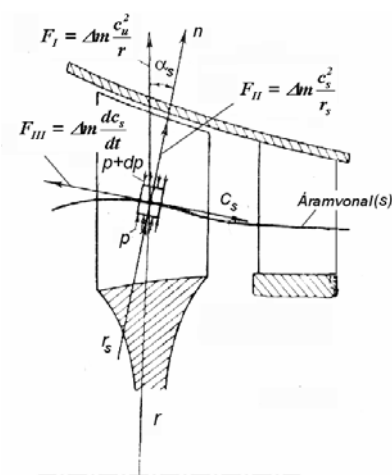


**REPÜLŐGÉP HAJTÓMŰVEK TERVEZÉSE**  
**AXIÁLIS KOMPRESSZOROK AERO-TERMODINAMIKAI**  
**SZÁMÍTÁSA**  
(Kézirat)



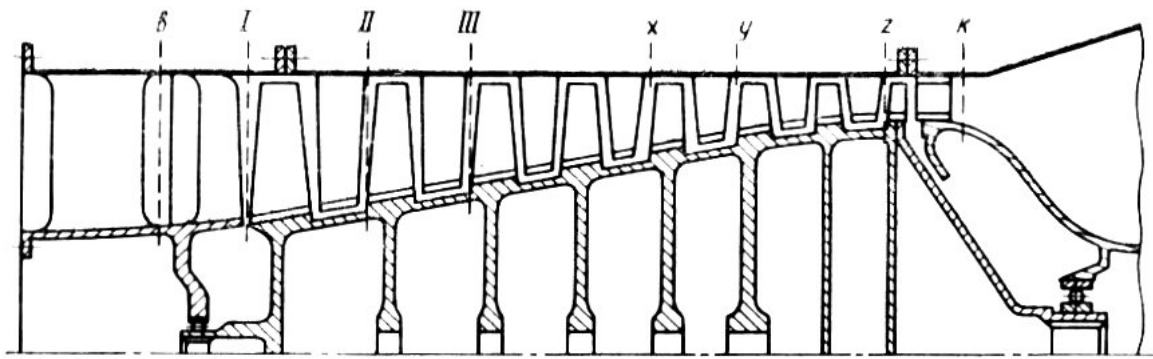
Összeállította:

Dr. Sánta Imre  
egyetemi docens

Budapest  
2009

# TARTALOM

1. Elméleti összefoglaló	2
1.1. Folyamat és paraméterváltozások a kompresszorfokozatban	2
1.2. Lapátra ható erő meghatározása	2
1.3. A nyomásviszony	3
1.4. A nyomásviszony növelésének lehetőségei és a korlátok	4
1.5. Az áramlási keresztmetszet elzáródása	5
1.6. Reakciófok	5
1.7. Az áramlási szögek változása a lapáthossz mentén	8
1.7.1. Elcsavarási törvényszerűségek	9
1.7.2. Lapátelcsavarás turbinákban	11
2. Axiálkompresszor aero-termodinamikai számítása	13
2.1. A kompresszor fő méreteinek meghatározása	13
2.2. Fokozatszám megválasztása	15
2.3. Fokozatok számítása	16
2.4. Osztás, húr hossz, lapátszám meghatározása	21
2.5. Lapátszögek meghatározása	21
3. Fokozati jelleggörbe számítás	24
3.1. Részterhelési üzemmódok	29
4. Kompresszor karakterisztika	33
5. Kompresszor számítása fajlagos munkatényező alapján	34
6. Birotatív (kettős forgásirányú) kompresszor	37
7. Birotatív turbina	38
8. Axiálkompresszor szerkezeti kialakítások	39

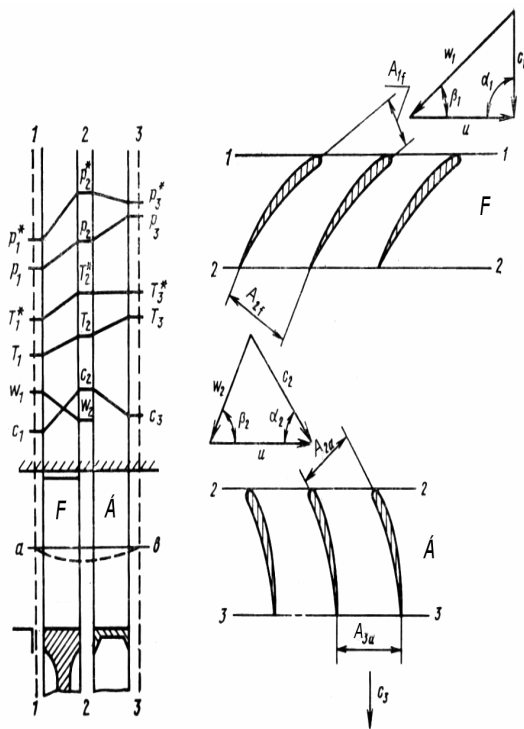


1.1. ábra. Többfokozatú axiálkompresszor

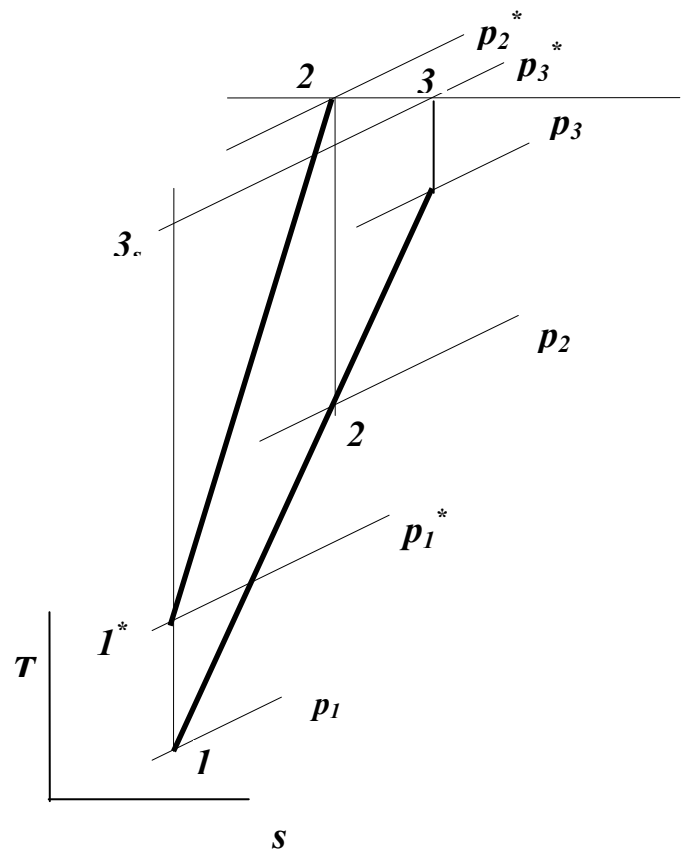
## 1. ELMÉLETI ÖSSZEFOGLALÓ

### 1.1. Folyamat és paraméterműváltozások a kompresszor fokozatban

Az ábra szemlélteti az axiális kompresszor fokozatban bekövetkező paraméterműváltozásokat és a sebességi háromszöget

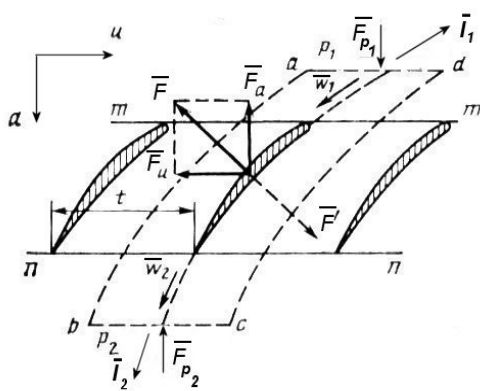


1.2. ábra



1.3. ábra. T-s diagram.

## 1.2. Lapátra ható erő meghatározása



1.4.ábra

Ellenőrző felületet veszünk fel az 1.4 ábrának megfelelően, majd arra felírjuk az impulzus tételt  
 $\bar{F}$  - lapátra ható erő,  $\bar{F}'$  - gázra ható erő

$$\int_A \bar{w} \rho \bar{w} d\bar{A} = - \int_A p d\bar{A} + \int_V \rho \bar{g} dV - \bar{F} \quad (1.1)$$

A tömegerőket, mint a gázokra nézve kicsiny mennyiséget elhanyagolva és az ábra szerinti vektorokat behelyettesítve

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{F}_{p2} + \bar{F}_{p1} + \bar{F} \quad (1.2)$$

melyből a lapátra ható  $\bar{F}$  erő

$$\bar{F} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 - \bar{F}_{p2} - \bar{F}_{p1} \quad (1.3)$$

Az  $\bar{F}$  erő u-irányú összetevője

$$\bar{F}_u = \dot{m}(w_{1u} - w_{2u}) = \dot{m}(w_1 \cos \beta_1 - w_2 \cos \beta_2) \quad (1.4)$$

Az erő forgatónyomatéka a forgástengelyre nézve

$$M = \bar{F}_u r = \dot{m} r (w_1 \cos \beta_1 - w_2 \cos \beta_2) \quad (1.5)$$

Teljesítménye

$$P = M \omega = \dot{m} r \omega (w_1 \cos \beta_1 - w_2 \cos \beta_2) \quad (1.6)$$

$$P = \dot{m} u (w_1 \cos \beta_1 - w_2 \cos \beta_2) \quad (1.7)$$

Vagy az axiálsebességgel kifejezve

$$P = \dot{m} u c_a (ctg \beta_1 - ctg \beta_2) \quad (1.8)$$

$$P = \dot{m} u c_a (ctg \alpha_1 - ctg \alpha_2) \quad (1.9)$$

Másrészt a termodinamika I főtételeből következőleg

$$P = \dot{m} w_{t1,2} = \dot{m}(i_2^* - i_1^*) = \dot{m} c_p (T_2^* - T_1^*) = \dot{m} c_p \Delta T_{fok}^* \quad (1.10)$$

$$c_p \Delta T_{fok}^* = u c_a (ctg \beta_1 - ctg \beta_2) \quad (1.11)$$

$$\Delta T_{fok}^* = \frac{u c_a (ctg \beta_1 - ctg \beta_2)}{c_p} \quad (1.12)$$

Euler egyenlete

$$P = \dot{m} u (c_{2u} - c_{1u}) = \dot{m} u (w_{1u} - w_{2u}) \quad (1.13)$$

$$P = \dot{m}(i_2^* - i_1^*) = \dot{m} c_p (T_2^* - T_1^*) \quad (1.14)$$

$$c_p \Delta T_{fok}^* = uc_a (ctg \alpha_2 - ctg \alpha_1) = uc_a (ctg \beta_1 - ctg \beta_2) \quad (1.15)$$

$$\Delta T_{fok}^* = \frac{uc_a (ctg \beta_1 - ctg \beta_2)}{c_p} \quad (1.16)$$

### 1.3. A nyomásviszony

$$T_3^* = T_1^* + \Delta T_{fok}^* \quad (1.17)$$

Az izentrópus hatásfokból

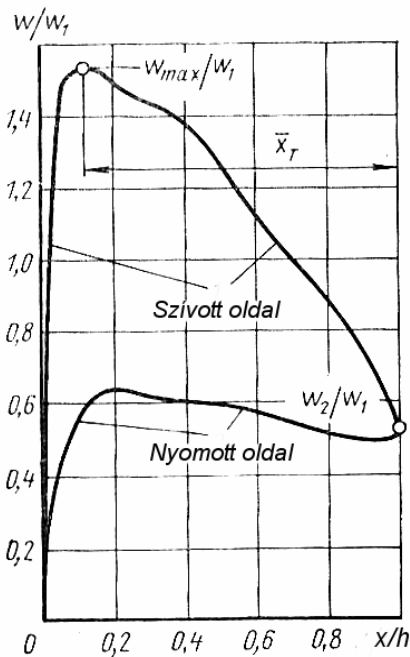
$$\eta_s = \frac{T_{3s}^* - T_1^*}{T_3^* - T_1^*} = \frac{T_{3s}^* - T_1^*}{\Delta T_{fok}^*} \quad (1.18)$$

$$\frac{T_{3s}^*}{T_1^*} = 1 + \frac{\eta_s \Delta T_{fok}^*}{T_1^*} \quad (1.19)$$

$$\frac{p_3^*}{p_1^*} = \left( \frac{T_{3s}^*}{T_1^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left( 1 + \frac{\eta_s \Delta T_{fok}^*}{T_1^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (1.20)$$

$$\frac{p_3^*}{p_1^*} = \left( 1 + \frac{\eta_s uc_a (ctg \beta_1 - ctg \beta_2)}{c_p T_1^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (1.21)$$

### 1.4. A nyomásviszony növelésének lehetőségei és a korlátok



1.5. ábra. Sebességmegoszlás a profil mentén

A kerületi sebesség növelése (szilárdsági korlát)

Az axiálsebesség növelése (korlát a hangsebesség átlépése a relatív áramlásban)

- előperdítés
- kisebb molekulatömegű munkaközeg.

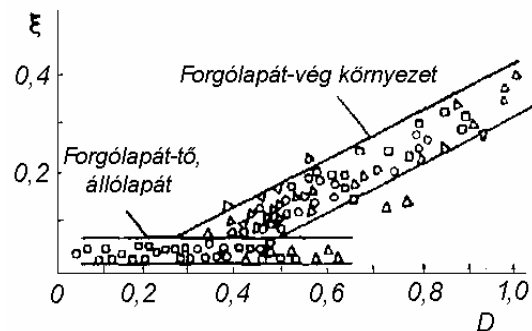
Az irányeltérítés növelése (korlát a leválás a lapátcsatornában)

- A de Haller-féle szám

$$Ha = \frac{w_2}{w_1} > 0,72 \quad (1.22)$$

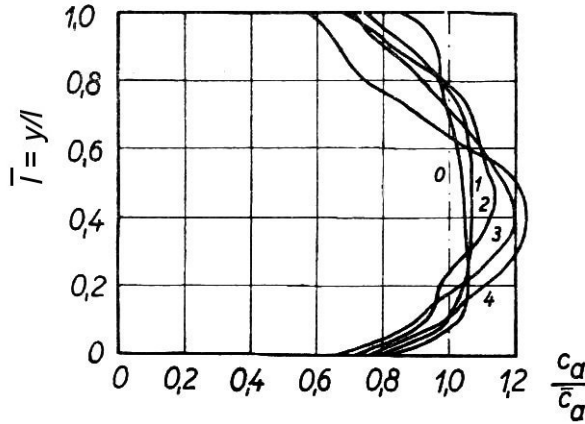
Lieblein-féle diffúzorossági tényező (D)

$$D = \frac{w_1 - w_2}{w_1} + \frac{c_{2u} - c_{1u}}{2w_1} \left( \frac{t}{h} \right) = 1 - \frac{w_2}{w_1} + \frac{\Delta c_u}{2w_1} \left( \frac{t}{h} \right) \quad (1.23)$$



1.6. ábra. A D tényező változása

## 1.5. Az áramlási keresztmetszet elzáródása

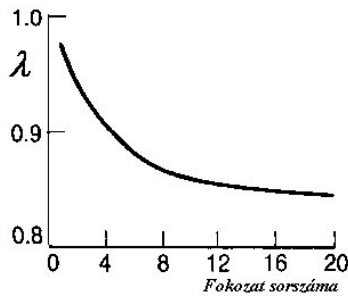


1.7. ábra

A (1.16) szerinti hőmérsékletnövekedés nem realizálható. Ennek oka a körgyűrű keresztmetszet határréteg vastagság növekedés miatti részleges elzáródása. Ez ugyanis axiális sebesség növekedést okoz (1.7. ábra). Ez a körülmény a kész kompresszorban  $\Delta T_{fok}^*$  csökkenést eredményez.

$$\Delta T_{fok}^* = \frac{u(w_{1u} - w_{2u})}{c_p} \quad (1.24)$$

$$w_{1u} - w_{2u} = u - c_{1u} - w_{2u} = u - c_a(ctg\alpha_1 + ctg\beta_2)$$



1.8. ábra

ezzel

$$\Delta T_{fok}^* = \frac{u(u - c_a(ctg\alpha_1 + ctg\beta_2))}{c_p} \quad (1.25)$$

Így a tényleges hőmérsékletnövekedés a fokozatban

$$\Delta T_{fok}^* = \frac{\lambda u c_a(ctg\beta_1 - ctg\beta_2)}{c_p} \quad (1.26)$$

ahol a  $\lambda$  tényező az 1.8. ábra szerint változik

## 1.6. Reakciófok

$$r^o = \frac{\text{statikus entalpiánövekedés a forgólapátokon}}{\text{statikus entalpiánövekedés a fokozatban}} = \frac{\Delta T_{forgólapát}}{\Delta T_{fokozat}} \quad (1.27)$$

