoj komori B_1 diferencijalnog pneumatskog komparatora. Pritisak u početnom položaju $p(\delta)=p(0,0)$ je najveći i ima vrednost p_0 . Povećanjem aksijalnog pomeranja pritisak se smanjuje. Na slici 4.5 date su karakteristične veličine za raspored pritiska u aksijalnom pravcu.



Slika 4.5 Karakteristične veličine raspodele pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$: p_0 - pritisak napajanja, δ - vrednost aksijalnog pomeranja mlaznice, tačka 1- početak pravolinijskog dijagrama, tačka 2- završetak pravolinijskog dela dijagrama, p_1 - pritisak u tački na početku pravolinijskog dela, p_2 - pritisak u tački nazavršetku pravolinijskog dela, δ_1 - aksijalno rastojanje tačke 1, δ_2 - aksijalno rastojanje tačke 2, $\Delta p = p_1 - p_2$, $\Delta \delta = \delta_2 - \delta_1$

Pomeranjem mlaznice iz početnog položaja $\delta=0 \mu\text{m}$, pritisak zadržava maksimalnu vrednost p_0 do aksijalnog rastojanja $\delta=\delta_0$. Daljim povećanjem rastojanja δ pritisak se naglo smanjuje do $\delta=\delta_2$ i za $\delta_2 \leq \delta \leq 800 \mu\text{m}$ pritisak blago opada i za najveće rastojanje između izlaznog preseka mlaznice M-1 i mašinskog dela, pritisak se asimptotski približava nekoj stalnoj vrednosti. Na slici 4.6 data je raspodela pritiska u aksijalnom pravcu za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar, pri čemu prečnik prigušnice A ima vrednost $D=1,0$ mm.



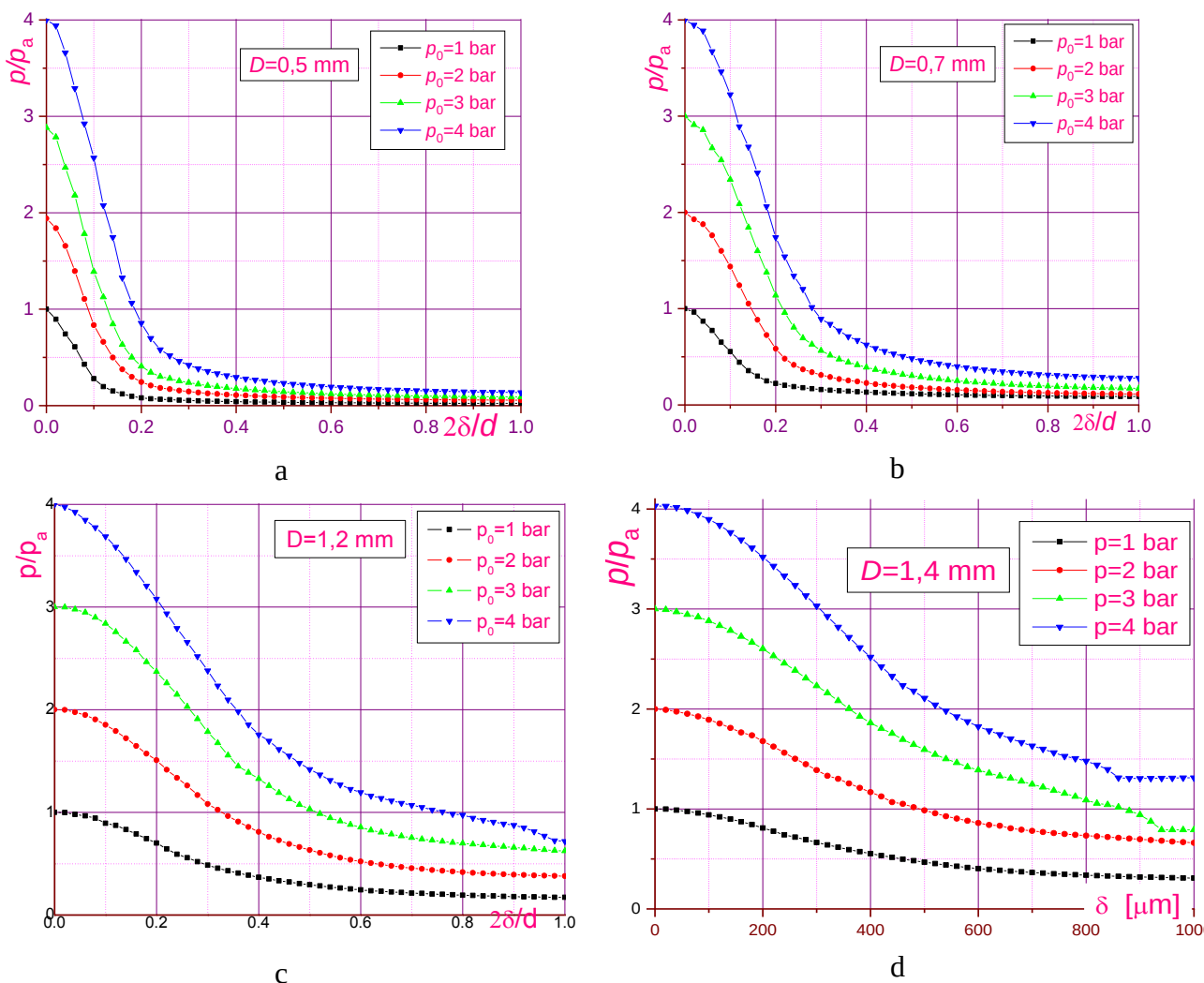
Slika 4.6. Raspored pritiska na ravnoj površini u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$, za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar

Korak pomeranja izlazne mlaznice u aksijalnom pravcu, tj. pomeranje duž ose mlaznice, je $\Delta \delta=1 \mu\text{m}$. Analizom dijagrama se vidi da pritisak napajanja p_0 značajno utiče na: položaj krive $p=p(\delta)$, dužinu pravolinijskog dela raspodele $p_{1,2}(\delta)$, dužinu zaustavne zone δ_0 u kojoj je $p=p_0=\text{const}$, početak dijagrama $p=(0, p_0)$ i položaj krive za $\delta \geq 1000 \mu\text{m}$. Karakteristične veličine raspodele pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$ date su u tabeli 4.5. Rezultati pokazuju da sa povećanjem pritiska napajanja, svi vrednosti u raspodeli pritiska u aksijalnom pravcu, na površini mernog mašinskog dela se povećavaju.

Tabela 4.5 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar

p_0 (bar)	bar					μm				
	p_0	p_1	p_2	p_{sr}	Δp	δ_0	δ_1	δ_2	δ_{sr}	$\Delta\delta$
2	2,000	1,912	0,731	1,348	1,218	88	118	355	232	252
3	3,000	2,907	1,093	1,919	1,872	92	140	392	429	272
4	4,000	3,907	1,423	2,661	2,554	98	169	429	279.5	299

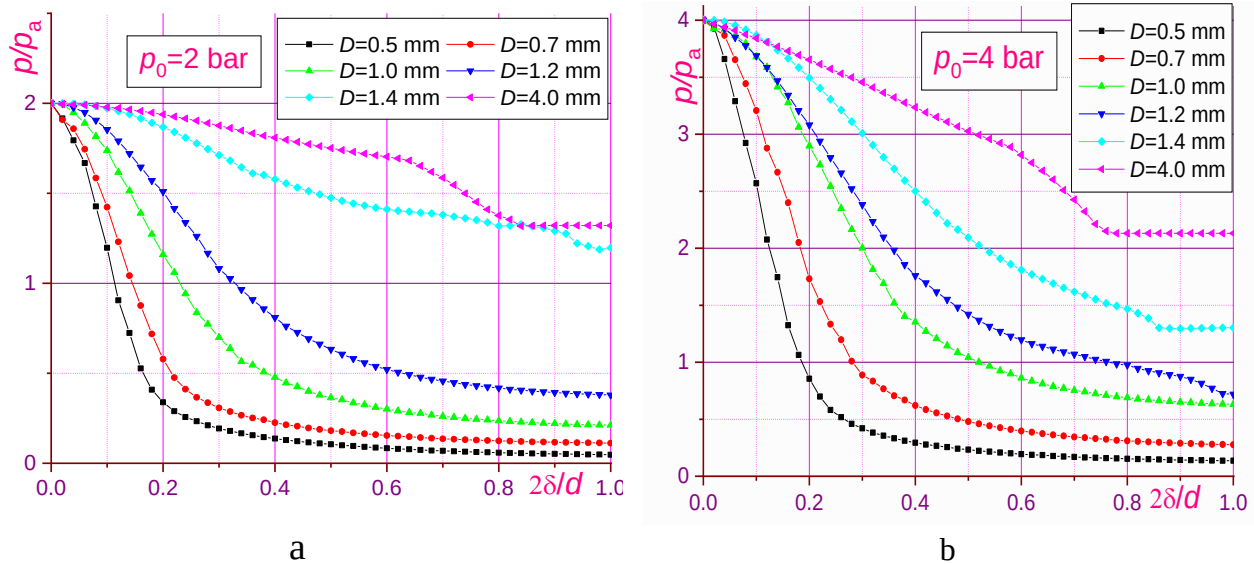
Vrednost pritiska p na mernom komadu MK zavisi od: pritiska napajanja p_0 , aksijalnog rastojanja mlaznice i površine komada koji se kontroliše δ , ali i od prečnika D prigušne mlaznice A u mernoj komori B_1 . Na slici 4.7 date su raspodele pritiska u aksijalnom pravcu za različite vrednosti prečnika prigušne mlaznice A, i to: $D=0,5$ mm, $D=0,7$ mm, $D=1,2$ mm i $D=1,4$ mm.



Slika 4.7. Dijagrami raspodele pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$ za: a) $D=0,5$ mm, b) $D=0,7$ mm, c) $D=1,2$ mm, d) $D=1,4$ mm, za $p=1$ bar, $p=2$ bar, $p=3$ bar, $p=4$ bar

Sa dijagrama se jasno uočava uticaj prigušenja na vrednosti pritiska na površini mašinskog dela. Što je veće prigušenje, tj. manja vrednost prečnika prigušne mlaznice D , to je izraženiji pad pritiska na malim rastojanjima δ između izlaznog preseka mlaznice i površine mašinskog dela, i to nezavisno od vrednosti pritiska napajanja (v. sl. 4.7a i 4.7b). Na većim aksijalnim rastojanjima

između čela mlaznice i površine mašinskog dela, pritisak se približava nekoj stalnoj vrednosti, koja je veća za veću vrednost pritiska napajanja p_0 . Sa povećanjem prečnika prigušne mlaznice, pad pritiska u aksijalnom pravcu je blaži, tako da nema jasno izražene razlike između oblasti približno konstantnog pritiska i oblasti u kojoj pritisak opada, slike 4.7c i 4.7d. Za vrednosti prečnika prigušnice $D=1,4$ mm i $D=4$ mm, ekvidistantne krive raspodele pritiska bi se ostvarile za veća rastojanja između izlaznog preseka mlaznice i površine mašinskog dela. Najmanje vrednosti pritiska za naveća prikazana aksijalna rastojanja δ su ostvarene za najveće prigušenje u mernoj komori B_1 , tj. za najmanju vrednost prečnika prigušne mlaznice D .

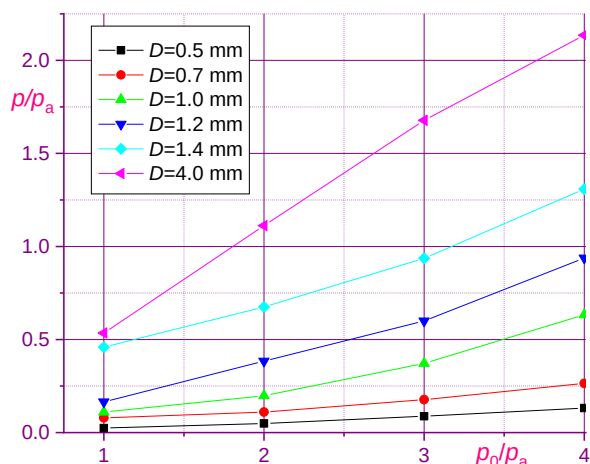


Slika 4.8 Dijagram $p=p(\delta)$ za $p_0=2$ bar, $p_0=4$ bar i $D=0,5$ mm; $0,7$ mm; $1,0$ mm; $1,2$ mm; $1,4$ mm i $4,0$ mm

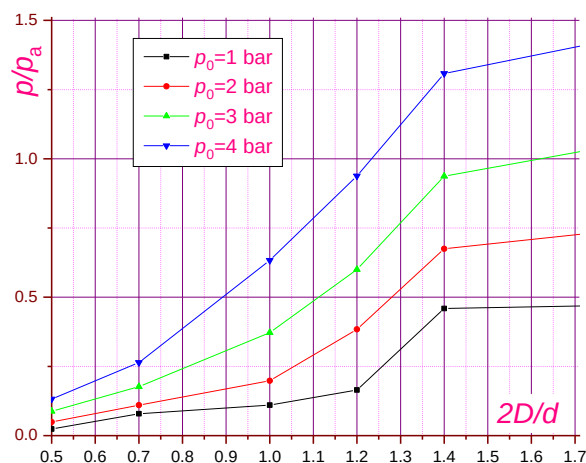
Uticaj prečnika D prigušne mlaznice je očigledan i na slici 4.8. Ovde su prikazane raspodele pritiska u aksijalnom pravcu za najmanji i najveći pritisak napajanja, $p_0=2$ bar i $p_0=4$ bar, za sve prečnike prigušnice $D=0,5$ mm - $4,0$ mm. Na dijagramima pritiska vidi se uticaj prečnika prigušnice na izgled dijagrama. Jasno se uočava smanjenje nagiba krive sa povećanjem prečnika prigušnice D . Krive pritiska za prigušenje $D=0,5$ mm; $0,7$ mm; $1,0$ mm i $1,2$ mm imaju veliki pad pritiska za $0 \leq \delta \leq 200$ μm . Za $200 \leq \delta \leq 400$ μm pad pritiska je postepen, za $400 \leq \delta \leq 1000$ μm pad pritiska je vrlo mali tako da za $\delta=1000$ μm pritisak ima vrednost asimptote. Međutim za krive $D=1,4$ mm i $D=4,0$ mm čije je prigušenje malo ili skoro nikakvo, pad pritiska je mali. Kriva za $D=1,4$ mm ima malo prigušenje za $0 \leq \delta \leq 900$ μm i pad pritiska je mali, zatim sa povećanjem δ pritisak brže pada, da bi za $\delta=1000$ μm dostigao minimalnu vrednost. Kriva pritiska za najmanje prigušenje, $D=4,0$ mm ima tri oblasti. Za $0 \leq \delta \leq 640$ μm pritisak sporo opada sa povećanjem δ . Druga oblast je bržeg pada pritiska 640 $\mu\text{m} \leq \delta \leq 840$ μm i za 840 $\mu\text{m} \leq \delta \leq 1000$ μm skoro da nema pada pritiska. Ovako mala prigušenja ($D=1,4$ mm i $D=4,0$ mm) se ne koriste u pneumatskoj metrologiji.

Dijagrami na slikama 4.9 i 4.10 pokazuju vrednost pritiska p za aksijalno rastojanje $\delta=1000$ μm , za sve pritiske napajanja p_0 i sve vrednosti prečnika prigušne mlaznice D u mernoj komori. Kao što je i očekivano, najveći pritisci p se ostvaruju za najveći pritisak napajanja p_0 i za najveći prečnik mlaznice D u mernoj komori diferencijalnog pneumatskog komparatora. Sa povećanjem prečnika prigušnice D , uticaj vrednosti pritiska napajanja p_0 na vrednost pritiska p na površini mašinskog dela koji se kontroliše je izraženiji, kao što se to vidi na slici 4.9. Krive pritiska su približno linearnog karaktera. Kada je reč o uticaju prečnika prigušnice D na pritisak na površini kontrolisanog mašinskog dela pri konstantnom pritisku napajanja p_0 , sa slike 4.10 se može zaključiti

da pritisak p raste sa povećanjem prečnika D i da je porast pritiska p izraženiji na većem pritisku napajanja p_0 . Za veće vrednosti prečnika D , veći je i uticaj pritiska napajanja p_0 .



Slika 4.9. Raspodela pritiska na površini mašinskog dela p u funkciji od pritiska napajanja p_0 za sve vrednosti prečnika prigušnice D u mernoj komori B_1 .



Slika 4.10. Raspodela pritiska na površini mašinskog dela p u funkciji od prečnika prigušnice D u mernoj komori B_1 za različite vrednosti pritiska napajanja p_0 .

U zaključku koji se odnosi na aksijalnu raspodelu pritiska na površini mašinskog dela koji se kontroliše, može se reći da se manji pritisak p ostvaruje za manje vrednosti pritiska napajanja p_0 i za manje vrednosti prečnika D prigušne mlaznice u mernoj komori B_1 . Takođe, veći gradijent pritiska u odnosu na aksijalno rastojanje δ se ostvaruje za veće vrednosti pritiska napajanja, za koje je i veća oblast linearne raspodele pritiska u aksijalnom pravcu. Upravo ova oblast linearne raspodele pritiska p na površini mašinskog dela u zavisnosti od aksijalnog rastojanja između izlaznog preseka izlazne mlaznice i površine mašinskog dela δ je interesantan za primenu u pneumatskoj metrologiji. Iz tog razloga je ovom delu dijagrama aksijalne raspodele pritiska p posvećen sledeći odeljak.

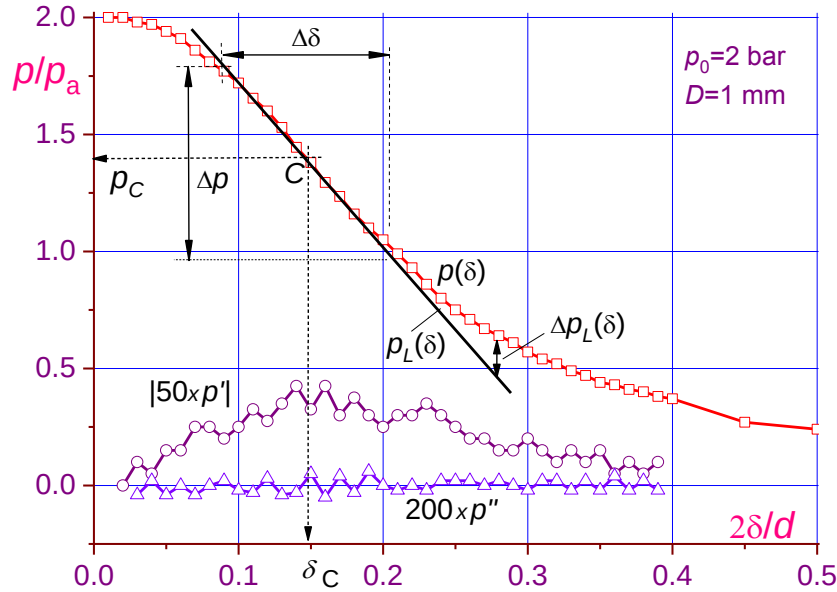
4.3 PNEUMATSKA OSETLJIVOST

Pneumatska osetljivost S diferencijalnog pneumatskog komparatora je jedan od ključnih parametara u industrijskoj primeni pneumatske dimenzijske kontrole i definisana je u oblasti linearne raspodele pritiska u aksijalnom pravcu tj. na delu krive od 1 do 2 na slici 4.5. Ova veličina predstavlja preciznost komparatora. Što je veća pneumatska osetljivost, to je pneumatski komparator precizniji. S obzirom na definiciju ove veličine koja predstavlja količnik priraštaja pritiska Δp i priraštaja aksijalnog rastojanja $\Delta \delta$ između izlazne mlaznice i kontrolisanog mašinskog dela, tj.

$$S = \frac{\Delta p}{\Delta \delta}, \quad (4.1)$$

jasno je da je za istu vrednost priraštaja aksijalnog rastojanja $\Delta \delta$, preciznost pneumatskog komparatora veća ako je veći priraštaj pritiska Δp . Dakle, matematički gledano, pneumatska osetljivost predstavlja nagib linearnog dela krive raspodele pritiska na površini mašinskog dela u aksijalnom pravcu. Sa slike 4.7 se vidi da se veća vrednost pneumatske osetljivosti ostvaruje za veće vrednosti pritiska napajanja. Međutim, povećana vrednost pritiska napajanja p_0 podrazumeva veću potrošnju energije, a dolazi i do povećanja nivoa buke na izlazu iz mlaznice M-1, što može uzrokovati izvesne poremećaje u strujnim veličinama komparatora. Iz tog razloga je potrebno

obratiti pažnju na pravilno određivanje pneumatske osetljivosti kao fizičke veličine i primenu komparatora sa velikim vrednostima ove veličine samo tamo gde je to neophodno. Najveći deo ovog odeljka je objavljen u Skoko et al. (2021).



Slika 4.11. Raspodela pritiska na površini mašinskog dela u funkciji od aksijalnog rastojanja $p(\delta)$, i raspodele prvog i drugog izvoda ove funkcije za $p_0=2$ bar i $D=1,0$ mm,

Linerni deo krive opisan je funkcijom:

$$p_L(\delta) = A - S \delta. \quad (4.2)$$

I pored toga što je funkcija linearna nju nije lako naći. Matematičke tačke prvi izvod funkcije (b) je pneumatska osetljivost: $p'_L = -S$, a njen drugi izvod je jednak nuli: $p''_L = 0$. U cilju određivanja linearne zavisnosti (4.2) uzmimo jednu eksperimentalnu krivu $p(\delta)$ sa Sl. 4.11 i nju aproksimirajmo funkcijom:

$$p(\delta) = \frac{a + b\delta + c\delta^2}{1 + d\delta + e\delta^2} \quad (4.3)$$

gde su: $a = p(0)$, b , c , d i e koeficijenti funkcije. Na osnovu funkcije (4.3) određuju se prvi i drugi izvod: p' i p'' , a njihove stvarne eksperimentalno dobijene vrednosti prikazane su na Sl. 4.13 i one su različite od vrednosti p'_L i p''_L koje daje linearna aproksimacija. U prevojnoj tački C krive $p(\delta)$ drugi izvod je: $p'' = 0$, odakle sledi jednačina:

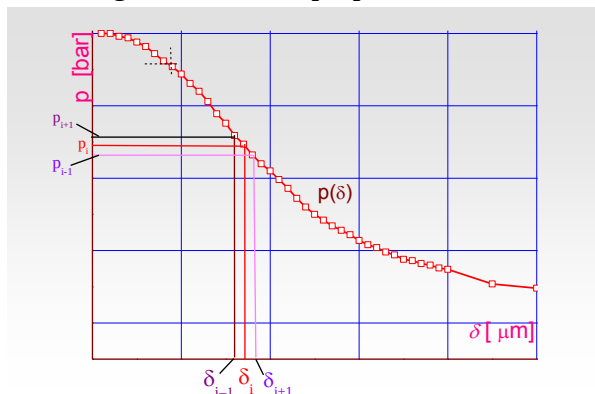
$$a_0 + a_1\delta + a_2\delta^2 + a_3\delta^3 + a_4\delta^4 + a_5\delta^5 = 0$$

u kojoj su $a_i(a, b, c, d, e)$, $i = 0, 1, \dots, 5$ eksperimentalno određeni koeficijenti funkcije (4.3), a njeno rešenje $\delta = \delta_C$ daje: $p_C = p(\delta_C)$ i $S = -p'(\delta_C)$.

Krive zavisnost pritiska od aksijalnog pomeranja $p(\delta)$ i $p_L(\delta)$ se razlikuju, a njihova razlika

$$\Delta p_L(\delta) = p(\delta) - p_L(\delta)$$

opisuje odstupanje merene od linearne zavisnosi. Za kriterijum odstupanja ovih funkcija usvaja se greška od 1%, te se na osnovu eksperimentalnih merenja $p(\delta)$ dobijaju vrednosti Δp i $\Delta \delta$ linearnog dela krive i u potpunosti definisanu pneumatsku osetljivost S .



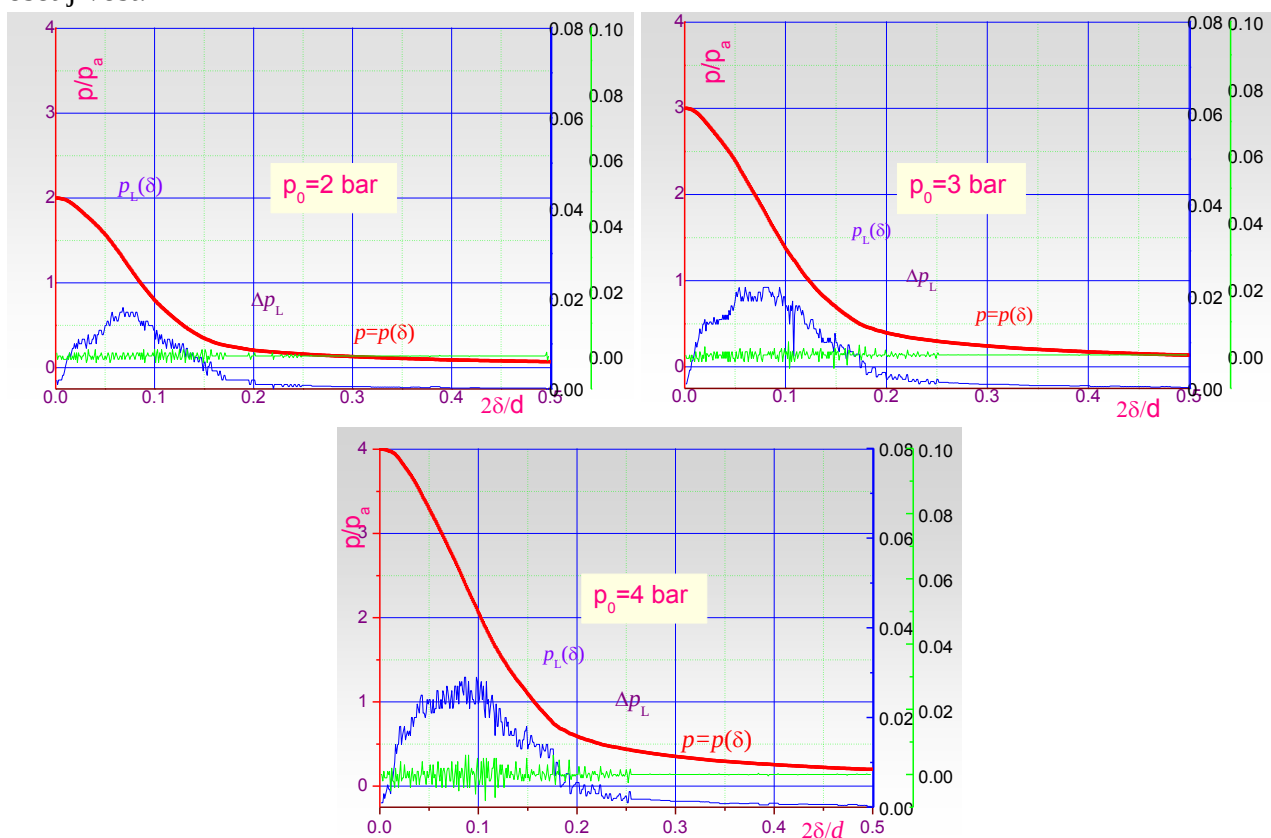
Slika 4.12. Osnovne veličine funkcije $p(\delta)$ za pritisak napajanja $p_0=2$ bar i prečnik prigušnice $D=1$ mm.

Određivanje pneumatske osetljivosti se svodi na izračunavanje prvog izvoda za datu krivu:

$$p'_i = \frac{p_i - p_{i-1}}{\delta_i - \delta_{i-1}} = S_i$$

$$p''_i = \frac{p_{i+1} - p_i}{\delta_{i+1} - \delta_i} = \frac{(p_{i+1} - p_i) - (p_i - p_{i-1})}{\delta_{i+1} - \delta_i} \Rightarrow p''_i = \frac{p_{i+1} - 2p_i + p_{i-1}}{\delta_{i+1} - \delta_i} = S'_i.$$

U nastavku će se za tri pritiska napajanja korišćena u ovom istraživanju, odrediti pneumatska osetljivost.



Slika 4.13. Raspodela pritiska na površini mašinskog dela u funkciji od aksijalnog rastojanja δ i raspodele prvog i drugog izvoda ove funkcije za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar i $D=1,0$ mm

Prateći oznake na slici 4.5 za početak i kraj oblasti linearne raspodele pritiska na površini kontrolisanog dela p u funkciji od aksijalnog rastojanja čela mlaznice od površine kontrolisanog dela, i dijagrame prikazane na slici 4.13, u tabeli 4.6 su date vrednosti karakterističnih aksijalnih rastojanja δ i odgovarajućih pritisaka p , za različite pritiske napajanja p_0 .

Tabela 4.6 Vrednosti aksijalnih rastojanja δ i odgovarajućih pritisaka p na linearnom delu dijagrama $p(\delta)$

		$p_0 = 2 \text{ bar}$	$p_0 = 3 \text{ bar}$	$p_0 = 4 \text{ bar}$
Početak linearnog dela krive $p(\delta) - 1$	$\delta, \mu\text{m}$	69	71	115
	p, bar	1,857	2,876	3,594
Kraj linearnog dela krive $p(\delta) - 2$	$\delta, \mu\text{m}$	269	305	381
	p, bar	0,817	1,196	1,402

U softverskom paketu Origin je izvršeno fitovanje eksperimentalnih podataka za svaki od pritisaka napajanja p_0 , i dobijene su sledeće jednačine kojima se opisuju funkcije $p(\delta)$:

$$p_0 = 2 \text{ bar} \rightarrow p = 2,16175 - 0,01997\delta + 5,34418 \cdot 10^{-4} \delta^2 - 1,1434 \cdot 10^{-5} \delta^3 + 9,29049 \cdot 10^{-8} \delta^4 - 2,56538 \cdot 10^{-10} \delta^5,$$

$$p_0 = 3 \text{ bar} \rightarrow p = 3,09262 - 0,01245\delta + 7,82531 \cdot 10^{-5} \delta^2 - 3,61567 \cdot 10^{-6} \delta^3 + 3,19781 \cdot 10^{-8} \delta^4 - 8,27841 \cdot 10^{-11} \delta^5,$$

$$p_0 = 4 \text{ bar} \rightarrow p = 4,232 - 0,019\delta + 1,5695 \cdot 10^{-4} \delta^2 - 4,4712 \cdot 10^{-6} \delta^3 + 3,442 \cdot 10^{-8} \delta^4 - 8,102 \cdot 10^{-11} \delta^5.$$

Linearni deo raspodele $p(\delta)$ za svaki od pritisaka napajanja, koji je i značajan za određivanje pneumatske osetljivosti S , se može aproksimirati jednačinama:

$$p_0 = 2 \text{ bar} \rightarrow p = 2,21514 - 0,01379\delta,$$

$$p_0 = 3 \text{ bar} \rightarrow p = 3,23426 - 0,01794\delta,$$

$$p_0 = 4 \text{ bar} \rightarrow p = 4,369 - 0,02237\delta,$$

na osnovu kojih se mogu odrediti vrednosti pneumatske osetljivosti za ova tri pritiska napajanja, koje su prikazane u tabeli 4.7.

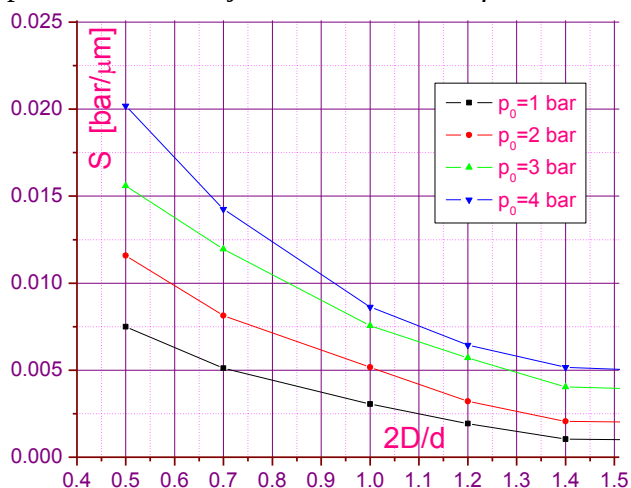
Tabela 4.7 Izračunate vrednosti pneumatske osetljivosti S za različite pritiske napajanja p_0

	$p_0 = 2 \text{ bar}$	$p_0 = 3 \text{ bar}$	$p_0 = 4 \text{ bar}$
$S, \text{bar}/\mu\text{m}$	0,0052	0,0071	0,0082

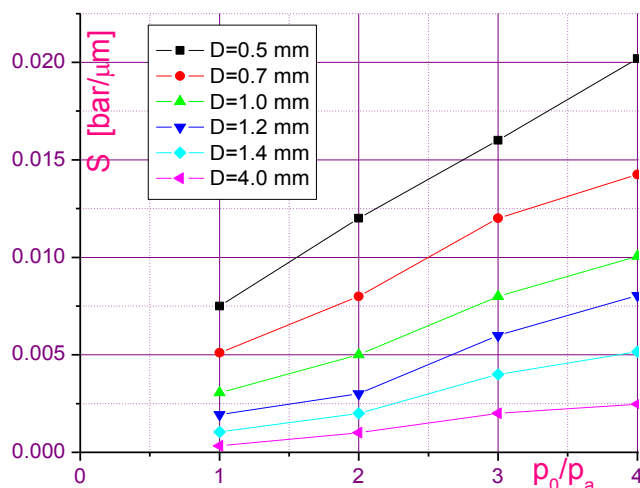
Ovim je, i matematičkim putem, pokazano da sa porastom vrednosti pritiska napajanja raste i pneumatska osetljivost S diferencijalnog pneumatskog komparatora. Ostalo je da se vidi kakav je uticaj prečnika prigušnice D u mernoj komori komparatora na vrednost pneumatske osetljivosti.

Sa dijagrama 4.14 i se vidi da, za jedan pritisak napajanja p_0 , povećanjem prečnika mlaznice D u mernoj komori, smanjuje se pneumatska osetljivost S , ali se smanjuje i nagib krive $p=p(\delta)$. Dakle, uticaj prečnika prigušne mlaznice D na pneumatsku osetljivost S je veći za manje vrednosti ove veličine. Krive prikazane na slici 4.15 pokazuju da za jednu odabranu prigušnu mlaznicu prečnika D , povećanje pritiska napajanja p_0 dovodi do povećanja pneumatske osetljivosti. Pri tome je pneumatska osetljivost praktično linearna funkcija pritiska napajanja. Najveća pneumatska osetljivost od 0,0191 bar/ μm se ostvaruje za najveći pritisak napajanja, u ovom istraživanju $p_0=4$ bar, i najmanji prečnik mlaznice $D=0,5$ mm. Za pritisak napajanja $p_0=4$ bar i prečnik mlaznice $D=1,2$ mm pneumatska osetljivost je 0,00628 bar/ μm . Na osnovu ovoga se može zaključiti da se za precizno određivanje prečnika mašinskog dela koriste pneumatski diferencijalni uređaji sa

prečnikom prigušnice $D=0,5$ mm i $D=0,7$ mm, s obzirom na činjenicu da su optimalne vrednosti pneumatske osetljivosti $S=0,015$ bar/ μ m do $0,020$ bar/ μ m.



Slika 4.14. Uticaj prečnika prigušne mlaznice D na vrednost pneumatske osetljivosti za različite vrednosti pritiska napajanja.



Slika 4.15. Uticaj pritiska napajanja p_0 na vrednost pneumatske osetljivosti za različite vrednosti prečnika prigušne mlaznice D .

Kontrola mašinskih delova pneumatskom metrologijom je vrlo jednostavna, tačna, stabilna. Može dugo da se koristi sa ponovljivim rezultatima kontrole i zbog toga ima veliku primenu u serijskoj proizvodnji mašinskih delova. Sa ovakvim uređajima kontrolišu se mašinski delovi malih dimenzija sa izuzetno malim tolerancijskim poljem. Takođe sa ovako velikom pneumatskom osetljivošću kontrolišu se i veći i veliki mašinski delovi sa uzanim tolerancijskim poljem, kao npr. pneumatski i hidraulični cilindri, klipovi i elementi razvoda i kontrole. Za kontrolu mašinskih delova većih dimenzija i većeg tolerancijskog polja koriste se pneumatski uređaji sa većim prečnikom mlaznice u mernoj komori $D=0,7$ mm i $D=1,0$ mm. Vrednosti pneumatske osetljivosti, pritiska na površini mašinskog dela u karakterističnim tačkama dijagrama aksijalne raspodele ove veličine (sl. 4.5) za različite pritiske napajanja p_0 su date u tabelama 4.8 do 4.10.

Tabela 4.8 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=0,5$ mm

bar	bar			μ m			bar/ μ m
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta \delta$	S
1	0,999	0,184	0,815	5	118	113	0,0072
2	1,894	0,431	1,463	13	148	135	0,0108
3	2,772	0,581	2,191	23	167	144	0,0131
4	3,774	1,177	2,597	30	170	146	0.0191

Tabela 4.9 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=0,7$ mm

bar	bar			μ m			bar/ μ m
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta \delta$	S
1	0,978	0,345	0,633	12	138	126	0,00502
2	1,846	0,506	1,34	49	211	162	0,00827
3	2,65	0,936	1,714	71	233	182	0,01058
4	3,877	1,308	2,569	40	245	205	0,01253

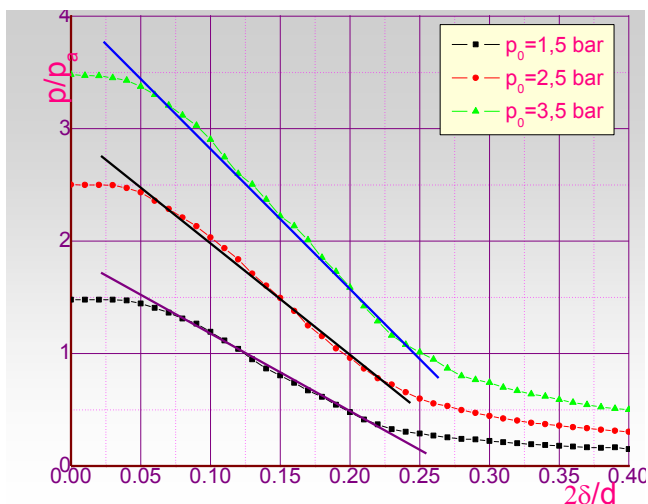
Na ovom mestu je vrlo važno uvesti pojam opsega pneumatskog komparatora i napraviti razliku između ove veličine i pneumatske osetljivosti. Naime, za razliku od pneumatske osetljivosti koja predstavlja preciznost pneumatskog komparatora, opseg komparatora je veličina od koje zavisi primena diferencijalnog pneumatskog komparatora za kontrolisanje mera mašinskih delova sa različitim tolerancijskim poljima. Opseg rada pneumatskog komparatora je projekcija linearnog dela raspodele pritiska $p(\delta)$ na x-osu, tj. reč je o vrednosti priraštaja aksijalnog rastojanja $\Delta\delta$. Što je veća vrednost priraštaja aksijalnog rastojanja za jedan pritisak napajanja, to je opseg primene pneumatskog komparatora veći i može se koristiti za proveru širih tolerancijskih polja na kontrolisanom mašinskom delu. Posmatrajući krive $p(\delta)$ za različite pritiske napajanja p_0 na slici 4.6 i za različite prečnike prigušne mlaznice D na slici 4.7, zaključuje se da je opseg rada komparatora obrnuto proporcionalan pritisku napajanja i direktno proporcionalan prečniku prigušne mlaznice.

Tabela 4.10 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=1,2$ mm

bar	bar			μm			bar/ μm
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$	S
1	0,969	0,411	0,558	329	64	265	0,00211
2	1,913	0,855	1,058	373	86	287	0,00369
3	2,762	1,422	1,34	366	123	243	0,00551
4	3,547	1,97	1,577	415	164	251	0,00628

Pneumatska osetljivost se smanjuje povećanjem prečnika prigušnice $D=0,7$ mm u radnoj komori. Za $p_0=1$ bar vrednost $S=0,00502$ bar/ μm , za $p_0=2$ bar $S=0,00827$ bar/ μm , za $p_0=3$ bar $S=0,01058$ bar/ μm i za $p_0=4$ bar $S=0,01253$ bar/ μm . Ovo su radni uslovi diferencijalnog pneumatskog komparatora. Ova pneumatska osetljivost se primenjuje u praksi. Koristi se pri kontroli mašinskih delova malih i velikih dimenzija sa odgovarajućim tolerancijskim poljem.

Kako je u praksi najčešće u primeni pneumatski komparator sa prigušnom mlaznicom prečnika $D=0,7$ mm, u nastavku će biti prikazane vrednosti pneumatske osetljivosti S za različite pritiske napajanja i karakteristične vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja δ , shodno oznakama na slici 4.5. Na slici 4.18. data je raspodela pritiska na površini mašinskog dela u aksijalnom pravcu za prigušnu mlaznicu $D=0,7$ mm. Krive dijagrama za date pritiske su aproksimirane pravim linijama i na njima se određuju svi parametri dijagrama pritiska i aksijalnih odstupanja. Sa svih dijagrama su unešeni parametri u tablicu i izračunata je pneumatska osetljivost. Sve osnovne veličine dijagrama sa slike 4.18 i njihove vrednosti date su u tabelama 4.11 – 4.15.



