

7. AXIÁLIS ÁTÖMLÉSŰ FORGÓGÉPEK TERVEZÉSÉNEK ÉS OPTIMALIZÁLÁSÁNAK KORSZERŰ IRÁNYVONALAI

7.1. A tervezési járókerék-lapátcirkuláció sugár menti alakulása

Adott sugáron a járókerék-lapát által keltett össznyomás-növekedés:

$$\Delta p_{\delta} = \eta_h \Delta p_{\delta id} = p_{2\delta} - p_{1\delta} \quad (7.1)$$

Ahol a járókerék előtti össznyomás:

$$p_{1\delta} = p_1 + \frac{\rho}{2} c_1^2 = \text{áll.} \quad (7.2)$$

A sugár mentén állandónak tekinthető. (A belépés előtti veszteségek elhanyagolásával, pl. álló légtérből szívó járókerék esetén a Bernoulli-egyenlet értelmében az össznyomás megegyezik azzal az össznyomással, amely a beszívás előtt érvényes. Pl. álló légtérből szívás esetén ez az össznyomás a légköri nyomás.)

A járókerék utáni össznyomás:

$$p_{2\delta} = p_2 + \frac{\rho}{2} c_2^2 \quad (7.3)$$

Nem szükségszerűen állandó a sugár mentén. Eloszlása a sugár függvényében a tervezői előírástól függ.

Vegyük figyelembe az alábbiakat!

$$\frac{dp_2}{dr} = \rho \frac{\Delta c_u^2}{r} \quad (7.4a)$$

A természetes koordináta-rendszerben felírt Euler-egyenlet normális irányú komponens egyenlete [3] értelmében.

Továbbá

$$c_2^2 = c_{2a}^2 + \Delta c_u^2 \quad (7.4b)$$

A radiális sebességkomponens elhanyagolásával. Feltételezzük továbbá, hogy

$$\eta_h \approx \text{áll.} \quad (7.4c)$$

Tehát a hidraulikai hatásfok a sugár mentén állandó.

Deriváljuk a sugár szerint a (7.3) egyenletet! Az eredmény, a (7.4) összefüggések figyelembe vételével:

$$\eta_h \frac{d(\Delta p_{\delta id})}{dr} = \rho \frac{\Delta c_u^2}{r} + \frac{\rho}{2} \frac{d}{dr} (c_{2a}^2 + \Delta c_u^2) = \rho \frac{\Delta c_u^2}{r} + \frac{\rho}{2} 2c_{2a} \frac{dc_{2a}}{dr} + \frac{\rho}{2} 2\Delta c_u \frac{d(\Delta c_u)}{dr} \quad (7.5)$$

Ezen belül

$$\rho \frac{\Delta c_u^2}{r} + \frac{\rho}{2} 2\Delta c_u \frac{d(\Delta c_u)}{dr} = \rho \frac{\Delta c_u}{r} \left(\Delta c_u + r \frac{d(\Delta c_u)}{dr} \right) = \rho \frac{\Delta c_u}{r} \frac{d}{dr} (r \Delta c_u) \quad (7.6)$$

Így a (7.5) egyenlet az alábbi formában írható fel:

$$\eta_h \frac{d(\Delta p_{\text{oid}})}{dr} = \rho \frac{\Delta c_u}{r} \frac{d}{dr} (r \Delta c_u) + \rho c_{2a} \frac{dc_{2a}}{dr} \quad (7.7)$$

Az egyenlet jobb oldalának első tagjában a deriválandó mennyiséget bővítsük $\rho \frac{u}{r}$ -rel, így a deriválandó mennyiség az Euler-turbinaegyenlet értelmében az ideális össznyomás-növekedés lesz:

$$\eta_h \frac{d(\Delta p_{\text{oid}})}{dr} = \frac{\Delta p_{\text{oid}}}{\rho u^2} \frac{d(\Delta p_{\text{oid}})}{dr} + \rho c_{2a} \frac{dc_{2a}}{dr} \quad (7.8)$$