Feltételezzük, hogy  $c_3 = c_1$  és  $c_{1a} \neq c_{2a}$ , ekkor

$$\Delta T_{fok} = \Delta T_{fok}^* \quad (1.28)$$

$$\Delta i_{fok}^* = \Delta i_{forgó}^* = \Delta i_{fok} \quad (1.29)$$

$$\Delta T_{fok} = \Delta T_{álló} + \Delta T_{forgó} \quad (1.30)$$

$$\Delta i_{fok}^* = c_p \Delta T_{fok}^* = c_p (\Delta T_{forgó} + \Delta T_{álló}) = u(c_{2u} - c_{1u}) \quad (1.31)$$

$$c_p \Delta T_{forgó} = c_p \Delta T_{fok}^* - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = u(c_{2u} - c_{1u}) - \frac{1}{2} [c_{2a}^2 + c_{2u}^2 - (c_{1a}^2 + c_{1u}^2)] \quad (1.32)$$

$$r^o = \frac{u(c_{2u} - c_{1u}) - \frac{1}{2}[c_{2a}^2 + c_{2u}^2 - (c_{1a}^2 + c_{1u}^2)]}{u(c_{2u} - c_{1u})} = 1 - \frac{1}{2} \frac{c_{2a}^2 - c_{1a}^2 + c_{2u}^2 - c_{1u}^2}{u(c_{2u} - c_{1u})} \quad (1.33)$$

$$r^o = 1 + \frac{c_{1a}^2 - c_{2a}^2}{2u(c_{2u} - c_{1u})} - \frac{c_{2u} + c_{1u}}{2u} \quad (1.34)$$

Amennyiben  $c_{1a} = c_{2a}$

$$r^o = 1 - \frac{c_{2u} + c_{1u}}{2u} = 1 - \frac{c_{uköz}}{u} \quad (1.35)$$

$$r^o = \frac{c_a}{2u} \left[ \frac{2u}{c_a} - (ctg\alpha_2 + ctg\alpha_1) \right] \quad (1.36)$$

A sebességi háromszögekől következik

$$\frac{u}{c_a} = ctg\alpha_1 + ctg\beta_1 \quad \frac{u}{c_a} = ctg\alpha_2 + ctg\beta_2 \quad (1.37)$$

melyekből

$$\frac{2u}{c_a} = ctg\alpha_1 + ctg\alpha_2 + ctg\beta_1 + ctg\beta_2 \quad (1.38)$$

$$r^o = \frac{c_a}{2u} (ctg\beta_2 + ctg\beta_1) = \frac{w_{uköz}}{u} \quad (1.39)$$

### 50%-os reakciófokú fokozat

$$0,5 = 1 - \frac{1}{2} \frac{c_a}{u} (ctg\alpha_2 + ctg\alpha_1) \quad (1.40)$$

$$\frac{u}{c_a} = ctg\alpha_2 + ctg\alpha_1 \quad \text{másrészt} \quad \frac{u}{c_a} = ctg\alpha_2 + ctg\beta_2 \quad (1.41)$$

ebből

$$\alpha_1 = \beta_2 \quad (1.42)$$

$$0,5 = \frac{c_a}{2u} (ctg\beta_2 + ctg\beta_1) \quad (1.43)$$

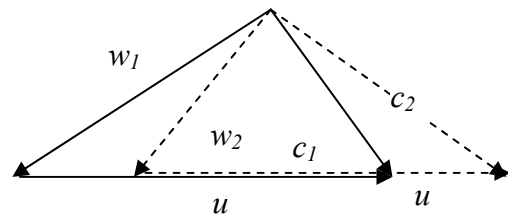
$$\frac{u}{c_a} = ctg\beta_2 + ctg\beta_1 \quad (1.44)$$

másrészt

$$\frac{u}{c_a} = ctg\alpha_2 + ctg\beta_2 \quad (1.45)$$

ebből

$$\beta_1 = \alpha_2 \quad (1.46)$$



### 0%-os reakciófokú fokozat

$$\frac{c_a}{2u}(\operatorname{ctg}\beta_2 + \operatorname{ctg}\beta_1) = 0 \quad (1.47)$$

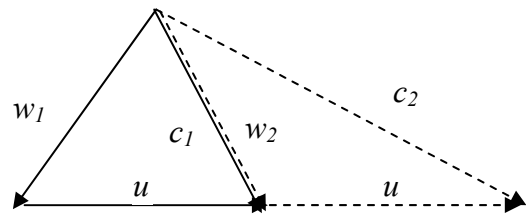
$$\operatorname{ctg}\beta_2 + \operatorname{ctg}\beta_1 = 0 \quad (1.48)$$

$$\beta_1 = 180^\circ - \beta_2$$

$$1 - \frac{1}{2} \frac{c_a}{u}(\operatorname{ctg}\alpha_2 + \operatorname{ctg}\alpha_1) = 0 \quad (1.49)$$

$$c_{1u} + c_{2u} = 2u$$

$$|w_1| = |w_2| \quad (1.50)$$



### 100%-os reakciófokú fokozat

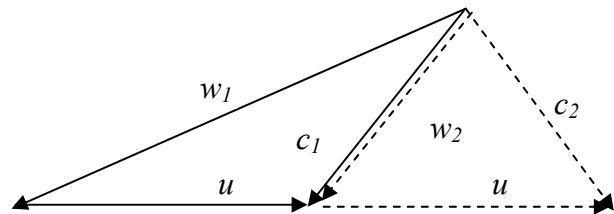
$$\frac{c_a}{2u}(\operatorname{ctg}\beta_2 + \operatorname{ctg}\beta_1) = 1 \quad (1.51)$$

$$1 - \frac{1}{2} \frac{c_a}{u}(\operatorname{ctg}\alpha_2 + \operatorname{ctg}\alpha_1) = 1 \quad (1.52)$$

$$\operatorname{ctg}\alpha_2 + \operatorname{ctg}\alpha_1 = 0 \quad (1.53)$$

$$\alpha_2 = 180^\circ - \alpha_1$$

$$|c_1| = |c_2| \quad (1.54)$$



A reakciófok értékének megválasztásánál szem előtt kell tartani a következőket:

Az 50%-os reakciófok a hatásfok szempontjából a legkedvezőbb, ezért választható az összes fokozat esetében.

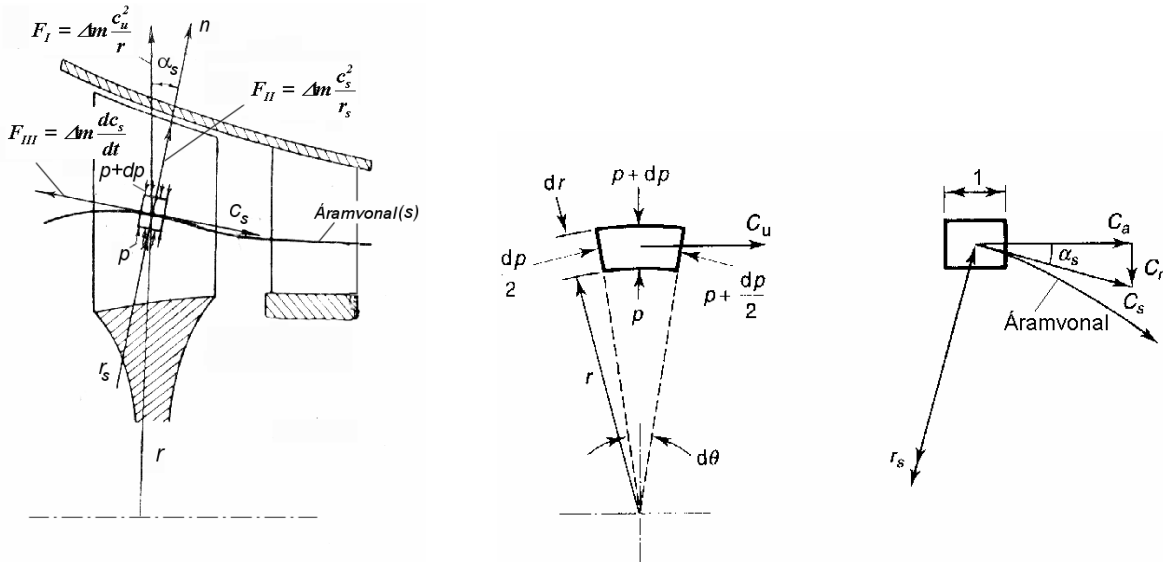
Ugyanakkor ha az axiálsebesség, illetve  $c_a/u$  csökken az utolsó fokozatok felé –adott  $h/t$  viszony esetében - ez a reakciófok érték korlátozhatja a középső és utolsó fokozatokban létrejövő nyomás- (hőmérséklet) növekedést.

Kis axiálsebességeknél a reakciófok 50% fölé emelése növelheti a fokozat nyomásviszonyát.

Ezért bizonyos esetekben a középső és utolsó fokozatokban célszerű lehet a reakciófok növelése.



## 1.7. Az áramlási szögek változása a lapáthossz mentén



1.9. ábra

$$F_I = \Delta m \frac{c_u^2}{r} = \rho r dr d\theta \frac{c_u^2}{r} \quad (1.55)$$

$$F_{II} = \Delta m \frac{c_s^2}{r_s} \cos \alpha_s = \rho r dr d\theta \frac{c_s^2}{r_s} \cos \alpha_s \quad (1.56)$$

$$F_{III} = \Delta m \frac{dc_s}{dt} \sin \alpha_s = \rho r dr d\theta \frac{dc_s}{dt} \sin \alpha_s \quad (1.57)$$

$$F_p = (p + dp)(r + dr)d\theta - prd\theta - 2\left(p + \frac{dp}{2}\right)dr \frac{d\theta}{2} \quad (1.58)$$

$$F_p = F_I + F_{II} + F_{III} \quad (1.59)$$

melyből a másodrendűen kicsiny mennyiségek elhanyagolása után kapjuk

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = \frac{c_u^2}{r} + \frac{c_s^2}{r_s} \cos \alpha_s + \frac{dc_s}{dt} \sin \alpha_s \quad (1.60)$$

mivel  $r_s \gg 0$ ,  $\sin \alpha_s \approx 0$ , így az egyenlet végső alakja

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = \frac{c_u^2}{r} \quad (1.61)$$

figyelembe véve, hogy a torlóponti entalpia

$$i^* = i + \frac{c^2}{2} = i + \frac{c_a^2 + c_u^2}{2} \quad (1.62)$$

melyet r szerint deriválva, kapjuk

$$\frac{di^*}{dr} = \frac{di}{dr} + c_a \frac{dc_a}{dr} + c_u \frac{dc_u}{dr} \quad (1.63)$$

ahol a termodinamika I. főtétele alapján

$$di = Tds + \frac{dp}{\rho} \quad (1.64)$$

$$\frac{di}{dr} = T \frac{ds}{dr} + ds \frac{dT}{dr} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{dp}{\rho^2} \frac{d\rho}{dr} \quad (1.65)$$

a másodrendűen kicsiny tagokat elhanyagolva

$$\frac{di}{dr} = T \frac{ds}{dr} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} \quad (1.66)$$

behelyettesítve az (1.63) egyenletbe és figyelembe véve (1.66) –et, kapjuk

$$\frac{di^*}{dr} = T \frac{ds}{dr} + c_a \frac{dc_a}{dr} + c_u \frac{dc_u}{dr} + \frac{c_u^2}{r} \quad (1.67)$$

Feltételezve  $\frac{ds}{dr} \approx 0$ , az örvény energia egyenlet

$$\frac{di^*}{dr} = c_a \frac{dc_a}{dr} + c_u \frac{dc_u}{dr} + \frac{c_u^2}{r} \quad (1.68)$$

$$\frac{di^*}{dr} = 0 \text{ esetén} \quad c_a \frac{dc_a}{dr} + c_u \frac{dc_u}{dr} + \frac{c_u^2}{r} = 0 \quad (1.69)$$

$$\frac{dc_a}{dr} = 0 \text{ esetén} \quad c_u \frac{dc_u}{dr} + \frac{c_u^2}{r} = 0 \quad (1.70)$$

melyből integrálás után

$$c_u r = \text{const} \quad (\text{állandó cirkuláció})$$

### 1.7.1. Elcsavarási törvényszerűségek

$$c_{1u} = aR^n - \frac{b}{R} \quad c_{2u} = aR^n + \frac{b}{R} \quad (1.71)$$

Ahol  $a$  és  $b$  állandók, de nem tetszés szerinti, hanem a fokozat középátmérőn kapott (felvett) adatai által meghatározottak.  $R = \frac{r}{r_m}$ .

A két egyenletből képezve a  $c_{2u} - c_{1u}$  különbséget, kapjuk

$$c_{2u} - c_{1u} = \frac{2b}{R} \quad (1.72)$$

melyből

$$u(c_{2u} - c_{1u}) = c_p \Delta T_{fok}^* = \frac{2bu}{R} \quad (1.73)$$

Mivel

$$\frac{2bu}{R} = \frac{2b2r\pi n}{\frac{r}{r_m}} = 4r_m b \pi n$$

a fokozat hőmérsékletnövekedése (munkabevitele) nem függ a sugártól azaz teljesül a  $\frac{di^*}{dr} = 0$  feltétel.

A (1.73) egyenletet középátmérőre ( $R=1$ ) alkalmazva

$$b = \frac{c_{2um} - c_{1um}}{2} \quad (1.74)$$

vagy a fokozati munkabevitel figyelembevételével

$$b = \frac{c_p \Delta T_{fok}^*}{2u_m} \quad (1.75)$$

A két egyenlet (1.71) összeadásával a

$$c_{1u} + c_{2u} = 2aR^n \quad (1.76)$$

egyenletet kapjuk, melyet az előzőeknek megfelelően a középátmérőre alkalmazva ( $R=1$ ) kapjuk

$$a = \frac{c_{1um} + c_{2um}}{2}$$

vagy a reakciófok kifejezésének felhasználásával

$$a = (1 - r^o) u_m \quad (1.77)$$

Tehát, az (1.71) egyenletek szerinti tangenciális sebesség megadás esetén teljesül a radiális egyen-súly, valamint az állandó munkabevitel a sugár mentén.

### 1.7.1.1. Állandó cirkuláció szerinti elcsavarás $n = -1$

$$c_{1u} = \frac{a}{R} - \frac{b}{R} = (a - b) \frac{r_m}{r} = c_{1um} \frac{r_m}{r} \quad c_{1u} = \frac{a}{R} + \frac{b}{R} = (a + b) \frac{r_m}{r} = c_{2um} \frac{r_m}{r}$$

$$c_u \quad r = \text{állandó} \quad \rightarrow \quad c_u r = c_{um} r_m$$

Melyből

$$c_u = c_{um} \frac{r_m}{r} \quad (1.78)$$

Az axiális sebesség  $c_a = c_{am} = \text{állandó}$

### 1.7.1.2. Első hatvány szerinti elcsavarás $n = 1$

$$c_{1u} = aR - \frac{b}{R} \quad c_{2u} = aR + \frac{b}{R} \quad (1.79)$$

Az axiálsebesség nem állandó, értékét az (1.69) egyenlet segítségével határozzuk meg

$$c_a \frac{dc_a}{dr} + c_u \frac{dc_u}{dr} + \frac{c_u^2}{r} = 0 \quad (1.80)$$

illetve

$$c_a dc_a + c_u dc_u + \frac{c_u^2}{R} dR = 0 \quad (1.81)$$

ahol  $R=r/r_m$ .

$$-\frac{I}{2}[c_a^2]_l^R = \frac{I}{2}[c_u^2]_l^R + \int_l^R \frac{c_u^2}{R} dR \quad (1.82)$$

A  $c_u$  megfelelő kifejezését behelyettesítve (1.79)-ből, majd integrálva a közép sugártól bármely  $r$  sugárig

$$c_{1a}^2 - c_{1am}^2 = -2(a^2 R^2 - 2ab \ln R - a^2)$$

$$c_{2a}^2 - c_{2am}^2 = -2(a^2 R^2 + 2ab \ln R - a^2)$$

$$c_{1a} = c_{1am} \sqrt{1 - \frac{2}{c_{1am}^2} (a^2 R^2 - 2ab \ln R - a^2)} \quad (1.83)$$

$$c_{2a} = c_{2am} \sqrt{1 - \frac{2}{c_{2am}^2} (a^2 R^2 + 2ab \ln R - a^2)} \quad (1.84)$$

### 1.7.1.3. Exponenciális elcsavarás $n = 0$

$$c_{1u} = a - \frac{b}{R} \quad c_{2u} = a + \frac{b}{R} \quad (1.85)$$

Az axiálsebesség nem állandó értéke az 1.7.1.2. pontban leírthoz hasonlóan határozható meg:

$$c_{1a}^2 - c_{1am}^2 = -2 \left( a^2 \ln R + \frac{ab}{R} - ab \right)$$

$$c_{2a}^2 - c_{2am}^2 = -2 \left( a^2 \ln R - \frac{ab}{R} + ab \right)$$

$$c_{1a} = c_{1am} \sqrt{1 - \frac{2}{c_{1am}^2} \left( a^2 \ln R + \frac{ab}{R} - ab \right)} \quad (1.86)$$

$$c_{2a} = c_{2am} \sqrt{1 - \frac{2}{c_{2am}^2} \left( a^2 \ln R - \frac{ab}{R} + ab \right)} \quad (1.87)$$

### 1.7.1.4. A tangenciális sebességmegoszlás más alakú függvénytől történő megadása

$$c_{uköz} r^m = \text{állandó} \quad (1.88)$$

$c_u r = \text{állandó}$

$m = 1$

$r^0$  (kinematikai) = állandó

$m = -1$

Közbenső

$-1 < m < 1$

### 1.7.1.5. Állandó reakciófok szerinti elcsavarás

(A radiális egyensúly feltétele nem teljesül!)

