

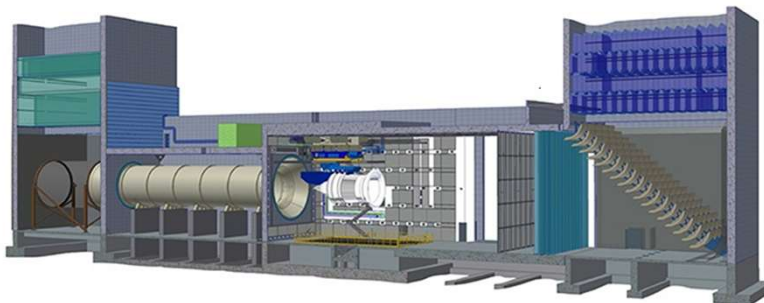
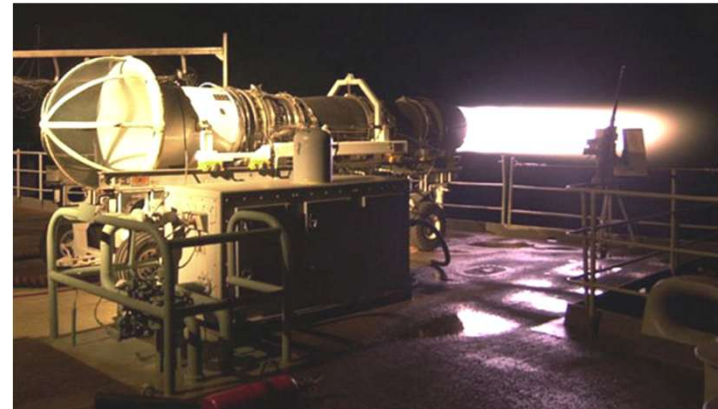
OSIĄGI TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

Dr inż. Robert Jakubowski

Katedra Inżynierii lotniczej i Kosmicznej

Metody wyznaczania osiąarów silnika

- **Analityczna**
- **Doświadczalna**
 - na hamowni stacjonarnej
 - na latającej hamowni



Charakterystyki silnika - podział

- **CHARAKTERYSTYKI WEWNĘTRZNE** – służą do oceny wpływu parametrów obiegu silnika na jego cechy użytkowe

T; WF, ST ; SFC=f(CPR, FPR, TIT, BPR);

- **CHARAKTERYSTYKI ZEWNĘTRZNE** – służą do wyznaczania wpływu zakresów pracy silnika i warunków lotu na jego parametry użytkowe

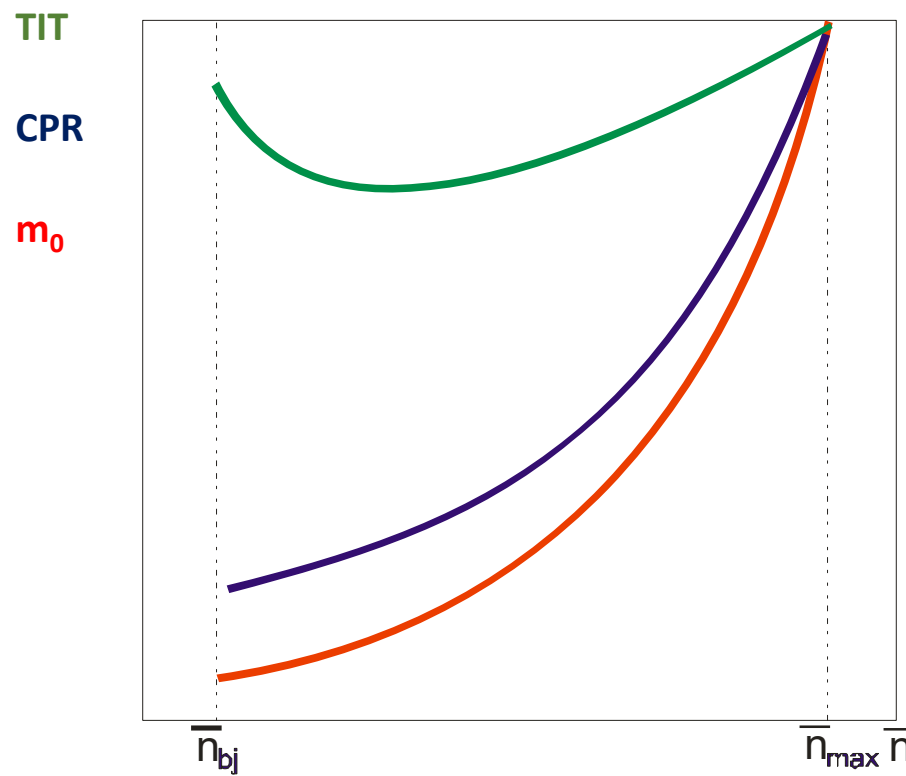
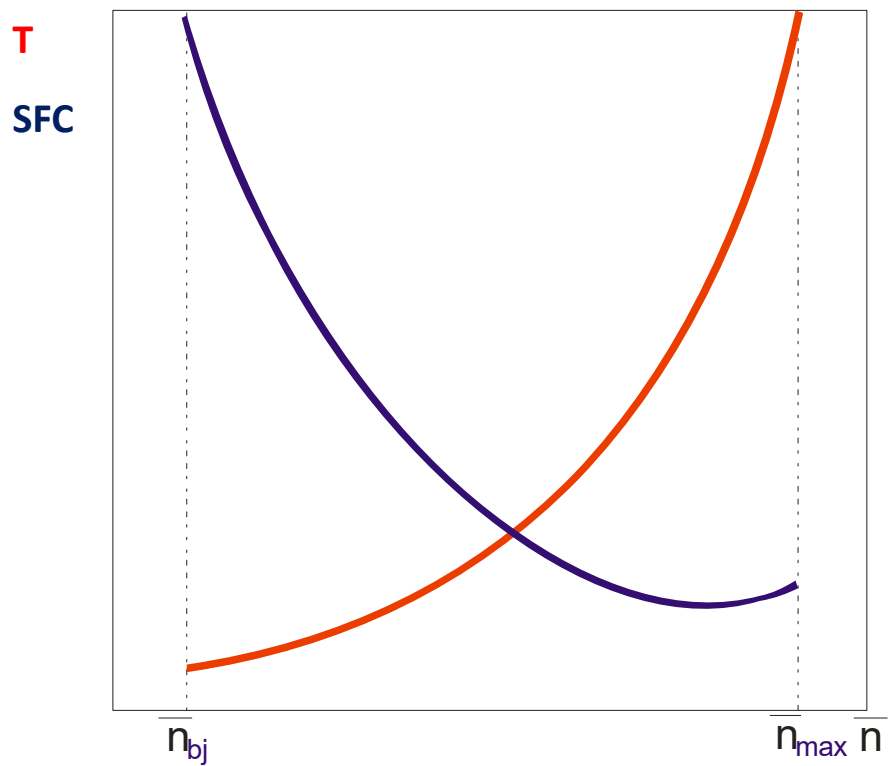
T; WF, ST ; SFC=f(N, H, Ma, parametry otoczenia);

Charakterystyki zewnętrzne

Zależnie od wzajemnego związku między zakresem pracy silnika i warunkami lotu samolotu a parametrami użytkowymi turbinowego silnika odrzutowego charakterystyki zewnętrzne dzieli się na:

- obrotowe $T; WF, ST; SFC = f(n); H = Ma = 0$
- prędkościowe $T; WF, ST; SFC = f(Ma); H = const; n = const$
- wysokościowe $T; WF, ST; SFC = f(H); Ma = const; n = const$
- klimatyczne $T; WF, ST; SFC = f(T_0; p_0; \varphi); H = Ma = 0$

Turbinowy silnik odrzutowy – charakterystyka obrotowa



TURBINOWY SILNIK ODRZUTOWY – ZAKRESY PRACY

- Zakres maksymalny (TO) - uzyskuje się na nim maksymalny ciąg silnika i jest wykorzystywany podczas startu, wznoszenia lub rozpędzania samolotu do maksymalnej prędkości lotu. Czas ciągłej pracy na tym zakresie jest zwykle ograniczany do 5... 10 min, z uwagi na występowanie maksymalnych obciążeń cieplnych i naprężeń w częściach podzespołów silnika.
- Zakres nominalny (MCM) - nazywany też obliczeniowym. W niektórych przypadkach pokrywa się z zakresem maksymalnym $n_{nom} = (0,96... 1,00) n_{max}$. Wykorzystuje się go podczas długotrwałego wznoszenia lub długotrwałego lotu z dużą prędkością. Ciąg silnika zwykle nie przekracza 85...90% ciągu maksymalnego. Czas pracy silnika na tym zakresie może być ograniczany do ok. 30 min, jeżeli intensywność chłodzenia podzespołów silnika jest słaba.

TURBINOWY SILNIK ODRZUTOWY – ZAKRESY PRACY

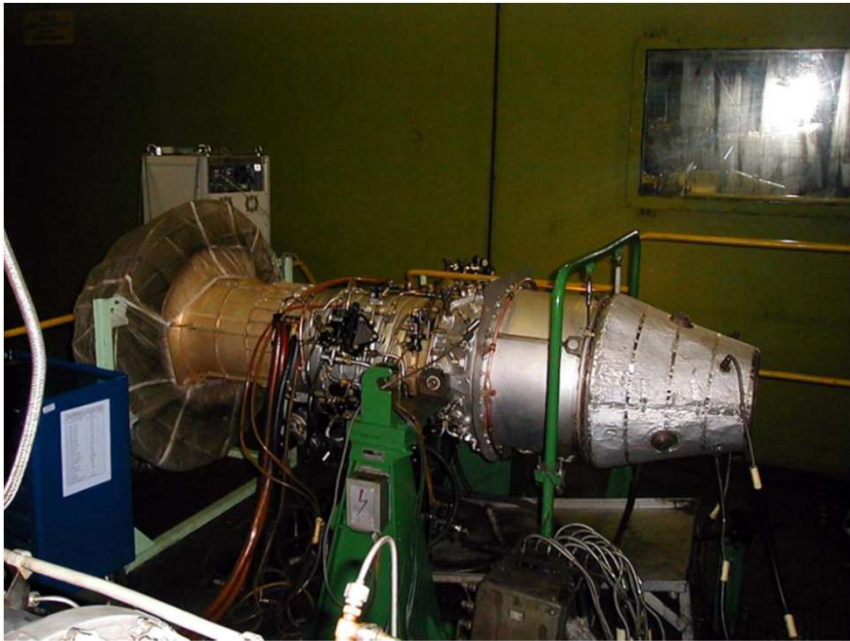
- Zakres przelotowy (MCR) - stanowi zwykle ok. 90% n_{max} i uzyskuje się ciąg silnika w przedziale 70...75% ciągu maksymalnego. Jest to podstawowy zakres w lotach długotrwałych. Czas ciągłej pracy jest nieograniczony (pomijając gwarantowany przez wytwórcę czas niezawodnej pracy podzespołów silnika).

- Zakres biegu jałowego (idle) - nazywany też „małym gazem”. Wartość prędkości obrotowej i ciągu silnika ustala się przez dobór temperatury spalin przed turbiną i zazwyczaj prędkość obrotowa nie przekracza 20...40% prędkości obrotowej maksymalnej, a ciąg silnika 3...5% ciągu maksymalnego. Jednocześnie ciąg silnika na tym zakresie powinien pozwolić na kołowanie samolotu ale nie powinien wydłużać drogi dobiegu podczas lądowania. Z uwagi na duże obciążenie cieplne podzespołów konstrukcyjnych silnika ogranicza się czas jego pracy na tym zakresie do ok. 5...10 min.

