

# Analiza radnih parametara različitih puhala automobilskih motora

---

**Mudri, Nikola**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:173260>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA RADNIH PARAMETARA RAZLIČITIH PUHALA  
AUTOMOBILSKIH MOTORA**

Rijeka, srpanj 2024.

Nikola Mudri  
0069088475

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA RADNIH PARAMETARA RAZLIČITIH PUHALA  
AUTOMOBILSKIH MOTORA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Rijeka, 05.03.2024.

Zavod:                   Zavod za termodinamiku i energetiku  
Predmet:                Toplinski strojevi i uređaji

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik:           **Nikola Mudri (0069088475)**  
Studij:                Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak:              **Analiza radnih parametara različitih puhala automobilskih motora /  
Operating parameters analysis of various automotive air chargers**

### Opis zadatka:

Opisati karakteristike, svojstva i načine rada turbopuhala za prednabijanje motora. Objasniti i opisati sastavne dijelove i komponente turbopuhala. Prema pretpostavljenim radnim krivuljama za nekoliko različitih puhala automobilskih motora izračunati idealne i stvarne snage potrebne za pogon puhala, te gubitke u više radnih točaka svakog puhala. Dobivene rezultate potrebno je prikazati, usporediti i komentirati.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku:    20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad pod nazivom "Analiza radnih parametara različitih puhalâ automobilskih motora " izradio potpuno samostalno uz stručnu pomoć mentora izv. prof. dr. sc. Vedrana Mrzljaka u razdoblju od 20. ožujka 2024. godine do 18. lipnja 2024. godine.

U Rijeci, 26.2.2024.

---

Nikola Mudri

## **ZAHVALA**

Ovim putem želim zahvaliti svojim roditeljima što su mi bili podrška kroz moje školovanje te bili uz mene u svakom trenutku, bez njih ovo ne bi bilo ostvarivo.

Posebno se želim zahvaliti svom mentoru izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak na pomoći oko pisanja završnog rada, odvojenom vremenu i dobroj volji.

# Sadržaj

1. UVOD .....	8
2. OSNOVNI DIJELOVI TURBOPUHALA .....	9
2.1. Centrifugalni turbokompresor .....	9
2.1. Turbina .....	10
2.3. Kućište turbokompresora i turbine .....	11
2.4. Intercooler (međuhladnjak) .....	12
2.5. Wastegate ventil.....	13
2.6. Ležajevi .....	15
3. DODATNI DIJELOVI TURBOPUHALA.....	18
3.1. Injektori za ulje.....	18
3.2. Nepovratni ventil.....	19
3.3. Senzori tlaka i temperature.....	20
4. PREDNABIJANJE.....	23
4.1. Matematička analiza procesa prednabijanja turbopuhalom .....	23
4.1.1. Omjeri tlakova:.....	23
4.1.2. Bilanca masenog protoka turbin.....	24
4.1.3. Formula za izračun snage turbine.....	24
4.1.4. Rad puhalo i turbine .....	24
5. RADNO POLJE PUHALA .....	27
6. ANALIZA RADNIH PARAMETARA PUHALA .....	29
7. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA .....	43
8. ZAKLJUČAK .....	49
LITERATURA .....	50
POPIS SLIKA .....	52

POPIS TABLICA .....	53
POPIS OZNAKA .....	54
SAŽETAK .....	55
SUMMARY .....	56



## 1. UVOD

Turbopuhalo bitan je dio u motorima s unutarnjim izgaranjem. Sustav turbopuhala uvelike je promijenio autoindustriju po pitanju rada, učinkovitosti, snage, momenta i potrošnje goriva.

Turbopuhalo ima turbokompresor koji koristi energiju ispušnih plinova iz motora kako bi povećao tlak zraka i gustoću zraka koji ulazi u cilindar motora. Dodatna kompresija zraka omogućava veću količinu zraka i goriva da uđe u cilindar, što rezultira potpunijim izgaranjem i većom snagom motora koje donosi velike benefite za rad motora, a u konačnici i za krajnje korisnike. Princip rada turbopuhala temelji se na iskorištavanju energije ispušnih plinova. Kroz složen sustav turbine na ispušne plinove i turbokompresora, energija ispušnih plinova prenosi se na turbokompresor, koji zatim povećava tlak zraka prije nego što uđe u cilindre motora. Uvođenjem turbopuhala, automobilska industrija postigla je značajne napretke u voznim osobinama, učinkovitosti i ekološkoj održivosti vozila te imaju veliku primjenu u autoindustriji, a i šire.

## 2. OSNOVNI DIJELOVI TURBOPUHALA

Sustav turbopuhala sastoji se od nekoliko ključnih dijelova od kojih svaki obavlja svoju ulogu u procesu kompresije zraka i povećanja snage motora. Niti jedan element tog sustava ne smije zakazati kako bi se maksimalno iskoristili svi benefiti tog sustava.

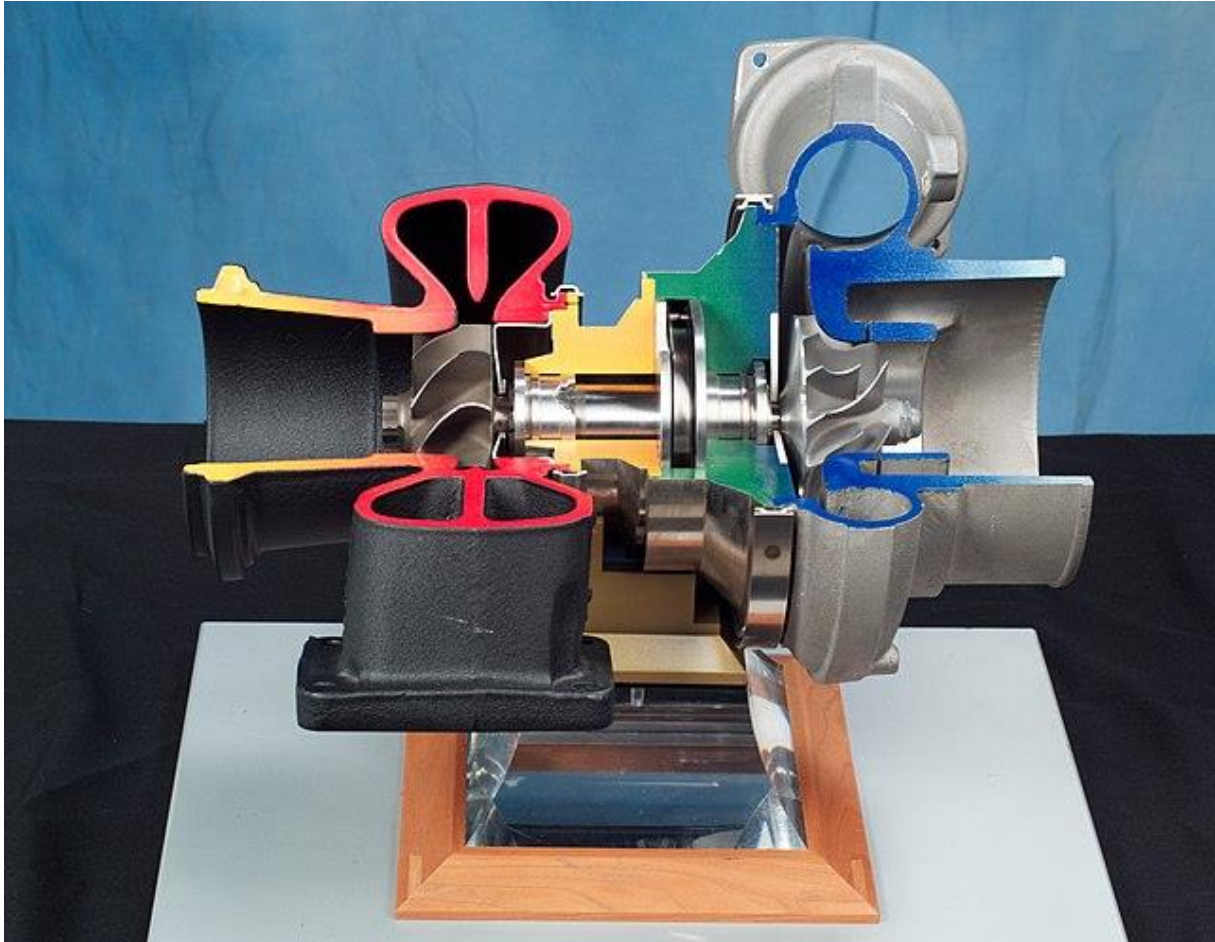
### 2.1. Centrifugalni turbokompresor

Centrifugalni turbokompresori imaju izrazito bitnu funkciju u turbopuhalima koje čini veliko inženjersko područje koje se bavi smanjenjem potrošnje goriva i regulacijom dovoda zraka [1]. Ovaj uređaj koristi snagu rotacije kako bi se ubrzao protok zraka, nakon čega se povećava tlak zraka i gustoća zraka prije nego on uđe u cilindar motora. Centrifugalni turbokompresori u sustavu turbopuhala često se koriste u sportskim automobilima, a danas je upotreba sve češća.

Centrifugalni rotor, poznat i kao turbina, nalazi se u središtu sustava te je povezan s ostatkom motora. Na slici 2.1. može se vidjeti presjek turbine i puhala. Dok se rotor vrti, on povlači zrak prema svom središtu, stvarajući centrifugalnu silu koja tjera zrak prema rubovima rotora, povećavajući njegovu kinetičku energiju. Upravo taj zrak koji se velikom brzinom giba ulazi u difuzor gdje se njegova kinetička energija pretvara u tlak što rezultira većom gustoćom zraka.

Ključna prednost centrifugalnih turbokompresora je njihova sposobnost stvaranja visokog tlaka u relativno malom i laganom kućištu što ih čini posebno prikladnim za primjene s ograničenom prostorom.

Turbopuhala koja koriste centrifugalne turbokompresore obično se koriste u sustavima s promjenjivim omjerom kompresije kako bi se poboljšala prilagodba rada turbokompresora prema trenutnim uvjetima vožnje, poboljšavajući sam rad motora [2]. Osim toga, moderni inženjerski pristupi uključuju upotrebu materijala visoke čvrstoće, poboljšanu aerodinamiku i sustave hlađenja kako bi se povećala učinkovitost i pouzdanost centrifugalnih turbokompresora u turbopuhalima.



*Slika 2.1. Presjek turbopuhala*

## **2.1. Turbina**

Turbina u sustavu turbopuhala predstavlja glavni dio tog sustava koji omogućuje prijenos snage iz energije ispušnih plinova u rotacijsku energiju koja pokreće turbokompresor [3]. To je ključna komponenta koja omogućuje turbopuhalu da stvori komprimirani zrak.

Turbine kod turbopuhala su obično jednostupanjske, a mogu biti i višestupanjske što znači da se sastoje od više rotor-stator parova koji se mijenjaju kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i snaga[4]. Svaki par rotora i statora obavlja određenu ulogu u pretvaranju energije iz ispušnih plinova u rotacijsku energiju.

Kada ispušni plinovi napuštaju motor oni prolaze kroz dovodni cjevovod prema turbini. Cjevovod prema turbini na ispušne plinove se kontinuirano sužava kako bi se u njemu povećala brzina (kinetička energija) dimnih plinova. Ta kinetička energija sadržana u dimnim plinovima

prenosi se na rotorske lopatice turbine. Ove lopatice su postavljene na rotoru i na njih se prenosi energija dimnih plinova. Kada plinovi prolaze kroz rotor turbine, njihova kinetička energija se pretvara u rotacijsku energiju, pokrećući rotor i prenosi proizvedenu mehaničku energiju na turbokompresor [5]. Ovaj proces omogućuje maksimalno iskorištavanje energije ispušnih plinova i stvaranje rotacijske snage.

Bitno je napomenuti da su turbine često izložene ekstremnim uvjetima, uključujući visoke temperature i brzine protoka te se stoga koriste visokokvalitetni materijali otporni na toplinu i visoke temperature kako bi se osigurala dugotrajna pouzdanost i učinkovitost. Uz to, inženjerska struka je usmjerena na poboljšanje aerodinamike rotorskih lopatica i optimizaciju oblika dovodnog cjevovoda kako bi se dodatno povećala učinkovitost i smanjila potrošnja goriva. Tehnološka napredna rješenja u području hlađenja omogućuju rad turbine u ekstremnim uvjetima bez smanjenja voznih karakteristika.

### **2.3. Kućište turbokompresora i turbine**

Kućište turbine i turbokompresora ima veliku ulogu jer štiti i podržava komponente motora, uključujući turbine, turbokompresore i druge dijelove. Njihov dizajn i funkcionalnost utječe na karakteristike, učinkovitost i pouzdanost cijelog motora i sustava turbopuhala.

Kućište turbine definira dovodne kanale dimnih plinova od cilindra motora prema rotoru. Njegova osnovna funkcija je usmjeravanje ispušnih plinova koji dolaze iz izgaranja goriva prema rotorskim lopaticama turbine. Kućište turbine također mora pružiti podršku rotacijskom dijelu turbine te osigurati optimalne uvjete protoka plinova za maksimalno iskorištavanje energije.

Takva kućišta obično su izrađena od legura koje su otporne na ekstremne uvjete kao što su visoke temperature ispušnih plinova [6]. Te legure osiguravaju dugotrajnost kućišta turbine čak i u uvjetima visokih temperatura i velikih brzina protoka plinova.

Kućište turbokompresora definira protočne kanale od rotora turbokompresora prema cilindrima motora. Promjer cjevovoda puhala prema cilindrima kontinuirano se povećava (difuzorsko strujanje) kako bi se mogao povećati tlak zraka. Kao i kućište turbine, kućište turbokompresora također mora biti čvrsto i izdržljivo kako bi podržalo rotirajuće dijelove turbokompresora i osiguralo učinkovit protok zraka.

Materijali koji se koriste za izradu kućišta turbokompresora obično su lagani metali ili legure visoke čvrstoće koji su istovremeno čvrsti i otporni na habanje. Ovi materijali omogućuju smanjenje mase kućišta turbokompresora što može poboljšati karakteristike i učinkovitost turbopuhala.

Osim spomenutih karakteristika, kućišta turbine i turbokompresora također moraju biti dizajnirana s ciljem optimizacije protoka zraka ili ispušnih plinova kako bi se postigla maksimalna učinkovitost motora. To može uključivati komplicirane oblike i geometrije unutar kućišta kojima se osigurava glatki i učinkovit protok fluida kroz sustav.