$$r^o = 1 - \frac{c_{1u} + c_{2u}}{2u} = 1 - \frac{c_{1u} + c_{2u}}{4r\pi n} \quad (1.89)$$

melyből

$$\frac{c_{1u} + c_{2u}}{r} = (1 - r^o)4\pi n = \text{const} \quad (1.90)$$

Számítási összefüggések

- a (1.90) egyenletből

$$c_{2u} + c_{1u} = (c_{2um} + c_{1um}) \frac{r}{r_m} = 2c_{umköz} \frac{r}{r_m} \quad (1.91)$$

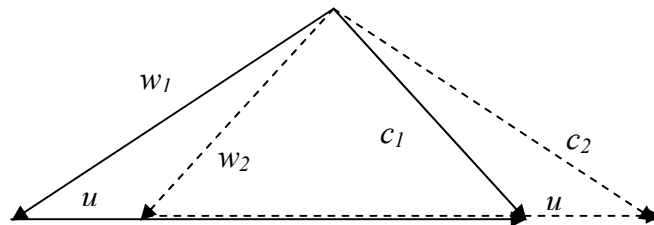
- a munka sugár menti állandóságából

$$c_{2u} - c_{1u} = (c_{2um} - c_{1um}) \frac{r_m}{r} = \Delta c_{um} \frac{r_m}{r} \quad (1.92)$$

A két egyenlet összeadásával  $c_{2u}$ , majd kivonásával  $c_{1u}$  kifejezését kapjuk:

$$c_{2u} = \frac{r}{r_m} c_{umköz} + \frac{r_m}{r} \frac{\Delta c_{um}}{2} \quad c_{1u} = \frac{r}{r_m} c_{umköz} - \frac{r_m}{r} \frac{\Delta c_{um}}{2} \quad (1.93)$$

Amennyiben a reakciófok a középpátmérőn  $r^o = 0,5$ , a szimmetrikus sebességi háromszög (1.10. ábra) a következő összefüggések alkalmazását teszi lehetővé:



1.10. ábra

Sebességi háromszögből  $u = \Delta c_u + 2c_{1u} \rightarrow c_u = \frac{u - \Delta c_u}{2} \quad (1.94)$

A sugár menti állandó munkabevitelből  $\Delta i_{fok}^* = u_m \Delta c_{um} = \text{áll.} \rightarrow \Delta c_u = \Delta c_{um} \frac{r_m}{r} \quad (1.95)$

Az axiális sebesség  $c_a = c_{am} = \text{állandó}$

### 1.7.2. Lapátelcsavarás turbinákban

Gőzturbinákban a kisnyomású lapátozást (hosszú lapátok) kivéve nem alkalmaznak elcsavarást – feltételezve, hogy nem okoz az állásszög változás számottevő veszteséget. A gőzturbináknál a sok fokozat esetében az elcsavarással készült profil költséges, ugyanakkor a Rankine-Clausius körfolyamat viszonylag kismértékben érzékeny a komponensek hatásfokára. Az összehasonlító vizsgálata-

tok egy  $\bar{d} = 0,73$  agyviszonyú fokozat esetében azt mutatják, hogy az elcsavarásos lapátozás a mérési hibák tartományán belüli hatásfokjavulást eredményez.

Gázturbináknál más a helyzet. A kismértékű hatásfok növekedés is fontos.

Kompresszornál (6 fokozatú) a lapátelcsavarás eredményeképpen (a leválás későbbi bekövetkezése miatt) 1,5 %-os hatásfok növekedés lépett fel.

A turbináknál az előzőekben említettek mellett – gyártási okok miatt- alkalmazzák az állandó fúvóka kilépőszöget, vagyis az  $\alpha_1 = const$  törvényszerűséget.

Az adott törvényszerűségnél a radiális egyensúly teljesül,  $i_o^* = const$ , a  $c_a$  és  $c_u$  változik a sugár mentén.

$$c_{1a} \frac{dc_{1a}}{dr} + c_{1u} \frac{dc_{1u}}{dr} + \frac{c_{1u}^2}{r} = 0 \quad (1.96)$$

$$\frac{c_{1a}}{c_{1u}} = tg \alpha_1 = const. \quad \frac{dc_{1a}}{dr} = \frac{dc_{1u}}{dr} tg \alpha_1 \quad (1.97)$$

$$c_{1u} tg^2 \alpha_1 \frac{dc_{1u}}{dr} + c_{1u} \frac{dc_{1u}}{dr} + \frac{c_{1u}^2}{r} = 0 \quad (1.98)$$

$$(1 + tg^2 \alpha_1) \frac{dc_{1u}}{dr} + \frac{c_{1u}}{r} = 0 \quad (1.99)$$

$$\frac{1}{\cos^2 \alpha_1} \frac{dc_{1u}}{dr} = -\frac{c_{1u}}{r} \quad (1.100)$$

melyből

$$c_{1u} r^{\cos^2 \alpha_1} = const. \quad (1.101)$$

és mivel  $\frac{c_{1a}}{c_{1u}} = const$

$$c_{1a} r^{\cos^2 \alpha_1} = const. \quad (1.102)$$

A sugár menti állandó munkabevitel feltételéből következik:

$$u(c_{1u} - c_{2u}) = u_m(c_{1um} - c_{2um}) \quad (1.103)$$

$$r(c_{1u} - c_{2u}) = r_m(c_{1um} - c_{2um}) \quad (1.104)$$

melyből

$$c_{2u} = c_{1u} - \frac{r_m}{r}(c_{1um} - c_{2um}) = c_{1u} - \frac{(c_{1um} - c_{2um})}{R}$$

az (1.101) egyenletből következőleg  $c_{1u} = \frac{c_{1um}}{R^{\cos^2 \alpha_1}}$

ezzel

$$c_{2u} = \frac{c_{1um}}{R^{\cos^2 \alpha_1}} - \frac{(c_{1um} - c_{2um})}{R} \quad (1.105)$$

A radiális egyensúly feltételéből (1.69) meghatározhatjuk a  $c_{2a}$  axiális sebességet:

Az (1.69) egyenletet a kilépő keresztmetszetre felírva

$$c_{2a} \frac{dc_{2a}}{dR} + c_{2u} \frac{dc_{2u}}{dR} + \frac{c_{2u}^2}{R} = 0 \quad (1.106)$$

majd (1.105)-öt behelyettesítve és 1-től R-ig integrálva kapjuk

$$c_{2a}^2 = c_{2am}^2 + 4c_{lum}^2 \left( \frac{I}{R^{\cos^2 \alpha_1}} - I \right) \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_1 - 2c_{lum}^2 \left( I - \frac{c_{2um}}{c_{lum}} \right) \left( I + \cos^2 \alpha_1 \right) \left( \frac{I}{R^{1+\cos^2 \alpha_1}} - I \right) \sin^2 \alpha_1 \quad (1.107)$$

## 2. AXIÁLKOMPRESSZOR AERO- TERMODINAMIKAI SZÁMÍTÁSA

A számítási eljárás az általános elvek mellett egy mintapéldán keresztül kerül bemutatásra. Az itt nem levezetett, illetve megadott számítási összefüggések a „Segédlet gázturbinás repülőgép hajtómű évfolyamterv készítéséhez” c. munkában [4] találhatóak.

Kiinduló adatok:

Környezeti jellemzők:  $T_0=288 \text{ K}$ ;  $p_0=1,01 \text{ bar}$ .

Nyomásviszony	$\pi_K^*$	=	4,15
Tömegáram	$\dot{m}$	=	20 kg/s
Fordulatszám	$n$	=	250 1/s
Kerületi sebesség a külső átmérőn	$u_{lk}$	=	350 m/s (előzetes korlát)
Nincs előperdités	$c_l=c_{la}$	=	150 m/s

$$T_1^* = T_0^* = T_0 \quad p_1^* = p_0^* = p_0$$

### 2.1. A kompresszor fő méreteinek meghatározása

Statikus jellemzők

$$T_1 = T_1^* - \frac{c_l^2}{2c_p} = 288 - \frac{150^2}{2 \times 1005} = 276,8 \text{ K}$$

$$p_1 = p_1^* \left( \frac{T_1}{T_1^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1,01 \times \left( \frac{276,8}{288} \right)^{3,5} = 0,879 \text{ bar}$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{0,879 \times 10^5}{287 \times 268,7} = 1,106 \text{ kg / m}^3$$

Külső átmérő

$$D_{lk} = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\rho_1 c_{la} \pi \left[ I - \left( \frac{D_{lb}}{D_{lk}} \right)^2 \right]}} = \sqrt{\frac{4 \times 20}{1,106 \times 150 \times \pi \times [I - \bar{d}^2]}} = \frac{0,39188}{\sqrt{I - \bar{d}^2}}$$

A gázdinamikai függvények módszerével

$$c_{1kr} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_1^*} = \sqrt{\frac{2 \times 1,4}{1,4+1} 287 \times 288} = 310,54 \text{ m/s}$$

$$\lambda_1 = \frac{c_1}{c_{1kr}} = \frac{150}{310,54} = 0,483 \quad q(\lambda_1) = 0,689945$$

$$A_1 = \frac{\dot{m} \sqrt{T_1^*}}{\beta p_1^* q(\lambda_1) \sin \alpha_1} = \frac{20 \sqrt{288}}{0,0404 \times 1,01 \times 10^5 \times 0,689945 \times \sin 90^\circ} = 0,12056 \text{ m}^2$$

$$A_1 = \frac{(D_{1k}^2 - D_{1b}^2) \pi}{4} = \frac{D_{1k}^2 \pi}{4} (1 - \bar{d}^2) \quad \text{melyből} \quad D_{1k} = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi(1-\bar{d}^2)}} = \frac{0,39188}{\sqrt{1-\bar{d}^2}}$$

**Fordulatszám**

$$n = \frac{u_{1k}}{D_{1k} \pi} = \frac{350}{D_{1k} \pi}$$

**Variációk**

Változtatjuk  $\bar{d}$  értékét 0,4 és 0,6 között.  $u_{1k} = 350 \text{ m/s}$  mellett.

$\bar{d}$	$D_{1k}$ m	$n$ f/s
0,4	0,4274	260,6
0,45	0,4388	253,9
0,5	0,4524	246,3
0,55	0,4692	237,5
0,6	0,4898	227,5

Kiválasztva:  $n=250 \text{ 1/s}$ ;  $\bar{d}=0,5$ ; Középmérető állandó.

Kerületi sebesség, relatív sebesség és Mach szám a külső átmérőn

$$u_{1k} = D_{1k} \times \pi \times n = 0,4524 \times 3,14 \times 250 = 355,3 \text{ m/s} \quad w_{1k} = \sqrt{u_{1k}^2 + c_{1a}^2} = 385,7 \text{ m/s}$$

$$a = \sqrt{\kappa RT_1} = \sqrt{1,4 \times 287 \times 276,8} = 331 \text{ m/s} \quad M_{w_{1k}} = \frac{w_{1k}}{a} = \frac{385,7}{331} = 1,165$$

**Kompresszor kilépő keresztmetszet számítása:**

$$p_2^* = p_1^* \pi_k^* = 1,01 \times 4,15 = 4,19 \text{ bar};$$

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\kappa-1}{\kappa \eta_p} = \frac{0,4}{1,4 \times 0,9} = 0,3175 \quad T_2^* = T_1^* (\pi_k^*)^{\frac{n-1}{n}} = 288 (4,15)^{0,3175} = 452,5 \text{ K}$$

$$c_{2kr} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_2^*} = \sqrt{\frac{2 \times 1,4}{1,4+1} 287 \times 452,5} = 389,25 \text{ m/s}$$

legyen  $c_2 = c_{2a} = 150 \text{ m/s}$  (axiális kilépést feltételezve)

$$\lambda_2 = \frac{c_2}{c_{2kr}} = \frac{150}{389,25} = 0,385 \quad q(\lambda_2) = 0,5712$$



$$A_2 = \frac{\dot{m} \sqrt{T_2^*}}{\beta p_2^* q(\lambda_2) \sin \alpha_2} = \frac{20 \sqrt{452,5}}{0,0404 \times 4,19 \times 10^5 \times 0,5712 \times \sin 90^\circ} = 0,044 \text{ m}^2$$

ugyanez statikus paraméterekkel

$$T_2 = T_2^* - \frac{c_2^2}{2c_p} = 452,5 - \frac{150^2}{2 \times 1005} = 441,3 \text{ K} \quad p_2 = p_2^* \left( \frac{T_2}{T_2^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 4,19 \left( \frac{441,3}{452,5} \right)^{3,5} = 3,838 \text{ bar}$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{3,838 \times 10^5}{287 \times 441,3} = 3,03 \text{ kg / m}^3$$

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 c_{2a}} = \frac{20}{3,03 \times 150} = 0,044 \text{ m}^2$$

### Lapáthossz

$$l_2 = \frac{A_2}{\pi D_{2m}} = \frac{0,044}{3,14 \times 0,3394} = 0,0413 \text{ m}$$

### Külső és belső átmérő

$$D_k = D_m + l_2 = 0,3394 + 0,0413 = 0,3807 \text{ m} \quad D_b = D_m - l_2 = 0,3394 - 0,0413 = 0,2982 \text{ m}$$

### Be- és kilépő keresztmetszet adatai:

$$n = 250 \text{ f/s}$$

$$c_a = 150 \text{ m/s}$$

$$r_m = 0,1697 \text{ m} = \text{áll.}$$

Belépő keresztmetszet:

$$r_k = 0,2262 \text{ m}$$

$$r_b = 0,1131 \text{ m}$$

Kilépő keresztmetszet:

$$r_k = 0,1903 \text{ m}$$

$$r_b = 0,1491 \text{ m}$$

## 2.2. Fokozatszám megválasztás

Feltételezve  $c_{1a} = c_{2a} = c_{3a} \Rightarrow$  mindenütt

A fokozatban bekövetkező hőmérsékletváltozás szubszonikus fokozatokban 15-30°-ra, transzszonikus és szuperszonikusokban 45°-nál nagyobbra vehető.

A fokozatszám meghatározásának alapját jelentő fokozati hőmérsékletnövekedést első közelítésképpen a de Haller-féle szám legkisebb (0,72) értékéből határozzuk meg.

Ehhez a belépő relatív sebesség és annak iránya az első fokozatban

$$\operatorname{ctg} \beta_1 = \frac{u}{c_{1a}} = \frac{266,6}{150} \rightarrow \beta_1 = 29,36^\circ$$

$$w_1 = \frac{c_{1a}}{\sin \beta_1} = \frac{150}{\sin 29,36^\circ} = 305,9 \text{ m/s}$$

a forgórészből kilépő relatív sebesség értéke

$$w_{2\min} = 0,72 w_1 = 0,72 \times 305,9 = 220 \text{ m/s}$$

A hozzátartozó szög

$$\sin \beta_2 = \frac{c_{1a}}{w_2} = \frac{150}{220} \rightarrow \beta_2 = 42,99^\circ$$

A fokozatra jutó hőmérsékletnövekedés ( $\lambda \approx 1$  felvehető)

$$\Delta T_f^* = \frac{\lambda u c_a (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2)}{c_p} = \frac{266,6 \times 150 (\operatorname{ctg} 29,36^\circ - \operatorname{ctg} 42,99^\circ)}{1005} \approx 28 K$$

$$z = \frac{\Delta T_k^*}{\Delta T_f^*} = \frac{164,5}{28} = 5,9$$

Választva  $z=7$   $\Delta T_f^* = \frac{\Delta T_k^*}{z} = \frac{164,5}{7} = 23,5 K$

Az első és utolsó fokozat működési feltételei ezekre kisebb  $\Delta T_f^*$  felvételét indokolják. Így a hőmérsékletváltozás megoszlása a fokozatokban lehet:

Fokozat	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta T_f^*$	20	25	25	25	25	25	20

### 2.3. Fokozatok számítása

Fokozat	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta T_f^*$	20	25	24	24	24	24	22,8
$\lambda$	0,98	0,93	0,88	0,83	0,83	0,83	0,83
$r^o$	számítva	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\alpha_1$	90	78,94	61,37	62,29	62,29	62,29	61,48
$\alpha_2$	62,86	48,95	39,08	38,62	38,62	38,62	39,02
$\alpha_3$							61,48
$\beta_1$	29,36	32,30	39,08	38,62	38,62	38,62	39,02
$\beta_2$	38,33	47,81	61,37	62,29	62,29	62,29	61,48
$\beta_2 - \beta_1$	8,98	15,51	22,29	23,67	23,67	23,67	22,46
$\alpha_3 - \alpha_2$							
Ha(forgó)	0,79	0,721	0,718	0,705	0,705	0,705	0,717
Ha(álló)	0,907	0,88	0,859	0,705	0,705	0,705	
$(p_3^* / p_1^*)_{fok}$	1,236	1,28	1,246	1,228	1,213	1,199	1,117
$(p_3^*)_{fok}$	1,249	1,599	1,992	2,447	2,968	3,56	4,192
$(T_3^*)_{fok}$	308	333	357	381	405	429	451,8
$r^o$	0,856	felvéve	felvéve	felvéve	felvéve	felvéve	felvéve
$l_1$	0,1131		0,0836				
$r_{1b}$	0,1131		0,1279				
$r_{1k}$	0,2262		0,2115				
$l_3$	0,0974		0,0712				
$r_{3b}$	0,1210		0,1341				
$r_{3k}$	0,2184		0,2053				
$l_2$	0,1052		0,7740				
$r_{2b}$	0,1171		0,1310				
$r_{2k}$	0,2223		0,2084				