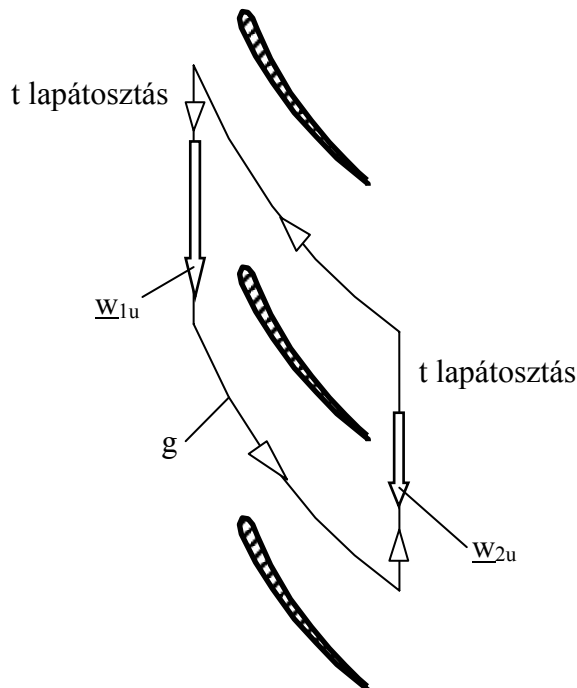
Végül átrendezve:

$$\frac{d(\Delta p_{\text{oid}})}{dr} \left[\eta_h - \frac{\Delta p_{\text{oid}}}{\rho u^2} \right] = \rho c_{2a} \frac{dc_{2a}}{dr} \quad (7.9)$$

A (7.9) egyenlet megmutatja az egyes jellemzők sugár menti alakulása közötti kapcsolatot. Segít megvizsgálni, milyen hatással van az ideális össznyomás-növekedés tervezés szerinti sugár menti eloszlása a járókerék-áramlás jellemzőire.

Az elemi részkerék egy lapátja körüli cirkuláció és az ideális össznyomás-növekedés között egyenes arányosság áll fenn (7.1. ábra). Egy elemi lapátot vegyünk körbe egy g görbével, amely a lapátozás előtt és mögött t lapátosztásnyi, tangenciális irányú szakaszokból áll, és két periodikus (lapátosztásnyi távolságú, tehát pontosan megegyező sebességeloszlást mutató) áramvonal zárja. A lapátcirkulációt felírva a relatív rendszerben a lapátozás előtti és mögötti tangenciális átlagsebességekkel, és figyelembe véve, hogy a periodikus áramvonalakon a vonalintegrálok kiejtik egymást:

$$\Gamma = \oint_g \underline{w} \cdot d\underline{s} = t(w_{1u} - w_{2u}) = t \Delta c_u = \frac{2r\pi}{N} \Delta c_u = \frac{2r\pi}{N\rho u} \rho u \Delta c_u = \frac{2\pi}{N\rho\omega} \Delta p_{\text{oid}} \quad (7.10)$$



7.1. ábra. A lapátcirkuláció szemléltetése

7.1.1. Sugár mentén állandó ideális össznyomás-növekedésre (ÁLLANDÓ LAPÁTCIRKULÁCIÓRA) történő tervezés (Free vortex design)

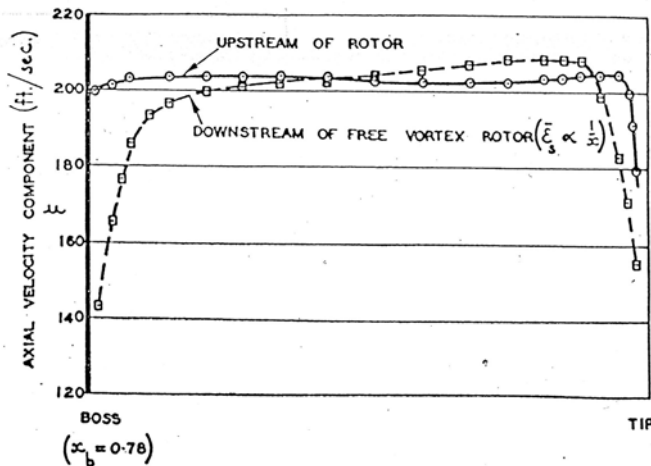
Klasszikus tervezési módszer.

A (7.9) egyenletbe behelyettesítve a sugár mentén állandó össznyomás-növekedés feltételét:

$$\frac{d(\Delta p_{\text{oid}})}{dr} = 0 \Rightarrow \rho c_{2a} \frac{dc_{2a}}{dr} = 0 \Rightarrow c_{2a}(r) = \text{áll.} \quad (7.11)$$