Slika 4.18. Pneumatska osetljivost za $p_0=1,5$ bar; 2,5 bar i 3,5 bar i $D=0,7$ mm

Tabela 4.11 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 i pneumatske osetljivosti za pritiske napajanja $p_0=1,5$ bar, 2,5 bar i 3,5 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=0,5$ mm

bar	bar			μm			bar/ μm
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$	S
1,5	1,454	0,313	1,141	50	160	110	0,01029
2,5	2,395	0,778	1,617	45	165	120	0,01430
3,5	3,384	0,967	2,417	40	170	130	0,01859

Tabela 4.12 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 i pneumatske osetljivosti za pritiske napajanja $p_0=1,5$ bar, 2,5 bar i 3,5 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=0,7$ mm

bar	bar			μm			bar/ μm
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$	S
1,5	1,406	0,570	0,836	60	220	160	0,00647
2,5	2,359	0,780	1,579	60	230	170	0,00902
3,5	3,308	1,011	2,297	60	250	190	0,00120

Tabela 4.13 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 i pneumatske osetljivosti za pritiske napajanja $p_0=1,5$ bar, 2,5 bar i 3,5 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=1,0$ mm

bar	bar			μm			bar/ μm
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$	S
1,5	1,430	0,584	0,846	80	300	220	0,00384
2,5	2,326	0,956	1,370	90	330	240	0,00630
3,5	3,247	1,285	1,962	100	360	260	0,00917

Tabela 4.14 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 i pneumatske osetljivosti za pritiske napajanja $p_0=1,5$ bar, 2,5 bar i 3,5 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=1,2$ mm

bar	bar			μm			bar/ μm
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$	S
1,5	1,415	0,687	0,728	100	380	280	0,00208
2,5	2,324	1,221	1,103	110	390	280	0,00394
3,5	3,178	1,741	1,437	130	400	270	0,00689

Tabela 4.15 Vrednosti pritiska i aksijalnog rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 i pneumatske osetljivosti za pritiske napajanja $p_0=1,5$ bar, 2,5 bar i 3,5 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=1,4$ mm

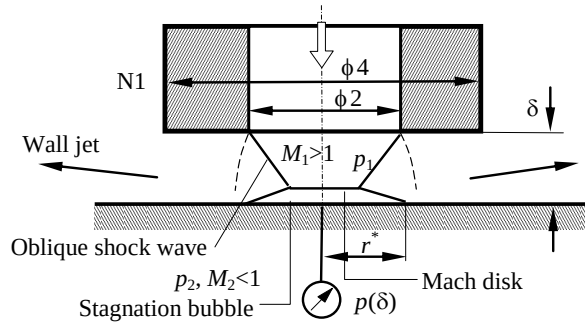
bar	bar			μm			bar/ μm
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$	S
1,5	1,305	0,939	0,366	170	370	200	0,00183
2,5	2,272	1,648	0,624	180	390	210	0,00297
3,5	3,179	2,368	0,811	190	400	210	0,00458

4.4 NESTABILNOST MERNOG SIGNALA

DIFERENCIJALNOG PNEUMATSKOG KOMPARATORA

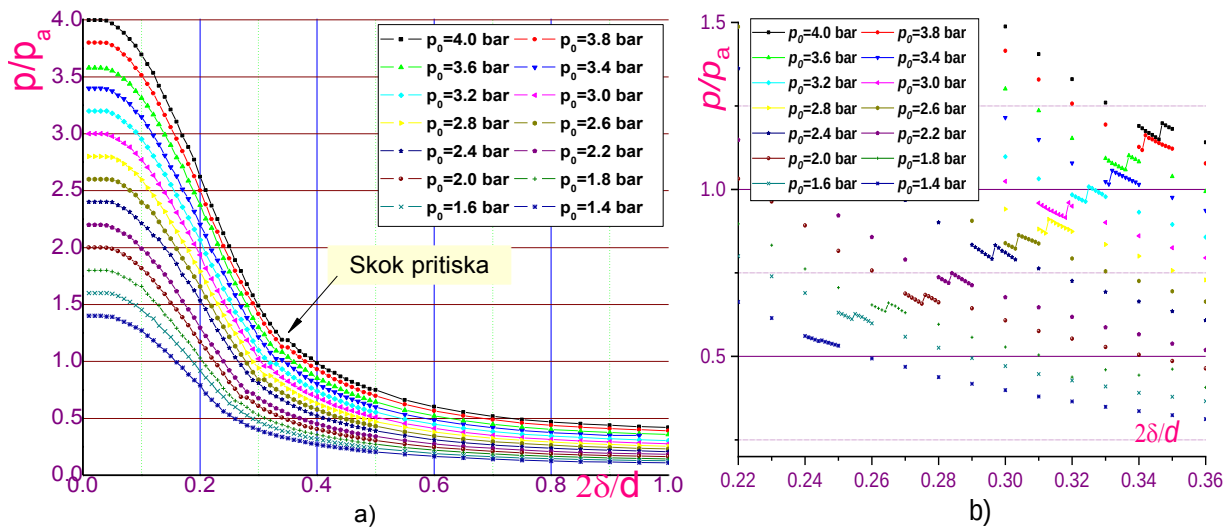
Pneumatski komparatori nalaze sve širu primenu zbog svoje velike preciznosti, jednostavnosti pri upotrebi i relativno niske cene. Međutim, ovi komparatori imaju nedostatak zbog kojeg korisnici moraju biti posebno oprezni. Reč je o nestabilnosti signala pritiska, koja se ogleda u promeni

vrednosti pritiska iako je aksijalno rastojanje između merne mlaznice i mašinskog dela nepromenjeno. Ovo je posledica pojave udarnog talasa u zoni između mlaznice i mašinskog dela, koji izaziva skok pritiska koji je reda veličine nekoliko desetina mikrometra, Rucki et al. (2008).



Slika 4.19. Struktura mlaza vazduha između mlaznice i ravne površine

Ovaj fenomen je još uvek nedovoljno istražen, najviše iz razloga malih rastojanja između mlaznice i ravne površine, reda veličine nekoliko mikrometara. Ovako mala rastojanja problem svrstavaju u eksperimentalno izučavanje, kako će se kasnije pokazati, transoničnog strujanja u mikrokanalima, što ima svoje poteškoće. Ovu pojavu je prvi uočio Markow et al. (1971), a obrađena je i u Crnojević et al. (1996). Kako se vidi sa dijagrama prikazanih na slici 4.20, skok pritiska nastaje samo pri određenim uslovima. Za manje vrednosti pritiska napajanja p_0 skok pritiska se javlja pri manjim vrednostima δ , a za veće vrednosti pritiska napajanja, skok pritiska se javlja pri većim vrednostima δ . Tako se npr, za $p_0=3,5$ bar skok pritiska javlja pri $\delta=250 \mu\text{m}$, a za $p_0=4$ bar skok pritiska se javlja pri $\delta=350 \mu\text{m}$.



Slika 4.20. Skok pritiska za sve pritiske napajanja p_0 **a)** dijagrami $p(\delta)$ za $\delta=0 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$ **b)** pogled na detalj sa levog dijagrama $p(\delta)$ za $\delta=220 \mu\text{m} - 350 \mu\text{m}$

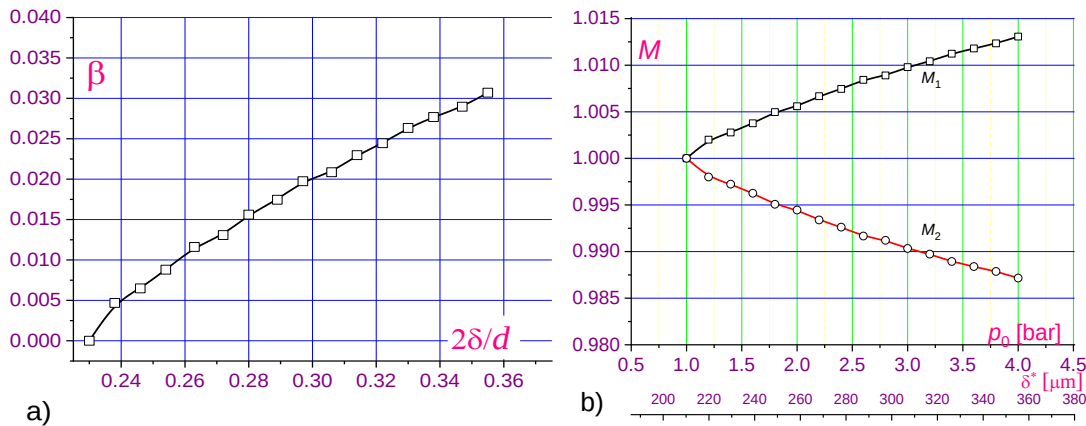
U strukturi udarnog talasa koji se javlja u oblasti između mlaznice i kontrolisanog dela, za razliku od poznatih rezultata u literaturi koji važe za $\delta/d > 1$, ovde se sa sigurnošću može konstatovati postojanje Mahovog konusa na zidu zaustavnog mehura i granice od izlaznog mlaza koja je vezana za kosi udarni talas, slika 4.19. Za prav udarni talas koji je u blizini zida važe relacije za Mahov broj pre i posle udarnog talasa

$$M_1 = \sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)} \quad \text{i} \quad M_2 = \sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right)}, \quad (4.4)$$

gde je $k=1,4$ eksponent izentrope, dok se intenzitet udarnog talasa određuje primenom

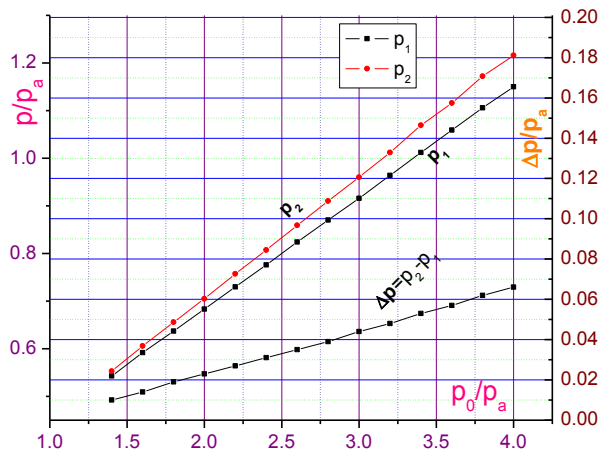
$$\beta = \frac{p_2}{p_1} - 1 \quad (4.5)$$

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja sprovedenih u ovoj disertaciji, pokazuje se da se za odnos pritisa $p_2/p_1 = 1,0018$ do $1,029$ Mahov broj pre i posle udarnog talasa dobija vrednosti od $M_1 = 1,0008$ do $1,0125$ i $M_2 = 0,9992$ do $0,9877$. S obzirom na ove vrednosti Mahovog broja, jasno je da se ovde radi o transoničnom strujanju gasa. Na osnovu izmerenih vrednosti pritisa p_1 i p_2 , korišćenjem izraza (4.5), izračunati su intenziteti udarnog talasa za odgovarajuće parove vrednosti pritiska, i nacrtan dijagram raspodele jačine udarnog talasa u zavisnosti od aksijalnog rastojanja δ , koji je prikazan na slici 4.21a. korišćenjem istih vrednosti pritiska i izraza (4.4) nacrtan je i dijagram raspodele Mahovih brojeva M_1 i M_2 , prikazan na slici 4.21b.

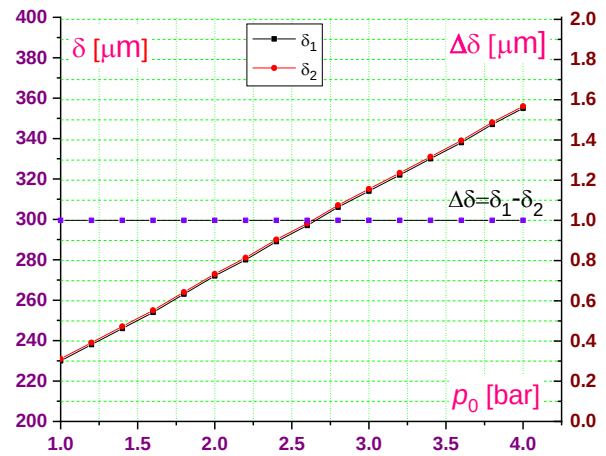


Slika 4.21. a) Intenzitet udarnog talasa i **b)** promena Mahovog broja pre i posle udarnog talasa u zavisnosti od pritiska napajanja p_0

Sa slike 4.21a se potvrđuje da su udarni talasi malog intenziteta, međutim, njihova jačina se povećava sa porastom pritiska napajanja (v. slike 4.21b, 4.22 i 4.23), što je i očekivano ako se imaju u vidu uslovi u kojima nastaje udarni talas.



Slika 4.22. Zavisnost skoka pritiska od pritiska napajanja p_0



Slika 4.23. Raspodela aksijalnog rastojanja δ u trenutku nastanka skoka pritiska u zavisnosti od pritiska napajanja p_0

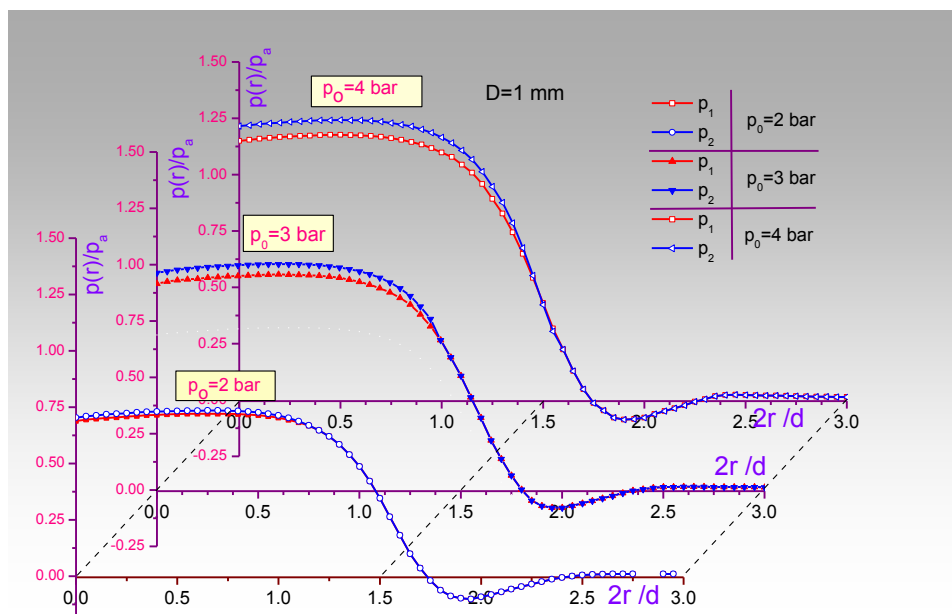
Takođe, sa porastom pritiska napajanja, pored porasta aksijalnog rastojanja na kojem dolazi do skoka pritiska, dolazi i do porasta vrednosti pritiska pre i posle udarnog talasa, što je i očekivano

ako se ima u vidu raspodela pritiska u aksijalnom pravcu prikazana na slici 4.6. Kao što se vidi sa slike 4.23, na mestu skoka pritiska se bez povećanja aksijalnog rastojanja ili sa mikrometarskim povećanjem ove veličine, odvija naglo povećanje pritiska sa vrednosti p_1 na vrednost p_2 . Za najmanji pritisak napajanja p_0 i skok pritiska Δp je najmanji. U tabeli 4.16 prikazane su sve karakteristične vrednosti za različite pritiske napajanja.

Tabela 4.16. Veličine dijagrama za $p(\delta)$ za pritisak napajanja $p_0=1,4 \text{ bar} - 4,0 \text{ bar}$

bar	bar			μm			M_1	M_2
p_0	p_1	p_2	Δp	δ_1	δ_2	$\Delta\delta$		
4,0	1,150	1,216	0,066	355	356	1	1,0130	0,9873
3,8	1,106	1,167	0,061	347	348	1	1,0123	0,9878
3,6	1,059	1,116	0,057	338	339	1	1,0117	0,9883
3,4	1,012	1,065	0,053	330	331	1	1,0112	0,9889
3,2	0,964	1,012	0,048	322	323	1	1,0104	0,9896
3,0	0,916	0,960	0,044	314	315	1	1,0097	0,9903
2,8	0,870	0,909	0,039	306	307	1	1,009	0,9909
2,6	0,824	0,860	0,035	297	298	1	1,0083	0,9916
2,4	0,776	0,807	0,031	289	290	1	1,0074	0,9925
2,2	0,730	0,757	0,027	280	281	1	1,0066	0,9933
2,0	0,683	0,705	0,023	272	273	1	1,0057	0,9942
1,8	0,637	0,656	0,019	263	264	1	1,0049	0,9950
1,6	0,592	0,606	0,014	254	255	1	1,0037	0,9962
1,4	0,543	0,553	0,010	246	247	1	1,0027	0,9972
1,2	0,495	0,502	0,007	238	239	1	1,0015	0,9982
1,0	0,447	0,447	0,000	230	231	1	1	1

Na slici 4.24 je prikazana raspodela pritiska u radijalnom pravcu za tri različita pritiska napajanja, na kojoj se jasno uočava granica Mahovog diska, oblasti u kojoj vladaju uslovi pre udarnog talasa, u ovoj disertaciji izraženi preko pritiska p_1 . U tabeli 4.17 su date vrednosti radijalne koordinate r^* i aksijalnog rastojanja δ^* za koje se javlja udarni talas između mlaznice i ravne površine za različite pritiske napajanja p_0 .



Slika 4.24 3-D dijagram skoka pritiska za $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar za $D=1,0$ mm

Ovo je najbolja ilustracija postojanja udarnog talasa i njegovih granica u ovoj strujnoj geometriji. Pri najvećem pritisku napajanja $p_0=4$ bar, je najveća razlika između pritisaka p_1 i p_2 , najveća je radijalna koordinata r^* koja ograničava oblast nadzvučnog strujanja, a najveća je i vrednost aksijalnog rastojanja koja je jedan od uslova za pojavu udarnog talasa i diskontinuiteta u raspodeli pritiska. Kako se smanjuje pritisak napajanja, smanjuju se i ostale nabrojane karakteristične veličine.

Tabela 4.17. Vrednosti radijalne i aksijalne koordinate u trenutku nastanka udarnog talasa za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4bar

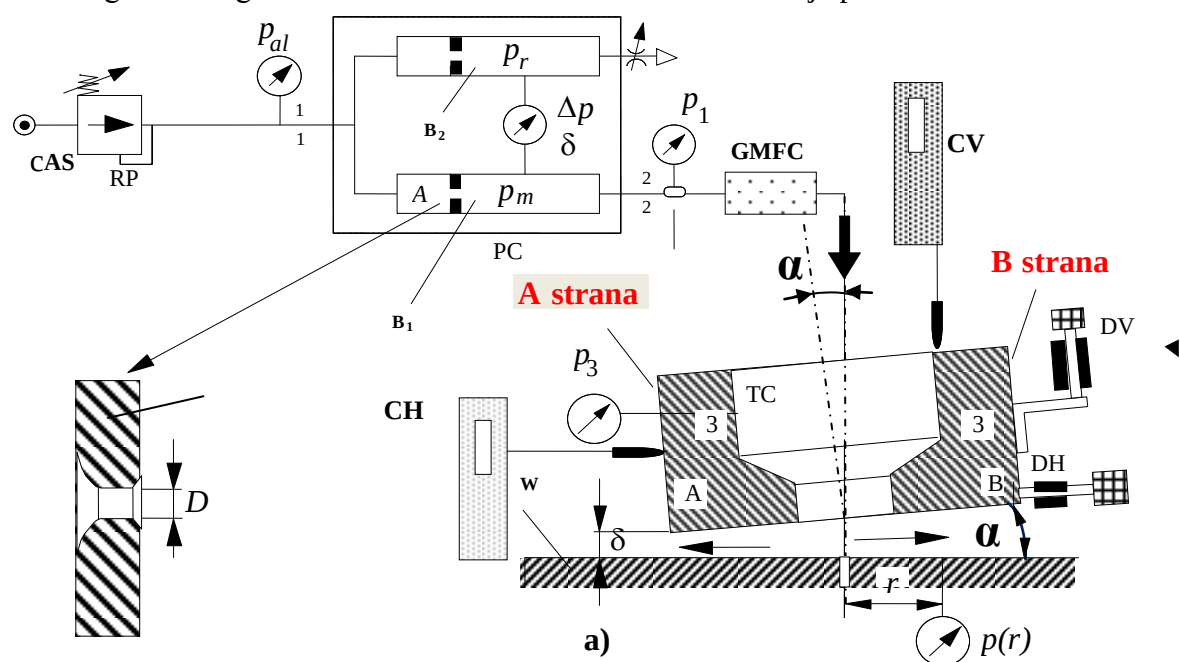
p_0 [bar]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	δ^* [μm]	r^* [μm]
2	0,658	0,704	275	1,160
3	0,916	0,960	314	1,420
4	1,150	1,216	355	1,630

Na osnovu prikazanih eksperimentalnih rezultata i uočenog fenomena pojave diskontinuiteta pritiska za veće vrednosti aksijalnog rastojanja δ , izbegava se primena pneumatskog diferencijalnog komparatora za veće vrednosti δ , jer u ovim oblastima aksijalnog rastojanja između čela mlaznice i površine mernog komada postoji opasnost od pojave diskontinuiteta pritiska, odnosno greška pri kontroli mašinskih delova.

U ovom poglavlju su prikazani rezultati koji potvrđuju i u nekim delovima proširuju postojeća znanja o radu i upotrebi diferencijalnih pneumatskih komparatora u dimenzijskoj kontroli mašinskih delova. Prikazani rezultati će biti od koristi za dalje analize i poređenja u nastavku ove disertacije.

5 UTICAJ NAGIBA IZLAZNE MLAZNICE NA RASPODELE PRITISKA NA POVRŠI MAŠINSKOG DELA

U prethodnom poglavlju analizirane su raspodele pritiska u aksijalnom i radijalnom pravcu pri tzv. normalnim uslovima rada kada nema nagnutosti izlazne mlaznice u odnosu na kontrolisani komad, tj. pri uglu $\alpha=0^\circ$. U praksi se mogu javiti i slučajevi kada je izlazna mlaznica postavljena pod uglom α u odnosu na merni komad, zbog eventualne greške u montaži merne grane ili njene istrošenosti usled dugotrajne upotrebe. Postoje proučavanja udara mlaza stišljivog fluida u nagnutu čvrstu podlogu, ali ne za potrebe pneumatske metrologije, već za uslove kada je $\delta/d > 1$. Proučavanje uticaja nagnutosti izlazne mlaznice, odnosno udara kosog mlaza, u odnosu na merni komad predstavlja novi efekat u proučavanju rada pneumatskog komparatora. Postojeća instalacija prikazana na slici 3.1 omogućava ugaono zakretanje izlazne mlaznice u odnosu na položaj $\alpha=0^\circ$ tj. u odnosu na površ mašinskog dela koji se kontroliše. Shematski prikaz merne instalacije kada je mlaznica nagnuta za ugao α u odnosu na normalu na merni komad je prikazana na slici 5.1.

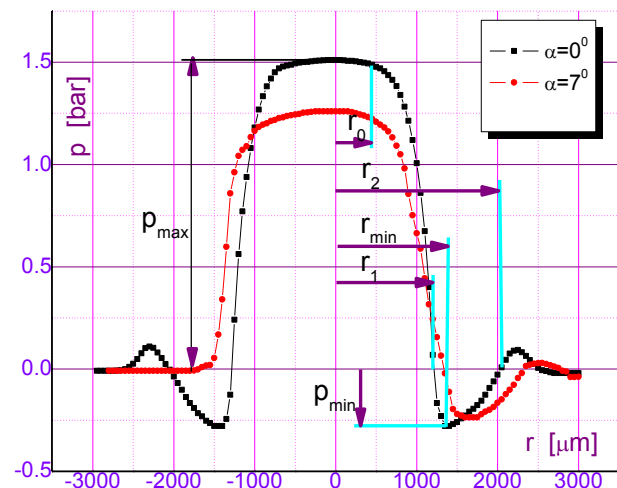


Slika 5.1. Šema merne instalacije sa nagnutom izlaznom mlaznicom u odnosu na normalnu osu, Skoko et al. (2017): K - kompresor, BV - Rezervoar za vazduh, RP - regulator pritiska, M_0 - manometar na ulazu u komparator, PC - diferencijalni pneumatski komparator, B_1 - merna komora, A - mlaznica u mernoj komori, C - mlaznica u referentnoj komori B_2 - referentna komora, M_2 - manometar na ulazu u protokomer, CP - protokomer, DV - mikrometar za vertikalno pomeranje, DH - mikrometar za horizontalno pomeranje, CV - akvizicija vertikalnog pomeranja, CH akvizicija horizontalnog pomeranja, MK - merni komad (mašinski deo), MI - izlazna mlaznica, MM - merno mesto, M_1 - manometar za merenje pritiska na površ mernog komada

U ovom delu rada, za zadate prečnike mlaznice D merne grane i d izlazne mlaznice M-1, eksperimentalnim putem proučavan je uticaj ugla nagiba izlazne mlaznice α za različite pritiske napajanja p_0 na pneumatsku osetljivost komparatora i položaj i veličinu vrtložne zone u zoni zida. Merenje pritiska je vršeno za slučajeve da izlazna mlaznica odstupa od normalnog položaja za: 1° do 7° , sa korakom od 1° . Pritisak napajanja je $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar a prečnik prigušnice A je $D=1,0$ mm. Korak pri radijalnom pomeranju izlazne mlaznice M-1 je $\Delta\delta=10\mu\text{m}$, dok je korak pri aksijalnom pomeranju mlaznice tj. pomeranje u pravcu ose mlaznice $\Delta\delta=1\mu\text{m}$.

5.1 UTICAJ NAGIBA MLAZNICE NA RADIJALNU RASPODELU PRITISKA NA POVRŠI MERENOG KOMADA

Na slici 5.2 prikazan je dijagram radijalnog polja pritiska $p(r, \alpha)$ sa osnovnim veličinama, koje će se koristiti u okviru analize eksperimentalnih rezultata. Dijagrami radijalne raspodele pritiska pri pritisku napajanja komprimovanim vazduhom $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar i aksijalnom rastojanju $\delta=250\mu\text{m}$ između izlaznog preseka mlaznice i površi mernog komada, za različite uglove α prikazan je na slici 5.3. Oblast radijalnog pomeranja mlaznice je $-3000\mu\text{m} \leq r \leq 3000\mu\text{m}$. Referentna raspodela pritiska u radijalnom pravcu $p(r, \alpha)=p(r, 0^\circ)$ je osnova za analizu dijagrama sa nagnutom mlaznicom $p(r)=p(r, \alpha)$. Kao što se videlo u okviru razmatranja u prethodnoj Glavi ove disertacije, referentna kriva radijalne raspodele pritiska $p(r, 0^\circ)$ je simetrična u odnosu na osu mlaza vazduha. Nasuprot tome, sa nagibanjem mlaznice dolazi do promena u radijalnoj raspodeli pritiska u odnosu na polje pritiska koje se uspostavlja kada je mlaznica postavljena upravno u odnosu na merni komad.

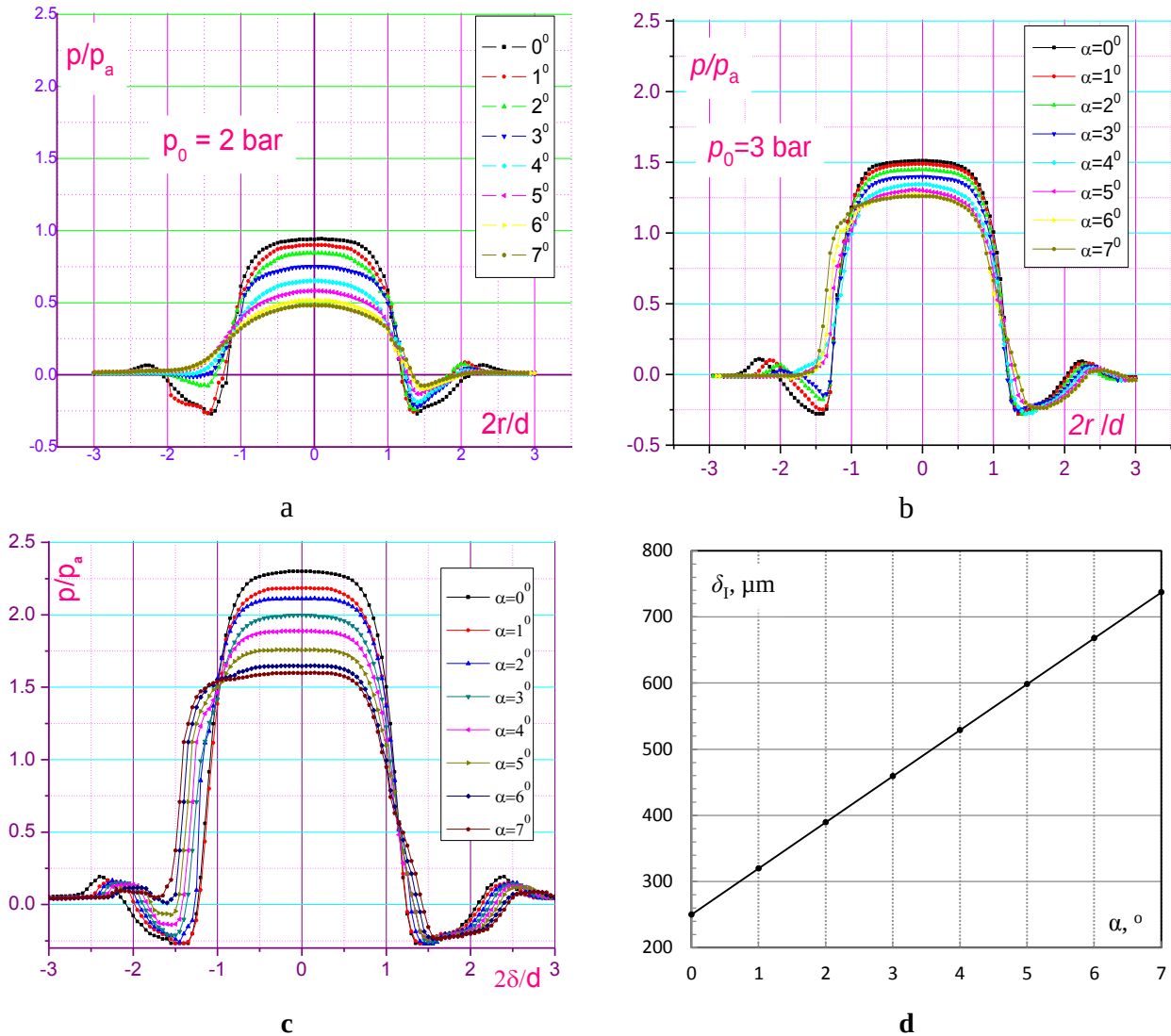


Slika 5.2. Osnovne veličine raspodele pritiska u radijalnom pravcu: r_0 -radijalno rastojanje za $p=p_{\max}$, r_1 - i r_2 -radijalno rastojanje za $p=0$ bar, $r_{\min}$ -radijalno rastojanje za $p=p_{\min}$

Na slici 5.3 su prikazane raspodele pritiska u radijalnom pravcu za tri vrednosti pritiska napajanja. Očigledan je uticaj vrednosti pritiska napajanja na polje pritiska. Što je veća vrednost napajanja, to je veća vrednost pritiska u jezgri mlaza, bez obzira na nagnutost mlaznice. Sa povećanjem ugla nagnutosti mlaznice dolazi do opadanja vrednosti pritiska u jezgri mlaza i do formiranja raspodele pritiska koja nije simetrična u odnosu na osu mlaza. Što je veći ugao nagnutosti mlaznice, to je više izražena i nesimetričnost raspodela pritiska u radijalnom pravcu. Praktično, dolazi do smanjivanja pravolinijskog dela u radijalnoj raspodeli pritiska u zoni maksimalne vrednosti pritiska. U skladu sa tim, kod analize polja pritiska u radijalnom pravcu je poželjno posmatrati "levi" deo dijagrama - na strani mlaznice gde se smanjuje rastojanje između mlaznice i mernog komada (tačka A na slici 5.1) i "desni" deo dijagrama - na strani mlaznice gde se rastojanje između mlaznice i mernog komada povećava (tačka B na slici 5.1).

Kao što je pokazano u prethodnoj glavi, u oblasti zida se formiraju zone potpritiska. Za najmanju vrednost pritiska napajanja, $p_0=2$ bar, potpritisak se gubi na "levoj" strani dijagrama za dovoljno velike uglove nagnutosti. Konkretno, u ovom istraživanju za uglove veće od 3° , kada je pritisak

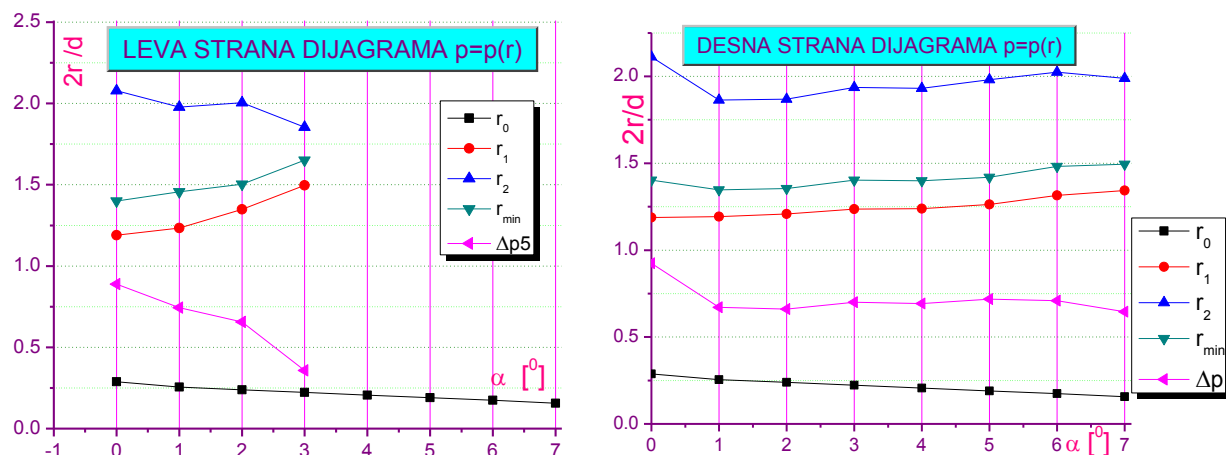
napajanja $p_0=2$ bar nema potpritiska na strani mlaznice koja je zbog nagnutosti bliža mernom komadu. Iako, za ugao nagiba od 3° , vrednost potpritiska je dovoljno mala tako da ne ometa ispravan rad komparatora. Za pritisak napajanja $p_0=3$ bar, zona potpritiska se eliminiše za istu vrednost ugla, ali su vrednosti potpritiska za uglove od 0° do 3° veće nego za pritisak napajanja $p_0=2$ bar. Takođe, sa strane manjeg aksijalnog rastojanja između mlaznice i mernog komada, pritisak uvek ostaje u zoni malih negativnih vrednosti, koje međutim, ne ometaju pravilan rad pneumatskog komparatora. Sa daljim povećanjem pritiska napajanja, potrebno je mlaznicu nagnuti za veći ugao da bi se eliminisala zona potpritiska sa te strane mlaznice. Tako je za pritisak napajanja $p_0=4$ bar, mlaznicu potrebno nagnuti za ugao od 6° ili veći, kako ne bi došlo do formiranja zone potpritiska u zoni zida.



Slika 5.3. Uticaj ugla nagiba mlaznice na radialnu raspodelu pritiska za pritisak napajanja **a)** $p_0=2$ bar, **b)** $p_0=3$ bar, **c)** $p_0=4$ bar i na **d)** aksijalno rastojanje između udaljenije ivice δ_l mlaznice M-1 i mernog komada, za prečnik prigušnice $D=1$ mm i aksijalno rastojanje između izlaznog preseka mlaznice upravne na merni komad i mernog komada od $\delta = 250 \mu m$.

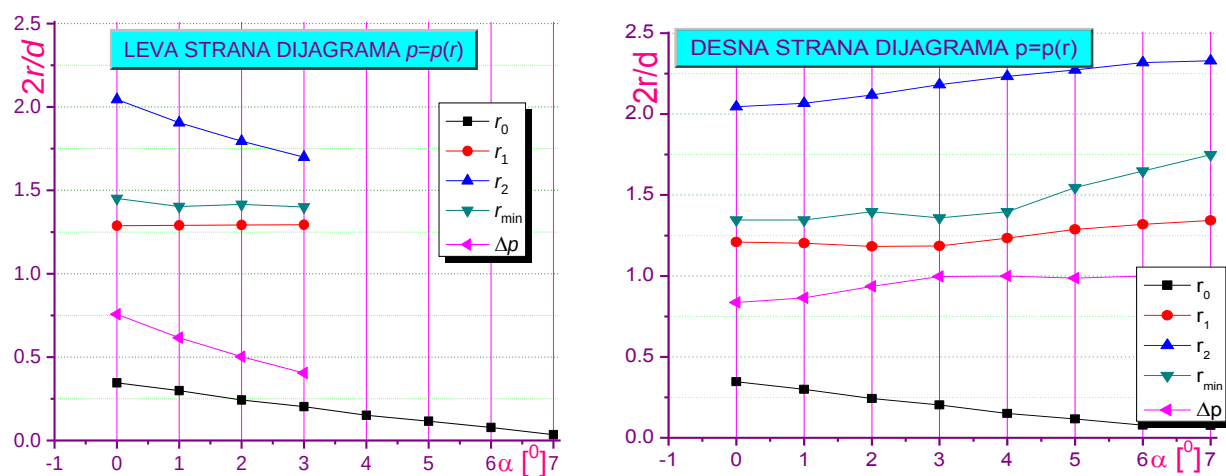
Sa druge strane, na strani mlaznice na kojoj se povećava rastojanje između mlaznice i mernog komada, zona potpritiska postoji bez obzira na ugao nagnutosti mlaznice. Ovo je i očekivano, s obzirom na to da je veći deo protoka usmeren prema strani gde je veće rastojanje između mlaznice i mernog komada, gde se povećava brzina, pa prema jednačini kontinuiteta opada pritisak. Sve vreme se mora imati u vidu da, iako postoji povećanje rastojanja između kraja mlaznice i mernog komada,

to rastojanje označeno sa δ_l je i dalje veoma malih dimenzija, kao što se vidi na slici 5.3d. Ono što izdvaja raspodelu pritiska u radijalnom pravcu sa strane većeg aksijalnog rastojanja između mlaznice i mernog komada jeste činjenica da posle dostizanja lokalnog maksimuma u zoni zida, pritisak ponovo uzima negativne vrednosti tako što se asimptotski približava nultoj vrednosti sa negativne strane.



Slika 5.4. Veličina i položaj apsolutnih vrednosti radijalnih koordinata r_0 , r_1 , r_2 , r_{min} za pritisak $p_0=2$ bar i $\delta=250 \mu m$ na levoj i desnoj strani dijagrama radijalne raspodele pritiska

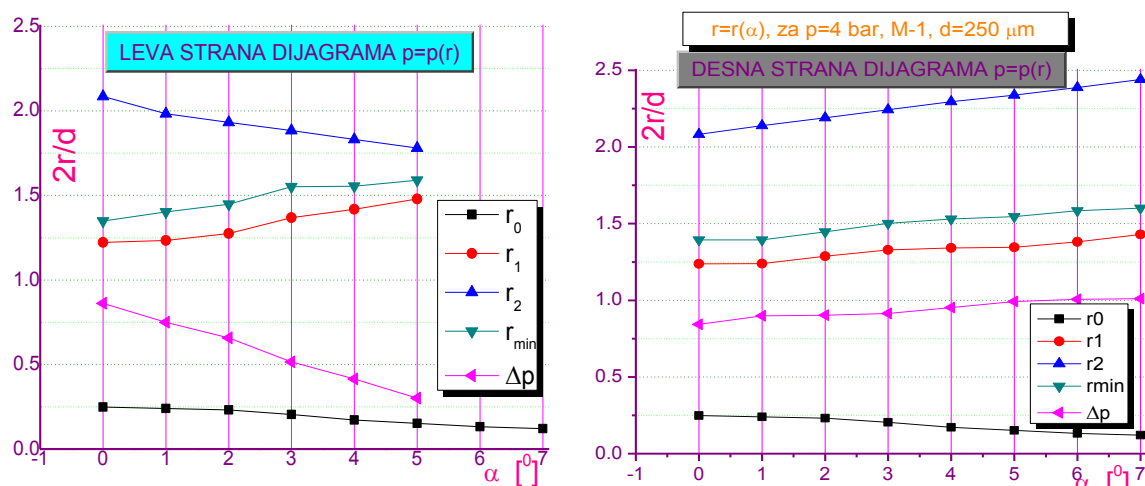
Na slikama 5.4 do 5.6 prikazane su karakteristične veličine sa dijagrama raspodele pritiska u radijalnom pravcu, u zavisnosti od ugla nagnutosti mlaznice i pritiska napajanja, na strani manjeg i većeg rastojanja mlaznice i mernog komada. Ovde se najbolje uočava uticaj ugla nagnutosti mlaznice na formiranje određenih oblasti pritiska u radijalnom pravcu. Još jednom se potvrđuje da za pritiske napajanja $p_0=2$ bar i $p_0=3$ bar, potpritisak u zoni zida nestaje za ugao nagnutosti mlaznice koji je veći od 3° , dok se za najveći razmatrani pritisak napajanja $p_0=4$ bar, potpritisak zadržava sve dok je mlaznica nagnuta pod uglom do 5° . Zanimljivo je da se radijalna koordinata minimalne vrednosti pritiska r_{min} povećava za pritiske napajanja $p_0=2$ bar i $p_0=4$ bar, dok se za $p_0=3$ bar, ova koordinata praktično ne menja. Sa povećanjem vrednosti ove koordinate dolazi do udaljavanja zone minimalnog pritiska od ose mlaznice što je poželjno u radu pneumatskog komparatora, kako bi se smanjilo deponovanje nečistoća u zoni glave uređaja.



