

# Održavanje optimalnih mikroklimatskih uvjeta u putničkom zrakoplovu

---

**Mateković, Željko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:737414>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-19**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Željko Mateković**

Zagreb, 2019 godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Marino Grozdek, dipl. ing.

Student:

Željko Mateković

Zagreb, 2019 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Željko Mateković



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Željko Mateković**

Mat. br.: **0035107470**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Održavanje optimalnih mikroklimatskih uvjeta u putničkom zrakoplovu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Maintaining optimum environmental conditions in civil transportation aircraft**

Opis zadatka:

Za potrebe održavanja mikroklimatskih uvjeta putnika i posade u zrakoplovima koriste se klimatizacijski sustavi bitno drugačiji nego je to slučaj u području zgradarstva ili vozilima u cestovnom prometu.

U okviru završnog rada potrebno je obraditi klimatizacijske sustave za održavanje optimalnih mikroklimatskih uvjeta u putničkom i kabinskom dijelu zrakoplova.

U radu je potrebno posebno obraditi:

1. Važeće propise i norme kojima se definiraju mikroklimatski uvjeti u putničkom i kabinskom dijelu zrakoplova vezano uz:
  - o sustav ventilacije,
  - o sustav održavanja pritlaka,
  - o način održavanja željene temperature i vlage.
2. Prikazati metodologiju proračuna (potrebna količina svježeg zraka, termodinamički proračun) kao podlogu za dimenzioniranje uređaja i opreme za održavanje optimalnih mikroklimatskih uvjeta.
3. Detaljno opisati naprave i uređaje za osiguravanje optimalnih mikroklimatskih uvjeta s obzirom na njihov način izvedbe.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Napomena: Svi potrebni podaci i parametri za izradu rada bit će dogovoreni s mentorom.

Zadatak zadan:

6. svibnja 2019.

Rok predaje rada:

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2019.

**3. rok:** 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2019.

**3. rok:** 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Marino Grozdek

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS OZNAKA .....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	V
1. UVOD.....	1
2. UTJECAJ MIKROKLIMATSKIH OKOLIŠNJIH UVJETA NA FIZIOLOŠKA STANJA ČOVJEKA .....	4
2.1. Sastav atmosfere .....	5
2.2. Vanjski uvjeti .....	5
2.3. Mikroklimatski uvjeti unutra trupa zrakoplova .....	7
2.3.1. Tlak .....	7
2.3.2. Ventilacija .....	9
2.3.3. Temperatura .....	13
2.3.4. Relativna vlaga.....	13
3. [5] [6] [7] VAŽEĆI PROPISI I NORME ZA DEFINIRANJE MIKROKLIMASKIH UVJETA U PILOTSKOM I KABINSKOM DIJELU ZRAKOPLOVA .....	14
3.1. [7] EASA CS-25.831 Ventilacija i grijanje .....	16
3.2. [7] EASA CS-25.832 Koncentracija ozona kabini .....	18
3.3. [7] EASA CS-25.841 Održavanje pretlaka u kabini zrakoplova .....	19
4. PRORAČUN KLIMATIZACIJE .....	21
4.1. Projektni uvjeti .....	21
4.2. Izračun toplinskih opterećenja .....	25
4.2.1. Konvektivno toplinsko opterećenje .....	25
4.2.2. Solarno toplinsko opterećenje .....	26
4.2.3. Toplinsko opterećenje od ljudi.....	27
4.2.4. Toplinsko opterećenje od uređaja i opreme .....	28
4.3. Proračun ventilacije trupa zrakoplova.....	29
4.3.1. Proračun ventilacije na osnovu unutarnje kontaminacije zraka.....	29
4.3.2. Recirkulacija zraka.....	31
5. OPIS ECS SUSTAVA.....	33
5.1. Klimatizacijski uređaji za klimatizaciju velikih zrakoplova, sa zrakom kao radnim medijem.....	33
6. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40
PRILOZI.....	41

**POPIS SLIKA**

Slika 1	ICAO – međunarodna standardna atmosfera [1].....	1
Slika 2	ISA Međunarodna standardna atmosfera [2].....	2
Slika 3	Promjena okolišne temperature u zavisnosti od nadmorske visine [3] .....	4
Slika 4	Utjecaj hipoksije u zavisnosti od nadmorske visine [2].....	6
Slika 5	Brzina nastanka hipoksije sa visinom .....	6
Slika 6	Zavisnost atmosferskog tlaka od nadmorske visine [4] .....	7
Slika 7	Koncentracija O <sub>3</sub> u zavisnosti od nadmorske visine [4].....	10
Slika 8	Presjek trupa zrakoplova sa prikazom sustava ventilacije [4].....	11
Slika 9	Shematski prikaz ventilacijskog sustava zrakoplova; A-bez recirkulacije zraka, B sa recirkulacijom zraka [4].....	12
Slika 10	Promjena atmosferskog tlaka u zavisnosti od nadmorske visine [8].....	21
Slika 11	Gustoća okolišnog zraka u zavisnosti od nadmorske visine [8].....	22
Slika 12	ISA - Vanjska projektna temperatura u zavisnosti od nadmorske visine [8] .....	23
Slika 13	Temperaturna odstupanja u odnosu na osnovni ISA model temperature [8].....	24
Slika 14	Intenzitet sunčevog zračenja u zavisnosti od nadmorske visine [10].....	27
Slika 15	Regulacija pritiska u zavisnosti od visine leta [8] .....	31
Slika 16	Osnovne karakteristike ventilacijskih sustava za pojedine tipove zrakoplova [4]	32
Slika 17	Shematski prikaz ECS sustava [3].....	33
Slika 18	Tipični smještaj klimatizacijskih uređaja u trupu zrakoplova i kontrolnih uređaja u kokpitu [3] .....	35
Slika 19	Regulacija temperature u trupu zrakoplova [8].....	36
Slika 20	– T,S dijagram stanja zraka ECS sustava klimatizacije zrakoplova [11].....	38

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$T_{amb}$	K (°C)	Temperatura okolišnjeg zraka
$T_s$	K (°C)	Temperatura oporavka
$T_c$	K (°C)	Temperatura zraka u trupu zrakolova
$A$	m <sup>2</sup>	Površina vanjskih vanjskih stjenki
$A_{ef}$	m <sup>2</sup>	Efektivna površina staklenih prozora
$\Phi$	W	Toplinski tok
$k$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline
$m_{sa}$	kg/s	Maseni protok dobavnog zraka
$m_o$	kg/s	Maseni protok svježeg zraka
$cp$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet zraka
$D_c$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća kontaminacije unutrašnjeg izvora onečišćenja zraka
$D_o$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća kontaminacije u vanjskom svježem dobavnom zraku
$S$	kg/s	Snaga izvora kontaminacije
$V$	m <sup>3</sup> /s	Volumen svježeg dobavnog zraka
$C_c$	ppm	Udio onečišćenja u unutrašnjem zraku
$C_o$	ppm	Udio onečišćenja u vanjskom zraku
$MW_a$	g/mol	Molekularna masa zraka
$MW$	g/mol	Molekularna masa onečišćača zraka
$p$	Pa	Tlak zraka
$\varphi$	%	Relativna vlaga zraka
$\Phi (z)$	W/m <sup>2</sup>	Intenzitet sunčevog zračenja



## **SAŽETAK**

U okviru ovog rada opisat će se sustavi i uređaji za održavanje optimalnih mikroklimatskih uvjeta unutar putničkog i kabinskog dijela trupa velikih putničkih zrakoplova.

Pod terminom optimalnih mikroklimatskih uvjeta, razmatrat će se fizikalne veličine temperatura, vlaga i tlak zraka, te dobava svježeg zraka i/ili kisika za održavanje komfornih unutarnjih uvjeta u putničkom i kabinskom dijelu zrakoplova.

Kako bi se postigli komforni uvjeti za boravak ljudi u trupu zrakoplova, a zavisno od različitih atmosferskih uvjeta u kojima se nalazi zrakoplov, u daljnjem tekstu su prikazani su načini za izračun, norme i preporuke za odabir sustava i uređaja.

Ključne riječi: temperatura zraka, vlaga zraka, tlak zraka, svježi zrak, kisik

## **SUMMARY**

In the scope of this study will be describe systems and equipment for maintaining optimal microclimate conditions in the aircraft part provided for passengers and cabin crew in commercial aircraft.

Under the term of optimal microclimatic conditions are taken into consideration air temperature, humidity, air pressure and fresh air and / or oxygen supply to maintain comfortable conditions in the aircraft section for passengers and cabin crew.

In order to meet the comfortable conditions in the part of the aircraft intended for passengers and cabin crew, in the furthure text are shown calculations, standards and recommendations for selecting systems and equipment, depending on the outside environment of the aircraft.

Key words: air temperature, air humidity, air pressure, fresh air, oxygen

## 1. UVOD

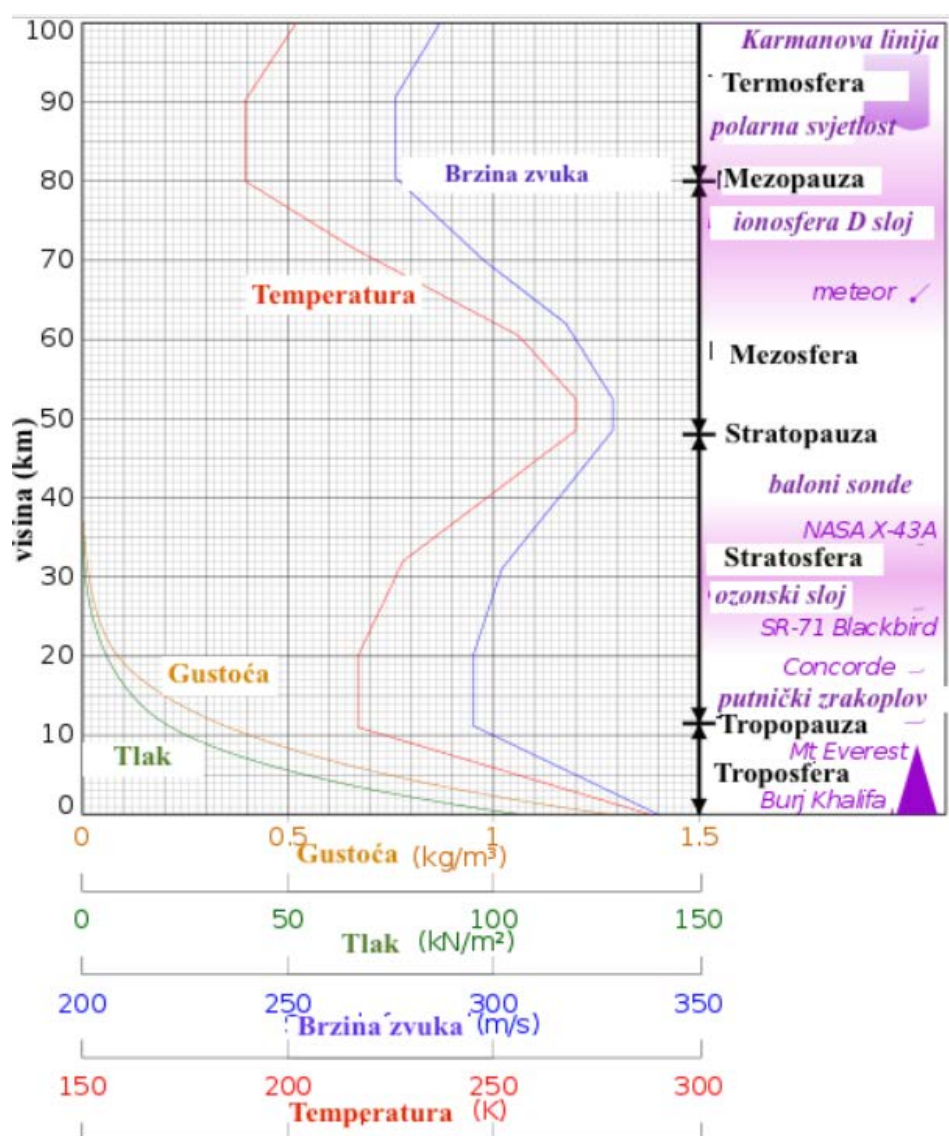
Osnovna namjena komercijalnih putničkih zrakoplova je prijevoz putnika na siguran i komforan način od točke polazišta do točke odredišta. Vanjski okolišnji uvjeti koji djeluju na zrakoplov za vrijeme stajanke, polijetanja, krstarenja i slijetanja bitno se mijenjaju u relativno kratkom vremenu. Vanjska temperatura zraka mijenja se u rasponu od  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  do preko  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , okolišnji tlak zraka mijenja se u rasponu od 10,1 kPa do 101 kPa, te vanjska relativna vlaga zraka od približno 0% do 100%.

Slika 1. [1] Međunarodna standardna atmosfera = idealizirani model atmosfere koji se koristi za različite proračune u meteorološkoj i zrakoplovnoj praksi - MSA je definirana (prema ICAO - International Civil Aviation Organization) slijedećim parametrima stanja na srednjoj morskoj razini: atmosferski tlak na g.š. 450 iznosi 1013,25 hPa, temperatura zraka 15,00, gustoća zraka  $1,225\text{ kg/m}^3$ , vertikalni temperaturni gradijent do visine 11 000 m je  $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ .

Tlak zraka hPa	Visina m	Temperatura zraka/ $^{\circ}\text{C}$	Gustoća zraka/ $\text{kg m}^{-3}$
25	25 029	- 51,5	0,040
50	20 576	- 55,9	0,080
100	16 180	- 56,5	0,161
200	11 784	- 56,5	0,322
300	9 164	- 44,6	0,457
500	5 574	- 21,2	0,691
700	3 012	- 4,6	0,908
850	1 457	5,5	1,063
900	988	8,6	1,113
1 000	111	14,3	1,212
1 013,25	0	15,0	1,225

Slika 1 ICAO – međunarodna standardna atmosfera [1]

Slika 2. [2] prikazuje Međunarodna standardna atmosfera ili ISA (akronim od engl. International Standard Atmosphere) je međunarodno prihvaćen model stanja Zemljine atmosfere (od 1920.) i okomite raspodjele temperature i tlaka zraka, do 90 kilometara visine, koja se uzima kao svjetski prosjek vrijednosti tih veličina. Model polazi od pretpostavke da u atmosferi vrijede zakoni za idealne plinove i da je odstupanje svojstava realnih atmosferskih plinova od svojstava idealnoga plina maleno. Do danas se nekoliko puta prilagođavala točnijim mjerenjima, pogotovo na većim visinama.