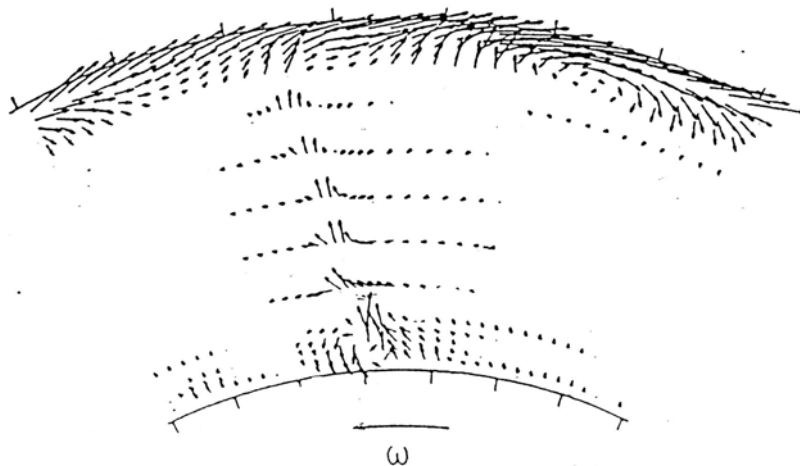
ELŐNYEI:

- Matematikailag könnyen kezelhető.
- A járókerékből kilépő közeg axiális sebessége a gyűrűkeresztmetszetben közel állandó (7.2. ábra). Ennek révén az axiális sebességprofil átrendeződésének megfelelő súrlódási veszteségek csökkenthetőek.



7.2. ábra. Free vortex járókerék előtt és mögött mért axiális sebességprofilok [10]

- Mivel a lapátcirkuláció a lapát magassága mentén állandó, nem jelennek meg a lapátvégről leúszó örvények. Ennek hatására a szekunder áramlási veszteségek minimalizálhatóak. Az áramlás a lapátcsatornában közel 2D marad, következetesen alkalmazhatóak a sík szárny- illetve szárnyrács-mérési eredmények a lapátózás tervezésekor (optimalizációjakor) (7.3. ábra).



7.3. ábra. Free vortex járókerék mögötti szekunder áramlási vektordiagram [20]

KORLÁTAI, HÁTRÁNYAI:

- Mivel

$$\Delta p_{oid}(r) = (\rho u \Delta c_u)(r) = \text{áll.} \quad (7.12)$$

Az agynál, ahol u a legkisebb, Δc_u maximális kell hogy legyen. Tehát a lapáttól éppen az agynál akarjuk a maximális irányeltérítést elvárni, ahol az agy és a lapáttó falsúrlódása a leválási veszélyt egyébként is fokozza. A lapáttó-leválás elkerülésére a lapáttónél megengedett tervezési $\frac{\ell}{t} c_f$ erőtenyezőt (ezen belül külön-külön az $\frac{\ell}{t}$ és c_f értékeket) korlátozni kell [2]. Ez korlátozza az agynál tervezhető Δp_{oid} értéket, ami a (7.12) értelmében korlátozza a teljes lapátmagasság mentén az előírható lapáatterhelést.

- Mivel a sugár mentén kifelé haladva u a sugárral egyenesen arányosan növekszik, (7.12) értelmében Δc_u hiperbolikusan csökken. Tehát éppen a nagy kerületi sebességgel forgó lapátmetszetektől várunk el kisebb terhelést: a lapátozás „kiterheltsége” mérsékelt.
- Fentiek értelmében állandó lapátcirkulációra történő tervezéssel mérsékelt fajlagos légtechnikai teljesítményű gépek alakíthatóak ki.
- Mivel a sugár mentén kifelé haladva az axiálssebesség közel állandó, de a kerületi sebesség nő, a sebességi háromszögek kifelé „megnyúlnak”, a lapátalak „belehajlik” a kerületi irányba. Tehát a lapátozás erősen csavarodik, és a kifelé mérséklődő terhelés miatt a lapáthúr is csökken. Ez gyártástechnológiai komplikációkat eredményezhet.

7.1.2. Sugár mentén változó ideális össznyomás-növekedésre (VÁLTOZÓ LAPÁTCIRKULÁCIÓRA) történő tervezés (Controlled vortex design, non-free vortex design)

Korszerűsített, a mai, nagy fajlagos teljesítményű (mérsékelt méretű és fordulatszámú) légtechnikai gépekre jellemző tervezési módszer.

Lakshminarayana [4]: "the myth that the free-vortex blading has the lowest losses has been replaced by a more systematic optimisation".

(MÁSRESZT: ez a tárgyalásmód csak a tervezési üzemállapotra vonatkozik! Csak a tervezési üzemállapotban működik úgy a gép, ahogyan terveztük.)

A sugár mentén növekvő ideális össznyomás-növekedést írunk elő a lapátmagasság domináns részén.