Egyéb geometriai jellemzők számítása

Áramlási keresztmetszet

Lapáthosszak

Sugarak

$$A_i = \frac{\dot{m} \sqrt{T_i^*}}{\beta p_i^* q(\lambda_i)} \quad l_i = \frac{A_i}{2\pi r_m} \quad r_{ib} = r_m - l_i \quad r_{ik} = r_m + l_i$$

Sebességek a sebességi háromszögekből számítandók

$$c = \frac{c_a}{\sin \alpha} \quad w = \frac{c_a}{\sin \beta} \quad (2.1)$$

### 2.3.1. Lapátelcsavarások

Minden elcsavarási törvényszerűség esetén

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{c_u}{c_a} \quad \operatorname{ctg} \beta = \frac{u - c_u}{c_a} \quad u = u_m \frac{r}{r_m}$$

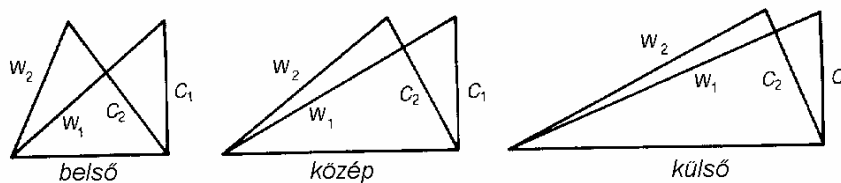
**$c_u r = \text{állandó elcsavarás}$**

$$c_u = c_{um} \frac{r_m}{r} \quad (2.2)$$

Első fokozat (példa)

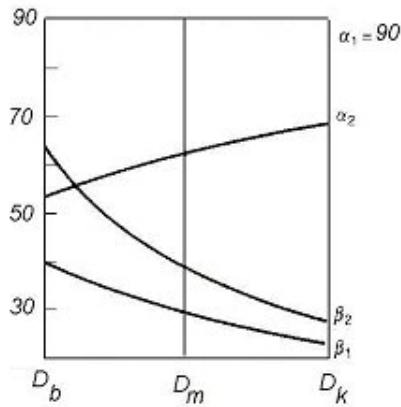
	Forgólapát		Állólapát	
	Belépő él	Kilépő él	Belépő él	Kilépő él
$r_k$	0,2262	0,2223	0,2223	0,2184
$r_m$	0,1697	0,1697	0,1697	0,1697
$r_b$	0,1131	0,1171	0,1171	0,1210
$u_k$	355,3	349,2		
$u_m$	266,6	266,6	266,6	266,6
$u_b$	177,7	183,9		
$c_{uk}$	0	58,7	58,7	
$c_{um}$	0	76,9	76,9	
$c_{ub}$	0	111,4	111,4	
$\beta_k, \alpha_k$	22,89	27,31	68,63	
$\beta_m, \alpha_m$	29,36	38,33	62,86	
$\beta_b, \alpha_b$	40,17	64,2	53,4	

Sebességi háromszögek alakulása a sugár mentén



2.1. ábra

Áramlási szögek

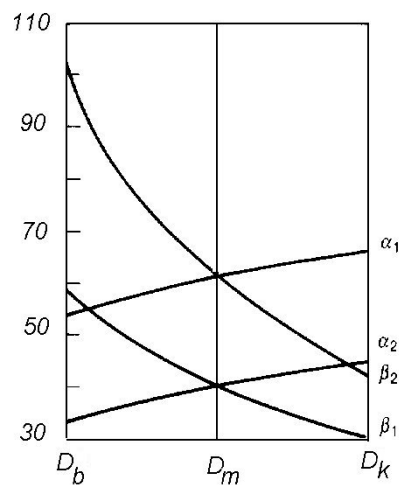


2.2. ábra

Harmadik fokozat (példa)

	Forgólapát		Állólapát	
	Belépő él	Kilépő él	Belépő él	Kilépő él
$r_k$	0,2115	0,2084	0,2084	0,2053
$r_m$	0,1697	0,1697	0,1697	0,1697
$r_b$	0,1279	0,1310	0,1310	0,1341
$u_k$	332,2	327,35	327,35	322,5
$u_m$	266,6	266,6	266,6	266,6
$u_b$	200,9	203,35	203,35	205,8
$c_{uk}$	65,7	152,7	152,7	
$c_{um}$	81,9	184,7	184,7	
$c_{ub}$	108,7	233,7	233,7	
$\beta_k, \alpha_k$	29,37	41,46	44,49	
$\beta_m, \alpha_m$	39,08	61,37	39,08	
$\beta_b, \alpha_b$	58,42	100,54	32,69	

A szögek változása a lapáthossz mentén



2.3. ábra

## Állandó reakciófok szerinti elcsavarás

Harmadik fokozat (példa)

$$\Delta c_{ub} = \Delta c_{um} \frac{r_m}{r_b} = 102,8 \frac{0,1697}{0,1279} = 136,4 \text{ m/s}$$

$$c_{1ub} = \frac{u_b - \Delta c_{ub}}{2} = \frac{200,9 - 136,4}{2} = 32,26 \text{ m/s}$$

$$\text{ctg } \alpha_{1b} = \frac{c_{1ub}}{c_a} = \frac{32,26}{150} = 0,2150 \Rightarrow \alpha_{1b} = 77,86^\circ = \beta_{2b}$$

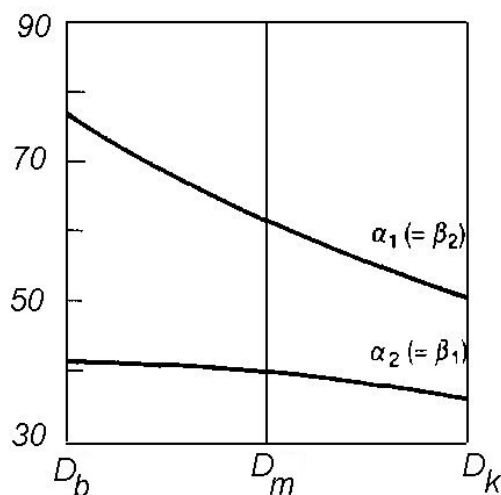
$$c_{2ub} = c_{1ub} + \Delta c_{ub} = 32,26 + 136,4 = 168,66 \text{ m/s}$$

$$\text{ctg } \alpha_{2b} = \frac{c_{2ub}}{c_a} = \frac{168,66}{150} = 1,1244 \Rightarrow \alpha_{2b} = 41,65^\circ = \beta_{12b}$$

A számítás eredményei táblázatban

	Forgólapát		Állólapát	
	Belépő él	Kilépő él	Belépő él	Kilépő él
$r_k$	0,2115	0,2084	0,2084	0,2053
$r_m$	0,1697	0,1697	0,1697	0,1697
$r_b$	0,1279	0,1310	0,1310	0,1341
$u_k$	332,2	327,35	327,35	322,5
$u_m$	266,6	266,6	266,6	
$u_b$	200,9	203,35	203,35	205,8
$c_{uk}$	124,8	207,77	152,7	
$c_{um}$	81,9	184,7	184,7	
$c_{ub}$	32,26	168,66	233,7	
$\beta_k, \alpha_k$	35,88	50,23	35,88	
$\beta_m, \alpha_m$	39,08	61,37	39,08	
$\beta_b, \alpha_b$	41,65	77,86	41,65	

A szögek változása a lapáthossz mentén



2.4. ábra

## Exponenciális elcsavarás n=0

$$c_{1u} = a - \frac{b}{R} \quad c_{2u} = a + \frac{b}{R} \quad (2.3)$$

$$a = u_m (1 - r_m^o) = 266,6(1 - 0,5) = 133,3 \text{ m/s}$$

$$b = \frac{c_p \Delta T}{2u_m \lambda} = \frac{1005 \times 24}{2 \times 266,6 \times 0,88} = 51,4 \text{ m/s}$$

A (4.3) egyenlet segítségével meghatározzuk az axiális sebesség értékét

$$c_a \frac{dc_a}{dr} + c_u \frac{dc_u}{dr} + \frac{c_u^2}{r} = 0 \quad (2.4)$$

illetve

$$c_a dc_a + c_u dc_u + \frac{c_u^2}{R} dR = 0 \quad (2.5)$$

ahol  $R=r/r_m$ .

Integrálva a közép sugártól bármely r sugárig

$$-\frac{I}{2} [c_a^2]_I^R = \frac{I}{2} [c_u^2]_I^R + \int_I^R \frac{c_u^2}{R} dR \quad (2.6)$$

$$c_{2a}^2 - c_{2am}^2 = -2 \left( a^2 \ln R - \frac{ab}{R} + ab \right) \quad (2.7)$$

$$c_{1a}^2 - c_{1am}^2 = -2 \left( a^2 \ln R + \frac{ab}{R} - ab \right) \quad (2.8)$$

$$c_{1a} = c_{1am} \sqrt{1 - \frac{2}{c_{1am}^2} \left( a^2 \ln R + \frac{ab}{R} - ab \right)} \quad (2.9)$$

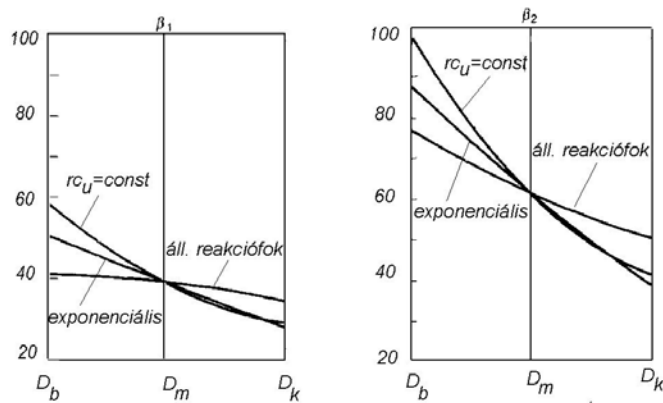
$$c_{2a} = c_{2am} \sqrt{1 - \frac{2}{c_{2am}^2} \left( a^2 \ln R - \frac{ab}{R} + ab \right)} \quad (2.10)$$

*Harmadik fokozat (példa)*

A számítási eredmények táblázatban

	Forgólapát		Állólapát	
	Belépő él	Kilépő él	Belépő él	Kilépő él
$r_k$	0,2114	0,2084	0,2084	0,2053
$r_m$	0,1697	0,1697	0,1697	0,1697
$r_b$	0,1279	0,1310	0,1310	0,1341
$u_k$	332,2	327,35	327,35	322,5
$u_m$	266,6	266,6	266,6	266,6
$u_b$	200,9	203,35	203,35	205,8
$c_{uk}$	92,0	175,8	175,8	
$c_{um}$	81,9	184,7	184,7	

$c_{ub}$	65,1	198,4	198,4	
$c_{ak}$	131,9	115,5	115,5	
$c_{am}$	150	150	150	
$c_{ab}$	167,5	185,8	185,8	
$\beta_k, \alpha_k$	28,77	38,21	33,3	
$\beta_m, \alpha_m$	39,08	61,37	89,08	
$\beta_b, \alpha_b$	50,97	87,72	43,12	



2.5. ábra. A különféle elcsavarási módok összehasonlítása (Harmadik fokozat adataiból)

Reakciófok, mivel  $c_a$  nem állandó,

$$r^o = 1 + \frac{c_{1a}^2 - c_{2a}^2}{2u(c_{2u} - c_{1u})} - \frac{c_{2u} + c_{1u}}{2u} \quad (2.11)$$

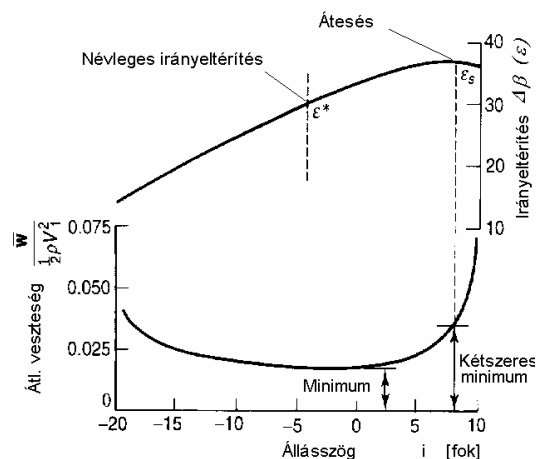
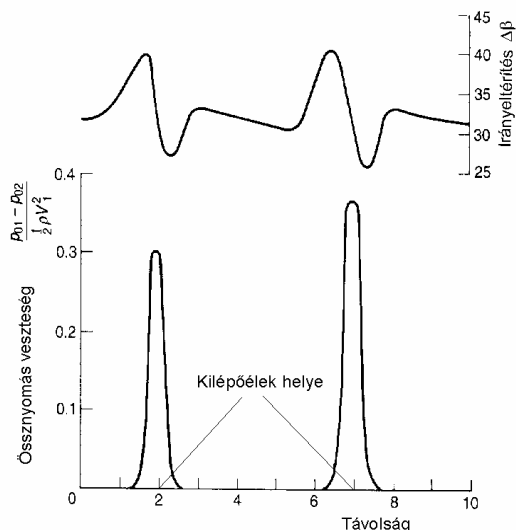
összefüggéssel számítandó.

## 2.4. Osztás, húr hossz, lapátszám meghatározása

(L. [4])

## 2.5. Lapátszögek meghatározása

Rácsmérések adott állásszögnél (2.6. ábra)  $\Rightarrow$  átlagolás  $\Rightarrow$  mérések különböző állásszögeknél (2.7. ábra)



2.6. ábra

2.7. ábra

Mint a 2.8. ábrából kitűnik, a kilépő lapátszög és a gázaram kilépőszög különbsége (lemaradási szög)

$$\delta = \beta_2' - \beta_2 \quad (2.12)$$

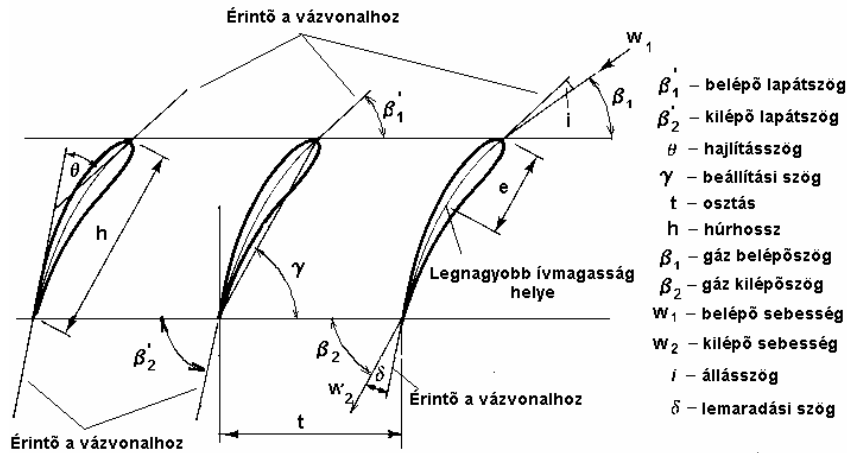
melynek értéke a

$$\delta = m\Theta \sqrt{\frac{t}{h}} \quad (2.13)$$

félempírikus összefüggés alapján számítható, ahol  $t$  – az osztás, míg  $\Theta = \beta_2' - \beta_1'$ .

$$m = 0,23 \left( \frac{2e}{h} \right)^2 + 0,18 - 0,002\beta_2 \quad (2.14)$$

itt  $e$  - a profil vázvonalaának legnagyobb ívmagasságához tartozó húrhossz.



2.8. ábra

Az irányeltérítés a lapátozásban

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = (\beta_2' - \delta) - (\beta_1' - i) = \Theta + i - \delta \quad (2.15)$$

A szakirodalomban az irányelterelési szöveget  $\varepsilon$ -al is jelölik, vagyis

$$\varepsilon = \Delta\beta \quad (2.16)$$

névleges értéke

$$\varepsilon^* = \beta_2^* - \beta_1 \quad (2.17)$$

ahol  $\beta_2^*$  – a névleges kilépőszög.