Slika 2 ISA Međunarodna standardna atmosfera [2]

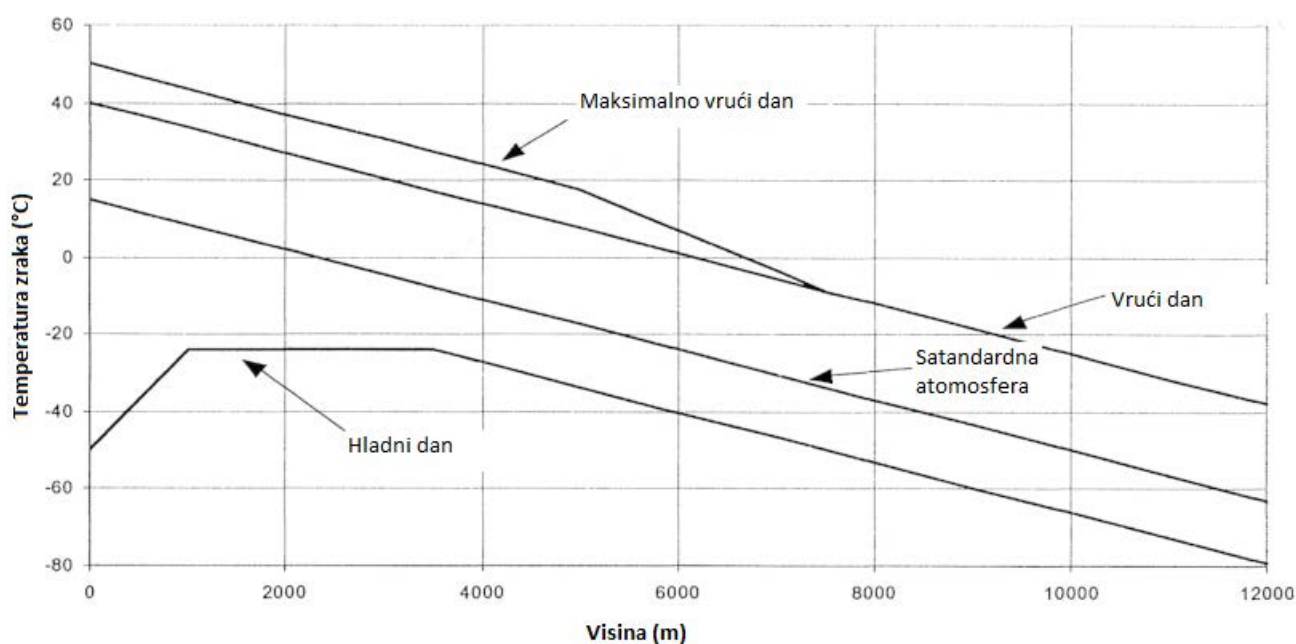
Kako bi se osigurali zahtjevi za održavanje komfornih i sigurnosnih uvjeta bitnih za zdravlje putnika i posade unutar zrakoplova pod utjecajem navedenih ekstremnih okolišnih uvjeta, sustavi održavanja mikroklimatskih uvjeta u putničkim zrakoplovima jedni su od ključnih sustava u putničkim zrakoplovima.

„Environmental control system (ECS)“ je termin koji je opće prihvaćen u stranoj literaturi za sustave za održavanje unutarnjih mikroklimatskih uvjeta u zrakoplovu je, tako da ćemo i mi u daljnjem tekstu za sustave održavanja mikroklimatskih uvjeta koristiti kraticu ECS.

Unutar ovog rada opisat će se važne funkcije i komponente ECS sustava za zadovoljavanje komfornih i sigurnosnih uvjeta u trupu zrakoplova, regulacija temperature, vlage, ventilacije i tlaka zraka.

## 2. UTJECAJ MIKROKLIMATSKIH OKOLIŠNJIH UVJETA NA FIZIOLOŠKA STANJA ČOVJEKA

Tijekom operativnog vremena zrakoplovi prolaze kroz veoma različite klimatske okolišne uvjete. Kako je prikazano na slici 3., okolišna temperatura u kojoj se nalazi zrakoplov može varirati od + 50 °C kad se zrakoplov nalazi na stajanki za vrijeme ukrcavanja putnika, do temperature od -60 °C i niže za vrijeme krstarenja na visini od 11000 m.



Slika 3 Promjena okolišne temperature u zavisnosti od nadmorske visine [3]

Osim temperature drastično se mijenja i okolišni tlak zraka u zavisnosti od visine na kojoj se nalazi zrakoplov. Tako da na visini od 11000 m atmosferski tlak zraka iznosi 226,2 mbar.

Gore navedeni klimatski uvjeti jako su nepovoljni za komfor i zdravlje ljudi, odnosno ljudi u takvim uvjetima ne mogu boraviti bez dodatnih regulacijskih sustava ili zaštitne opreme.

## 2.1. Sastav atmosfere

Atmosfera je plinski omotač koji okružuje zemlju sastavljen od smjese različitih plinova. Standardno postotni udjeli plinova koji tvore atmosferu su 78% dušik, 21% kisik, dok preostalih 1% zauzimaju svi ostali plinovi. Najvažniji utjecaj na fizikalni i kemijski sastav atmosfere ima sunčevo toplinsko zračenje i gravitacije zemlje. Sa povećanjem nadmorske maseni udio plinova u atmosferi se bitno smanjuje, dok postotni udjeli ostaju nepromijenjeni. Specifična gustoća zraka na visini mora iznosi  $1,2 \text{ kg/ m}^3$ , dok sa povećanjem nadmorske visine specifična gustoća zraka pada eksponencijalno sa visinom. Na nadmorskoj visini od 5500 m specifična gustoća zraka je upola manja od gustoće na nadmorskoj visini, dok je na visini od 11000 m gustoća zraka jednaka  $1/4$  gustoće zraka na nadmorskoj visini.

Sa povećanjem visine atmosferski tlak zraka eksponencijalno opada, tako da na visini od 5000 m atmosferski tlak smanjuje se na 50% od tlaka zraka na razini mora.

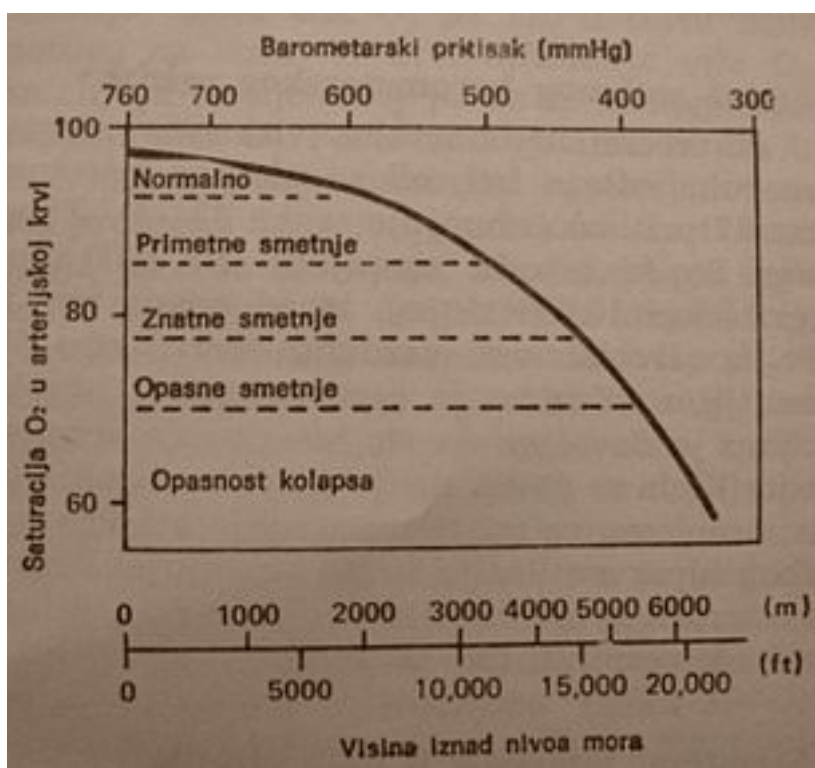
## 2.2. Vanjski uvjeti

Visinska granica u kojoj je još uvijek dovoljna razina kisika u zraku za održavanje normalnih fizioloških potreba ljudi bez potrebnih posebnih uređaja ili zaštitne opreme iznosi 3000 m iznad visine mora i naziva se fiziološka zona atmosfere ili zona potpune kompenzacije.

U plućima čovjeka parcijalni tlak vodene pare i ugljikovog dioksida iznosi 87 mmHg. Na osnovu navedene visine parcijalnog tlaka u plućima, okolišnim uvjetima gdje je tlak zraka jednak ili niži od 87 mmHg čak i u slučaju da je zrak sastavljen od 100% kisika, više nije moguće disanje iz razloga što je okolišni tlak koji dovodi kisik u aveole pluća jednak ili manji okolišnom tlaku. Na nadmorskoj visini od 15000 m, atmosferski tlak iznosi 87 mmHg, te je to ujedno i funkcionalna granica atmosfere, jer iznad te visine više nije moguće održavanje života bez posebnih uređaja ili zaštitne opreme.

U ljudskom organizmu na temperaturi  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , tlak vodene pare iznosi 47 mmHg, što znači da u okolišnom stanju u kojem je tlak zraka jednak ili manji 47 mmHg u ljudskom organizmu dolazi do vrenja tjelesnih tekućina. Na nadmorskoj visini od 19350 m atmosferski tlak iznosi 47 mmHg. Nadmorska visina od 19000 m je sljedeća visinska granica i naziva se Armstrongova funkcionalna granica.

Slika 4, efekt hipoksije na različitim nadmorskim visinama uvjetovan je smanjenjem parcijalnog tlaka kisika u udahnutom zraku.



Slika 4 Utjecaj hipoksije u zavisnosti od nadmorske visine [2]

[2] Prema brzini nastajanja, hipoksija može biti : Akutna, postepena i perakutna, a kao poseban oblik perakutne hipoksije je eksplozivna (dekompresijska) hipoksija koja nastaje kada se u vremenu manjem od 1 sekunde parcijalni tlak atmosferskog zraka smanji na 100 mm stupca, a srećemo je u zrakoplovstvu i kozmonautici zbog narušavanja hermetičnosti kabinskog prostora (eksplozivna dekompresija) i u eksperimentalnim uvjetima na ljudima i životinjama u dvokomornim hipobaričnim barokomorama.

Visina u metrima	Zadesna hipoksija	Eksplozivna dekompresija
6.706	10 min	5 min
7.620	3 min	2 min
10.644	75 sec	30 sec
12190	30 sec	23 sec
16.760	15 sec	15 sek

Slika 5 Brzina nastanka hipoksije sa visinom



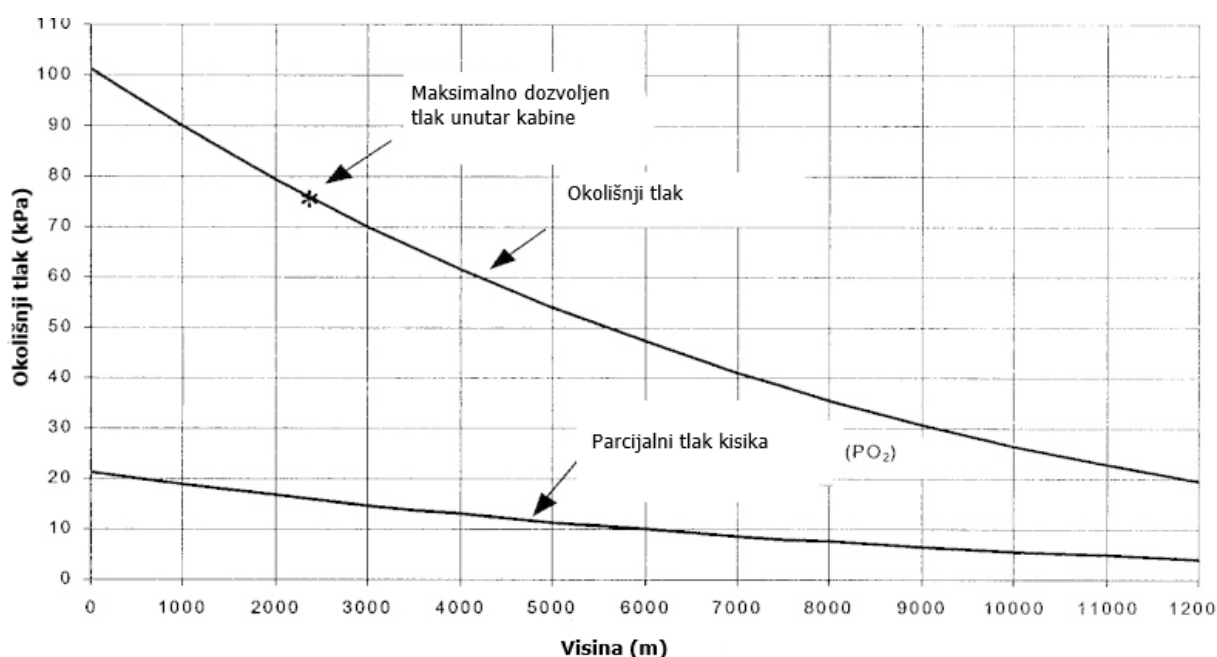
## 2.3. Mikroklimatski uvjeti unutra trupa zrakoplova

### 2.3.1. Tlak

Tijekom leta zrakoplova, ECS sustav komprimira okolišni zrak niskog tlaka i distribuira ga u unutrašnjost trupa zrakoplova čime se u trupu zrakoplova održava se pretlak zraka u odnosu na okolišni tlak zraka, a samim time i parcijalni tlak kisika unutar granica prihvatljivih za zdravlje i komfor ljudi koji se nalaze u zrakoplovu.

Tlak zraka u trupu zrakoplova iskazuje se kao ekvivalent nadmorske visine, odnosno kao udaljenost iznad razine mora na kojoj atmosfera vrši isti tlak kao stvarni tlak u kabini zrakoplova.

Visina tlaka u kabini je statički tlak mjeren unutar trupa pod tlakom koji predstavlja ekvivalentni apsolutni statički tlak okoline na određenoj nadmorskoj visini za određeni standardni dan ili uvjete referentnog dana.



Slika 6 Zavisnost atmosferskog tlaka od nadmorske visine [4]

[4] Minimalni tlak u kabini reguliran je Federalnom zrakoplovnom uredbom (FAR) 25, koja zahtijeva da sustav regulacije tlaka "osigura normalnu visinu tlaka zraka u kabini koja odgovara tlaku zraka na nadmorskoj visini od 8000 ft [2.440 m]" u normalnim radnim uvjetima.

Ta granica od 2.440 m (8.000 ft) odgovara tlaku zraka u kabini od 75 kPa (10,9 psi) kao što je prikazano na Slici 6. Stoga se tlak u kabini može kretati od najviše 101 kPa (14,7 psi) na tlu na razini mora do minimalno 75 kPa (10,9 psi) u letu, bez obzira na visinu na kojoj zrakoplov leti.

Primarna svrha pretlaka u kabini zrakoplova je održavanje parcijalnog tlaka kisika ( $PO_2$ ) na prihvatljivim razinama. Slika 6. pokazuje da vrijednosti  $PO_2$  na razini mora i na nadmorskoj visini od 2.440 m (8.000 ft) iznose 21 kPa (3.1 psi) i 16 kPa (2.3 psi). Odnosno, najmanji dopušteni  $PO_2$  u kabini zrakoplova na najmanjoj dopuštenoj visini tlaka zraka u kabini zrakoplova od 2.440 m (8.000 ft) iznosi 74% vrijednosti morske razine.