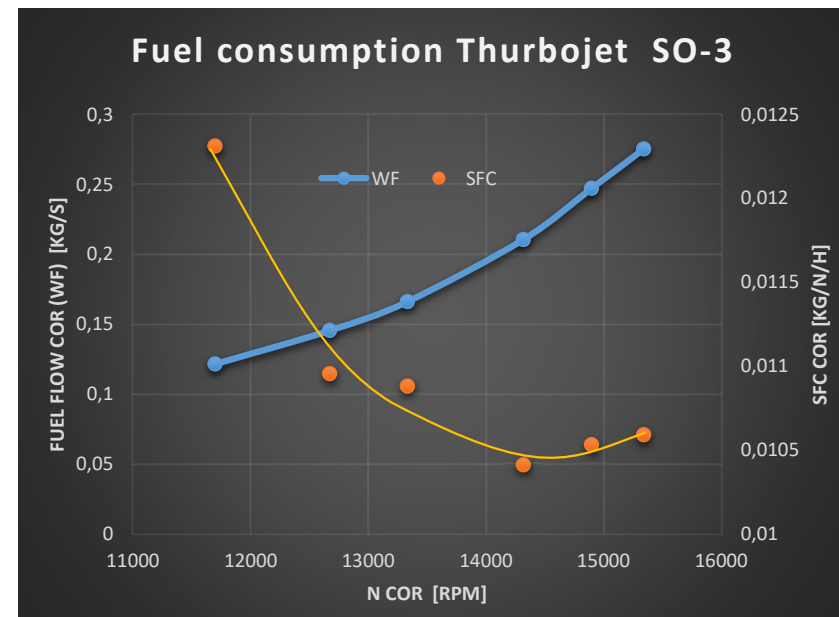
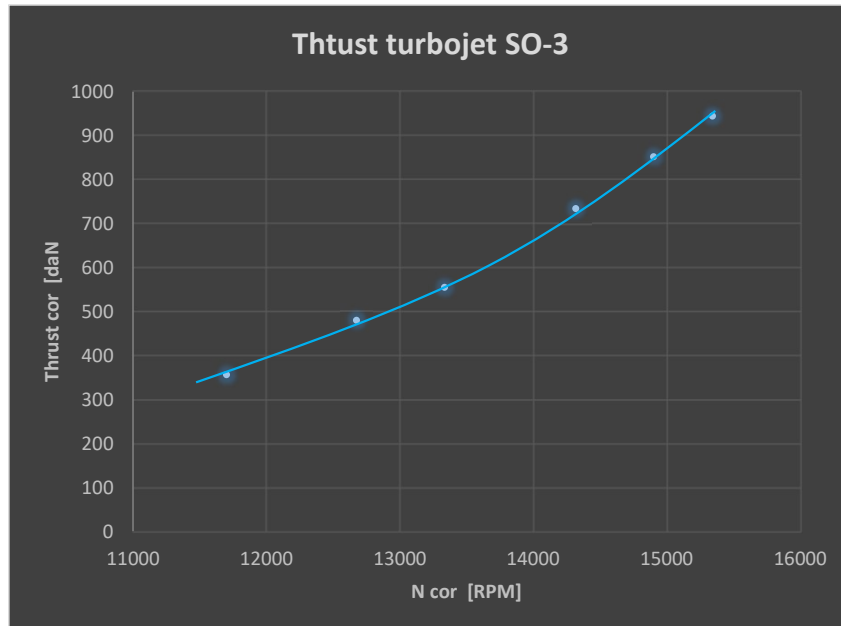
Test nowych silników

- **FET – First Engine To Test**
 - pierwszy fizycznie zbudowany egzemplarz silnika przeznaczony do prób,
 - pierwszy silnik, który:
 - trafia na hamownię,
 - przechodzi testy funkcjonalne,
- **SET - Second Engine To Test**
 - drugi zbudowany egzemplarz silnika do badań,
 - Testy:
 - mapowanie charakterystyk,
 - testy długotrwałe,
 - testy temperaturowe,
 - wczesne testy certyfikacyjne

SO-3 na stanowisku badawczym

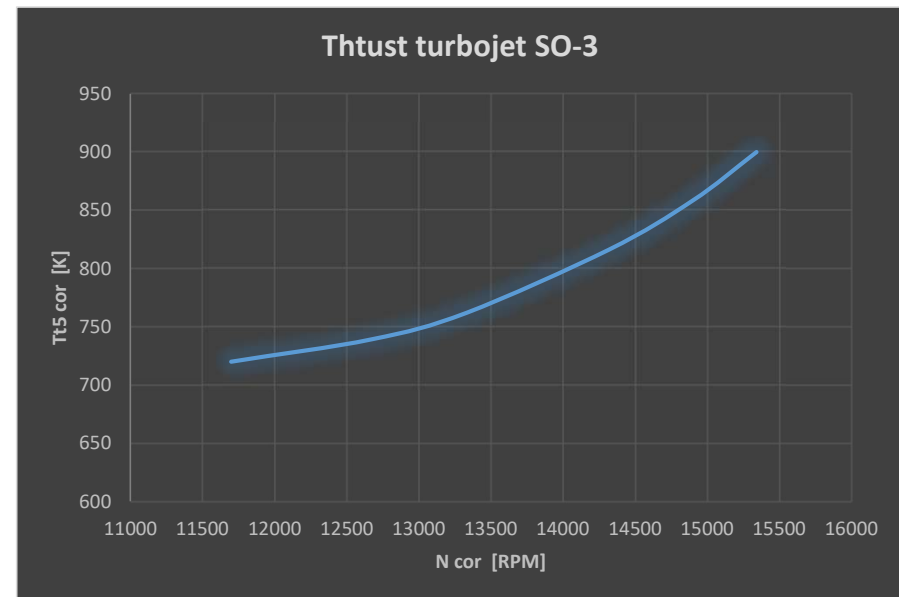
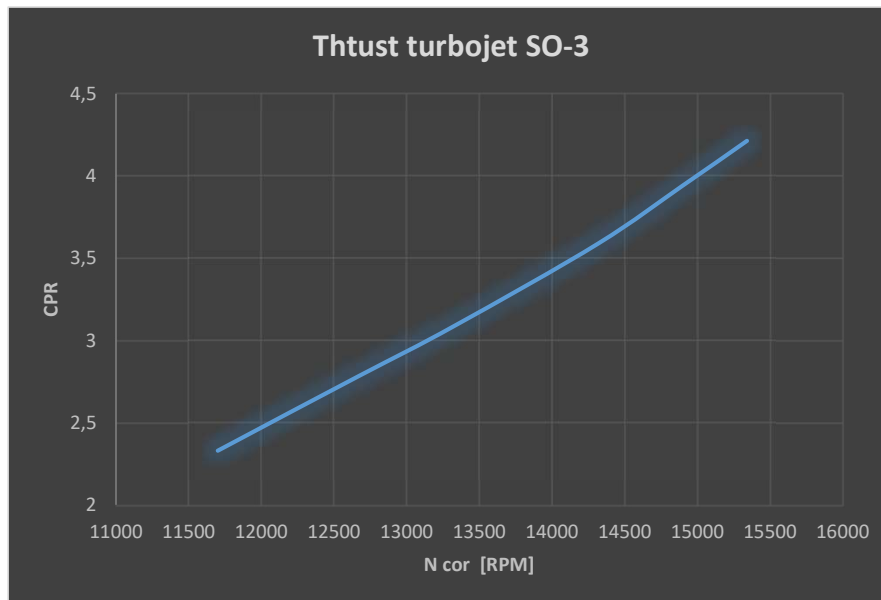


Charakterystyka turbinowego silnika jednoprzepływowego SO-3



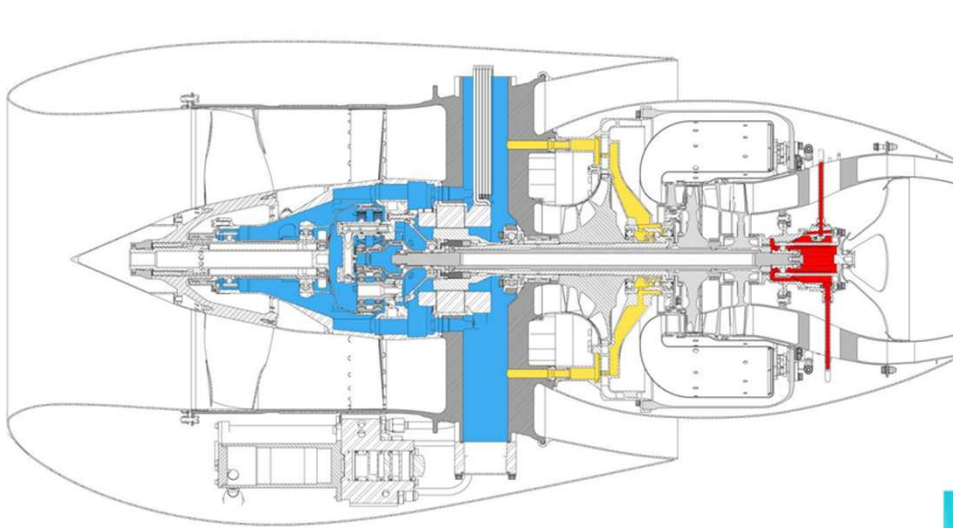
- Ciąg silnika i zużycie paliwa rośnie z prędkością obrotową silnika
- Jednostkowe zużycie paliwa obniża się z prędkością obrotową do wartości minimalnych w okolicach MCR, następnie najczęściej nieco wzrasta

Charakterystyka turbinowego silnika jednoprzepływowego SO-3



- Spręż silnika wzrasta ze wzrostem prędkości obrotowej, podobnie wzrasta wydatek masy powietrza
- W silnikach najczęściej jest mierzona temperatura za turbinami (ETG), charakterystyka tej temperatury jest przedstawiona jako Tt5. Ze względu na zbyt wysoką wartość nie da się dokonywać pomiaru bezpośrednio za komorą spalania

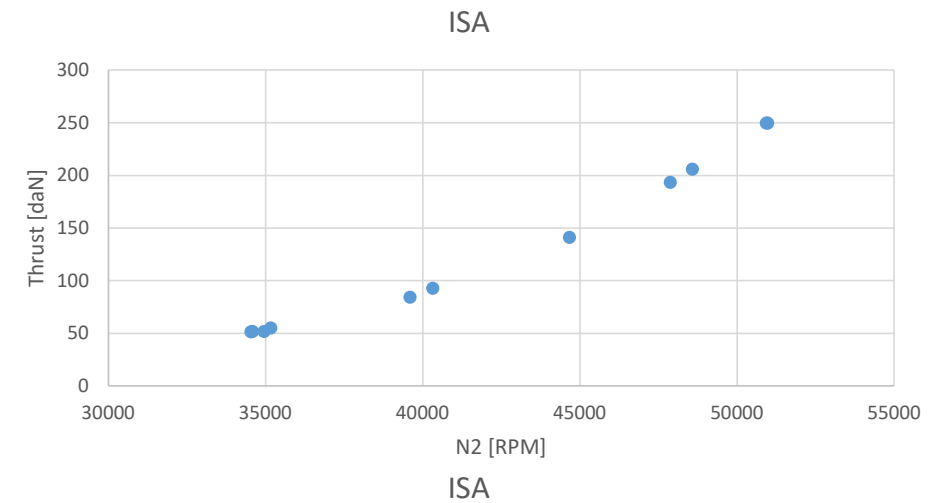
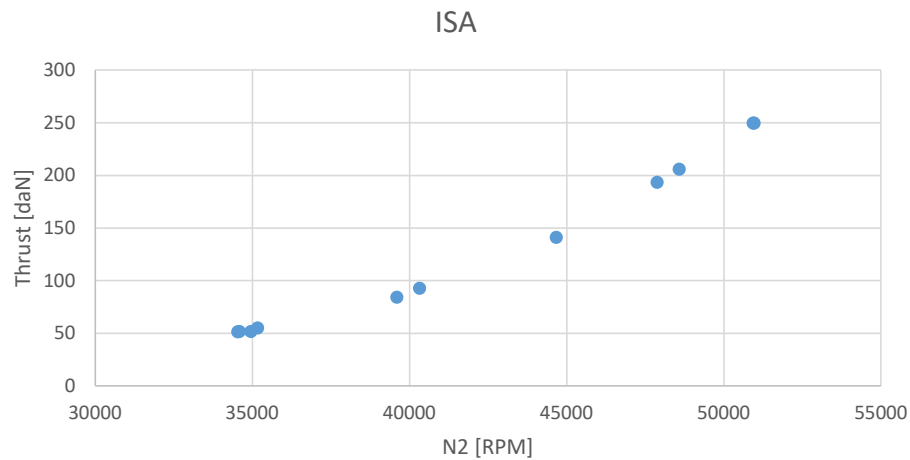
Silnik DEGN - 380



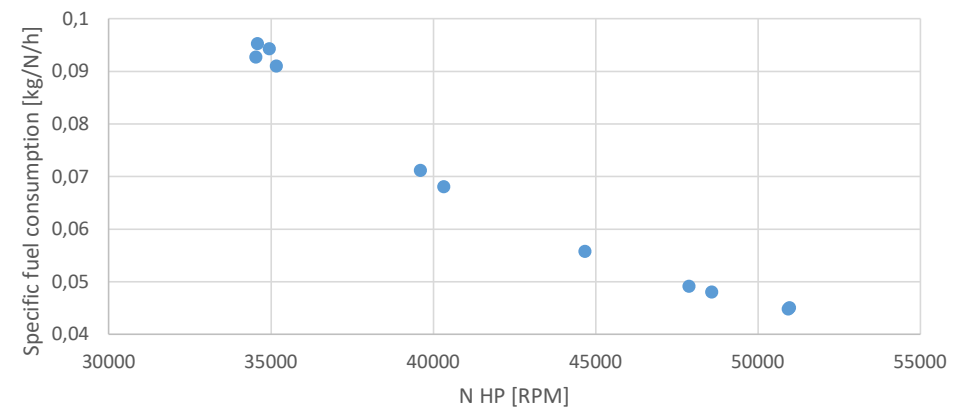
Osiągi kluczowe	
	DGEN 380
Ciąg przy starcie (TOP) ISA SL, Mn=0	255 daN (560 lb)
Jednostkowe zużycie paliwa (SFC)	0,44
Ciąg przy warunkach przelotowych (MRC) ISA SL, Mn=0.338	105 daN (230 lb)
Jednostkowe zużycie paliwa (SFC)	0,78
Współczynnik dwuprzepływowości	7,6
Ciężar silnika z osprzętem bez mocowania	About 85 Kg
Resurs	3 600 ho
Typowe zastosowania	4+1 osobowy do 1650kg MTOW