A profil hajlítási szöge

$$\Theta = \frac{\Delta\beta - i}{1 - m\sqrt{t/h}} \quad (2.18)$$

névleges üzemmódon az állásszög értékét rendszerint  $i=0$ -ra vesszük, így  $\beta_1' = \beta_1$  és ezzel a lapát kilépőszöge

$$\beta_2' = \Theta + \beta_1' \quad (2.19)$$



*Harmadik fokozat (példa)*

A harmadik fokozat esetében körív vázvonalnál  $2e/h=1$ ,

$$m = 0,23 \left( \frac{2e}{h} \right)^2 + 0,18 - 0,002 \beta_2 = 0,23 + 0,18 - 0,002 \times 61,37^\circ = 0,2873$$

$$\Theta = \frac{\Delta\beta - i}{1 - m\sqrt{t/h}} = \frac{22,29 - 0}{1 - 0,2873\sqrt{0,9}} = 30,64^\circ$$

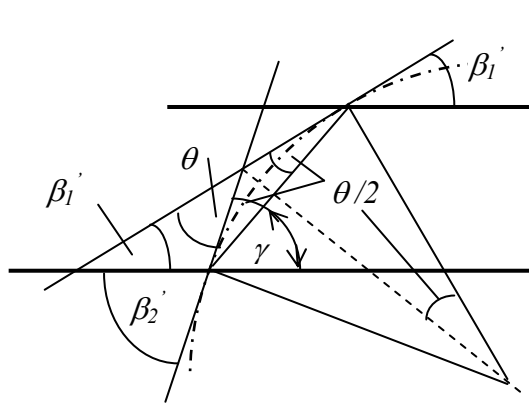
Névleges üzemmódon az állásszög értékét  $i=0$  -ra vesszük, így  $\beta'_1 = \beta_1$  és ezzel a lapát kilépőszöge

$$\beta'_2 = \Theta + \beta'_1 = 30,64 + 39,08 = 69,72^\circ$$

a lemaradási szög

$$\delta = \beta'_2 - \beta_2 = 69,72 - 61,37 = 8,35^\circ$$

A beállítási szög körív vázvonal esetén a 2.9. ábra alapján



2.9. ábra

$$\gamma = \beta'_2 - \frac{\Theta}{2} = 69,72 - \frac{30,64}{2} = 54,40^\circ$$

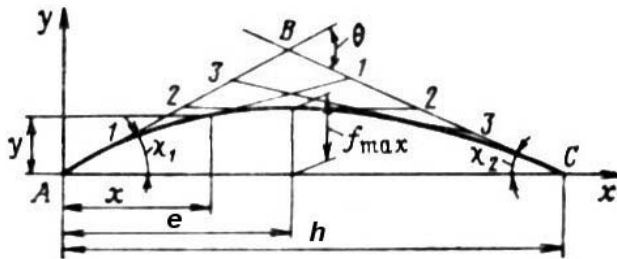
A vázvonal sugara

$$r = \frac{h}{2 \sin(\theta/2)}$$

A vázvonal hossza

$$L = \frac{\pi}{180} \theta r$$

Parabola vázvonal szerkesztése

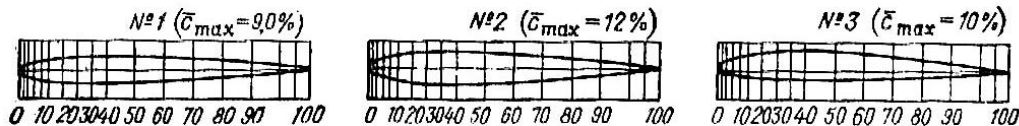


2.10. ábra.

A 2.10. ábra szerint a húr két végén (A- belépőél, C- kilépőél)  $\chi_1 = \gamma - \beta'_1$  és

$\chi_2 = \beta'_2 - \gamma$  hajlásszögű segédegyeneseket húzunk.

Az AB és BC egyeneseket azonos számú egyenlő részre osztjuk, majd az ábra szerint számozva az osztásokat, az azonos számúakat egyenesekkel összekötjük. Az így kapott sokszög belső érintőgörbéje lesz a vázvonal.

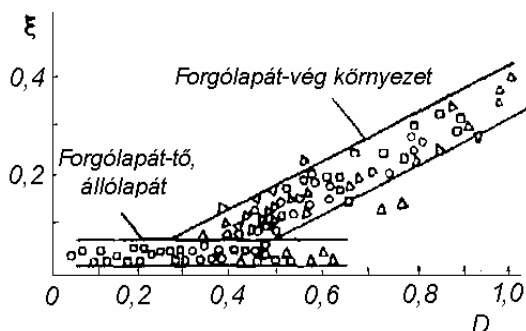


$\bar{x}$	$U_f$	$U_a$	$U_{köz}$	$c$
0	0	0	0	0
1,25	1,42	-1,42	0	2,84
2,5	1,96	-1,96	0	3,92
5	2,67	-2,67	0	5,34
7,5	3,15	-3,15	0	6,30
10	3,61	-3,61	0	7,02
15	4,01	-4,01	0	8,02
20	4,30	-4,30	0	8,60
25	4,46	-4,46	0	8,92
30	4,50	-4,50	0	9,00
40	4,35	-4,35	0	8,70
50	3,97	-3,97	0	7,94
60	3,42	-3,42	0	6,84
70	2,75	-2,75	0	5,50
80	1,97	-1,97	0	3,94
90	1,09	-1,09	0	2,18
95	0,60	-0,60	0	1,20
100	0	0	0	0

$\bar{x}$	$U_f$	$U_a$	$U_{köz}$	$c$
0	0	0	0	0
1,25	1,89	-1,89	0	3,78
2,5	2,62	-2,62	0	5,24
5	3,56	-3,56	0	7,12
7,5	4,20	-4,20	0	8,40
10	4,68	-4,68	0	9,36
15	5,34	-5,34	0	10,68
20	5,74	-5,74	0	11,48
25	5,94	-5,94	0	11,88
30	6,00	-6,00	0	12,00
40	5,80	-5,80	0	11,60
50	5,29	-5,29	0	10,58
60	4,56	-4,56	0	9,12
70	3,66	-3,66	0	7,32
80	2,62	-2,62	0	5,24
90	1,45	-1,45	0	2,90
95	0,81	-0,81	0	1,62
100	0	0	0	0

$\bar{x}$	$U_f$	$U_a$	$U_{köz}$	$c$
0	0	0	0	0
1,25	2,01	-1,03	0,49	3,04
2,5	2,92	-1,57	0,70	4,44
5	4,02	-1,96	1,03	5,98
7,5	4,83	-2,17	1,33	7,00
10	5,51	-2,47	1,52	7,98
15	6,40	-2,60	1,90	9,00
20	6,78	-2,78	2,00	9,56
25	6,93	-2,95	1,99	9,88
30	6,97	-3,03	1,97	10,00
40	6,75	-2,95	1,90	9,70
50	6,16	-2,72	1,72	8,88
60	5,34	-2,30	1,52	7,64
70	4,29	-1,81	1,24	6,10
80	3,19	-1,41	0,89	4,60
90	1,60	-0,74	0,43	2,34
95	0,92	-0,42	0,26	1,34
100	0	0	0	0

### A Lieblein-féle diffúzorossági tényező a lapátvégen



2.11. ábra

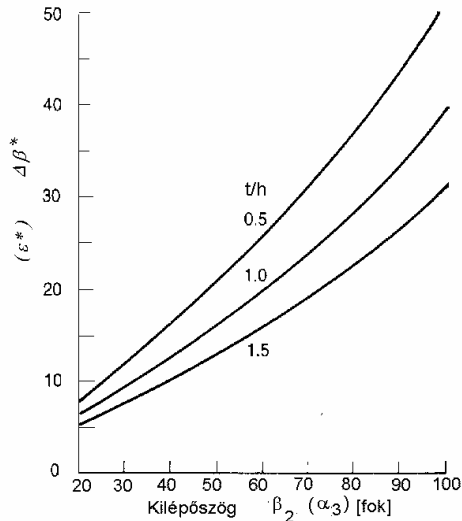
$$c_a = 150 \text{ m/s}, \quad \beta_1 = 29,37^\circ, \quad \beta_2 = 41,46^\circ,$$

$$\beta_2 - \beta_1 = 12,09^\circ, \quad \Delta c_u = 87 \text{ m/s},$$

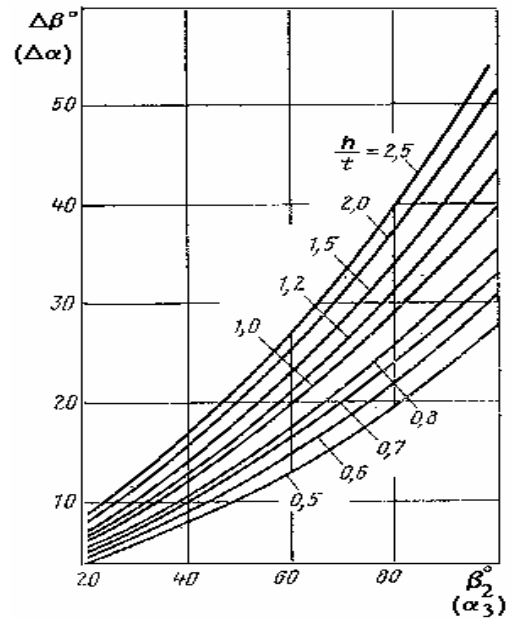
$$w_1 = c_a / \sin \beta_1 = 305,8 \text{ m/s} \quad w_2 = c_a / \sin \beta_2 = 226,5 \text{ m/s}$$

$$D = 1 - \frac{w_2}{w_1} + \frac{\Delta c_u}{2w_1} \frac{t}{h} = 1 - \frac{226,5}{305,8} + \frac{87 \times 1,1}{2 \times 305,8} = 0,42$$

Mint a 2.11. ábrán látható, ez a D érték még viszonylag elfogadható veszteséget jelez.



2.12. ábra



2.13. ábra.

### 3. FOKOZATI JELLEGGÖRBE SZÁMÍTÁS

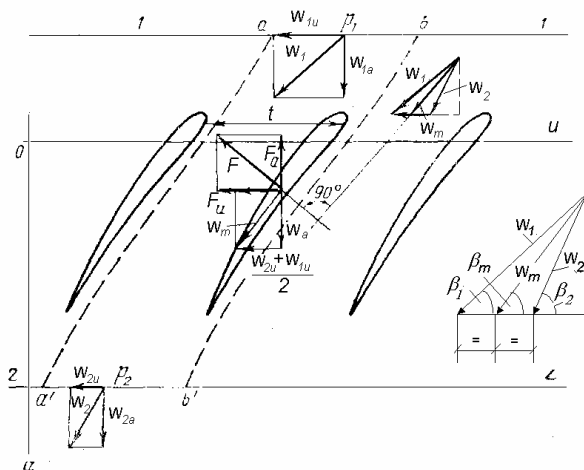
A mért közepes veszteségből  $\varpi = p_1^* - p_2^*$  két tényező határozható meg: Profilellenállás tényező  $C_{Dp}$  és a felhajtóerő tényező  $C_L$ .

A statikus nyomásnövekedés a lapátsoron

$$\Delta p = p_2 - p_1 = p_2^* - \frac{1}{2} \rho w_2^2 - \left( p_1^* - \frac{1}{2} \rho w_1^2 \right) = \frac{\rho}{2} (w_1^2 - w_2^2) - \varpi \quad (3.1)$$

$$w^2 = w_u^2 + w_a^2$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} w_a^2 (\text{ctg}^2 \beta_1 - \text{ctg}^2 \beta_2) - \varpi \quad (3.2)$$



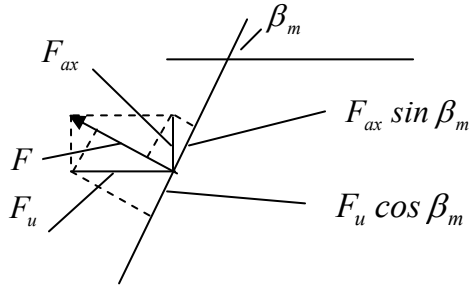
3.1. ábra

Az egységnyi lapáthosszra eső axiális erő

$$F_{ax} = t \Delta p \quad (3.3)$$

Az impulzus tétel értelmében a rácson az egységnyi lapáthosszra vonatkoztatott tangenciális erő

$$F_u = t \rho w_a (w_{1u} - w_{2u}) = t \rho w_a^2 (\text{ctg} \beta_1 - \text{ctg} \beta_2) \quad (3.4)$$



3.2. ábra

A  $w_m$  közepes sebesség és annak  $\beta_m$  szöge a sebességi háromszögből (3.1. ábra)

$$w_{mu} = \frac{w_{1u} + w_{2u}}{2} \quad \beta_m = \text{arcctg} \frac{\text{ctg}\beta_1 + \text{ctg}\beta_2}{2} \quad (3.5)$$

Az ellenállás erő

$$F_D = \frac{1}{2} \rho w_m^2 h C_{Dp} = F_u \cos \beta_m - t \Delta p \sin \beta_m \quad (3.6)$$

Behelyettesítve (3.4)

$$\frac{1}{2} \rho w_m^2 h C_{Dp} = t \rho w_a^2 (\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2) \cos \beta_m - \frac{1}{2} \rho w_a^2 t (\text{ctg}^2 \beta_1 - \text{ctg}^2 \beta_2) \sin \beta_m + \varpi t \sin \beta_m \quad (3.7)$$

A profilellenállás tényezője

$$C_{Dp} = 2 \frac{t}{h} \frac{w_a^2}{w_m^2} (\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2) \cos \beta_m - \frac{t}{h} \frac{w_a^2}{w_m^2} (\text{ctg}^2 \beta_1 - \text{ctg}^2 \beta_2) \sin \beta_m + \frac{\varpi}{0,5 \rho} \frac{t}{h} \frac{\sin \beta_m}{w_m^2} \quad (3.8)$$

$$C_{Dp} = \frac{t}{h} \frac{w_a^2}{w_m^2} \sin \beta_m \left\{ \left[ 2(\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2) \text{ctg}\beta_m - (\text{ctg}^2 \beta_1 - \text{ctg}^2 \beta_2) \right] + \frac{\varpi}{0,5 \rho} \frac{1}{w_a^2} \right\} \quad (3.9)$$

mivel

$$\text{ctg}^2 \beta_1 - \text{ctg}^2 \beta_2 = (\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2)(\text{ctg}\beta_1 + \text{ctg}\beta_2) = 2(\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2) \text{ctg}\beta_m \quad (3.10)$$

a szögletes zárójelben levő kifejezés zérus értékű, továbbá a

$$w_a = w_m \sin \beta_m \quad w_a = w_1 \sin \beta_1 \quad (3.11)$$

összefüggések figyelembevételével

$$C_{Dp} = \left( \frac{t}{h} \right) \left( \frac{\varpi}{0,5 \rho} \right) \left( \frac{\sin^3 \beta_m}{w_a^2} \right) = \left( \frac{t}{h} \right) \left( \frac{\varpi}{0,5 \rho w_1^2} \right) \left( \frac{\sin^3 \beta_m}{\sin^2 \beta_1} \right) \quad (3.12)$$

A felhajtóerő

$$F_L = \frac{1}{2} \rho w_m^2 h C_L = F_u \sin \beta_m + t \Delta p \cos \beta_m \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{2} \rho w_m^2 h C_L = t \rho w_a^2 (\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2) \sin \beta_m + \frac{1}{2} \rho w_a^2 t (\text{ctg}^2 \beta_1 - \text{ctg}^2 \beta_2) \cos \beta_m - \varpi t \cos \beta_m \quad (3.14)$$

A felhajtóerő tényező

$$C_L = 2 \left( \frac{t}{h} \right) (\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2) \sin \beta_m - C_{Dp} \text{ctg}\beta_m \quad (3.15)$$

Másodlagos ellenállások tényezője

$$C_{Ds} = 0,018C_L^2 \quad (3.16)$$

Az áramlást határoló körgyűrű felületeken fellépő súrlódási ellenállások tényezője

$$C_{Dgy} = 0,020 \left( \frac{t}{l} \right) \quad (3.17)$$

Teljes ellenállás tényező

$$C_D = C_{Dp} + C_{Dgy} + C_{Ds} \quad (3.18)$$

Az egyenes rácsra kapott (3.12) kifejezés  $C_D$  helyettesítéssel alkalmas *kör alakú rácsok esetében* teljes ellenállás tényező számítására, vagyis a (3.12) egyenletet használhatjuk a  $\frac{\varpi}{0,5\rho w_1^2}$  veszteség-tényező meghatározására

$$\frac{\varpi}{0,5\rho w_1^2} = \frac{C_D}{\left( \frac{t}{h} \right) \left( \frac{\sin^3 \beta_m}{\sin^2 \beta_1} \right)}$$

Az ideális nyomásnövekedés az adott lapátsorban a (3.1) képlet alapján a  $\varpi = 0$  helyettesítéssel

$$\Delta p_{id} = \frac{\rho}{2} (w_1^2 - w_2^2) \quad (3.19)$$

$$\frac{\Delta p_{id}}{\frac{\rho}{2} w_1^2} = \left( 1 - \frac{w_2^2}{w_1^2} \right) = 1 - \frac{w_a^2 \sin^2 \beta_1}{w_a^2 \sin^2 \beta_2} = 1 - \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2 \beta_2} \quad (3.20)$$

A lapátsor hatásfoka

$$\eta_l = \frac{\Delta p}{\Delta p_{id}} = \frac{\Delta p_{id} - \varpi}{\Delta p_{id}} = 1 - \frac{\varpi}{\Delta p_{id}} \quad \eta_l = 1 - \frac{\left( \frac{\varpi}{0,5\rho w_1^2} \right)}{\left( \frac{\Delta p_{id}}{0,5\rho w_1^2} \right)} \quad (3.21)$$

ahol

$$\frac{\varpi}{0,5\rho w_1^2} = \frac{C_D}{\left( \frac{t}{h} \right) \left( \frac{\sin^3 \beta_m}{\sin^2 \beta_1} \right)} \quad (3.22)$$