Slika 5.5. Veličina i položaj apsolutnih vrednosti radijalnih koordinata r_0 , r_1 , r_2 , r_{min} za pritisak $p_0=3$ bar i $\delta=250 \mu m$ na levoj i desnoj strani dijagrama radijalne raspodele pritiska

Pored udaljavanja zone potpritiska od ose mlaznice, važna je i veličina ove zone. U sva tri razmatrana slučaja pritiska napajanja, vrednost Δr opada sa povećanjem ugla nagiba mlaznice.

Međutim, razlikuju se uzroci ovakvog ponašanja vrednosti Δr . Tako, za pritiske napajanja $p_0=2$ bar i $p_0=4$ bar, oblast Δr se smanjuje na račun smanjivanja koordinate r_2 koja predstavlja radijalnu koordinatu kada pritisak menja znak iz negativne u pozitivnu vrednost, uz istovremeni porast koordinate r_1 koja označava vrednost radijalne koordinate pri kojoj vrednost pritiska postaje negativna. To znači da sa povećanjem ugla nagiba mlaznice dolazi do udaljavanja od ose mlaznice celokupne zone u kojoj pritisak ima negativnu vrednost, što je takođe pozitivno sa stanovišta primene pneumatske metrologije. Sa druge strane, za pritisak napajanja $p_0=3$ bar, vrednosti radijalne koordinate pri kojoj pritisak postaje negativan u zoni zida se praktično ne menja, pa se oblast negativnog pritiska smanjuje na račun smanjenja koordinate r_2 pri kojoj vrednost pritiska postaje pozitivna.



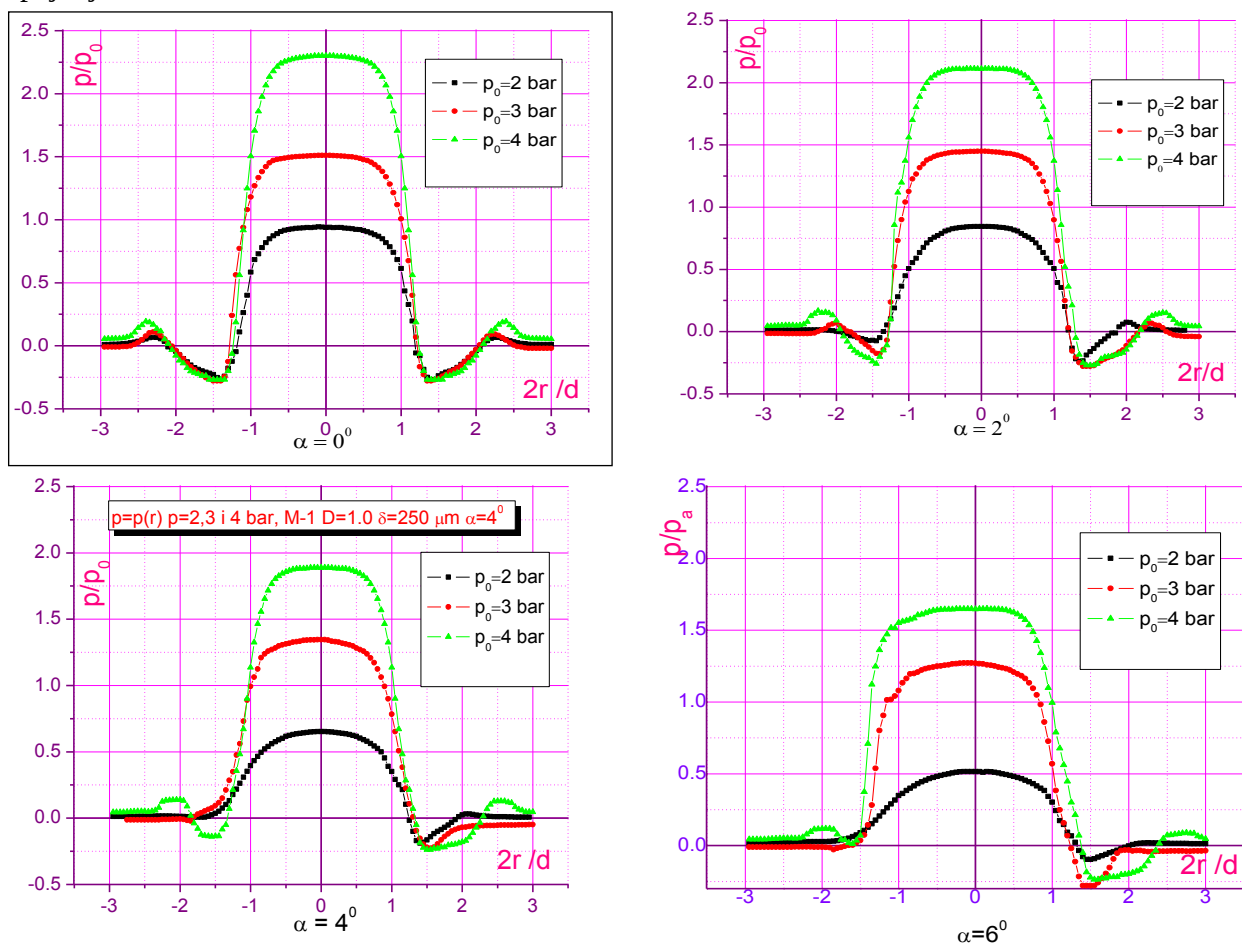
Slika 5.6. Veličina i položaj apsolutnih vrednosti radijalnih koordinata r_0 , r_1 , r_2 , r_{min} za pritisak $p_0=4$ bar i $\delta=250 \mu m$ na levoj i desnoj strani dijagrama radijalne raspodele pritiska

Sa strane većeg rastojanja između mlaznice i mernog komada, oblast potpritiska se zadržava bez obzira na ugao nagiba mlaznice. Postoje blaža odstupanja u polju pritiska u odnosu na upravni položaj mlaznice u pogledu radijalne koordinate kada pritisak postaje negativan, i to tako da se ovaj položaj udaljava od ose mlaznice. Međutim, sa povećanjem ugla nagiba mlaznice dolazi do proširenja oblasti potpritiska na ovoj strani mlaznice uz istovremeno opadanje vrednosti lokalnog maksimuma pritiska u oblasti zida. Za pritisak napajanja $p_0=2$ bar postoji težnja da sa povećanjem vrednosti ugla nagiba mlaznice dođe do nestajanja zone potpritiska, što je posledica malog pritiska napajanja. Za ostale dve vrednosti pritiska napajanja, zona potpritiska se proširuje i vrednost potpritiska ostaje praktično nepromenjena za sve uglove nagiba mlaznice.

Uticao pritiska napajanja na polje pritiska na površi mernog komada za različite vrednosti ugla nagiba mlaznice je prikazan na slici 5.7. Još jednom se potvrđuje da naginjanje mlaznice uzrokuje nesimetričnost raspodele pritiska u odnosu na podužnu osu mlaznice, koja je u toliko veća koliko je veća vrednost ugla nagiba α . Međutim, ono što je na ovoj slici posebno uočljivo jeste uticaj nagiba mlaznice na raspodele pritiska u zoni zida, kako sa strane manjeg rastojanja mlaznice i mernog komada, tako i sa strane gde je to rastojanje povećano usled nagnutosti mlaznice.

Na mlaznicu koja je postavljena upravno u odnosu na merni komad, zone potpritiska sa obe strane mlaznice imaju skoro iste karakteristike – nastaju na istom radijalnom rastojanju od podužne ose mlaznice i vrednost potpritiska je praktično ista. Međutim, sa naginjanjem mlaznice, dolazi do promena u ovim zonama, koje u mnogome zavise od vrednosti pritiska napajanja p_0 . Ovde se najbolje vidi da sa strane malog aksijalnog rastojanja između mlaznice i mernog komada sa povećanjem ugla nagiba mlaznice postoji tendencija smanjivanja vrednosti potpritiska. Čak za

manje vrednosti pritiska napajanja, može doći i do potpunog eliminisanja ove zone. Ova težnja postoji i sa strane većeg rastojanja između mlaznice i mernog komada za male vrednosti pritiska napajanja.



Slika 5. 7. Radijalna raspodela pritiska $p=p(r)$ za $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar, $\delta=250 \mu\text{m}$ i $\alpha=0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ i 6°

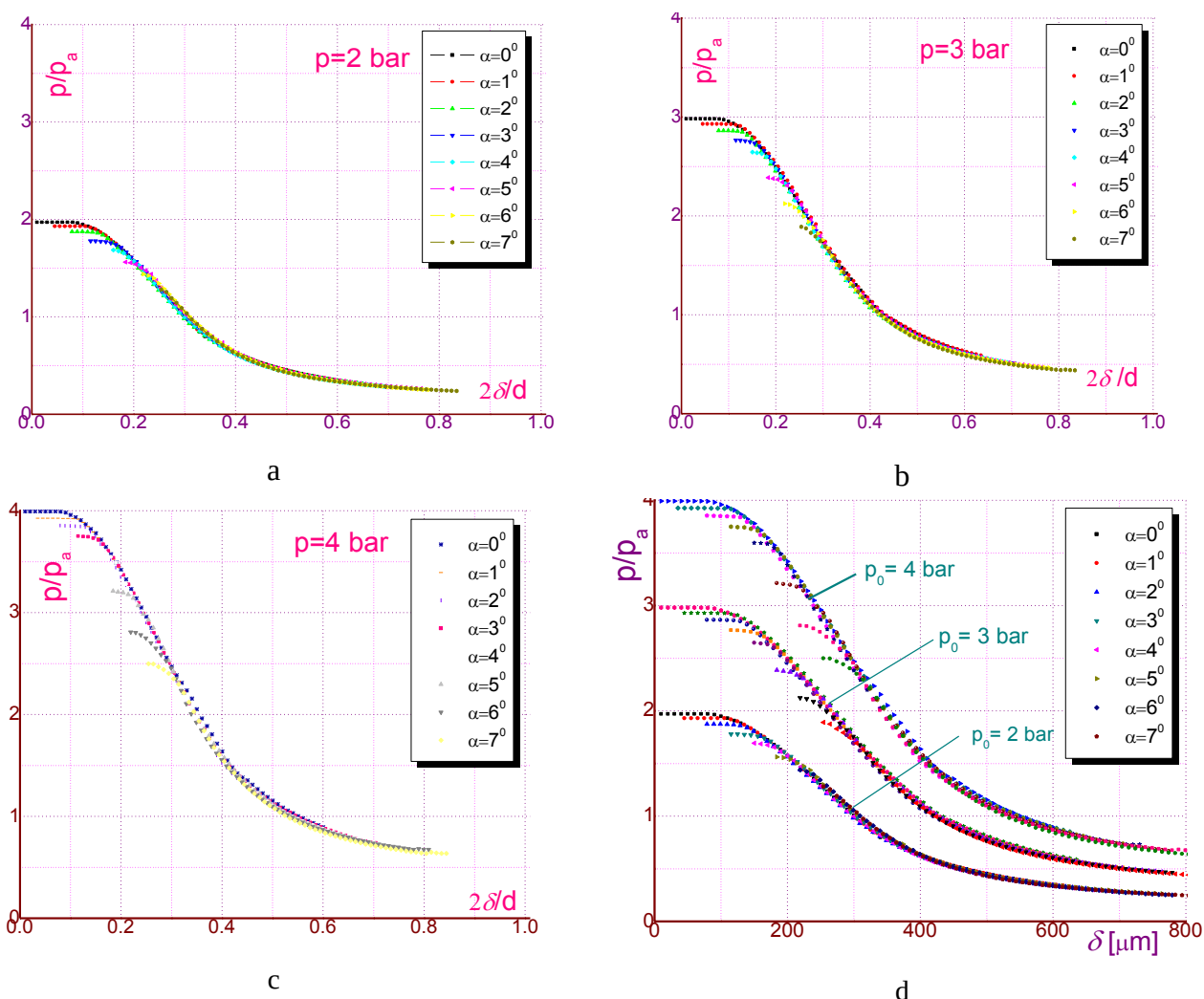
Sa gledišta pneumatske metrologije, oblast potpritiska u zoni zida tj. na mernom komadu je nepoželjna i teži se tome da je ona mala i sa malom vrednošću potpritiska. Očigledno je da povećanjem ugla nagiba mlaznice dolazi do smanjenja ove oblasti, čak, za neke vrednosti pritiska napajanja, i do smanjenja vrednosti potpritiska do vrednosti koje su prihvatljive za primenu u pneumatskoj metrologiji. Ostaje da se vidi kako nagib mlaznice utiče na opseg primene i pneumatsku osetljivost pneumatskog komparatora, što će biti jedne od tema narednog odeljka.

5.2 UTICAJ NAGIBA MLAZNICE NA AKSIJALNU RASPODELU PRITISKA NA POVRŠI MERENOG KOMADA

Na slici 5.8 prikazane su raspodele pritiska na površi mernog komada u aksijalnom pravcu u zavisnosti od ugla nagiba izlazne mlaznice M-1. Kao što se može videti na ovoj slici, nezavisno od pritiska napajanja, nagnjanje mlaznice dovodi do promena u raspodeli pritiska u odnosu na osnovni slučaj u kome je mlaznica postavljena upravno u odnosu na površ mernog komada.

Početak krive $p(\delta, \alpha)$ u odnosu na referentnu krivu $p(\delta, 0)$ je pomeren, i to tako što se smanjuje vrednost pritiska a smanjuje aksijalna dužina stalnog maksimalnog pritiska δ_0 (v. slike 4.3 i 5.9). Naime, za referentnu krivu aksijalnog pritiska, pritisak u osi mlaza je najveći i jednak je pritisku napajanja. U odnosu na ovo stanje porastom ugla α početak krive $p(\delta, \alpha)$ je pomeren u pozitivnom

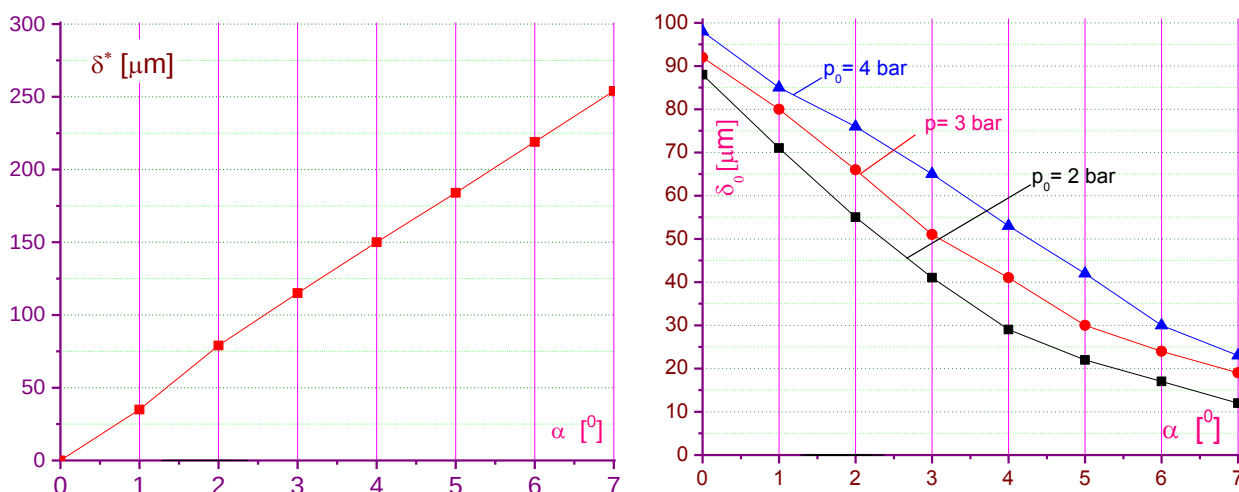
smeru δ -ose za $\delta^* = 0,5D \sin \alpha$ (v. sliku 5.9), gde je $D=4$ mm spoljašnji prečnik izlazne mlaznice M-1. U početnom položaju ($\delta=0$) mlaznica za svaki ugao naginjanja dodiruje ravnu površ mašinskog dela. Međutim, samo u slučaju kada je mlaznica upravna na površ mernog komada, pritisak na ravnoj površi ima vrednost pritiska napajanja, $p=p_0=p^*$, obzirom da je izlazna mlaznica celim svojim izlaznim presekom naslonjena na merni komad (v. sliku 5.10).



Slika 5.8. Uticaj ugla nagiba mlaznice na raspodelu pritiska na mernom komadu u aksijalnom pravcu za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3bar i 4 bar i prečnik prigušnice $D=1$ mm.

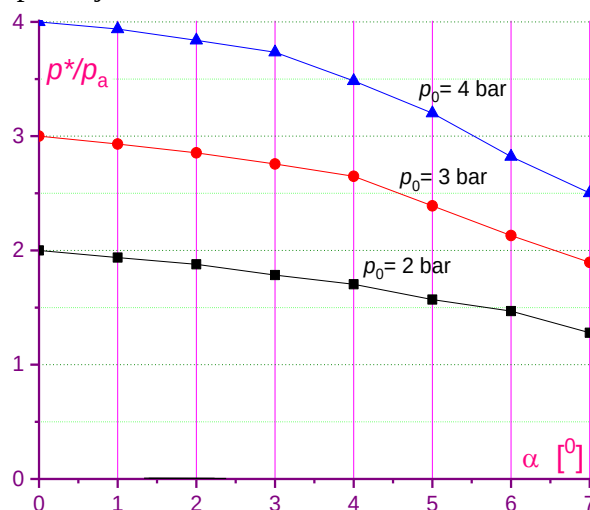
Smanjenje početnog pritiska $p(\delta_0, \alpha)=p^*$ sa porastom ugla α je povezano sa "veštačkim" porastom rastojanja između mlaznice i mernog komada, jer se središnji deo izlaznog preseka mlaznice udaljava od površi mernog komada proporcionalno sinusu ugla nagiba mlaznice. Na taj način se, za uglove nagiba mlaznice $\alpha \neq 0$ u početnom položaju mlaznica oslanja na površ mernog komada samo jednim delom svoje frontalne površi. Povećanjem nagiba mlaznice, početni položaj naslanjanja frontalne površi mlaznice se smanjuje, a samim tim se smanjuje i pritisak jer se povećava zazor između čela mlaznice i ravne površi. Dakle, usled naginjanja mlaznice pneumatskog komparatora dolazi do smanjenja dužine δ_0 (v. sliku 4.5 i 5.9), a samim tim i do smanjenja vrednosti pritiska u nultom položaju mlaznice, u kome je fizičko rastojanje u aksijalnom pravcu između mlaznice i površi mernog komada ($\delta=0$). Sa slika 5.8 i 5.10 se uočava da je za veće vrednosti pritiska napajanja veća i razlika između pritiska napajanja p_0 i umanjenog pritiska zbog nagnutosti mlaznice p^* . Šta više, za veće vrednosti ugla nagiba izlazne mlaznice gradijent pritiska

p^* je veći. Može se reći da je uticaj nagiba mlaznice na početni pritisak p^* za uglove mlaznice do 3° praktično nezavistan od pritiska napajanja.

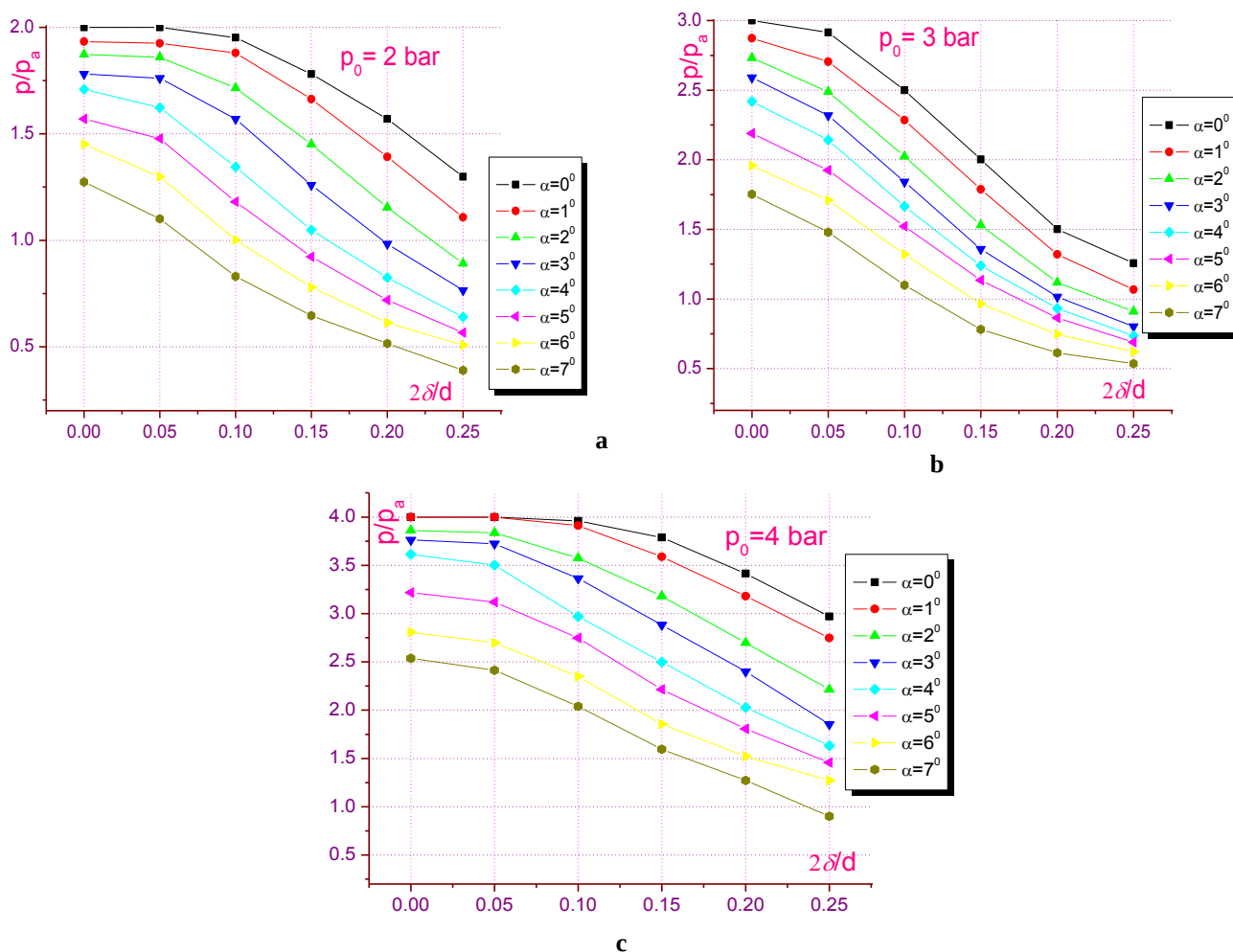


Slika 5.9. Uticaj ugla nagiba mlaznice na vrednost rastojanja sredine izlaznog preseka mlaznice δ^* i na smanjenje aksijalne dužine δ_0 stalnog početnog pritiska p^* u položaju mlaznice $\delta=0 \mu\text{m}$.

Shodno tome, na slici 5.11 su date vrednosti pritiska na ravnoj površi mernog komada za pritiske napajanja $p_0=2 \text{ bar}$, 3 bar i 4 bar za karakteristična aksijalna rastojanja između izlaznog preseka mlaznice i površi mernog komada: $\delta=0 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ i $250 \mu\text{m}$. Uočava se smanjenje pritiska na ravnoj površi sa udaljavanjem mlaznice od mernog komada i to tako da je za malo aksijalno pomeranje $\delta=50 \mu\text{m}$ mali pad pritiska, dok za veća aksijalna pomeranja pad pritiska veći. Karakteristično je da je najveći pritisak napajanja, pritisak na površi mernog komada ostaje nepromenjen iako je mlaznica koja je nagnuta za ugao od 1° udaljena od mernog komada za $50 \mu\text{m}$. Ovo je, naravno, posledica velike vrednosti pritiska napajanja za ovako malo aksijalno rastojanje između mlaznice i mernog komada. Čak, i za veće vrednosti ugla nagiba mlaznice pri najvećem pritisku napajanja dolazi do manjeg pada pritiska na površi mernog komada za sve razmatrane aksijalne pozicije mlaznice.



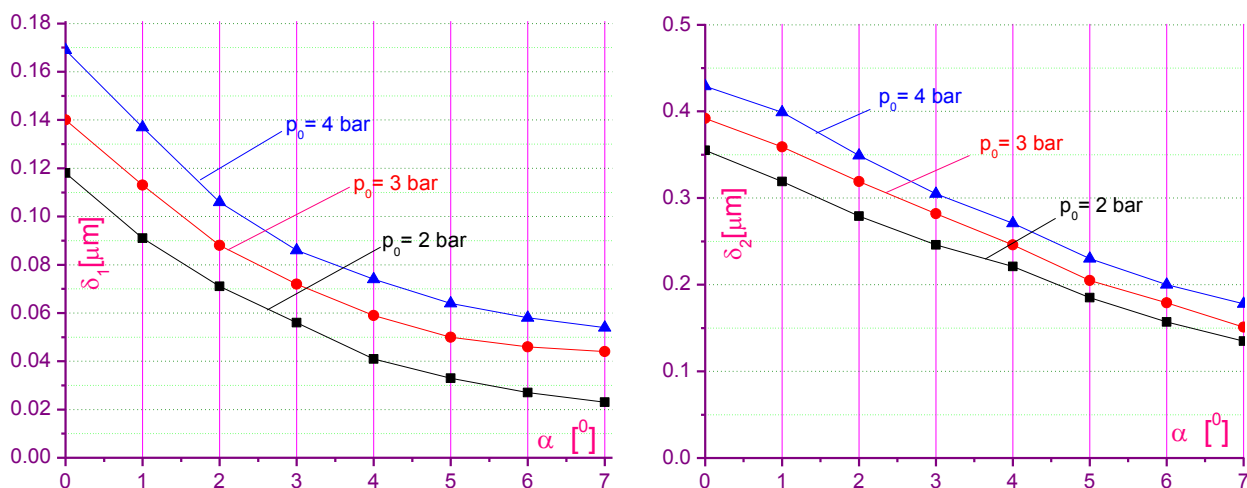
Slika 5.10. Uticaj ugla nagiba mlaznice na vrednost početnog pritiska p^* u nultom položaju mlaznice u odnosu na merni komad.



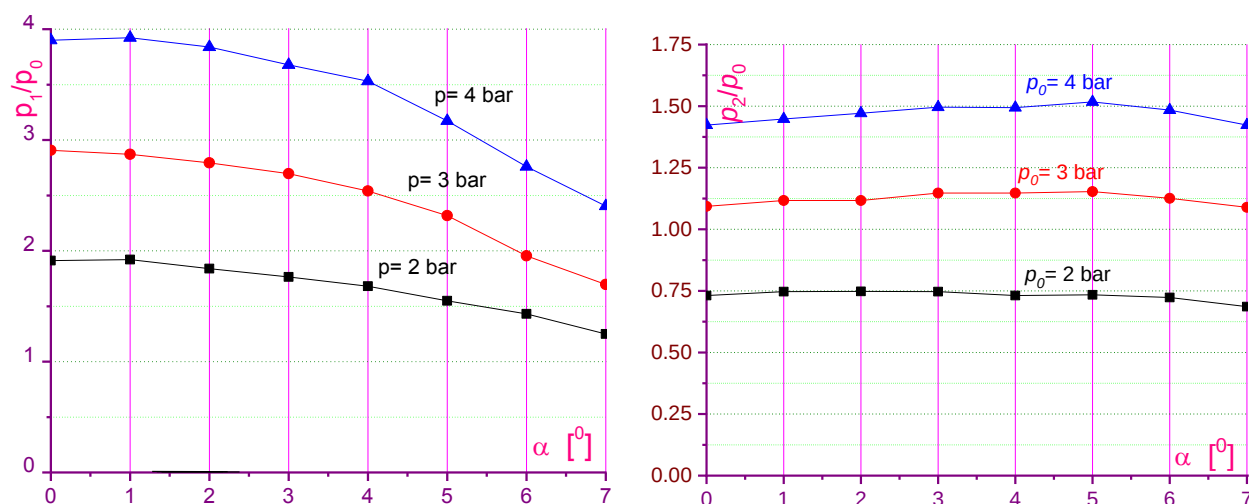
Slika 5.11. Zavisnost pritiska na površi mernog komada od aksijalnog rastojanja središta izlaznog preseka mlaznice i odgovarajućeg ugla nagiba mlaznice za različite pritiske napajanja: a) $p_0=2$ bar, b) $p_0=3$ bar i c) $p_0=4$ bar.

Na slici 5.12 je prikazan uticaj ugla nagiba mlaznice na aksijalna rastojanja δ_1 i δ_2 sa dijagrama prikazanog na slici 4.5. Povećanje ugla nagiba mlaznice ima veći uticaj na pad vrednosti aksijalnog rastojanja δ_1 u odnosu na pad koji se za iste uslove ostvaruje za aksijalno rastojanje δ_2 , s tim što ni funkcije po kojima opadaju vrednosti nisu jednake. Kod aksijalnog rastojanja u tački 2 je pad vrednosti skoro linearan u zavisnosti od ugla α , nezavisno od pritiska napajanja. Aksijalno rastojanje δ_1 ima najveći gradijent za najveći pritisak napajanja za uglove do 2° . Kasnije su krive zavisnosti ovog aksijalnog rastojanja od ugla α praktično ekvidistantne, do ugla od 5° kada do izražaja dolazi manji pad vrednosti δ_1 za pritisak napajanja $p_0=2$ bar.

Za razliku od aksijalnih rastojanja u karakterističnim tačkama 1 i 2 sa dijagrama na slici 4.5, vrednosti pritiska u istim tačkama i za iste uslove pokazuju različite zavisnosti (v. sliku 5.13). Dok pritisak p_1 opada za sve vrednosti pritiska napajanja, pri čemu je najveći pad vrednosti ostvaren za najveći pritisak napajanja, pritisak na kraju linearnog dela krive aksijalne raspodele pritiska na površi mašinskog dela p_2 ili zadržava nepromenjenu vrednost, ili čak ima tendenciju blagog rasta. Najveći pad pritiska p_1 se ostvaruje za najveći pritisak napajanja i za najveće vrednosti ugla nagiba mlaznice ($\alpha > 4^\circ$). Pritisak p_2 raste za pritiske napajanja $p_0=3$ bar i $p_0=4$ bar sve do ugla nagiba mlaznice od 5° , kada počinje da opada, dok za pritisak napajanja $p_0=2$ bar, pritisak u tački 2 ima blagi rast do ugla $\alpha > 3^\circ$, posle čega počinje da opada uz blage oscilacije.



Slika 5.12. Uticaj nagiba mlaznice na aksijalna rastojanja u tačkama 1 i 2 sa dijagrama na slici 4.5.



Slika 5.13. Uticaj nagiba mlaznice na vrednosti pritiska u tačkama 1 i 2 sa dijagrama na slici 4.5.

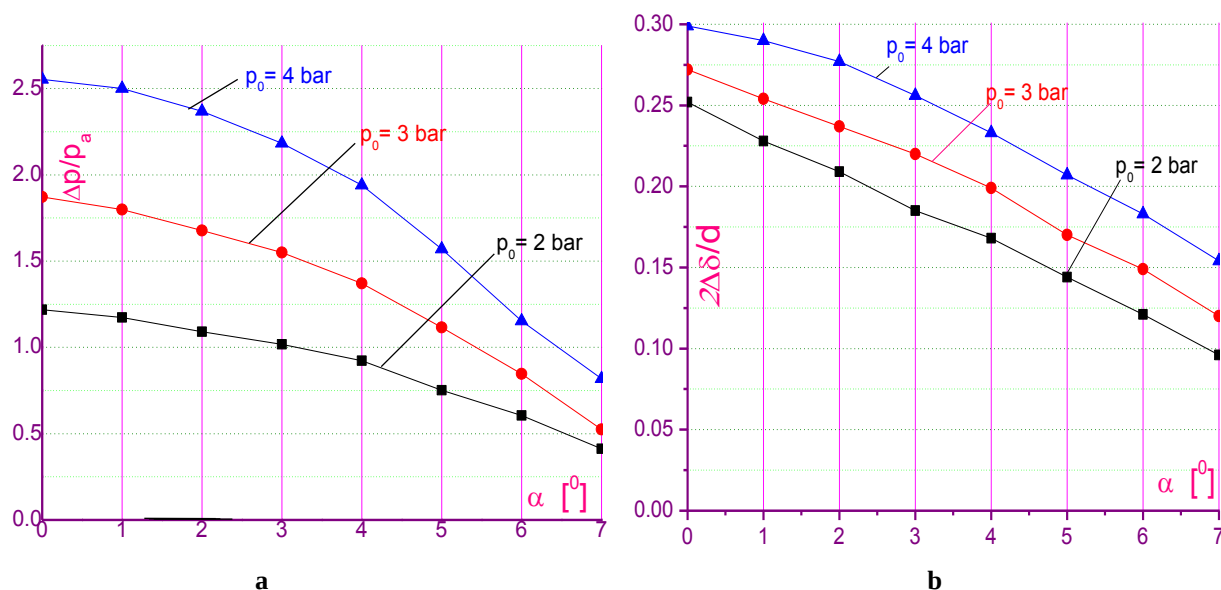
Ovako detaljna analiza ponašanja vrednosti pritiska i aksijalnih rastojanja u karakterističnim tačkama dijagrama sa slike 4.5 je neophodna za analizu uticaja ugla nagiba mlaznice na pneumatsku osetljivost i opseg primene pneumatskog komparatora, koja je pred nama.

5.3 UTICAJ NAGIBA MLAZNICE NA OPSEG PRIMENE I PNEUMATSKU OSETLJIVOST DIFERENCIJALNOG PNEUMATSKOG KOMPARATORA

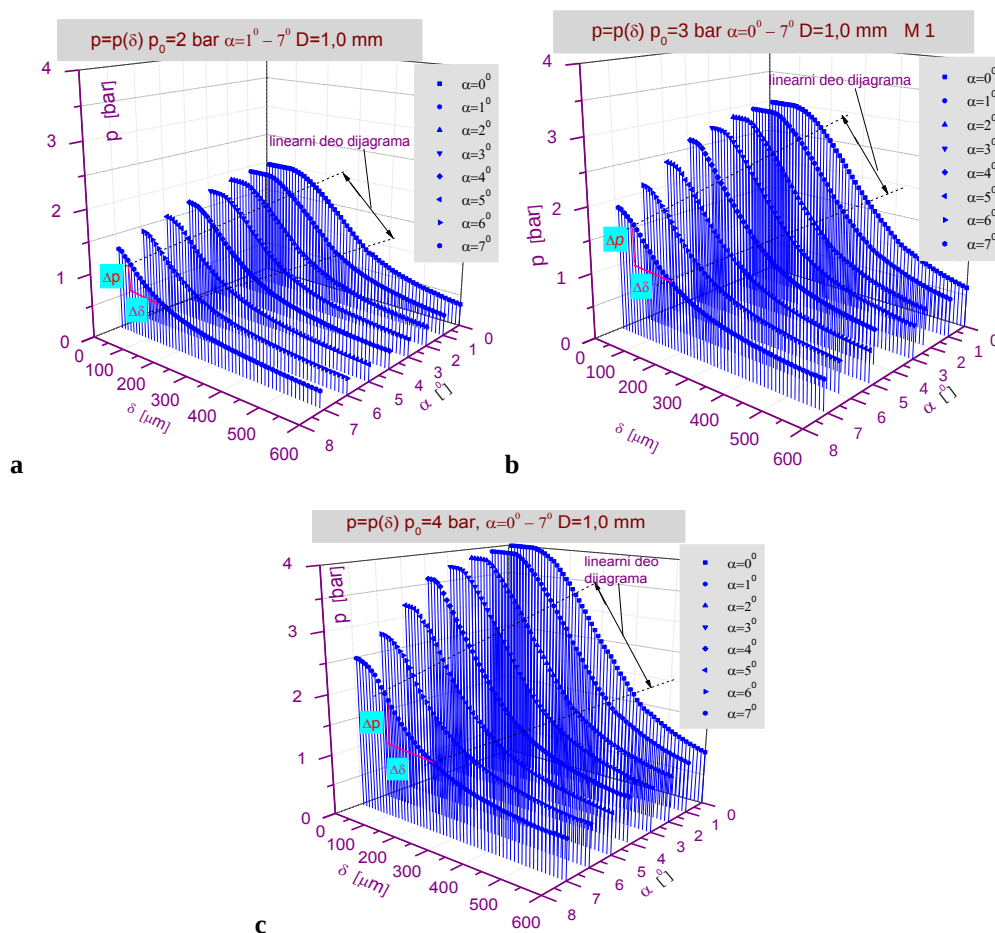
U prethodnim razmatranjima je zaključeno da nagnjanje izlazne mlaznice diferencijalnog pneumatskog komparatora ima pozitivan uticaj na radialnu raspodelu pritiska u oblasti zida tj. na površi mernog komada, obzirom da dolazi do smanjivanja, čak i do potpunog nestajanja zone potpritiska. Međutim, važnije od toga je pitanje kako nagib mlaznice utiče na opseg primene pneumatskog komparatora i na njegovu preciznost.

Znajući da opseg pneumatskog komparatora predstavlja priraštaj aksijalnog rastojanja između izlaznog preseka mlaznice i mernog komada, posmatrajući sliku 5.14b zaključujemo da sa nagnjanjem izlazne mlaznice komparatora dolazi do smanjenja opsega primene pneumatskog komparatora. Ovo je još očiglednije na slici 5.15 prikazano, gde se jasno vidi prostorno polje pritiska linearnog dela krive za sve pritiske napajanja, kao i veličina pritiska za svako aksijalno rastojanje δ i za sve uglove nagiba mlaznice. To praktično znači da u slučaju nagnutosti mlaznice komparatora, isti možemo koristiti za kontrolu užih tolerancijskih polja nego uobičajeno za date

pritiske napajanja. Što je veći nagib mlaznice, uže je tolerancijsko polje koje možemo kontrolisati. Imajući u vidu da je za velike pritiske napajanja, opseg primene pneumatskog komparatora mali i da se već tada koristi za kontrolu uskih tolerancijskih polja dimenzija mašinskih delova, jasno je da je naganjanje mlaznice za ove pritiske napajanja nepovoljno.

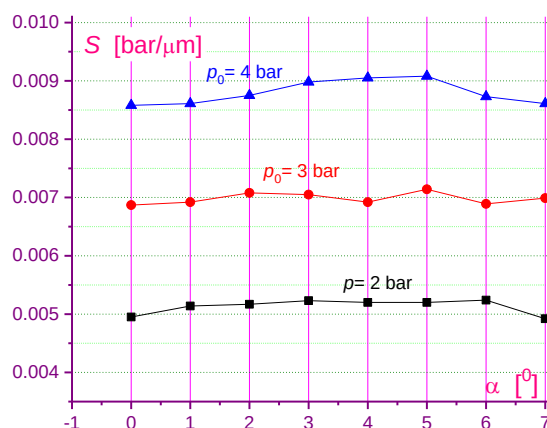


Slika 5.14. Uticaj nagiba mlaznice na vrednosti priraštaja pritiska Δp i priraštaja aksijalnog rastojanja $\Delta\delta$ na linearnom delu aksijalne raspodele pritiska na površi mernog komada za različite pritiske napajanja p_0 .