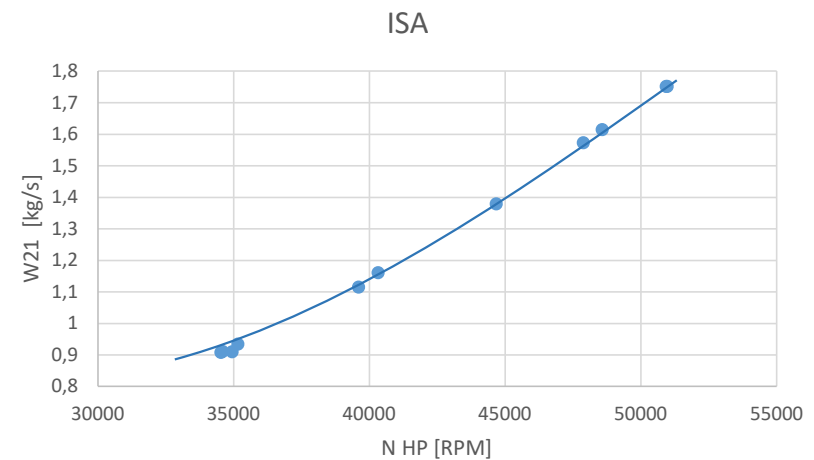
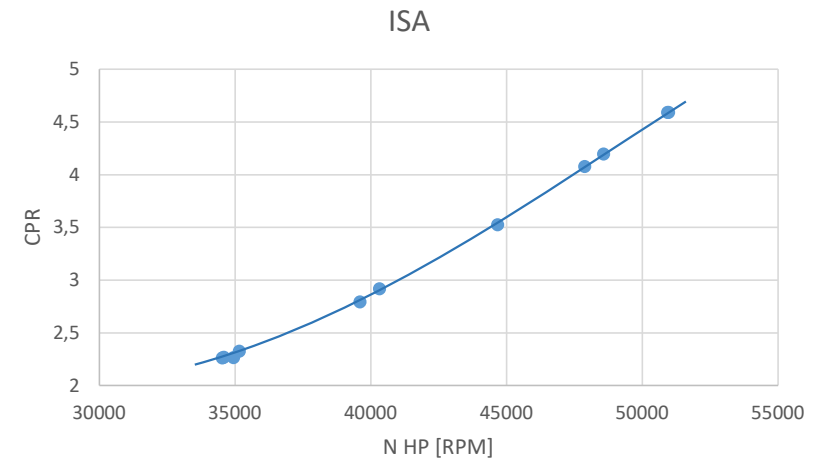
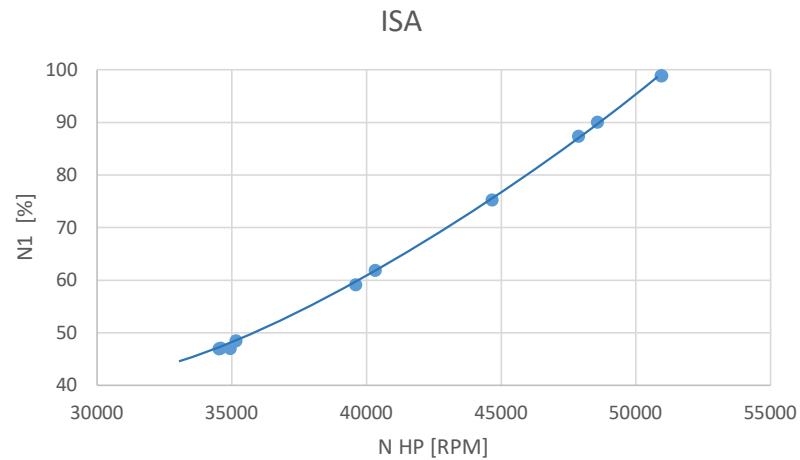
Silnik dwuprzepływowy DGEN 380 - Charakterystyka obrotowa



Ze wzrostem prędkości obrotowej rośnie ciąg silnika i jego zużycie paliwa, a jednostkowe zużycie paliwa maleje



Silnik dwuprzepływowy DGEN 380 - charakterystyka obrotowa c.d.

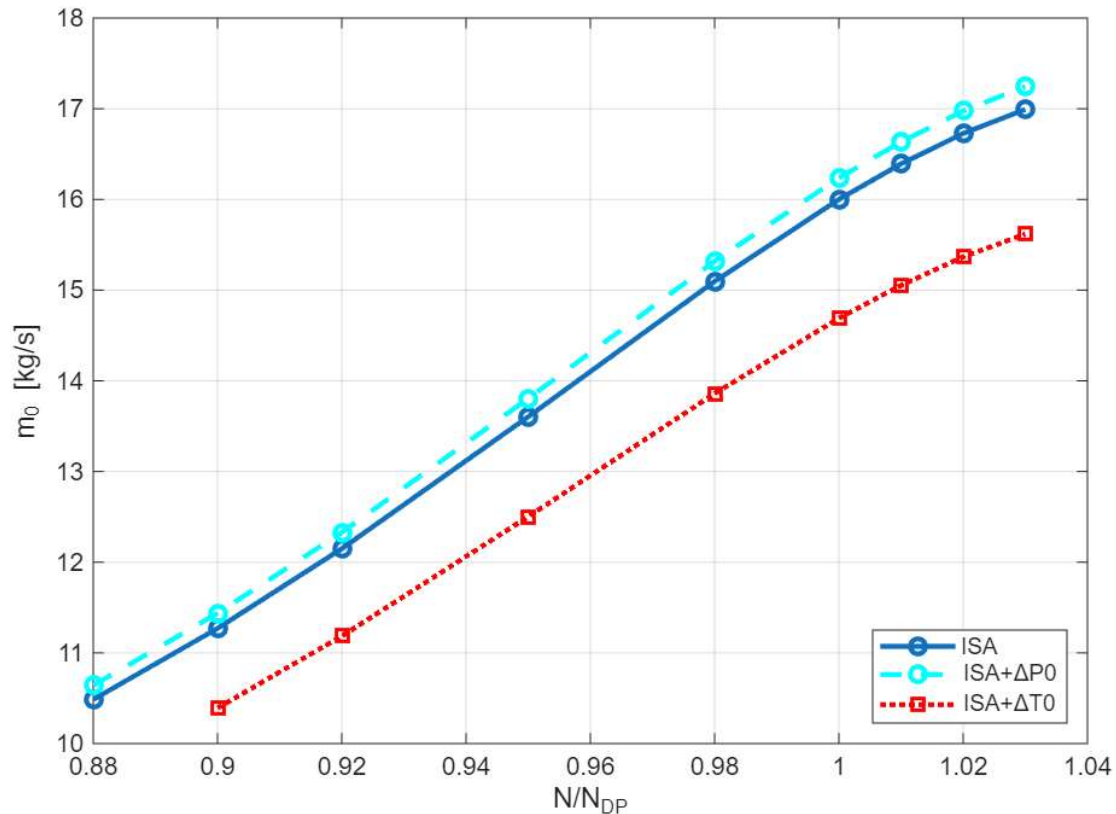


Zmniejszona nieliniowo prędkość wirnika niskiego ciśnienia N1 przy niskich prędkościach obrotowych N2 powoduje mniejszy wydatek powietrza w kanale wewnętrznym silnika W21 i zabezpiecza go przed niestateczną pracą (pompażem),

Wpływ warunków otoczenia na charakterystyki i pracę silnika

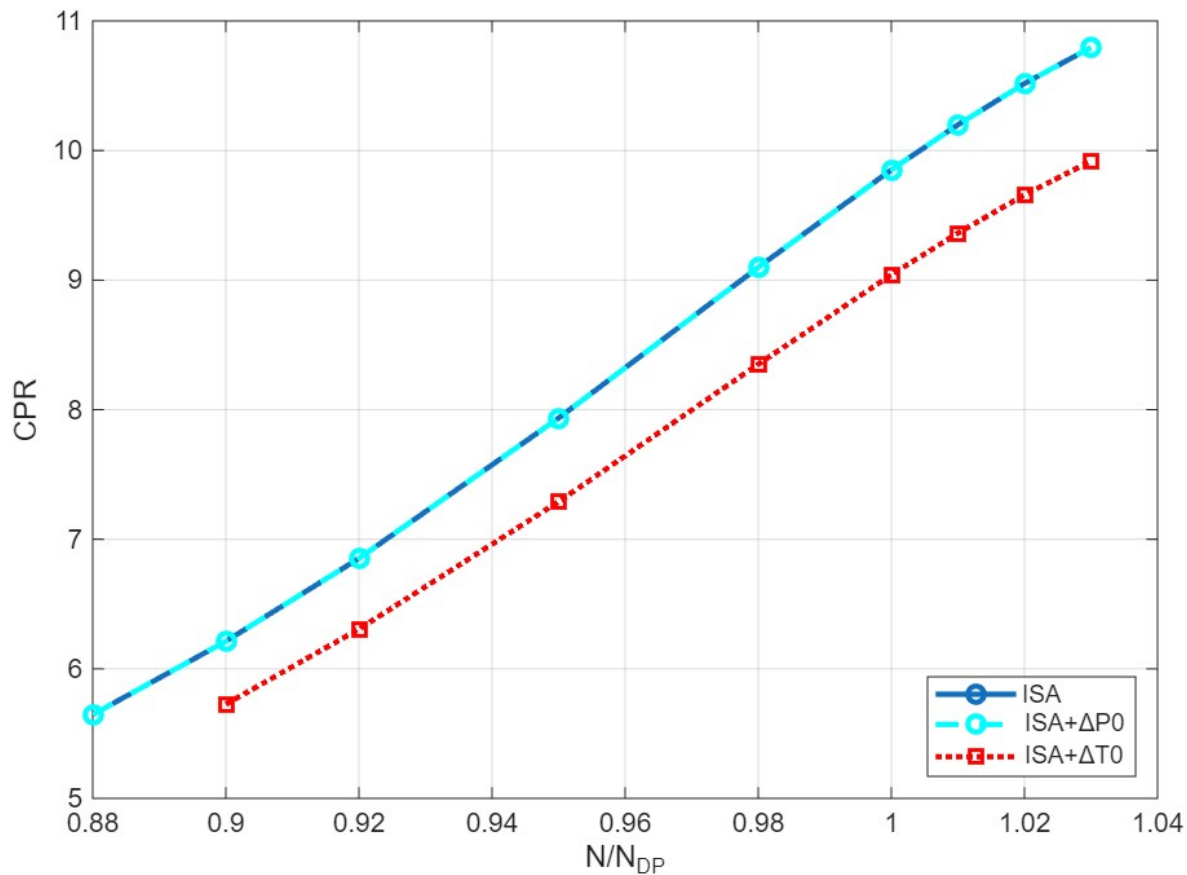
- Temperatura otoczenia istotnie wpływa na osiągi silnika, jej obniżenie przeważnie poprawia parametry pracy silnika, a zwiększenie działa odwrotnie
- Ciśnienie otoczenia w znacznie mniejszym stopniu się zmienia na danej wysokości, nie mniej także wpływa na osiągi silnika. Zwiększenie ciśnienia otoczenia zwiększa gęstość strumienia powietrza, a przez to jego wydatek masowy w silniku, co przekłada się na wzrost ciągu silnika i zużycia paliwa, choć nie wpływa to na zmianę jednostkowego zużycia paliwa