Amennyiben  $p_1$  és  $p_2$  a forgólapátsor be- és kilépő statikus nyomása

$$\eta_l = \frac{p_2 - p_1}{p_2' - p_1} \quad (3.23)$$

ahol  $p_2'$  - az ideális kilépőnyomás veszteségmentes esetben. Ha a fokozat izentrópikus hatásfokát, mint az izentrópikus statikus hőmérsékletváltozás és a valóságos statikus hőmérsékletváltozás hányadosát definiáljuk

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( 1 + \frac{\eta_s \Delta T_f}{2T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (3.24)$$

ahol  $\frac{\Delta T_f}{2}$  a hőmérsékletnövekedés a forgólapátosáson  $r^o = 0,5$  esetén.

$$\frac{p_2'}{p_1} = \left( 1 + \frac{\Delta T_f}{2T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (3.25)$$

$$\eta_l = \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) / \left( \frac{p_2'}{p_1} - 1 \right) = \left[ \left( 1 + \frac{\eta_s \Delta T_f}{2T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} - 1 \right] / \left[ \left( 1 + \frac{\Delta T_f}{2T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} - 1 \right] \quad (3.26)$$

Az  $(1+x)^n$  kifejezést binomiális sorba fejtve kapjuk

$$(1+x)^n = \binom{n}{0} + \binom{n}{1}x + \binom{n}{2}x^2 + \dots$$

az elvet a (3.26) egyenletben található kifejezésekre alkalmazva és a másodrendűen kicsiny mennyiségeket - figyelembe véve, hogy  $\Delta T_f \ll T_1$  - elhanyagolva kapjuk

$$\left( 1 + \frac{\eta_s \Delta T_f}{2T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1 + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{\eta_s \Delta T_f}{2T_1} \quad (3.27)$$

$$\left( 1 + \frac{\Delta T_f}{2T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1 + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{\Delta T_f}{2T_1} \quad (3.28)$$

Ezeket a lapáthatásfok (3.26) kifejezésébe helyettesítve és a másodrendűen kicsiny mennyiségeket elhanyagolva kapjuk

$$\eta_l = \eta_{sf} \quad (3.29)$$

Tehát  $r^o = 0,5$  és  $\Delta T_{fok}^* \approx 20K$  esetén

$$\eta_{s\ fok} \approx \eta_l \quad (3.30)$$

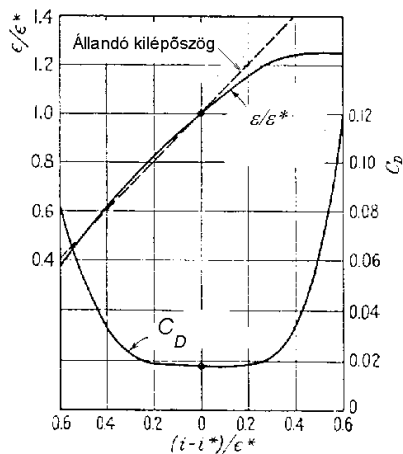
Ettől eltérő esetben, ha a reakciófok 0,5 közelében van, a fokozat hatásfoka a forgó és állólapátosor hatásfokának számtani középértékeként számítható.

$$\eta_{s\ fok} = \frac{\eta_{l\ forgó} + \eta_{l\ álló}}{2} \quad (3.31)$$

különben

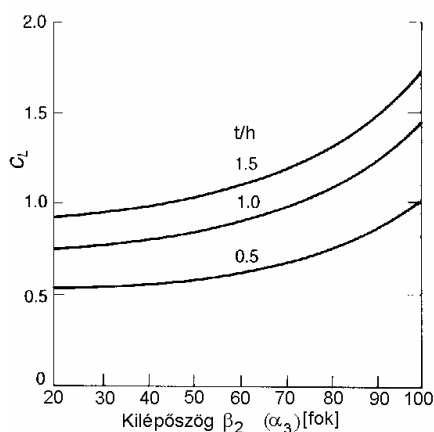
$$\eta_{s\ fok} = r^o \eta_{l\ forgó} + (1 - r^o) \eta_{l\ álló} \quad (3.32)$$

### A harmadik fokozat hatásfokának és nyomásviszonyának meghatározása



3.3. ábra

A teljes ellenállás tényező



3.4. ábra

A 3.4. ábrából  $t/h=0,9$  és  $\beta_2=61,37^\circ$ -nál  $C_L=0,875$

A másodlagos veszteség

$$C_{Ds} = 0,018C_L^2 = 0,018 \times 0,875^2 = 0,0138$$

Mivel az osztás  $t=0,0248$  m és lapáthossz  $l=0,0836$  m, a gyűrű felületeken jelentkező súrlódási ellenállás

$$C_{Dgy} = 0,020 \left( \frac{t}{l} \right) = 0,02 \frac{0,0248}{0,0836} = 0,0059$$

A 3.3. ábrából  $i=0$  állásszögnél a profilveszteség

$$C_{Dp}=0,018$$

$$C_D = C_{Dp} + C_{Dgy} + C_{Ds} = 0,018 + 0,0059 + 0,0138 = 0,0377$$

így a (6.5) egyenletből

$$\frac{\varpi}{0,5 \rho w_1^2} = \frac{C_D}{\left( \frac{t}{h} \right) \left( \frac{\sin^3 \beta_m}{\sin^2 \beta_1} \right)} = \frac{0,0377}{0,9 \frac{\sin^3 48,37^\circ}{\sin^2 39,08^\circ}} = 0,0399$$

$$\frac{\Delta p_{id}}{\frac{\rho}{2} w_1^2} = 1 - \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2 \beta_2} = 1 - \frac{\sin^2 39,08^\circ}{\sin^2 61,37^\circ} = 0,4842$$

a forgólapátsor hatásfoka

$$\eta_l = 1 - \frac{\left( \frac{\varpi}{0,5 \rho w_1^2} \right)}{\left( \frac{\Delta p_{id}}{0,5 \rho w_1^2} \right)} = 1 - \frac{0,0399}{0,4842} = 0,918$$

Az 50 %-os reakciófok miatt a fokozat hatásfoka

$$\eta_{sfok} = 0,92$$

A fokozat statikus nyomásviszonya 318,5 K statikus belépőhőmérséklet (számítandó) mellett

$$\pi_{fok} = \left( 1 + \frac{\eta_{sfok} \Delta T_{fok}}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left( 1 + \frac{0,92 \times 24}{318,5} \right)^{3,5} = 1,264$$

A torlóponthi nyomásviszony

$$\pi_{fok}^* = \left( 1 + \frac{\eta_{sfok} \Delta T_{fok}^*}{T_1^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left( 1 + \frac{0,92 \times 24}{333} \right)^{3,5} = 1,252$$

### 3.1. Részterhelési üzemmódok

## Hőmérséklet- és nyomástényező

A fokozatban bekövetkező torlóponti nyomásnövekedést a hőmérsékletnövekedés és az izentrópikus hatások segítségével határozhatjuk meg

$$\frac{p_1^* + \Delta p_f^*}{p_1^*} = 1 + \frac{\Delta p_f^*}{p_1^*} = \left( 1 + \frac{\eta_{sf} \Delta T_f^*}{T_1^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (3.33)$$

A kifejezést binomiális sorba fejtvé és a másodrendűen kicsiny mennyiségeket - figyelembe véve, hogy  $\Delta T_s^* \ll T_1^*$  - elhanyagolva kapjuk

$$\left( 1 + \frac{\eta_{sf} \Delta T_f^*}{T_1^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1 + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{\eta_{sf} \Delta T_f^*}{T_1^*} \quad (3.34)$$

behelyettesítve

$$1 + \frac{\Delta p_f^*}{p_1^*} = 1 + \frac{\kappa}{\kappa-1} \eta_{sf} \frac{\Delta T_f^*}{T_1^*} \quad (3.35)$$

melyből

$$\frac{\Delta p_f^*}{p_1^*} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \eta_{sf} \frac{\Delta T_f^*}{T_1^*} = \frac{c_p}{R} \eta_{sf} \frac{\Delta T_f^*}{T_1^*} \quad (3.36)$$

$$\frac{\Delta p_f^*}{p_1^*} R T_1^* = \eta_f c_p \Delta T_f^* \quad (3.37)$$

$$\frac{\Delta p_f^*}{\rho_1^*} = \eta_f c_p \Delta T_f^* \quad (3.38)$$

A nyomástényező

$$\frac{\Delta p_f^*}{u^2 \rho_1^*} = \eta_f \frac{c_p \Delta T_f^*}{u^2} \quad (3.39)$$

vagy mivel a hőmérséklet-tényező  $\psi = \frac{c_p \Delta T_f^*}{u^2}$  (3.40)

$$\frac{\Delta p_f^*}{u^2 \rho_1^*} = \eta_f \psi \quad (3.41)$$

Képezzük az

$a = \frac{i - i^*}{\varepsilon} = -0,2$  viszonyszámot majd változtatva pl.  $-0,6 \div +0,6$  között és elvégezve a következő számításokat megkapjuk a fokozat karakterisztikáját.

$$i - i^* = \varepsilon^* a = 22,29^\circ \times (-0,2) = -4,46^\circ$$



$$i = i^* + \varepsilon^* a = 0 - 4,458 = -4,46^\circ$$

$$\beta_1 = \beta_1' - i = 39,08 + 4,46 = 43,54^\circ$$

A 15. ábrából  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*} = b = 0,82$

$$\varepsilon = \varepsilon^* b = 22,29^\circ \times 0,82 = 18,28^\circ$$

$$\beta_2 = \beta_1 + \varepsilon = 43,54 + 18,28 = 61,82^\circ$$

a szimmetrikus sebességi háromszögből adódóan

$$\alpha_1 = \beta_2 = 61,82^\circ \quad \alpha_2 = \beta_1 = 43,54^\circ$$

Az átömlési tényező

$$\varphi = \frac{w_a}{u} = \frac{l}{ctg\beta_1 + ctg\alpha_1} = \frac{l}{1,0523 + 0,5357} = 0,629$$

Hőmérséklettényező

$$\psi = \frac{c_p \Delta T_{fok}^*}{u^2} = \frac{\lambda u c_a (ctg\beta_1 - ctg\beta_2)}{u^2} = \lambda \varphi (ctg\beta_1 - ctg\beta_2) = \lambda \frac{ctg\beta_1 - ctg\beta_2}{ctg\beta_1 + ctg\alpha_1}$$

másrészt

$$\psi = \frac{c_p \Delta T_{fok}^*}{u^2} = \frac{\lambda u c_a (ctg\beta_1 - ctg\beta_2)}{u^2} = \lambda \frac{\Delta c_u}{u}$$

$$\psi = \lambda \frac{ctg\beta_1 - ctg\beta_2}{ctg\beta_1 + ctg\alpha_1} = 0,88 \frac{1,0523 - 0,5327}{1,0523 + 0,5327} = 0,288$$

A profilellenállás tényező a 3.3. ábrából

$$C_{Dp} = 0,018$$

Körgyűrű felület súrlódási ellenállás tényezője

$$C_{Dgy} = 0,020 \left( \frac{t}{l} \right) = 0,02 \frac{0,0248}{0,0836} = 0,0059$$

Felhajtóerő tényező

$$\beta_m = \text{arcctg} \frac{ctg\beta_1 + ctg\beta_2}{2} = \text{arcctg} \frac{1,0523 + 0,5327}{2} = 51,60^\circ$$

$$C_L = 2 \left( \frac{t}{h} \right) (ctg\beta_1 - ctg\beta_2) \sin \beta_m - C_{Dp} ctg\beta_m$$

$$C_L = 2 \times 0,9 \times (1,0523 - 0,5327) 0,7837 - 0,018 \times 0,7925 = 0,7187$$

Másodlagos veszteségek tényezője

$$C_{Ds} = 0,018 C_L^2 = 0,018 \times 0,7187^2 = 0,0093$$

$$C_D = C_{Dp} + C_{Dgy} + C_{Ds} = 0,018 + 0,0059 + 0,0093 = 0,0332$$

$$\frac{\varpi}{0,5\rho w_1^2} = \frac{C_D}{\left(\frac{t}{h}\right)\left(\frac{\sin^3 \beta_m}{\sin^2 \beta_1}\right)} = \frac{0,0332}{0,9 \frac{\sin^3 51,6^\circ}{\sin^2 43,54^\circ}} = 0,0364$$

$$\frac{\Delta p_{id}}{\frac{\rho}{2} w_1^2} = 1 - \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2 \beta_2} = 1 - \frac{\sin^2 43,54^\circ}{\sin^2 61,82^\circ} = 0,3893$$

Fokozati hatásfok

$$\eta_i = 1 - \frac{\left(\frac{\varpi}{0,5\rho w_1^2}\right)}{\left(\frac{\Delta p_{id}}{0,5\rho w_1^2}\right)} = 1 - \frac{0,0364}{0,3893} = 0,906$$

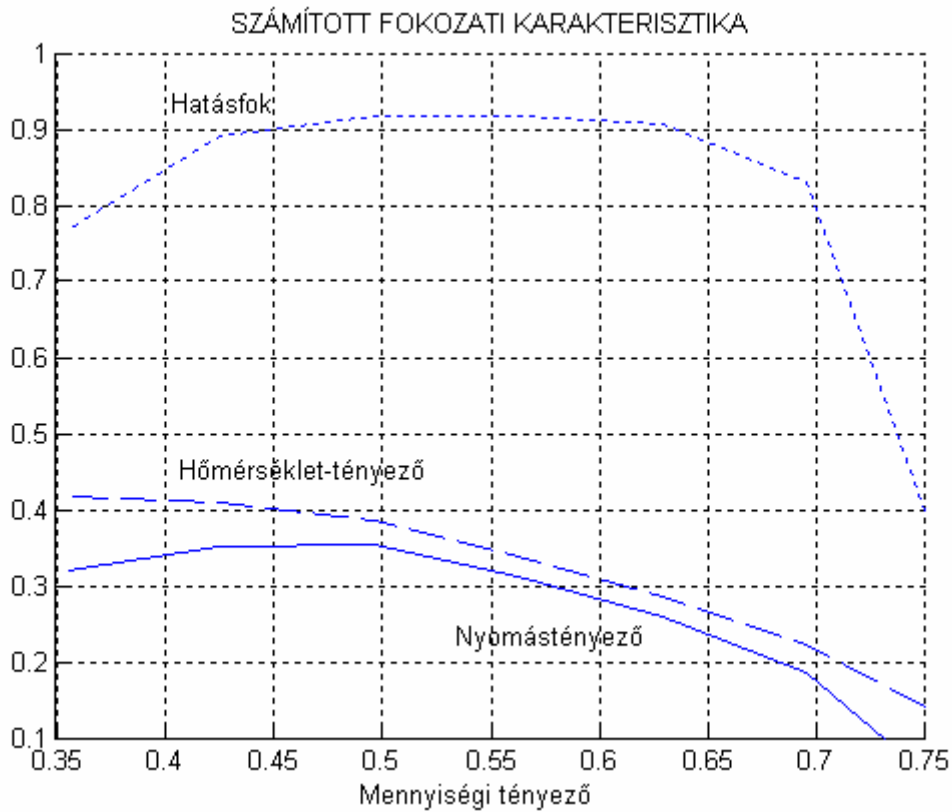
A nyomástényező

Nyomásnövekedés a fokozatban  $\Delta p_f^*$

$$\frac{\Delta p_f^*}{\rho_1^* u^2} = \eta_i \psi = 0,906 \times 0,288 = 0,261$$

A számítási eredmények táblázatban

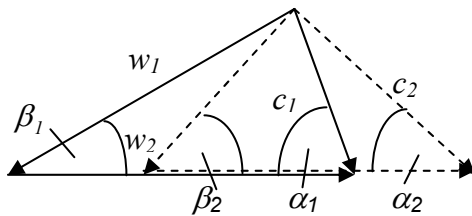
$(i - i^*) / \varepsilon^*$	[-]	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,2	0,4	0,6
$\varepsilon / \varepsilon^*$	[-]	0,38	0,615	0,82	1	1,16	1,24	1,25
$i$	[fok]	-13,38	-8,92	-4,46	0	4,46	8,92	13,37
$\varepsilon$	[fok]	8,47	13,82	18,28	22,29	25,86	27,64	27,86
$\beta_1 = \alpha_2$	[fok]	52,45	48	43,54	39,08	34,62	30,16	25,71
$\beta_2 = \alpha_1$	[fok]	60,92	61,81	61,82	61,37	60,48	57,8	53,57
$\varphi$	[-]	0,75	0,695	0,629	0,562	0,496	0,425	0,355
$\psi$	[-]	0,141	0,223	0,288	0,339	0,385	0,408	0,418
$C_{Dp}$	[-]	0,081	0,032	0,018	0,017	0,018	0,035	0,12
$C_{Dgy}$	[-]	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059
$C_L$	[-]	0,2652	0,5101	0,7137	0,907	1,1	1,231	1,227
$C_{Ds}$	[-]	0,0013	0,0047	0,0092	0,0148	0,0218	0,0273	0,0271
$C_D$	[-]	0,088	0,0426	0,0331	0,0377	0,0457	0,0682	0,153
$\varpi / (0,5\rho w_1^2)$	[-]	0,1063	0,0488	0,0365	0,0399	0,0469	0,0703	0,1648
$\Delta p_{id} / (0,5\rho w_1^2)$	[-]	0,1771	0,2893	0,3894	0,484	0,5738	0,647	0,709
$\eta_{s\ fok}$	[-]	0,4	0,831	0,906	0,918	0,918	0,891	0,767
$\Delta p_{fok}^* / (\rho_1^* u^2)$	[-]	0,0564	0,185	0,261	0,311	0,353	0,351	0,320