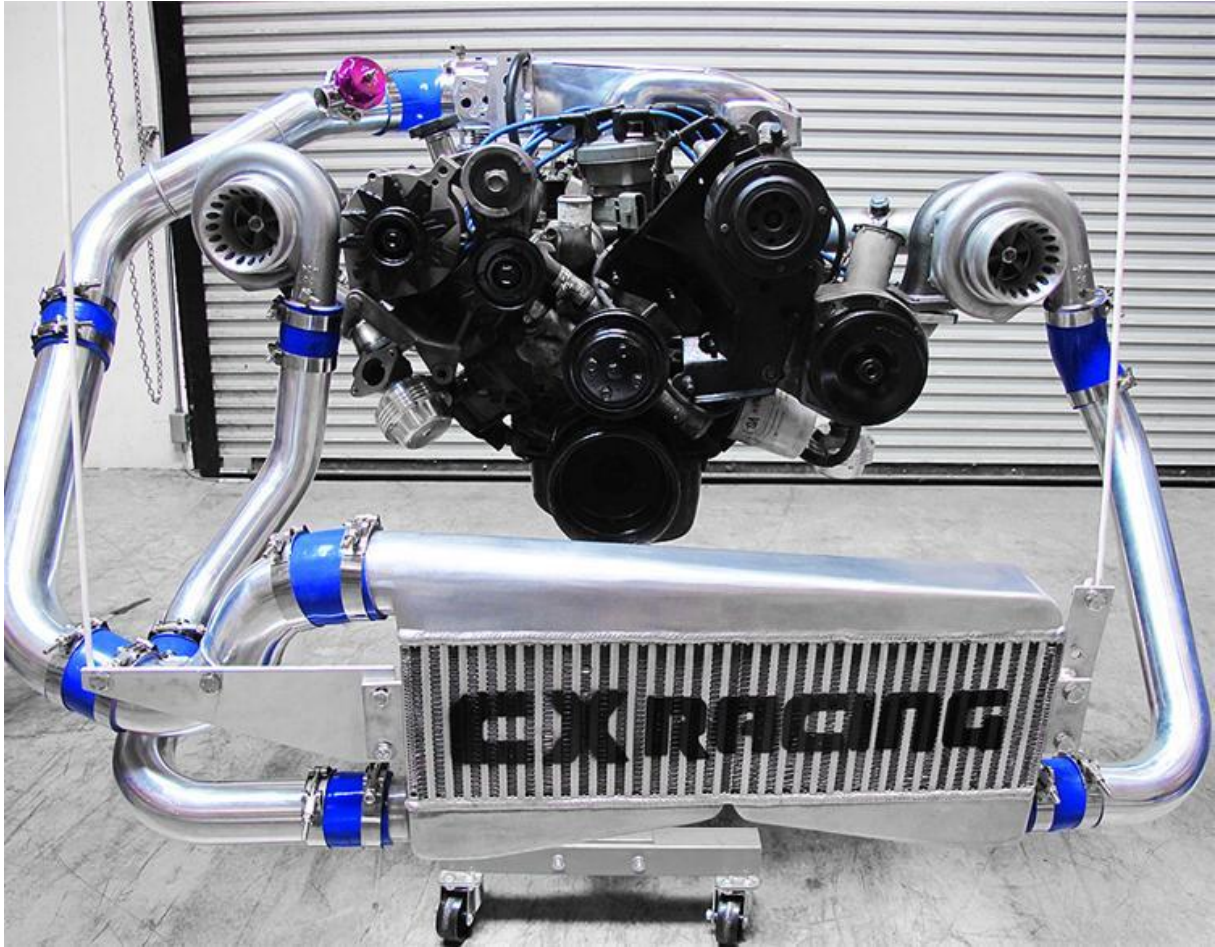
#### **2.4. Intercooler (međuhladnjak)**

Intercooler, poznat i kao međuhladnjak, ima važnu ulogu u sustavu turbopuhala. Njegova uloga je smanjiti temperaturu zraka nakon turbokompresora što dovodi do dodatnog povećanja gustoće zraka prije nego što uđe u motor. Povećana gustoća zraka omogućuje veći unos kisika u cilindre motora što potiče bolje izgaranje goriva, a u konačnici povećava snagu motora.

Međuhladnjak funkcionira na temelju principa hlađenja komprimiranog zraka. Kada zrak prolazi kroz turbokompresor u turbopuhalu, dolazi do povećanja njegove temperature zbog povećanja tlaka (pojava koja se očituje kod svake kompresije plina). Takav zagrijani zrak ima veliki volumen i može uzrokovati veće temperature u cilindrima motora te to može dovesti do problema s pregrijavanjem [7].

Međuhladnjak se stoga koristi kako bi se ohladio komprimirani zrak prije nego što uđe u motor. Kada zrak prođe kroz međuhladnjak, toplina se prenosi na rashladni medij, a zrak se hladi. Takav ohlađeni zrak ima veću gustoću te nižu temperaturu.

Smještaj međuhladnjaka je između turbokompresora i bloka motora odnosno na prednjem dijelu automobila kako je prikazano na slici 2.2. Komprimirani zrak prolazi kroz cijevi ili kanale unutar međuhladnjaka koji su obično izrađeni od aluminija radi bolje toplinske provodljivosti. Unutar međuhladnjaka nalaze se lamelirane ili rebraste plohe koje povećavaju površinu izloženu zraku radi boljeg hlađenja [8].



**Slika 2.2.** Međuhladnjak i njegov položaj

Kada zrak prolazi kroz međuhladnjak, toplina se prenosi na stjenke, a zrak se ohladi. Ohlađeni zrak napušta međuhladnjak i ulazi u motor.

Može se reći da je međuhladnjak preporučljiv za povećanje efikasnosti i snage turbopunjenih motora. Njegova sposobnost hlađenja komprimiranog zraka omogućava motoru da ostvari bolje karakteristike smanjenjem temperature i povećanjem gustoće zraka. Pravilnim odabirom i dizajnom može se znatno poboljšati učinkovitost motora.

## **2.5. Wastegate ventil**

Wastegate ventil komponenta je u turbo punjenim motorima i njegova osnovna funkcija je kontrola tlaka komprimiranog zraka koji proizvodi turbopuhalo, čime se sprječava prekomjerno povećanje tlaka zraka koji može oštetiti motor [9].

Takva izvedba ventila regulira koliki protok ispušnih plinova prolazi kroz turbinu turbopuhala, a kada se postigne željeni tlak zraka, ventil se otvara i omogućava dijelu ispušnih plinova da zaobiđe turbinu turbopuhala, umjesto da je potpuno pogoni. To pomaže u održavanju sigurnog tlaka zraka unutar sustava.

Postoje dvije glavne vrste wastegatea [10], slika 2.3:

- vanjski wastegate - ovo je zasebna komponenta ugrađena između ispušnog kolektora i turbopuhala. Omogućuje precizniju kontrolu tlaka zraka jer je neovisna o turbopuhalu i često se koristi u vozilima visokih performansi.
- unutarnji wastegate - integriran je direktno u turbopuhalo i jednostavniji je za ugradnju, ali može biti manje precizan u kontroli tlaka zraka od vanjskog wastegatea.

Wastegate može biti kontroliran mehanički ili elektronički [11]:

- mehanički kontrolirani wastegate koristi oprugu i dijafragmu koja reagira na tlak zraka nakon puhala
- elektronički kontrolirani wastegate (poznat kao e-wastegate) koristi elektromotor za precizniju kontrolu. To mu omogućava bolje radne karakteristike.

Pravilno podešavanje wastegate ventila ključno je za optimalne performanse motora s prednabijanjem. Ispravno funkcionalan wastegate pomaže u:

- sprječavanju odgode u odazivu turbopuhala (turbo lag)
- smanjenju naprezanja na motor i turbopuhalo
- očuvanju optimalnog rada motora.

Wastegate ventil direktno utječe na rad turbopuhala i međuhladjaka. Kada ventil pravilno regulira tlak zraka, turbopuhalo može efikasnije raditi, a međuhladjak može učinkovitije hladiti zrak što dovodi do boljih karakteristika motora. Također, ventil mora biti usklađen s upravljačkom jedinicom vozila, posebno ako je elektronički kontroliran, kako bi osigurao pravilno upravljanje parametrima motora.



*Slika 2.3. Unutarnji (lijevo) i vanjski(desno) wastegate ventil*

## 2.6. Ležajevi

Ležajevi turbopuhala igraju ključnu ulogu u pravilnom i efikasnom funkcioniranju. Ovi ležajevi podržavaju rotirajuće vratilo turbopuhala i omogućavaju joj da se vrti visokim brzinama s minimalnim trenjem i otporom. Zbog ekstremnih uvjeta rada, kao što su visoke temperature i brzine ležajevi turbopuhala moraju biti izuzetno otporni i precizni, a na slici 2.4. može se vidjeti njihova konstrukcija [12].

Klizni ležajevi koriste tanki sloj ulja koji se neprestano dovodi pod tlakom kako bi se osiguralo da se vratilo turbopuhala vrti slobodno bez direktnog kontakta s ležajem. Ovaj tip



ležaja je čest u mnogim standardnim turbopuhalima jer efikasno apsorbira vibracije i šumove [13].

Prednosti kliznih ležajeva:

- jednostavna konstrukcija
- neosjetljivost na udarce i promjene
- dobro prigušenje buke
- laka montaža i demontaža dvodjelnih ležajeva
- dozvoljavaju visoke brzine vrtnje

Nedostaci kliznih ležajeva:

- visok faktor trenja kod pokretanja i malih obodnih brzina
- osjetljivost na nedostatak maziva (dovodi do uništenja ležaja)
- kod velikih opterećenja potrebno je prisilno hlađenje ležaja

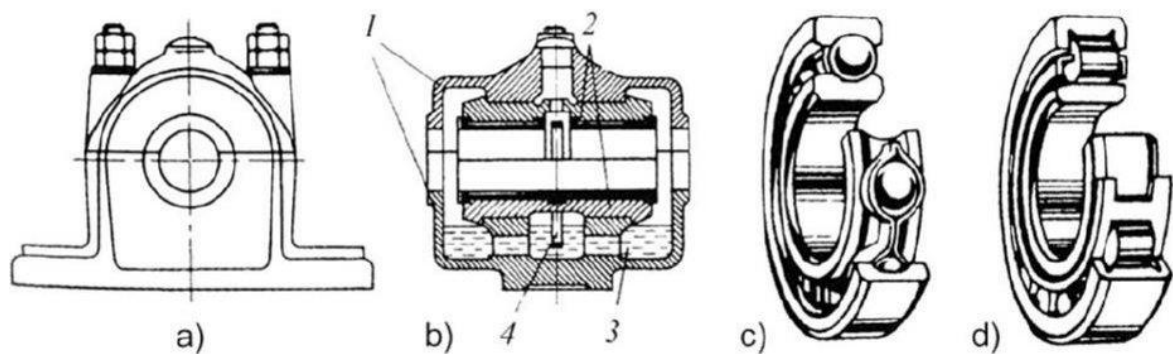
Kuglični ležajevi koriste seriju malih metalnih kuglica koje reduciraju trenje između pokretnih dijelova. Ovi ležajevi omogućavaju turbopuhalu da brže reagira i smanjuju takozvani "turbo lag". Iako su skuplji, kuglični ležajevi pružaju bolje performanse u aplikacijama visokih performansi.

Prednosti kugličnih ležajeva:

- nisko trenje pri pokretanju – gotovo jednako onom u radu
- brzina vrtnje ne utječe na trenje
- standardizirani
- male dimenzije i težina
- niska potrošnja maziva

Nedostaci kugličnih ležajeva:

- visoka osjetljivost na opterećenja i vibracije pri niskim brzinama rada
- trajnost ležaja izravno povezana s brzinom vrtnje
- potrebna visoka preciznost i točnost izrade



*Slika 2.4. Klizni (a i b) i kuglični (c i d) ležajevi turbopuhala*

Ležajevi turbopuhala izloženi su ekstremnim uvjetima koji uključuju visoke temperature i brzine vrtnje što može dovesti do bržeg trošenja. Redovito održavanje, uključujući provjeru i zamjenu ulja, ključno je za očuvanje njihove funkcionalnosti. Također, nepravilno podešavanje ili zagađenje mogu uzrokovati rano otkazivanje ležajeva.

Ležajevi u turbopuhalima ključni su za njegovu pouzdanost i performanse. Odabirom pravog tipa ležaja i redovitim održavanjem može se osigurati dugotrajnost i efikasnost.

### 3. DODATNI DIJELOVI TURBOPUHALA

#### 3.1. Injektori za ulje

Injektori za ulje (poznatiji kao dizne za ulje) u turbopuhalima komponente su koje osiguravaju pravilno podmazivanje rotirajućih dijelova turbopuhala. Kao što je rečeno - ulje ima važnu ulogu u smanjenju trenja i hlađenju turbopuhala što je od presudne važnosti s obzirom na visoke radne temperature i brzine vrtnje koje se postižu u turbo sustavima. Dizajnirane su tako da precizno doziraju i raspršuju motorno ulje na ključne dijelove turbopuhala, a najčešće na ležajeve i vratilo. Pravilno podmazivanje minimizira trošenje dijelova i omogućava turbopuhalu da efikasno i pouzdano radi na visokim okretajima [14].

Ulje se pod tlakom dovodi do turbopuhala iz motornog uljnog sustava. Kada motor radi, ulje se pumpa kroz uljni filter te preko dizni na ležajeve turbopuhala. Dizne za ulje precizno su dizajnirane da osiguraju optimalnu količinu ulja koja je potrebna za podmazivanje, bez stvaranja viška koji bi mogao dovesti do problema poput nepoželjnog curenja ulja [15].

Dizne za ulje mogu varirati u dizajnu, a to ovisi o specifikacijama turbopuhala i motoru kojem su namijenjene. Postoje osnovna dva tipa dizni (injektora) za ulje:

- fiksne dizne imaju unaprijed određenu veličinu otvora kroz koji protječe ulje. Prilagođene su za specifične uvjete rada i ne prilagođavaju se promjenama u radnim uvjetima motora,
- podesive dizne omogućuju promjenu količine ulja koja se dovodi do turbopuhala, ovisno o radnim uvjetima motora. To može biti korisno za motore koji rade u širokom rasponu radnih uvjeta.