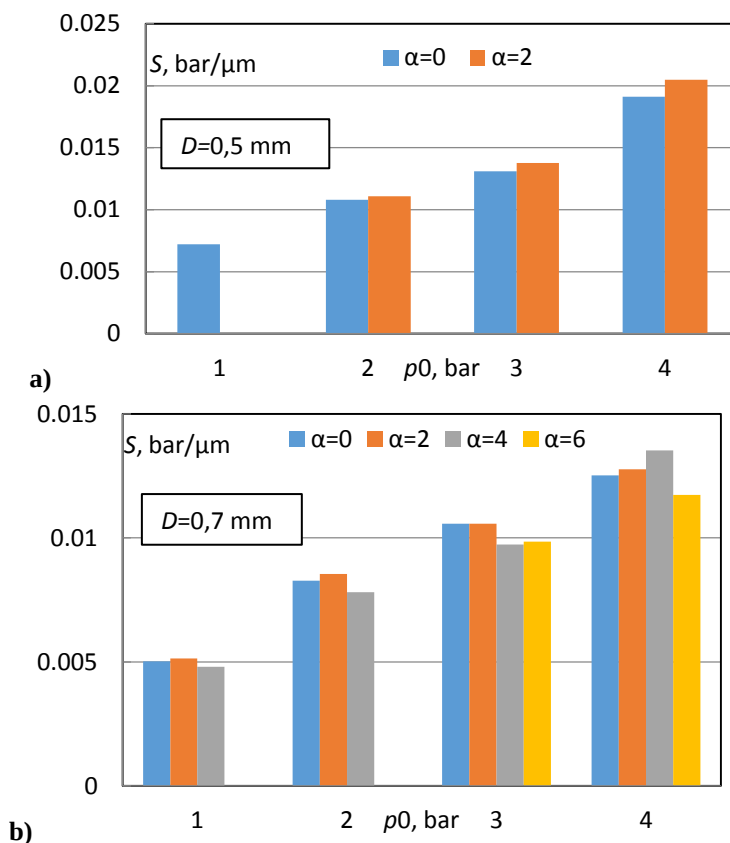
Slika 5.15. 3-D dijagram $p=p(\delta)$ za $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar, $\alpha=0^\circ - 7^\circ$

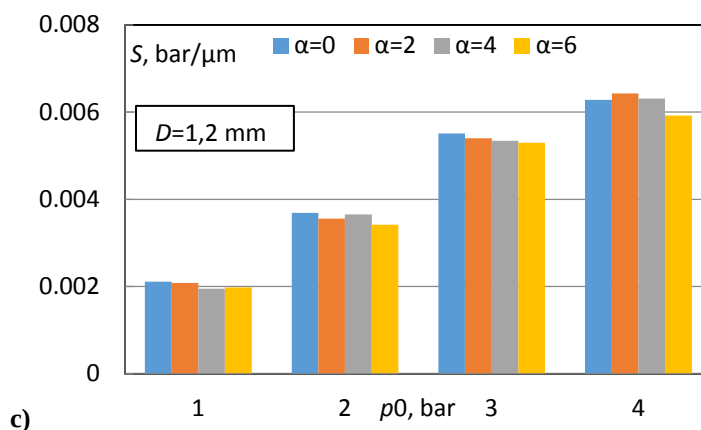
Sa druge strane, za pritisak napajanja $p_0=2$ bar, za najveći ugao nagiba mlaznice od 7° , opseg primene razmatranog komparatora je reda veličine $100\ \mu\text{m}$ (v. sliku 5.14b). S obzirom na prethodnu analizu u pogledu eliminisanja zone potpritiska na strani mlaznice koja je bliža mernom komadu kada se ista naginje, kao i na to da na suprotnoj strani – na kojoj se povećava rastojanje u odnosu na merni komad, postoji trend smanjenja vrednosti potpritiska (v. sliku 5.3a), može se zaključiti da je namerno nagnjanje izlazne mlaznice pneumatskog komparatora za ovaj pritisak napajanja povoljno i poželjno za dugotrajniji rad uređaja između dva čišćenja akumuliranih nečistoća sa čone površi izlazne mlaznice.



Slika 5.16. Uticaj nagiba mlaznice na pneumatska osetljivost S za pritiske napajanja p_0 i prečnik prigušnice $D=1\text{ mm}$

Posmatrajući dijagram raspodele pneumatske osetljivosti u zavisnosti od ugla nagiba izlazne mlaznice pneumatskog komparatora, prikazan na slici 5.16, vidimo da je ovakvo razmišljanje opravdano i sa stanovišta očuvanja preciznosti u radu uređaja. Naime, konkretno za slučaj pritiska napajanja $p_0=2$ bar i za najveći ugao nagiba mlaznice od 7° , pneumatska osetljivost je skoro ista kao i u referentnom slučaju kada je mlaznica postavljena upravno u odnosu na merni komad.





Slika 5.17. Uticaj nagiba mlaznice na pneumatsku osjetljivost S za pritiske napajanja p_0 i prečnike prigušnice D

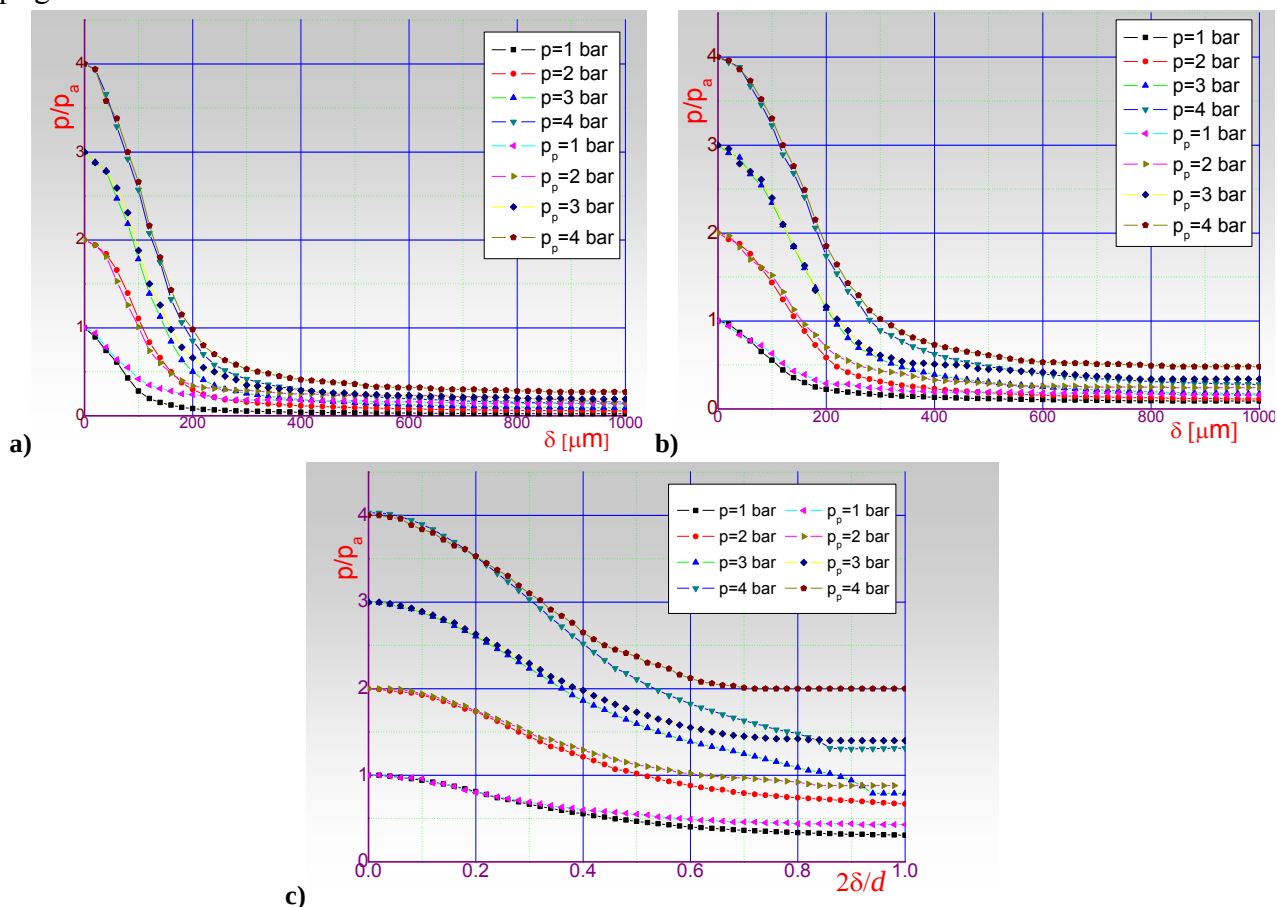
Međutim, ne postoji jasan trend uticaja nagiba mlaznice na promenu pneumatske osjetljivosti, što se može potvrditi i posmatranjem dijagrama na slici 5.17, na kojima je prikazan uticaj nagiba mlaznice na pneumatsku osjetljivost za različite prečnike prigušnice D . Ovo je posledica različitog uticaja nagiba mlaznice na priraštaje pritiska Δp i aksijalnog rastojanja $\Delta \delta$ o čemu je bilo reči u prethodnom izlaganju. Sa druge strane, za pneumatske komparatore sa velikim prigušenjem u radnoj komori, pri malim pritiscima napajanja, možemo doći u situaciju u kojoj usled naginjanja izlazne mlaznice pneumatski komparator nije upotrebljiv, budući da se sa naginjanjem mlaznice gubi linearni deo aksijalne raspodele pritiska ili taj deo krive postaje toliko mali da se pravilno određivanje pneumatske osjetljivosti uređaja dovodi u pitanje. Ovo se dogodilo za pritisak napajanja $p_0=1$ bar i najmanji prečnik prigušnice $D=0,5$ mm, i za pritiske napajanja $p_0=1$ bar i $p_0=2$ bar u kombinaciji sa prigušnicom prečnika $D=0,7$ mm (v. slike 5.17a i 5.17b). Za ove kombinacije vrednosti pritiska napajanja i prečnika prigušnice na navedenim slikama nema vrednosti za pneumatsku osjetljivost za pojedine uglove nagiba izlazne mlaznice.

S obzirom na prethodno rečeno, očigledno je da se odluka o naginjanju mlaznice mora donositi za svaki pojedinačni slučaj, tj. za kombinaciju uticajnih faktora. Iz razmatranih eksperimentalnih rezultata se ne može zaključiti da je najveća pneumatska osjetljivost S za referentni položaj mlaznice, kao ni da je za najveći nagib mlaznice $\alpha=7^\circ$ vrednost pneumatske osjetljivosti najmanja. Sa dijagrama prikazanih na slikama 5.16 i 5.17 se još jednom potvrđuje da je pneumatska osjetljivost direktno proporcionalna pritisku napajanja p_0 .

5.4 PRITISAK NA ULAZU U MERILO PROTOKA

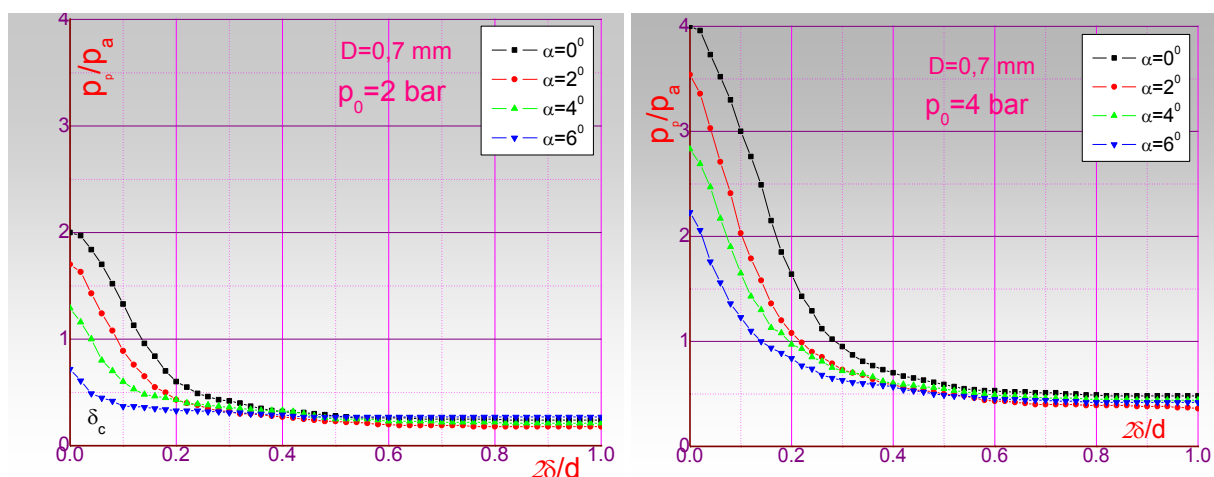
Pritisak na ulazu u merilo protoka p_p se meri na mernoj grani 2-2 instalacije, koja spaja mernu komore diferencijalnog pneumatskog komparatora i protokomer GMFC, slika 3.1. Dalje, iz protokomera vazduh struji ka izlaznoj mlaznici M-1. Dijagram $p_p=p_p(\delta, \alpha)$ je vrlo sličan dijagramu $p=p(\delta, \alpha)$ pritiska na ravnoj površi za iste uslove. Razlika pritiska p na ravnoj površi i pritiska na ulazu u protokomer p_p je mala, može da se vidi na uporednim dijagramima na slici 5.18 ili poređenjem vrednosti pritisaka za isto aksijalno rastojanje. Dijagrami na slici 5.18 su za sve pritiske napajanja i za različite prečnike prigušne mlaznice D za slučaj kada je mlaznica upravna u odnosu na ravnu površ mernog komada. Uočava se da je vrednost pritisaka skoro ista za aksijalno rastojanje $0 \mu\text{m} \leq \delta \leq 200 \mu\text{m}$. Daljim povećanjem aksijalnog rastojanja mlaznice u odnosu na merni komad, razlika pritisaka se povećava, da bi za najveće vrednosti aksijalnog rastojanja pritisak imao konstantnu vrednost. Veći je pritisak na ulazu u protokomer p_p u odnosu na pritisak na ravnoj površi p za sve prečnike prigušnice i sve pritiske napajanja. Za prečnik prigušnice $D=1,4$ mm, postoji veće

odstupanje u vrednostima između pritisa p_p i p . Za veći pritisak napajanja je veća i razlika pritisa. Na osnovu ovoga se može zaključiti da se razlika pritisa $\Delta p = p_p - p$ povećava povećanjem pritiska napajanja p_0 , aksijalnog rastojanja δ između izlazne mlaznice i mernog komada i prečnika prigušnice D .



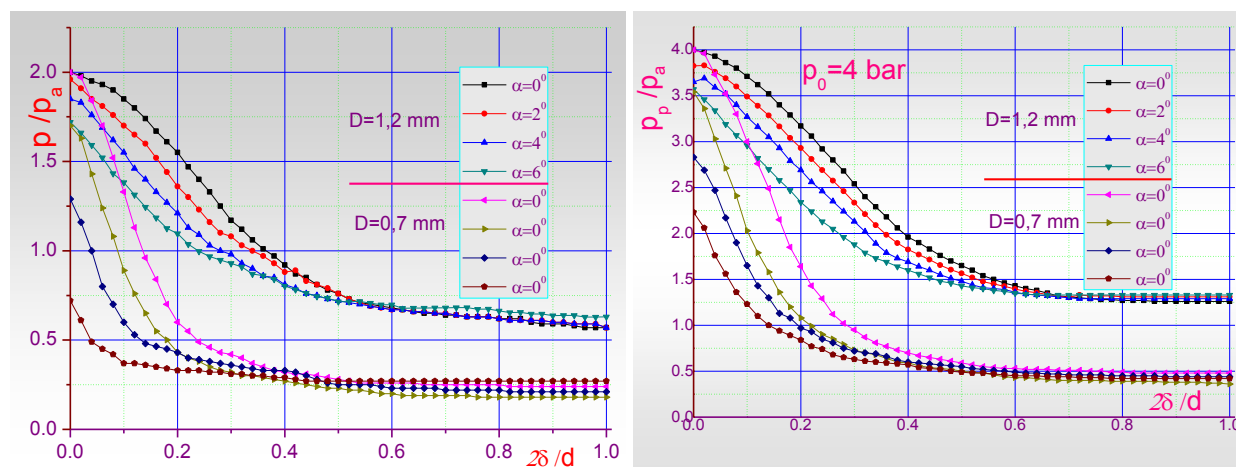
Slika 5.18. Vrednosti pritiska na ulazu u merilo protoka i na ravnoj površi za pritiske napajanja $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar za $\alpha=0^\circ$ i prečnike prigušnice a) $D=0.5$ mm, b) $D=0.7$ mm i c) $D=1.4$ mm.

Ako posmatramo dijagrame, slika 5.19, za uslov $\delta=0$ μm , najveći pritisak je za referentni ugao $\alpha=0^\circ$. Povećanjem nagiba pritisak se smanjuje. Odmicanjem izlazne mlaznice pritisak p_p na ulazu u merilo protoka brzo opada i postaje konstantan. Najpre konstantnu vrednost dostiže pritisak za najveći nagib $\alpha=6^\circ$. Za referentne uslove $\alpha=0^\circ$ pritisak postaje konstantan za veće aksijalno rastojanje. Smanjenjem ugla nagiba povećava se aksijalno rastojanje δ_c za uslov $p_p=\text{const}$. Posmatranjem dijagrama na slici 5.19 uočava se da su za veći pritisak napajanja p_0 veći maksimalni pritisci za uslov $\delta=0$ μm i njihova razlika je veća u zavisnosti od ugla nagiba. Kao i u slučaju pritiska na površi mernog komada, i pritisak na ulazu u protokomer postaje konstantan za veće vrednosti aksijalne koordinate δ . Dakle, raspodela pritiska p_p ima isti trend kao i pritisak na površi mernog komada za iste uslove.



Slika 5.19. Raspodela pritiska na ulazu u merilo protoka p_p u zavisnosti od ugla nagiba mlaznice α , za različite pritiske napajanja p_0 a za istu vrednosti prečnika prigušnice D

Na slici 5.20 su prikazane vrednosti pritiska na ulazu u merilo protoka za dva različita prečnika prigušnice i za različite uglove nagiba mlaznice, pri različitim pritiscima napajanja. Uočava se da je raspodela i ovog pritiska istog trenda kao i raspodela pritiska na ravnoj površi mernog komada. Sa povećanjem ugla nagiba mlaznice opada vrednost pritiska p_p .

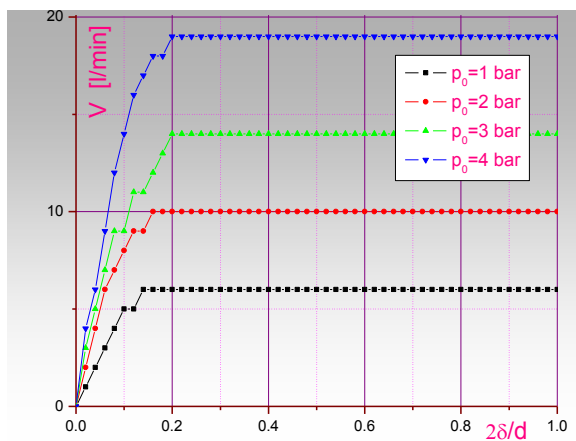


Slika 5.20. Uticaj prečnika prigušnice na raspodelu pritiska na ulazu u merilo protoka p_p za različite pritiske napajanja pri različitim uglovima nagiba izlaznice mlaznice

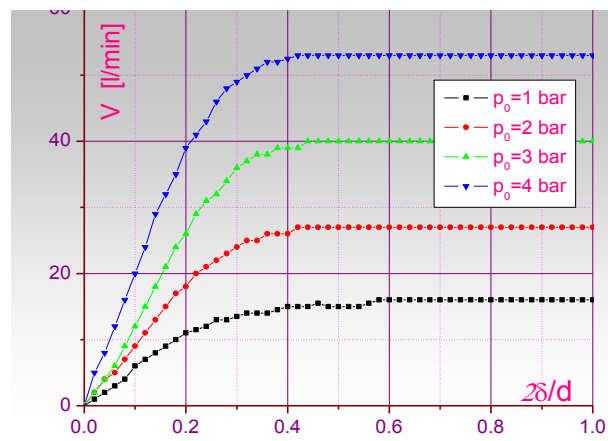
Očigledno je i uticaj prečnika prigušnice na pritisak na ulazu u merilo protoka isti kao i na pritisak na površi mernog komada. Sa većim prigušenjem se ostvaruje veći gradijent pritiska za male vrednosti aksijalne koordinate δ . Sa povećanjem ugla nagiba mlaznice smanjuje se vrednost pritiska p_p , pri čemu je uticaj ugla nagiba α na pad pritiska više izražen za veće prigušenje u komori pneumatskog komparatora, nezavisno od pritiska napajanja. Za manji pritisak napajanja se približno stalna vrednost pritiska p_p ostvaruje za manje vrednosti aksijalne koordinate δ .

5.5 MERENJE PROTOKA VAZDUHA

Zapreminski protok $\dot{V}$ meri se na protokomeru GFC koji je postavljen između diferencijalnog pneumatskog komparatora i izlazne mlaznice, slika 3.1. Protok je zajedno sa pritiskom najvažnija komponenta strujanja vazduha.



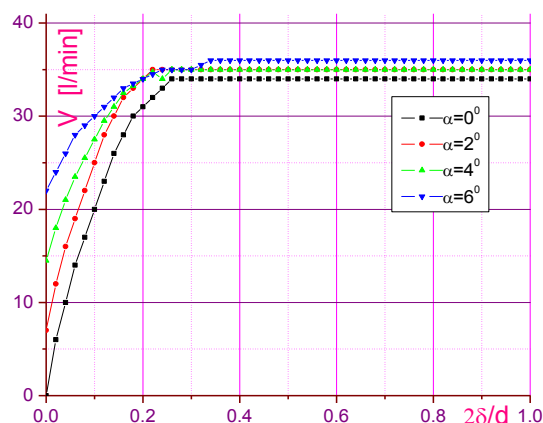
Slika 5.21. Protok vazduha za $D=0,7$ mm, $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar i ugao nagiba mlaznice $\alpha=0^0$



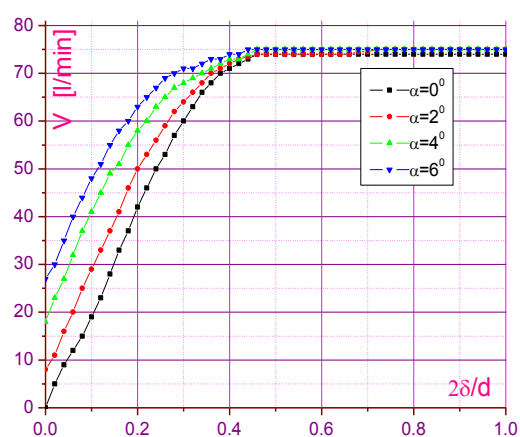
Slika 5.22. Protok vazduha za $D=1,2$ mm, $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar i ugao nagiba mlaznice $\alpha=0^0$

Dijagram na slici 5.21 daje vrednosti protoka zavisno od aksijalnog rastojanja δ između vrha izlazne mlaznice i ravne površi za prečnik prigušnice $D=0,7$ mm i sve pritiske napajanja p_0 . Jasno je da se za veći pritisak napajanja, pri svim ostalim istim uslovima, ostvaruje veći protok vazduha. Sa dijagrama se uočava da za određene vrednosti aksijalne koordinate dolazi do uspostavljanja konstantnog protoka, što je posledica zagušenja mlaznice. Iz priloženog se vidi da konstantan protok najpre se dostiže za najmanji pritisak napajanja. Sa povećanjem pritiska napajanja, povećava se i aksijalno rastojanje za koje se ostvaruje konstantan protok. Poredeći dijagrame prikazane na slikama 5.21 i 5.22, jasno je da se sa povećanjem prečnika prigušne mlaznice, tj. sa smanjenjem prigušenja ostvaruje veći protok na izlaznoj mlaznici. Dakle, protok vazduha u pneumatskom komparatoru je direktno proporcionalan pritisku napajanja p_0 i prečniku prigušnice D .

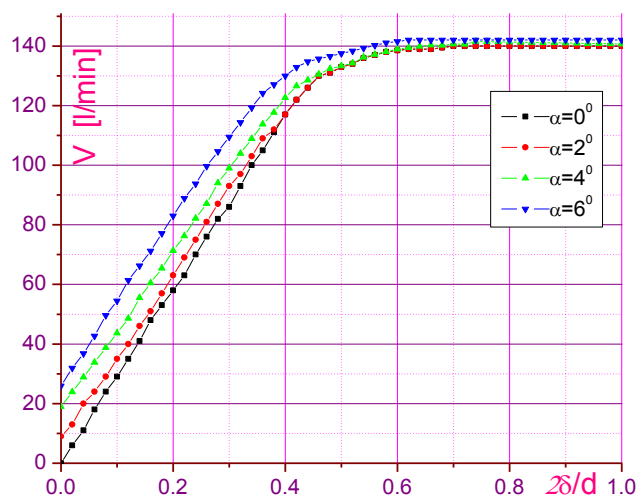
Dijagrami protoka vazduha zavisno od nagiba izlazne mlaznice, dati su na slikama 5.23 i 5.24 za iste pritiske napajanja $p_0=4$ bar i dva različita prečnika prigušnice. Kao što je i očekivano, sa porastom ugla nagiba mlaznice dolazi do povećanja protoka vazduha kroz izlaznu mlaznicu, nezavisno od prečnika prigušne mlaznice D . Uticaj prigušne mlaznice se ogleda u tome da za veće prigušenje dolazi do veće segregacije u vrednostima konstantnog protoka. Takođe, manja je i aksijalna koordinata za koju se ostvaruje konstantna vrednost protoka.



Slika 5.23. Protok vazduha za $D=1,0$ mm, $p_0=4$ bar i $\alpha=0^0$, 2^0 , 4^0 i 6^0



Slika 5.24. Protok vazduha za $D=1,4$ mm, $p_0=4$ bar i $\alpha=0^0$, 2^0 , 4^0 i 6^0

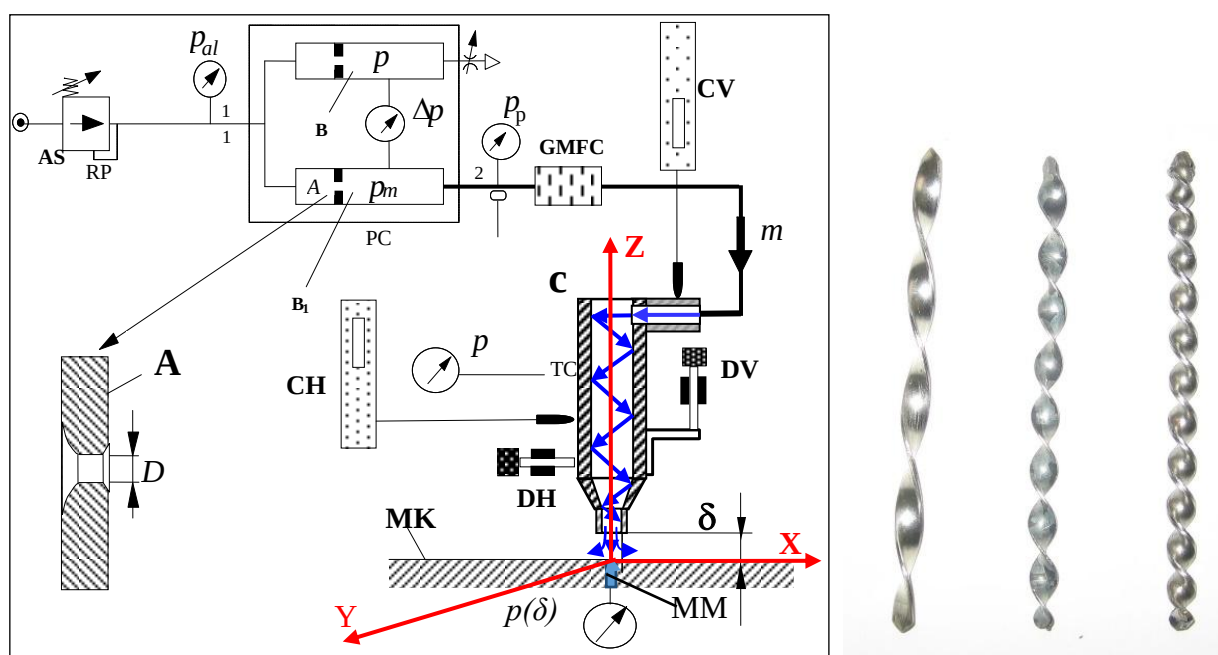


Slika 5.25 Dijagram protoka vazduha za $D=4,0$ mm, $p_0=4$ bar i $\alpha=0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ i 6°

Prethodno rečeno se potvrđuje i na slici 5.25 gde su prikazane vrednosti protoka u slučaju kada nema nikakvog prigušenja u pneumatskom komparatoru. U ovom graničnom slučaju se još višepovećava aksijalno rastojanje između izlazne mlaznice i mernog komada za koje se ostvaruje konstantan protok, a ta vrednost konstantnog protoka je približno ista za sve uglove nagiba izlazne mlaznice. Takođe, veća je i vrednost protoka u odnosu na druge dve razmatrane vrednosti prečnika prigušne mlaznice D .

6 UTICAJ VIHORA U MLAZU IZLAZNE MLAZNICE NA RAD DIFERENCIJALNOG PNEUMATSKOG KOMPARATORA

Za potrebe merenja parametara za eksperiment sa vihornim strujanjem vazduha, iskorišćena je postojeća instalacija sa protokomerom Gas Mass Flow Controllers GFC-2106 i manometrom za merenje pritiska na ulazu u protokomer, slika 6.1.



Slika 6.1. Shematski prikaz merne instalacije i fotografija zavojnih traka Z2, Z4 i Z6. Za detaljniji uvid u oznake elemenata merne instalacije pogledati sliku 3.1.

Vihorno strujanje vazduha ostvaruje se na dva načina. Prvo se u standardnu izlaznu mlaznicu M-1 postavljaju zavojne trake različitog koraka, sa oznakom Z1 redosledno do Z6. Zavojne trake su urađene od lima debljine 1,1 mm, širine 4,9 mm i dužine 96 mm. Sve zavojne trake su dvohode. Vrednosti koraka zavojnih traka su navedene u tabeli 6.1. Jasno je da se sa promenom zavojne trake menja i jačina vihornog strujanja na izlazu iz mlaznice. Najslabiji vikor se ostvaruje za zavojnu traku Z1, a najjači za Z6. Na slici 6.1 prikazana je i fotografija zavojnih traka Z2, Z4 i Z6. Iako su merenja sprovedena za sve zavojne trake iz tabele 6.1, zbog obima disertacije, u ovom radu će se prikazati rezultati samo za tri zavojne trake i to: Z2, Z4 i Z6.

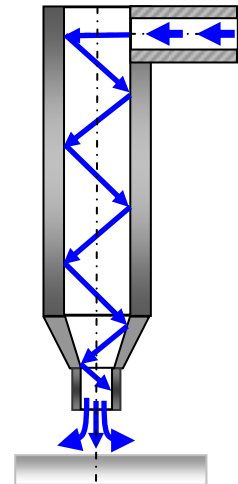
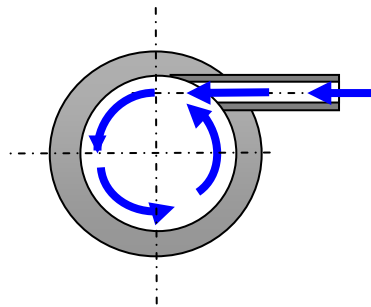
Tabela 6.1 Parametri zavojnih traka

Oznaka zavojne trake	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Broj koraka u zavojnoj traci	1	2	3	4	5	6
Korak, mm	96	48	32	24	17,2	16

U drugom slučaju se vihorno strujanje ostvaruje pomoću izlazne mlaznice u koju se vazduh pod pritiskom uvodi tangencijalno u odnosu na osu mlaznice, slika 6.3. Ova mlaznica se sastoji iz dva dela. Gornji deo služi za pričvršćivanje za nosač mlaznice, dok je donji deo mlaznice cilindar unutrašnjeg prečnika 5 mm. Delovi ove mlaznice su spojeni navojnom vezom. Na spojevima je zaptivni gumeni prsten. Vrh mlaznice sa tangencijalnim ulazom vazduha je po svemu istovetan vrhu standardne mlaznice M-1, tj. ima spoljašnji prečnik $D=4$ mm i unutrašnji prečnik $d=2$ mm.



Slika 6.3. Fotografija izlazne mlaznice sa tangencijalnim ulazom vazduha



Slika 6.4. Shematski prikaz vijkornog strujanja vazduha u izlaznoj mlaznici sa tangencijalnim ulazom vazduha

Prema shemi prikazanoj na slici 6.2, vazduh pod pritiskom izlazi iz diferencijalnog pneumatskog manometra, prolazi kroz merilo protoka i ulazi tangencijalno u mlaznicu kroz ulaznu deonicu koja je postavljena tangencijalno u odnosu na osu mlaznice, a upravno u odnosu na meridijansku ravan mlaznice, slika 6.4. Na ovaj način se u mlaznici formira vihorno strujanje vazduha.



Slika 6.5. Fotografija prigušnica prečnika $D=0,5$ mm, 0,7 mm, 1,0 mm, 1,2 mm i 1,4 mm

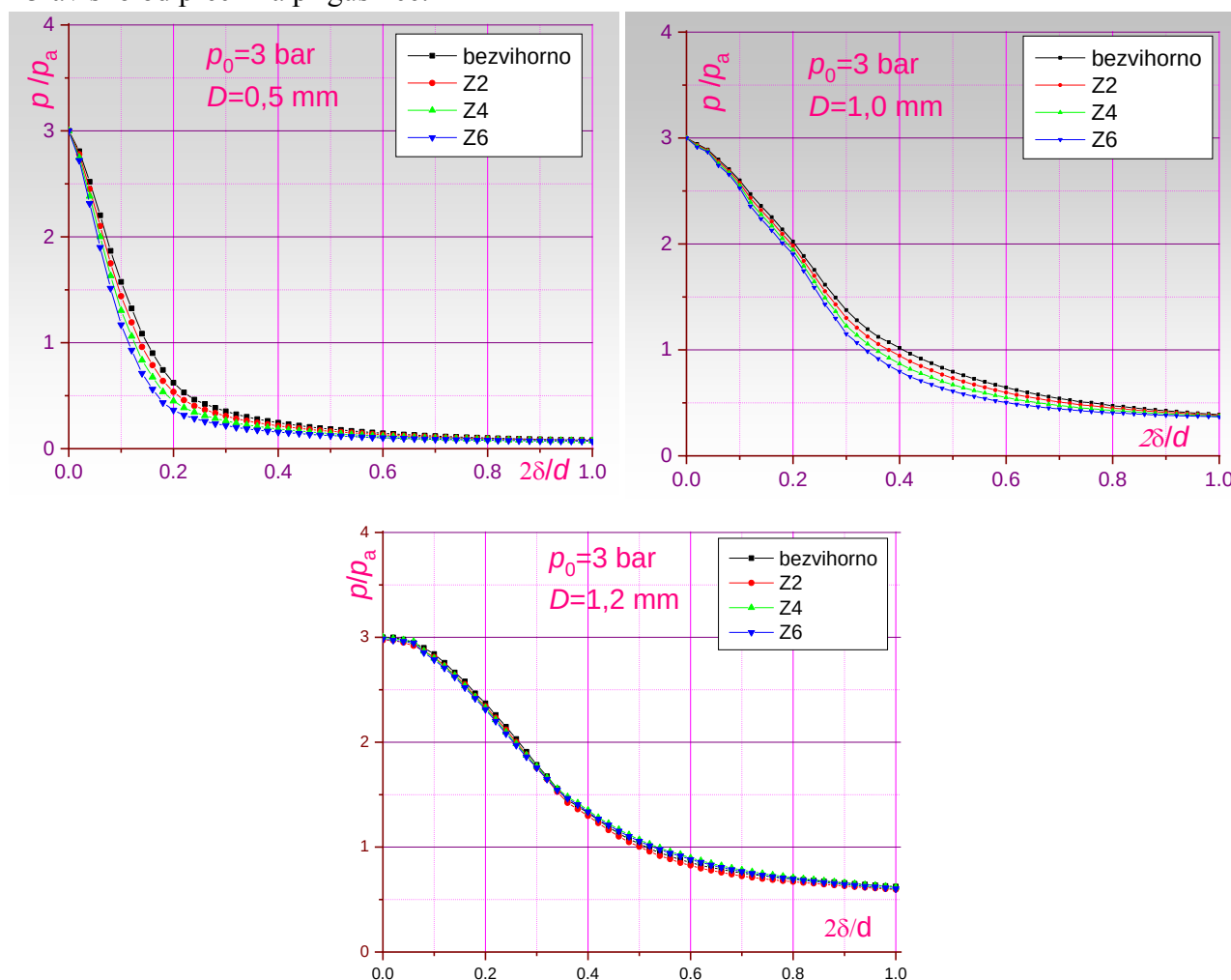
Na slici 6.5 prikazane su prigušnice A, različitog prečnika $D=0,5$ mm, 0,7 mm, 1,0 mm, 1,2 mm, 1,4 mm, koje se postavljaju u mernu komoru B_1 . Promenom prečnika prigušnice menja se pritisak na površini mernog komada p , raspodela pritiska u aksijalnom i radijalnom pravcu, pa samim tim i pneumatska osetljivost, protok vazduha $\dot{V}$ i pritisak p_1 na ulazu u merilo protoka. Za male prečnike prigušnice manji je protok vazduha i veći je pad pritiska sa povećanjem aksijalnog rastojanja δ izlazne mlaznice od površine komada koji se kontroliše. Za veće prečnike prigušnice povećava se protok vazduha a pad pritiska je manji u odnosu na povećanje δ . Prigušnice su urađene od kvalitetnog legiranog čelika otpornog na habanje i koroziju.

Cilj ovoga merenja je da se sagleda uticaj vijkornog strujanja vazduha na parametre strujanja na izlazu iz mlaznice M-1 sa postavljenom zavojnom trakom i mlaznice sa tangentnim ulazom vazduha pod pritiskom i njihovo poređenje sa parametrima pri bezvijkornom strujanju. Merena je

raspodela pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$ pri čemu su u mernoj grani diferencijalnog pneumatskog uređaja korišćene prigušnice $D=0,5$ mm, 0,7 mm, 1,0 mm, 1,2 mm, 1,4 mm i 4 mm (bez prigušnice) sa pritiscima napajanja $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar. Meren je pritisak na ravnoj površi mernog komada p , pritisak na ulazu u merilo protoka p_p i protok u zavisnosti od aksijalnog rastojanja između izlaznog preseka izlazne mlaznice i ravne površi δ za zadati pritisak napajanja p_0 . Na osnovu dobijenih rezultata se određuje pneumatska osetljivost S uređaja za svaku dobijenu krivu $p=p(\delta)$. Određuje se i aksijalno rastojanje izlazne mlaznice i ravne površi δ_0 u trenutku kada se javlja skok pritiska.

6.1 VIHORNO STRUJANJE U MLAZU IZLAZNE MLAZNICE FORMIRANO ZAVOJNIM TRAKAMA

Na dijagramu slika 6.6 date su sve krive pritiska na površi merenog komada za pritisak napajanja $p_0=3$ bar, prečnik prigušne mlaznice $D=0,5$ mm pri bezvihornom strujanju u mlaznici i pri vihornom strujanju uzrokovanom zavojnim trakama Z2, Z4 i Z6. Kao što je i očekivano, najveći pad pritiska se ostvaruje za slučaj vihornog strujanja formiranim zavojnom trakom Z6, i to nezavisno od prečnika prigušnice.



Slika 6.6. Dijagram $p=p(\delta, h)$ za $p_0=3$ bar i $D=0,5$ mm pri bezvihornom strujanju i za zavojne trake Z2, Z4 i Z6

Iako je sada u izlaznoj mlaznici vihorno strujanje, uticaj prigušnice na aksijalnu raspodelu pritiska se ne menja. I dalje je za najveće prigušenje najveći gradijent pritiska na linearnom delu krive. Međutim, za manje prigušenje u mernoj komori, uticaj jačine viora na aksijalnu raspodelu

pritiska je slabije izražen. U tabeli 6.2 date su vrednosti pritiska za $\delta = 100 \mu\text{m}$, pad pritiska Δp u odnosu na bezvihorno strujanje u mlaznici, pneumatska osetljivost S i njeno povećanje sa povećanjem jačine vihora, dato u procentima.