Pored regulacije tlaka zraka za održavanje potrebnog  $PO_2$  u kabini, ECS mora spriječiti brze promjene tlaka u kabini. Brze promjene tlaka mogu uzrokovati promjene u volumenu zauzetih plinovima u tjelesnim šupljinama i uzrokovati nelagodu. Kontrola brzine promjene tlaka posebno je važna tijekom promjene visine leta zrakoplova. [4] Tijekom normalnog rada, brzina promjene visine tlaka u kabini ograničena je na vrijednosti ne više od 5 m / s (oko 1000 ft / min), protuvrijednosti razine mora tijekom uspona i 2,3 m / s (450 ft / min) tijekom spuštanja zrakoplova.

Regulacija pretlaka unutar trupa zrakoplova vrši se prestrujnim ventilima koji mogu raditi u automatskom režimu ali također mogu biti i ručno upravljani putem kontrola smještenih u kokpitu zrakoplova.

Iz razloga konstrukcijskih i strukturalnih ograničenja zrakoplova, razlika između okolišnog tlaka zraka i tlaka zraka u trupu zrakoplova ograničena je na vrijednosti između 55–62 kPa (8–9 psi). Međusobni odnosi visine leta, tlaka zraka u kabini i strukturalnog opterećenja zrakoplova, ujedno određuju i maksimalnu visinu na kojoj pojedini zrakoplov može letjeti.

### 2.3.2. Ventilacija

Kod projektiranja sustava ventilacije zrakoplova postoje četiri važna uvjeta koji se moraju ispuniti u dijela trupa zrakoplova namijenjenom za boravak ljudi: protok vanjskog zraka potreban za uklanjanje onečišćenja iz kabine, protok kondicioniranog zraka potreban za uklanjanje topline iz kabine, ukupni protok količina zraka potrebna za osiguravanje odgovarajuće cirkulacije u kabini i protok vanjskog zraka potreban za održavanje pretlaka. Sustavom ventilacije zrakoplova, dovodi se komprimirani vanjski okolišni zrak, te se odvodi onečišćeni zrak iz trupa zrakoplova. Ukupan broj izmjena zraka ima direktan utjecaj na kvalitetu unutrašnjeg zraka i koncentraciju onečišćenja u trupu zrakoplova.

[4] Odrasla osoba u sjedenju troši kisik u količini od približno 0,44 g / min (0,001 lb / min) (Nishi 1981). Minimalna količina dobave svježeg zraka regulirana je propisom FAR 25 i iznosi 0,25 kg / min (0,55 lb / min) po putniku, te količinom kisika od 0,058 kg / min (0,127 lb / min) po osobi.

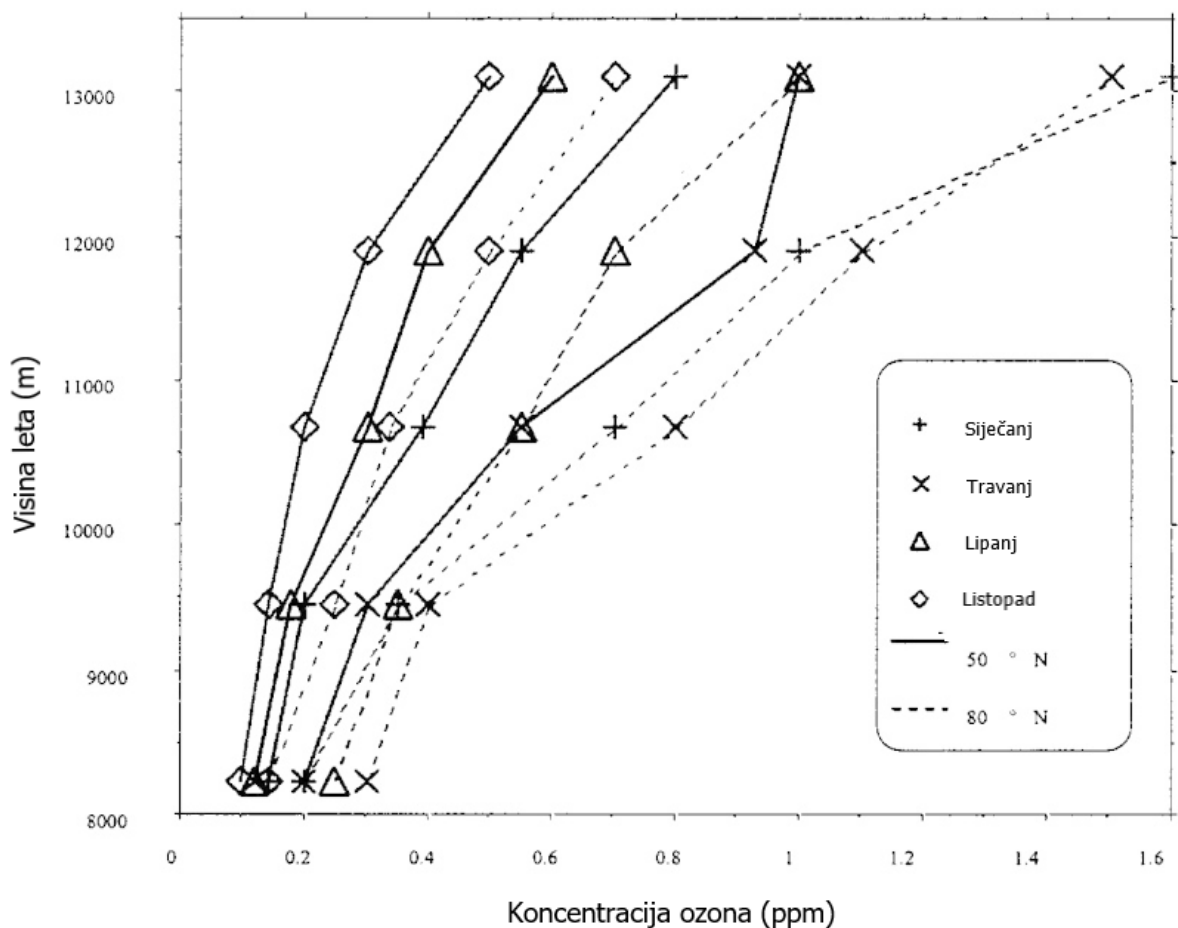
Uzroci onečišćenja unutrašnjeg zraka u trupu zrakoplova mogu biti vanjski i unutrašnji. Koncentracija onečišćenja unutrašnjeg zraka u trupu zrakoplova, ovisi o fluktuacijama izvora onečišćenja i broju izmjena zraka u trupu zrakoplova.

Promjenom broja izmjena zraka možemo utjecati na kvalitetu zraka u trupu ukoliko je izvor onečišćenja zraka unutar trupa. Ukoliko je izvor onečišćenja zraka u okolišnom zraku koji dovodimo u zrakoplov, tada se brojem izmjena zraka u trupu zrakoplova ne može postići zadovoljavajuća kvaliteta zraka.

Vanjski onečišćivači zraka koji se putem sustava ventilacije mogu dovesti u trup zrakoplova su ozon O<sub>3</sub>, te pare ulja sa kompresora motora.

[4] Na velikim nadmorskim visinama, posebno na velikim zemljopisnim širinama, koncentracija O<sub>3</sub> u vanjskom zraku može biti znatno viša od koncentracije koja je regulirana prema FAR 25 a iznosi 0,25 ppm volumena u bilo kojem trenutku iznad 32 000 ft (9,800 m ) ili iznad prosječno ponderiranog prosjeka od 0,1 ppm tijekom bilo kojeg leta od 3 sata iznad (8,200 m) iznad 27 000 ft. Stoga se za regulaciju koncentracije ozona O<sub>3</sub> u dobavnom zraku, u sklopu ECS sustava koristi katalitičko uništavanje O<sub>3</sub>. Koncentracije O<sub>3</sub> na 84% intervala pouzdanosti gornje granice, kao funkcija nadmorske visine, za odabrane mjesece i

zemljopisne širine. Koncentracija 0,1 ppm odgovara  $200 \mu\text{g} / \text{m}^3$ , gdje se volumen određuje na tlaku na razini mora, a temperatura je  $20^\circ \text{C}$ . Izvor: Podaci iz SAE (2000).

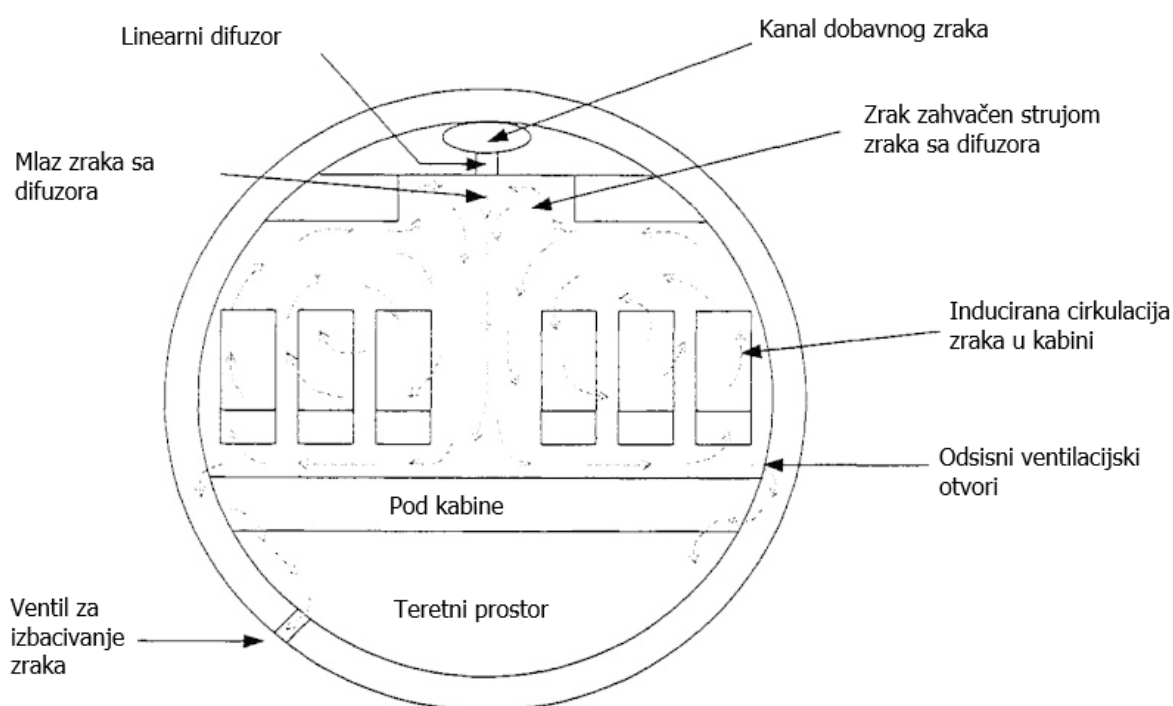


Slika 7 Koncentracija  $\text{O}_3$  u zavisnosti od nadmorske visine [4]

Izvori onečišćenja zraka unutar trupa zrakoplova povezani s putnicima i posadom pojavljuju se u obliku bio otpada, virusa, bakterija, alergena i spora; ti se izvori onečišćenja ispuštaju s odjeće ili kože ili se izbacuju iz usnih, nosnih ili rektalnih otvora.

Pored putnika i posade, strukturne komponente zrakoplova, prtljage, osobnih predmeta, hrane i sanitarnih tekućina također mogu biti izvori onečišćenja u obliku para ili čestica. Nadalje, izvori onečišćenja mogu biti površinski ostaci na komponentama zrakoplova od sredstava za čišćenje, pesticida ili jednostavno nakupljene nečistoće. Pored navedenih onečišćuća zraka u trupu zrakoplova, također je važno uzeti u obzir i koncentraciju  $\text{CO}_2$  koja je u zavisnosti od broja ljudi i koncentracije  $\text{CO}_2$  koji se nalazi u okolišnom zraku koji se sustavom ventilacije distribuira u trup zrakoplova. [4] Odrasla osoba u sjedilačkom načinu rada producira

$7.7 \times 10^{-6}$  kg/s (ASHRAE 1999b). Koncentracija CO<sub>2</sub> u čistom okolišnom zraku je oko 0,037%. Unutar propisa FAR 25 definirana je maksimalna dopuštena koncentracija CO<sub>2</sub> u trupu zrakoplova predviđenim za boravak ljudi. Sustavom ventilacije zrakoplova pored uvjeta za ispunjavanjem sanitarnih normi kvalitete zraka, potrebno je riješiti i distribuciju zraka od uređaja za pripremu i obradu zraka do unutrašnjeg dijela zrakoplova namijenjenog za boravak putnika i posade.