Wydatek masowy powietrza



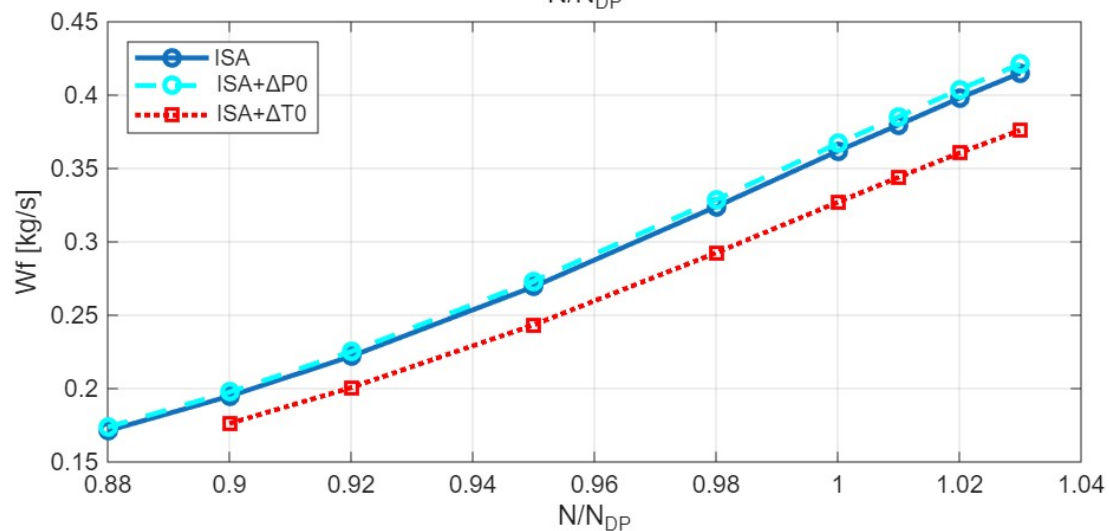
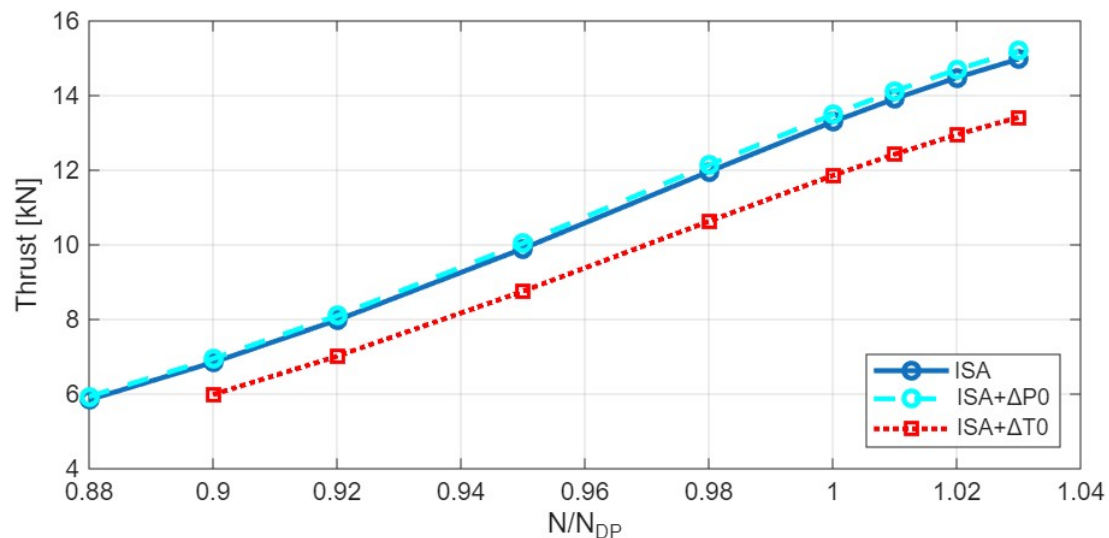
- Zmiana parametrów otoczenia istotnie wpływa na zależność wydatku masowego powietrza w silniku od prędkości obrotowej.
 - Wzrost ciśnienia otoczenia powoduje nieznaczne zwiększenie wydatku powietrza
 - Wzrost temperatury otoczenia powoduje istotne obniżenie charakterystyki wydatku masowego powietrza w silniku

Spręż sprężarki CPR



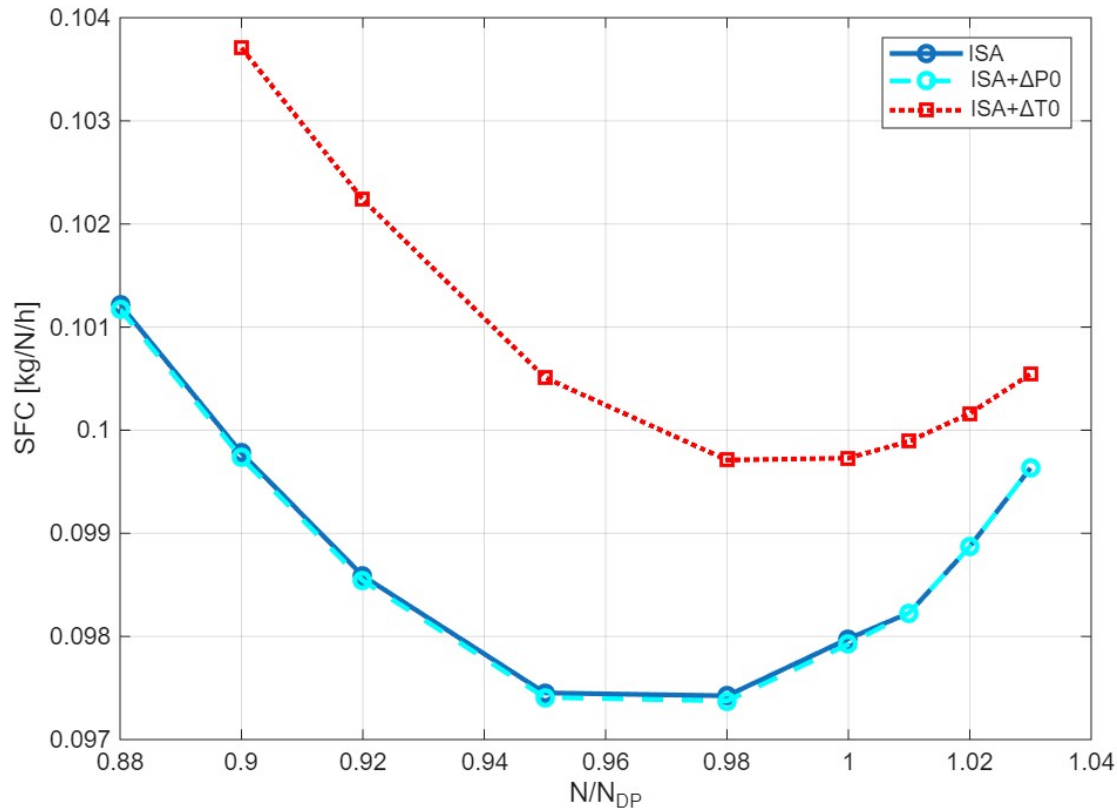
- Zmiana ciśnienia otoczenia nie wpływa na zmianę zależności CPR od prędkości obrotowej.
- Zmiana temperatury otoczenia powoduje zmianę zależności CPR od N . Zwiększenie temperatury otoczenia obniża spręż silnika (pokazano na charakterystyce linią czerwoną, przez analogię zmniejszenie temperatury otoczenia podniesie wartości CPR dla danej prędkości obrotowej)

Ciąg i zużycie paliwa



- Zmiana ciśnienia nieznacznie zmienia charakterystykę ciągu silnika i zużycia paliwa od prędkości obrotowej podnosząc ją delikatnie do góry dla zwiększonego ciśnienia otoczenia.
- Zwiększona temperatura otoczenia powoduje natomiast istotne obniżenie charakterystyki ciągu silnika, ale także pociąga za sobą także zmniejszenie zużycia paliwa dla tej samej prędkości obrotowej wirnika

Jednostkowe zużycie paliwa SFC

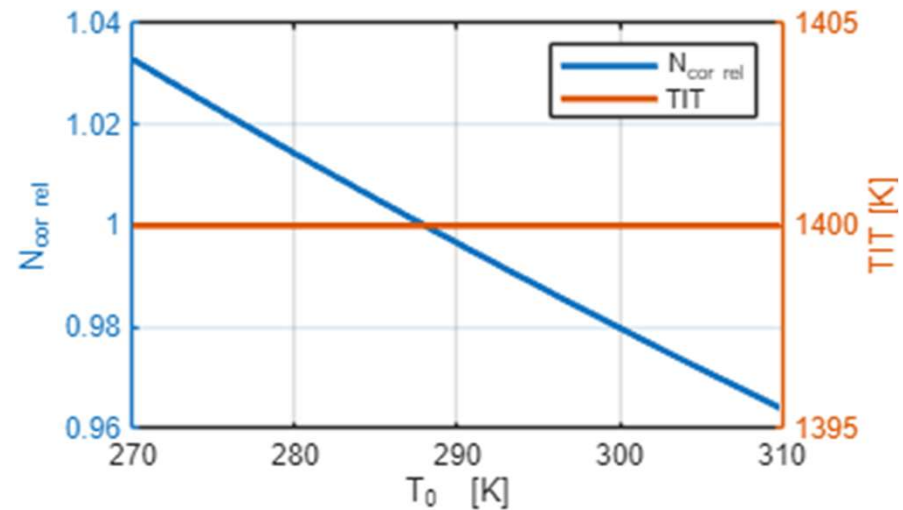
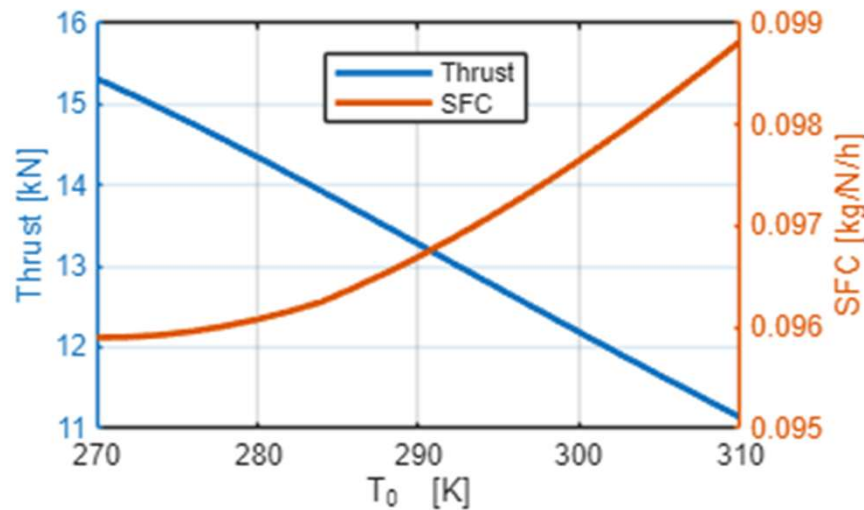


- Zmiana ciśnienia otoczenie nie wpływa na charakterystykę jednostkowego zużycia paliwa w funkcji prędkości obrotowej.
- Zmiana temperatury otoczenia istotnie wpływa na zależność SFC od prędkości obrotowej. Dla wyższej temperatury otoczenia jednostkowe zużycie paliwa jest znacznie wyższe niż dla warunków standardowych przy tej samej prędkości obrotowej. Przez analogię obniżenie temperatury otoczenia powodować będzie zmniejszenie SFC dla tej samej prędkości obrotowej.

WPŁYW TEMPERATURY OTOCZENIA NA CIĄG STARTOWY SILNIKA

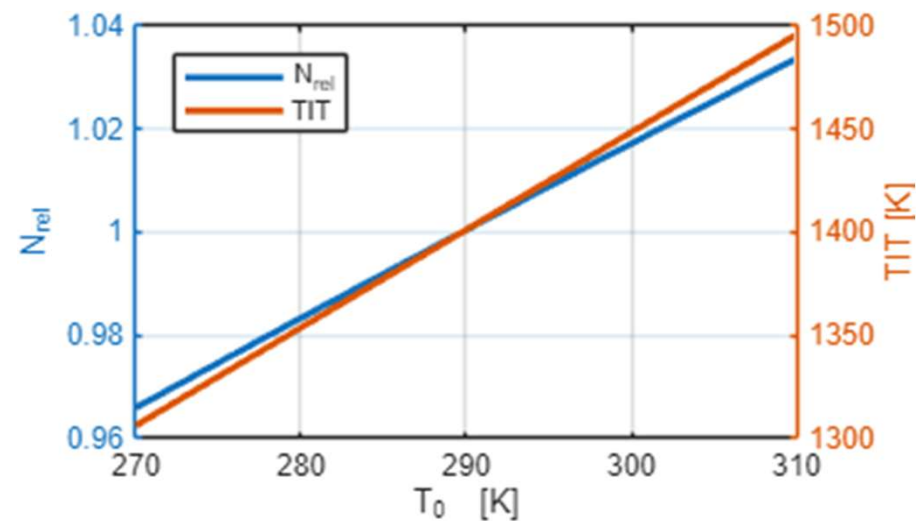
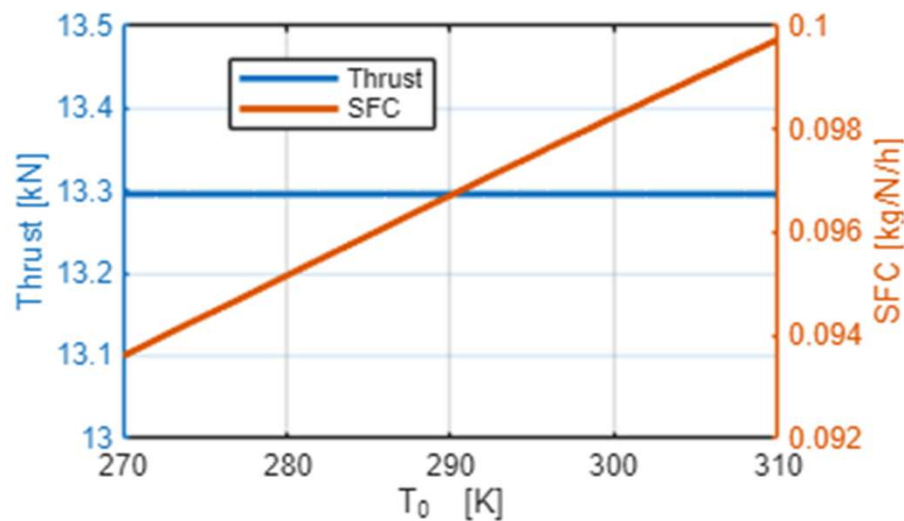
Zmiany temperatury otoczenia istotnie wpływają na parametry pracy i