Uljne dizne moraju biti izrađene od materijala koji mogu izdržati visoke temperature i radne uvjete motora. Obično su izrađene od visokokvalitetnih metala kao što su čelik ili aluminij, a ponekad su dodatno obrađene kako bi se poboljšala njihova otpornost na trošenje i koroziju.

Pravilno održavanje dizni za ulje je ključno za dugotrajan i pouzdan rad turbopuhala. To uključuje redovitu provjeru i zamjenu ulja, kao i provjeru samih dizni i cijelog uljnog sustava na znakove trošenja ili začepljenja. Začepljene ili oštećene dizne mogu dovesti do nedovoljnog podmazivanja, što povećava rizik od oštećenja turbopuhala.

### 3.2. Nepovratni ventil

Nepovratni ventil je element u sustavu turbopuhala automobila kako je i prikazano na slici 3.1. Njegova funkcija je osiguravanje jednosmjernog toka fluida – obično ulja ili rashladne tekućine – kroz sustav, čime se sprječava njihov povratak i osigurava ispravno podmazivanje i hlađenje turbopuhala. Takav ventil mora osigurati minimalni mogući pad tlaka (mali otpor) jer je on kriterij kvalitete nepovratnog ventila [16].

Nepovratni ventil u turbopuhalu ima ključnu ulogu u održavanju kontinuiranog i stabilnog tlaka unutar sustava. To je posebno važno jer turbopuhala rade na vrlo visokim brzinama vrtnje i pod visokim temperaturama gdje svaki prekid u opskrbi uljem ili rashladnom tekućinom može dovesti do ozbiljnih oštećenja. Imaju jednostavan dizajn koji omogućava fluidu da teče samo u jednom smjeru. Ventil obično sadrži oprugu i klip ili kuglu koja pod utjecajem protoka fluida dopušta prolaz u jednom smjeru. Kada se protok zaustavi ili pokuša teći u suprotnom smjeru, klip ili kugla blokira prolaz, sprječavajući povratak fluida.

Svi ventili u sustavima turbopuhala izrađeni su od materijala otpornih na visoke temperature i koroziju, poput nehrđajućeg čelika ili specijalnih legura. Dizajn ventila mora osigurati pouzdan rad pod različitim radnim uvjetima, uključujući vibracije, impulse tlaka i visoke temperature.

Dvije najbitnije uloge nepovratnog ventila su [17]:

- podmazivanje: osiguravanje da ulje ostane u ležajevima turbopuhala kad motor prestane raditi, sprječavajući time suho trenje pri ponovnom pokretanju,

- hlađenje: u sustavima gdje se koristi rashladna tekućina, nepovratni ventili sprječavaju njeno vraćanje u sustav hlađenja motora, osiguravajući da turbopuhalo ostane adekvatno hlađeno nakon što motor prestane raditi.



*Slika 3.1. Nepovratni ventil*

### 3.3. Senzori tlaka i temperature

Senzori tlaka i temperature su elementi koji se nalaze u sustavima automobila. Omogućuju precizno promatranje i upravljanje performansama motora automobila što omogućuje optimiziranje potrošnje goriva i smanjivanje emisija štetnih plinova.

Senzori tlaka turbopuhala mjere tlak zraka unutar usisnog kolektora i turbo sustava. Ove informacije koriste se za reguliranje količine zraka koja se dovodi u motor što je ključno za održavanje optimalnog omjera zraka i goriva te efikasnost izgaranja. Rade pomoću membranskih sustava koji reagiraju na promjene tlaka te se takve promjene pretvaraju u električne signale koji se šalju upravljačkoj jedinici motora. Upravljačka jedinica tada koristi te informacije za prilagodbu parametara motora kao što su doziranje goriva i trenutak upaljivanja gorive smjese [18].

Radni tlakovi u turbopuhalu:

1. **usisni tlak zraka:** tlak u usisnom kolektoru je obično blizu atmosferskog tlaka, a na razini mora iznosi 101.3 kPa,

2. **tlak zraka nakon puhala:** tlak koji puhalo stvori komprimiranjem usisnog zraka. Može varirati ovisno o potrebi za snagom i konfiguraciji puhala, a uobičajeni radni tlakovi zraka za motore sa turbopuhalom se kreću od oko 0.7 bara pa sve do 2.5 bara i više (za benzinske motore, dizelski motori često imaju veći tlak punjenja zbog potrebe za većom snagom),
3. **tlak zraka nakon međuhladnjaka:** to je ohlađeni zrak nakon što prođe kroz međuhladnjak i kada mu se smanji temperatura, a ujedino se i tlak zraka može smanjiti. Tlak zraka nakon međuhladnjaka u pravilu ostaje sličan tlaku izlaznog zraka iz tubopuhala, ali je potrebno uzeti u obzir male gubitke zbog otpora protoka kroz međuhladnjak,
4. **tlak ispušnih plinova:** tlak u ispušnom sustavu prije turbine turbopuhala je viši od tlaka na izlazu iz turbine turbopuhala zbog otpora stvorenih ispušnim sustavom i energije potrebne za pogon turbine. Ovi tlakovi mogu biti znatno viši pod opterećenjem, a ovisno o opterećenju motora mogu doseći i do 5 bara.

Senzori temperature u turbopuhalu mjere temperaturu zraka koji ulazi u motor i izlazi iz turbopuhala. Takve izmjere temperature su važne za zaštitu komponenti motora od pregrijavanja, optimizaciju učinkovitosti izgaranja i minimiziranje emisija štetnih plinova. Senzori temperature često koriste termistore (električni termootpornik) ili otporni termometar (RTD – Resistance Temperature Detector) koji mijenja električni otpor ovisno o temperaturi, te se promjene pretvaraju u električne signale koje zaprima upravljačka jedinica koja ih interpretira i prilagodi postavke rada motora [19].

Realne temperature u sustavu turbopuhala

Temperature mogu varirati ovisno o mnogo faktora kao što su: radni uvjeti motora, vanjska temperatura i opterećenje motora. Temperature koje se mogu očekivati:

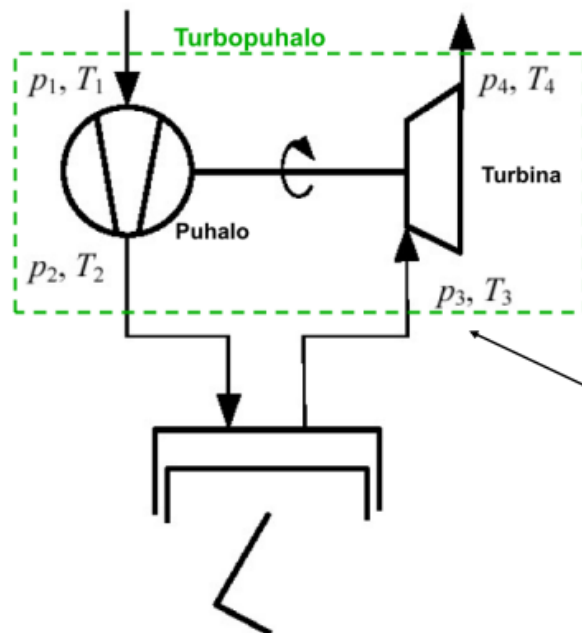
1. **temperatura usisnog zraka:** može biti blizu temperature okoline kada motor radi na niskim brzinama vrtnje ili pod niskim opterećenjem, tipično između 20°C do 40°C,
2. **temperatura zraka nakon puhala:** prije prolaska kroz međuhladnjak, temperatura zraka može porasti na 150°C do 200°C, ovisno o opterećenju i efikasnosti turbopuhala,

3. **temperatura zraka nakon međuhladnjaka:** međuhladnjak značajno smanjuje temperaturu zraka, obično na 30°C do 50°C iznad vanjske temperature, što znači da bi temperature mogle biti oko 50°C do 70°C u normalnim uvjetima.

## 4. PREDNABIJANJE

Prednabijanje turbopuhalima je postupak povećanja tlaka zraka i gustoće zraka koji ulazi u motor, čime se omogućuje da motor primi veću količinu zraka, a time i goriva, što rezultira povećanjem izlazne snage motora. Puhala pogonjena turbinom na ispušne plinove kako je prikazano na slici 4.1. poznata su kao turbopuhala. To su dinamički turbokompresori koji kontinuirano povećavaju tlak struje plina. Ovaj proces se odvija tako da rotor puhala najprije ubrzava strujanje zraka pretvarajući mehaničku energiju u kinetičku, a potom difuzorsko strujanje usporava zrak čime se kinetička energija pretvara u energiju tlaka [20].

### 4.1. Matematička analiza procesa prednabijanja turbopuhalom



*Slika 4.1. Shematski prikaz spoja turbine i puhala preko vratila*

#### 4.1.1. Omjeri tlakova:

Prikazane jednadžbe za puhalo i turbinu odgovaraju radnim točkama prikazanim na slici 4.1.

Puhalo:

$$\text{Omjer tlakova puhala } (\pi_c) = \frac{p_2}{p_1} \quad [\text{bezdimezionalan}]$$

$p_1$  - tlak zraka prije puhala [Pa]

$p_2$  - tlak zraka nakon puhala [Pa]



Turbina:

$$\text{Omjer tlakova turbina } (\pi_t) = \frac{p_3}{p_4} \quad [\text{bezdimezionalan}]$$

$p_3$  - tlak ispušnih plinova prije turbine [Pa]

$p_4$  - tlak ispušnih plinova nakon turbine [Pa].

#### 4.1.2. Bilanca masenog protoka turbin

Bilanca masenog protoka turbine

$$(\dot{m}_{ukupno}) = \dot{m}_{zrak} + \dot{m}_{gorivo} \quad [kg/s]$$

$\dot{m}_{zrak}$  - maseni protok zraka [kg/s]

$\dot{m}_{gorivo}$  - maseni protok goriva [kg/s].

#### 4.1.3. Formula za izračun snage turbine

Snaga turbine

$$(P_{turbina}) = P_{puhala} + \frac{d}{dt} KE_{turbopuhala} \quad [W]$$

$P_{puhala}$  - snaga potrebna za pogon puhala [W],

$KE_{turbopuhala}$  - promjena kinetičke energije turbopuhala [W].

#### 4.1.4. Rad puhala i turbine

Puhalo

Idealna adijabatska kompresija zraka:

$$W_{adiabatski} = c_p \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad [J]$$

$W_{adiabatski}$  - rad potrošen za idealnu adijabatsku kompresiju zraka [J]

$c_p$  - specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku zraka [J/(kg·K)]

$T_1$  - početna temperatura radnog medija [K]

$p_1$  - početni tlak radnog medija [Pa]

$p_2$  - konačni tlak nakon kompresije zraka [Pa]

$\gamma$  - eksponent adijabate [bezdimezionalan]

Stvarna politropska kompresija zraka:

$$W_{politropski} = c_p \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad [J]$$

$W_{politropski}$  - rad potrošen za stvarnu politropsku kompresiju zraka [J]

$n$  - eksponent politrope [bezdimezionalan]

Iskoristivost puhala  $\eta$ :

$$\eta_{puhalo} = \frac{W_{adiabatski}}{W_{politropski}} \quad [\text{bezdimezionalan}]$$

$\eta_{puhalo}$  - iskoristivost puhala [bezdimezionalan]

Turbina

Idealna adijabatska ekspanzija:

$$W_{adiabatski} = c_p \cdot T_3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad [J]$$

$W_{adiabatski}$  - rad dobiven za idealnu adijabatsku ekspanziju [J]

$T_3$  - početna temperatura ispušnih plinova [K]

$p_3$  - početni tlak ispušnih plinova [Pa]

$p_4$  - konačni tlak ispušnih plinova nakon ekspanzije [Pa]

$\gamma$  - eksponent adijabate [bezdimezionalan]

Stvarna politropska ekspanzija:

$$W_{politropski} = c_p \cdot T_3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad [J]$$

$W_{politropski}$  - rad dobiven za stvarnu politropsku ekspanziju [J]

$T_3$  - početna temperatura ispušnih plinova [K]

$p_3$  - početni tlak ispušnih plinova [Pa]

$p_4$  - konačni tlak ispušnih plinova nakon ekspanzije [Pa]

$n$  - eksponent politrope [bezdimezionalan]

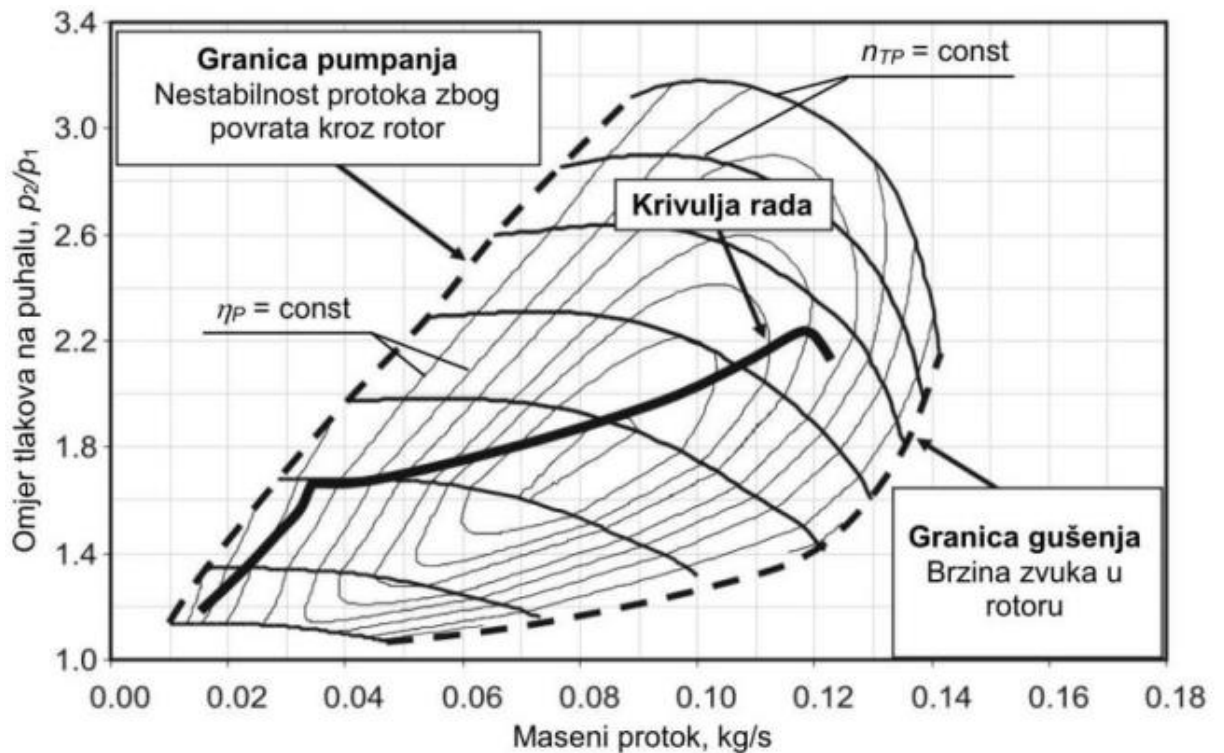
Iskoristivost turbine  $\eta$ :

$$\eta_{turbina} = \frac{W_{politropski}}{W_{adiabatski}} \quad [\text{bezdimezionalan}]$$

$\eta_{turbina}$  - iskoristivost turbine [bezdimezionalan]

## 5. RADNO POLJE PUHALA

Radno polje puhalo (mapa puhalo) ključno za analizu performansi puhalo u različitim radnim uvjetima. Mapa puhalo grafički prikazuje odnos između masenog protoka zraka (kg/s) i omjera tlakova ( $\frac{p_2}{p_1}$ ), pri čemu  $p_1$  predstavlja tlak zraka prije puhalo, a  $p_2$  tlak zraka nakon puhalo.