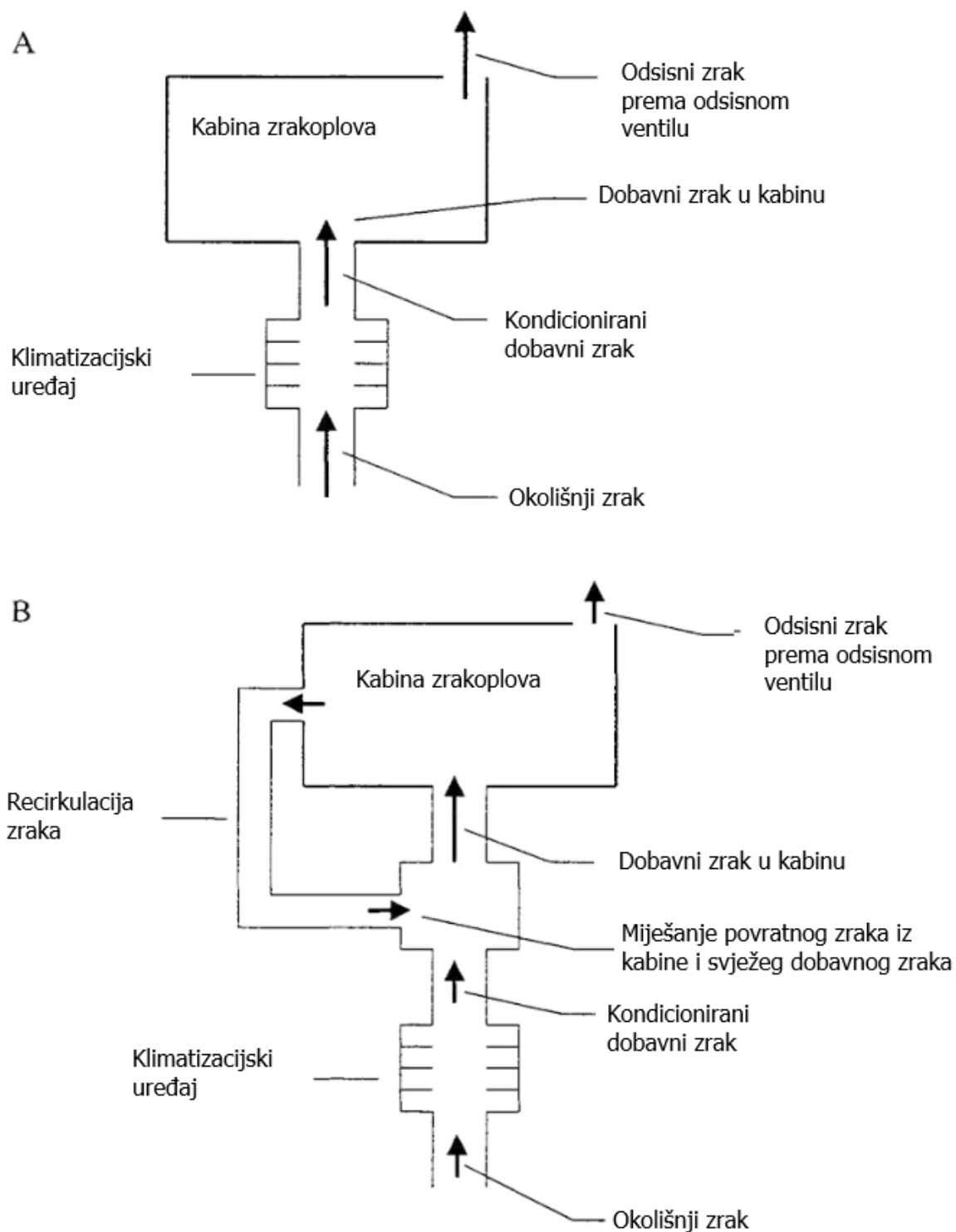


**Slika 8 Presjek trupa zrakoplova sa prikazom sustava ventilacije [4]**

Obradeni svježi zrak dovodi se u trup zrakoplova putem linearnih difuzora zraka smještenih u stropu po cijeloj dužini zrakoplova, putem zračnih otvora smještenih iznad prozora, te otvora smještenih iznad sjedala putnika. Iskorišteni povratni zrak odvodi iz kabine zrakoplova putem otvora smještenih pri podu, bočnim zidovima i stropu zrakoplova.

Dio povratnog zraka nakon što se u ECS sustavu, filtrira, podgrijava ili pothlađuje, ponovno se vraća u trup zrakoplova, dok se preostali dio ispušta u okolinu.

Ventilacija sanitarnih prostora i spremišta unutar zrakoplova kako bi se izbjeglo onečišćenje zraka u drugim dijelovima kabine mirisima ili drugim onečišćenjima iz tih područja, ventiliraju se zasebnim sustavom ventilacije, na način da se putem ventilatora otpadni zrak iz tih prostora odvodi direktno u okoliš.



**Slika 9** Shematski prikaz ventilacijskog sustava zrakoplova; A-bez recirkulacije zraka, B sa recirkulacijom zraka [4]

### 2.3.3. Temperatura

Regulacija temperature ima ključnu važnost za sigurnost zdravlja putnika na velikim visinama leta, te visoku važnost vezanu uz komfor na svim nadmorskim visinama tokom operativnog vremena zrakoplova. Željena temperatura u trupu zrakoplova održava se sustavom ventilacije, ubacivanjem zraka temperature različite od temperature zraka u trupu zrakoplova, čime se podmiruju se zahtjevi za grijanjem / hlađenjem u unutrašnjosti trupa zrakoplova. Ukupni toplinski dobitci u trupu zrakoplova je suma toplinskih dobitaka od ljudi, opreme i vanjskih okolišnih utjecaja. Regulacija temperature ostvaruje se regulacijom količine i temperature dobavnog zraka koji se upuhuje u trup zrakoplova. Unutarnja projektna temperatura u trupu zrakoplova je  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Iz razloga utjecaja na komfor putnika temperatura dobavnog zraka u režimu hlađenja ograničena je na  $10^{\circ}\text{C}$  ( $50^{\circ}\text{F}$ ).

### 2.3.4. Relativna vlaga

Regulacija vlage zraka u trupu zrakoplova provodi se iz razloga komfora i sigurnosti ljudi koji se nalaze u zrakoplovu. Visoka relativna vlaga (npr. relativna vlaga zraka  $> 70\%$ ) u kombinaciji sa visokom temperaturom zraka dovodi do nekomfora putnika. Osim komfornih zahtjeva, visoka relativna vlaga također ima i druge nepovoljne posljedice kao što su pojava kondenzacije, kapanja vode, mogućnost biološkog rasta bakterija i ostalih štetnih učinaka na kvalitetu zraka u trupu zrakoplova. Na velikim nadmorskim visinama relativna vlaga zraka se drastično smanjuje. Na visinama krstarenja vanjski zrak sadrži vrlo malo vlage, a glavni izvori vlage u zraku u kabini su disanje i isparavanje iz kože putnika. Takve vrijednosti relativne vlage su ispod smjernica za komfor (ASHRAE 1992). Unatoč smjernicama koje se odnose na relativnu vlagu i komfor ljudi, ovlaživanje zraka u trupu zrakoplova ima za posljedicu brojne probleme, povećanje mase zrakoplova, problem biološkog rasta bakterija unutar ovlaživača itd. Iz navedenih razloga u ECS sustavima nije predviđeno ovlaživanje zraka u cijelom prostoru trupa zrakoplova namijenjenom za boravak ljudi, u pojedinim tipovima zrakoplova ovlažuje se samo zrak koji se dovodi u pilotsku kabinu. Niska relativna vlaga zraka u trupu zrakoplova, može se u određenoj mjeri izbjeći korištenjem najniže moguće količine protoka vanjskog zraka, no to ima za posljedicu povećanje onečišćenja zraka u trupu zrakoplova. [4] Prema Fenger (1982), odrasla osoba u sjedilačkom načinu rada u okruženju niske relativne vlažnosti proizvodi  $0,013\text{ g/s}$  vlage. Na osnovu tog podatka i minimalne količine dobave svježeg zraka  $0,042\text{ kg/s}$  po čovjeku (FAA), koncentracija vodene pare u zraku iznosi  $0,5\%$  što odgovara relativnoj vlažnosti zraka od oko  $18\%$ .

### **3. [5] [6] [7] VAŽEĆI PROPISI I NORME ZA DEFINIRANJE MIKROKLIMASKIH UVJETA U PILOTSKOM I KABINSKOM DIJELU ZRAKOPLOVA**

.Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo (eng. Croatian Civil Aviation Agency, kratica CCAA) nadležna je za reguliranje i nadziranje civilnog zračnog prometa u Republici Hrvatskoj.

Zračni promet u Republici Hrvatskoj reguliran je hrvatskim propisima, ali i zakonodavstvom Europske Unije koje je po pravnoj snazi iznad nacionalnih propisa

U okviru nadležnosti Europske Unije, njene institucije donose uredbе, direktive, odluke, preporuke i mišljenja.

Uredbe su izravno obvezujuće i neposredno se primjenjuju u svim državama članicama, te se provedbeni propis za uredbе donosi samo iznimno, kada to zahtijevaju same odredbe uredbе.

Direktive su obvezujuće s obzirom na cilj koji žele postići, dok su oblik i metoda postizanja tog cilja prepušteni nacionalnim pravnim sustavima država članica kroz provedbene propise.

Odluke su u cijelosti i izravno obvezujuće za svoje adresate.

Preporuke i mišljenja nemaju obvezujuću snagu.

Osim navedenog, pojedini aspekti zračnog prometa uređeni su međunarodnim konvencijama koje obvezuju Republiku Hrvatsku i/ili Europsku Uniju.

Savezna uprava za civilno zrakoplovstvo (engl. Federal Aviation Administration, kratica FAA) agencija je američkog Ministarstva prometa (engl. United States Department of Transportation) nadležna za reguliranje i nadziranje svih aspekata civilnog zračnog prometa u SAD.

FAA je pojedinačno najutjecajnija vladina zrakoplovna agencija u svijetu, dok bi Europska agencija za zrakoplovnu sigurnost (Eng.: European Aviation Safety Agency, katica EASA) bila druga.

1975. godine FAA je potvrdila nadležnost nad sigurnošću i zdravljem pilotske i kabinske posade (40 FR 29114, DOT 1975). Svaki faktor koji utječe na sigurnost i zdrave radne uvjete članova posade zrakoplova uključuje pitanja koja su neodvojivo povezana s FAA-inim odgovornostima za sigurnost i zdravlje na radu u skladu sa Zakonom o saveznom zrakoplovstvu.



Kada je riječ o civilnim zrakoplovima u radu, ukupni regulatorni program FAA-e, opisan gore jednim dijelom, u potpunosti zauzima i iscrpljuje područje sigurnosti i zdravlja članova posade zrakoplova.

Važno je napomenuti da se regulatorno tijelo FAA-e (40 FR 29114, 10. srpnja 1975.) za zaštitu na radu primjenjuje kada zrakoplov "radi". U radu se definira kao vrijeme koje započinje od kad se na zrakoplov prvi put ukrcava član posade, vrijeme za let, te do vremena kada posljednji član posade napusti zrakoplov nakon završetka leta, uključujući zaustavljanja na tlu tijekom kojih najmanje jedan član posade ostaje u zrakoplovu čak i ako su motori ugašeni.

Pored regulatornog ovlaštenja za kabinsko i pilotsko osoblje, FAA je ovlaštena za zaštitu zdravlja i sigurnosti putnika, kako je izraženo u 49 USC 40101D i 49 USC 44701A, koji FAA-i pružaju široka ovlaštenja za održavanje sigurnosti i zračne trgovine. Kao rezultat tog regulatornog tijela za sigurnost i zdravlje, FAA je u Federalnim zrakoplovnim propisima (eng. Federal Aviation Regulations) (FAR) objavila specifikacije za kvalitetu zraka u komercijalnim zrakoplovima.

Europska agencija za zrakoplovnu sigurnost (Eng.: EASA, European Aviation Safety Agency) .

Agencija ima posebne regulatorne i izvršne zadatke u oblasti sigurnosti civilnog zrakoplovstva. Osnovana je 28. rujna 2003. godine a svoju potpunu funkcionalnost dostigla je preuzimanjem funkcija JAA (Eng.: Joint Aviation Authorities)u 2008.

Agencija je nadležno za:

- savjetovanje Europske unije u izradi nacрта novog zakonodavstva;
- provedbu i nadzor sigurnosnih pravila, uključujući provjere u državama članicama;
- certifikaciju tipova zrakoplova i njegovih komponenti, kao i davanje ovlasti organizacijama uključenim u projektiranje, izradu i održavanje zrakoplovnih proizvoda;
- izdavanje odobrenja operatorima u zemljama izvan EU;
- analize i istraživanja u području sigurnosti.

Naslov 14, Poglavlje 1 Kodeksa Federalnih propisa (eng. Code Federal of Regulations kratica: CFR) odnosi se na Saveznu upravu za zrakoplovstvo (FAA).

Unutar Naslova 14 CFR nalaze se federalni propisi o zračnom prometu (FAR) koji se primjenjuju na dizajn i rad komercijalnih zrakoplova.

Propisi 14 CFR 21, 14 CFR 25, 14 CFR 121 i 14 CFR 125 odnose se na O<sub>3</sub>, CO, ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), ventilaciju i tlak u kabini. Propisi u 14 CFR 25 su standardi plovidbenosti za komercijalne zrakoplove; zamišljeni su kao konstrukcijske specifikacije za zrakoplove koji podliježu certificiranju prema 14 CFR 21.2 Suprotno tome, 14 CFR 121 namijenjen je operativnom standardu i odnosi se na domaće, strane i dopunske zračne prijevoznike. FAR dodatak C sadrži propise koji su relevantni za kvalitetu zraka u kabini. Propisi slični američkim propisima koje je utvrdila FAA primjenjuju na europske zrakoplove Europska zajednička plovidbena agencija (JAA) i nazivaju se zajedničkim zrakoplovnim propisima.

Europska agencija za zrakoplovnu sigurnost EASA, unutar CS-25 Knjiga 1, Specifikacije certifikacije i prihvatljiva sredstva sukladnosti za velike zrakoplove, propisuje norme i upute vezane uz kvalitetu zraka u trupu velikih zrakoplova.

### **3.1. [7] EASA CS-25.831 Ventilacija i grijanje**

- (a) Prostori za smještaj putnička i posade moraju se provjetravati, a svaki odjeljak mora imati dovoljno svježeg zraka (ali ne manje od 0,28 m<sup>3</sup> / min (10 kubičnih ft u minuti) po članu posade) kako bi članovi posade mogli obavljati svoje dužnosti bez nelagode ili umora.

#### **AMC 25.831 (a)**

Opskrba svježim zrakom u slučaju gubitka jednog izvora ne smije biti manja od 0,18 kg / min (0,04 lb / min) po osobi tijekom razdoblja dužeg od pet minuta. Međutim, smanjenja ispod ovog protoka mogu se prihvatiti pod uvjetom da se okoliš u odjeljku može održavati na razini koja nije opasna za putnika.

- (b) Zrak u prostoru za putnike i članove posade ne smije sadržavati štetne ili opasne koncentracije plinova ili para. U ispunjavanju ovog zahtjeva vrijedi sljedeće:

- (1) Koncentracije ugljičnog monoksida veće od jednog dijela u 20 000 dijelova zraka smatraju se opasnim. Za potrebe ispitivanja može se koristiti bilo koja prihvatljiva metoda detekcije ugljičnog monoksida.
  - (2) Koncentracija ugljičnog dioksida tijekom leta ne smije biti veća od 0,5 · volumnih % (ekvivalent razine mora) u odjeljcima koje obično zauzimaju putnici ili članovi posade. U svrhu ovog podstavka, "ekvivalent razine mora" odnosi se na uvjete od 25 ° C (77 ° F) i 1 013 · 2 hPa (760 milimetara žive).
- (c) Moraju se stvoriti odredbe kojima se osigurava ispunjenje uvjeta propisanih u podstavku (b) ovog stavka nakon razumno vjerojatnih kvarova ili neispravnog rada ventilacijskog, grijanja, tlaka ili drugih sustava i opreme.