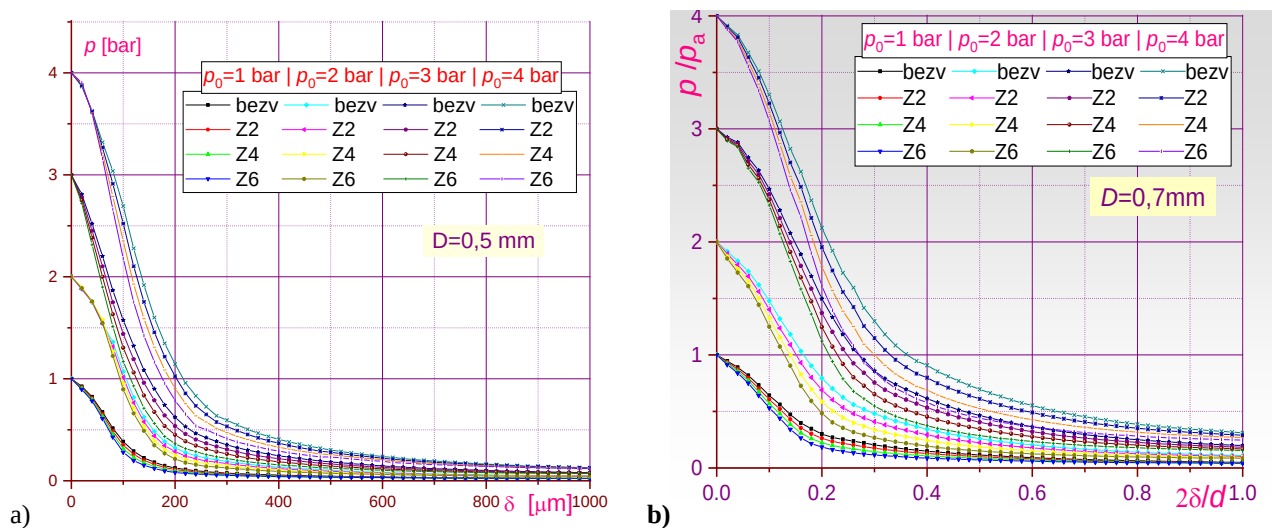
Tablica 6.2 Pritisak za $\delta = 100 \mu\text{m}$, razlika pritisa Δp i pneumatska osetljivost za $p_0 = 3 \text{ bar}$, $D = 0,5 \text{ mm}$ pri bezvihornom strujanju i vihornom strujanju formiranom zavojnim trakama Z2, Z4 i Z6

$\delta = 100 \mu\text{m}$	bezvihorno	Z2	Z4	Z6
p , bar	1,575	1,440	1,305	1,169
Δp , bar	0	0,135	0,270	0,406
S , bar/ μm	0,01396	0,01525	0,01732	0,01911
ΔS , %	0	9,24	24,49	36,89

Aksijalno rastojanje $\delta = 100 \mu\text{m}$ uzima se za analizu jer za to aksijalno rastojanje na kojem krive $p = p(\delta)$ imaju pravolinijski deo. Početak $p = p(\delta_1)$ i završetak $p = p(\delta_2)$ pravolinijskog dela dijagrama su osnova za određivanje prečnika merne glave za kontrolu spoljašnjih i unutrašnjih dimenzija mašinskog dela, (Skoko, 2008). Ako se analizira pritisak na merenom mašinskom delu za isto aksijalno rastojanje $\delta = 100 \mu\text{m}$, vidi se da najveći pad pritiska ima kriva za najveću jačinu vihora, što ukazuje da je najveće prigušenje za zavojnu traku Z6 i najveća je pneumatska osetljivost S . Istovetan zaključak se izvodi i za pritisak napajanja $p_0 = 4 \text{ bar}$ i prečnik prigušnice $D = 0,7 \text{ mm}$, kao što se to vidi u tabeli 6.3. Bez obzira na manje prigušenje, veći pritisak napajanja uslovljava formiranje jačeg vihora, te je i porast pneumatske osetljivosti veća u odnosu na pritisak napajanja od 3 bar.

Tablica 6.3 Pritisak za $\delta = 100 \mu\text{m}$, razlika pritisa Δp i pneumatska osetljivost S za $p_0 = 4 \text{ bar}$, $D = 0,7 \text{ mm}$ pri bezvihornom strujanju i vihornom strujanju formiranom zavojnim trakama Z2, Z4 i Z6

$\delta = 100 \mu\text{m}$	bezvihorno	Z2	Z4	Z6
p , bar	3,303	3,225	3,148	3,071
Δp , bar	0	0,154	0,155	0,232
S , bar/ μm	0,00764	0,00882	0,01091	0,01240
ΔS , %	0	15,44	42,8	62,3

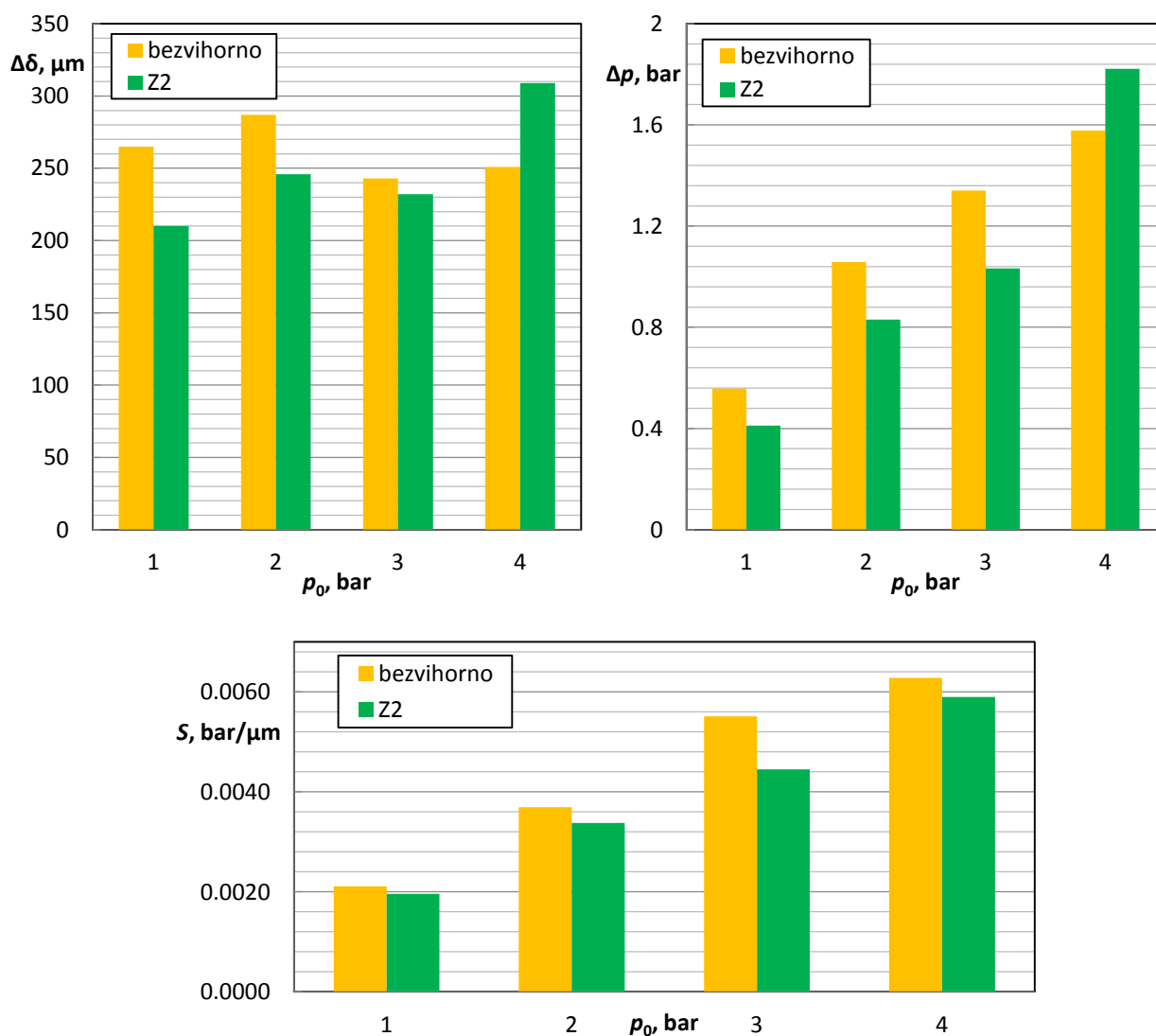


Slika 6.7. Dijagram $p = p(\delta)$ za $p_0 = 1 - 4 \text{ bar}$ i $D = 0,5 \text{ mm}$ i $D = 0,7 \text{ mm}$ pri bezvihornom strujanju i vihornom strujanju u mlaznici formirano zavojnim trakama Z2, Z4 i Z6

Na slici 6.7 dat je zajednički dijagram aksijalne raspodele pritiska za prečnike prigušnice $D = 0,5 \text{ mm}$ i $D = 0,7 \text{ mm}$, za sve pritiske napajanja $p_0 = 1 \text{ bar}$, 2 bar , 3 bar i 4 bar pri bezvihornom i

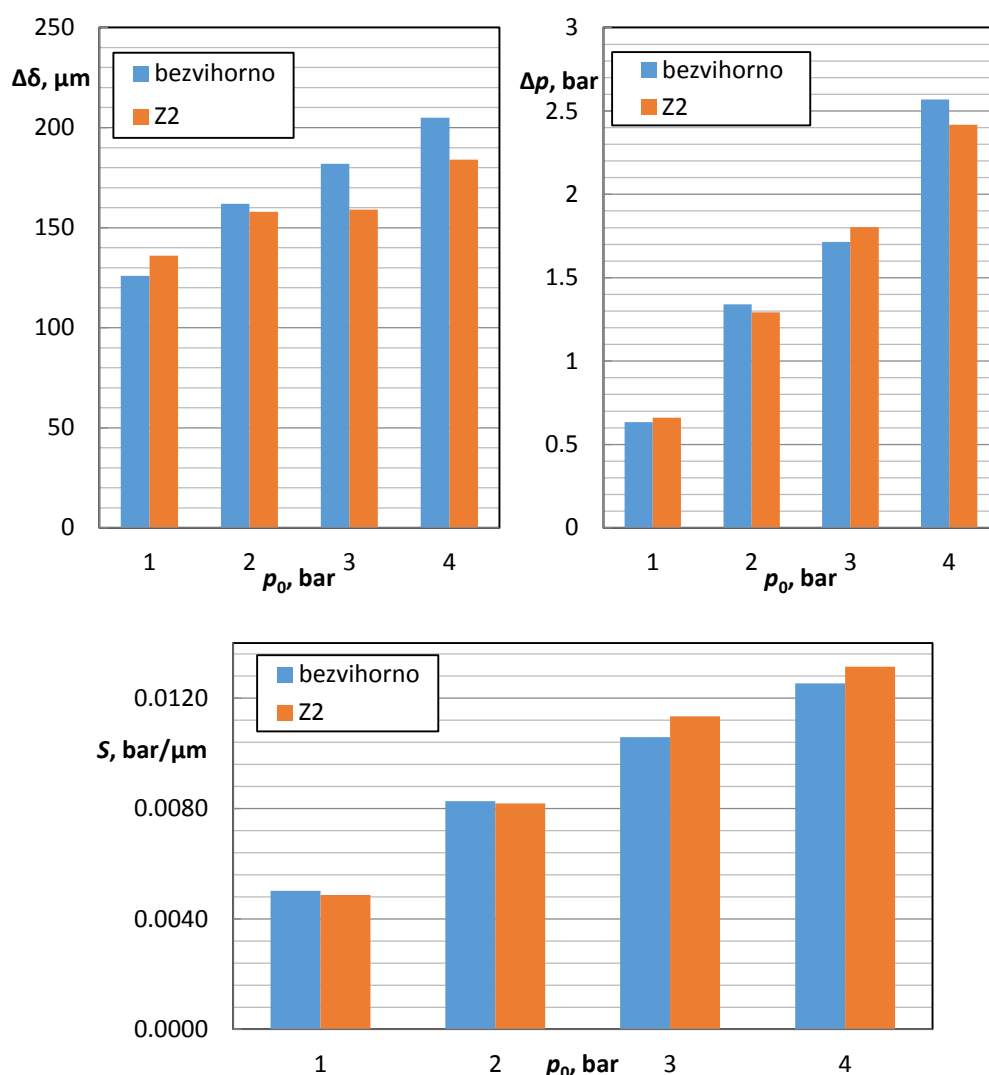
vihornom strujanju vazduha na izlazu iz mlaznice formiranom pomoću zavojnih traka Z2, Z4 i Z6. Za prigušnicu $D=0,5$ mm pneumatska osetljivost se povećava sa povećanjem pritiska napajanja, kao i kod bezvihornog strujanja vazduha u mlaznici za iste uslove. Na istoj slici data je aksijalna raspodela pritiska na površi merenog komada u prostoru za pritiske napajanja $p_0=2$ bar, 3 bar i 4 bar.

Istovetna analiza može da se napravi i za aksijalnu raspodelu pritiska za prigušnicu prečnika $D=0,7$ mm (v. sliku 6.7b), za sve pritiska napajanja $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar pri bezvihornom i vihornom strujanju vazduha na izlazu iz mlaznice formiranom pomoću zavojnih traka Z2, Z4 i Z6. Ova vrednost prigušne mlaznice je najčešće u upotrebi u diferencijalnom pneumatskom komparatoru. Uočava se da se razlika pritisaka povećava povećanjem pritiska napajanja p_0 za isto aksijalno rastojanje. Najveći gradijent pritiska je za najveći pritisak napajanja $p_0=4$ bar, što je i očekivano. Smanjenjem pritiska napajanja smanjuje se nagib krivih i najmanji je za najmanji pritisak napajanja $p_0=1$ bar. U odnosu na raspodelu sa slike 6.7a za prigušnicu prečnika $D=0,5$ mm, vidi se da ovde krive imaju manji nagib, pa samim tim i manju vrednost pneumatske osetljivosti za sve pritiske napajanja p_0 . Vidi se da se pritisak za najveću aksijalnu koordinatu povećao skoro dva puta u odnosu za iste uslove i mlaznicu $D=0,5$ mm, za svaki od pritisaka napajanja.



Slika 6.8 Uticaj vihora na priraštaje pritiska i aksijalnog rastojanja na linearnom delu krive raspodele pritiska i na pneumatsku osetljivost za $D=1,2$ mm

Na slikama 6.8 i 6.9 je prikazan uticaj vihora na priraštaje pritiska i aksijalnog rastojanja, posledično i na pneumatsku osetljivost, za dve različite vrednosti prigušenja u mernoj komori. Odmah se uočava da se za manje prigušenje pneumatska osetljivost smanjuje za svaki pritisak napajanja (v. sliku 6.8), uprkos tome što, npr. za najveći pritisak napajanja rastu i priraštaj pritiska i priraštaj aksijalnog rastojanja između merenog komada i izlaznog preseka mlaznice na linearnom delu raspodele pritiska u aksijalnom pravcu. Kao i u slučaju zakretanja mlaznice u odnosu na normalu na mereni komad (v. odeljak 5.3), i u slučaju vihornog strujanja u mlazu je potrebno odlučivati za svaki slučaj posebno. Npr. u slučaju prečnika prigušnice $D=1,2$ mm, vrednost pneumatske osetljivosti jeste manja za vihorno strujanje. Međutim, opseg primene pneumatskog komparatora za ovaj pritisak napajanja i vihorno strujanje u mlazu se povećalo. Dakle, potrebno je odlučiti u konkretnom slučaju (za određenu dimenziju mašinskog dela, širinu tolerancijskog polja) da li je značajniji mali pad pneumatske osetljivosti ili veći porast oblasti primene uređaja.



Slika 6.9 Uticaj vihora na priraštaje pritiska i aksijalnog rastojanja na linearnom delu krive raspodele pritiska i na pneumatsku osetljivost za $D=0,7$ mm

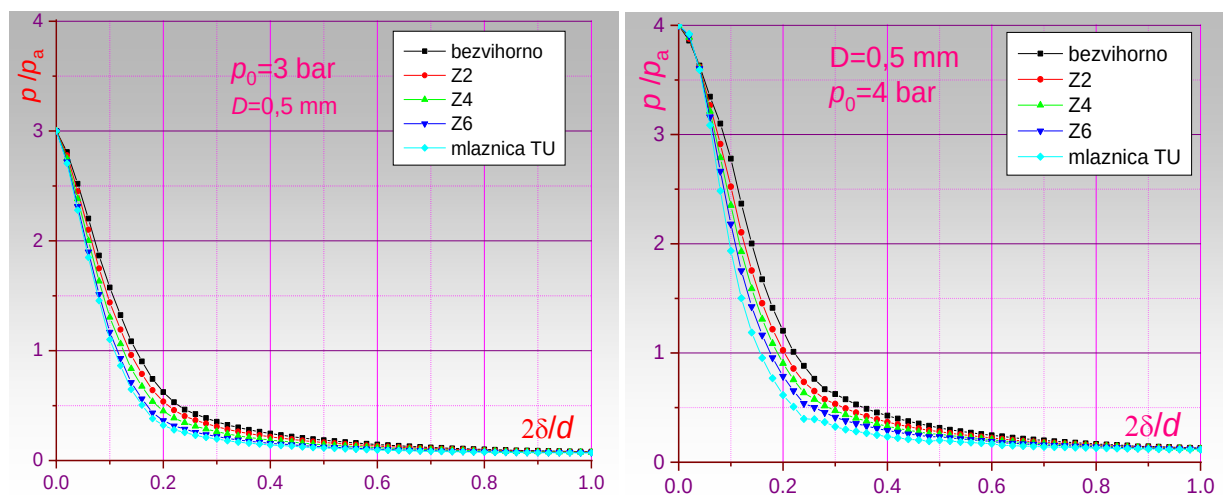
Nasuprot prethodno razmatranom slučaju, za prigušnicu prečnika $D=0,7$ mm pneumatska osetljivost raste za dva veća pritiska napajanja, kada u mlazu pneumatskog komparatora postoji vihorno strujanje. Sa druge strane, za iste pritiske za koje vihar uzrokuje porast pneumatske osetljivosti, dolazi do značajnog pada u oblasti primene uređaja, što je izraženo kroz pad vrednosti

aksijalnog rastojanja $\Delta\delta$. Ovo ujedno znači da je porastu pneumatske osjetljivosti više doprineo pad priraštaja aksijalnog rastojanja, nego pad pritiska koji je uzrokovan prisustvom vihora u mlazu.

6.2 VIHORO STRUJANJE FORMIRANO

TANGENCIJALNIM ULAZOM VAZDUHA U MLAZNICU

Na slici 6.10 je prikazana aksijalna raspodela pritiska na površi merenog komada za isti stepen prigušenja u mernoj komori $D=0,5$ mm, za dva različita pritiska napajanja, kada je u izlaznoj mlaznici bezvihorno strujanje, kada se na izlazu iz ove mlaznice formira vihorno strujanje pomoću zavojnih traka Z2, Z4 i Z6 i mlaznice sa tangencijalnim ulazom vazduha (mlaznica TU).



Slika 6.10. Dijagram $p=p(\delta)$ za $p_0=3$ bar i $p_0=4$ bar i $D=0,5$ mm pri bezvihornom strujanju i vihornom strujanju u mlaznici formirano zavojnim trakama Z2, Z4 i Z6 i tangentim ulazom u mlaznicu

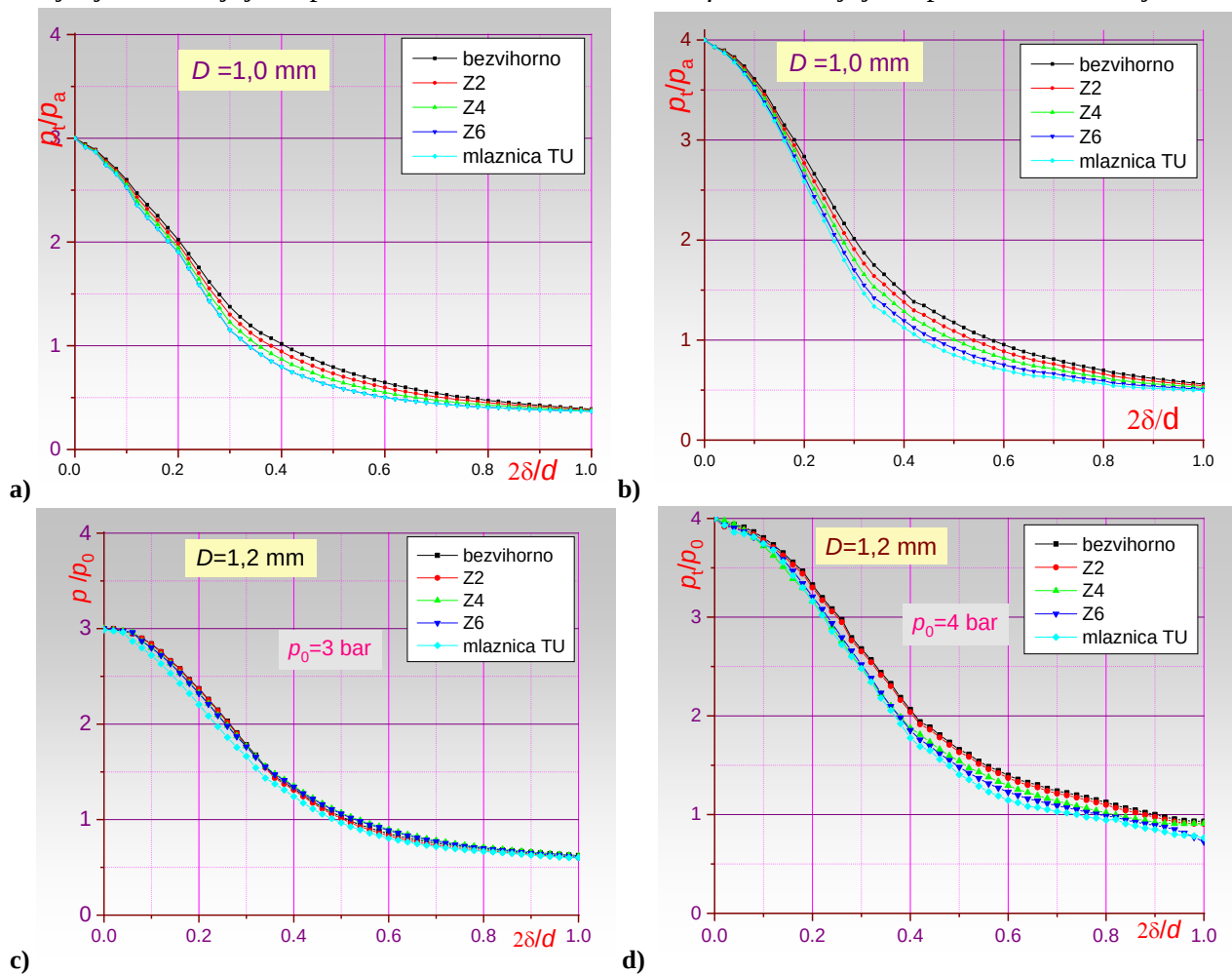
Analiza pritiska na površini mernog komada, za uslov da je izlazna mlaznica ona sa tangencijalnim ulazom vazduha, vrši se poređenjem sa referentnim pritiskom za bezvihorno strujanje na izlazu iz izlazne mlaznice i pritiskom za vihorno strujanje nastalo pomoću zavojnih traka Z2, Z4 i Z6. Ako se analizira pritisak na mernom komadu za isto aksijalno rastojanje $\delta=100$ μm dobijaju se vrednosti $p=2,694$ bar za bezvihorno strujanje, i $p=2,836$ bar za vihorno strujanje nastalo tangencijalnim ulazom vazduha u mlaznicu. Najmanji pritisak je za mlaznicu TU sa tangencijalnim ulazom vazduha što ukazuje da ova mlaznica ima najveće prigušenje. Manji pad pritiska je za referentno bezvihorno strujanje u odnosu na mlaznicu sa tangentnim ulazom vazduha, tabela 6.4.

Tabela 6.4 Pritisak za $\delta=100$ μm , razlika pritiska Δp i pneumatska osjetljivost S za $p_0=3$ bar i $p_0=4$ bar, za $D=0,5$ mm za bezvihorno i vihorno strujanje u mlaznici sa tangentnim ulazom vazduha

	$p_0=4$ bar		$p_0=3$ bar	
	bezhvorno	mlaznica TU	bezhvorno	mlaznica TU
$\delta=100$ μm	3,521	3,593	2,591	2,525
Δp , bar	0,072	0	0,066	0
S , bar/ μm	0,00824	0,01019	0,00718	0,00754
ΔS , %		23,67		5,01

Opet, pneumatska osjetljivost za zadate uslove zavisi od jačine vihora u mlaznici. U odnosu na referentne uslove pneumatska osjetljivost se povećala za mlaznicu sa tangencijalnim ulazom vazduha. Kao što je i očekivano, povećanje pneumatske osjetljivosti za mlaznicu sa tangencijalnim

ulazom vazduha (mlaznica TU) je proporcionalno pritisku napajanja. Smanjenjem pritiska napajanja smanjuje se pravolinijska dužina dijagrama, smanjuje se razlika pritisaka za isto aksijalno rastojanje δ , smanjuje se pritisak za sve krive za $\delta=1000 \mu\text{m}$ i smanjuje se pneumatska osetljivost.



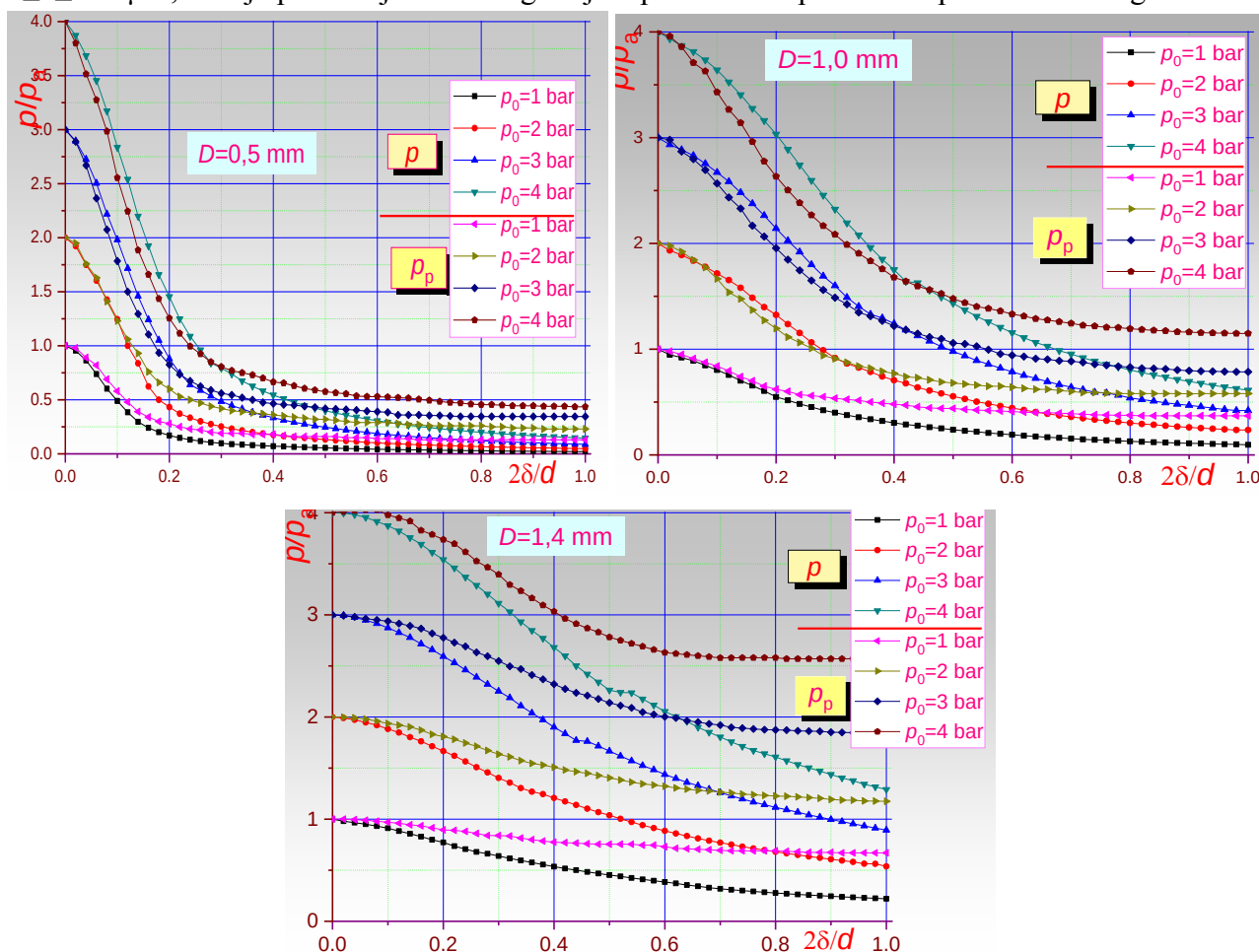
Slika 6.11. Dijagram $p=p(\delta)$ za $p_0=3 \text{ bar}$ i $p_0=4 \text{ bar}$ i $D=1 \text{ mm}$ i $D=1,2 \text{ mm}$ pri bezvihornom strujanju i vihornom strujanju u mlaznici formirano zavojnim trakama Z2, Z4 i Z6 i tangentim ulazom u mlaznicu

Na slici 6.11, dati su dijagrami za pritisak $p_0=3 \text{ bar}$ i $p_0=4 \text{ bar}$ i prigušnice prečnika $D=1,0 \text{ mm}$ i $D=1,2 \text{ mm}$. Ovi dijagrami služe kao potvrda prethodno rečenog - najveći pad pritiska ima kriva za najveći pritisak napajanja, za veće prigušenje u mernoj komori i sa vihornim strujanjem u mlaznici sa tangencijalnim ulazom vazduha (mlaznica TU).

Budući da se uticaj vihornog strujanja na rad pneumatskog komparatora po prvi put razmatra u ovoj doktorskoj disertaciji, i da autoru nije poznato neko prethodno istraživanje na ovu temu, nije moguće napraviti odgovarajuća poređenja dobijenih rezultata sa rezultatima drugih autora. S tim u vezi, sve analize u okviru ovog odeljka treba uzeti sa određenom dozom naučnog opreza. Za detaljnija razmatranja je potrebno sprovesti dodatna merenja strujnih veličina samog vihornog strujanja, kao jednog od najsloženijih vidova strujanja u prirodi sa svoje tri komponente brzine i posledično veoma složenim poljem pritiska. Dalje, potrebno je precizno definisati visinu u odnosu na izlazni presek izlazne mlaznice na kojoj će biti formirano vihorno strujanje. Time će se uzeti u obzir i uticaj odumiranja vihora u samoj mlaznici, pored onog koje postoji nakon izlaza vazduha iz iste. Na taj način će biti moguće i opravdano porediti rezultate uticaja vihora formiranog zavojnim trakama i pomoću tangencijalnog ulaska vazduha u mlaznicu.

6.2 PRITISAK NA ULAZU U MERILO PROTOKA ZA MLAZNICU TU

Na slici 6.12 dati su dijagrami pritiska vazduha na ulazu u merilo protoka, za različite prečnike prigušnice i sve pritiske napajanja. Za najveće prigušenje u mernoj komori je najveća razlika za najveći pritisak napajanja i to za aksijalno rastojanje $0 \leq \delta \leq 200 \mu\text{m}$. Za pritisak napajanja $p_0=1$ bar razlika pritiska se povećava povećanjem aksijalnog rastojanja. Za $p_0=2$ bar pritisak je isti za $0 \leq \delta \leq 100 \mu\text{m}$, a dalje povećanjem δ veći gradijent pritiska ima pritisak na površini mernog komada.



Slika 6.12. Raspodele pritiska na ulazu merilo protoka p_p i pritiska na površi merenog komada p , za sve pritiske napajanja $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar i za mlaznicu a) $D=0,5$ mm, b) $D=1,0$ mm i c) $D=1,4$ mm

Za $\delta=220 \mu\text{m}$ pritisci su isti, a dalje povećanjem δ veći je gradijent pritiska na površini merenog mašinskog dela p . Za $p_0=4$ bar pritisak p je veći za $0 \leq \delta \leq 300 \mu\text{m}$. Za $\delta=300 \mu\text{m}$ pritisci su isti a dalje povećanjem δ brži pad pritiska ima pritisak na površini merenog mašinskog dela. Daljim povećanjem aksijalnog rastojanja mlaznice, razlika pritiska se povećava, da bi za $400 \leq \delta \leq 1000 \mu\text{m}$ razlika bila konstantna vrednost. Veći je pritisak na ulazu u merilo protoka. Razlika pritiska nastaje sa povećanjem protoka vazduha. Za veće aksijalno odmicanje δ veći je protok vazduha. Za veće pritiske napajanja veća je razlika pritiska $\Delta p=p_p-p$.

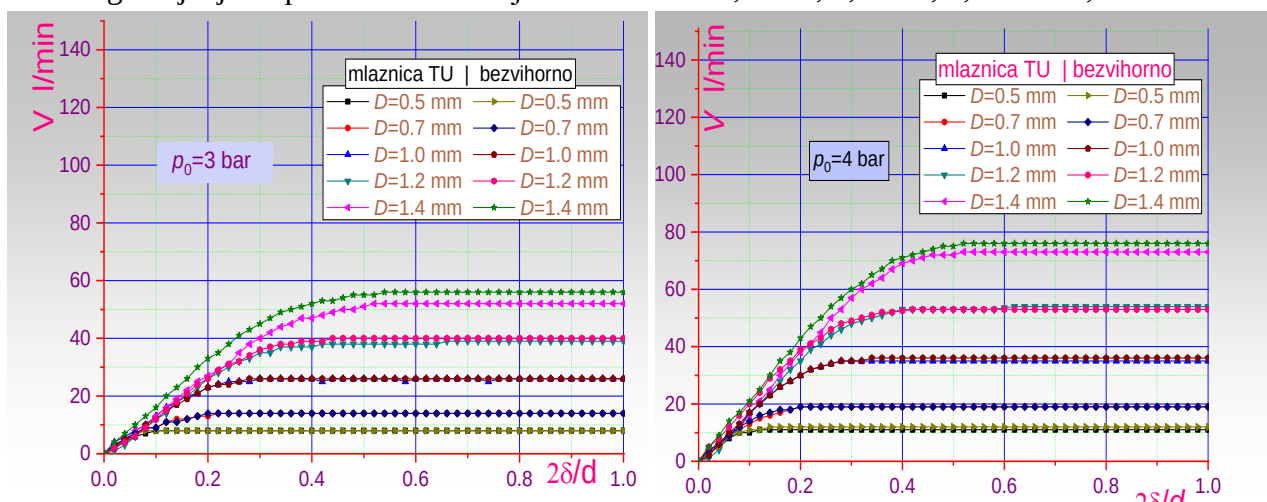
Na slici 6.12b dat je dijagram $p=p(\delta)$ za sve pritiske napajanja i $D=1,0$ mm. Za $p_0=1$ bar za $0 \leq \delta \leq 1000 \mu\text{m}$ je veći pritisak na ulazu u protokomer p_p . Za $p_0=2$ bar za $0 \leq \delta \leq 100 \mu\text{m}$ pritisci su isti, da bi za $100 \mu\text{m} \leq \delta \leq 280 \mu\text{m}$ veći pritisak bio na površi merenog komada. Za $280 \leq \delta \leq 1000 \mu\text{m}$ veći je gradijent pritiska na površi merenog komada. Za $p_0=3$ bar i 4 bar za $0 \mu\text{m} \leq \delta \leq 400 \mu\text{m}$ veći je p a za preostalo aksijalno odmicanje veći je pritisak na ulazu u protokomer p_p . Za veći pritisak

napajanja veća je razlika pritisaka. Takođe povećanjem prečnika unutrašnje prigušnice povećava se razlika pritiska na ulazu u protokomer p_1 i pritiska na mernom komadu p .

Za malo prigušenje protoka vazduha, $D=1,4$ mm, dat je uporedni dijagram pritiska p_p i p , slika 6.12c. Sa dijagrama se uočava da su pritisci na ulazu u merilo protoka za sve vrednosti aksijalnog rastojanja između mlaznice i merenog komada veći na ulazu u merilo protoka u odnosu na pritiske na površini merenog komada. Najveća razlika pritisaka je na $\delta=1000$ μm i za najveći pritisak napajanja $p_0=4$. Na osnovu ovoga se može zaključiti da se razlika pritisaka $\Delta p=p_p-p$ povećava povećanjem pritiska napajanja p_0 , aksijalnog rastojanja δ i prečnika prigušnice D .

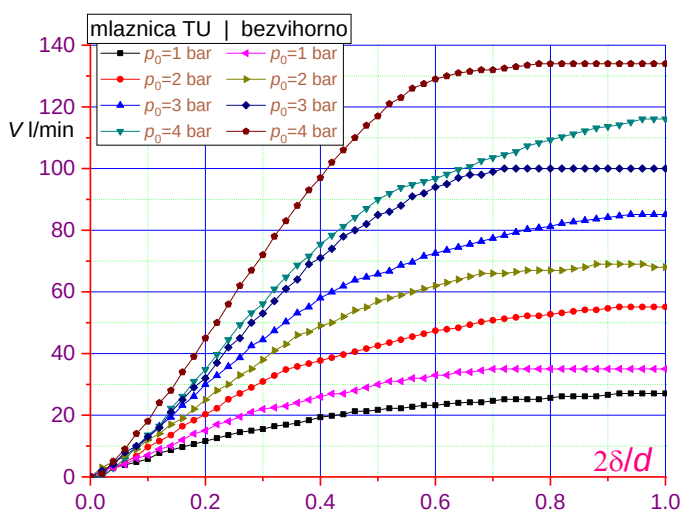
6.3 MERENJE PROTOKA VAZDUHA ZA MLAZNICU TU

Na slici 6.13 je prikazan protok za pritiske napajanja $p_0=3$ bar i $p_0=4$ bar, za različite vrednosti prečnika prigušnice. Vidi se da je protok vazduha isti za mlaznicu TU i standardnu mlaznicu bez vihornog strujanja za prečnike unutrašnje mlaznice $D=0,5$ mm; 0,7 mm; 1,0 mm i 1,2 mm.



Slika 6.13 Uporedni dijagram protoka vazduha za mlaznicu sa tangencijalnim ulazom vazduha i standardnu mlaznicu sa bezvihornim strujanjem za $D=0,5$ mm - 1,4 mm, za pritisak napajanja a) $p_0=3$ bar i b) 4 bar

Za mlaznicu $D=1,4$ mm razlika pritiska je evidentna od najmanje aksijalne koordinate. Povećanjem aksijalnog rastojanja do $\delta=460$ μm razlika pritisaka se povećava i za $460 \leq \delta \leq 1000$ μm razlika je maksimalna i iznosi 3 l/min. I sa povećanjem pritiska napajanja na 4 bar, za sve prečnike



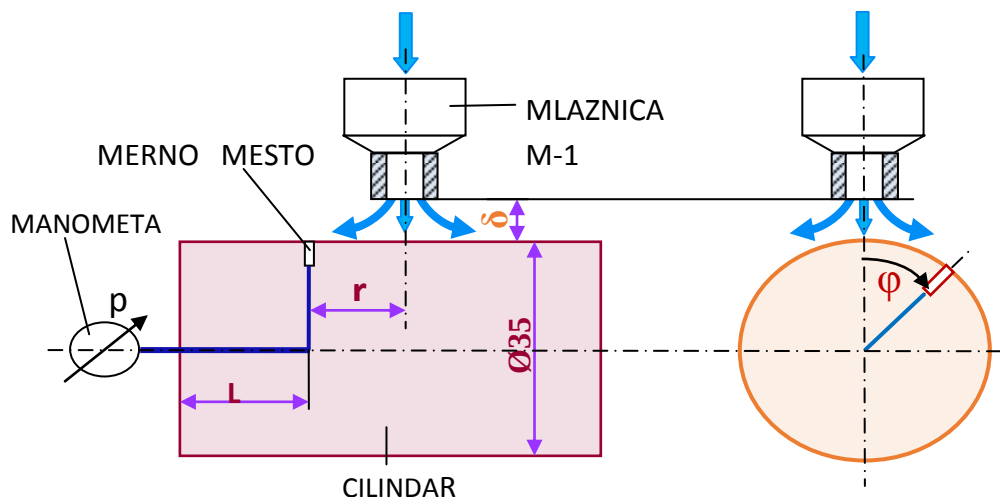
Slika 6.14. Uporedni dijagram protoka vazduha za mlaznicu sa tangencijalnim ulazom vazduha i standardnu mlaznicu sa bezvihornim strujanjem za $D=4$ mm

prigušnice D , izuzev za $D=1,4$ mm, je protok isti bez obzira na vrstu mlaznice tj. da li je u pitanju standardna mlaznica sa bezvihornim strujanjem ili mlaznica TU. Za $D=1,4$ mm, razlika u protocima je maksimalna za $440 \leq \delta \leq 1000$ μm i iznosi $\Delta \dot{V}=4$ l/min.

Najveća razlika protoka vazduha je za uslov najvećeg prečnika unutrašnje mlaznice $D=4,0$ mm. Na dijagramu prikazanom na slici 6.14 se vidi da se razlika protoka povećava povećanjem pritiska napajanja p_0 i aksijalnog rastojanja δ .

7 UTICAJ ZAKRIVLJENOSTI POVRŠI MERENOG KOMADA NA RASPODELE PRITISKA U AKSIJALNOM I RADIJALNOM PRAVCU

U okviru ove glave će se razmatrati uticaj centralnog ugla površi merenog komada na radijalne i aksijalne raspodele pritiska na površi merenog komada. U tu svrhu će se sprovesti merenja na cilindričnim površima čiji je radijus krivine 17,5 mm i 3,4375 mm, i rezultati ovih merenja će se uporediti sa rezultatima na ravnoj površi iz prethodnog razmatranja, za koju je radijus krivine, teorijski gledano, jednak beskonačnosti. Za potrebe ovih istraživanja, napravljena su dva cilindra prethodno navedenih prečnika u kojima je izbušen sistem povezanih rupa na čijem jednom od krajeva je povezan manometar, kao što je to prikazano na slici 7.1.