*Slika 5.1. Radno polje puhalo*

Krivulja rada puhalo prikazuje kako puhalo reagira pri različitim masenim protocima zraka za određene brzine rotora. Svaka krivulja na mapi povezuje točke koje imaju istu brzinu rotora, ali variraju u masenom protoku i omjeru tlakova. Ove krivulje omogućuju da se odrede optimalni radni uvjeti za puhalo. Nepovoljne radne uvjete treba maksimalno izbjegavati jer mogu dovesti do trajnih oštećenja, smanjenja performansi ili gašenja motora.

Granica pumpanja koja se može vidjeti na slici 5.1 označava stanje kada puhalo više ne može efikasno komprimirati zrak i dovodi do nestabilnosti protoka. Ovo stanje često uključuje povrat zraka kroz rotor puhalo, što može uzrokovati vibracije, buku i oštećenja. Na mapi puhalo, granica pumpanja se nalazi na lijevoj strani i predstavljena je krivuljom koja ograničava područje stabilnog režima rada.

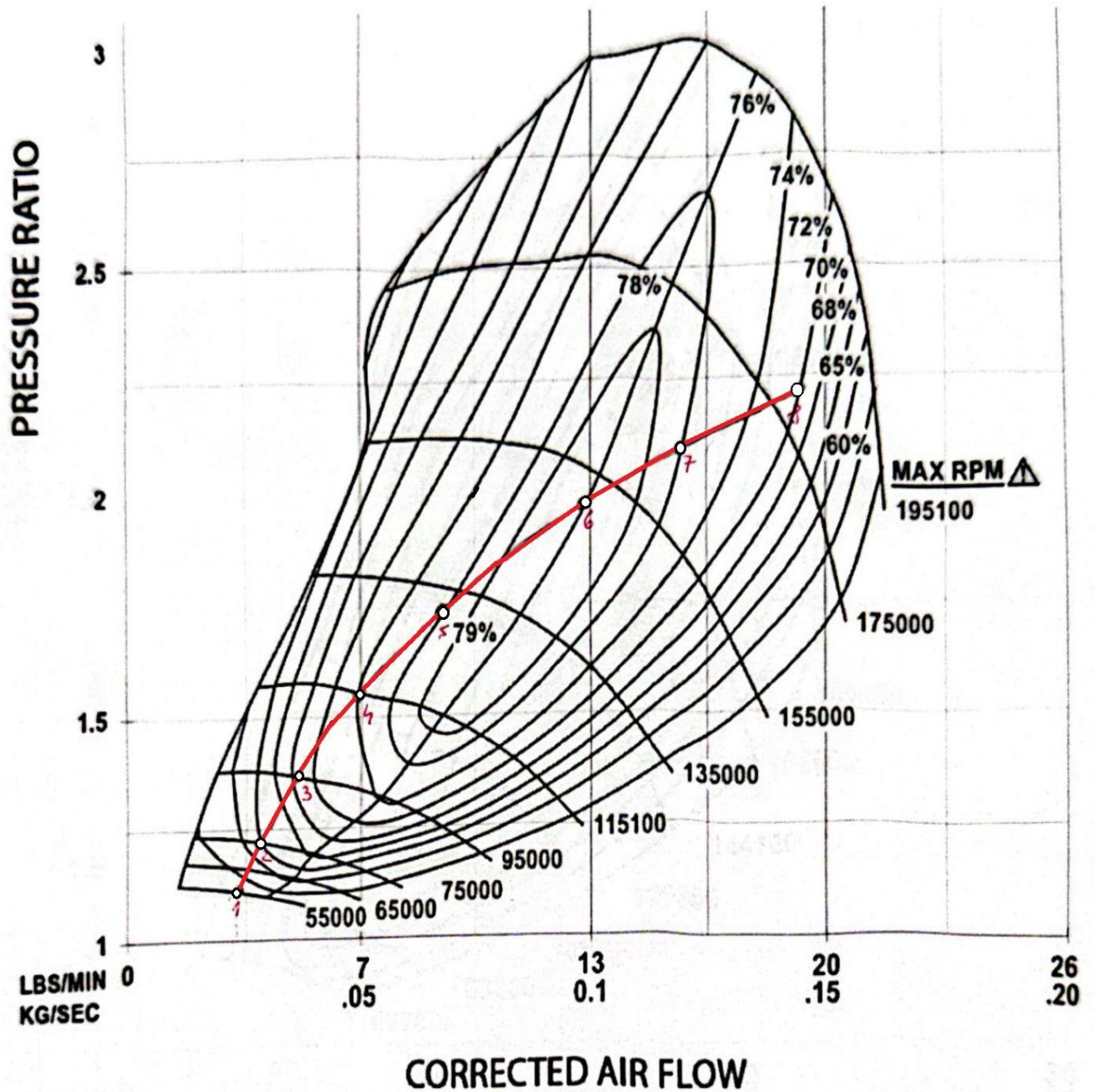
Gušenje nastaje kada puhalo radi pri maksimalnom masenom protoku zraka za koji je dizajnirano, a njena granica se može vidjeti na slici 5.1. U ovom stanju, brzina zraka u rotoru može doseći brzinu zvuka, što uzrokuje pojavu šokova i drugih pojava koji ograničavaju daljnji porast masenog protoka. Granica gušenja označava maksimalni sigurni maseni protok zraka pri kojem puhalo može raditi.

Mapa puhalo koristi se za optimizaciju rada motora i za osiguranje da turbopuhalo radi u optimalnom i sigurnom radnom polju.

Radno polje sa svojim jasnim granicama pomaže u optimiziranju rada puhalo u promjenjivim uvjetima poput razlika u geografskom području u kojem radi puhalo. Promjene u atmosferskom tlaku i temperaturi mogu utjecati na performanse puhalo stoga je potrebna prilagodba puhalo za različite uvjete rada kako bi dobili stabilan i pouzdan rad motora.

## 6. ANALIZA RADNIH PARAMETARA PUHALA

2003 – 2011 Volkswagen 1.9L | 2.0L TDI Engines



Slika 6.1.: Radno polje puhala 1 - VW 1.9L/2.0L TDI

Slika 6.1. prikazuje odabranu mapu odnosno radno polje puhalo 1 koje je odabrano za analizu radnih parametara. Mapa rada puhalo je za Volkswagen 1.9L/2.0L TDI motora iz razdoblja 2003. godine – 2011. godine.

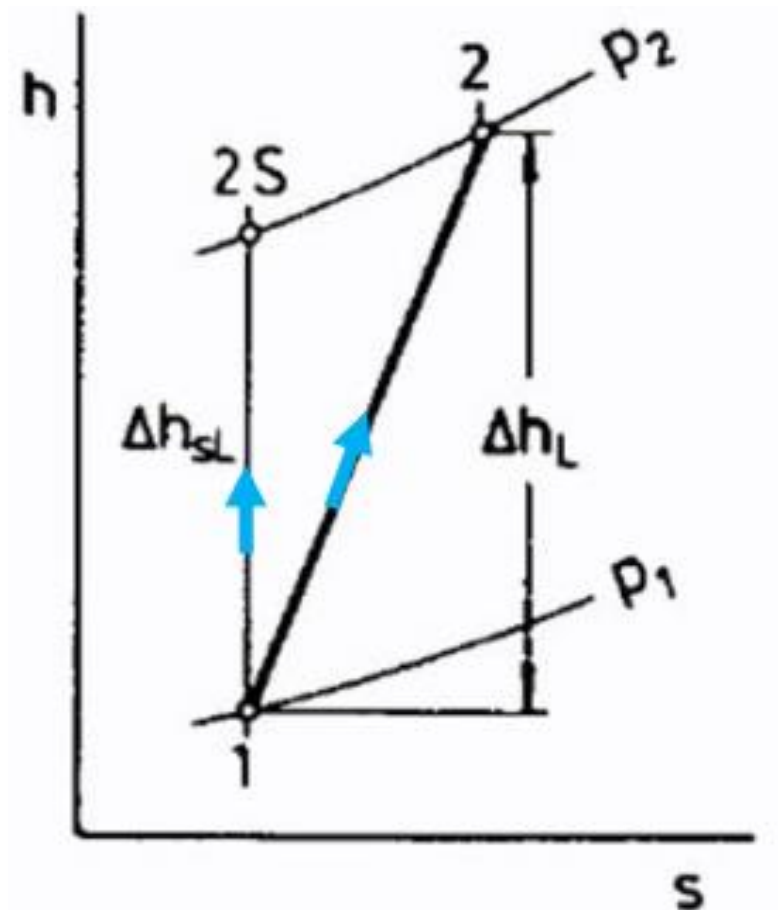
Nakon odabira mape puhalo potrebno je pretpostaviti radnu krivulju po kojoj može raditi to puhalo. Za sva puhalo analizirana u ovome radu radna krivulja je pretpostavljena pri opterećenju motora tj. pri povećanju brzine vrtnje turbopuhala i sve većem tlaku dobave. Pritom, potrebno je paziti da nismo blizu granice gušenja ili granice pumpanja jer su te granice nepovoljne za rad motora kako je ranije opisano. Identificirano je osam specifičnih točki na toj krivulji i očitane su iduće vrijednosti, a tablica 6.1. ih prikazuje:

- Maseni protok zraka  $m$  [kg/s]
- Tlak zraka na izlazu iz puhalo  $p_2$  [bar]
- Iskoristivost puhalo u postocima [%].

**Tablica 6.1.** Očitane vrijednosti s mape puhalo 1

Točke na mapi	$m$ (kg/s)	$p_2$ (bar)	Iskor.
1	0,024	1,12	0,55
2	0,027	1,23	0,60
3	0,032	1,3	0,68
4	0,05	1,53	0,74
5	0,07	1,75	0,78
6	0,1	1,98	0,76
7	0,12	2,12	0,78
8	0,14	2,2	0,70

Prema dobivenim podacima može se primjetiti kako se mijenja efikasnost puhalo za različite tlakove i različite masene protoke. Ova analiza pomaže u boljem razumijevanju učinkovitosti puhalo pri različitim opterećenjima i brzinama motora, pomaže u boljoj procjeni gdje je optimalno radno područje puhalo, ali i gdje puhalo može postati neefikasno i ući u nestabilnosti (npr. približavanje granici pumpanja).



**Slika 6.2.** Idealni i stvarni proces povećanja tlaka zraka puhalom u  $h$ - $s$  dijagramu

Slika 6.2. prikazuje usporedbu idealnog i stvarnog procesa povećanja tlaka zraka puhalom u  $h$ - $s$  dijagramu. Dijagram prikazuje razliku između idealne adijabatske i stvarne politropske kompresije zraka ili nekog drugog radnog medija.

Točka 1 predstavlja ulazno stanje radnog zraka u kompresor, koje je korišteno kao 1 bar i 20 °C. Na dijagramu, ova točka je početna točka za proces kompresije zraka.

Točka 2s predstavlja krajnje stanje radnog medija nakon idealne adijabatske kompresije zraka. Adijabatski promjena stanja je termodinamički proces u kojem nema izmjene topline s okolinom, što znači da je kompresija izvedena bez gubitaka energije. U idealnom slučaju, energija potrebna za ovakvu idealnu kompresiju je minimalna.

Točka 2 na dijagramu označava stvarno stanje radnog medija nakon politropske kompresije zraka, gdje se uzimaju u obzir stvarni energetske gubici tijekom kompresije zraka. Ovi gubici



uključuju trenje, toplinske gubitke i ostale gubitke koji povećavaju specifičnu entropiju i smanjuju efikasnost kompresije zraka.

- $\Delta h_{SL}$ :
  - ova vrijednost predstavlja promjenu specifične entalpije između točaka 1 i 2S i pokazuje teoretski potrebnu energiju za adijabatsku kompresiju,
- $\Delta h_L$ :
  - ova vrijednost predstavlja promjenu specifične entalpije između točaka 1 i 2, prikazujući stvarnu potrošenu energiju za kompresiju. Razlika između  $\Delta h_L$  i  $\Delta h_{SL}$  ukazuje na energetske gubitke tijekom stvarne kompresije zraka.

Korištenje *REFPROP* programa omogućava detaljnu analizu termodinamičkih svojstava i karakteristika puhala kroz različite radne točke. Postupak uključuje:

1. **Definiranje ulaznih uvjeta** - postavljanje početne temperature  $T_1$  [°C], početnog tlaka  $p_1$  [bar],
2. **Izračun idealnih i stvarnih izlaznih stanja** - korištenjem *REFPROP*-a za izračun specifične entalpije  $h$  [kJ/kg] i specifične entropije  $s$  [kJ/kg·K] za idealnu (adijabatsku) i stvarnu (politropsku) kompresiju,
3. **Praćenje izvedbe** - izračunavanje izlazne idealne i stvarne snage  $P$  [kW], gubitaka  $Gub$  [kW], i provjere iskoristivosti (%) kroz sve točke.