AMC 25.831 (c)

- 1 Kako bi se izbjegla kontaminacija, dovod svježeg zraka mora biti prikladano izveden, na mjestima gdje prolazi kroz bilo koji odjeljak nedostupan u letu
  - 2 Ako je dovod zraka dopunjen recirkulacijskim sustavom, trebalo bi biti moguće zaustaviti recirkulacijski sustav i –
    - a. I dalje održavati propisanu opskrbu svježim zrakom i
    - b. Ipak postići 1.
- (d) Ako je nakupljanje opasnih količina dima u prostoru pilotske kabine razumno vjerojatno, potrebno je brzo izvesti evakuaciju dima, počevši s maksimalnim pretlakom i bez dekompresije tlaka izvan sigurnih granica.
- (e) Osim kao što je predviđeno u stavku (f) ovog stavka, mora se osigurati način na koji će se omogućiti putnicima sljedećih odjeljaka i područja da kontroliraju temperaturu i količinu zraka za ventilaciju koji se dovodi u njihov odjeljak ili područje neovisno o temperaturi i količina zraka koja se dovodi u druge odjeljke i područja:

- (1) Kabina pilotske posade.
  - (2) Prostor i odjeljci za članove posade koji nisu odjeljak zrakoplovne pilotske posade, osim ako se odjeljak ili područje članova posade ventilira zračnom izmjenom s drugim odjeljcima ili područjima pod svim radnim uvjetima.
- (f) Sredstva koja će omogućiti kabinskoj posadi da kontrolira temperaturu i količinu zraka za ventilaciju koja se dovodi u odjeljak zrakoplovne posade neovisno o temperaturi i količini zraka za ventilaciju koji se dovodi u druge odjeljke nisu potrebni ako su ispunjeni svi sljedeći uvjeti:
- (1) Ukupni volumen putničkog i kabinskog prostora je 22,65 m<sup>3</sup> (800 kubnih ft) ili manje.
  - (2) Distribucija zraka i otvori za prestujavanje zraka preko kojih zrak struji između za putničkog i kabinskog prostora moraju biti izvedeni na način da se osigura razlika temperature unutar 2,8 ° C (5 ° F) između tih odvojenih prostora i dovoljnom ventilacijom za putnike u oba odjeljka.
  - (3) Kontrole temperature i ventilacije dostupne su kabinskom osoblju. [Amdt br: 25/18]

### 3.2. [7] EASA CS-25.832 Koncentracija ozona kabini

- (a) Koncentracija ozona u kabini zrakoplova tijekom leta mora se pokazati da i ne smije prelaziti –
- (1) 0,25 na milijun volumnih dijelova, u odnosu na ekvivalent na razini mora, u bilo kojem trenutku iznad razine leta 320; i
  - (2) 0,1 na milijun volumnih dijelova, ekvivalent razine mora, prosječno ponderirani prosjek tijekom bilo kojeg 3-satnog intervala iznad razine leta 270.
- (b) U smislu ovog stavka, "ekvivalent razine mora" odnosi se na uvjete od 25 ° C (77 ° F) i 1013,2 hPa (760 milimetara žive).
- (c) Sukladnost s ovom stavkom mora se pokazati analizom ili ispitivanjima koja se temelje na operativnim procedurama zrakoplova i ograničenjima performansi, koji pokazuju da:

- (1) Zrakoplovom se ne može upravljati na visini koja bi rezultirala koncentracijom ozona u kabini koja premašuje granice propisane u stavku (a) ovog stavka; ili
- (2) Ventilacijski sustav aviona, uključujući bilo koju opremu za kontrolu ozona, održavat će koncentracije ozona u kabini na ili ispod granica propisanih podstavkom (a) ovog stavka.

### 3.3. [7] EASA CS-25.841 Održavanje pretlaka u kabini zrakoplova

- (a) Dijelovi trupa zrakoplova namijenjeni za smještaj putnika i osoblja moraju biti opremljeni sustavom koji osigurava visinu tlaka u kabini ne veću od 2438 m (8000 ft) na najvećoj letnoj visini aviona u normalnim operativnim uvjetima. Ako se traži potvrda za let zrakoplova na visini preko 7620 m (25 000 ft), zrakoplov mora biti u mogućnosti održavati visinu tlaka u kabini ne veću od 4572 m (15 000 ft) u slučaju bilo kojih razumno vjerojatnih kvarova ili neispravnosti u sustavu za održavanje pretlaka.
- (b) Pretlačne kabine moraju imati najmanje sljedeće ventile, kontrole i indikatore za kontrolu tlaka u kabini:
  - (1) Dva tlačna ventila za automatsko ograničavanje razlike pozitivnog tlaka na unaprijed određenu vrijednost pri maksimalnoj brzini protoka koju isporučuje izvor tlaka. Kombinirani kapacitet sigurnosnih ventila mora biti dovoljno velik da kvar jednog ventila ne bi uzrokovao značajan porast razlike tlaka. Razlika tlaka je pozitivna kada je unutarnji tlak veći od vanjskog.
  - (2) Dva povratna ventila diferencijalnog tlaka (ili njihovi ekvivalenti) kako bi se automatski spriječio negativni diferencijalni tlak koji bi oštetio konstrukciju. No, jedan je ventil dovoljan ako ima takav dizajn koji sprečava neispravan rad.
  - (3) Način pomoću kojeg se razlika tlaka može brzo izjednačiti.
  - (4) Automatski ili ručni regulator za kontrolu ulaznog i ispušnog zraka ili oboje za održavanje potrebnih unutarnjih razina tlaka i brzine protoka zraka.
  - (5) Instrumenti na pilotskoj ili letnoj inženjerskoj stanici za prikaz razlike tlaka, visine tlaka u kabini i stope promjene visine tlaka u kabini.
  - (6) Oznaka upozorenja na pilotskoj ili inženjerskoj stanici leta da naznači kada su prekoračene sigurne ili unaprijed postavljene granice tlaka i visine tlaka u

kabini. Prikladne oznake upozorenja na diferencijalnom indikatoru tlaka u kabini zadovoljavaju zahtjev upozorenja za granice razlike tlaka, a zvučni ili vizualni signal (osim sredstava za pokazivanje visine kabine) ispunjava zahtjev upozorenja za ograničenje visine tlaka u kabini ako upozorava letnu posadu kad kabina visina tlaka prelazi 3048 m (10 000 ft).

- (7) Tablica s upozorenjem na pilotskoj ili letnoj inženjerskoj stanici ako konstrukcija nije konstruirana za razlike tlaka do maksimalnog podešavanja ventila u kombinaciji s opterećenjima za slijetanje.
- (8) Senzori tlaka potrebni za ispunjavanje zahtjeva iz podstavka (b) (5) i (b) (6) ovog stavka i CS 25.1447 (c), moraju biti locirani i dizajnirani tako da, u slučaju gubitka tlaka u kabini u bilo kojem prostoru za putnike ili posadu (uključujući gornje i donje ugrade), upozorenja i uređaji za automatsko prikazivanje, koji se zahtijevaju tim odredbama, aktivirat će se bez ikakvog odlaganja koji bi značajno povećao opasnosti od dekompresije.

## 4. PRORAČUN KLIMATIZACIJE

### 4.1. Projektni uvjeti

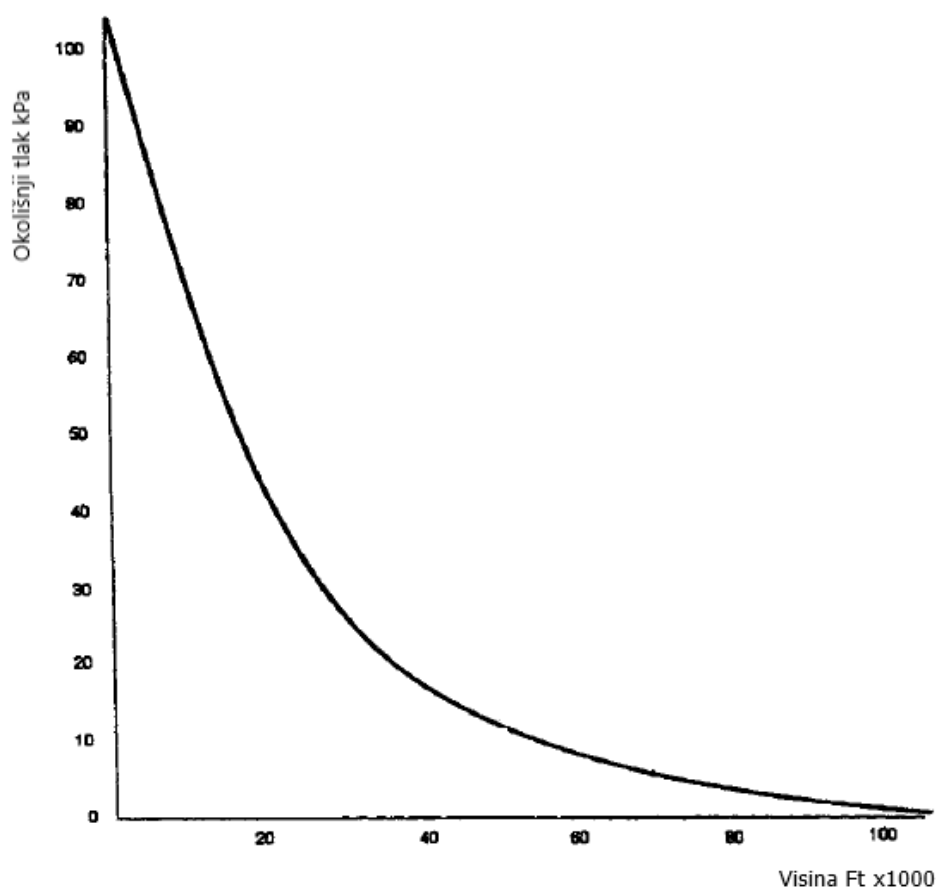
Unutarnja projektna temperatura  $22 \pm 2$  °C

Pretlak u trupu zrakoplova 0,75 bar (na visini krstarenja) do 1,013 bar (na tlu)

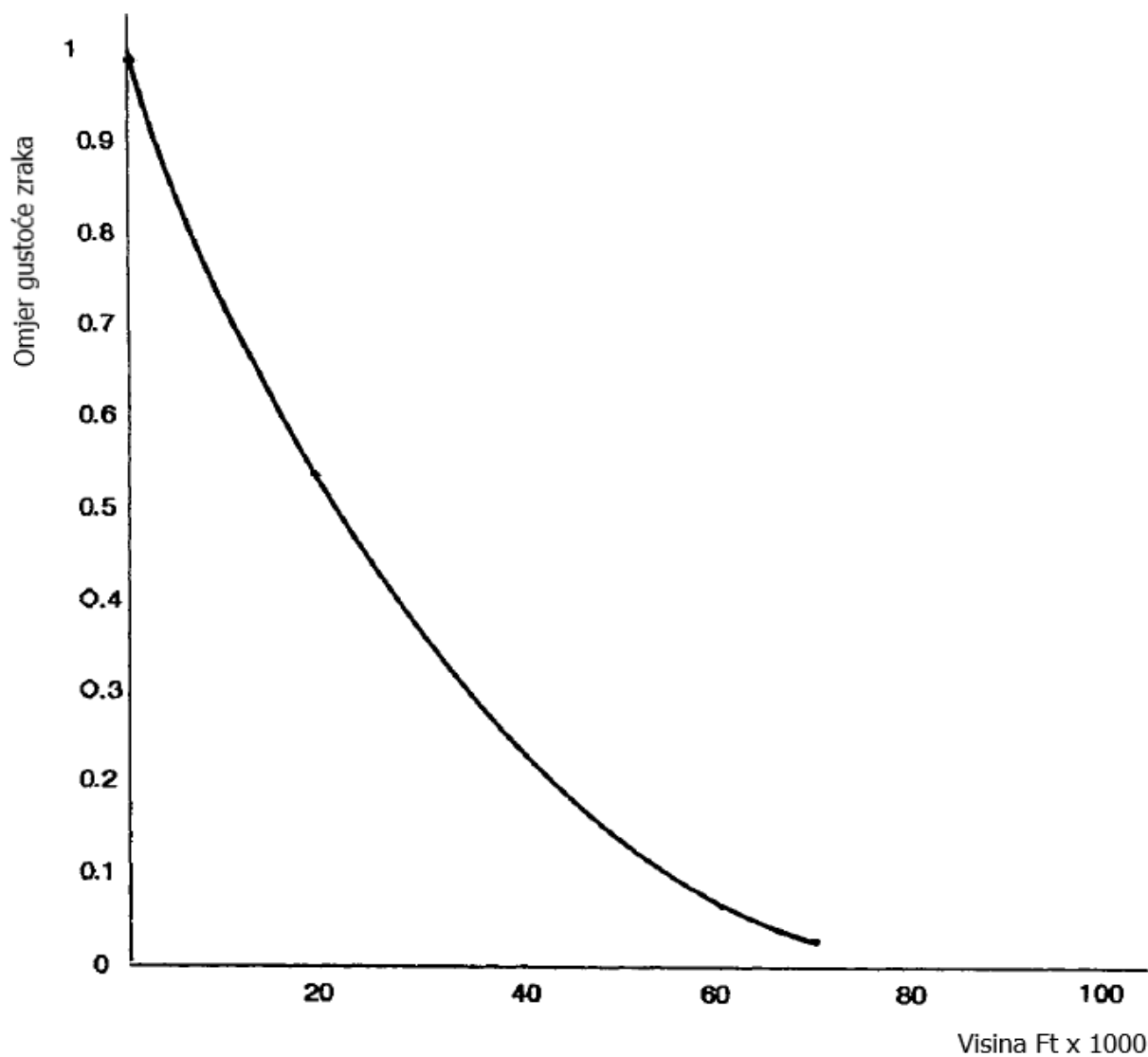
Vlažnost zraka u trupu maksimalno 60% (na tlu)

Dobava svježeg zraka / kisika min. 0,28 [m<sup>3</sup>/min/čovjeku] ili min. 0,18 [m<sup>3</sup>/min/putniku] u slučaju kvara