- Zwiększenie temperatury otoczenia nie jest korzystne, bo powoduje, obniżenie ciągu silnika i wzrost jednostkowego zużycia paliwa
- Przy zachowaniu tej samej prędkości obrotowej silnika utrzymuje się na stałym poziomie temperatury gazów na wejściu do turbiny, a następuje spadek prędkości obrotowej zredukowanej ze wzrostem temperatury otoczenia



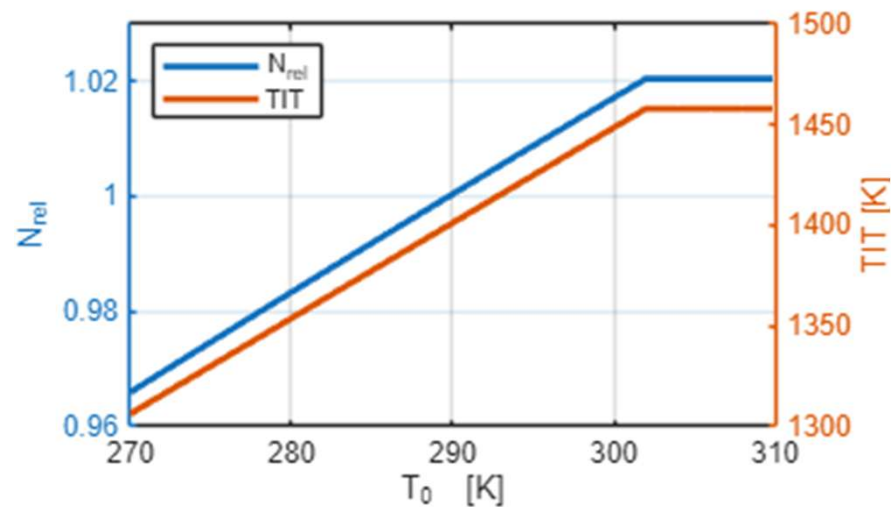
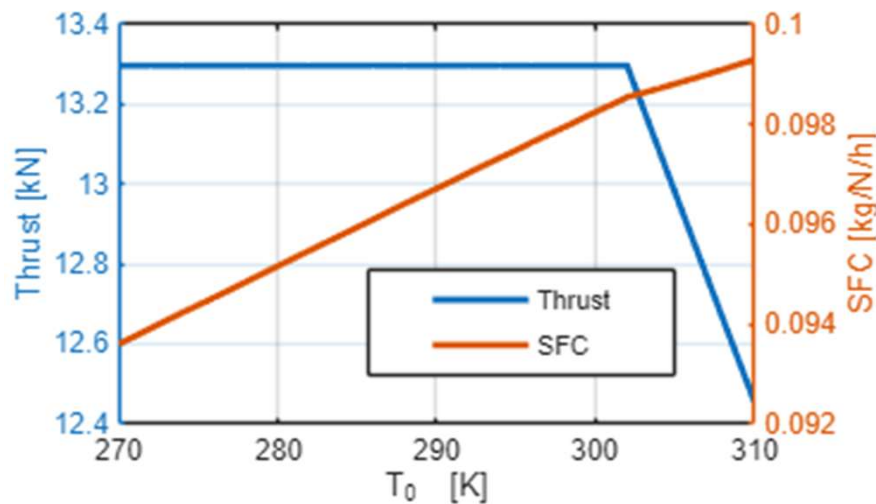
Rating Silnika

- W silniku dąży się do tego aby utrzymać stałą wartość ciągu startowego, co powoduje, że w rzeczywistości silnik poprzez system sterowania będzie utrzymywał inne charakterystyki niż pokazano wcześniej, zachowując stały ciąg wynikający z jego RATINGU
- Powoduje do, że ze wzrostem temperatury otoczenia rośnie prędkość obrotowa silnika i temperatura gazów przed turbiną, tak że w efekcie przy pewnej temperaturze otoczenia następuje przekroczenie wartości dopuszczalnych dla silnika
- Aby nie dopuścić do przekroczenia wartości dopuszczalnych utrzymanie stałego ciągu jest możliwe do określonej wartości temperatury otoczenia (np. ISA + 15K w zależności od założeń projektowych)



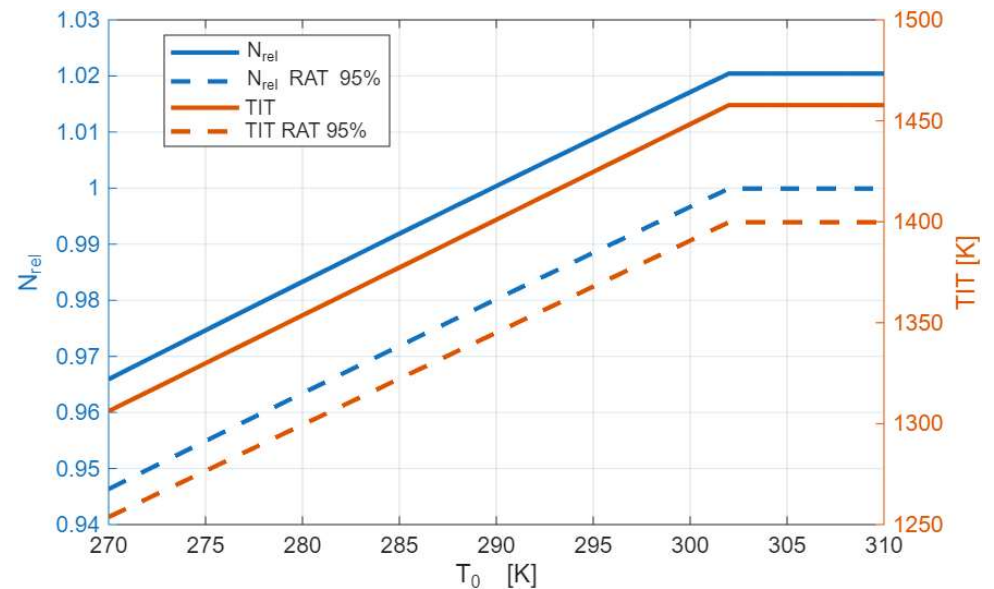
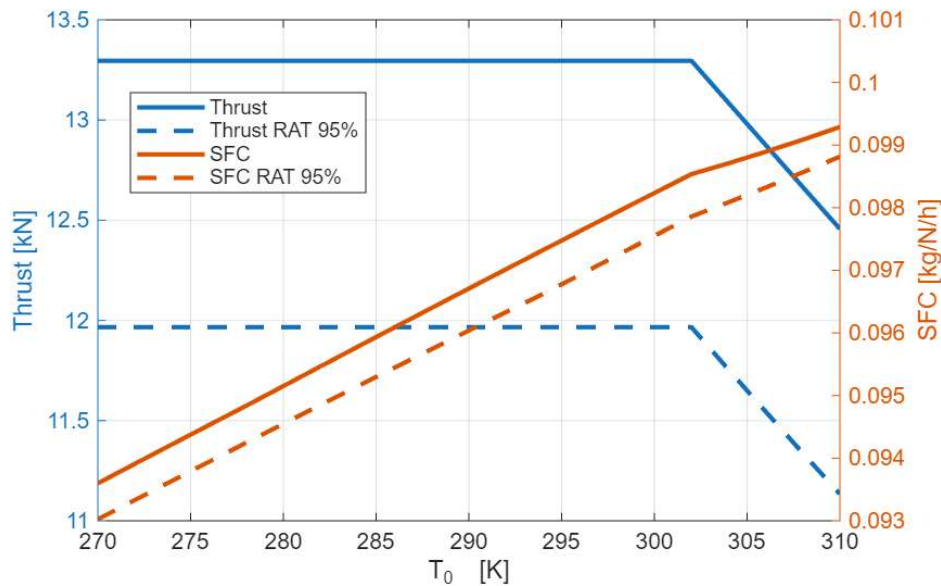
STAŁY CIĄG SILNIKA DO OKREŚLONEJ TEMPERATURY OTOCZENIA (FLAT-RATED TEMPERATURE)

- Przykład charakterystyk utrzymania stałego ciągu do określonej temperatury otoczenia (np. ISA +15K) pokazano na poniższych wykresach. Wynika z nich, że:
 - Ciąg silnika po przekroczeniu tej temperatury spada
 - Prędkość obrotowa i temperatura gazów przed turbiną do tej temperatury rosną, a następnie są utrzymywane na stałym poziomie
 - SFC cały czas wzrasta ze wzrostem temperatury otoczenia, ale po przekroczeniu temperatury stałego ciągu rośnie wolniej



Ratingi silnika

- W lotnictwie stosuje się różne ratingi silnika, co powoduje, że może być on eksploatowany z różnymi obciążeniami mechanicznymi i cieplnymi. Silnik o obniżonym ratingu będzie cechował się dłuższą żywotnością i będzie mógł mieć mniejsze reżimy eksploatacyjne (dłuższe okresy między przeglądowe i naprawcze)
- Do samolotów eksploatowanych w klimacie gorącym stosuje się silniki o zwiększonym ratingu w celu osiągnięcia wymaganych założeń eksploatacyjnych samolotu.
- Przykład silnika PW 1100G-JM o ratingach 24, 27 i 33, co odpowiada cągowi startowemu odpowiednio: 24 000 lbf (107 kN), 27 000 lbf (120 kN) i 33000 lbf (147 kN)



Korekcja parametrów pracy silnika (corrected parameters)

- Ciąg zredukowany

$$T_{corr} = T/P_{t0}$$

- Zredukowany wydatek powietrza

$$m_{corr} = m * \sqrt{T_{t0}/P_{t0}}$$

- Zredukowany wydatek paliwa

$$m_{f\ corr} = m_f / \sqrt{T_{t0}/P_{t0}}$$

- Zreducowane jednostkowe zużycie paliwa

$$SFC_{corr} = SFC / \sqrt{T_{t0}}$$

- Zredukowana prędkość obrotowa

$$n_{corr} = n / \sqrt{T_{t0}}$$

Parametry zredukowane są stosowane w celu uniezależnienia się od warunków otoczenia przy przygotowywaniu jednoznacznych charakterystyk silnika.

Redukcja parametrów pracy silnika służy do:

- Sprowadzenia wyników pomiarów silnika w różnych warunkach otoczenia do jednych ustandaryzowanych, co pozwala porównać osiągi silnika
- W obliczeniach osiąarów silnika wykorzystując dane zredukowane można wykonać operacje odwrotną i wyliczyć osiągi silnika w innych warunkach pracy.

Parametry zredukowane do warunków standardowych ISA

- Ciąg zredukowany

$$T_{cor} = T / (P_{t0} / 101325)$$

- Zredukowany wydatek powietrza

$$m_{cor} = m * \sqrt{(T_{t0} / 288)} / \left(\frac{P_{t0}}{101325}\right)$$

- Zredukowany wydatek paliwa

$$m_{f\ cor} = m_f / \sqrt{\left(\frac{T_{t0}}{288}\right)} / \left(\frac{P_{t0}}{101325}\right)$$

- Zreduowane jednostkowe zużycie paliwa

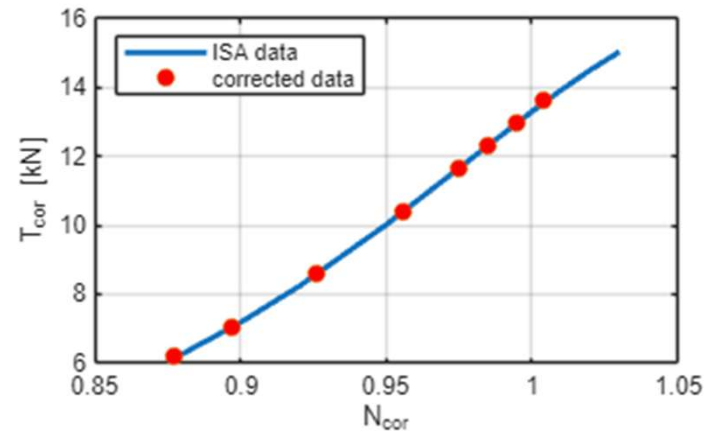
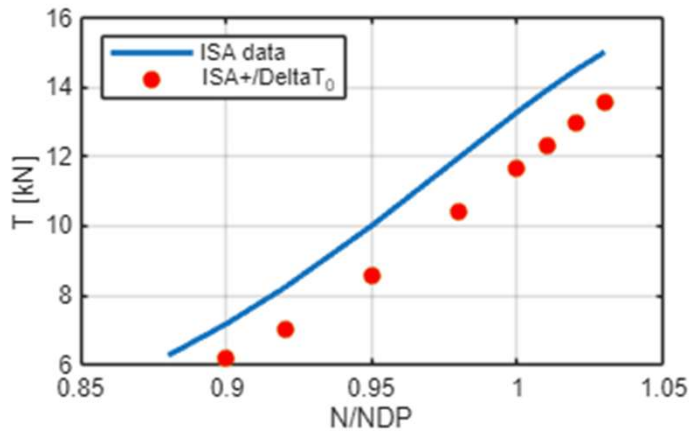
$$SFC_{cor} = SFC / \sqrt{T_{t0} / 288}$$

- Zredukowana prędkość obrotowa

$$n_{cor} = n / \sqrt{T_{t0} / 288}$$

Dla tak przyjętych zależności parametry pracy silnika zmierzone w warunkach standardowych są równe parametrom odniesienia (corrected parameters), a ich jednostka jest zgodna z jednostką parametru.