Za ulazno stanje za točku 1 na mapi poznato je da prevladava atmosferski zrak kojem je:

- ulazna temperatura  $T_1 = 20$  °C,
- ulazni tlak zraka  $p_1 = 1$  bar.

Pritom se na radnom polju puhala očitaju iduće vrijednosti za točku 1:

- protok zraka  $m = 0,024$  kg/s,
- tlak zraka nakon kompresije  $p_2 = 1,12$  bar,
- iskoristivost  $\eta = 0,55$  (55%).

Nakon očitavanja s mape puhala prelazi se u program *REFPROP*. Odabire se smjesa zraka koja se zove Pseudo Pure Fluid. Unesu se poznate vrijednosti za točku 1 (temperatura i tlak) te

program izračuna specifičnu entalpiju i specifičnu entropiju za to stanje nakon čega se prelazi na iduću točku.

Za točku 2<sub>s</sub>, u koju se dođe pri idealnoj (adijabatskoj) promjeni stanja, poznat je tlak zraka p<sub>2</sub> = 1,12 bara koji je očitao s mape puhala, specifična entropija s = 3,8673 kJ/kg·K koja je ista kao u točki 1 te se to unese u program REFPROP kako bi se izračunala temperatura T<sub>2s</sub> = 29,668 °C i specifična entalpija h<sub>2s</sub> = 429,11 kJ/kg.

Za točku 2 u koju se dođe pri stvarnoj (politropskoj) promjeni stanja, poznat je tlak zraka p<sub>2</sub>=1,12 bara koji je isti kao u točki 2<sub>s</sub> odnosno očitao s mape puhala, te je potrebno izračunati specifičnu entalpiju h<sub>2</sub> po izrazu:

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta} = h_2 = 419,41 + \frac{429,11 - 419,41}{0,55} = 437,05 [kJ/kg]$$

Nakon izračuna specifične entalpije u točki 2 u program REFPROP unesu se poznate vrijednosti:

- p<sub>2</sub> = 1,12 bar,
- h<sub>2</sub> = 437,05 kJ/kg,

te program izračuna preostale vrijednosti:

- T<sub>2</sub> = 37,554 °C,
- s<sub>2</sub> = 3,8932 kJ/kgK.

Nakon izračuna stanja svih radnih točaka potrebno je izračunati idealnu snagu, stvarnu snagu, gubitke i obaviti provjeru. Idealna snaga puhala računa se prema izrazu:

$$P_{id} = m \cdot (h_{2s} - h_1) = 0,024 \cdot (429,11 - 419,41) = 0,233 [kW]$$

Stvarna snaga puhala računa se prema izrazu:

$$P_{stv} = m \cdot (h_2 - h_1) = 0,024 \cdot (437,05 - 419,41) = 0,423 [kW]$$

Gubici pri stvarnoj politropskoj kompresiji računaju se prema izrazu:

$$Gub = P_{stv} - P_{id} = 0,423 - 0,233 = 0,190 [kW]$$

Provjera se radi prema izrazu za iskoristivost puhalo:

$$\eta = \frac{P_{id}}{P_{stv}} = \frac{0,233}{0,423} = 0,55$$

Rezultat provjere mora biti identičan kao očitana vrijednost iskoristivosti sa mape puhalo.

**Tablica 6.2.** Izračunate vrijednosti za točku 1 na mapi puhalo 1

<b>TOČKA MAPA 1</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p<sub>1</sub> (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kg·K)</b>	<b>P<sub>id</sub> (kW)</b>	0,233
<b>1</b>	20,000	1	0,024	419,41	3,8673	<b>P<sub>stv</sub> (kW)</b>	0,423
<b>2S</b>	29,668	1,12	0,024	429,11	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	0,190
<b>2</b>	37,554	1,12	0,024	437,05	3,8932	<b>PROVJERA (%)</b>	0,55

Postupak izračuna temperature, tlaka, specifične entalpije i specifične entropije se ponavlja za svaku točku na mapi puhalo 1 po metodi kako je ranije prikazano za točku 1 na mapi tog istog puhalo. Tablica 6.2. prikazuje kompletan izračun traženih vrijednosti za prvu točku na mapi za puhalo 1 – Volkswagen 1.9L/2.0L 2003. godine – 2011. godine.

Po završetku svih izračuna dobivene su sve potrebne vrijednosti za točku 1 puhalo 1. Na slici 6.3. može se vidjeti kako izgledaju izračunate vrijednosti svih točaka u programu REFPROP za puhalo 1.

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
2	29,668	1,1200	1,2889	429,11	3,8673
3	37,554	1,1200	1,2561	437,05	3,8932
4					
5	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
6	37,886	1,2300	1,3780	437,36	3,8673
7	49,767	1,2300	1,3272	449,33	3,9051
8					
9	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
10	42,844	1,3000	1,4335	442,34	3,8673
11	53,551	1,3000	1,3864	453,13	3,9009
12					
13	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
14	57,891	1,5300	1,6103	457,46	3,8673
15	71,139	1,5300	1,5482	470,83	3,9069
16					
17	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
18	70,825	1,7500	1,7724	470,48	3,8673
19	85,085	1,7500	1,7017	484,88	3,9083
20					
21	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
22	83,147	1,9800	1,9358	482,89	3,8673
23	102,97	1,9800	1,8335	502,94	3,9221
24					
25	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
26	90,147	2,1200	2,0326	489,94	3,8673
27	109,79	2,1200	1,9281	509,83	3,9206
28					
29	20,000	1,0000	1,1888	419,41	3,8673
30	93,997	2,2000	2,0871	493,83	3,8673
31	125,56	2,2000	1,9215	525,81	3,9509
32					

- Current Fluid: air Ref. State: Default

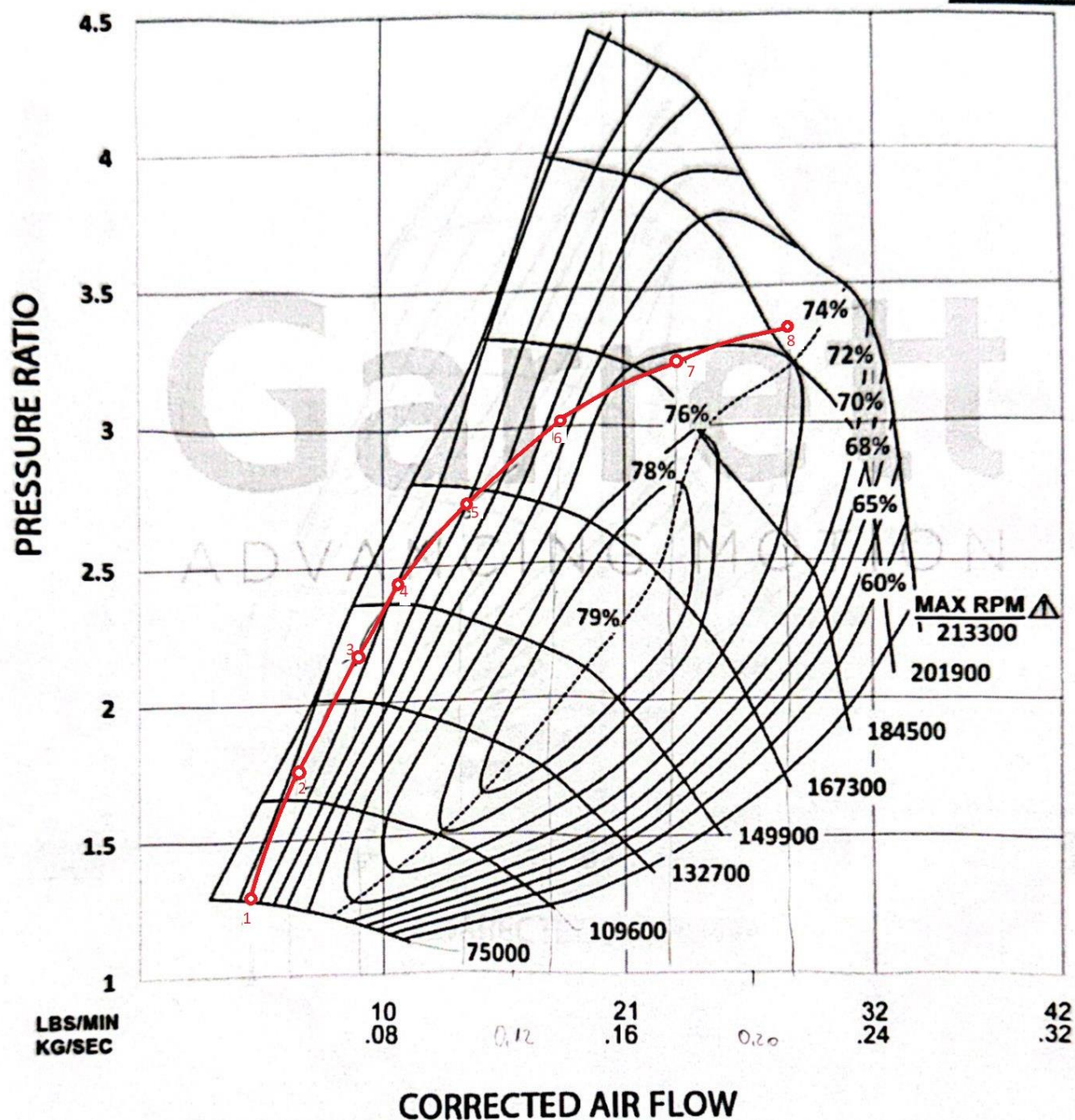
*Slika 6.3. Izračunate vrijednosti u REFPROP programu*

Za preostale točke je potrebno osim vrijednosti koje su prikazane na slici 6.3. izračunati i vrijednosti idealnih i stvarnih snaga, gubitaka te obaviti provjeru. Tablica 6.3. prikazuje kompletan izračun svih osam radnih točaka za puhalo 1.

*Tablica 6.3. Potpuni izračun i očitavanja za puhalo 1*

<b>TOCKA MAPA 1</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	0,233
	<b>1</b>	20,000	1	0,024	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 0,423
	<b>2S</b>	29,668	1,12	0,024	429,11	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 0,190
	<b>2</b>	37,554	1,12	0,024	437,05	3,8932	<b>PROVJERA (%)</b> 0,55
<b>TOCKA MAPA 2</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	0,485
	<b>1</b>	20,000	1	0,027	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 0,808
	<b>2S</b>	37,886	1,23	0,027	437,36	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 0,323
	<b>2</b>	49,767	1,23	0,027	449,33	3,9051	<b>PROVJERA (%)</b> 0,6
<b>TOCKA MAPA 3</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	0,734
	<b>1</b>	20,000	1	0,032	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 1,079
	<b>2S</b>	42,844	1,30	0,032	442,34	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 0,345
	<b>2</b>	53,551	1,30	0,032	453,13	3,9009	<b>PROVJERA (%)</b> 0,68
<b>TOCKA MAPA 4</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	1,903
	<b>1</b>	20,000	1	0,05	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 2,571
	<b>2S</b>	57,891	1,53	0,05	457,46	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 0,668
	<b>2</b>	71,139	1,53	0,05	470,83	3,9069	<b>PROVJERA (%)</b> 0,74
<b>TOCKA MAPA 5</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	3,575
	<b>1</b>	20,000	1	0,07	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 4,583
	<b>2S</b>	70,825	1,75	0,07	470,48	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 1,008
	<b>2</b>	85,085	1,75	0,07	484,88	3,9083	<b>PROVJERA (%)</b> 0,78
<b>TOCKA MAPA 6</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	6,348
	<b>1</b>	20,000	1	0,1	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 8,353
	<b>2S</b>	83,147	1,98	0,1	482,89	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 2,005
	<b>2</b>	102,970	1,98	0,1	502,94	3,9224	<b>PROVJERA (%)</b> 0,76
<b>TOCKA MAPA 7</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	8,464
	<b>1</b>	20,000	1	0,12	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 10,851
	<b>2S</b>	90,147	2,12	0,12	489,94	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 2,387
	<b>2</b>	109,790	2,12	0,12	509,83	3,9206	<b>PROVJERA (%)</b> 0,78
<b>TOCKA MAPA 8</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	10,427
	<b>1</b>	20,000	1	0,14	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 14,896
	<b>2S</b>	93,997	2,20	0,14	493,89	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 4,469
	<b>2</b>	125,560	2,20	0,14	525,81	3,9509	<b>PROVJERA (%)</b> 0,7

## 2014 – 2019 GM (Holden, Chevrolet) Colorado 2.8L XLDE Diesel



Slika 6.4. Radno polje puhalo 2 - GM Colorado 2014-2019 2.8L

Za proračun puhalo 2 koristi se turbopuhalo automobila GM (Holden, Chevrolet) 2014-2019.g. Colorado 2.8L XLDE Diesel. Postupak se ponavlja identično kao za mapu puhalo 1, a kreće se s pretpostavljanjem radne krivulje za puhalo 2. Radna krivulja s osam karakterističnih

točaka prikazana je na slici 6.4, a tablicom 6.4 prikazane su očitane vrijednosti s mape puhalo 2.

**Tablica 6.4.** Očitane vrijednosti s mape puhalo 2

Točke na mapi	m (kg/s)	p <sub>2</sub> (bar)	Iskor.
1	0,030	1,25	0,55
2	0,040	1,51	0,6
3	0,055	1,85	0,7
4	0,075	2,24	0,71
5	0,095	2,4	0,72
6	0,110	2,65	0,73
7	0,130	2,85	0,751
8	0,158	3,1	0,745

Postupak je identičan kao i za prethodno puhalo kako je i opisano u gornjem dijelu.

Potrebno je:

- postaviti u programu REFPROP zrak "Air – Pseudo Pure Fluid",
- pretpostaviti ulaznu temperaturu zraka  $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- pretpostaviti ulazni tlak zraka  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,
- unijeti podatke u REFPROP za izračun podataka u ulaznoj točki 1,
- unijeti tlak zraka i specifičnu entropiju nakon adijabatske kompresije zraka u točki 2<sub>s</sub> te zapisati dobivene vrijednosti,
- za točku 2 koja se dobije nakon stvarne (politropske) kompresije zraka unijeti tlak zraka koji je  $p_{2s} = p_2$  i izračunati specifičnu entalpiju po formuli prikazanoj ranije,
- izračunati idealnu snagu puhalo,
- izračunati stvarnu snagu puhalo,
- izračunati gubitke kao razliku stvarne i idealne snage puhalo,
- obaviti provjeru.