Okolišni uvjeti, slika 10, 11, 12, 13

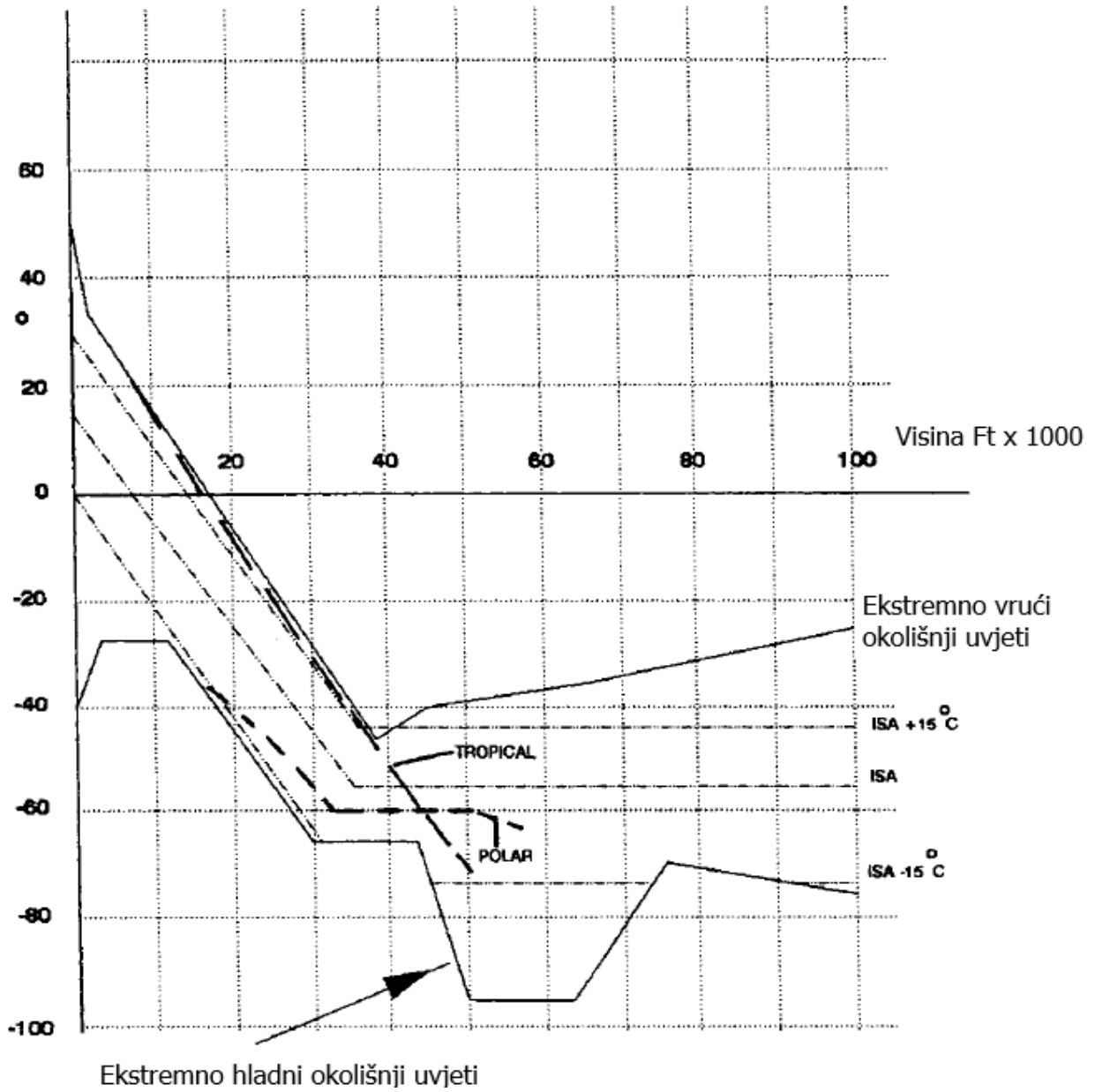


Slika 10 Promjena atmosferskog tlaka u zavisnosti od nadmorske visine [8]



Slika 11 Gustoća okolišnog zraka u zavisnosti od nadmorske visine [8]





Slika 12 ISA - Vanjska projektna temperatura u zavisnosti od nadmorske visine [8]



Slika 13 Temperaturna odstupanja u odnosu na osnovni ISA model temperature [8]

## 4.2. Izračun toplinskih opterećenja

Toplinska opterećenja koje je potrebno uzeti u obzir kod dimenzioniranja uređaja i opreme ECS sustava su sljedeći:

- Konvektivno toplinsko opterećenje
- Solarno toplinsko opterećenje
- Toplinsko opterećenje od ljudi
- Toplinsko opterećenje od uređaja i opreme

### 4.2.1. Konvektivno toplinsko opterećenje

Vanjsko konvektivno toplinsko opterećenje kao posljedica temperaturne razlike unutrašnjeg zraka u trupu zrakoplova i vanjske površinske temperature oplata  $\Phi_1$  (W)

$$\Phi_1 = kA(T_s - T_c) \quad (1)$$

Gdje je:

$k$  – koeficijent prijelaza topline (W/m<sup>2</sup>K)

$A$  – površina vanjskih stjenki (m<sup>2</sup>)

$T_s$  – temperatura oporavka (K)

$T_c$  – unutrašnja temperatura (K)

Za vrijeme leta vanjska površina zrakoplova u interakciji sa okolišnim zrakom uslijed sile trenja dovodi do zagrijavanja vanjskih stjenki zrakoplova. Najizraženiji efekt zagrijavanja dešava se na napadnim bridovima zrakoplova i naziva se u terminologiji kinetičko zagrijavanje, a temperatura proizašla iz takvog zagrijavanja naziva se „ram“ temperatura. Sve ostale površine koje su udaljenije od napadnih bridova subjektom su nižih temperatura od „ram“ temperature i nazivaju se temperaturom oporavka

$$[9] \quad T_s = T_{amb} \left( 1 + r \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \quad (2)$$

Gdje je:

$T_{amb}$  – temperatura okolišnog zraka (K)

$r$  - faktor oporavka

$\gamma$  – izentropski eksponent za zrak

$M$  – Machov broj

$r = [0, 1]$

$r = 0,9$

$\gamma = 1,4$

$$[9] \quad T_s = T_{amb} (1 + 0,18M^2) \quad (3)$$

#### 4.2.2. Solarno toplinsko opterećenje

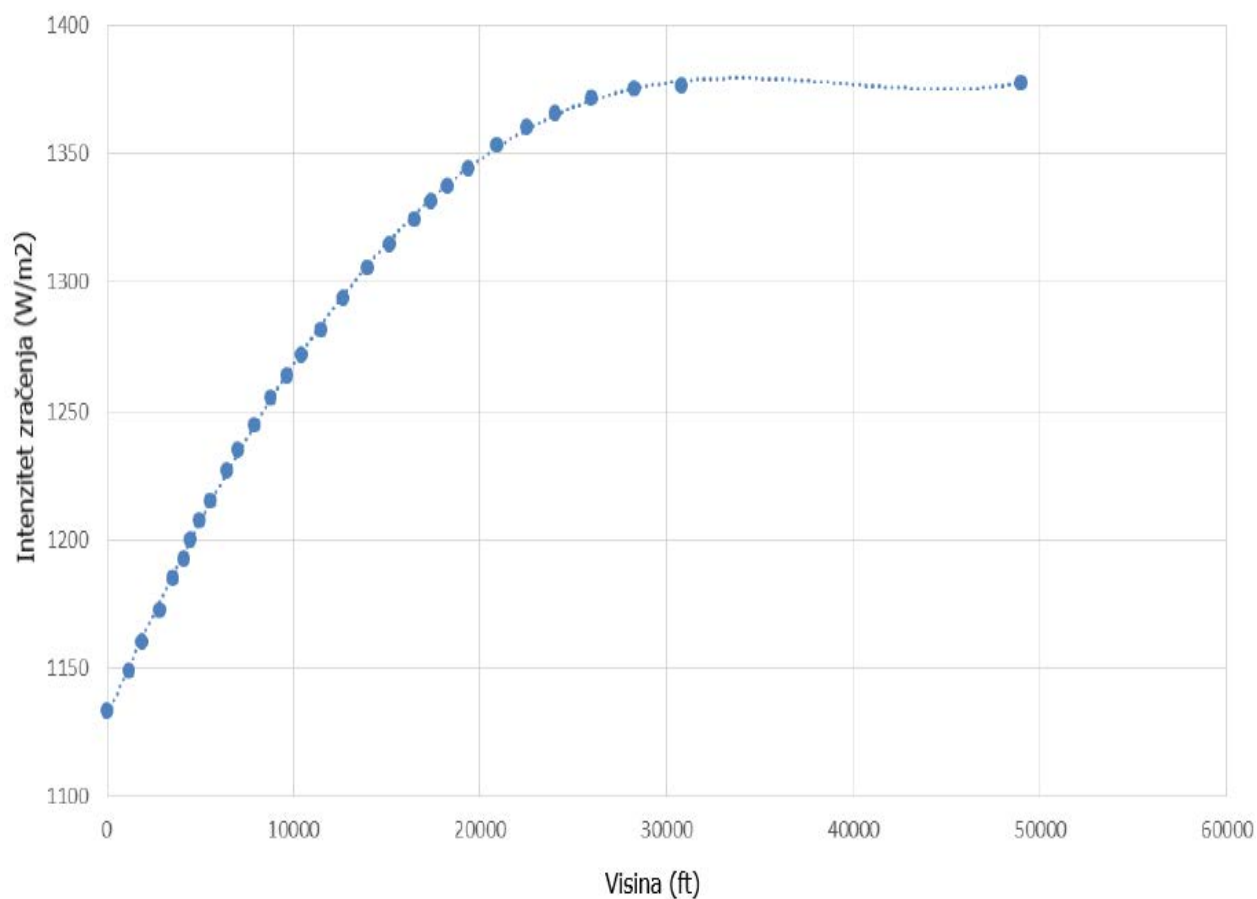
Solarno toplinsko opterećenje od zračenja sunca kroz staklene površine  $\Phi_2$  (W)

$$[9] \quad \Phi_2 = A_{ef} * \Phi(z) \quad (4)$$

Gdje je:

$A_{ef}$  – efektivna površina prozora, zavisno od kuta upada sunčevog zračenja (m<sup>2</sup>)

$\Phi(z)$  – intenzitet solarnog zračenja (W/m<sup>2</sup>)



Slika 14 Intenzitet sunčevog zračenja u zavisnosti od nadmorske visine [10]

#### 4.2.3. Toplinsko opterećenje od ljudi

Odavanje topline od putnika i osoblja u trupu zrakoplova  $\Phi_3$  (W)

$$[9] \quad \Phi_3 = N (188 - 4,7 * T_c) \quad (5)$$

Gdje je:

$N$  – broj ljudi

$T_c$  – unutarnja temperatura u trupu zrakoplova (°C)

#### 4.2.4. Toplinsko opterećenje od uređaja i opreme

Toplinsko opterećenje od uređaja i opreme  $\Phi_4$  (W)

Ukupno toplinsko opterećenje  $\Phi$  (W)

$$\Phi = \sum_{i=1}^4 \Phi_i \quad (6)$$

Temperatura unutrašnjeg zraka u trupu zrakoplova je funkcija temperature i masenog protoka dobavnog zraka u trup zrakoplova putem sustava ventilacije, te ukupnog toplinskog opterećenja.

$$T_c = T_{sa} + \left(\frac{Q}{m_{sa}}\right)\left(\frac{1}{c_p}\right) \quad (7)$$

Gdje je:

$T_c$  – unutrašnja temperatura (°C)

$T_{sa}$  – temperatura dobavnog zraka putem sustava ventilacije (°C)

$Q$  – ukupno toplinsko opterećenje (W)

$m_{sa}$  – maseni protok dobavnog zraka (kg/s)

$c_p$  – specifični toplinski kapacitet zraka

### 4.3. Proračun ventilacije trupa zrakoplova

Uobičajeno je iskazivati protok zraka ventilacijskog sustava u L/s. Takva praksa nije praktična kod definiranja protoka zraka ventilacijskih sustava zrakoplova iz razloga promjene okolišnog stanja zraka u zavisnosti od nadmorske visine. Iz tog razloga za potrebe definiranja ventilacijskih sustava u zrakoplovima se koristi maseni protok zraka kg/s.

Prema FAR 25 minimalna količina svježeg zraka koju je potrebno putem sustava ventilacije dovesti do ljudi koji se nalaze u zrakoplovu iznosi 0,25 kg/s po čovjeku.

#### 4.3.1. Proračun ventilacije na osnovu unutarnje kontaminacije zraka

Unutarnja kontaminacija zraka prema ASHRAE 1997a

$$[4] \quad D_{e,i} = D_{o,i} + S_i/V_o \quad (8)$$

Gdje je:

$D_e$  – gustoća kontaminacije unutrašnjeg izvora onečišćenja zraka (kg/ m<sup>3</sup>)

$D_o$  – gustoća kontaminacije u vanjskom svježem dobavnom zraku (kg/ m<sup>3</sup>)

$S$  – snaga izvora kontaminacije (kg/s)

$V$  – količina svježeg dobavnog zraka (m<sup>3</sup>/s)

Unutarnja kontaminacija zraka u funkcijskoj zavisnosti od koncentracije onečišćenja

$$[4] \quad C_{e,i} = C_{o,i} + (S_i MW_a)/(m_o MW_i) \quad (9)$$

Gdje je:

$C_c$  – volumni udio onečišćaća u unutrašnjem zraku

$C_o$  – volumni udio onečišćaća u svježem dobavnom zraku

$S$  – snaga izvora kontaminacije (kg/s)

$m_o$  – maseni protok svježeg zraka, (kg/s)

$MW_a$  – molekularna masa zraka

$MW$  – molekularna masa izvora onečišćenja

#### 4.3.1.1. Proračun koncentracije ugljičnog dioksida CO<sub>2</sub> u trupu zrakolova

$$[4] \quad C_{e,CO_2} = 0,00037 + N(7,7 \times 10^{-6})(0,658/m_o) \quad (10)$$

Gdje je:

$7,7 \times 10^{-6}$ - količina CO<sub>2</sub> proizvedena po čovjeku u sjedilačkom načinu rada (kg/s)

0,037 – koncentracija CO<sub>2</sub> u okolišnjem zraku

$N$  – broj ljudi

44,1 – molekularna masa CO<sub>2</sub> (g/mol)

28,96 – molekularna masa zraka (g/mol)

$m_o$  – maseni protok svježeg zraka (kg/s)

Prema FAR 25, minimalna količina svježeg zraka po putniku iznosi:

$$m_o = 0,0042 \text{ kg/s}$$

na osnovu masenog protoka svježeg zraka koncentracija CO<sub>2</sub> i trupu zrakoplova iznosi:

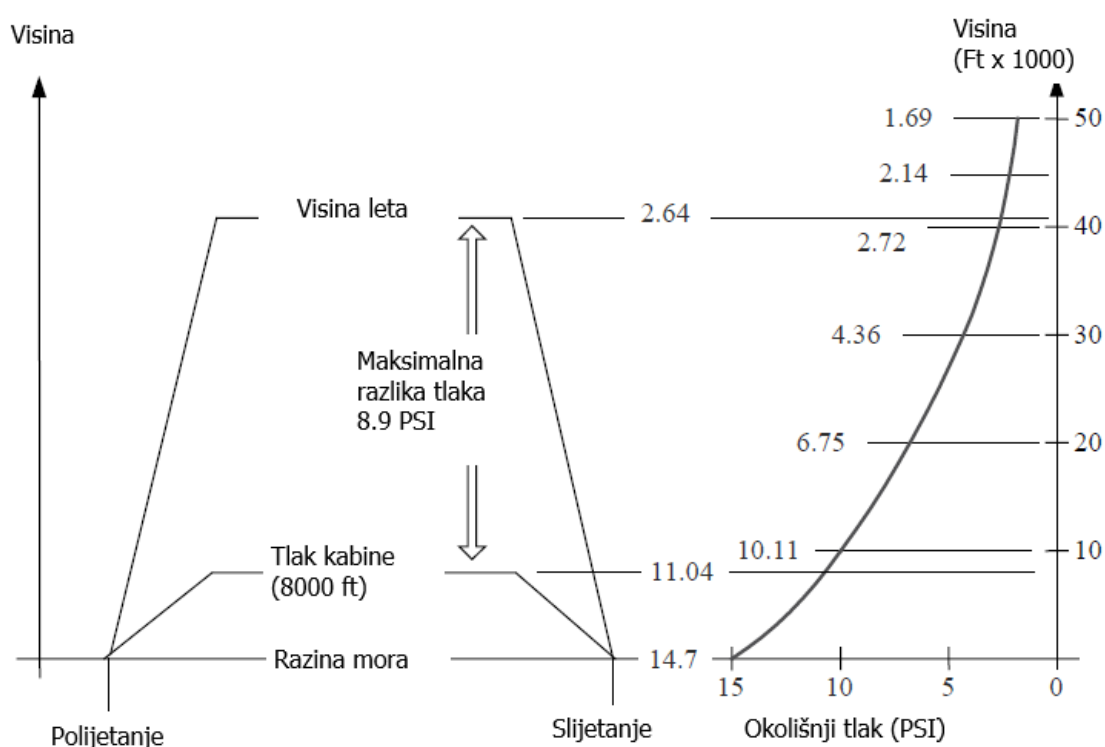
$$[4] \quad C_{e,CO_2} = 0,00037 + (7,7 \times 10^{-6}) \left( \frac{0,658}{0,0042} \right) = 0,00158 = 1,580 \text{ ppm} \quad (11)$$