Przykładowe wyniki Charakterystyki w parametrach fizycznych i skorygowane

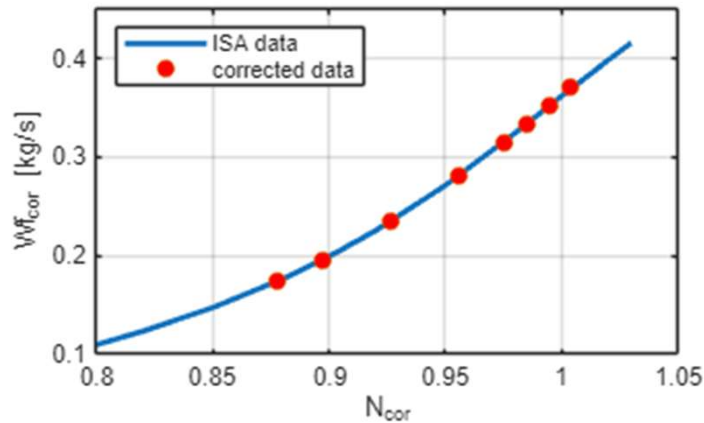
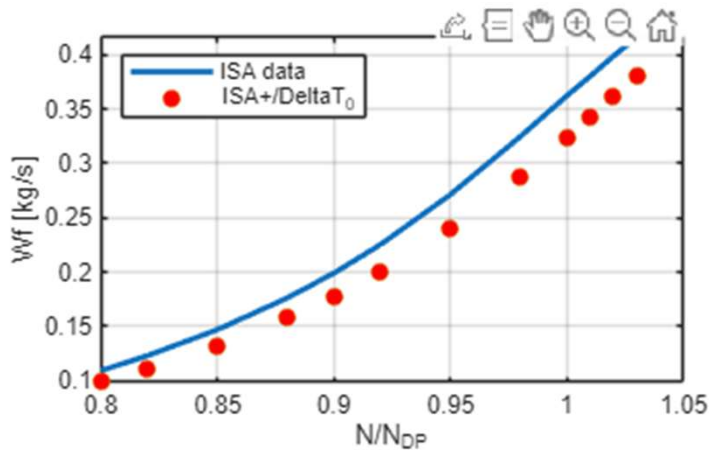


Charakterystyka ciągu została skorygowana względem prędkości

$$n_{cor} = n / \sqrt{T_{t0} / 288}$$

Gdyby ciśnienie się zmieniło względem ISA ciąg też musiałby być skorygowany wg zależności

$$T_{cor} = T / (P_{t0} / 101325)$$

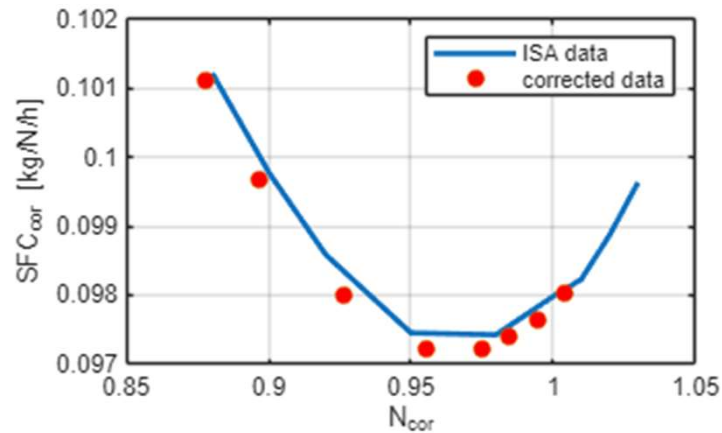
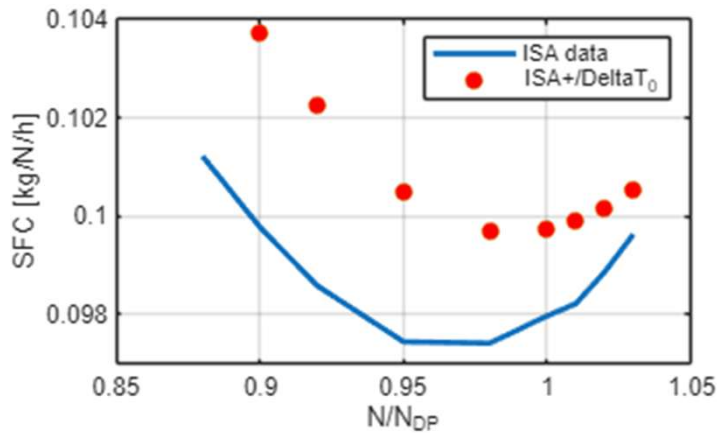


Charakterystyka zużycia paliwa została skorygowana względem prędkości i Wf

$$n_{cor} = n / \sqrt{T_{t0} / 288}$$

$$W_{f\ cor} = m_f / \left(\sqrt{\left(\frac{T_{t0}}{288} \right)} / \left(\frac{P_{t0}}{101325} \right) \right)$$

Przykładowe wyniki Charakterystyki w parametrach fizycznych i skorygowane



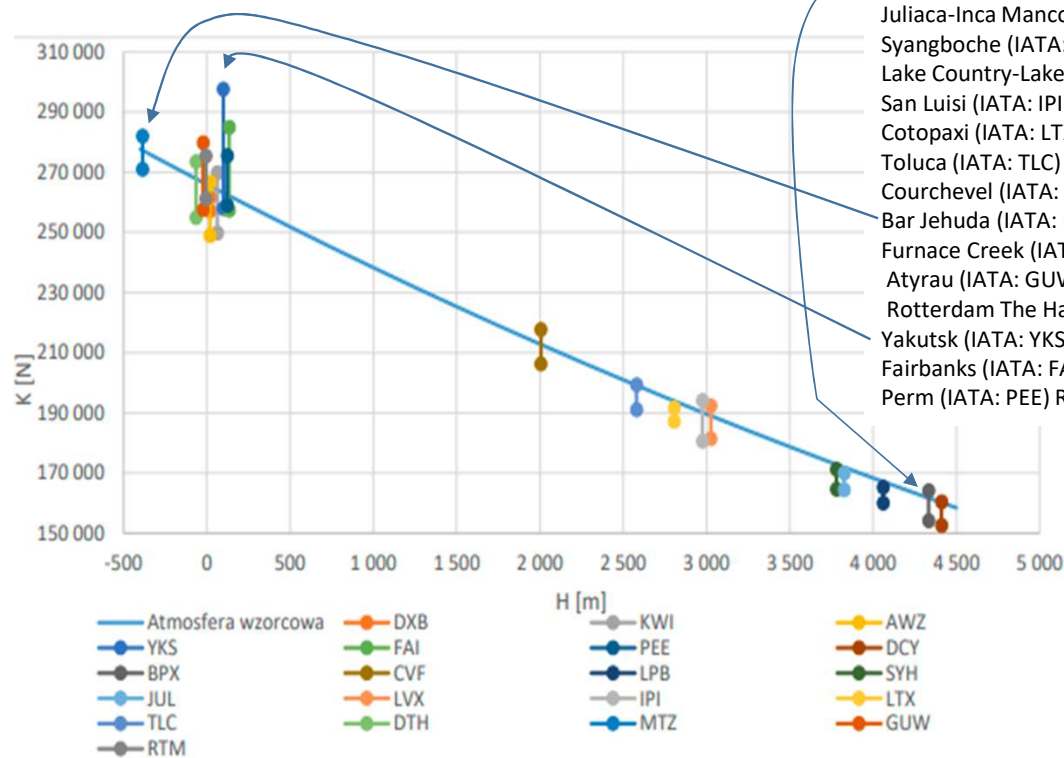
Charakterystyka zużycia paliwa została skorygowana względem prędkości i SFC

$$n_{cor} = n / \sqrt{T_{t0}/288}$$
$$SFC_{cor} = SFC / \sqrt{T_{t0}/288}$$

Zimny dzień o wysokim ciśnieniu jest korzystniejszym z punktu widzenia pracy i osiągnięć silnika, niż gorący dzień i niskie ciśnienie. Przykładowo mało korzystne są lotniska położone na dużej wysokości w strefie gorącej.

Przykład obliczeń ciągu startowego silnika dla różnych lotnisk (ciąg nominalny 265 kN)

Dubaj (IATA: DXB) ZEA – 308K (34,85°C)
 Kuwejt (IATA: KWI) Kuwejt – 322,15K (49°C)
 Ahwaz (IATA: AWZ) Iran – 327,15K (54°C)



Daocheng Yading (IATA: DCY) Chiny – 4411m.n.p.m.
 Qamdo Bamda (IATA: BPX) Chiny – 4334m.n.p.m.
 La Paz El Alto (IATA: LPB) Boliwia – 4061m.n.p.m.
 Juliaca-Inca Manco Capac (IATA: JUL) Peru – 3826m.n.p.m.
 Syangboche (IATA: SYH) Nepal – 3780m.n.p.m.
 Lake Country-Lakeview (IATA: LVX) USA – 3026m.n.p.m.
 San Luisi (IATA: IPI) Kolumbia – 2976m.n.p.m.
 Cotopaxi (IATA: LTX) Ekwador – 2806m.n.p.m.
 Toluca (IATA: TLC) Meksyk – 2580m.n.p.m.
 Courchevel (IATA: CVF) Francja – 2006m.n.p.m.
 Bar Jehuda (IATA: MTZ) Izrael – 386m.p.p.m.
 Furnace Creek (IATA: DTH) USA – 64m.p.p.m.
 Atyrau (IATA: GUW) Kazachstan – 22m.p.p.m.
 Rotterdam The Hauge (IATA: RTM) Holandia – 5m.p.p.m.
 Yakutsk (IATA: YKS) Rosja – 205,45K (-67,7°C)
 Fairbanks (IATA: FAI) USA – 232,15K (-41°C)
 Perm (IATA: PEE) Rosja – 255,65K (-17,5°C)

Najwyższy ciąg startowy będzie rozwijał silnik startując z lotnisk położonych w strefie niskich temperatur na niedużej wysokości, zaś najgorsze osiągi będzie miał silnik startując w strefie gorącej na dużej wysokości

CHARAKTERYSTYKI
PRĘDKOŚCIOWO- WYSOKOŚCIOWE
SILNIKA

Zależności do przeliczenia punktu pracy silnika (dla tej samej prędkości zredukowanej)

- Ciąg

$$T = \frac{T_{cor}}{P_{t0\ cor}} P_{t0}$$

- Wydatek masowy powietrza

$$m = \frac{m_{cor} \sqrt{T_{t0\ cor}}}{P_{t0\ cor}} \frac{P_{t0}}{\sqrt{T_{t0}}}$$