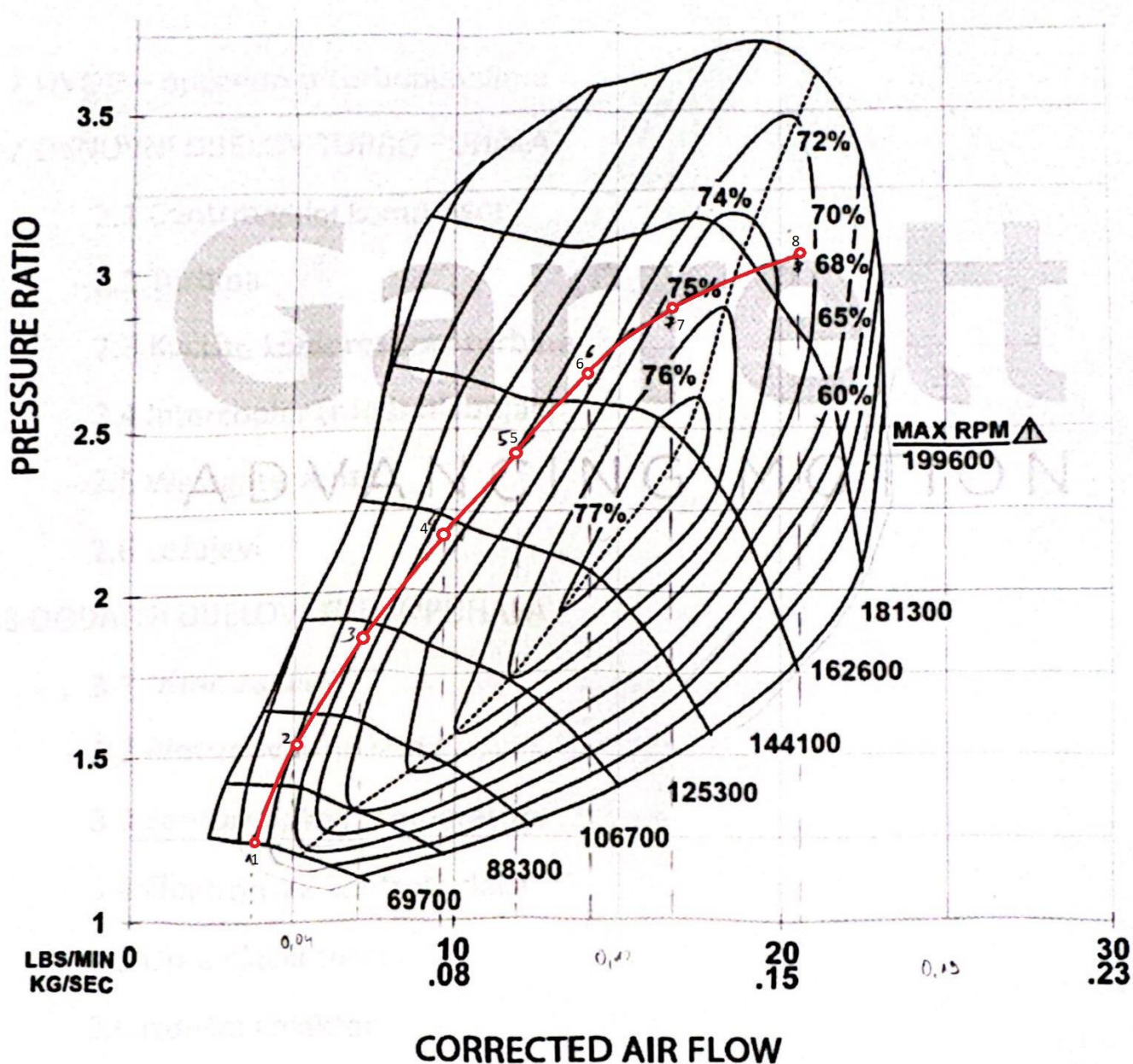
U tablici 6.5. prikazane su sve vrijednosti koje je potrebno izračunati za puhalo 2.

Tablica 6.5. Potpuni izračun i očitavanja za puhalo 2

<b>TOCKA MAPA 1</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	0,582
	1	20,000	1	0,03	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 1,058
	2S	39,323	1,25	0,03	438,8	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 0,476
	2	55,059	1,25	0,03	454,66	3,9934	<b>PROVJERA (%)</b> 0,55
<b>TOCKA MAPA 2</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	1,472
	1	20,000	1	0,04	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 2,454
	2S	56,650	1,51	0,04	456,22	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 0,982
	2	80,970	1,51	0,04	480,76	3,9391	<b>PROVJERA (%)</b> 0,6
<b>TOCKA MAPA 3</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	3,113
	1	20,000	1	0,055	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 4,447
	2S	76,318	1,85	0,055	476,01	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 1,334
	2	100,320	1,85	0,055	500,27	3,9344	<b>PROVJERA (%)</b> 0,7
<b>TOCKA MAPA 4</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	5,724
	1	20,000	1	0,075	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 8,062
	2S	95,885	2,24	0,075	495,73	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 2,338
	2	126,640	2,24	0,075	526,90	3,9484	<b>PROVJERA (%)</b> 0,71
<b>TOCKA MAPA 5</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	7,952
	1	20,000	1	0,095	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 11,044
	2S	103,200	2,40	0,095	503,11	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 3,092
	2	135,280	2,40	0,095	535,66	3,9503	<b>PROVJERA (%)</b> 0,72
<b>TOCKA MAPA 6</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	10,402
	1	20,000	1	0,11	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 14,249
	2S	113,950	2,65	0,11	513,97	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 3,847
	2	148,360	2,65	0,11	548,94	3,9538	<b>PROVJERA (%)</b> 0,73
<b>TOCKA MAPA 7</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	13,356
	1	20,000	1	0,13	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 17,785
	2S	122,030	2,85	0,13	522,15	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 4,428
	2	155,520	2,85	0,13	556,21	3,9500	<b>PROVJERA (%)</b> 0,751
<b>TOCKA MAPA 8</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>s (kJ/kgK)</b>	<b>P_id (kW)</b>	17,758
	1	20,000	1	0,158	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b> 23,836
	2S	131,560	3,10	0,158	531,80	3,8673	<b>Gub (kW)</b> 6,078
	2	169,320	3,10	0,158	570,27	3,9582	<b>PROVJERA (%)</b> 0,745



**2011-2021 Ford Ranger PX1 PX2 PX3 | Everest and 2011-2020 Mazda BT50 3.2L**



*Slika 6.5. Radno polje puhalo 3 – Ford Ranger 2011-2021 i 2011-2020 Mazda 3.2L*

Slika 6.5. prikazuje radno polje puhalo 3 za Ford Ranger 2011-2021 PX1 PX2 PX3 i 2011-2020 Mazda BT50 3.2L sa pretpostavljenom radnom krivuljom i označenih 8 karakterističnih točaka koji se koriste za proračun. Očitane vrijednosti s mape puhalo 3 za osam karakterističnih radnih točaka prikazane su u tablici 6.6.

**Tablica 6.6.** Očitane vrijednosti s mape puhalo 3

Točke na mapi	m (kg/s)	p <sub>2</sub> (bar)	Iskor.
1	0,040	1,25	0,62
2	0,048	1,75	0,65
3	0,070	2,15	0,68
4	0,090	2,4	0,71
5	0,100	2,69	0,72
6	0,130	3,08	0,73
7	0,175	3,25	0,751
8	0,215	3,41	0,745

Proračun je isti kako je opisan za puhalo 1, ponovljen za puhalo 2, a koraci su:

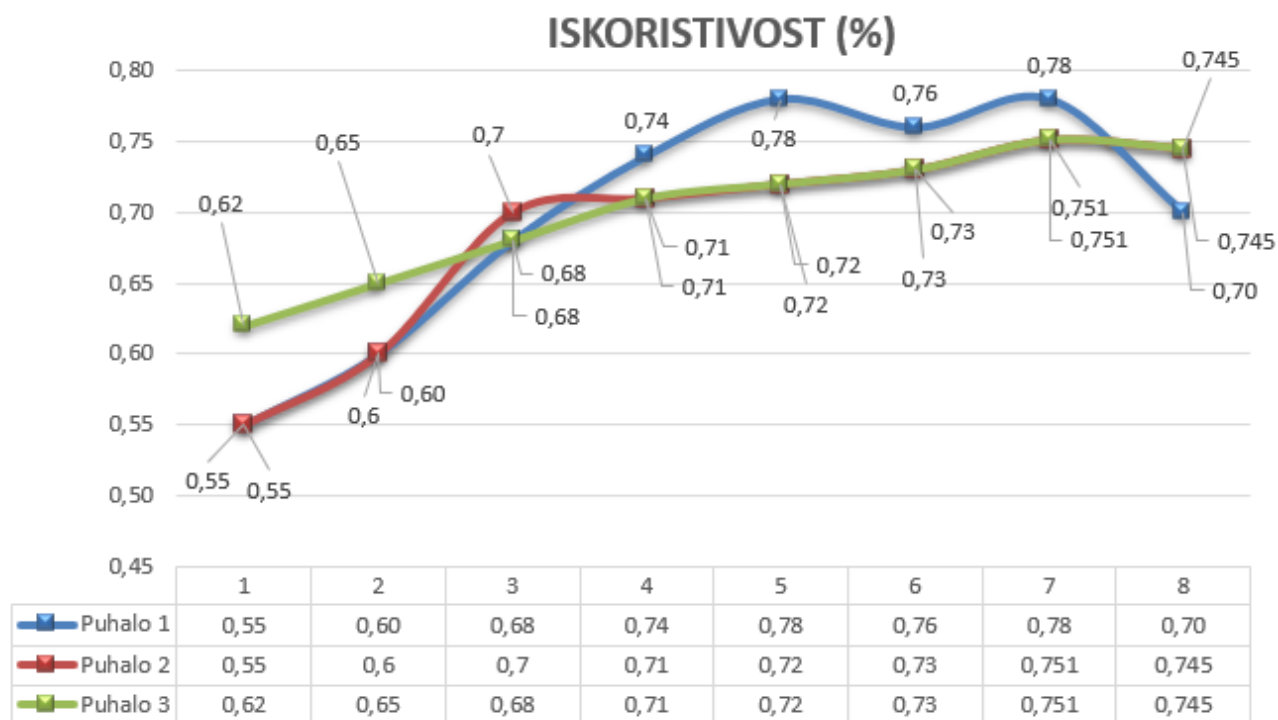
- postaviti u programu REFPROP zrak "Air – Pseudo Pure Fluid",
- pretpostaviti ulaznu temperaturu zraka  $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- pretpostaviti ulazni tlak zraka  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,
- unijeti podatke u REFPROP za izračun podataka u ulaznoj točki 1,
- unijeti tlak zraka i specifičnu entropiju nakon adijabatske kompresije zraka u točki 2<sub>s</sub> te zapisati dobivene vrijednosti,
- za točku 2 koja se dobije nakon stvarne (politropske) kompresije zraka unijeti tlak zraka koji je  $p_{2s} = p_2$  i izračunati specifičnu entalpiju po formuli prikazanoj ranije,
- izračunati idealnu snagu puhalo,
- izračunati stvarnu snagu puhalo,
- izračunati gubitke kao razliku stvarne i idealne snage puhalo,
- obaviti provjeru.

Tablica 6.7. prikazuje sve vrijednosti koje su izračunate za puhalo 3.

Tablica 6.7. Potpuni izračun i očitavanja za puhalo 3

<b>TOCKA MAPA 1</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	0,776	
	<b>1</b>	20,000	1	0,04	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	1,251
	<b>2S</b>	39,323	1,25	0,04	438,8	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	0,475
	<b>2</b>	51,110	1,25	0,04	450,68	3,9046	<b>PROVJERA (%)</b>	0,62
<b>TOCKA MAPA 2</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	2,451	
	<b>1</b>	20,000	1	0,048	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	3,771
	<b>2S</b>	70,825	1,75	0,048	470,48	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	1,320
	<b>2</b>	98,040	1,75	0,048	497,98	3,9443	<b>PROVJERA (%)</b>	0,65
<b>TOCKA MAPA 3</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	5,040	
	<b>1</b>	20,000	1	0,07	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	7,412
	<b>2S</b>	91,603	2,15	0,07	491,41	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	2,372
	<b>2</b>	125,040	2,15	0,07	525,29	3,9562	<b>PROVJERA (%)</b>	0,68
<b>TOCKA MAPA 4</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	7,533	
	<b>1</b>	20,000	1	0,09	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	10,610
	<b>2S</b>	103,200	2,40	0,09	503,11	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	3,077
	<b>2</b>	136,890	2,40	0,09	537,30	3,9543	<b>PROVJERA (%)</b>	0,71
<b>TOCKA MAPA 5</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	9,623	
	<b>1</b>	20,000	1	0,1	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	13,365
	<b>2S</b>	115,600	2,69	0,1	515,64	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	3,742
	<b>2</b>	152,410	2,69	0,1	553,06	3,9593	<b>PROVJERA (%)</b>	0,72
<b>TOCKA MAPA 6</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	14,513	
	<b>1</b>	20,000	1	0,13	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	19,881
	<b>2S</b>	130,820	3,08	0,13	531,05	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	5,368
	<b>2</b>	171,350	3,08	0,13	572,34	3,9647	<b>PROVJERA (%)</b>	0,73
<b>TOCKA MAPA 7</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	20,636	
	<b>1</b>	20,000	1	0,175	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	27,478
	<b>2S</b>	137,020	3,25	0,175	537,33	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	6,842
	<b>2</b>	175,360	3,25	0,175	576,43	3,9584	<b>PROVJERA (%)</b>	0,751
<b>TOCKA MAPA 8</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p1 (bar)</b>	<b>m</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>P_id (kW)</b>	26,580	
	<b>1</b>	20,000	1	0,215	419,41	3,8673	<b>P_stv (kW)</b>	35,678
	<b>2S</b>	142,640	3,41	0,215	543,04	3,8673	<b>Gub (kW)</b>	9,098
	<b>2</b>	184,100	3,41	0,215	585,36	3,9643	<b>PROVJERA (%)</b>	0,745