### 4.3.2. Recirkulacija zraka

Recirkulacija zraka trupa zrakoplova ostvaruje se na način da se povratni zrak iz trupa zrakoplova miješa sa svježim okolišnim zrakom, te se ponovo ubacuje u trup zrakoplova. Kod određivanja udjela povratnog zraka u sustavu ventilacije potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete:

- Udio svježeg zraka u ukupnoj količini dobavnog zraka mora biti dovoljan za uklanjanje onečišćenja unutrašnjeg zraka
- Ukupna količina zraka koji se upuhuje u unutrašnji prostor sustavom ventilacije mora dostatna za pokrivanje toplinskog opterećenja u trupu zrakoplova
- Ukupna količina zraka treba biti dostatna da se osigura pravilna distribucija zraka u unutrašnjosti zrakoplova, bez pojave propuha ili nekomfortnih temperaturnih zona
- Udio svježeg zraka u ukupnoj količini zraka koji se upuhuje u trup zrakoplova mora biti dovoljan za održavanje pretaka u trupu zrakoplova



Slika 15 Regulacija pretlaka u zavisnosti od visine leta [8]

Aircraft		Air Source		Air Recirculation, % <sup>a</sup>		No. Air Exchanges per Hour <sup>a, b</sup>	
Manufacturer	Model No.	Ram Air	Bleed Air	Cabin	Cockpit <sup>c</sup>	Cabin	Cockpit <sup>c</sup>
Boeing	707, 720						
	Turbojet	✓		0	0	NA	NA
	Turbo fan		✓	0	0	NA	NA
	727-100	Backup	✓	0	0	21.6-24.8	31.7-36.2
	727-200	Backup		0	0	23.6-29.2	42.2-56.8
	737-100		✓	0	0	12.0-26.1	17.5-43.5
	737-200		✓	0	0	11.0-23.9	17.5-43.5
	737-300		✓	37-47	0	21.8-24.8	35.0-40.5
	747-100		✓	23-27	0	19.2-22.6	29.9-37.1
	747-200		✓	23-27	0	19.2-22.6	29.9-37.1
	747-300		✓	23-27	0	18.0-21.3	29.9-37.1
	757		✓	48-55	0	29.7-34.3	57.6-61.9
	767-200		✓	45-53	49-55	20.1-24.6	61.3-68.4
Douglas	DC-8-10	✓	Backup	0	0	20.3	22.8
	DC-8-50	✓	Backup	0	0	20.3	22.8
	DC-8-62	✓	Backup	0	0	19.2	22.8
	DC-8-71	✓	Backup	34-49	0	26.6-31.5	25.0-35.7
	DC-8-72	✓	Backup	34-49	0	20.9-24.7	25.0-35.7
	DC-8-73	✓	Backup	34-49	0	26.6-31.5	25.0-35.7
	DC-9-10	✓	0	0	20.6-27.4	39.2-52.5	
	DC-9-20	✓	0	0	20.6-27.4	39.2-52.5	
	DC-9-30	✓	0	0	13.3-27.3	32.7-66.8	
	DC-9-40	✓	0	0	12.2-25.0	32.7-66.8	
	DC-9-50	✓	0	0	11.1-22.9	32.7-66.8	
	MD-81	✓	0-44	0	16.7-25.9	35.3-67.2	
	MD-82	✓	0-44	0	16.7-25.9	35.3-67.2	
	DC-10	✓	0 (originally)	0	21.6-23.2	77.5-83.8	
	DC-10	✓	38	0	21.6-23.2	77.5-83.8	
Airbus	A-300-100	✓	0	0	61.0-19.0	66.4-78.7	
	A-300-200	✓	0	0	61.0-19.0	66.4-78.7	
	A-300-300	✓	0	0	61.0-19.0	66.4-78.7	
	A-300B4-600	✓	41-53	0	21.0-25.3	46.2-58.6	
	A-310-200	✓	37-53	0	20.6-25.4	49.1-64.1	
Lockheed	L-1011-1	✓	0	0	14.0-29.7	36.3-77.4	
	L-1011-100	✓	0	0	14.0-29.7	36.3-77.4	
	L-1011-200	✓	0	0	14.0-29.7	36.3-77.4	
	L-1011-500	✓	0	0	15.2-32.3	36.3-77.4	

Slika 16 Osnovne karakteristike ventilacijskih sustava za pojedine tipove zrakoplova [4]

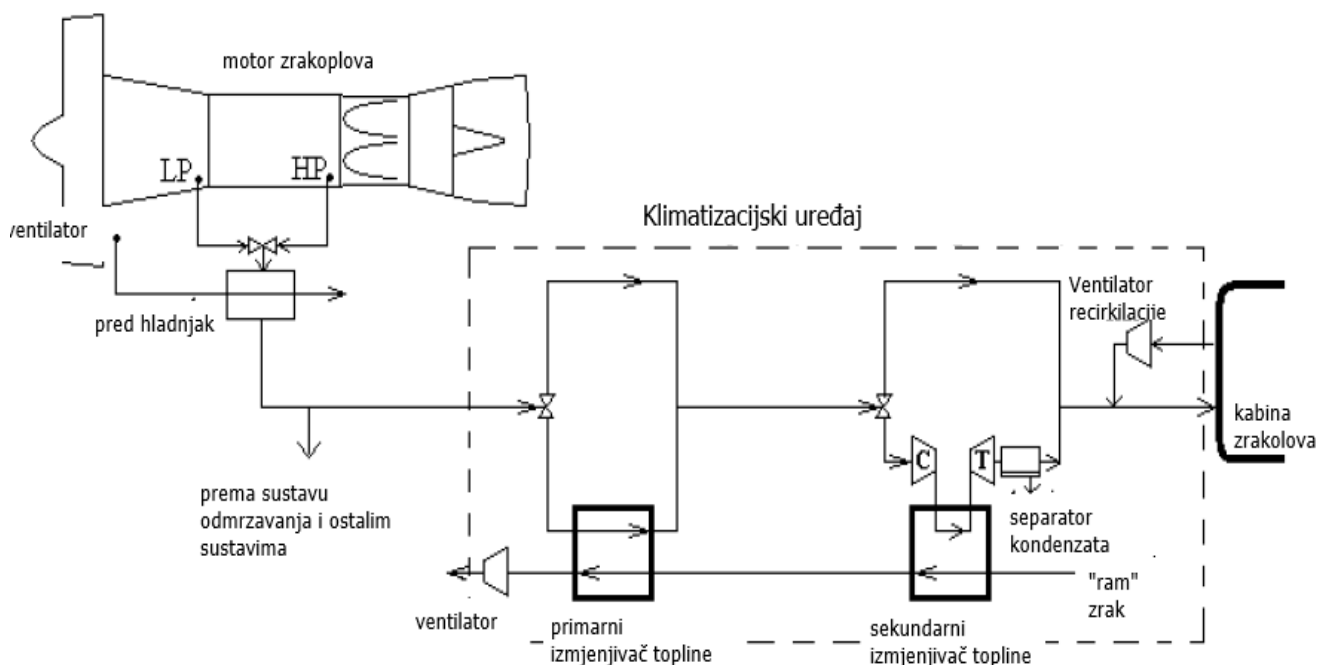
## 5. OPIS ECS SUSTAVA

Vrlo je malo publikacija usmjerenih na klimatizacijske sustave zrakoplova. Pojednosti arhitekture klimatizacijskih uređaja obično su povjerljive informacije koje pripadaju proizvođačima i teško su dostupne u otvorenoj literaturi.

ECS sustavi imaju zadaću osigurati komforne i sigurnosne zahtjeve za putnike i posadu u zrakoplovu, tokom cijelog operativnog vremena zrakoplova. ECS sustavi koje se koriste u zrakoplovima razlikuju se po konstrukciji i vrsti radnog medija.

- Za male zrakoplove, najčešće se koriste klimatizacijski uređaji sa parom kao radnim medijem u izvedbi toplinske pumpe, te sa odvojenim sustavom ventilacije
- Kod velikih zrakoplova, najčešće se koriste klimatizacijski sustavi sa zrakom kao radnim medijem

### 5.1. Klimatizacijski uređaji za klimatizaciju velikih zrakoplova, sa zrakom kao radnim medijem.



Slika 17 Shematski prikaz ECS sustava [3]

Sa kompresora zrakoplovnog motora uzima se svježiji zrak pri tlaku od približno 250 kPa i temperaturi od većoj od 200 °C. Tlak i temperatura zraka na kompresoru zavisi od broja okretaja kompresora i stupnju kompresije. Iz tog razloga, zrak koji se uzima sa kompresora za potrebe rada klimatizacijskog uređaja, odvodi se sa kompresora na različitim stupnjevima kompresije. Naknadno se tlak zraka regulira kontrolnim regulatorima tlaka, slika 17.

Vrući zrak odveden sa kompresora zahtijeva hlađenje prije ulaska u kabinu, izmjenjivač topline (HE) s vanjskim zrakom nije dovoljno učinkovit (potreban je veliki HE za hlađenje te količine zraka od 200 °C do 20 °C, posebno na malim visinama) da bi se osiguralo da se vrući zrak sa kompresora može sigurno provesti kroz sustav ventilacije do trupa i sustava za odmrzavanje zrakoplova. Iz tog razloga zrak sa kompresora prolazi kroz izmjenjivač topline (pred-hladnjak) koji se nalazi u motoru zrakoplova i hladi zrak iz kompresora do nekih 180 °C (450 K).

Takav zrak dalje se odvodi do uređaja za klimatizaciju. Unutar uređaja za klimatizaciju, pothlađeni zrak sa pred hladnjaka dovodi se do primarnog izmjenjivača topline (slika 16, primary HE), gdje se dodatno hladi do temperature od približno 110 °C.

Nakon tog, zrak temperature 110 °C se odvodi na kompresor sa stupnjem kompresije od 1,8 čime se povećava i temperatura zraka na oko 210 °C.

Nakon kompresora zraka se vodi na sekundarni izmjenjivač topline (slika 17, secondary HE), gdje se temperatura zraka smanjuje na oko 100 °C, uz gubitak tlaka zraka od 20-40 kPa.

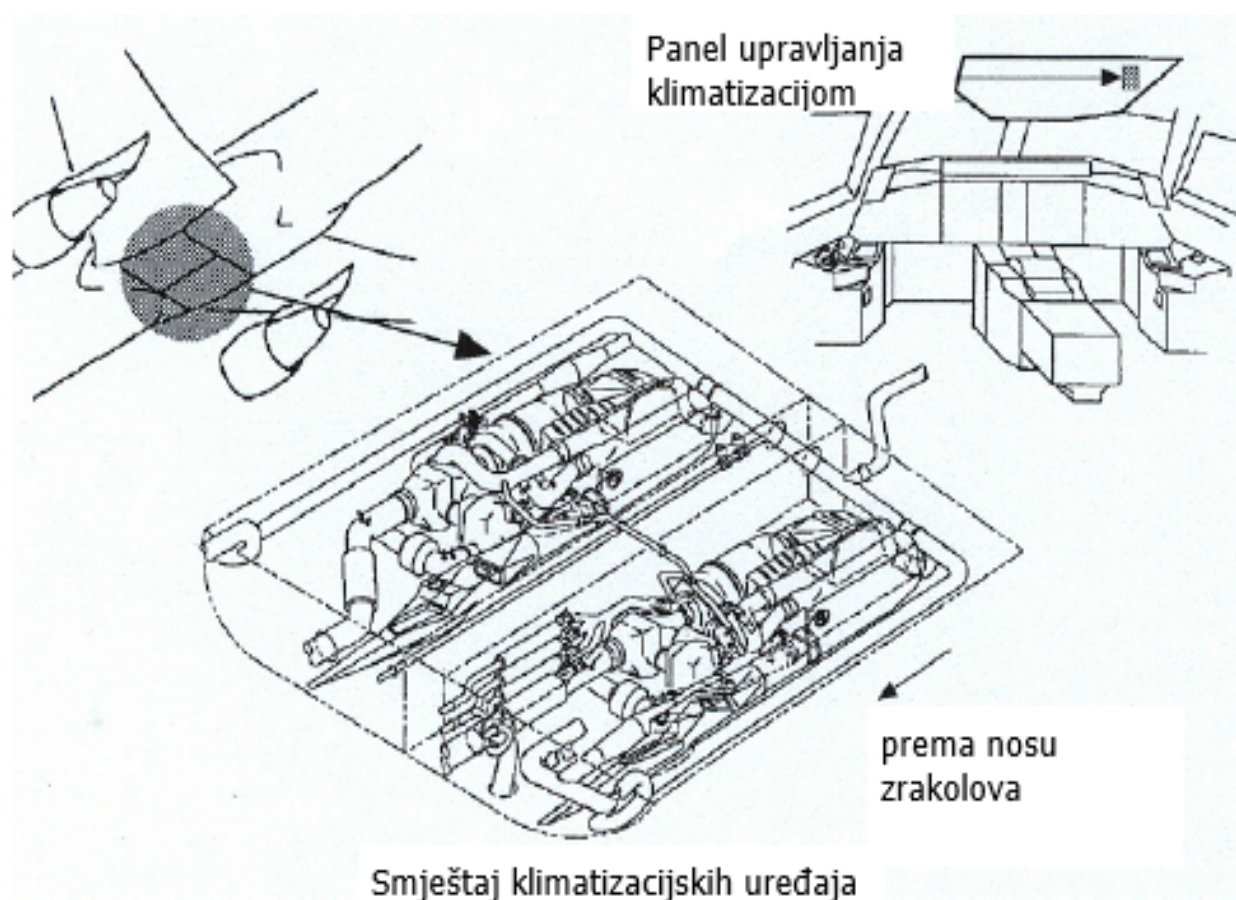
Nadalje se takav zrak dovodi do turbine na kojoj se hladi na približno 5°C. Zrak sa turbine temperature 5°C miješa se zrakom temperature 100 °C dobivenim nakon sekundarnog izmjenjivača topline. Temperatura miješanja zraka kreće se u rasponu od 10-35°C zavisno od radne faze klimatizacijskog sustava (grijanje ili hlađenje). Nakon miješanja zrak se sustavnom ventilacije odvodi do trupa zrakoplova.