A kiadódó eloszlások ki kell hogy elégítsék az alábbi integrál-feltételeket:

Az axiális sebesség sugár menti alakulása meg kell hogy feleljen a tervezési térfogatáramnak:

$$q_V = \int_{d/2}^{D/2} c_{2a}(r) 2\pi r dr \quad (7.13)$$

Az axiális sebesség és az ideális össznyomás-növekedés meg kell hogy feleljen az átlagos tervezési össznyomás-növekedésnek:

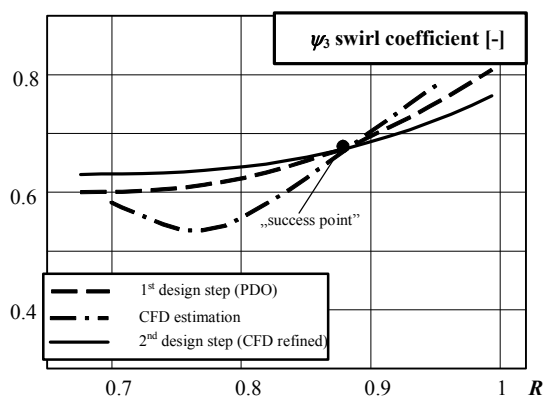
$$\overline{\Delta p_{\delta}} = \eta_h \frac{1}{q_v} \int_{d/2}^{D/2} \Delta p_{\delta id}(r) c_{2a}(r) 2\pi r dr \quad (7.14)$$

ELŐNYEI:

- A lapáttó terhelése mérsékelhető a lapáttó-leválás elkerülése érdekében.
- Ez nem vezet ahhoz a nemkívánatos tényezhez, hogy a nagyobb sugarakon lévő lapátmetszetek nincsenek megfelelően kiterhelve. A lapát a teljes magasság mentén hatékonyan kihasználható. Ennek eredményeként fokozható a gépek fajlagos légtéchnikai teljesítménye.
- Közel állandó lapátszögű, illetve állandó húr hosszú lapátozások tervezhetőek, ami gyártástechnológiai egyszerűsítést jelent.

KORLÁTAI, HÁTRÁNYAI:

- Matematikailag bonyolultabb kezelésmód \Leftrightarrow számítógépes tervezői szoftver! Bár a lapátcirkuláció előírására különféle kultúrák terjedtek el (pl. exponential design [4], lineáris cirkuláció-eloszlás, stb.), célszoftverrel TETSZŐLEGES, célirányos eloszlás előírható (7.4. ábra).



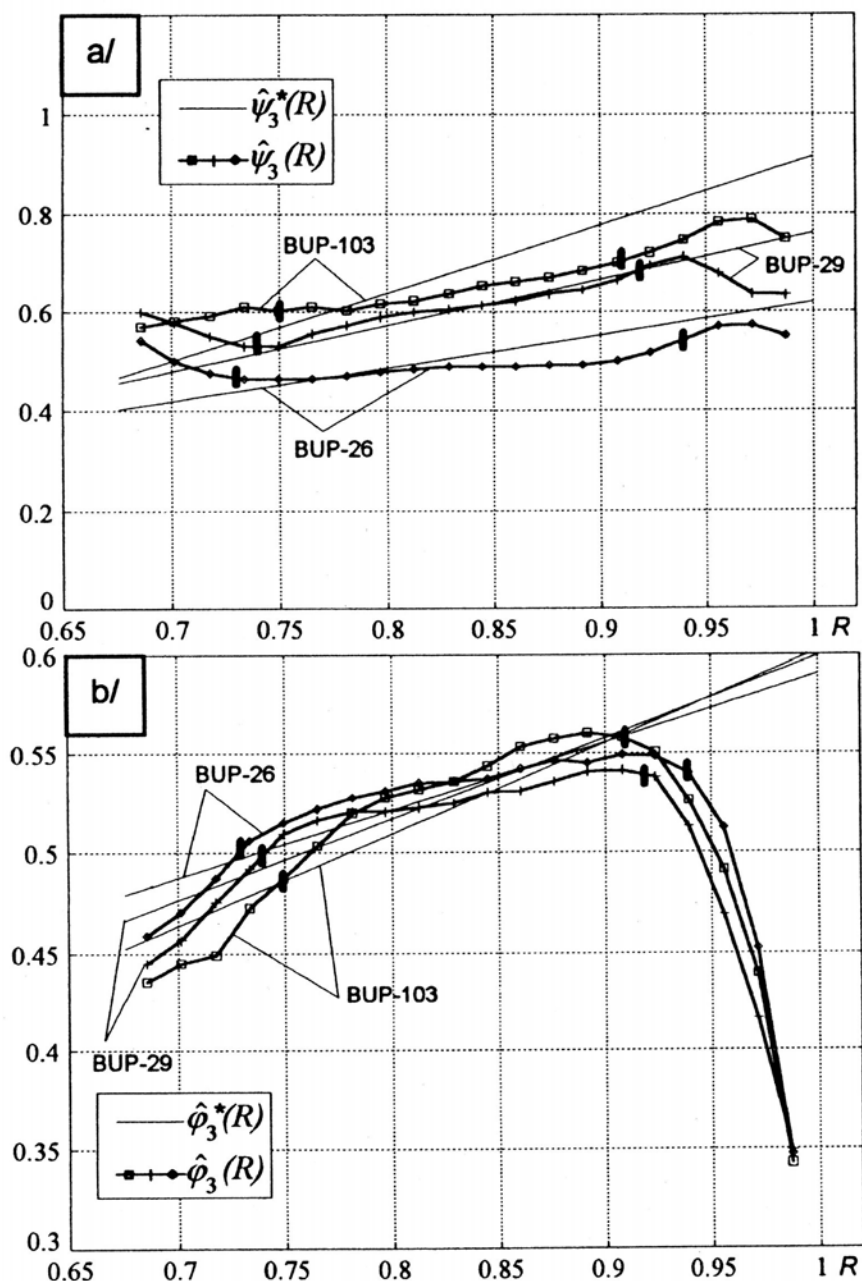
7.4. ábra. Tervezési lapátcirkuláció-eloszlások [19]