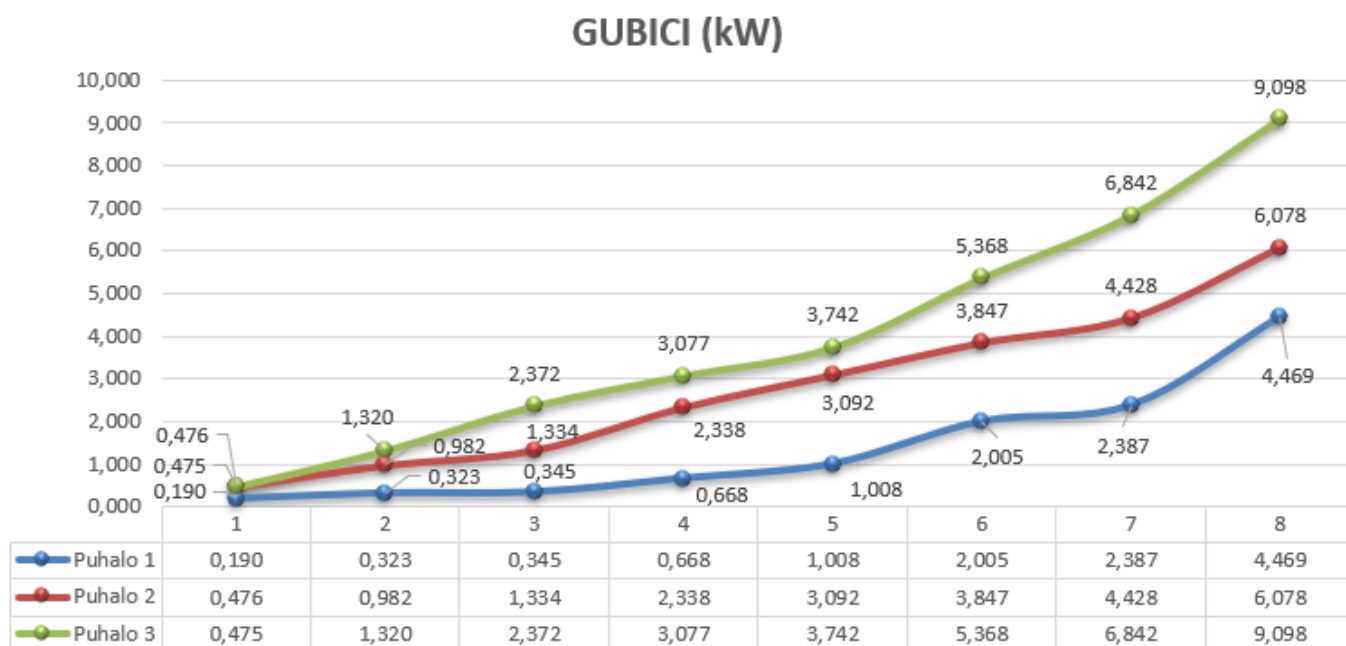
## 7. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA



*Slika 7.1. Grafički prikaz iskoristivosti u %*

Slika 7.1. prikazuje iskoristivost sva tri puhala kroz 8 označenih točaka na radnoj krivulji te se može primijetiti jasan porast iskoristivosti po točkama što ukazuje na poboljšanje učinkovitosti rada puhala s promjenom radnih uvjeta. Porast iskoristivosti odnosno promjena uvjeta rada može biti rezultat bolje prilagodbe puhala drugim uvjetima. Porast iskoristivosti generalno je pokazatelj da puhalo radi unutar ili vrlo blizu svom idealnom režimu rada. Kako se povećava maseni protok, puhalo postiže sve veću iskoristivost koja odgovara njegovim konstrukcijskim rješenjima, a rezultira efikasnijim radom motora.

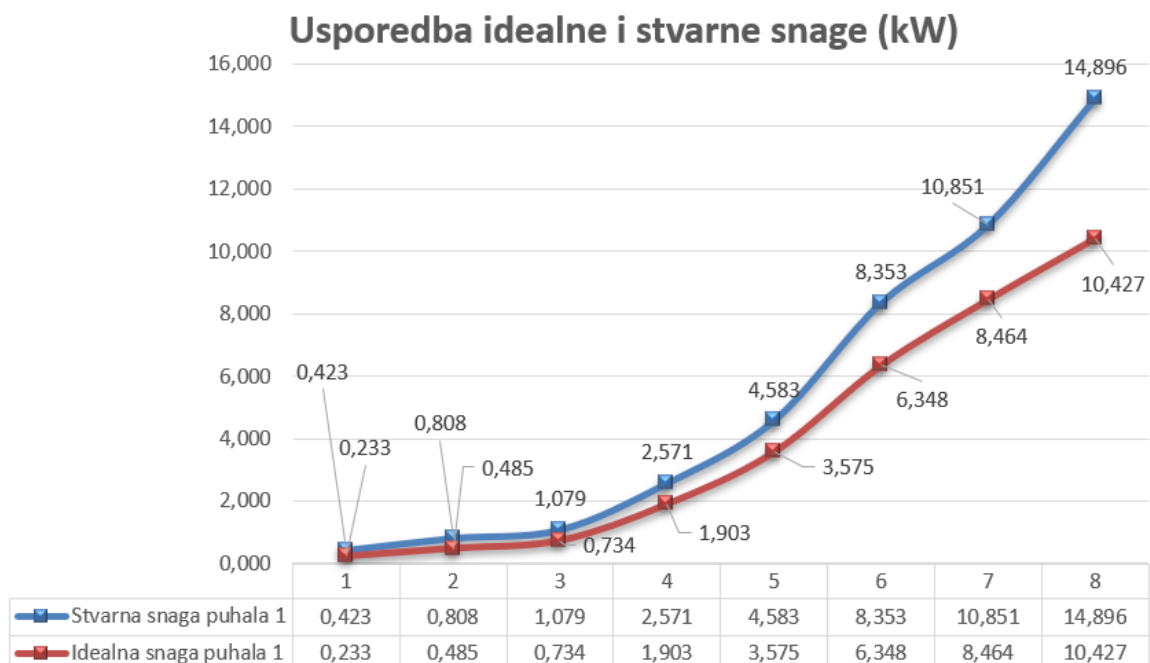
Važno je istaknuti da porast iskoristivosti ne mora uvijek biti u kontinuiranom porastu. Kao što vidimo u točki 6 i točki 8 na slici 7.1. za puhalo 1 (plava krivulja) - pad iskoristivosti je rezultat toga da postoje točke u kojima neće biti poboljšanja rada motora te ovakav graf može uvelike pomoći za precizniju prilagodbu rada puhala u različitim uvjetima, a ujedno i u odabiru najboljeg puhala za određene uvjete rada.



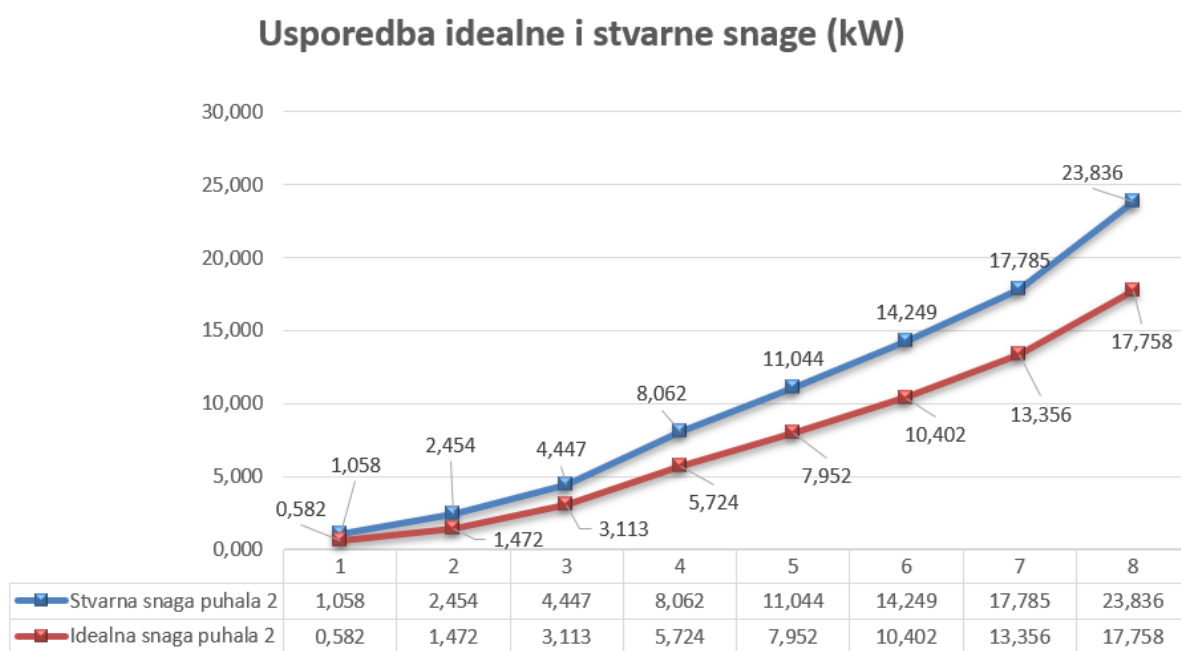
*Slika 7.2. Grafički prikaz gubitaka u kW*

Slika 7.2. prikazuje trend gubitaka energije izražen u kilovatima za osam različitih točaka na mapi za sva tri puhalo. Gubici su izračunati kao razlika između stvarne snage koju puhalo troši u realnim uvjetima rada i idealne snage koja predstavlja teoretsku snagu koju bi puhalo moglo potrošiti u idealnim uvjetima.

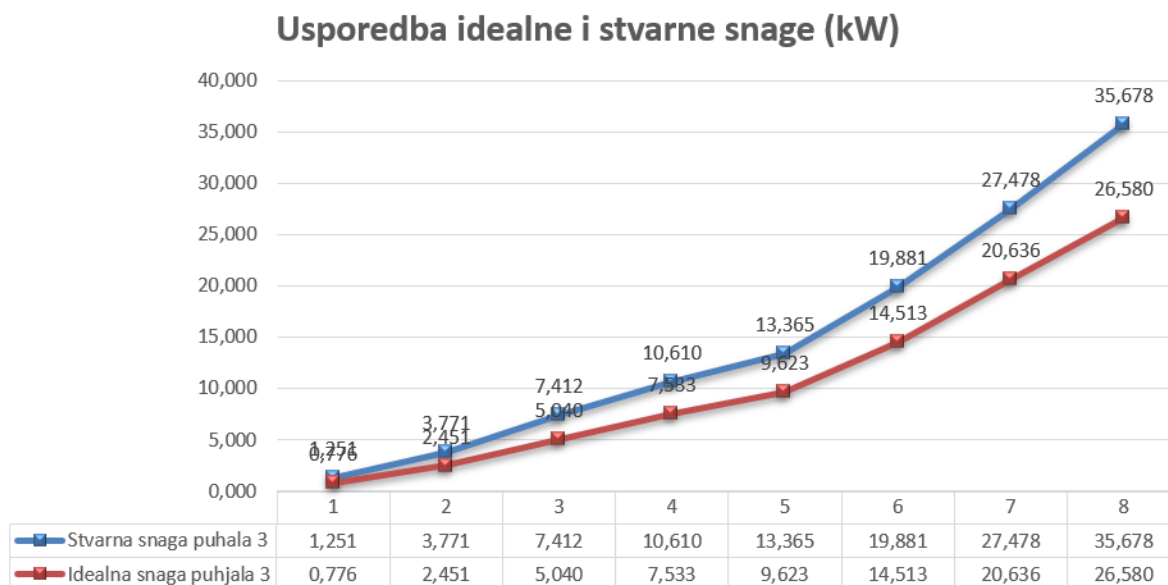
Može se vidjeti kontinuirani porast gubitaka energije – povećanje masenog protoka i radnih tlakova uzrokuje veće gubitke. Početni blagi porast gubitaka može se pripisati postupnom opterećenju puhalo – manje promjene u radnim uvjetima uzrokuju relativno manje gubitke energije. Kako se tlak i protok povećavaju po točkama – tako i gubici značajno rastu. Visoki gubici negativno utječu na radne karakteristike puhalo tako što smanjuju njegovu sposobnost da efektivno komprimira zrak te mogu dovesti do pregrijavanja, povećane potrošnje goriva i u konačnici smanjene snage motora.



*Slika 7.3. Grafička usporedba idealne i stvarne snage za puhalo 1*



*Slika 7.4. Grafička usporedba idealne i stvarne snage za puhalo 2*



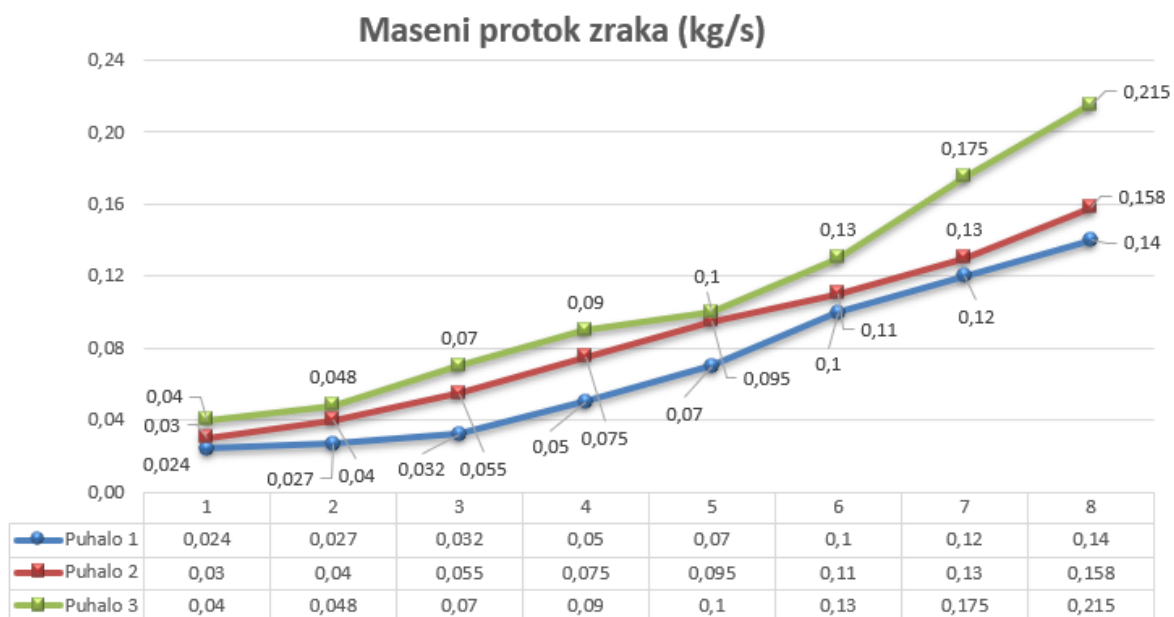
*Slika 7.5. Grafička usporedba idealne i stvarne snage za puhalo 3*

Slike 7.3., 7.4. i 7.5. prikazuju grafičku usporedbu između idealne i stvarne snage za sva tri puhalo izražene u kilovatima kroz osam točaka te pružaju uvid u razlike između teoretskih (idealnih) i stvarnih (realnih) snaga potrebnih za pogon puhalo.