Neposredno nakon turbine klimatizacijskog sustava, a u većini slučajeva i prije turbine kada potreban vrlo hladan zrak za hlađenje kabine, kako bi se izbjegla opasnost od zaleđivanja turbina, ugrađeni su separatori koji osiguravaju uklanjanje kondenzata. Taj kondenzat se ubrizgava u „ram“ struju zraka (strujanje zraka koja nastaje kao posljedica gibanja tijela kroz okolišnji zrak) kako bi se poboljšala učinkovitost izmjenjivača topline (HE). Kod projektiranja separatora kondenzata uzima se maksimalna apsolutna vlaga od 22 g / kg (zasićeni zrak pri 26 °C i 100 kPa, ili 40% RH i 40 °C).

„Ram“ struja zraka koristi se kao toplinski ponor primarnog i sekundarnog izmjenjivača topline, koji su izvedeni kao kompaktni pločasti izmjenjivači topline. „Ram“ struja zraka dovodi se preko usisnih vratašca i difuzora smještenih na vanjskom dijelu trupa zrakoplova. Nadalje se putem ventilatora pogonjenoga od strane turbine klimatizacijskog sustava vodi na primarni i sekundarni izmjenjivač topline, te se nakon prolaska kroz izmjenjivače odvodi u okoliš putem ispušnih sapnica i izlaznih vratašca.

Usisna i ispušna vratašca za cirkulaciju „ram“ zraka su međusobno povezana i pogone se istim pogonom. U uvjetima kad nije potrebno hlađenje, vratašca su zatvorena.

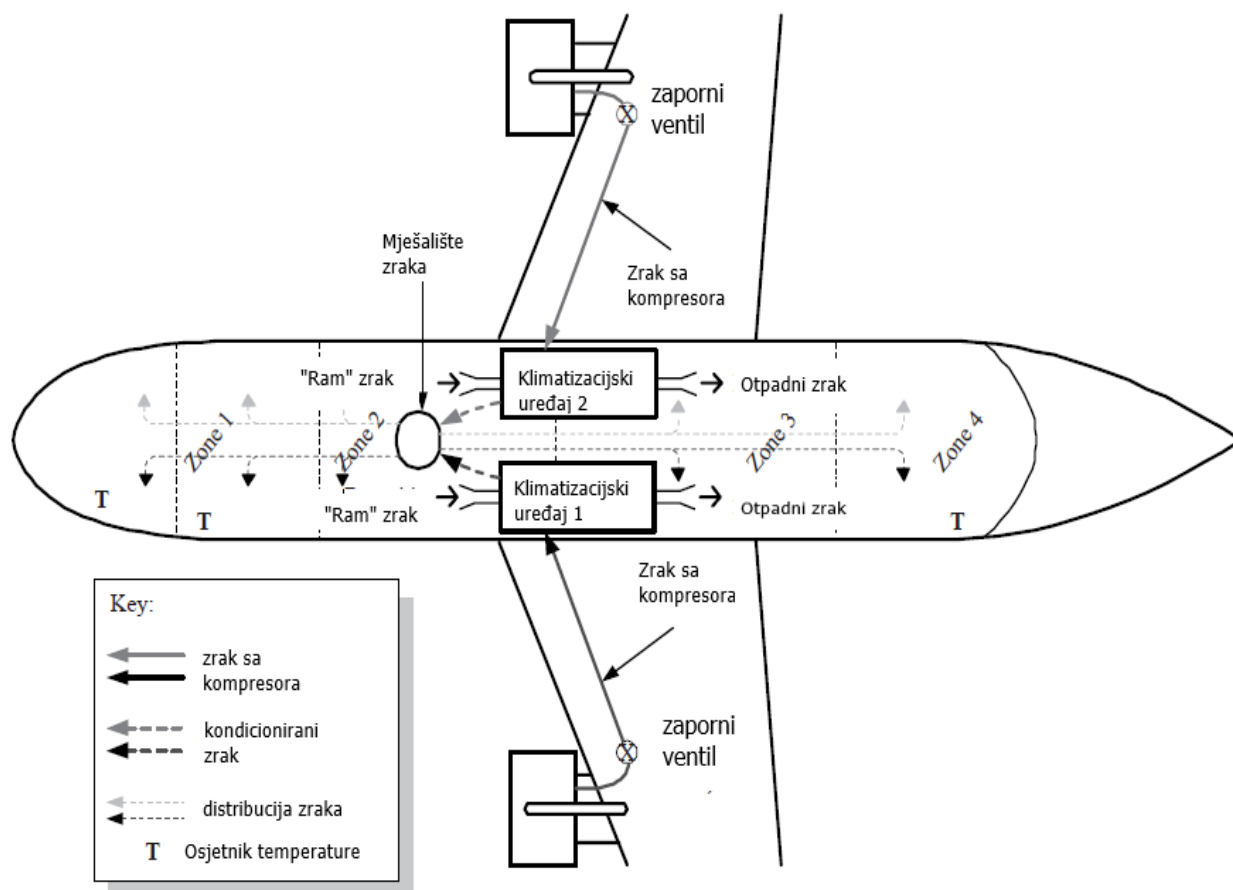
Iz sigurnosnih razloga u zrakoplove se ugrađuju dva klimatizacijska sustava, dimenzionirana na način da u slučaju kvara jednog od uređaja, drugi može ispunjavati u potpunosti sve potrebne zahtjeve vezane u komfor i sigurnost ljudi u zrakoplovu.



**Slika 18** Tipični smještaj klimatizacijskih uređaja u trupu zrakoplova i kontrolnih uređaja u kokpitu [3]

Slika 19 prikazuje regulaciju temperature pojedinih temperaturnih zona u trupu zrakoplova. Zrakoplovnom osoblju putem kontrola u kokpitu zrakoplova omogućena je regulacija klimatizacijskih uređaja:

- Tipka za svaki klimatizacijski uređaj sa četiri pozicije rada: Automatski način rada, Grijanje, Isključeno, Hlađenje
- Termostatske tipke za svaku temperaturnu zonu u trupu zrakoplova sa tri pozicije: Normalno, Toplije, Hladnije



Slika 19 Regulacija temperature u trupu zrakoplova [8]

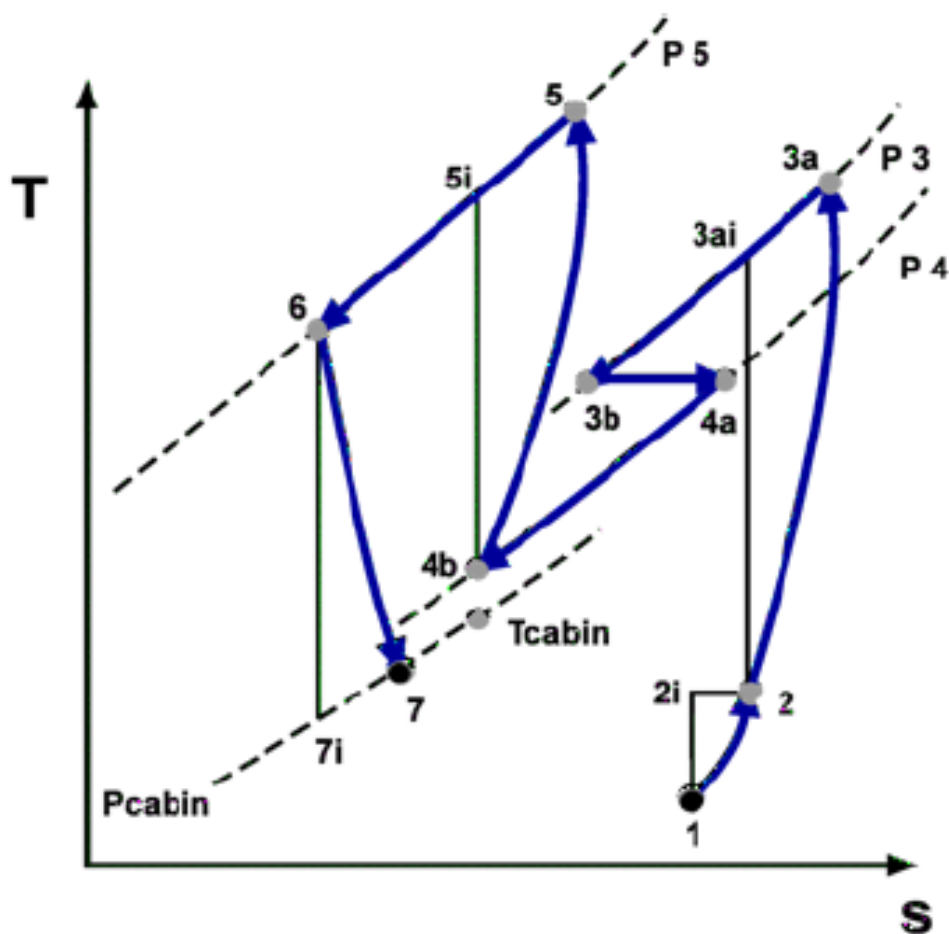
[3] Mogući scenariji rada klimatizacijskih uređaja:

- Grijanje trupa zrakoplova na visini krstarenja sa malim brojem zaposjednutosti mjesta za sjedenje. Klimatizacijski sustav mora osigurati kontinuiranu dobavu zraka temperature  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  i tlaka  $> 75\text{ kPa}$  u trup zrakoplova, iz zraka kompresora temperature  $450\text{ K}$  i  $250\text{ kPa}$  te okolišnog zraka temperature  $250\text{ K}$  i  $22\text{ kPa}$ .
- Grijanje trupa zrakoplova na tlu u hladnim okolišnim uvjetima sa malim brojem zaposjednutosti mjesta za sjedenje. Klimatizacijski sustav mora osigurati kontinuiranu dobavu zraka temperature  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  i tlaka  $100\text{ kPa}$  u trup zrakoplova, iz zraka kompresora temperature  $350\text{ K}$  i  $250\text{ kPa}$  te okolišnog zraka temperature  $240\text{ K}$  i  $100\text{ kPa}$ .
- Hlađenje trupa zrakoplova na tlu u vrućim okolišnim uvjetima sa potpuno popunjenim mjestima za sjedenje. Klimatizacijski sustav mora osigurati kontinuiranu dobavu zraka temperature  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  pri okolišnom tlaku  $100\text{ kPa}$  u trup zrakoplova, iz zraka kompresora temperature  $370\text{ K}$  i  $250\text{ kPa}$  te okolišnog zraka temperature  $320\text{ K}$  i  $100\text{ kPa}$ .

Na osnovu navedenih mogućih scenarija rada klimatizacijskih sustava, zaključujemo da bez obzira na režim rada grijanje / hlađenje klimatizacijskog sustava, uvijek je potrebno prije ubacivanja zraka u trup zrakoplova, hlađenje ulaznog zraka sa kompresora motora.

ECS sustavi su obično podijeljeni na način da se na svaki zrakoplovni motor pridodaje po jedan klimatizacijski uređaj.

Veličina klimatizacijskog uređaja definira se na osnovu zahtjeva za količinom zraka koju je potrebno ubaciti u trup zrakoplova.



Slika 20 – T,S dijagram stanja zraka ECS sustava klimatizacije zrakoplova [11]

Gdje je:

- 1 stacionarni okolišno stanje zraka
- 2 stanje zraka nakon „ram“ kompresije (uslijed gibanja tijela kroz okolišni zrak)
- 3a stanje zraka na izlazu iz kompresora zrakoplovnog glavnog motora
- 3b stanje zraka na izlazu iz predhlađivača
- 4a stanje zraka nakon regulacije tlaka
- 4b stanje zraka nakon primarnog izmjenjivača topline
- 5 stanje zraka nakon kompresora klimatizacijskog uređaja
- 6 stanje zraka nakon sekundarnog izmjenjivača topline
- 7 stanje zraka nakon turbine klimatizacijskog uređaja;



## 6. ZAKLJUČAK

Regulacija temperature, tlaka, vlage i koncentracije kisika u kabini zrakoplova važno je kada se uzmu u obzir uvjeti leta komercijalnog zrakoplova. Nepravilna regulacija mikroklimatskih uvjeta u kabini zrakoplova može imati za posljedicu razne zdravstveni probleme kod putnika i zrakoplovnog osoblja. Iz tog razloga; vrući komprimirani zrak iz kompresora motora zrakoplova dodatno se tretira u klimatizacijskom sustavu kako bi se stvorio ugodan ambijent unutar kabine zrakoplova. Parametri za definiranje toplinskog opterećenja su temperatura, tlak i gustoća zraka unutar zrakoplova, te okolišna atmosfera.

Tlak zraka u kabini je dominantan faktor u određivanju parcijalnog tlaka kisika u kabini zrakoplova. Broj izmjena unutrašnjeg zraka putem ventilacije nema velikog utjecaja na parcijalni tlak kisika.

Dobava vanjskog zraka mora biti dovoljna za kontrolu onečišćenja u kabini, bez obzira da li se koristi recirkulacija ili ne.

Niska vlaga u kabinama zrakoplova ne može se povećati kontrolom ventilacije bez postavljanja pitanja o utjecaju na kvalitetu zraka. Brojni problemi povezani su s ovlaživanjem unutrašnjeg zraka kabine zrakoplova. Iz tog razloga niska vlaga unutrašnjeg zraka je uobičajena na visinama krstarenja.

## LITERATURA

- [1] S.Lozić: Odabrana poglavlja iz klimatologije
- [2] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Međunarodna\\_standardna\\_atmosfera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Međunarodna_standardna_atmosfera);  
<https://hr.wikipedia.org/wiki/Hipoksija>
- [3] Isidoro Martinez: Aircraft environmental control
- [4] NCBI - The National Center for Biotechnology Information: The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books>
- [5] CCAA - Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo
- [6] FAA - Federal Aviation Administration
- [7] EASA - European Aviation Safety Agency
- [8] Ian Moir, Allan Seabridge: Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition
- [9] International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 5, May-2016 ISSN 2229-5518: Heat Load Calculation for the Design of Environmental Control System of a Light Transport Aircraft
- [10] Daniel Perez Lineares: Modeling and simulation of an aircraft environmental control system
- [11] A.P.P. Santos, C.R. Andrade, E.L. Zapparoli: A Thermodynamic Study of Air Cycle Machine for Aeronautical Applications
- [12] Golle Steffen, Hesse Ullrich, Klimpel Frank: "Pneumatically Driven Environmental Control System In Aircrafts Based On A Vapor-compression Cycle" (2014). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1439.
- [13] Yasin Ozdemir, Muammer Ozgoren, Ilker Goktepel: Energy analysis for an air-conditioning system of a commercial aircraft: case study for airbus a330

## **PRILOZI**

I. CD-R disc