- Wydatek masowy paliwa

$$m_f = \frac{m_{fco}}{\sqrt{T_{t0\ cor}} P_{t0\ cor}} \sqrt{T_{t0}} P_{t0}$$

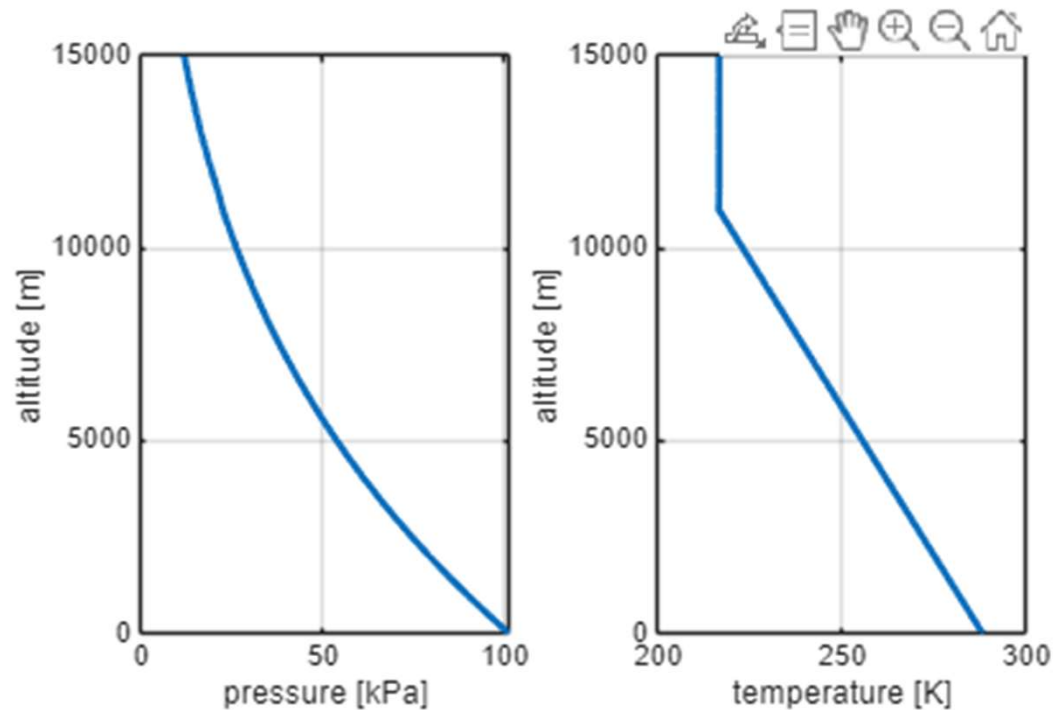
- Jednostkowe zużycie paliwa

$$SFC = \frac{SFC_{cor}}{\sqrt{T_{t0\ cor}}} \sqrt{T_{t0}}$$

- Prędkość obrotowa

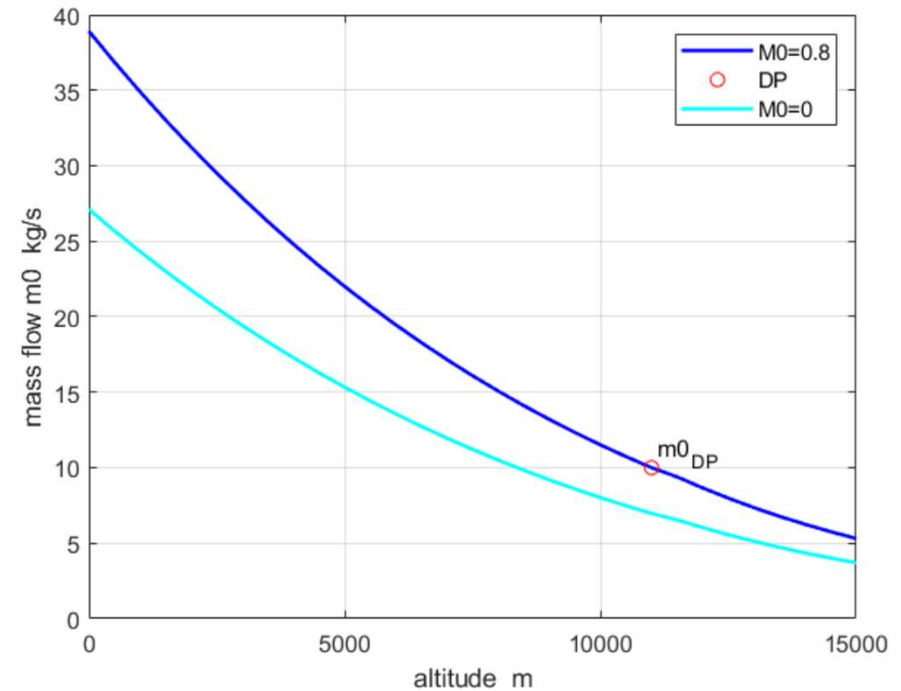
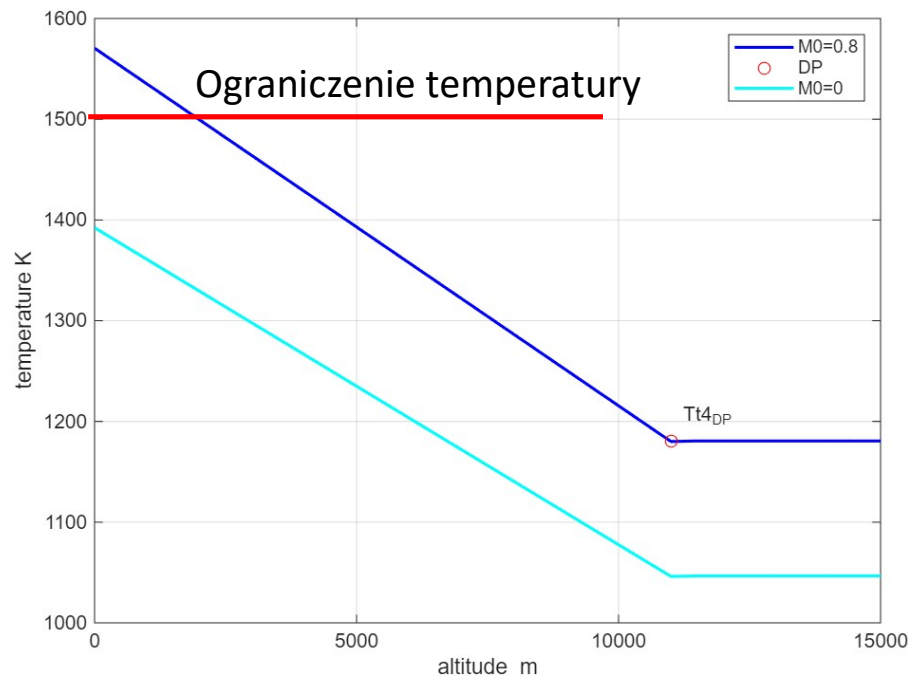
$$n = \frac{n_{cor}}{\sqrt{T_{t0\ cor}}} \sqrt{T_{t0}}$$

Zależność temperatur i ciśnień w silniku z wysokością



Ciśnienie z wysokością maleje w sposób ciągły przy czym wg ISA po 11 km zmienia się profil zmiany ciśnienia
Temperatura z wysokością maleje liniowo do 11 km po tej wysokości jest stała w zakresie do 20 km

Zmiana parametrów pracy silnika z wysokością

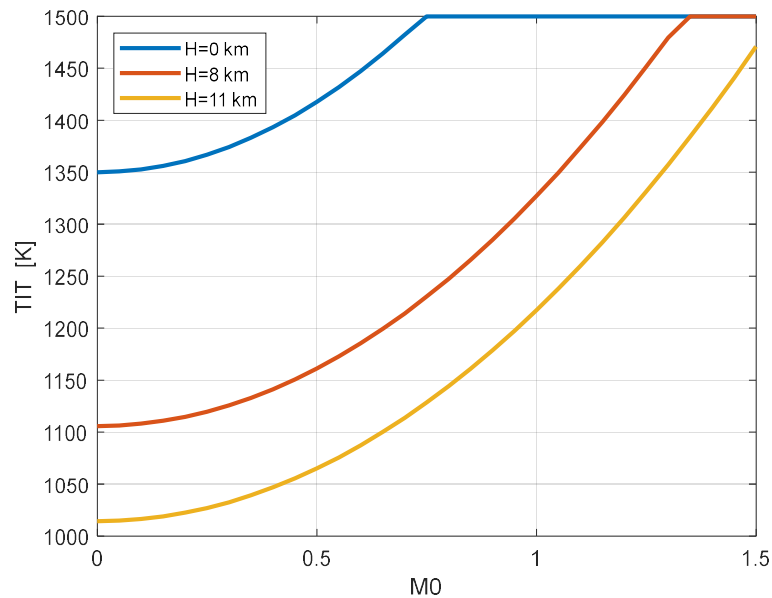


Zmianę temperatury TIT i wydatku powietrza w silniku można wyznaczyć z zależności:

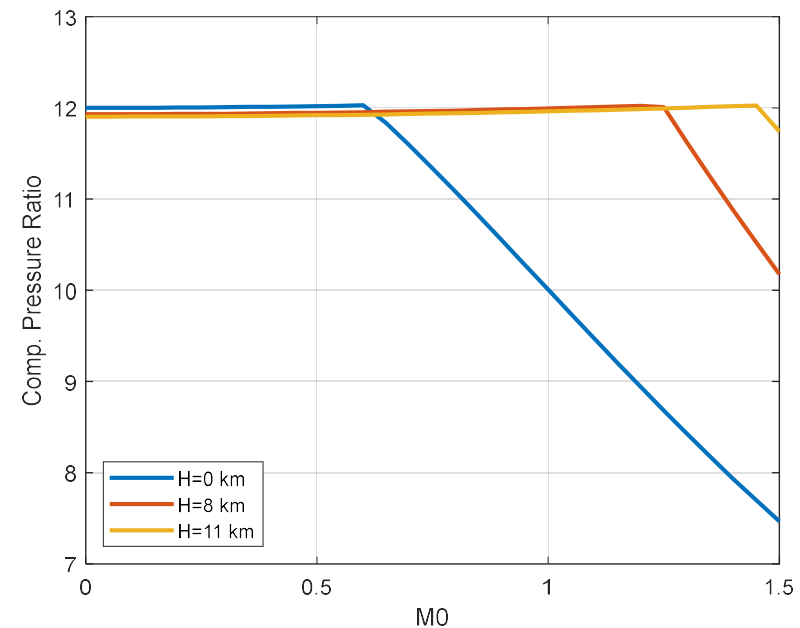
$$m_0(M_0, H) = m_{0_{DP}} \sqrt{\frac{T_{t2_{DP}}}{T_{t2}(M_0, H)}} * \frac{P_{t2}(M_0, H)}{P_{t2_{DP}}}$$

$$T_{t4}(M_0, H) = \frac{T_{t4_{DP}}}{T_{t0_{DP}}} * T_{t0}(M_0, H)$$

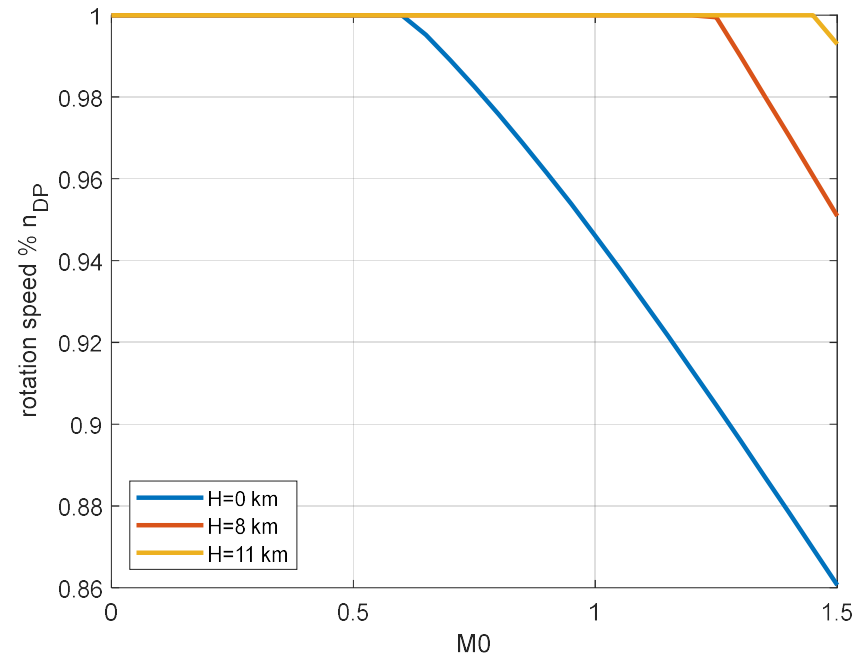
Charakterystyka TIT and CPR



TIT na większej wysokości rośnie w większym zakresie prędkości zanim osiągnie wartość maksymalną.
Spręż sprężarki jest stały dopóki TIT nie osiągnie wartości maksymalnej, później obniża się. Jest to spowodowane spadkiem prędkości obrotowej i rosnącą temperaturą na wlocie do sprężarki