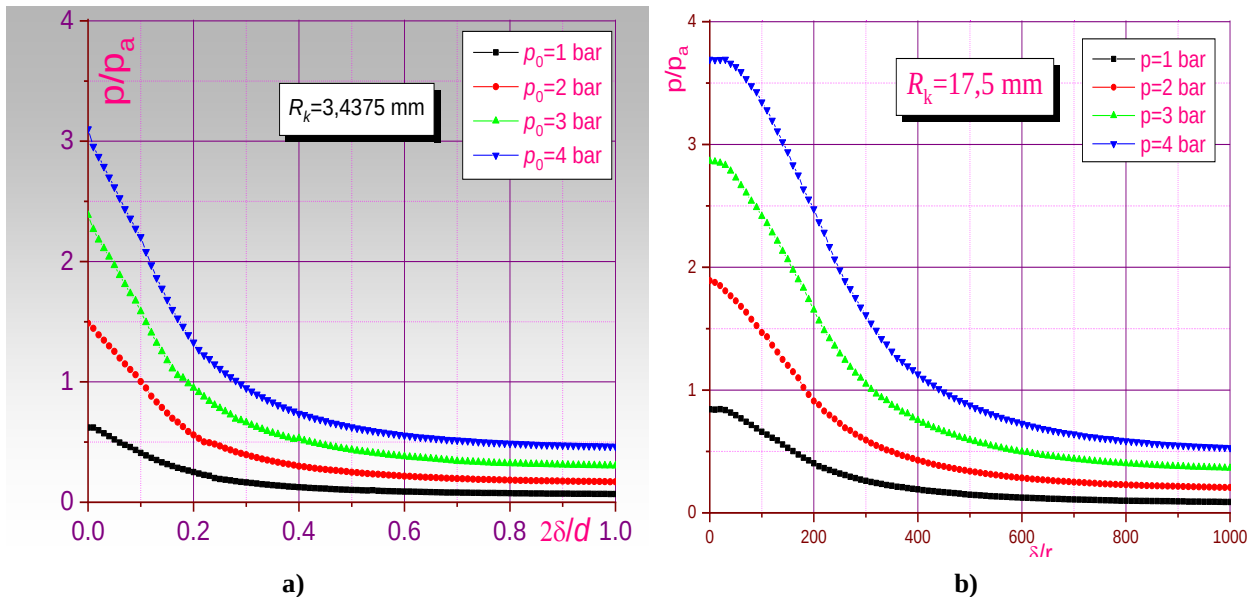
Slika 7.1. Šema dela merne instalacije za merenje na cilindričnoj površini

Merenje pritiska na cilindričnoj površi je kompleksnije od merenja na ravnoj površi. Merna instalacija treba da omogući merenje aksijalne raspodele pritiska $p=p(\delta)$, radijalne raspodele pritiska $p=p(r)$ i pritiska na površi cilindra kada se cilindar zarotira za određeni ugao $p=p(\varphi)$. Na cilindru se izbuši rupa prečnika 1 mm čija je dubina polovina prečnika cilindra $d_c/2$. Radijalno se probuši druga rupa prečnika 2 mm dužine L. Ove rupe su međusobno spojene i upravne su jedna u odnosu na drugu (v. sliku 7.1). Na kraju cilindra u osi, nalazi se priključna mlaznica koja se spaja elastičnim vodom (crevom) sa manometrom na kojem se očitava vrednost pritiska na površi mernog cilindra. Pored toga, merna instalacija je koncipirana tako da je omogućeno zakretanje cilindra za ugao φ .

7.1 UTICAJ ZAKRIVLJENOSTI POVRŠI MERENOG KOMADA NA AKSIJALNU RASPODELU PRITISKA

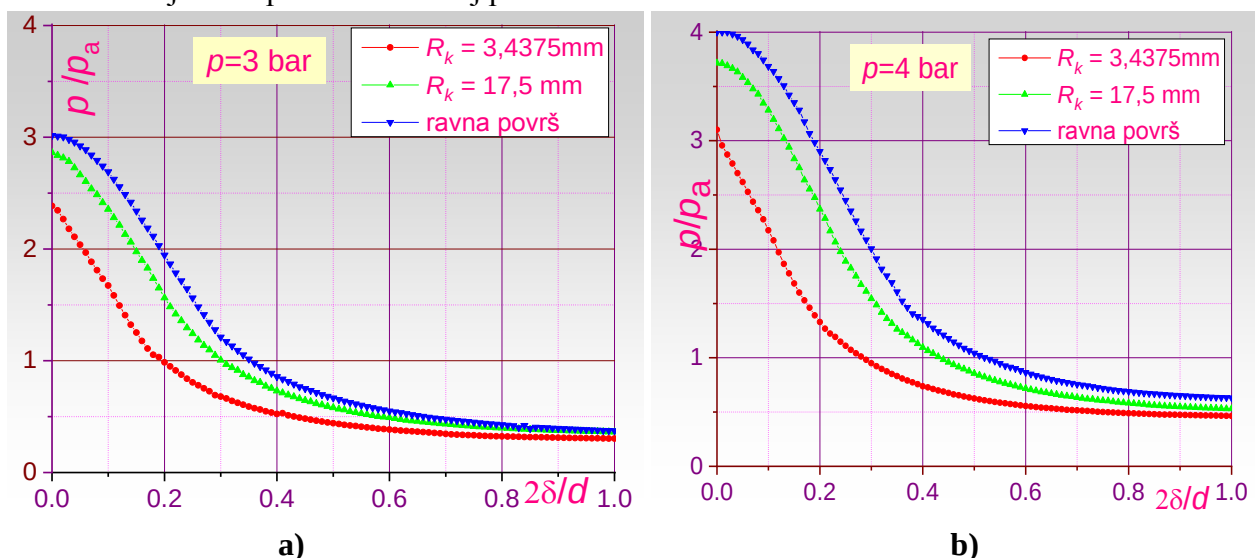
Za merenje pritiska u aksijalnom pravcu na cilindričnoj površi, izlazna mlaznica M-1 mora da se postavi tačno iznad mernog mesta, tj. ose mlaznice i mernog mesta moraju da se poklapaju. To se ostvaruje pomoću aksijalnog i radijalnog pozicionera. Da bi se to ostvarilo, cilindrični predmet ima

moгуćnost vrlo finog ugaonog zakretanja. U početnom položaju, osa mlaznice poklapa se sa osom mernog mesta, što znači da je radijalna koordinata $r=0 \mu\text{m}$, ugao zakretanja cilindra $\varphi=0^\circ$ i aksijalno rastojanje između mlaznice i mernog komada $\delta=0 \mu\text{m}$. Ovo su uslovi za korektno merenje koje je vrlo teško postići. Dovođenje mlaznice tačno iznad mernog mesta vrši se tako što se na mernom mestu traži maksimalni pritisak. Takođe je komplikovano odrediti početni položaj $\delta=0 \mu\text{m}$ za aksijalno odmicanje mlaznice. To se radi merenjem električnog otpora ili vizuelnom metodom. Za bilo koju metodu mora se električno izolovati merna mlaznica M-1 od postolja za koga je pričvršćena. U trenutku odvajanja mlaznice od mernog mesta, menja se električni otpor. Ili, odvajanjem mlaznice otvara se električno kolo i prekida napajanje električnom energijom led diode, dioda se isključuje.



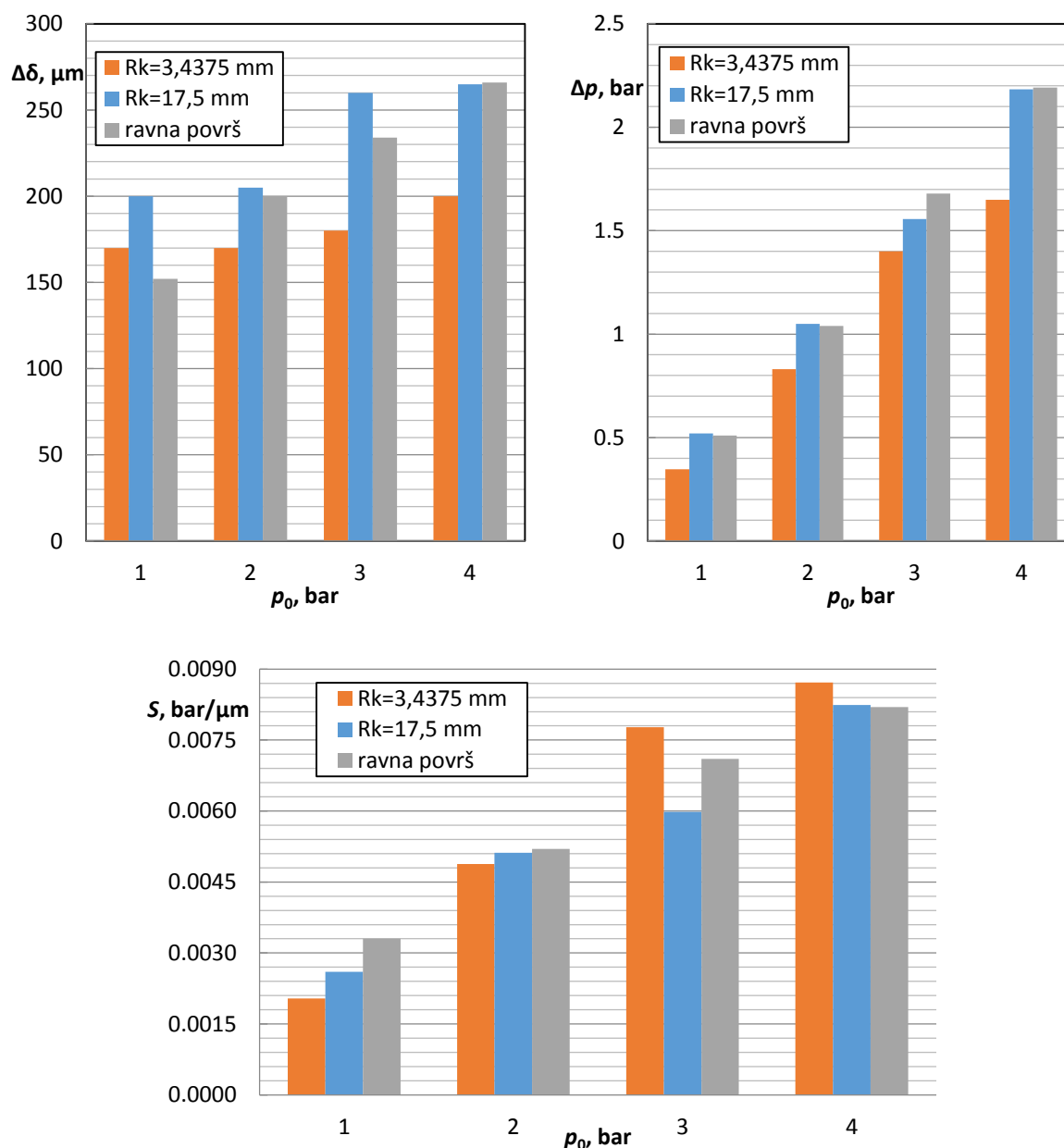
Slika 7.2 Aksijalna raspodela pritiska $p=p(\delta)$ na površi radijusa krivine 3,4375 mm i 17,5 mm za $D=1,0$ mm i pritisak napajanja $p_0=1$ bar - 4 bar

Na slici 7.2 data je aksijalna raspodela pritiska vazduha na cilindričnoj površi cilindra različitih prečnika, za prečnik prigušnice $D=1,0$ mm i pritiske napajanja $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar. Svi parametri krive $p=p(\delta)$ se povećavaju sa povećanjem pritiska napajanja p_0 , kao i u slučaju raspodele pritiska u aksijalnom pravcu na ravnoj površi.



Slika 7.3 Aksijalna raspodela pritiska $p=p(\delta)$ na površi radijusa krivine 3,4375 mm i 17,5 mm i ravnoj površi za $D=1,0$ mm i pritisak napajanja **a)** $p_0=3$ bar i **b)** $p_0=4$ bar

Međutim, ono što karakteriše cilindrične površi, tj. površ sa manjim radijusom krivine u odnosu na ravnu površ, jeste značajno smanjenje pritiska u nultom položaju mlaznice tj. za $\delta=0 \mu\text{m}$, i to tako da je vrednost pritiska u nultom položaju mlaznice manja ukoliko je radijus krivine površi merenog komada manja (v. slike 7.2 i 7.3). Takođe, za isti radijus krivine površi merenog komada se širina zone nepromenjenog pritiska (δ_0 na slici 4.5) u jezgru mlaza smanjuje sa smanjenjem pritiska napajanja.



Slika 7.4 Uticaj radijusa krivine površi merenog komada na priraštaj pritiska, priraštaj aksijalnog rastojanja i pneumatsku osetljivost za $D=1,0 \text{ mm}$ i različite pritiske napajanja

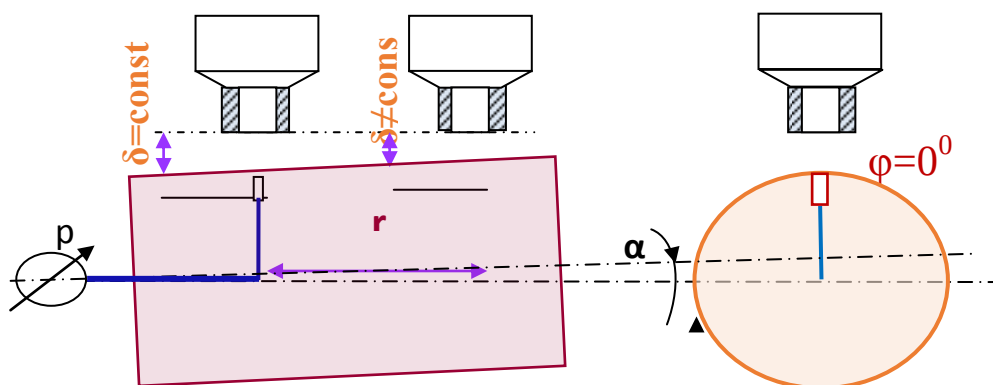
Krive aksijalne raspodele pritiska za različite radijuse krivine površi pri istom pritisku napajanja su međusobno ekvidistantne, ali se razlikuju dužine linearnog dela krive. Sa smanjenjem radijusa krivine površi merenog komada, linearni deo aksijalne raspodele pritiska se takođe smanjuje. S tim u vezi, menja se i pneumatska osetljivost uređaja. Promena pneumatske osetljivosti zavisi od relativnog odnosa promene priraštaja pritiska i priraštaja aksijalnog rastojanja (v. sliku 7.4).

7.2 UTICAJ ZAKRIVLJENOSTI POVRŠI MERENOG KOMADA NA RADIJALNU RASPODELU PRITISKA

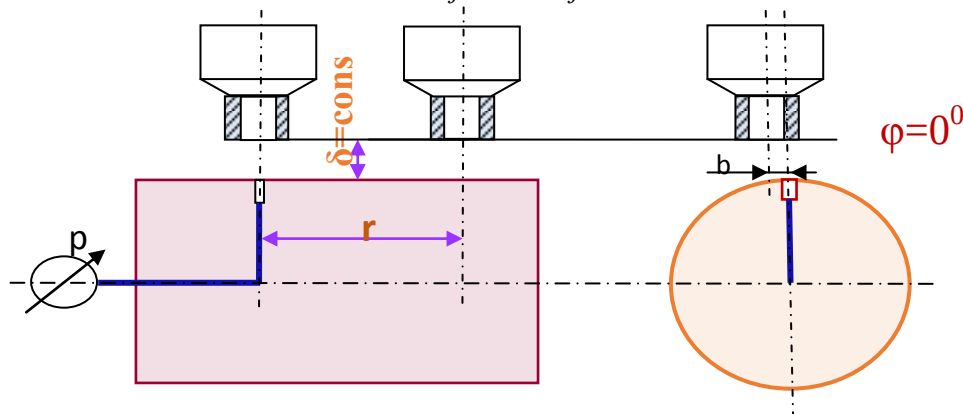
U okviru ovog odeljka će se razmatrati promene u radijalnoj raspodeli pritiska kada se mlaznica pomera duže ose cilindra na određenom aksijalnom rastojanju i u slučaju kada se cilindar zakreće za određeni ugao oko svoje podužne ose. Na ovaj način se obezbeđuje relativno pomeranje mlaznice u odnosu na cilindar u pravcu upravnom na podužnu osu mlaznice pri konstantnom aksijalnom rastojanju između mlaznice i merenog komada.

7.2.1 Uticaj pomeranja mlaznice duž ose cilindra na radijalnu raspodelu pritiska

Za merenje radijalnog pritiska $p=p(r)$ na cilindričnoj površi, slika 7.5, dat je deo merne instalacije. Za korektno merenje mora da bude zadovoljen uslov normalnosti osa izlazne mlaznice M-1 i cilindra. Ovaj uslov omogućava da za svako radijalno odmicanje r aksijalno rastojanje izlazne mlaznice i cilindrične površine bude $\delta=\text{const}$. Dalje, mora da bude zadovoljen uslov da se pravac kretanja izlazne mlaznice poklapa sa pravcem ose cilindra. Ovo se postiže tako što za određeno radijalno rastojanje između izlazne mlaznice i merenog komada levo i desno od ose mernog mesta, mora da bude zadovoljen uslov da pritisak ima istu vrednost. Takođe, pomoću aksijalnog i radijalnog pozicionera postavlja se izlazna mlaznica u željeni položaj. U početnom položaju osa mlaznice mora da se poklapa sa osom mernog mesta. To znači da je radijalna koordinata $r=0\text{ }\mu\text{m}$, ugao zakretanja cilindra $\varphi=0^\circ$ i aksijalna koordinata mlaznice $\delta=0\text{ }\mu\text{m}$. Ovo su uslovi za korektno merenje koje je vrlo teško postići.



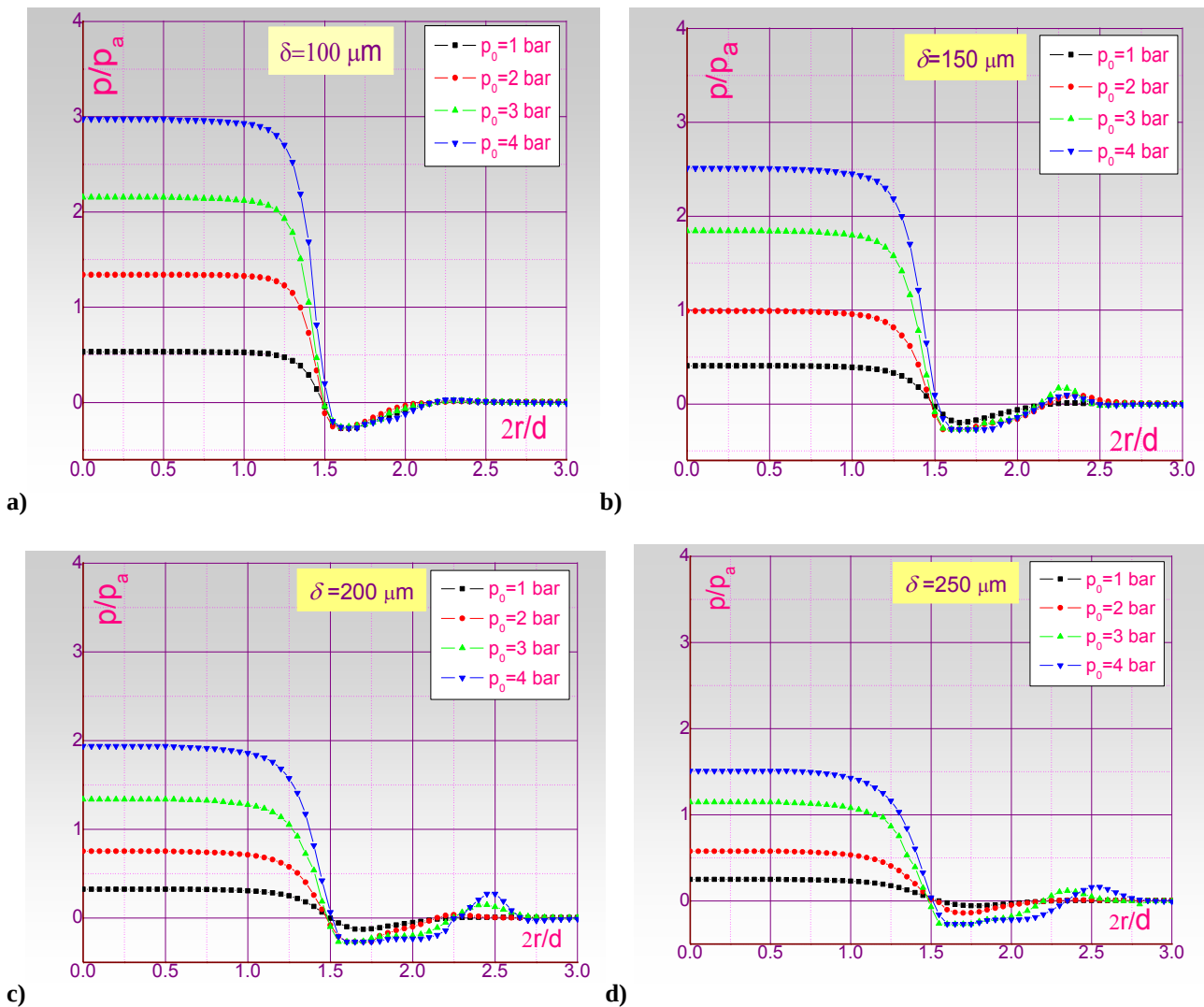
Slika 7.5. Greška: nije zadovoljen uslov $\delta=\text{const}$



Slika 7.6. Šema nastanka greške pri merenju: pravac kretanja mlaznice se ne poklapa sa uzdužnom osom cilindra

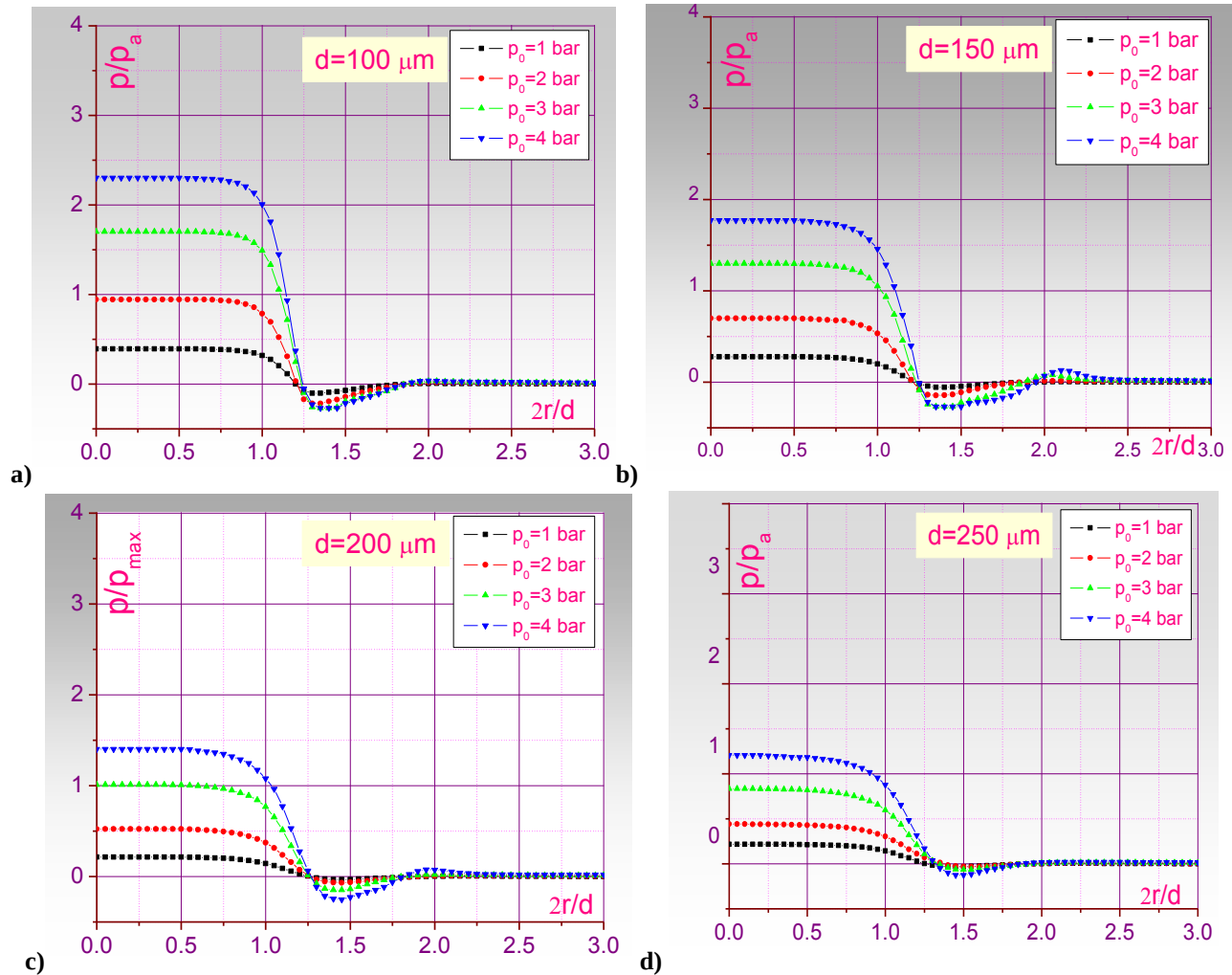
Greške pri merenju nastaju ako nije zadovoljen uslov $\delta=\text{const}$, slika 7.5. Ako osa cilindra nije paralelna sa pravcem kretanja mlaznice, već postoji ugaona razlika α , tada nastaju dva slučaja. Ako se δ povećava radijalni pritisak $p=p(r)$ će imati manje vrednosti od potrebnih. Ako se δ smanjuje radijalni pritisak $p=p(r)$ će imati veće vrednosti, slika 7.6. Greška pri merenju može da nastane i pored toga što je zadovoljen uslov $\delta=\text{const}$ ako se pravac pomeranja izlazne mlaznice u radijalnom pravcu ne poklapa sa pravcem ose cilindra. Tada nastaje slučaj da se osa mlaznice ne poklapa sa podušnom osom cilindra, slika 7.6 i u tom slučaju vrednost pritiska $p=p(r)$ je manja od stvarnog.

Na slici 7.7 prikazani su eksperimentalni rezultati radijalne promene pritiska na površi mernog komada radijusa krivine 17,5 mm pri aksijalnom rastojanju mlaznice i ravne površine $\delta=100\text{ }\mu\text{m}$ - $250\text{ }\mu\text{m}$, za pritisak napajanja $p_0=1\text{ bar}$, 2 bar , 3 bar i 4 bar i prečnik prigušne mlaznice $D=1,0\text{ mm}$ u mernoj komori B₁. Rezultati merenja pokazuju da je dobijen tipičan dijagram promene radijalnog pritiska na kome se jasno uočavaju tri karakteristična dela. Prvi deo dijagrama je horizontalni deo i nalazi se u okolini ose koji odgovara zaustavnoj oblasti $p=p(r_z, \delta)$. Drugi deo je oblast nagle promene – pad pritiska na mernom mašinskom delu, koja je ispod frontalne površi mlaznice. I treći deo je oblast potpritiska koja je u vrtložnoj zoni, zona potpritiska $p_{\min}=p_{\min}(r_{\min}, \delta)$.



Slika 7.7 Radijalna raspodela pritiska $p=p(r)$ za površ radijusa krivine 17,5 mm, za $D=1\text{ mm}$, pri pritisku napajanja $p_0=1\text{ bar}$ - 4 bar , za **a)** $\delta=100\text{ }\mu\text{m}$, **b)** $\delta=150\text{ }\mu\text{m}$, **c)** $\delta=200\text{ }\mu\text{m}$ i **d)** $\delta=250\text{ }\mu\text{m}$

Kao i na ravnoj površi, sa povećanjem aksijalnog rastojanja između merenog komada i izlazne mlaznice, dolazi do pada pritiska u zaustavnoj zoni. Posledično, za istu aksijalnu koordinatu δ , dolazi do smanjenja gradijenta pritiska u smicajnom sloju mlaza. Karakteristično za sva četiri razmatrana aksijalna rastojanja δ je to da pritisak menja znak na približno istoj radijalnoj koordinati. Međutim, razlikuje se vrednost potpritiska ispod čeonice površi mlaznice, kao i širina zone u kojoj vlada potpritisk. Naime, sa porastom aksijalne koordinate, dolazi do proširenja zone potpritiska, i to tako da za veću vrednost pritiska napajanja ova zona postaje šira. Takođe, po izlasku iz vrtložne zone, sa spoljašnje strane zida mlaznice, sa povećanjem pritiska napajanja a na većim aksijalnim rastojanjima δ , dolazi do formiranja lokalnog maksimuma u raspodeli pritiska u radijalnom pravcu.

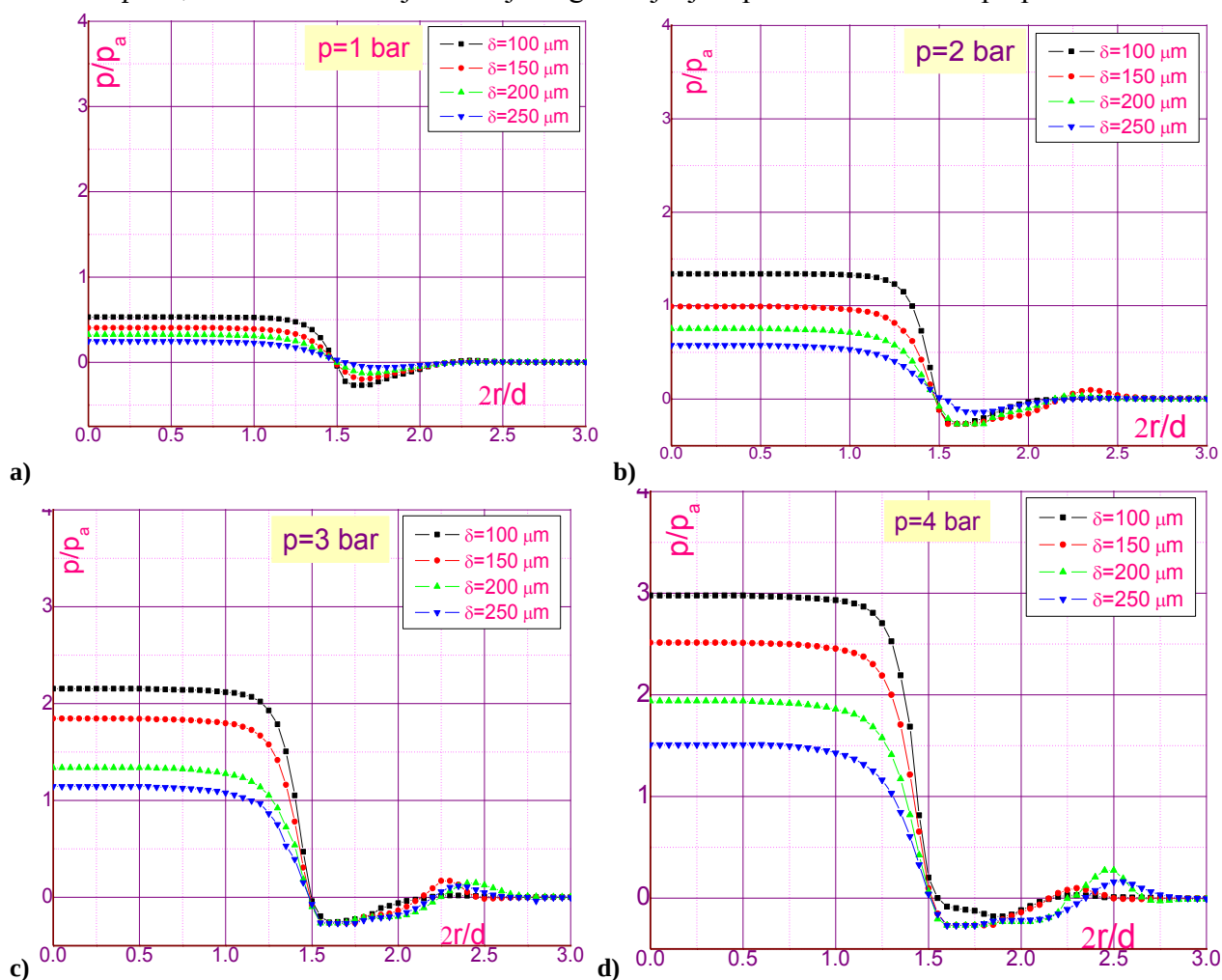


Slika 7.8 Radijalna raspodela pritiska $p=p(r)$ za površ radijusa krivine 3,4375 mm, za $D=1$ mm, pri pritisku napajanja $p_0=1$ bar - 4 bar, za **a)** $\delta=100 \mu\text{m}$, **b)** $\delta=150 \mu\text{m}$, **c)** $\delta=200 \mu\text{m}$ i **d)** $\delta=250 \mu\text{m}$

Raspodela pritiska u radijalnom pravcu je slična i za površ manjeg radijusa krivine (slika 7.8). Uočava se da porastom pritiska napajanja povećava se rastojanje nastanka $p_{\min}$, a vrednost $p_{\min}$ se smanjuje. Rastojanje $r_{\min}$ na kome se definiše položaj kritičnog preseka nalazi se u vrlo uzanom intervalu od 1350 do 1400 μm . Karakteristično za ovaj dijagram je da su radijalna rastojanja r_1 nastanka potpritiska, povećavaju u funkciji pritiska napajanja. Takođe i radijalna rastojanja r_2 prelaska potpritiska u natpritisk, se povećavaju sa povećanjem pritiska napajanja.

Povećanjem aksijalnog rastojanja δ smanjuje se vrednost pritiska na površini mernog komada u zaustavnoj zoni $p=p(r_z, p)$, povećava se vrednost radijalne koordinate r_1 gde je vrednost pritiska $p=0$ bar, povećava se vrednost aksijalne koordinate $r_{\min}$. Vrednost $p_{\min}$ se povećava za $p_0=1$ bar i 2 bar

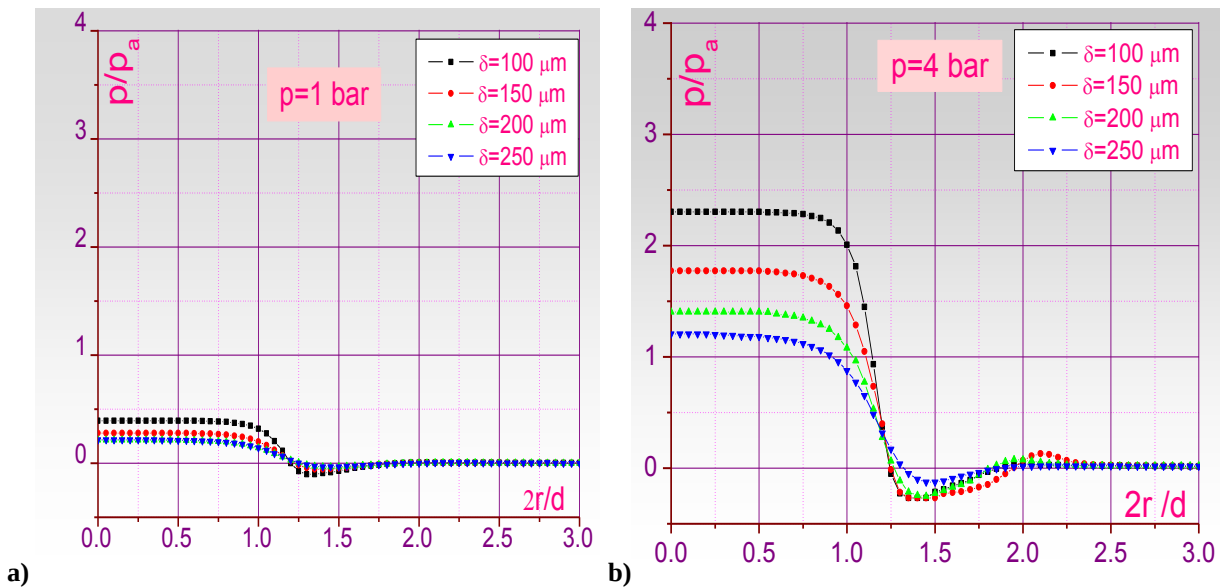
porastom aksijalnog rastojanja δ , a vrednost $p_{\min}$ se ne menja za $p_0=3$ bar i 4 bar i ima najmanju vrednost $p=-0,269$ bar. Povećanjem aksijalnog rastojanja δ povećava se oblast potpritiska Δr .



Slika 7.9 Radijalna raspodela pritiska $p=p(r)$ za cilindričnu površ prečnika 35 mm, za $D=1$ mm, na aksijalnom rastojanju $\delta = 100 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}$, za **a)** $p_0=1$ bar, **b)** $p_0=2$ bar, **c)** $p_0=3$ bar i **d)** $p_0=4$ bar

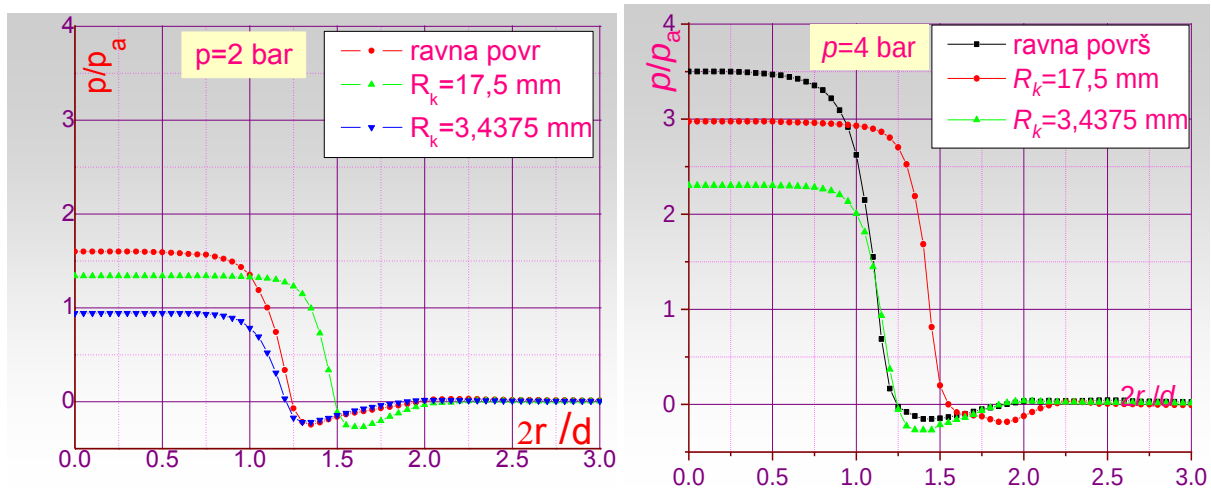
Na dijagramima prikazanim na slici 7.9 date su raspodele pritiska u radijalnom pravcu na površi mernog komada čiji je radijus krivine 17,5 mm za različite pritiske napajanja i sva aksijalna rastojanja $\delta=100 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}$. Kao i kod površi sa beskonačno velikim radijusom krivine, najveći pritisak na površi merenog komada je za najmanje aksijalno rastojanje $\delta=100 \mu\text{m}$ i obrnuto. Širina zaustavne zone je praktično ista za sve pritiske napajanja tj. pritisak menja znak za približno istu vrednost radijalne koordinate. Za dva najmanja pritiska napajanja, najveći potpritisak ima kriva za $\delta=100 \mu\text{m}$, a povećanjem aksijalnog rastojanja δ potpritisak se smanjuje. Sa povećanjem pritiska napajanja na 3 bar i na 4 bar, ovo nije slučaj. Iako se povećava aksijalno rastojanje između merenog komada i izlazne mlaznice komparatora, vrednost potpritiska ostaje približno ista, sa manjim odstupanjima u širini zone potpritiska. Izuzetak je kriva za najveći razmatrani pritisak napajanja i najmanju aksijalnu koordinatu, koja pokazuje manju vrednost potpritiska u odnosu na ostale krive za dati pritisak napajanja. Sa povećanjem pritiska napajanja, sa spoljašnje strane zida mlaznice dolazi do formiranja lokalnog maksimuma u raspodeli pritiska u radijalnom pravcu.

Dijagrami prikazani na slici 7.10 svedoče tome da je zavisnost radijalne raspodele pritiska od pritiska napajanja i aksijalnog rastojanja između merenog komada i izlazne mlaznice ista i za površ najmanjeg razmatranog radijusa krivine od 3,4375 mm.



Slika 7.10 Radijalna raspodela pritiska $p=p(r)$ za površ radijusa krivine 3,4375 mm, za $D=1$ mm, na aksijalnom rastojanju $\delta = 100 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}$, za **a)** $p_0=1$ bar, **b)** $p_0=4$ bar

Na slici 7.11 dat je dijagram za pritisak napajanja $p_0=2$ bar i $p_0=4$ bar. Uočava se da najveći pritisak ima kriva za ravnu površinu a najmanji je za krivu površ radijusa krivine $R_k=3,4375$ mm. Ovo je zbog toga što su izvodnice površi manjeg radijusa krivine udaljenije od frontalne površi mlaznice. Najmanji pritisak u zaustavnoj zoni je za površ najmanjeg radijusa krivine, a najveći za ravnu površ. Sa ovih dijagrama se vidi da za sva tri slučaja javlja se potpritisak. Kod cilindra većeg prečnika $d=35$ mm taj potpritisak se javlja na kraju frontalne površi izlazne mlaznice, što je dobro, jer ne dolazi do nagomilavanja nečistoća na istoj i ne ometa ispravan rad pneumatskog komparatora.