3.5. ábra

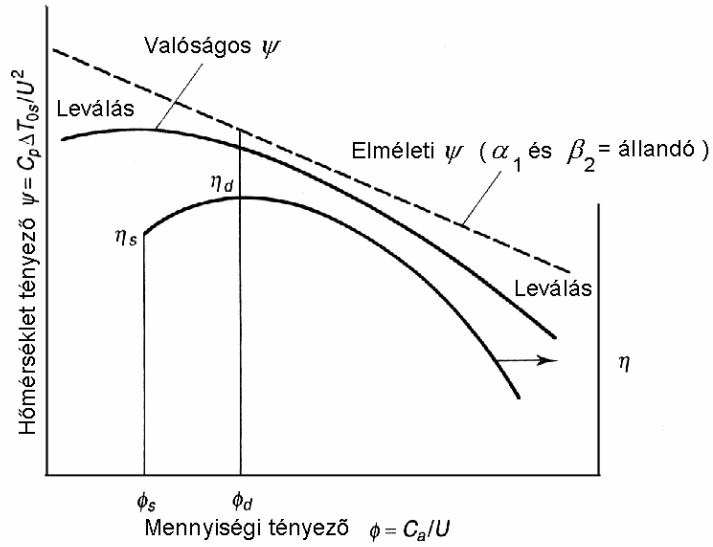
#### 4. KOMPRESSZOR KARAKTERISZTIKA

$$\Delta i_{fok}^* = u(w_{1u} - w_{2u}) = u[u - (w_{2u} + c_{1u})] = u[u - c_a(ctg\beta_2 + ctg\alpha_1)] \quad (4.1)$$

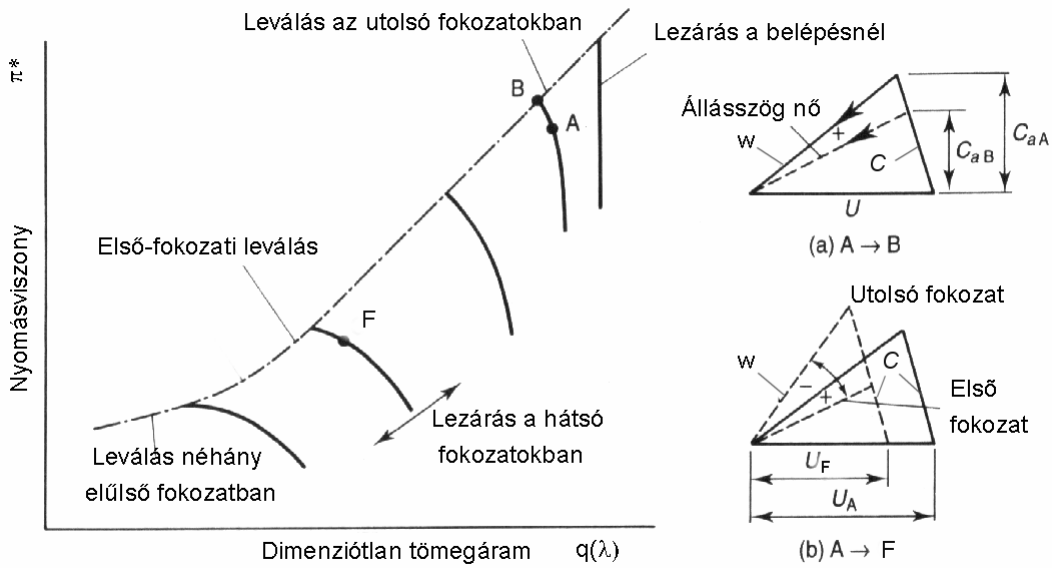


4.1. ábra

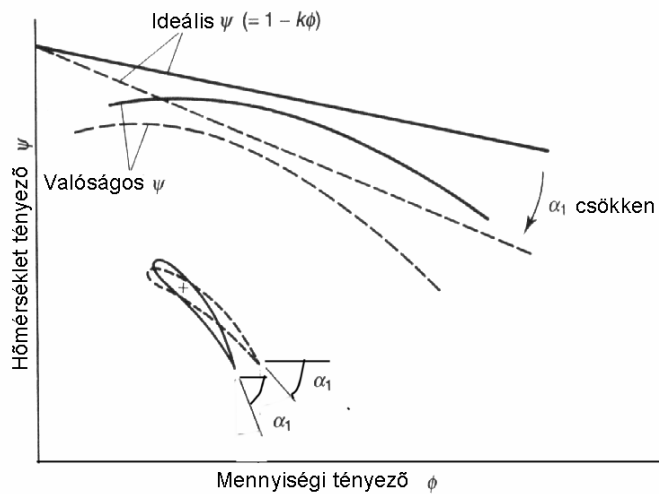
$$\psi = \frac{\Delta i_{fok}^*}{u^2} = 1 - \frac{c_a}{u}(ctg\beta_2 + ctg\alpha_1) = 1 - \phi(ctg\beta_2 + ctg\alpha_1) \quad (4.2)$$



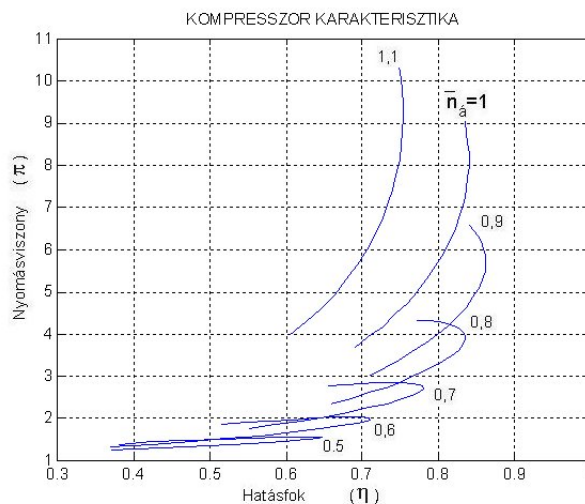
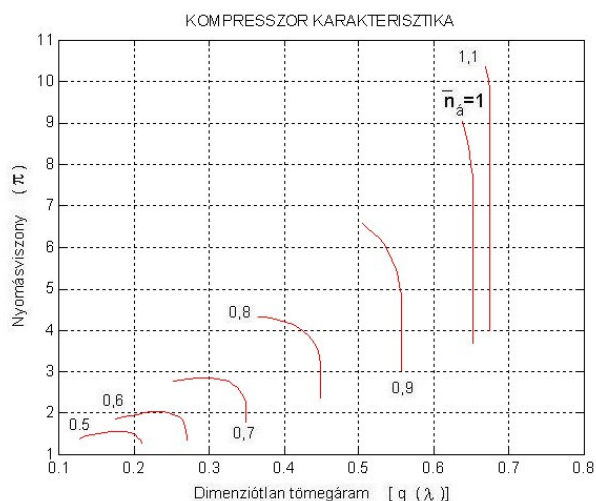
4.2. ábra



4.3. ábra



4.4. ábra



4.5. ábra

## 5. KOMPRESSZOR SZÁMÍTÁSA FAJLAGOS MUNKATÉNYEZŐ ALAPJÁN

A méretezendő kompresszor jellemzői:

Tömegáram  $\dot{m} = 70,5 \text{ kg/s}$

Nyomásviszony  $\pi_K^* = 7,5$

Adiabatikus hatásfok  $\eta_s^k = 0,85$

Szivócsatorna össznyomás-visszanyerési tényező  $\sigma_{sz} = 0,98$

Környezeti nyomás  $p_0 = 1,01 \text{ bar}$

Környezeti hőmérséklet  $T_0 = 288 \text{ K}$

Az első fokozat külső átmérője  $D_{1k} = 0,78 \text{ m}$

Fordulatszám  $n = 8570 \text{ 1/min}$

Kerületi sebesség az első fokozat külső átmérőn  $u_{1k} = 350 \text{ m/s}$

Axiális sebesség az első fokozat középátmérőn  $c_{1a} = 187 \text{ m/s}$

Az izentrópus sűrítési munka

$$w_{Ks} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_1^* \left( \pi_K^{*\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) = 1005 \cdot 288 \left( 7,5^{0,286} - 1 \right) = 225000 \text{ J/kg}$$

A valóságos kompresszió munkaszükséglet

$$w_K = \frac{w_{Ks}}{\eta_s^k} = \frac{225000}{0,85} = 265000 \text{ J/kg}$$

Közepes fajlagos munka  $w_{Kköz} = 33200 \text{ J/kg}$

Fokozatok száma

$$Z = \frac{w_K}{w_{Kköz}} = \frac{265000}{33200} = 8$$

A Tervezési segédlet [4] 4.2.1. pontja alapján a középátmérőre elvégzett számításokat a következő táblázat tartalmazza

Sorsz.	Paraméter	Mértékegység	Fokozat sorszáma															
			1	2	3	4	5	6	7	8								

Sorsz.	Paraméter	Mérték- egység	Fokozat sorszáma							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	$w_{k,i}$	J/kg	19800	27200	33800	33800	39240	38200	36300	32400
2	$\eta_{s,i}$		0,865	0,872	0,885	0,892	0,892	0,892	0,882	0,865
3	$T_{3,i}^* = T_{2,i}^* = T_{1,(i+1)}^*$	K	307,6	334,6	368,3	406,3	445,3	483,3	519,3	551,3
4	$\pi_{fok,i}^*$		1,222	1,292	1,347	1,362	1,335	1,29	1,25	1,2
5	$c_{1a_i}$	m/s	187	187	187	182	177	172	167	163
6	$\eta_r, \eta_f$		0,98	0,977	0,974	0,971	0,968	0,965	0,962	0,96
7	$\Omega$		0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
8	$w_{elmi}$	J/kg	19800	27400	34330	39100	40500	39600	38000	34200
9	$u_{k,i}$	m/s	350	350	350	350	350	350	350	350
10	$u_{m1,i}$	m/s	245	269	288	301	312	319	324	328
11	$r_i^o$		0,5	0,5	0,52	0,54	0,56	0,59	0,62	0,65
12	$K_{Gi}$		0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
13	$A_{1,i}$	m <sup>2</sup>	0,4	0,339	0,28	0,229	0,1865	0,155	0,1327	0,116
14	$\bar{d}_{1,i}$		0,4	0,539	0,644	0,721	0,781	0,822	0,85	0,871
15	$D_{b1,i}$	m	0,312	0,42	0,502	0,563	0,61	0,641	0,664	0,68
16	$c_{1u,i}$	m/s	82	83,4	78,4	73,4	72,8	68,7	64,5	62,7
17	$c_{1,i}$	m/s	204	204,7	202,7	196,2	191,2	185,2	179	174,6
18	$\alpha_{1,i}$	fok	66,3	65,9	67,35	67,8	67,8	68,13	68,75	68,75
19	$w_{1,i}$	m/s	248	263,4	280,9	291,4	297,5	303,6	308,5	311,4
20	$a_{1,i}$	m/s	330	340	355	374	395	413	432	450
21	$\tilde{M}_{1,i}$		0,75	0,775	0,792	0,783	0,75	0,735	0,715	0,693
22	$\bar{c}_{a,i}$		0,763	0,695	0,65	0,606	0,568	0,54	0,515	0,497
23	$\bar{H}_{elm,i}$		0,33	0,38	0,414	0,43	0,415	0,38	0,362	0,317
24	$I_i$		0,702	0,895	1,04	1,148	1,16	1,092	1,062	0,94
25	$(h/t)_{f1,i}$		0,63	0,86	1,06	1,19	1,2	1,12	1,08	0,93
26	$l_{1i}$	m	0,234	0,18	0,139	0,104	0,085	0,075	0,058	0,05
27	$(l/h)_i$		4,11	3,78	3,61	3,1	2,8	2,68	2,49	2,3

Sorsz.	Paraméter	Mérték- egység	Fokozat sorszáma							
			1	2	3	4	5	6	7	8
28	$z_i$		19	34	56	75	86	96	105	98
29	$c_{2u,i}$	m/s	163	185,4	197,6	203	201,2	193,3	181,5	166,5
30	$c_{2,i}$	m/s	248	263,3	270,3	270,9	266,4	257,1	245,3	232,1
31	$a_{2,i}$	m/s	334	348	368	386	403	426	445	460
32	$M_{2,i}$		0,74	0,755	0,735	0,705	0,655	0,602	0,55	0,505
33	$\alpha_{2,i}$	fok	49	45,2	43,1	41,53	40,9	41,3	42,2	44
34	$A_{2,i}$	m <sup>2</sup>	0,365	0,312	0,251	0,205	0,169	0,1425	0,122	0,1065
35	$\bar{d}_{2,i}$		0,485	0,59	0,689	0,754	0,804	0,838	0,863	0,881
36	$w_{2,i}$	m/s	211	208,7	208,7	207,5	208,9	213,4	220	229,7
37	$\beta_{2,i}$	fok	62,5	63,7	62	59,9	56,7	52,65	48,6	44,83
38	$\beta_{1,i}$	fok	49	45,2	41,76	38,7	36,5	34,5	32,75	31,6
39	$\Delta\beta$	fok	13,5	18,5	20,24	21,2	20,2	18,15	15,85	13,23
40	$\alpha_{3i} = \alpha_{1(i+1)}$	fok	65,9	67,36	67,8	67,8	68,13	68,75	68,75	90
41	$\Delta\alpha = \alpha_{3i} - \alpha_{2i}$	fok	16,9	22,16	24,73	26,29	27,21	27,45	26,53	48
42	$E_i$		0,735	0,936	1,038	1,1	1,14	1,13	1,09	1,34
43	$(h/t)_{\acute{a},i}$		0,63	0,91	1,04	1,16	1,25	1,24	1,15	1,68
44	$(l_2/h)_i$		4,05	3,79	3,5	2,98	2,78	2,6	2,31	
45	$l_{2i}$	m	0,2015	0,16	0,121	0,095	0,077	0,063	0,053	0,047
46	$z_{\acute{a},i}$		23	42	61	78	100	116	114	

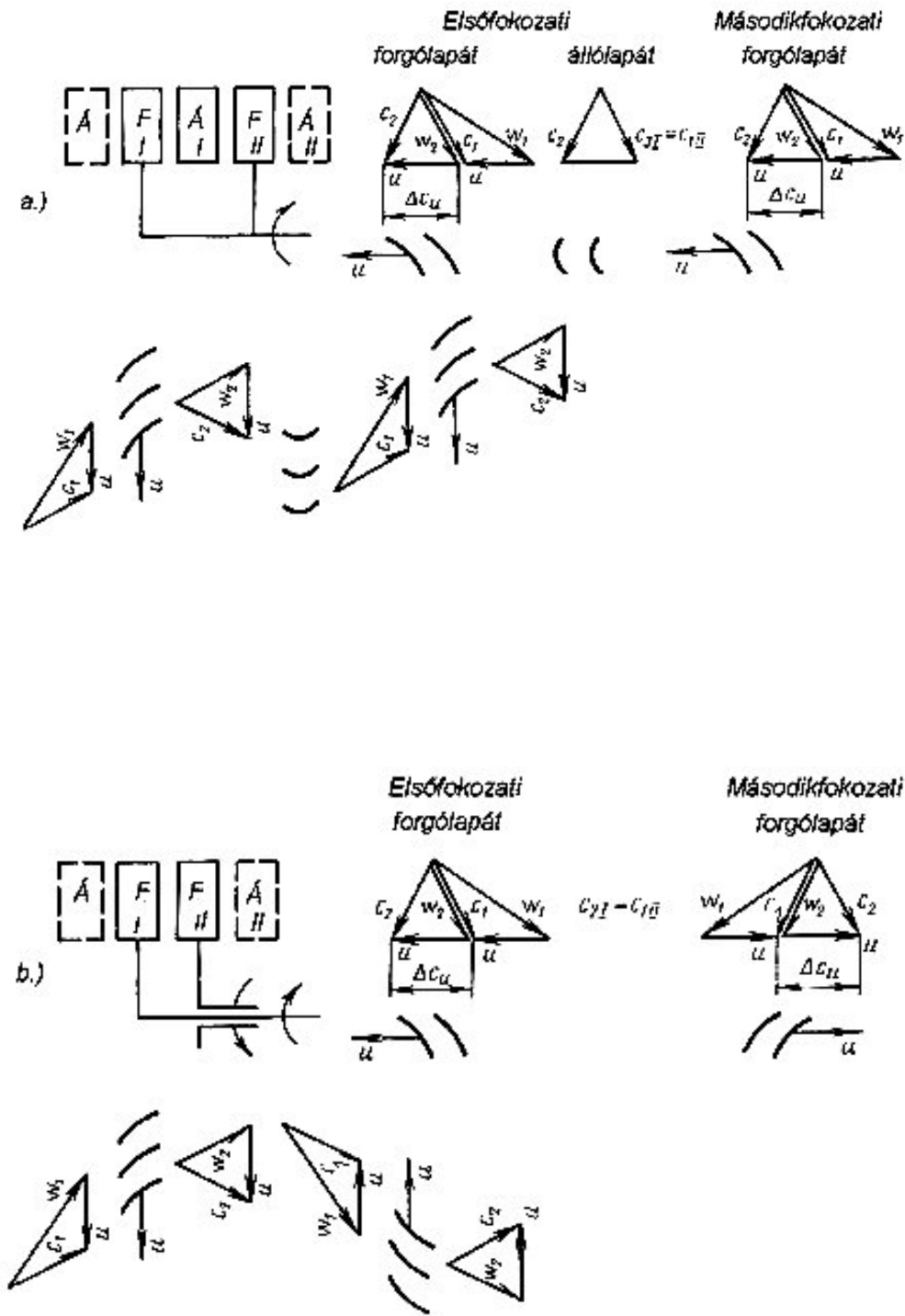
## 6. BIROTATÍV (KETTŐS FORGÁSIRÁNYÚ) KOMPRESSZOR

A 24 a. ábrán két 100% reakciófokú fokozatból álló hagyományos kétfokozatú kompresszor felépítési és sebességi háromszögeinek ábráit láthatjuk. Az adott fokozatokban a teljes nyomásnövekedés a forgólapátokon következik be, míg az állólapátokon csak a gázáram irányeltérése megy végbe  $c_2=c_3$ .