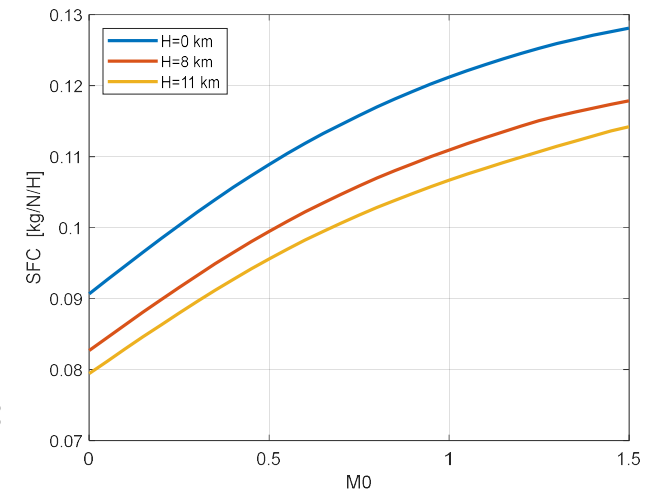
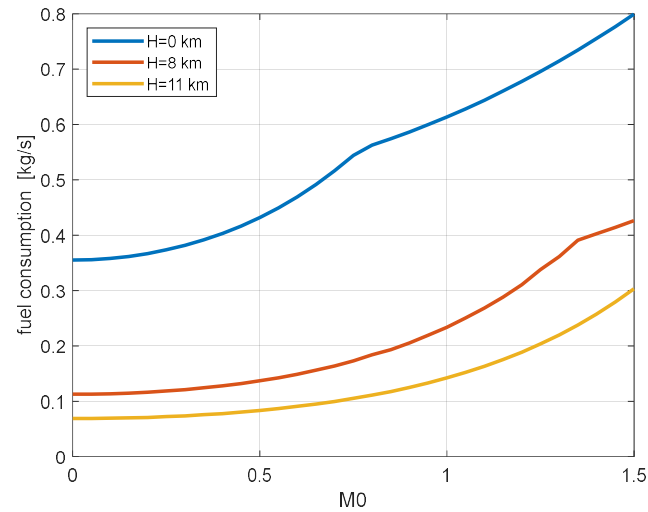
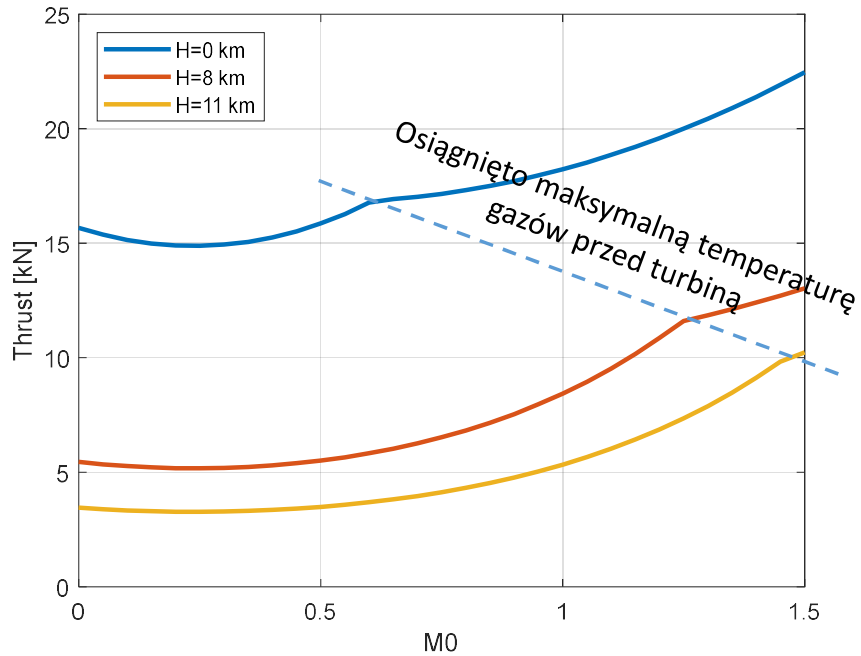


Charakterystyka prędkości obrotowej



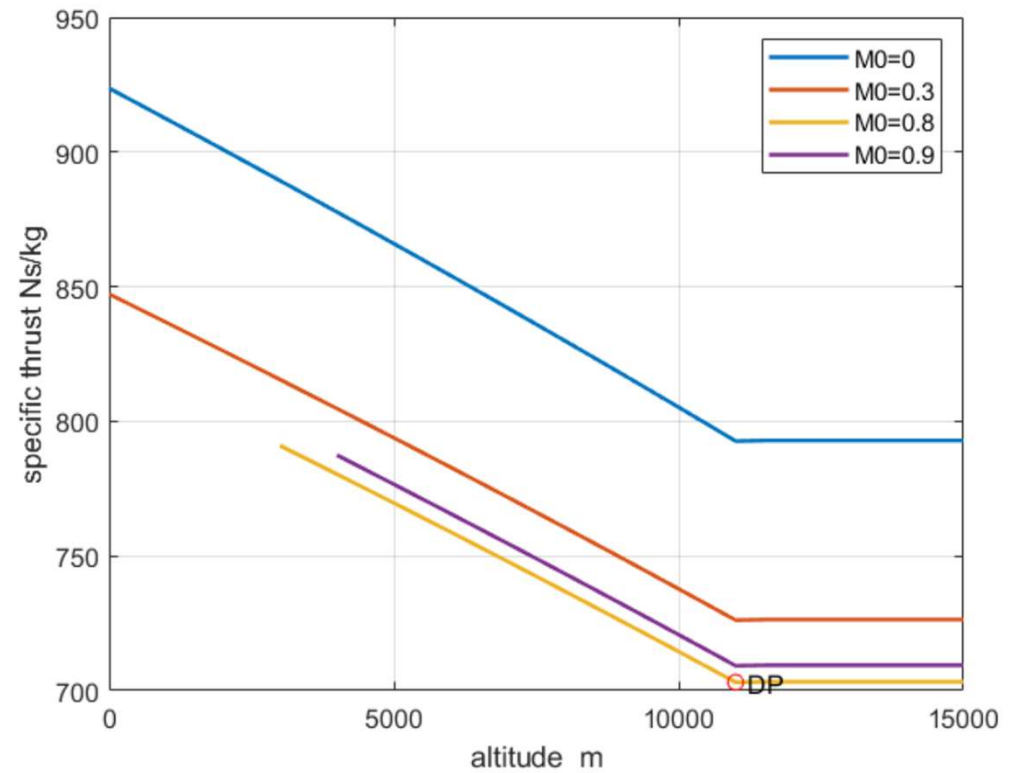
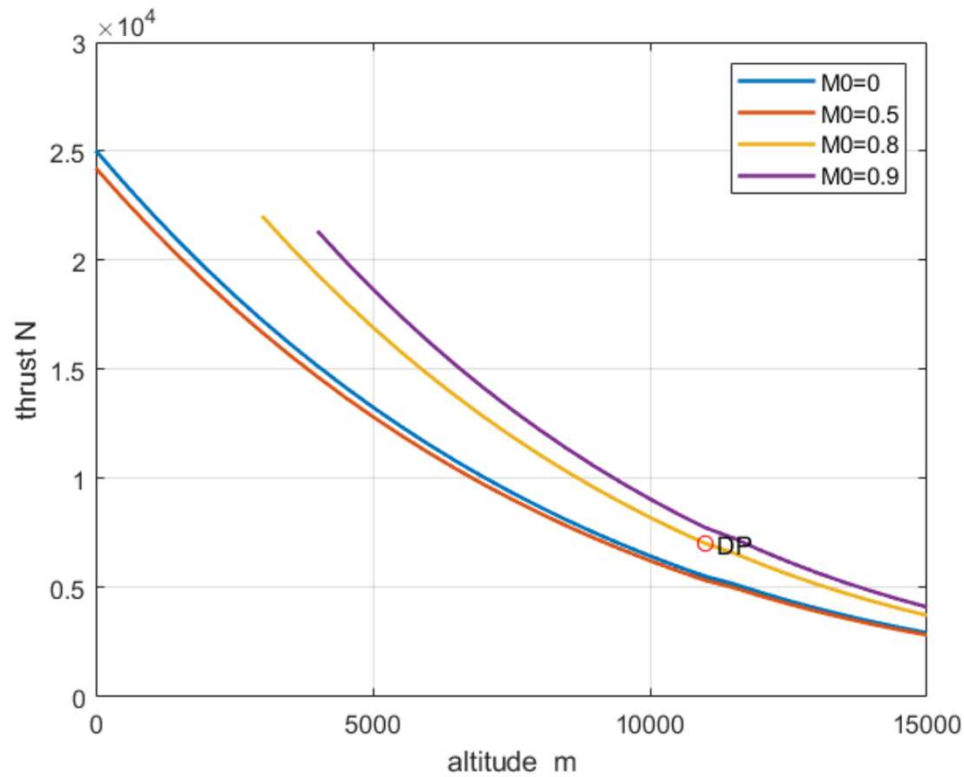
Zgodnie z założonymi warunkami wykonywania charakterystyki – prędkość obrotowa ze zmianą prędkości lotu jest stała, do momentu osiągnięcia maksymalnej temperatury gazów przed turbiną później ustala się na stałym poziomie

Charakterystyka ciągu i zużycia paliwa



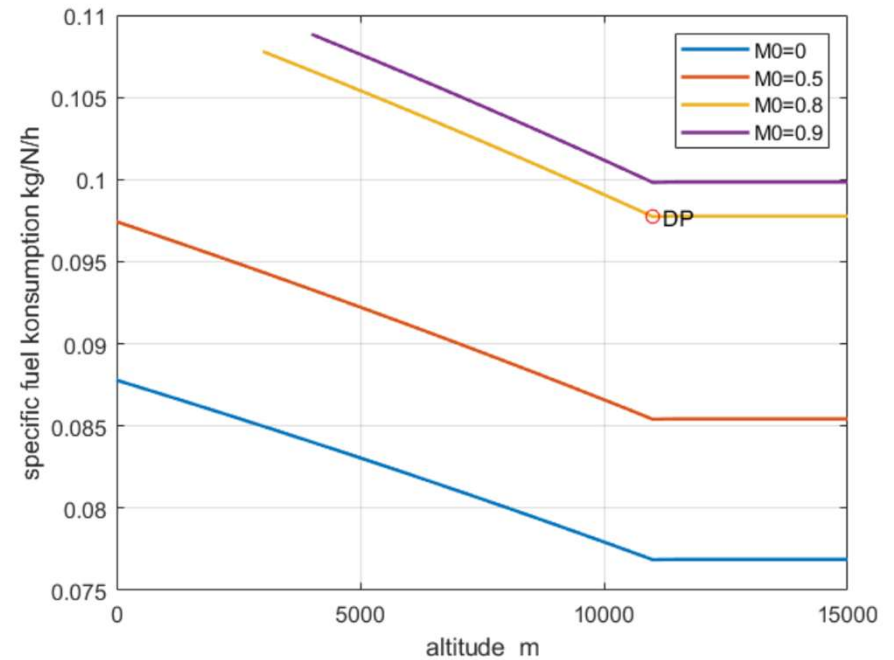
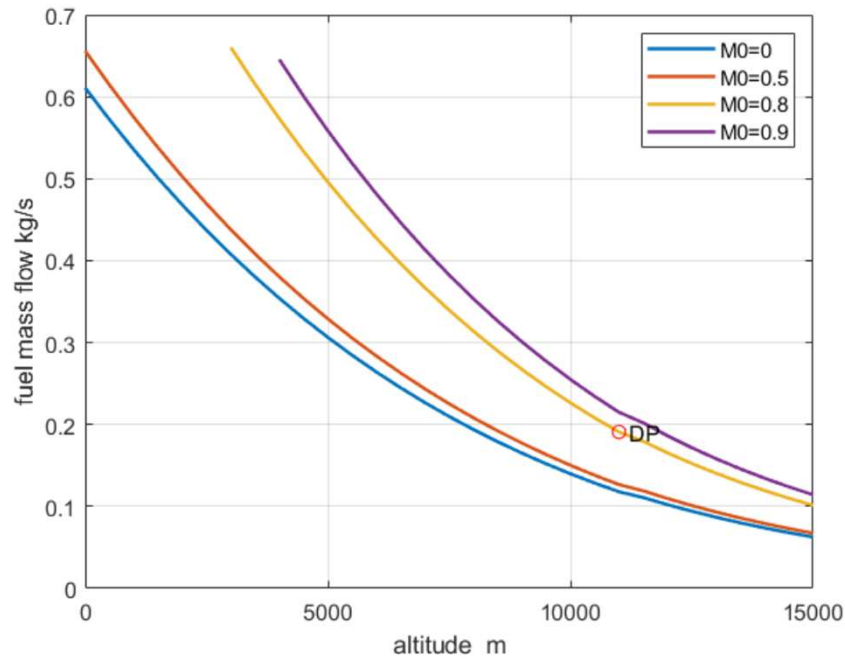
Przedstawione wyniki są zgodne z: **Jack D. Mattingly: Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets AIAA Education Series**

Ciąg i ciąg jednostkowy z wysokością



Ciąg maleje z wysokością przy czym przy 11 km zmienia się intensywność zmian
Ciąg jednostkowy maleje z wysokością do 11 km, potem utrzymuje się na stałym poziomie

Zużycie i jednostkowe zużycie paliwa



Zużycie paliwa maleje z wysokością przy czym przy 11 km zmienia się intensywność zmian
Jednostkowe zużycie paliwa maleje z wysokością do 11 km, potem utrzymuje się na stałym poziomie

Dziękuję za uwagę