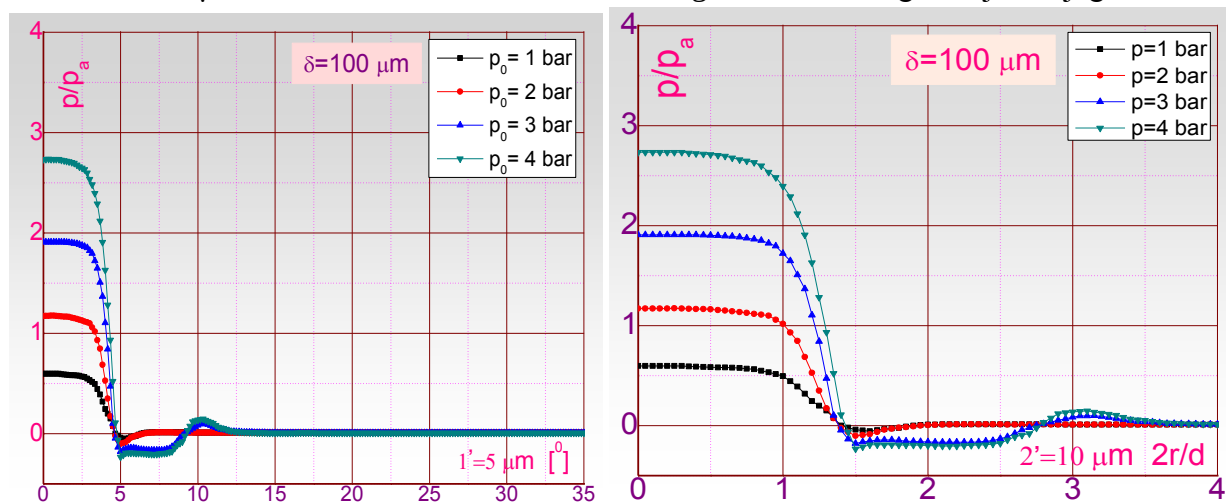
Slika 7.11 Uporedni prikaz radijalne raspodele pritiska $p=p(r)$ za površi različitih radijusa krivine za pritisak napajanja **a)** $p_0=2$ bar, **b)** $p_0=4$ bar

Najmanja vrednost potpritiska $p_{\min}$ je za površ radijusa krivine 17,5 mm, zatim za ravnu površ i najmanji pritisak je za površ najmanjeg radijusa krivine $R_k=3,4375$ mm. Bez obzira što je najniži pritisak za površ radijusa krivine $R_k=17,5$ mm, taj pritisak je van frontalne zone mlaza vazduha. To je intencija istraživanja, da se dobije potpritisak što dalje od ose izlazne mlaznice.

7.2.2 Uticaj zakretanja cilindričnog merenog komada na radijalnu raspodelu pritiska

U ovom pododeljku će se razmatrati promene u radijalnoj raspodeli pritiska ako se čeona površ mlaznice pomera u pravcu koji je poprečan u odnosu na podužnu osu cilindra, zadržavajući pri tome isto aksijalno rastojanje u odnosu na površ merenog komada. Jasno je da su ovo uslovi koji se mogu ostvariti rotacijom cilindra oko sopstvene ose za određeni ugao, držeći mlaznicu u nepromenjenom položaju. Deo instalacije za merenje pritiska na cilindričnoj površini, za ugaono zakretanje $p=p(\varphi)$, šematski je prikazana na slici 7.1. U početnom položaju osa mlaznice se poklapa sa osom mernog mesta. To znači da radijalno odmicanje mora da bude $r=0 \mu\text{m}$, ugao zakretanja cilindra $\varphi=0^\circ$ i aksijalnim odmicanjem mlaznice $\delta=0$. Pored uslova koji moraju da budu zadovoljeni, a koji su navedeni u prethodnom odeljku, instalacija omogućava finu rotaciju cilindra oko sopstvene ose sa tačnošću zakretanja od $2' = 10 \mu\text{m}$. Ovaj deo instalacije se sastoji od kućišta sa vratilom. Na vratilu je cilindar, na kome se vrši merenje. Na cilindru je merno mesto i priključak za manometar. Sa druge strane vratila je merni uređaj sa kružnom skalom graduisanom u stepenima. Na kućištu se nalazi dodatna skala koja omogućava merenje ugla zakretanja cilindra sa tačnošću šestog dela stepena, tačnije $10'$ (minuta). Ugaono zakretanje cilindra je $\varphi=0^\circ - 30^\circ$. Ugaoni korak zakretanja je $10'$. Prečnik cilindra je $d=35 \text{ mm}$, a obim njegove osnove je $O=109,9 \text{ mm}$. Uglu $\varphi=1^\circ$ odgovara lučna dužina $r=300 \mu\text{m}$, što znači da ugaono zakretanje za $10'$ odgovara pomeranju po obimu u dužini luka od $50 \mu\text{m}$. Ovo pretvaranje lučnog zakretanja na pravolinijsku dužinu, omogućava poređenje sa dijagramima na ravnoj površini.

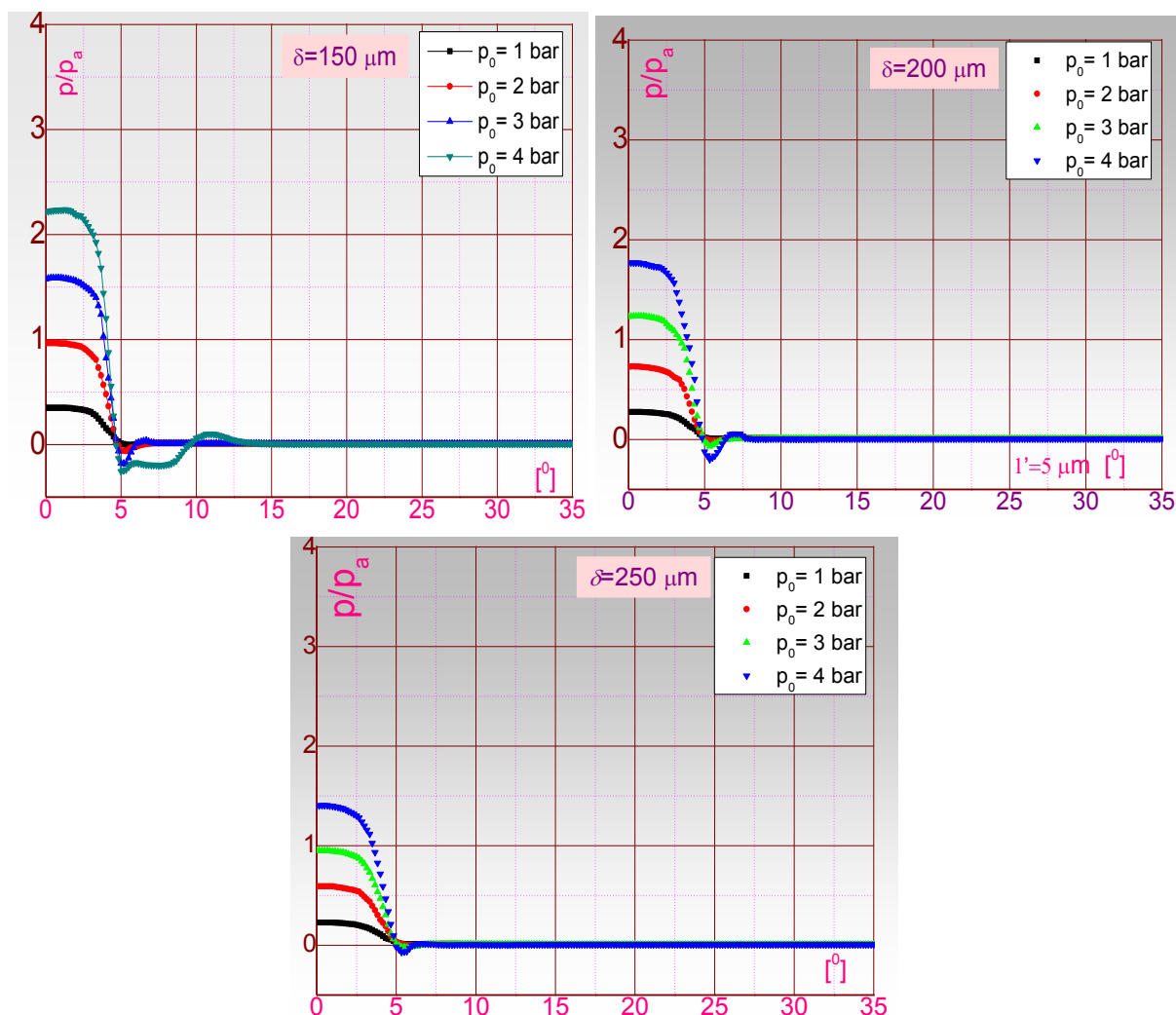
Na slici 7.12 prikazani su eksperimentalni rezultati radijalne promene pritiska na cilindričnom mernom mašinskom delu pri aksijalnom rastojanju mlaznice i cilindra $\delta=100 \mu\text{m}$, za pritisak napajanja $p_0=1 \text{ bar}$, 2 bar , 3 bar i 4 bar i prečnik unutrašnje mlaznice $D=1,0 \text{ mm}$. Razlika je u skalama – apscisama. Levo je dužinska dok je na desnom dijagramu na apscisi ugaona skala. Ugaona skala je pretvorena u lučnu – dužinsku skalu. Relacija za transformaciju je $10' = 50 \mu\text{m}$, odnosno $1^\circ=300 \mu\text{m}$. U svim analizama će se koristiti ugaona skala i odgovarajući dijagrami.



Slika 7.12. Raspodela pritiska na površi radijusa krivine $R_k=17,5 \text{ mm}$ za ugaono zakretanje $p=p(\varphi)$ za aksijalno rastojanje mlaznice $\delta=100 \mu\text{m}$ i pri pritisku napajanja $p_0=1\text{bar}$, 2 bar , 3bar i 4 bar dat u odnosu na a) ugao zakretanja φ i b) dužinu opisanog luka

Rezultati merenja pokazuju da je dobijen dijagram promene pritiska na kome se jasno uočavaju tri karakteristična dela. Prvi deo dijagrama je horizontalni deo i nalazi se u okolini ose mlaznice koji odgovara zaustavnoj oblasti $p=p(\varphi_0, \delta)$, zaustavna zona. Drugi deo je oblast nagle promene – pad pritiska koja je u mikrokanalu između mlaznice i mernog mašinskog dela. I treći deo je oblast potpritiska koja je u vrtlžnoj zoni, zona potpritiska, $p_{\min}=p_{\min}(\varphi_{\min}, \delta)$. Na slici 7.13 su prikazane

raspodele pritiska na cilindričnoj površi radijusa krivine od 17,5 mm, za tri preostale aksijalne koordinate.

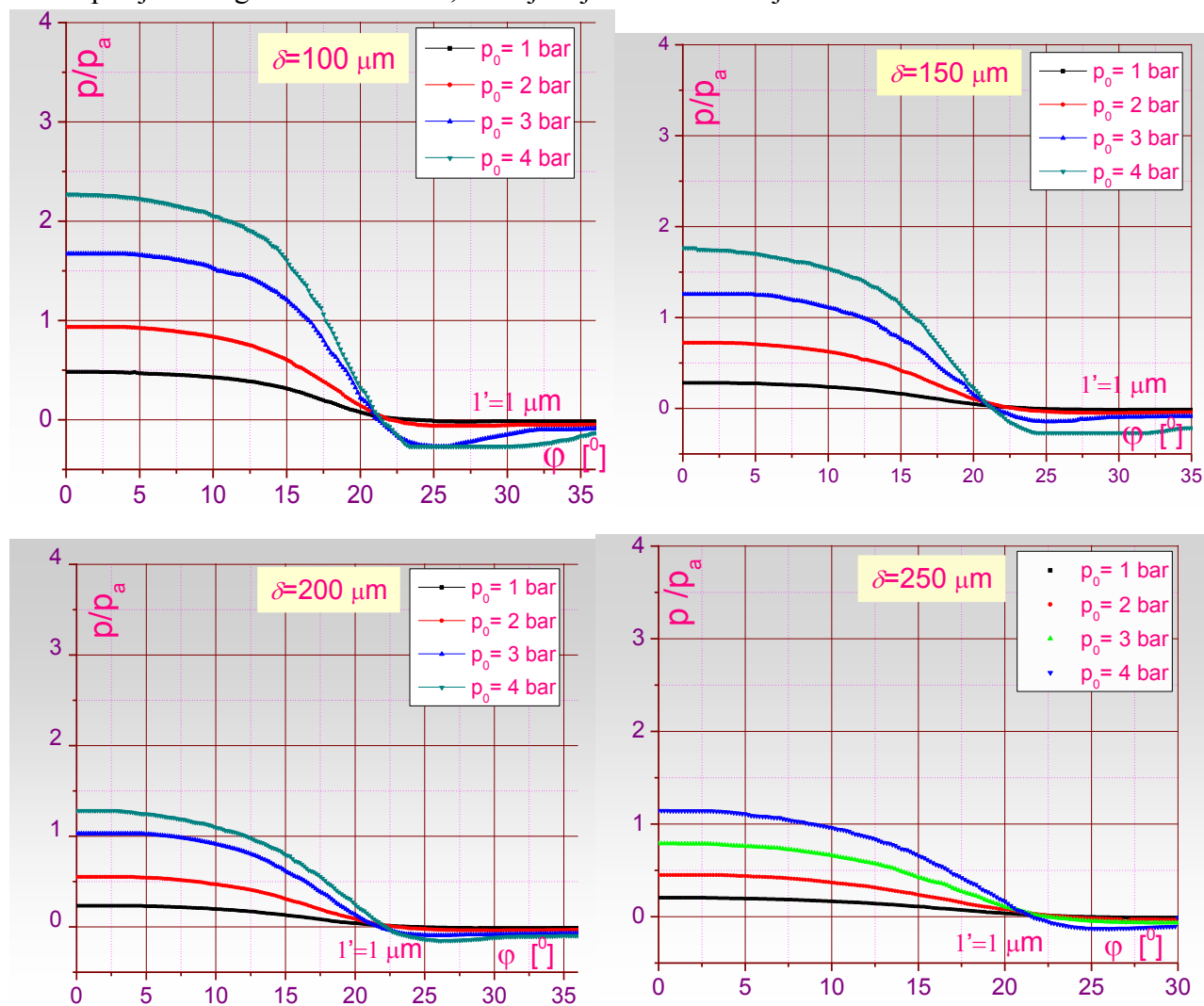


Slika 7.13. Raspodela pritiska na cilindričnoj površini radijusa krivine 17,5 mm za ugaono zakretanje $p=p(\varphi)$ pri pritisku napajanja $p_0=1\text{ bar}$, 2 bar, 3 bar i 4 bar dat u odnosu na ugaono zakretanja za aksijalno rastojanje mlaznice a) $\delta=150\text{ }\mu\text{m}$, b) $\delta=200\text{ }\mu\text{m}$, c) $\delta=250\text{ }\mu\text{m}$

Sa slika 7.12 i 7.13 se vidi jasan uticaj aksijalnog rastojanja između izlazne mlaznice i cilindrične za najmanji radijus krivine. Već za najmanje aksijalno rastojanje, raspodela pritiska za dva najmanja pritiska napajanja se značajno razlikuje od onih za veće pritiske napajanja (3 bar i 4 bar). Za veće vrednosti pritiska napajanja je zona potpritiska značajno šira. Ovakvo je stanje i za aksijalnu koordinatu $\delta=150\text{ }\mu\text{m}$ za $p_0=4\text{ bar}$. U ovim slučajevima se zona potpritiska proširuje na veću lučnu dužinu cilindra. Međutim, za aksijalna rastojanja $\delta=200\text{ }\mu\text{m}$ i $\delta=250\text{ }\mu\text{m}$, zona potpritiska za različite pritiske napajanja se razlikuje samo prema vrednosti ostvarenog potpritiska. Za najveće aksijalno rastojanje, za pritiske napajanja $p_0=1\text{ bar}$ i $p_0=2\text{ bar}$ ne postoji oblasti potpritiska ispod čeonu površi mlaznice. Za pritisak napajanja $p_0=1\text{ bar}$ zona potpritiska se formira samo za aksijalno rastojanje od $\delta=100\text{ }\mu\text{m}$. Sa smanjenjem pritiska napajanja, smanjuje se i vrednost pritiska u zaustavnoj zoni na površi merenog komada. Posmatrajući dijagrame na slikama 7.11 i 7.12 možemo pogodnim izborom pritiska napajanja p_0 i aksijalne koordinate δ "podesiti" da pritisak ispod frontalne površi mlaznice bude što manji i da je ova zona što dalje od ose mlaznice.

Na slici 7.14 je prikazana radijalna raspodela pritiska na cilindru prečnika 6,875 mm, za različite aksijalne koordinate i pri svim pritiscima napajanja. Odmah se uočava da se ove raspodele pritiska u radijalnom pravcu razlikuju u odnosu na one koje smo analizirali za površ radijusa krivine

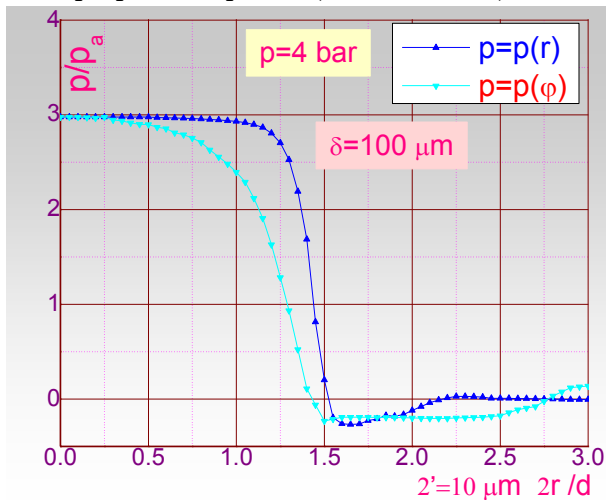
17,5 mm. Glavne osobine radijalne raspodele pritiska su i ovde zadržane - sa povećanjem pritiska napanja, povećava se pritisak u zaustavnoj zoni, sa povećanjem aksijalnog rastojanja između površi merenog komada i izlaznog preseka mlaznice dolazi do smanjenja pritiska u zaustavnoj zoni. Međutim, u ovom slučaju, tj. kada je radijus krivine površi merenog komada 4,4375 mm, ne postoji nagli pad pritiska za ugao zakretanja manji od 5° (v. slike 7.12 i 7.13). Ovo je posledica relativnog odnosa unutrašnjeg prečnika izlazne mlaznice i prečnika cilindra na kojem su sprovedena merenja. Takođe, oblast potpritiska se formira za veće vrednosti ugla zakretanja u odnosu na slučaj površi čiji je radijus krivine 17,5 mm. Istovremeno, za površ manjeg radijusa krivine, zona potpritiska je šira i opstaje i za uglove veće od 35° , za koje nije vršeno merenje.



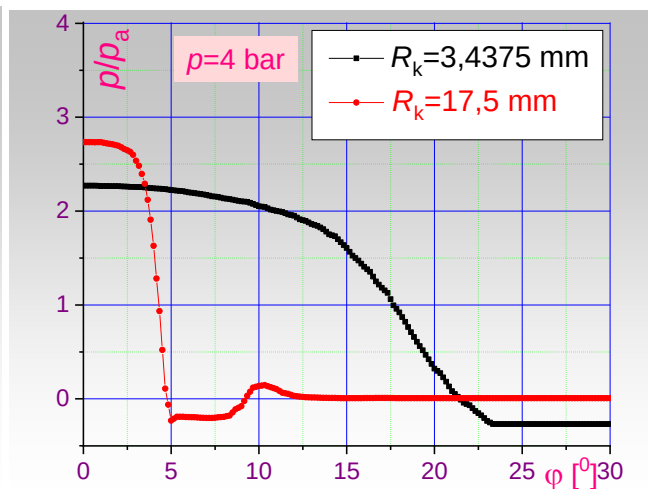
Slika 7.14. Raspodela pritiska na cilindričnoj površini radijusa krivine 3,4375 mm za ugaono zakretanje $p=p(\varphi)$ pri pritisku napajanja $p_0=1$ bar, 2 bar, 3 bar i 4 bar dat u odnosu na ugao zakretanja za aksijalno rastojanje mlaznice a) $\delta=150 \mu\text{m}$, b) $\delta=200 \mu\text{m}$, c) $\delta=250 \mu\text{m}$

Dijagram na slici 7.15 dat je za pritisak napajanja $p_0=4$ bar za prečnik cilindra $d=35$ mm za aksijalno rastojanje mlaznice i površine cilindra $\delta=100 \mu\text{m}$. Ovde se poredi radijalni pritisak $p=p(r)$, koji nastaje radijalnim pomeranjem izlazne mlaznice duž ose cilindra i pritisak na cilindru $p=p(\varphi)$ nastao poprečnim zakretanjem u odnosu na osu cilindra. Opseg radijalnog pomeranja mlaznice je $r=0 - 3000 \mu\text{m}$ a opseg ugaonog zakretanja je $\varphi=0 - 30^\circ$. Dijagram pritiska za ugaono zakretanje $p=p(\varphi)$ može da se poredi sa dijagramom pritiska u radijalnom pravcu $p=p(r)$ jer se ugaono zakretanje prevodi u dužinu luka, tako da imaju istu osnovu za poređenje. Ugaono zakretanje cilindra od $\varphi=l'$ odgovara dužini luka $\Delta \varphi=5 \mu\text{m}$. Pritisak za ugaono zakretanje postepeno se

smanjuje do $0 \leq r \leq 1000 \mu\text{m}$. Povećanjem radijalnog kretanja pritisak naglo pada tako da za $r_1=1450 \mu\text{m}$ gde natpritisak prelazi u potpritisak. Kod kriva $p=p(r)$ izražena je zona naglog pada pritiska za malo radijalno pomeranje. Karakteristično za dijagram $p=p(\varphi)$ da u oblasti $1500 \leq r \leq 2700 \mu\text{m}$ ima veliki potpritisak $p_{\min}=-(0,095 - 0,232) \text{ bar}$.



Slika 7.15 Uporedni dijagrami $p=p(r)$ i $p=p(\varphi)$ za površi $R_k=17,5 \text{ mm}$ i $p_0=4 \text{ bar}$ i $\delta=100 \mu\text{m}$



Slika 7.16 Uporedni dijagrami $p=p(\varphi)$ za površi radijusa krivine $R_k=17,5 \text{ mm}$ i $3,4375 \text{ mm}$ za $p_0=4 \text{ bar}$

Na slici 7.16 dati su dijagrami pritiska $p=p(\varphi)$ na površima radijusa krivine $R_k=17,5 \text{ mm}$ i $3,4375 \text{ mm}$ za pritisak napajanja $p_0=4 \text{ bar}$ i aksijalnog odstojanja mlaznice $\delta=100 \mu\text{m}$. Vidi se da je pritisak veći za površ većeg radijusa krivine za početne uslove $p=p(0, 100 \mu\text{m})$. Takođe se vidi da zona naglog pada pritiska, za površ manjeg radijusa krivine, ne postoji, već je pad pritiska postepen. Dijagram na slici 7.15 je dat u lučnoj dužini, i on je realan. Međutim dijagram 7.16 je dat u ugaonom domenu i relativan je. Ako posmatramo zakretanje od 5° za prečnik $d=35 \text{ mm}$ je lučna dužina $1500 \mu\text{m}$, dok je za ugao 5° za radijus krivine $R_k=3,4375 \text{ mm}$, ta lučna dužina jednaka $300 \mu\text{m}$. U oblasti zaustavne zone pritisak je $p_z=2,734 \text{ bar}$ za ugaono zakretanje 1° a za manji radijus krivine $p_z=2,269 \text{ bar}$ za ugaono zakretanje $0,833^\circ$. Vrednost ugaonog zakretanja φ_1 kada natpritisak prelazi u potpritisak je za veći radijus krivine $\varphi_1=4,833^\circ$ ($r=1499 \mu\text{m}$) a za manji radijus krivine $\varphi_1=21,3^\circ$ što odgovara lučnoj dužini $1380 \mu\text{m}$. Karakteristično je da je izrazito veće ugaono zakretanje za površ manjeg radijusa krivine, to je zbog toga što je lučna dužina na površi manjeg radijusa krivine pet puta manja od lučne dužine na površi većeg radijusa krivine. Zbog toga dijagram, za manji R_k , izgleda razvučen. Ugaono zakretanje za cilindar prečnika $d=6,875 \text{ mm}$, kada potpritisak prelazi u natpritisak φ_2 , za ovaj opseg zakretanja $\varphi=0^\circ-30^\circ$, ne može da se odredi jer posle ugaonog zakretanja φ_1 pritisak je negativan za svako φ . Ugaono zakretanje φ_2 za površ radijusa krivine $R_k=17,5 \text{ mm}$ $\varphi_2=9,166^\circ$.

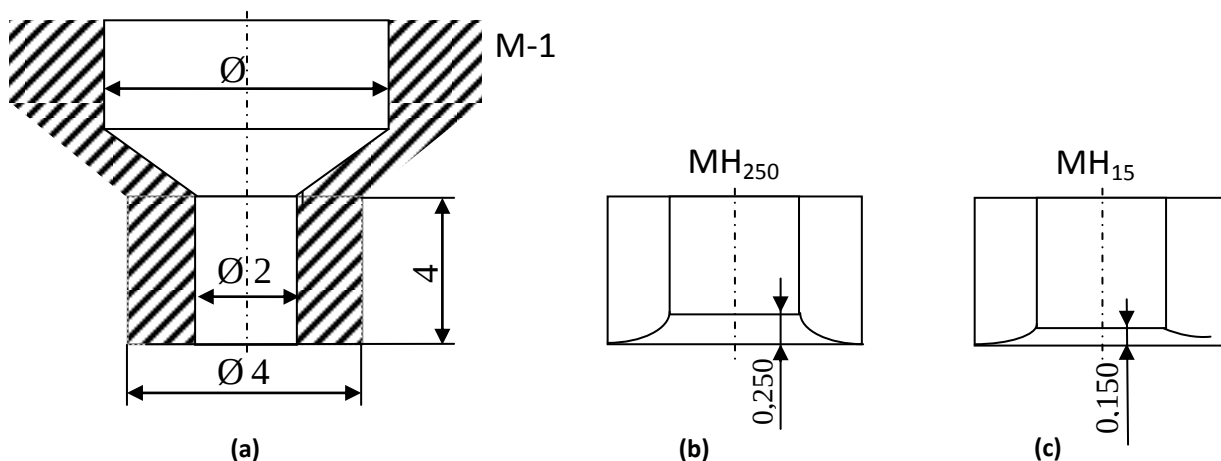
I na ovom mestu je potrebno da se istakne da su ovo prva merenja ovog tipa sa primenom u pneumatskoj metrologiji. Autoru ove disertacije nije poznato prethodno istraživanje uticaja radijusa krivine na radijalnu i aksijalnu raspodelu pritiska na površi merenog komada različitih radijusa krivine. U tom smislu, potrebno je uzeti u obzir i dodatna merenja na novim površima čiji se radijusi krivine razlikuju u odnosu na ove koji su razmatrani u okviru ove glave. Takođe, potrebno je razmotriti mogućnost da se prečnik mernog mesta dodatno smanji u odnosu na karakteristične dimenzije merenih komada.

8 MODIFIKACIJE GEOMETRIJE IZLAZNE MLAZNICE

U okviru ove glave ćemo se baviti oblikom čeonu površi izlazne mlaznice. S jedne strane, napravljene su dve nove mlaznice MH_{150} i MH_{250} koje imaju zaobljeni zid sa unutrašnje strane, za koje ćemo analizirati radijalnu i aksijalnu raspodelu pritiska na ravnoj površi merenog komada, i razmatraćemo mogućnosti za primenu ovih mlaznica u pneumatskoj metrologiji. U drugom delu glave ćemo na neki način izvršiti modifikaciju standardne mlaznice. Tačnije, oblik čeonu površine će ostati geometrijski nepromenjen, ali će se za potrebe merenja pritiska na čeonu površi same mlaznice, na istoj izbušiti tri otvora malih dimenzija koje će biti raspoređene na tri koncentrične kružnice različitih poluprečnika.

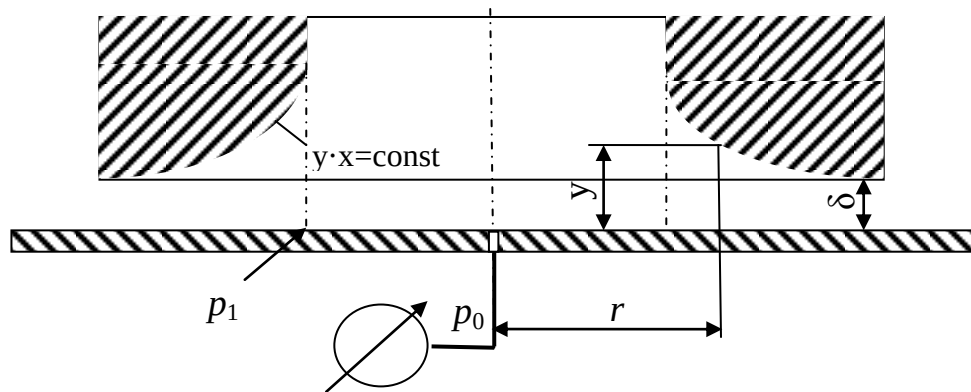
8.1 GEOMETRIJA MLAZNICA MH_{150} I MH_{250}

Izlazne mlaznice MH_{150} i MH_{250} , slike 8.1b i 8.1c, imaju istu geometriju vrha kao standardna izlazna mlaznica M-1, slika 8.1a. To su niske mlaznice visine vrha mlaznice $h=4$ mm, spoljašnjeg prečnika $D=4$ mm i unutrašnjeg prečnika $d=2$ mm. Unutrašnji prečnik tela mlaznica je $\varnothing 5$ mm. Mlaznice MH_{150} i MH_{250} imaju zaobljen unutrašnji zid, slika 8.2. Kriva zaobljenja je parabola $y \cdot x = \text{const}$. Ovo je urađeno iz razloga da razvijena površina ispod mlaznice uvek ima istu vrednost površine: $A=2 \cdot x \cdot z \cdot \pi = \text{const}$.



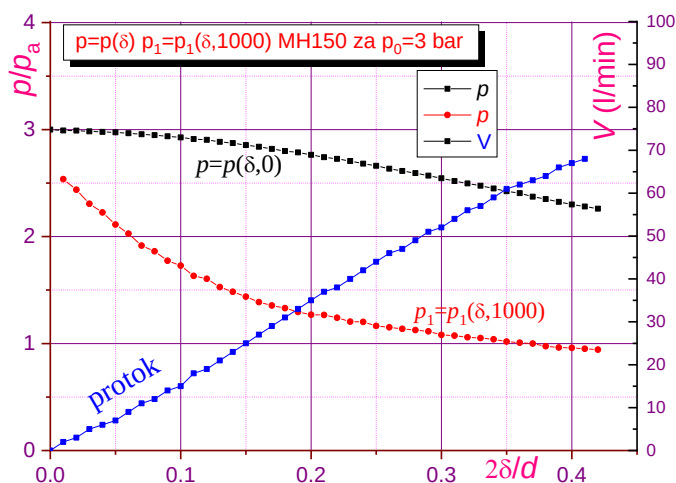
Slika 8.1. Šema geometrije vrha mlaznica: M-1; MH_{150} i MH_{250}

Merenje je rađeno za aksijalne položaje $\delta=150$ μm ; 200 μm i 250 μm . Vrednost razvijene površine za $x=2$ mm i $y=\delta$ je: $A_{150}=1,8849$ mm²; $A_{200}=2,5132$ mm² i $A_{250}=3,1416$ mm². Za potrebe eksperimenta urađene su mlaznice MH_{150} i MH_{250} . Meren je pritisak u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$ za radijalne koordinate $r=0$ i $r=1000$ μm . Svi su eksperimenti rađeni bez prigušnice, tj. za $D=4$ mm.



Slika 8.2. Šema dela merne instalacije i geometrija vrha izlaznih mlaznica MH150 i MH250

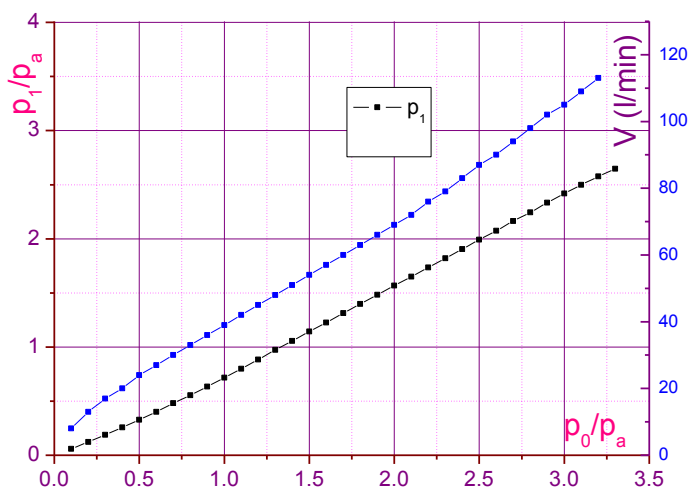
Na dijagramu prikazanom na slici 8.3, data je raspodela pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$ na radijalnim pozicijama $r=0$ i $r=1000 \mu\text{m}$. Pritisak za nulti položaj mlaznice $\delta=0 \mu\text{m}$ i $r=1000 \mu\text{m}$ ne može da se izmeri jer nema protoka vazduha. Tek za neko najmanje aksijalno pomeranje mlaznice u aksijalnom pravcu, u ovom slučaju $\delta=5 \mu\text{m}$, pritisak za radijalnu koordinatu $r=1000 \mu\text{m}$ je $p_1=2,537$ bar. Merenje pritiska u aksijalnom pravcu $p=p(\delta)$ se vrši za aksijalno rastojanje $0 \leq \delta \leq 420 \mu\text{m}$. Korak aksijalnog pomeranja je $0,010 \text{ mm}$. Pritisak napajanja je $p_0=3$ bar. U početnom položaju za $\delta=0 \mu\text{m}$ i $r=0 \mu\text{m}$ pritisak na ravnoj površini je $p=p_0=3$ bar. Aksijalnim pomeranjem mlaznice pritisak $p=p(\delta)$ se blago smanjuje (v. sliku 8.3), i za $\delta=420 \mu\text{m}$ ima vrednost $p=2,281$ bar. Uticaj aksijalnog rastojanja između mlaznice i mernog komada je veći za pritisak meren na radijalnoj koordinati $r=1000 \mu\text{m}$ u odnosu na pritisak u osi mlaznice, što se vidi sa slike 8.3. Na istoj slici se vide i izmerene vrednosti protoka, gde se vidi još jednom da sa porastom aksijalnog rastojanja dolazi do povećanja protoka.



Slika 8.3. Dijagram aksijalne raspodele pritiska $p=p(\delta)$ i protoka $\dot{V}$, za radijalne koordinate $r=0$ i $r=1000 \mu\text{m}$ za mlaznicu MH₁₅₀

Dijagram radijalne raspodele pritiska i protoka za mlaznicu MH₂₅₀ je prikazan na slici 8.4. Merenje je rađeno tako što se za zadati aksijalni pritisak meri radijalni pritisak i protok. Vrednost aksijalnog pritiska je: $p=0,1; 0,2; 0,3$ sve do $3,2$ bara i kao što se vidi sa korakom $0,1$ bar. Primera radi, mlaznica se postavi u početni položaj $r=0 \mu\text{m}$. Mlaznica MH₂₅₀ se aksijalno odmiče sve dok se ne dođe do pritiska $p=0,1$ bar. Zatim se mlaznica radijalno pomeri za $r_1=1000$ i izmeri se radijalni pritisak p_1 . Mlaznica se ponovo vrati u početni položaj, $r=0 \mu\text{m}$ i aksijalnim odmicanjem traži se naredni zadati aksijalni pritisak $p=0,2$ bar. Dobijena kriva se može aproksimirati pravom linijom

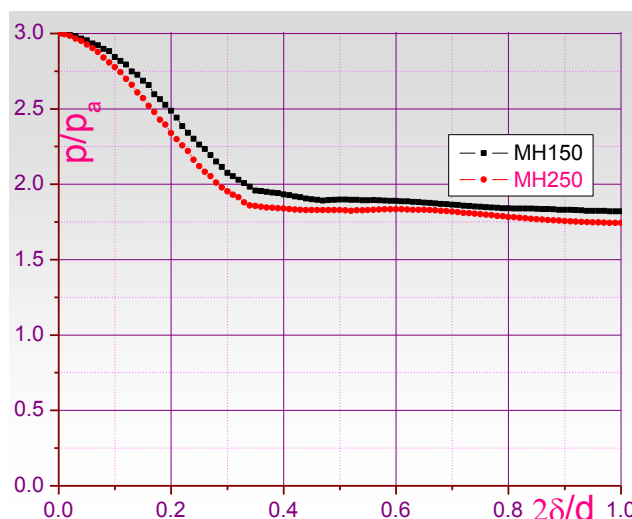
$p_1 = -0,8761 + 0,829p$. Zavisnost radijalnog pritiska i protoka $\dot{V}$ od aksijalnog pritiska $p = p(\delta)$ je direktno proporcionalna. Za svako merenje radijalnog pritiska meren je i protok $\dot{V}$. Kriva protoka, makroskopski gledano je prava linija. Najveći protok je za najveći aksijalni pritisak $p = 3,4$ bar i $\dot{V} = 113$ l/min.



Slika 8.4. Dijagram radijalne raspodele pritiska i protoka $\dot{V}$ u zavisnosti od pritiska u aksijalnom pravcu $p = p(\delta)$

8.1.1 Aksijalna raspodela pritiska na merenom komadu za mlaznice MH₁₅₀ i MH₂₅₀

Dijagram aksijalne raspodele pritiska $p = p(\delta)$ dat je na slici 8.5. Kao što se vidi sa dijagrama, pritisak napajanja je 3 bar. Aksijalno pomeranje mlaznica u toku merenja je $\Delta\delta = 0,010$ mm. Raspodele pritiska u aksijalnom pravcu za ove dve mlaznice imaju isti trend. Razlika je samo što su vrednosti pritiska za mlaznicu MH₂₅₀ manji u odnosu na pritisak ostvaren sa drugom mlaznicom. Bez obzira na korišćenu mlaznicu, ne postoji zaustavna zona već sa povećavanjem rastojanja između mlaznice i mernog komada odmah dolazi do pada pritiska. Za obe mlaznice, za mala aksijalna pomeranja $0 \leq \delta \leq 40$ μm , pritisci imaju blag pad. Povećanjem aksijalnog rastojanja u oblasti $40 \leq \delta \leq 340$ μm pritisak se naglo smanjuje. Daljim aksijalnim pomeranjem za obe mlaznice pad pritiska je blag.



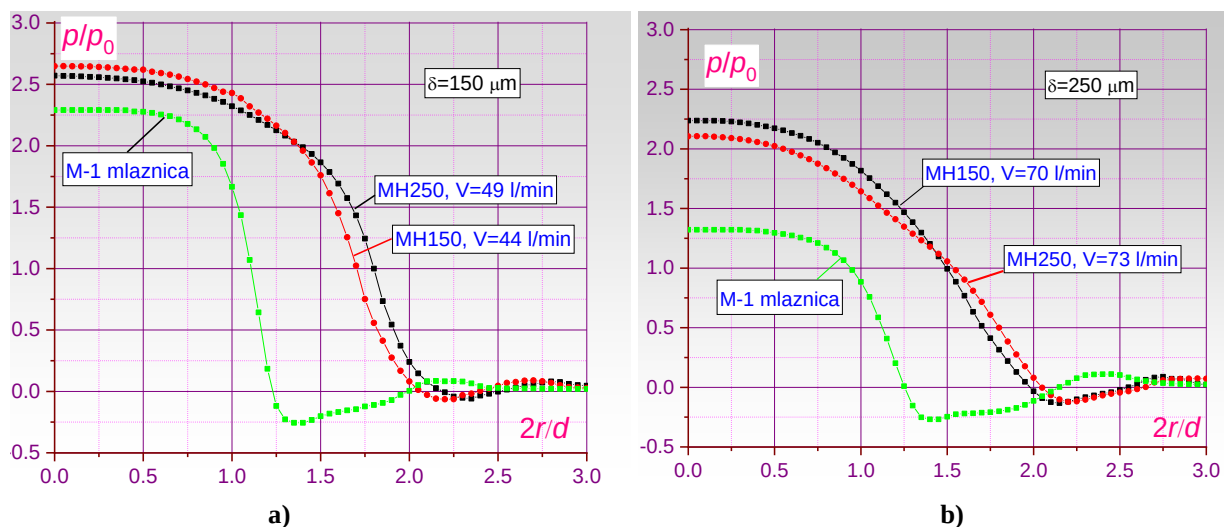
Slika 8.5. Dijagram aksijalne raspodele pritiska $p = p(\delta)$ za mlaznice MH₁₅₀ i MH₂₅₀ pri pritisku napajanja $p_0 = 3$ bar

Što se tiče pneumatske osetljivosti sa slike 8.5 se vidi da kriva za mlaznicu MH₂₅₀ ima malo veći nagib, a samim tim i veću pneumatsku osetljivost. Pneumatska osetljivost krive za mlaznicu

MH₂₅₀ je $S=0,004219$ bar/ μm . Pneumatska osetljivost krive za mlaznicu MH₁₅₀ je $s=0,0039907$ bar/ μm . Razlika je izuzetno mala $\Delta S=0,000309$ bar/ μm .