Amennyiben a két fokozat forgólapátsora egymással ellentétes irányba forog (24 b. ábra), akkor az első forgólapátsorról kilépő gáz abszolút sebessége ( $c_{2I}$ ) – megegyezik a második forgólapátsor belépő abszolút sebességével ( $c_{1II}$ ). A kerületi sebességek ellentétes irányúak, de a

sebességek és azok szögei azonosak. Ebben az elrendezésben ugyanakkora sűrítési munka esetén elmaradhat a két fokozat forgólapátjai közül az állólapát és ugyanakkor nő a kompresszor hatásfoka.

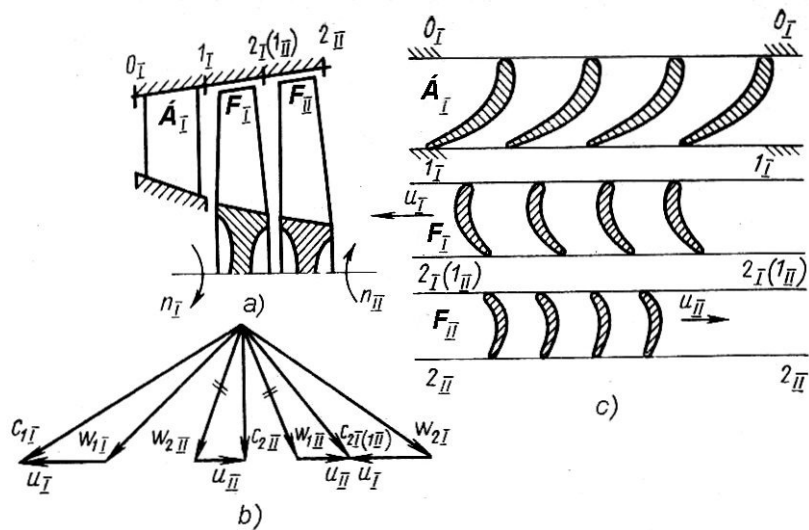
Az állólapát elmaradása kedvezően hat a kompresszor tömegére – és az ellentétes forgásirány a kompresszor giroszkópos nyomatékára. A birotatív elrendezés szerkezeti megoldása bonyolultabb a hagyományosnál, nevezetesen a csapágyak nagyobb fordulatszámon működnek (a fordulatszám a két fordulatszám összegével egyenlő) és megnő a tengelyek és a támaszok száma is.



6.1. ábra



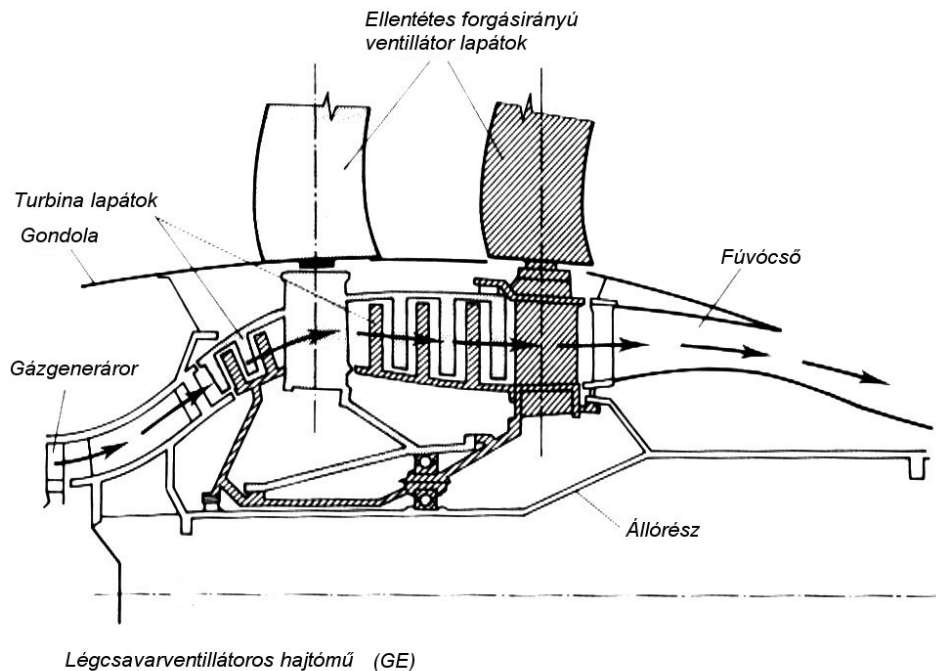
## 7. BIROTATIV (KETTŐS FORGÁSIRÁNYÚ) TURBINA



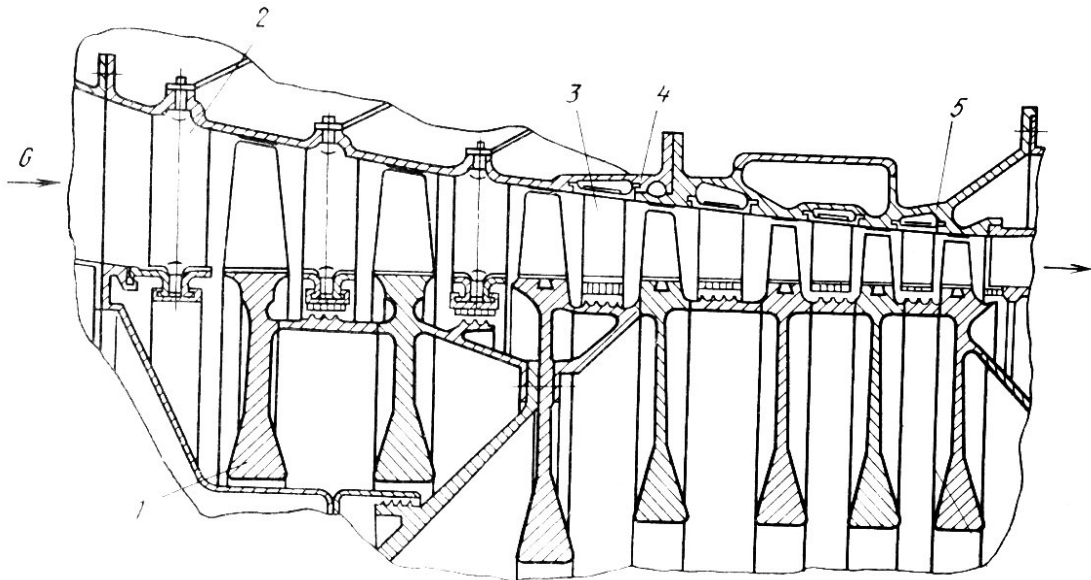
7.1. ábra.

Perspektivikus az olyan szerkezeti kialakítású turbina, amikor forgólapátsorai ellentétes forgásirányúak és nincs közöttük állólapátsor (26. ábra).

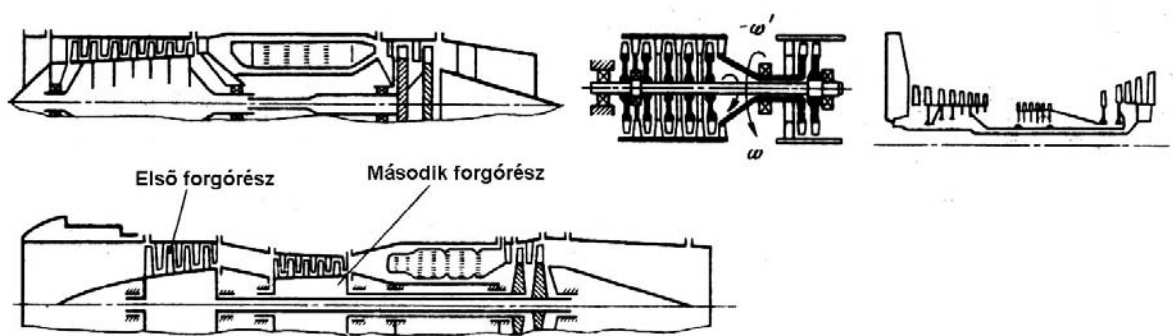
Az ilyen turbinában az I. forgólapátsorból kilépő abszolút sebesség ( $c_{2I}$ ) lesz a következő forgólapátsor abszolút belépősebessége ( $c_{1II}$ ). A sebességi háromszögek így megszerkeszthetők (26. b. ábra). Az állólapátsor hiánya csökkenti a fokozati veszteséget, a hajtómű méretét, tömegét és ahhoz vezet, hogy a második fokozat teljes expanziója a második forgólapátsoron valósul meg. Ugyanakkor itt nem lehet 100 %-os reakciófokú fokozatról beszélni, mivel a második fokozat fűvókája tulajdonképpen a teljes első fokozat. Az ábra szerinti esetben ez a második forgólapátsor akciós lapátozást képvisel, és a fűvóka szerepét a teljes első fokozat látja el. A fentiek mellett a birotatív turbínák előnye, hogy csökken a forgórész giroszkópikus nyomatéka. Az ilyen turbina alkalmas birotatív kompresszorok, légszavar-ventillátorok hajtására, de az elvet alkalmazzák munkaturbinás hajtóművek gázturbináiban is. Hátránya a csapágyazás nagymértékű igénybevétele.



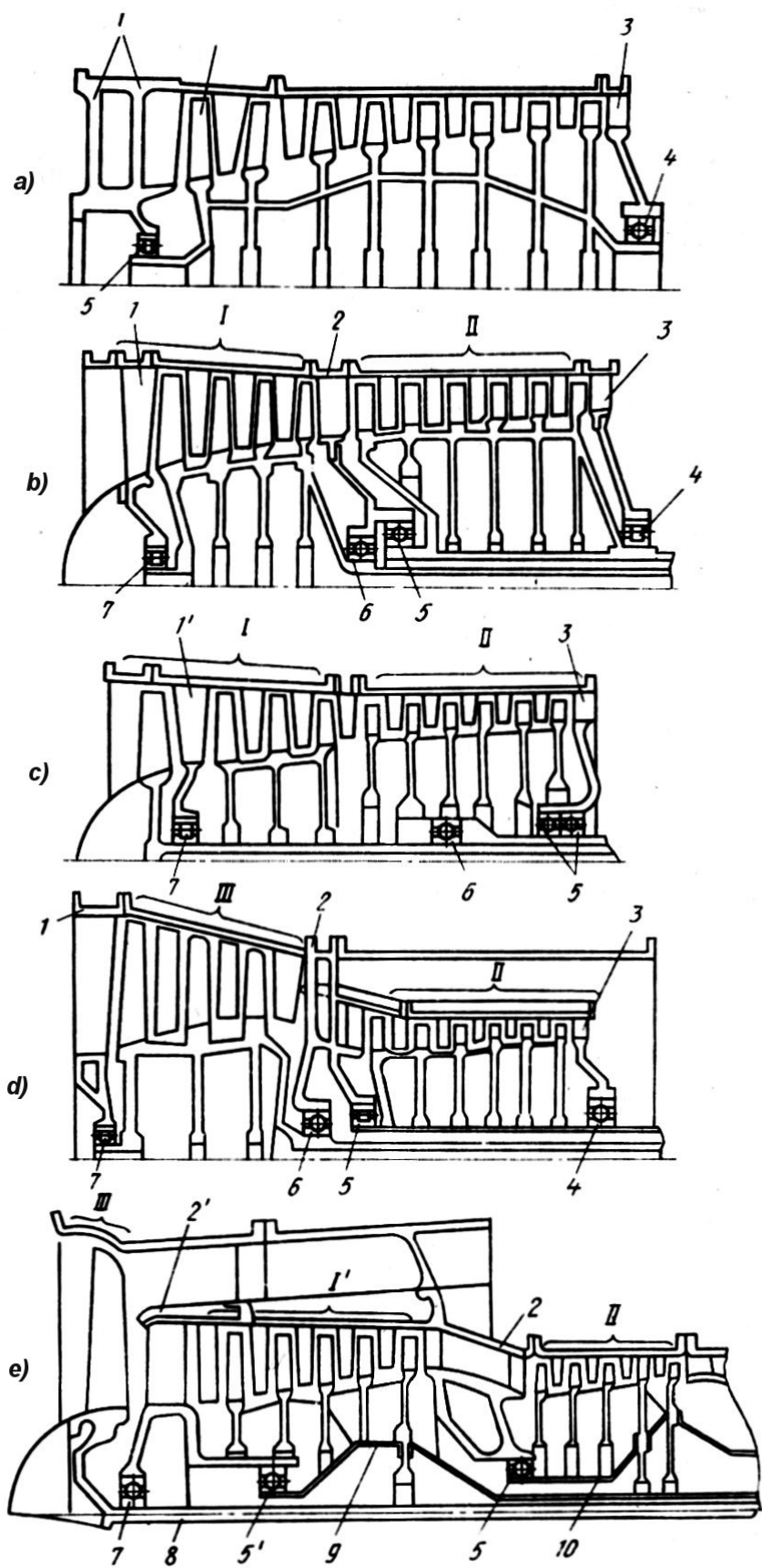
## 8. AXIÁLKOMPRESSZOR SZERKEZETI KIALAKÍTÁSOK



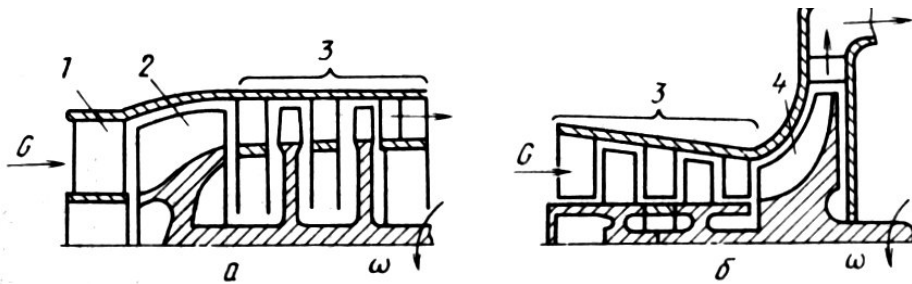
Forgórész kombinációk



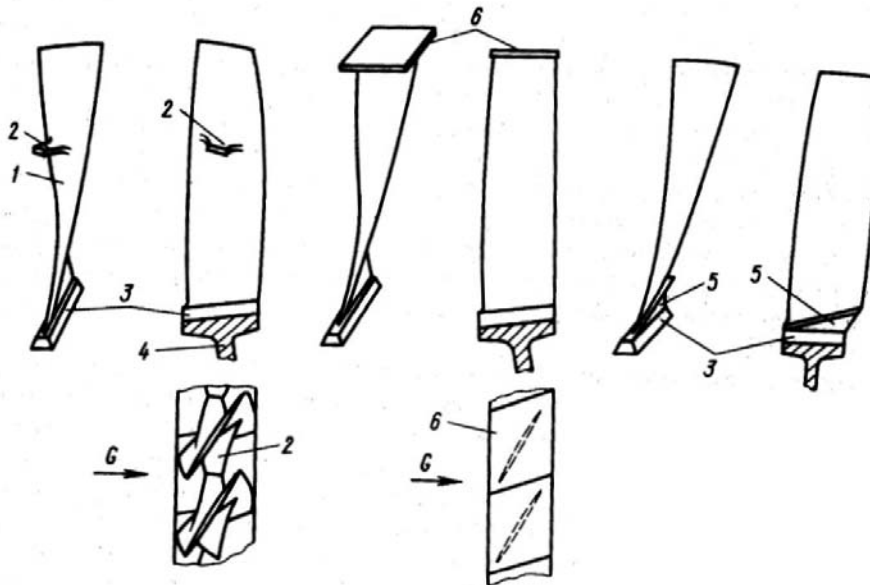
Axiális kompresszor elrendezések



## Kombinált kompresszorok



### Forgólapát kialakítások



### FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Cohen H., Rogers G.F.C, Saravanamuttoo H.I.H.: Gas Turbine Theory. Longman Ltd. 1998.
2. Fülöp Z.: Gázturbinák. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975
3. Holscevnikov K.V.: Teorija i raszcsot aviacionnüh lopatocsnüh masin. Masinosztroenie. Moszkva. 1970.
4. Sánta I.: Segédlet gázturbinás repülőgép hajtómű évfolyamterv készítéséhez. BME. Repülőgépek és Hajók Tanszék. Budapest, 2007.