Plava linija na slici 7.3., 7.4. i 7.5. prikazuje stvarnu snagu svakog puhalo kroz svih osam analiziranih radnih točaka te je vidljivo kontinuirano povećanje snage što ukazuje na rastuću potrošnju energije. Crvena linija predstavlja idealnu snagu koja bi bila potrošena u idealnim uvjetima (uvjeti bez energetske gubitke).

U početnim točkama može se primijetiti zanemarivo mala razlika između stvarne i idealne snage što pokazuje da su u tim točkama odnosno pod tim uvjetima iznimno mali gubici puhalo. Kako se radni uvjeti mijenjaju tako razlike između stvarne i idealne snage postaju sve veće, a posebno u točkama 6, 7 i 8 (za sva puhalo) iz čega se može zaključiti da su u tim točkama veliki energetske gubici.

Velike razlike između stvarne i idealne snage govore kako je potrebno dodatno istraživanje uzroka te razlike kao i optimizacija istih kako bi se smanjila razlika odnosno minimizirali gubici koji rezultiraju boljom učinkovitosti rada motora.



*Slika 7.6. Grafička usporedba masenih protoka zraka svih puhala*

Slika grafa 7.6. prikazuje maseni protok zraka u kilogramima po sekundi za tri različita puhala (Puhalo 1, Puhalo 2 i Puhalo 3) kroz osam radnih točaka. Graf omogućava uvid u promjene masenog protoka zraka koje se javljaju pri različitim radnim uvjetima svakog puhala.

Plava linija na slici 7.6. prikazuje puhalo 1 i može se vidjeti relativno umjeren rast masenog protoka zraka s povećanjem broja radne točke, a počinje od 0,024 kg/s pa sve do 0,140 kg/s.

Crvena linija na slici 7.6. koja prikazuje puhalo 2 ima rast masenog protoka zraka počevši od 0,03 kg/s pa sve do 0,158 kg/s. Rast masenog protoka zraka je nešto intenzivniji u usporedbi s Puhalom 1.

Zelena linija na slici 7.6. prikazuje puhalo 3 koje ima najveći početni maseni protok zraka od 0,04 kg/s, a ujedno i najveći završni protok u točki osam od 0,215 kg/s. Puhalo 3 ima najveći raspon masenog protoka zraka iz čega se može zaključiti da ima najveću sposobnost rada u širem rasponu radnih uvjeta.

Sva tri puhala imaju rastući trend masenog protoka zraka što implicira povećanje učinkovitosti i/ili kapaciteta puhala kako se povećava broj radne točke odnosno s promjenom



uvjeta rada motora i puhala. To bi mogla biti posljedica povećanja brzine vrtnje puhala, smanjenja otpora protoka ili promjene u uvjetima okoline.

Povećanje masenog protoka kroz seriju točaka sugerira da su puhala sposobna podnijeti veća opterećenja i moguća je njihova široka upotreba u zahtjevnijim uvjetima. Usporedba masenih protoka različitih puhala može uvelike pomoći u odabiru najprikladnijeg puhala za specifične uvjete koji ovise o potrebnom protoku zraka i radnim uvjetima. Također, praćenje i očitavanje masenog protoka važno je za planiranje održavanja puhala i optimizaciju njegovih postavki kako bi se osiguralo maksimalno iskorištavanje kapaciteta i efikasnosti.

## 8. ZAKLJUČAK

Turbopuhala danas imaju veliki utjecaj na povećanje performansi motora nudeći brojne prednosti kao što su povećanje snage, poboljšanu učinkovitost potrošnje goriva i smanjenje štetnih emisija. Ovi uređaji koriste energiju ispušnih plinova za pokretanje turbokompresora koji povećava tlak usisnog zraka, omogućujući veću gustoću zraka u cilindrima motora. To omogućuje izgaranje veće količine goriva i proizvodnju veće snage. Upotreba turbopuhala posebno je ključna u kontekstu suvremenih ekoloških standarda i potrebe za motorima veće učinkovitosti.

U ovom završnom radu analizirane su performanse tri turbopuhala pod različitim uvjetima rada i opterećenjima. Istraživanje pokazuje kontinuirani porast masenog protoka što upućuje na šire područje rada turbopuhala s prilagodbom operativnih uvjeta. Također, zabilježen je rast energetske gubitaka pri promjeni radnih točaka i povećanju tlaka. Usporedba između teorijskih i realnih vrijednosti snage koju troše puhala ukazuje na sve veće razlike povećanjem tlaka dobave.

Ovakva analiza pruža ključne uvide koji su nužni za razumijevanje dinamike puhala i njegovih ograničenja. Analiziranjem kako puhala reagiraju pri različitim radnim uvjetima, moguće je identificirati ključne točke za poboljšanje dizajna i operativnih procedura. Ovakva vrsta proučavanja je neophodna za unaprjeđenje učinkovitosti puhala što direktno doprinosi poboljšanju ukupne učinkovitosti i performansi motora. Analiza je ključna ne samo za optimizaciju pojedinih komponenti, već i za integraciju turbopuhala kao elementa u modernim motorima koji trebaju zadovoljavati sve strože ekološke i tehničke standarde.

## LITERATURA

- [1] Čotić, S.: "Turbopunjači", s Interneta, <https://www.idm-cotic.com/turbopunjaci>, 23.5.2024.
- [2] Jurina, K.: "Centrifugalni kompresor za male dobave", Repozitorij Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, diplomski rad, 2022
- [3] Mrzljak, V.: Toplinski strojevi i uređaji 1, materijali sa predavanja i vježbi, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2017.
- [4] Wikipedia, "Turbina", s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Turbina>, 23.5.2024.
- [5] Garret Motion INC.: "Turbo Tech: Turbine Housings 101", s Interneta <https://www.garrettmotion.com/news/newsroom/article/turbo-tech-turbine-housings-101-garrett-performance/>, 25.5.2024.
- [6] Grujić V., dipl. ing. mech.: "Čemu služi interkuler?", s Interneta <https://www.mojvolan.com/cemu-sluzi-interkuler/>, 25.5.2024.
- [7] Jović. M.: "Intercooler: hladnjak stlačenog zraka, Viagra za turbomotor", s Interneta <https://autoportal.hr/tehnika/tehnika-intercooler-hladnjak-stlacenog-zraka/>, Tehnika, 12.02.2022.
- [8] Banks Power Tech Articles: "How a turbo wastegate works", s Interneta [https://official.bankspower.com/tech\\_article/how-a-turbo-wastegate-works/](https://official.bankspower.com/tech_article/how-a-turbo-wastegate-works/), 26.5.2024.
- [9] GCG Turbochargers Australia Pty Ltd.: "Internal and External Wastegates", s Interneta, <https://gcg.com.au/turbopedia-turbo-knowledge-base-details/Internal-and-External-Wastegates-news.html>, 2022.
- [10] Tehnical F1 Dictionary: "Turbocharger", s Interneta, <https://www.T.net/turbocharger.html>, 28.5.2024.
- [11] Ćorić, Z. "Analiza havarije turbopunjača gospodarskog vozila", Sveučilište u Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2024.
- [12] Vrcan Ž.: Nastavni materijal iz kolegija Konstrukcijski elementi II, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 29.5.2024.
- [13] Nepoznati autor: "How does the oil injector work in a turbine oil system?", s Interneta, <https://www.quora.com/How-does-the-oil-injector-work-in-a-turbine-oil-system>, 2016.
- [14] Sealand Turbo-Diesel Asia: "What are electronic unit injectors and how do they

- work?", s Interneta, <https://www.slturbodiesel.com/what-are-electronic-unit-injectors-and-how-do-they-work/>, 2022.
- [15] Handa, G.; Denton, B.; Rengarajan, S.; Chadwell, C.: "Utilizing One-Way Valve to Optimize Turbocharger Performance on a Blended EGR Engine", Ožujak 2021.
- [16] CPV Manufacturing: "Symptoms of a Failing Valve and How to Prevent It", s Interneta, <https://www.cpvvmfg.com/news/symptoms-of-failing-valve-and-how-to-prevent/>, 29.5.2024.
- [17] Auto DITEX: "BOOST PRESSURE SENSOR (BPS)", s Interneta, <https://autoditex.com/page/boost-pressure-sensor-bps-24-1.html>, 30.5.2024.
- [18] Auto DITEX: "Air Temperature Sensor (ATS)", s Interneta, <https://autoditex.com/page/air-temperature-sensor-ats-10-1.html>, 30.5.2024.
- [19] Sesar, I.: "Mogućnost povećanja snage motora s prednabijanjem", Repozitorij završnih radova Veleučilišta u Šibeniku, 14.6.2024.
- [20] Mrzljak, V.: "Motori", materijali sa predavanja i vježbi, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2022.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Presjek turbopuhala.....	10
Slika 2.2. Međuhladnjak i njegov položaj.....	13
Slika 2.3. Unutarnji (lijevo) i vanjski (desno) wastegate ventil.....	15
Slika 2.4. Klizni (a) i kuglični (b) ležajevi turbopuhala.....	17
Slika 3.1. Nepovratni ventil.....	20
Slika 4.1. Shematski prikaz spoja turbine i puhala preko vratila.....	23
Slika 5.1. Radno polje puhala.....	27
Slika 6.1. Radno polje puhala za 1 - VW 1.9L/2.0L TDI.....	29
Slika 6.2. Idealni i stvarni proces povećanja tlaka zraka puhalom u h-s dijagramu.....	31
Slika 6.3. Izračunate vrijednosti u REFPROP programu.....	35
Slika 6.4. Radno polje puhala 2 – GM Colorado 2014-2019 2.8L.....	37
Slika 6.5. Radno polje puhala 3 – Ford Ranger 2011-2021 i 2011-2020 Mazda 3.2L.....	40
Slika 7.1. Grafički prikaz iskoristivosti u %.....	43
Slika 7.2. Grafički prikaz gubitaka u kW.....	44
Slika 7.3. Grafička usporedba idealne i stvarne snage za puhalo 1.....	45
Slika 7.4. Grafička usporedba idealne i stvarne snage za puhalo 2.....	46
Slika 7.6. Grafička usporedba masenih protoka zraka svih puhala.....	47

## POPIS TABLICA

Tablica 6.1. Očitane vrijednost s mape puhala 1.....	30
Tablica 6.2. Izračunate vrijednosti za točku 1 na mapi puhala 1.....	34
Tablica 6.3. Potpuni izračun i očitavanja za puhalo 1.....	36
Tablica 6.4. Očitane vrijednost s mape puhala 2.....	38
Tablica 6.5. Potpuni izračun i očitavanja za puhalo 2.....	39
Tablica 6.6. Očitane vrijednost s mape puhala 3.....	41
Tablica 6.7. Potpuni izračun i očitavanja za puhalo 3.....	42

## POPIS OZNAKA

$p$	Tlak	bar
$W$	Rad	J
$T$	Temperatura	K
$m$	Maseni protok	kg/s
$h$	Specifična entalpija	kJ/kg
$s$	Specifična entropija	kJ/kgK
$c_p$	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku	kJ/kgK
$\eta$	Iskoristivost	%
$P_{id}$	Idealna snaga	kW
$P_{stv}$	Stvarna snaga	kW
Gub	Gubici	kW
1	Početno stanje	bar, K
2 <sub>s</sub>	Stanje nakon adijabatske kompresije zraka	bar, K
2	Stanje nakon politropske kompresije zraka	bar, K

## SAŽETAK

U ovom završnom radu izvršena je analiza triju puhala s različitim karakteristikama te u različitim uvjetima rada. Pomoću grafičke analize dobivenih rezultata uočen je postupni rast masenog protoka što ukazuje na povećanje kapaciteta puhala s promjenom radnih uvjeta. Također, uočeno je da gubici energije imaju pozitivan trend s promjenom radne točke odnosno s povećanjem tlaka. Usporedba idealne i stvarne snage ukazuje na sve veću nejednakost između teorijske i stvarne vrijednosti snage s povećanjem brzine vrtnje turbopuhala te to može ukazati na aerodinamičke i termalne neefikasnosti puhala pri visokim radnim režimima. Ova analiza pruža ključne uvide za razumijevanje kako treba razmišljati ako se želi ići prema poboljšanju dizajna, operativnih procedura, uvjeta rada, a sve u svrhu minimiziranja gubitaka i povećanja efikasnosti puhala.

**KLJUČNE RIJEČI:** Turbopuhalo, turbokompresor, prednabijanje, radno polje puhala, kompresija zraka



## **SUMMARY**

In this thesis, an analysis of three blowers with different characteristics and under varying operating conditions and loads was conducted. A graphical comparison of the obtained results revealed a positive increase in mass flow rate, indicating an increase in blower capacity with changes in operating conditions. Additionally, it was observed that energy losses exhibit exponential growth with changes in the operating point, i.e., with increasing pressure. The comparison between ideal and actual power indicates an increasing disparity between the theoretical and actual power values with an increase of the rotation speed, which may suggest aerodynamic and thermal inefficiencies in the blowers at high operating conditions. This analysis provides key insights for understanding how to think about improvements in design, operational procedures, and working conditions, all aimed at minimizing losses and increasing blower efficiency.

**KEYWORDS:** Turbocharger, turbocompressor, turbocharging, blower operating field, air compression