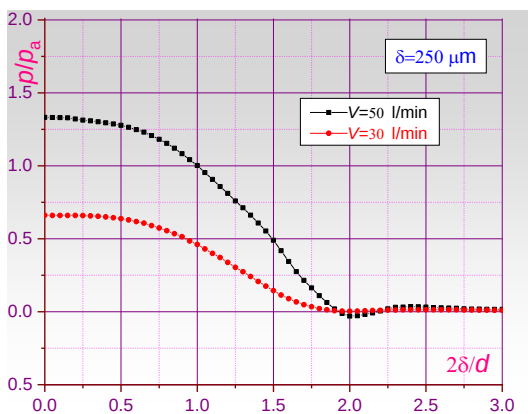
8.1.2 Radijalna raspodela pritiska na merenom komadu za mlaznice MH₁₅₀ i MH₂₅₀

Na slici 8.6 je prikazana raspodela pritiska na površi merenog komada u radijalnom pravcu za standardnu i mlaznice MH₁₅₀ i MH₂₅₀. Odmah se uočava da je za mlaznicu MH₂₅₀, pri istom pritisku napajanja i istoj aksijalnoj koordinati, nešto veći protok vazduha, što je posledica njene geometrije. Pritisak vazduha u jezgri mlaza je veći za dve modifikovane mlaznice, u poređenju sa standardnom mlaznicom. Takođe, gradijent pritiska u smicajnom sloju mlaza je manji u odnosu na standardnu mlaznicu. Ovaj gradijent pritiska je još manji za veće aksijalno rastojanje između čelone površi mlaznice i površi merenog komada. Ovo doprinosi promeni pneumatske osetljivosti uređaja, što se mora razmatrati za svaku od mlaznica pojedinačno, u vezi sa relativnim odnosom promene priraštaja pritiska i priraštaja aksijalne koordinate na linearnom delu raspodele pritiska.



Slika 8.6. Radijalna raspodela pritiska $p=p(r)$ za mlaznice MH₁₅₀ i MH₂₅₀ za $p_0=3$ bar za a) $\delta=150 \mu\text{m}$ i b) $\delta=250 \mu\text{m}$

Međutim, možda najvažnije jeste činjenica da je polje potpritiska za obe modifikovane mlaznice pomereno sa spoljašnje strane zida mlaznice i da je vrednost tog potpritiska značajno manja u odnosu na potpritisak koji se formira u zoni ispod zida standardne mlaznice M-1. Na ovaj način se, primenom modifikovanih mlaznica, produžava period između čišćenja glave pneumatskog komparatora, jer se zbog ovakve raspodele pritiska na ovom mestu nagomilava manje nečistoća, u poređenju sa standardnom mlaznicom. Karakteristično je da je za veće aksijalno rastojanje između



Slika 8.7. Dijagram radijalne raspodele pritiska $p=p(r)$ za fiksne protoke na aksijalnom rastojanju $\delta=250 \mu\text{m}$

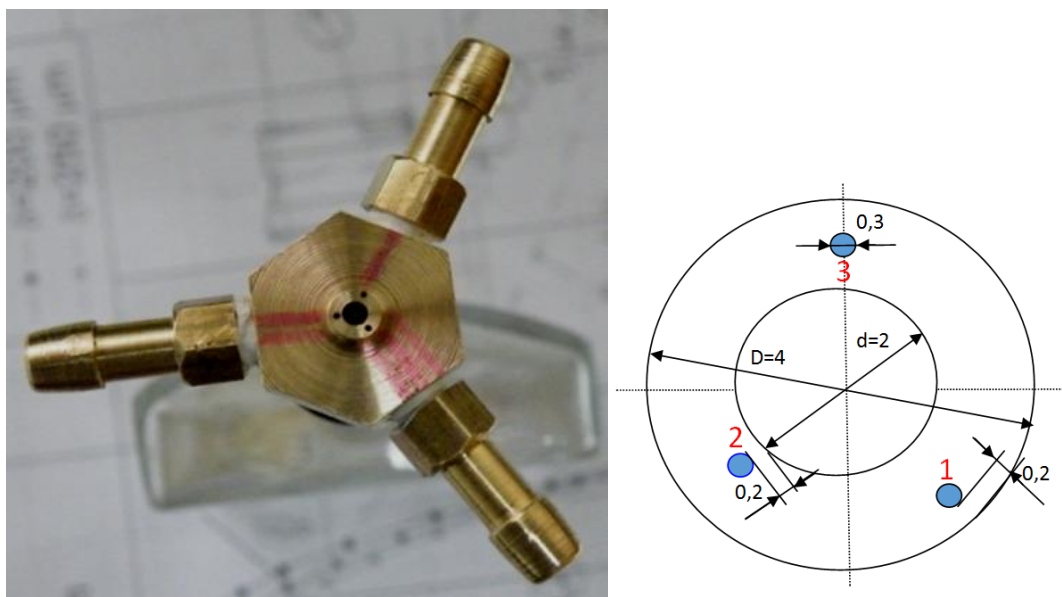
merenog komada i čelone površi mlaznice veći potpritisak pored mlaznice. Čak, sa mlaznicom MH₁₅₀ se ulazi u oblast negativnog pritiska za manju vrednost radijalne koordinate, bez obzira na vrednost aksijalne koordinate δ . Ovo ukazuje da se mora posebno voditi računa o aksijalnom rastojanju na koje će se mlaznice MH₁₅₀ i MH₂₅₀ postaviti u odnosu na mereni komad pri upotrebi u pneumatskom komparatoru.

Za zadate protoke $\dot{V}=30$ i 50 l/min i aksijalno rastojanje $\delta=250 \mu\text{m}$ određena je radijalna raspodela pritiska za mlaznicu MH₂₅₀, koja je prikazana na slici 8.7. Očekivano, s obzirom da je za veći protok za sve ostale iste uslove potrebno obezbediti veći pritisak

napajanja, za protok od 50 l/min je veći pritisak u pritisak koji se ostvaruje za manji protok. Međutim, u zoni blizu spoljašnje ivice zida mlaznice za veći protok postoji zona potpritisaka, koja izostaje za manji protok, što je poželjno. Međutim, posledica manjeg protoka, s obzirom na manji pritisak napajanja, jeste i manja pneumatska osetljivost pneumatskog komparatora.

8.2 MERENJE PRITISKA NA FRONTALNOJ POVRŠI STANDARDNE MLAZNICE

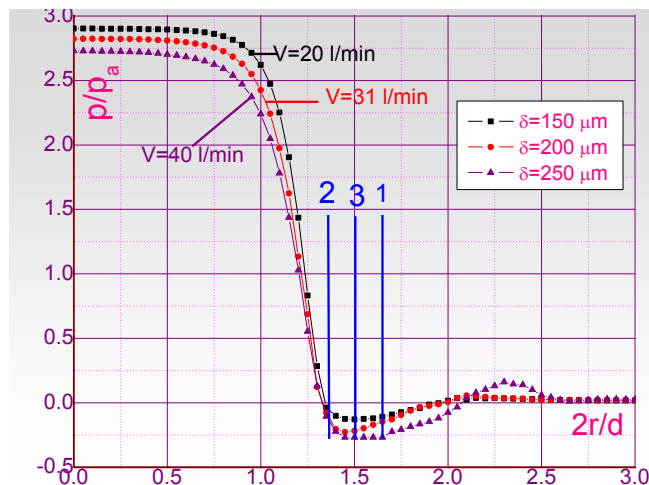
Do sada je razmatrana raspodela pritiska na površi merenog komada, i utvrđene su određene zavisnosti od kojih zavisi pravilna upotreba pneumatskog komparatora u svrhe provere dimenzija mašinskih delova. U okviru ovog odeljka će se razmatrati i pritisak ispod čelone površi standardne mlaznice. Za potrebe ovih merenja, osnovna geometrija standardne mlaznice je donekle izmenjena. Napravljena je mlaznica geometrijskog oblika standardne mlaznice M-1 sa tri merna mesta na frontalnoj površi mlaznice, slika 8.8. Prečnik otvora mernog mesta je 0,3 mm. Merno mesto broj 1 se nalazi uz spoljašnju ivicu mlaznice, broj 2 uz unutrašnju ivicu i broj 3 je na sredini frontalne površine mlaznice. Dakle, ove otvore su postavljene na tri koncentrične kružnice različitih prečnika ($r_{M1}=1,65$ mm, $r_{M2}=1,35$ mm i $r_{M3}=1,5$ mm) što nam omogućava bliži uvid u raspodelu pritiska po širini zida mlaznice čija je debljina samo 1 mm. Pogled na standardnu mlaznicu prilagođene geometrije za sprovođenje eksperimenta sa njene čelone strane je dat na slici 8.8.



Slika 8.8. Izgled frontalne površi standardne mlaznice i skica položaja mernih mesta na frontalnoj površi.

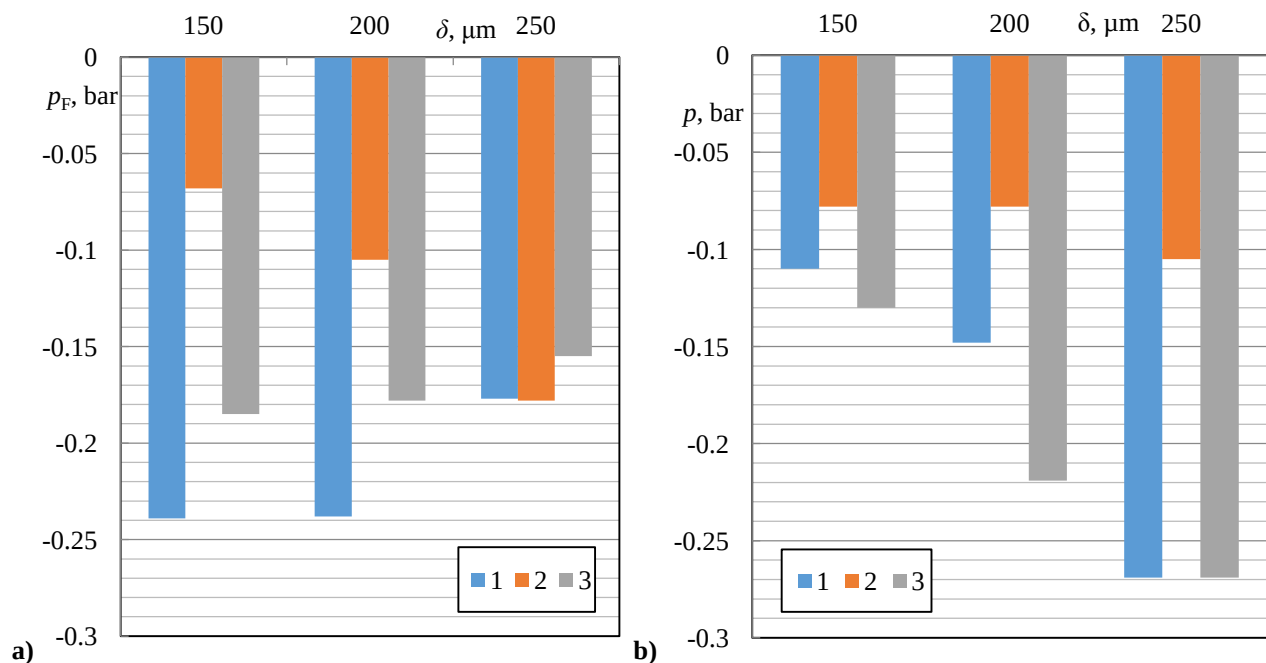
Na ovom mestu ponavljamo dijagram prikazan na slici 4.4.c, na kojem je data radijalna raspodela pritiska na merenom komadu za tri aksijalne koordinate δ pri pritisku napajanja $p_0=3$ bar. Ovaj dijagram je sada prikazan na slici 8.9, na kojoj su date i vrednosti protoka vazduha na mlaznici za ova tri aksijalna rastojanja između merenog komada i frontalne površi izlazne mlaznice.

U kritičnoj zoni u mikrokanalu, gde su strujanja vazduha vrtložna i gde postoji potpritisak, shodno raspodeli pritiska prikazanoj na slici 8.9, merene su vrednosti pritiska na mernim mestima 1, 2 i 3 na frontalnoj površi mlaznice p_F . Uporedni prikaz izmerenih vrednosti pritiska je prikazan na slici 8.10.



Slika 8.9. Radijalna raspodela pritiska $p=p(r)$ na površi mernog komada za $\delta=150\ \mu\text{m}$; $200\ \mu\text{m}$ i $250\ \mu\text{m}$ pri pritisku napajanja $p_0=3\ \text{bar}$

Za ove uslove merenja, pritisak na frontalnoj površini izlazne mlaznice, kao i pritisak na površi mernog komada, je negativan na svim mernim mestima. Ovo govori da se u celoj zoni između zida mlaznice i mernog komada javlja vrtložna zona za zadate uslove.



Slika 8.10. Vrednosti pritiska u mernim mestima 1, 2 i 3 za različita aksijalna rastojanja između mernog komada i frontalne površi mlaznice na **a)** frontalnoj površi mlaznice i na **b)** površi mernog komada.

Na ravnoj površi mašinskog dela se nagomilava tanak sloj nečistoća ako je merenje dugotrajno. Ovaj potpritisak malo utiče na tačnu kontrolu, jer se komad koji se kontroliše ukloni a samim tim i nečistoća na njemu. Sa druge strane, pritisak koji je meren na frontalnoj površi mlaznice ima veći uticaj na tačnost kontrole mašinskih delova. Eksperiment je pokazao da su to dosta veliki potpritisaci na određenim mestima (v. sliku 8.10a), koji imaju za posledicu deponovanje nečistoća na frontalnoj površi mlaznice. Dugotrajnim radom nečistoće se nagomilavaju i smanjuje se zazor između mlaznice i ravne merne površi mašinskog dela koji se kontroliše. Zbog toga se mora često čistiti zaprljana frontalna površ mlaznice.

9 ZAKLJUČAK

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je primena pneumatske metrologije za kontrolu tačnosti izrade mašinskih delova. Ova metoda kontrole postaje praktično nezamenljiva u velikoserijskoj proizvodnji, zbog svoje jednostavnosti u primeni, stabilnosti u radu, i lakog održavanja sastavnih elemenata mernog sistema. Naime, reč je o beskontaktnoj metodi u kojoj se na osnovu razlike pritisaka konstatuje promena na geometriji kontrolisanog mašinskog dela. U odnosu na kontaktne metode kontrole, ovde nema habanja elemenata komparatora, a zbog načina rada u kojem mlaz vazduha pod pritiskom udara u površ kontrolisanog dela, dolazi do oduvavanja sa ove površi nečistoća bilo koje vrste, koje su zaostale od procesa obrade dela ili njegovog transporta do mesta kontrole. Na ovaj način se povećava i tačnost ove kontrole u odnosu na kontaktne metode. Dakle, merenje je veoma tačno, rezultati su ponovljivi, a sam proces kontrole jednog mašinskog dela traje vrlo kratko (3-4 sec).

Potvrđena su i proširena trenutna znanja o raspodelama pritiska na površi mašinskog dela u radijalnom i aksijalnom pravcu. Radijalna raspodela pritiska je određivana za četiri vrednosti aksijalnog rastojanja između merenog komada i izlaznog preseka izlazne mlaznice komparatora i za četiri vrednosti pritiska napajanja, a za jednu vrednost prečnika prigušnice $D=1$ mm. Za svaku od kombinacija ovih uticajnih parametara uočene su karakteristične zone u raspodeli pritiska u radijalnom pravcu - zona zaustavnog pritiska, zona naglog pada pritiska do vrednosti u zoni zida tj. površi mašinskog dela, i zona potpritiska na površi mašinskog dela za radijalne koordinate koje odgovaraju položaju zida mlaznice pneumatskog komparatora. Sa spoljašnje strane zida izlazne mlaznice dolazi do oporavka vrednosti pritiska pri čemu pritisak postaje pozitivan. Za neke vrednosti pritiska napajanja i aksijalnog rastojanja javlja se i lokalna maksimalna vrednost ovog pritiska u zoni zida. Sa većim pritiskom napajanja i manjom aksijalnom koordinatom ostvaruje se veća vrednost pritiska u zaustavnoj zoni, pa samim tim i veći gradijent pritiska do vrednosti koje se ostvaruju u zoni zida. Sa manjim odstupanjima, prelazak u potpritisak se odvija za istu vrednost radijalne koordinate.

Aksijalna raspodela pritiska na površi mašinskog dela je određivana za četiri vrednosti pritiska napajanja i različite vrednosti prečnika prigušnice u mernoj komori pneumatskog komparatora. Opet, za svaku od kombinacija uticajnih parametara je dobijena karakteristična raspodela pritiska na površi mašinskog dela u aksijalnom pravcu. U nultom položaju mlaznice, kada je njen izlazni presek postavljen na površ merenog komada, pritisak ima maksimalnu vrednost. Ona se zadržava još za malu vrednost pomeranja mlaznice u aksijalnom pravcu, da bi potom naglo počela da opada do vrednosti u zoni zida koja asimptotski teži nekoj konstantnoj vrednosti sa pozitivne strane ordinate. Što je prigušenje u mernoj komori veće, tj. prečnik prigušnice je manji, to je gradijent pritiska od maksimalne vrednosti do vrednosti u zoni zida veći. Takođe, na povećanje ovog gradijenta utiče i vrednost pritiska napajanja sa kojom je u praktično linearnoj vezi. Upravo ovaj gradijent pritiska u aksijalnom pravcu je od značaja za rad diferencijalnog pneumatskog komparatora. Linearni deo ovog pada pritiska predstavlja pneumatsku osetljivost komparatora koja određuje njegovu preciznost. U ovoj disertaciji je fitovanjem sopstvenih eksperimentalnih podataka

izvršeno određivanje jednačine raspodele pritiska u aksijalnom pravcu, koja predstavlja krivu petog stepena, sa posebnim akcentom na linearni deo ove raspodele i određivanje vrednosti pneumatske osetljivosti komparatora sa kojim je izvođen eksperiment. Sa druge strane, projekcija linearnog dela raspodele pritiska u aksijalnom pravcu na apscisu daje opseg primene komparatora izražen kroz priraštaj aksijalne koordinate. Pneumatska osetljivost komparatora i njegov opseg primene su od izuzetnog značaja za pravilan rad ovog uređaja, budući da od ove dve veličine zavisi dimenzija mašinskog dela koja se može kontrolisati i širina odgovarajućeg tolerancijskog polja. Najveća pneumatska osetljivost komparatora se ostvaruje za najveći pritisak napajanja i najveće prigušenje u mernoj grani diferencijalnog pneumatskog komparatora.

Potvrđeno je prisustvo skoka pritiska na aksijalnoj raspodeli pritiska na površi mašinskog dela, do koga dolazi pri nepromenjenom rastojanju između mlaznice komparatora i površi merenog komada zbog formiranja udarnog talasa u mikrokanalu između zida mlaznice i površi merenog komada. Za veće vrednosti pritiska napajanja, veća je i aksijalna koordinata na kojoj dolazi do ove pojave. Izračunavanjem vrednosti Mahovog broja pre i posle udarnog talasa, na osnovu sopstvenih eksperimentalnih rezultata, pokazano je da je strujanje u mikrokanalu između čeonih površi izlazne mlaznice komparatora i površi merenog komada transonično. Određeni su intenziteti udarnih talasa, čime je pokazano da je reč o slabim udarnim talasima, čija se jačina povećava sa povećanjem pritiska napajanja. Iako su udarni talasi slabi, pokazano je da su dovoljno jaki da unesu nestabilnost u rad pneumatskog komparatora u opsegu aksijalne koordinate u kojoj je prisutan skok pritiska. Upravo iz tih razloga, u pneumatskoj metrologiji treba izbegavati oblast nastanka skoka pritiska.

Razmatran je uticaj nagiba izlazne mlaznice pneumatskog komparatora na raspodelu pritiska na površi kontrolisanog dela u aksijalnom i radijalnom pravcu. Uvidom u dostupnu literaturu, ovaj uticaj do sada nije bio tema analiza. Za potrebe ovog istraživanja, ugao mlaznice u odnosu na sopstvenu podužnu osu tj. u odnosu na normalu na površ merenog komada je variran od 1° do 7° , sa jediničnim korakom. Pokazano je da sa povećanjem nagiba mlaznice dolazi do asimetrije u raspodeli pritiska u radijalnom pravcu, sa istovremenim padom vrednosti pritiska u zaustavnoj zoni. Za manje pritiske napajanja, na strani manjeg rastojanja između mlaznice i površi merenog komada dolazi do postepenog nestajanja potpritiska u zoni zida, što je poželjno u pogledu eliminisanja akumulacije nečistoća u ovoj zoni. Za veće vrednosti pritiska napajanja, tek za veće uglove (za najveći pritisak napajanja, samo za najveći ugao) nagiba mlaznice oblast potpritiska ispod zida mlaznice nestaje. Sa strane većeg rastojanja mlaznice i površi merenog komada, situacija je drugačija. Zona potpritiska se održava, pri čemu za najmanji razmatrani pritisak napajanja od 1 bar, postoji tendencija njenog eliminisanja, ali do ovoga bi došlo za još veće nagibe mlaznice koji nisu razmatrani u okviru ove disertacije. Naginjanje mlaznice ima značajan uticaj i na aksijalnu raspodelu pritiska. Naime, sa povećanjem ugla nagiba mlaznice smanjuje se vrednost pritiska u početnom položaju mlaznice, jer se veštački povećava njeno rastojanje od površi merenog dela. Samim tim, obzirom da raspodela pritiska zadržava svoj nagib u odnosu na slučaj kada je mlaznica postavljena upravno u odnosu na površ mašinskog dela, dolazi do smanjenja linearnog dela krive. Detaljnom analizom za određene pritiske napajanja, prečnike prigušnice u mernoj grani komparatora i uglove nagiba mlaznice, zaključeno je da ne postoji jasan trend uticaja nagiba mlaznice na pneumatsku osetljivost. Prema tome, potrebno je za svaki pojedinačni slučaj izvršiti analizu da li je poželjno izvršiti naginjanje mlaznice i za koji ugao. Sa naginjanjem mlaznice diferencijalnog komparatora smanjuje se i opseg njegove primene. Ovo znači da sa naginjanjem mlaznice komparatora, isti možemo koristiti za kontrolisanje užih tolerancijskih polja nego uobičajeno za dati pritisak napajanja. Sa povećanjem ugla nagiba mlaznice, smanjuje se širina

tolerancijskog polja koje se može kontrolisati. U svetlu ovih razmatranja, zaključeno je da je naginjanje izlazne mlaznice komparatora za velike pritiske napajanja nepovoljno, budući da se za ove vrednosti pritiska napajanja inače kontrolišu uska tolerancijska polja. Potrebna je posebna pažnja u vezi sa namernim naginjanjem mlaznice u sprezi sa prečnikom prigušnice u mernoj grani. Pokazano je da za veća prigušenja u mernoj grani pri manjim pritiscima napajanja, naginjanje mlaznice dovodi do neupotrebljivosti komparatora, jer nestaje linearni deo u raspodeli pritiska u aksijalnom pravcu.

Prema dostupnoj literaturi, uticaj vihornog strujanja u mlazu na izlazu iz mlaznice komparatora još nije razmatran. Analiza u vezi sa ovim uticajem na rad komparatora je sprovedena u okviru ovog istraživanja. Ovo je sprovedeno formiranjem vihornog strujanja postavljanjem zavojnih traka u standardnu mlaznicu i pomoću posebno konstruisane mlaznice sa tangencijalnim ulazom vazduha. Zaključeno je da sa povećanjem jačine vihora u mlazu na izlazu iz izlazne mlaznice dolazi do povećanja nagiba raspodele pritiska na površi merenog komada u aksijalnom pravcu. Ovo povećanje je još izražnije za veće pritiske napajanja i veće prigušenje u mernoj komori diferencijalnog pneumatskog komparatora. Kao i u slučaju naginjanja izlazne mlaznice, i u slučaju vihornog strujanja u mlazu komparatora, potrebno je analizirati za svaki pojedinačni slučaj da li je uvođenje vihora u mlaz poželjno ili ne. Pokazano je da za prečnik prigušnice $D=1,2$ mm, dolazi do blagog pada pneumatske osetljivosti sa vihornim strujanjem u mlazu. Međutim, opseg primene komparatora za iste uslove je značajno proširen. Prema tome, u konkretnom slučaju se treba odlučiti šta je od ova dva važna parametra rada diferencijalnog komparatora važnije. Za veće prigušenje, pneumatska osetljivost raste, ali opada opseg primene. Ovo znači da je porastu pneumatske osetljivosti više doprineo pad priraštaja aksijalnog rastojanja, nego pad pritiska koji je uzrokovan prisustvom vihora u mlazu.

U ovoj doktorskoj disertaciji se objavljuju rezultati i u vezi sa uticajem radijusa krivine konveksne površi merenog komada na rad pneumatskog komparatora. Pokazano je da sa smanjenjem radijusa krivine površi merenog komada, smatrajući da ravna površ u teorijskom smislu ima beskonačno veliki radijus krivine, dolazi do opadanja vrednosti pritiska u svakom od delova aksijalne raspodele pritiska na površi merenog komada. Krive aksijalne raspodele pritiska za različite radijuse krivine površi pri istom pritisku napajanja su međusobno ekvidistantne, ali se sa smanjenjem radijusa krivine smanjuje dužina linearnog dela krive. Samim tim, menja se i pneumatska osetljivost, čija promena zavisi od relativnog odnosa promene priraštaja pritiska i priraštaja aksijalnog rastojanja. Nije ustanovljeno jasno pravilo o ponašanju pneumatske osetljivosti sa promenom radijusa krivine površi merenog komada.

Sprovedeno je određivanje radijalne raspodele pritiska na zakrivljenoj površi mašinskog dela kada se ova zarotira za određeni ugao. Izvedeni su određeni zaključci, međutim, potrebna su dodatna merenja na površima manjih radijusa krivina od onih koje su razmatrane. Zbog prirode merenja i geometrije na kojoj se merenja izvode, potrebno je razmotriti mogućnost smanjenja dimenzije mernog mesta, kao i unutrašnjeg prečnika mlaznice.

U okviru rada na ovoj doktorskoj disertaciji, konstruisane su nove mlaznice za zakrivljenim unutrašnjim zidom i sa njima je određena raspodela pritiska u radijalnom pravcu na ravnoj površi merenog komada. Utvrđeno je da je ovom modifikacijom unutrašnje geometrije standardne mlaznice, postignuto pomeranje krive radijalne raspodele pritiska u oblasti većih radijalnih koordinata. Pri tome je oblast potpritiska pomeren sa spoljašnje strane zida mlaznice a vrednosti potpritiska su značajno manje u poređenju sa standardnom mlaznicom u istim uslovima rada. Ovo

je poželjno sa stanovišta održavanja pneumatskog komparatora, budući da se produžava period između čišćenja glave uređaja od deponovanih nečistoća.

Izmerene su vrednosti pritiska na čeonj površi standardne mlaznice u tri merna mesta koja su raspoređena na tri koncentrične kružnice različitih prečnika. Pokazano je da u svim mernim mestima i za sva razmatrana aksijalna rastojanja, na čeonj površi mlaznice postoji potpritisak, koji se razlikuje po vrednosti u zavisnosti od mernog mesta i aksijalnog rastojanja između mlaznice i merenog komada. Ovo su takođe početna merenja koja je potrebno proširiti, ali može već da se ukaže na to da je potencijal za deponovanje nečistoća pri merenju veći na strani čeone površi mlaznice, nego na površi merenog komada. Na taj način je pokazano da deponovane nečistoće na čeonj površi mlaznice ima veći uticaj na tačnost rada diferencijalnog pneumatskog komparatora, nego deponovanje nečistoća na površi merenog komada.

Buduća istraživanja su usmerena na ispitivanje mogućnosti za primenu diferencijalnih pneumatskih komparatora za detektovanje površinskih naprslina na mašinskim delovima i određivanje površinske poroznosti ovih delova. Takođe, razmatraće se uticaj hrapavosti na tačnost rada komparatora, kao i mogućnost za određivanje hrapavosti tj. kvaliteta obrade primenom ovog uređaja. Sa druge strane, razmatraće se uticaj radijusa krivine konkavne površi na rad diferencijalnog pneumatskog komparatora, pri kontroli unutrašnjih mera mašinskih delova. Za sve ove poduhvate je potrebno izvesti određene zahvate na eksperimentalnoj instalaciji, ali i stremiti ka primeni mlaznica što manjeg unutrašnjeg prečnika. Ovo je i u skladu sa potrebom za očuvanjem energije i životne sredine, budući da manji prečnik mlaznice iziskuje manji pritisak napajanja i manje protoke za rad diferencijalnog pneumatskog komparatora. Započeta istraživanja po pitanju uticaja radijusa krivine konveksne površi i uticaja prisustva vihora u mlazu na rad diferencijalnog pneumatskog komparatora treba nastaviti. Poseban akcenat u istraživanju vihornog strujanja u mlazu diferencijalnog komparatora će biti na analizi strujanja u mikrokanalu između mlaznice i površi merenog komada, u pogledu postojanja ili odsustva udarnih talasa, posledično eliminisanja nestabilnosti u radu pneumatskog komparatora.

LITERATURA

Bettahar A.: "Application des écoulements radiaux a la metrologie pneumatique dimensionnelle", Projet de these sous la direction du Professeur P. Florent profesor des Univerzites de Valenciennes. France, juin 1993.

Bokov V. B. (2011): Pneumatic gauge steady-state modelling by theoretical and empirical methods, Measurement 44(2): 303-311, DOI: [10.1016/j.measurement.2009.01.015](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.01.015)

Bokov V.: "Nozzle-Flapper Sensor Mechanistic and Statistical Concurrent Modeling". Measurement 37, pp. 47-61, (2005).

Breitinger R.: "Fehlerquellen beim pneumatischen Längenmessen". Dissertation, TU Stuttgart, (1969).

Burrows V. R.: "The Principles and Applications of Pneumatic Gauging", Societuof manufacturing Engineers, pp. 88 – 94. South Africa, May (2013).

Crnojevic C, Florent P, Decool F: Le champ de pression sur une plaque plane provoqué par un jet d'air, Strazburg, (1995).

Crnojevic C., Florent P. et Decool F.: "Le temps de réponse d'un, comparateur". Dimensionnel pneumatique, (juin 1996).

Crnojevic C., Florent P. et Decool F.: "Mesure des pulsations de pression dans un élargissement brusqué d'un comparateur pneumatique". II Symposium International - Contemporary problems of fluid mechanics, pp.113-116, Belgrade, (1996).

Crnojevic C., P. Florent and F. Decool.: "Influence de la vitesse de rotation de la piece à contrôler sur la mesure en contrôle pneumatique". Proceedings 15th Canadian Congress of Applied Mechanics, Vol. 2, pp. 776-777, (1995).

Crnojevic C., Roy G., Bettahar A. and Florent P.: "Influence of regulator diameter and injection nozzle geometry on flow structure in pneumatic dimensional control systems". Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, pp. 609-615, (1997).

Đorđević V. D. i Crnojević C: "O jednoj mogućnosti primene izotermnog stišljivog strujanja gasa u mikro-kanalima u pneumatskoj metrologiji". SANU Odeljenje tehničkih nauka, Beograd, (1998).

Florent P., Crnojević C: "Le champs de pression et de vitesse dans le contrôleur pneumatique". (1993).

Florent P., Crnojević C: "Modélisation de l'écoulement compressible dans un comparateur pneumatique en vue de l'étude de son temps de réponse". (1993).

Glukhov V. I.: "Calculation of the High Pressure Air Gauges Characteristics". Journal Measuring Techniques, vol. 6, pp. 107, (1971).

Henderson B.: "The connection between sound production and jet structure of the supersonic impinging jet". J. Acoust. Soc. Am., Vol 111 (2), pp. 735-747, (2002).

Jakubowicz M: "Możliwości wykorzystania metopneumatycznych w pomiarach długości", Zakład metrologii i systemów pomiarowych, vol 60 pp.587 – 589, Poznan, Poland, (2014).

Jankiewicz, Proceedings SPIE, Vol. 3054, Washington, pp. 36-39, (1997).

Jermak C. J, Jakubowicz M. (2012): Ocena właściwości statycznych pneumatycznych przetworników długości (PPD) z dyszami szczelinowymi, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, POLITECHNIKA POZNAŃSKA, PAK 58(11): 994-996

Jermak Cz. J, Rucki M. (2016): Pomiary pneumatyczne powierzchni walcowych: zarys problematyki, Mechanik, 89(2): 105-108, DOI: 10.17814/mechanik.2016.2.11

Jermak Cz, J. Miroslav Rucky: „Air Gauging: Still Some Room for Development”, AASCIT (American Association Science and Technology), Volume 2, Issue 2 March 20, 2015)

Jermak Cz. J., Rucki M. "Calculation of the Outlet Surface for Measurement by the Air Gauge". Proceedings of the 4th International Conference, Measurement 2003, Slovak Academy of Sciences, Smolenice, pp. 495-498, (2003).

Jermak Cz. J., Rucki M.: " Advantageous Metrological Properties of Asymmetrical Air Gauges for the Length Measurement Integrated with Pneutronic Devices". Proceedings of 30th Israeli Conference on Mechanical Engineering, Tel-Aviv, pp. 250-251, (2005).

Jermak Cz. J., Rucki M.: "The Advantageous Statical Metrological Properties of the Pneumatic Sensor with Two Skewed Nozzles". Measurement Science Review, Volume 1, Number 1, (2001).

Lamont P., Hunt B.: "The impingement of underexpanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates". J. Fluid Mech., vol. 100, part 3, pp. 471-511, (1980),

Markow B.N.: "Pneumatic Dimensional System with the Measuring Nozzle". (in German), Feinerätetechnik 20. Jg. Helt 4, pp.160-161, (1971).

McGhee J., Henderson I.A., Sydenham P.H.: “Sensor Science – Essentials for Instrumentation and Measurement Technology“. Measurement 25, pp. 89-113, (1999).

Menzies, P. Koshy: "In- process detection of surface porosity in machined casting". International Journal of machined Tools and Manufacture 49, pp. 530-535, (2009).

Moela C. L, de Luca L. and Carlomagno G.M: "Azimuthal instability in an iminging jet: adiabatic njall temperature distribution". Journal Experiments in Fluids 18, pp. 303-310, (1995).

Roy G., Crnojevic C., Bettahar A., Florent. P. and Vo-Ngoc D.: "Influence of nozzle geometry in pneumatic metrology applications." International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion, Proc. Vol. 1, pp.363-368, Bali, Indonesia, (1994).

Roy G., Crnojevic C., Florent P. and Vo-Ngoc, D.: "Application of radial flow to dimensional pneumatic metrology" (1996).

Roy G., Dinh Vo-Ngoc, Bravine V.: "A Numerical Analysis of Turbulent Compressible Radial Channel Flow with Particular Reference to Pneumatic Controllers". J. of Thermal Science, Vol.13, No.1, pp. 24-29, (2004).

Roy G., Vo-Ngoc D., Nguyen D., Florent P.: "Behovior of Radial incompressible flow in pneumatic dimensinal control systems". Transacions of ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 125, pp. 843-850, (2003).

Roy G.: "Cotribution à l'étude de l'écoulement radial". Applications en métrologie industrielle. Ph D thesis, Université Laval, Québec, Canada. (1997),

- Rucki M, Barisic B, Szalay T: "Analysis of air gage inaccuracy caused by flow instability". Polish Academy of Science. (2007).
- Rucki M., Barisic B, "Response time of air gauges with different volumes of the measuring chambers". Polish Academy of Science. (2009).
- Rucki M., Barisic B., Gyula G.: "Air gauges as a part of the dimensional inspection systems". Measurement 43, pp. 83-91, (2010).
- Sağlam H., "Pneumatic Non-contact Data Acquisition System For straightness Measurement of Cylindrical Parts", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May (2011).
- Shiraishi M., Yasui A.: "In-process Measurement of Dimensional Error for stepped workpiece profile". Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, (1998).
- Skoko D. M, Crnojević C. Đ, Lečić M. R, Ristivojević M. R, Mitrović R. M, Burazer J. M. (2021): Some characteristics of compressible air impingement jet applied in pneumatic dimensional control, Experimental Techniques, doi: 10.1007/s40799-021-00460-6, First online, <https://link.springer.com/article/10.1007/s40799-021-00460-6>,
- Skoko D., Crnojević C, Ristivojević M: " Izbor merne glave diferencijalnog pneumatskog komparatora za kontrolu unutrašnjih mera mašinskih delova", SERBIATRIB'13 13th International Conference on tribology, p 433-439, Kragujevac, Serbia, 15 – 17 Maj 2013.
- Skoko D., Crnojević C, Ristivojević M: "Effects of outlet nozzle slope angle on accuracy of machine parts geometrical control", 8th International Scientific Conference IRMES 2017, p 169-174, Trebinje , Bosnia and Hercegovina, September 7-9. 2017.
- Skoko D., Crnojević C, Ristivojević M: "Influence of supply pressure and geometry of measuring branches nozzle on work of differential pneumatic controller", 4th International Conference on manufacturing Engineering – icmen, pp.423 – 430, 3–5 october 2011, Thessaloniki, Greece.
- Skoko D.: "Istraživanje uticaja parametara strujanja fluida na tačnost kontrole mašinskih delova". Magistarski rad, Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade, (2008).
- Tomasik J.: "Control of the Devices for Length and Angle Measurement". Publisher Warsaw Technical University, Warszawa, (in Polish), (2003).
- Yu S. C. M., Poh H. J., Tso C. P. : Numerical Simulation on the Flow Structure Around the Injection Nozzles for pneumatic Dimensional Control Systems, Journal of Fluids Engineering, Vol.122, pp. 735 – 742, (2000).

BIOGRAFIJA

Dragiša M. Skoko je rođen 11. 05. 1952 godine u Novoj Pazovi, gde je završio osnovnu školu. Godine 1971. završio je gimnaziju u Staroj Pazovi, matematički smer. Mašinski fakultet je završio u Beogradu - smer Motori. Diplomirao je sa najvećom ocenom kod akademika prof. dr Vladana Dorđevića iz oblasti jednodimenzijskog strujanja fluida. Prvo zaposlenje mu je bilo u tehničkoj školi „Mihajlo Pupin,, u Indiji. Predavao je tehničke predmete: Mašinski elementi, Osnovi konstruisanja, Hidraulika i pneumatika, Termodinamika i termotehnika, Mašinski materijali, Otpornost materijala, Mehanika, Osnove elektrotehnike, SUS motori, Teorija sagorevanja i drugi.

Od 1995. do 2000. godine bio je vlasnik SZR „Konstruktor,,. Bavio se projektovanjem, konstruisanjem i izradom mašina iz oblasti procesne tehnike. Izradio je više desetina mašina. Ponosan je na instalaciju za merenje parametara jednodimenzijskog strujanja fluida, koju je uradio za Mašinski fakultet u Beogradu. Svi studenti koji slušaju predmet Mehanika fluida imaju praktične vežbe na istoj.

Zaposlio se na Mašinskom fakultetu u Beogradu 2000. godine na Katedri za opšte mašinske konstrukcije. Iste godine je upisao magistarske studije. Uz pomoć prof. dr Cvetka Crnojevića, uvodi laboratorijsku vežbu iz oblasti pneumatskih merenja u okviru predmeta Mašinski elementi. Ovo je jedinstvena vežba kod nas, a slična postoji na Mašinskom fakultetu u Nansiju (Francuska). Ovo je savremena vežba, tako da je pored studenata osnovnih, slušaju i studenti master studija.

Magistrirao je 20. 02. 2008 godine na Mašinskom fakultetu u Beogradu sa temom „Istraživanje uticaja parametara strujanja fluida na tačnost kontrole mašinskih delova“. Mentor rada je prof. dr Cvetko Crnojević, a komentor prof. dr Mileta Ristivojević.

Do sada je objavio devet naučnih radova iz oblasti: pneumatska metrologija (merenje i kontrola), kotrljajni ležaji i planetarni prenosnici reduktori velike snage, od kojih je jedan na SCI listi. Koautor je jednog tehničkog rešenja.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Драгиша Скоко

Број индекса 23-75/00

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај струјних и геометријских параметара на пнеуматску димензијску контролу
машинских делова

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 27.07.2021.

Д. Скоко

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Драгиша Скоко

Број индекса 23-75/00

Студијски програм докторске академске студије

Наслов рада Утицај струјних и геометријских параметара на
пнеуматску димензијску контролу машинских делова

Ментор проф. др Милан Лечић и проф. др Милета Ристивојевић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 27.07.2021.

Д. Скоко

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај струјних и геометријских параметара на пнеуматску димензијску контролу
машинских делова

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 27.07.2021.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.