- (7.9) szerint

$$\frac{d(\Delta p_{\delta id})}{dr} \left[\eta_h - \frac{\Delta p_{\delta id}}{\rho u^2} \right] = \rho c_{2a} \frac{dc_{2a}}{dr} \quad (7.9)$$

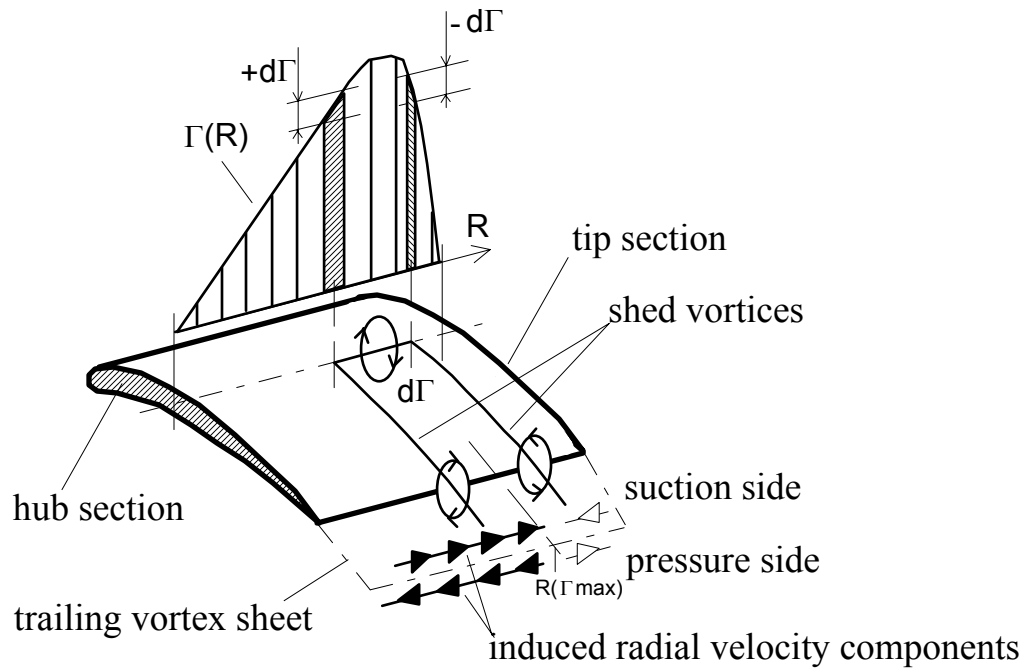
Sugár mentén növekvő ideális össznyomás-növekedéshez sugár mentén növekvő axiálsebesség tartozik (7.5. ábra). Ez azt jelenti, hogy az axiális sebességprofil a lapátsatornán belül átrendeződik. A lapátozás mögött a sebességprofil újbóli egyenletesedése a súrlódás révén következik be, tehát veszteségforrás. \Leftrightarrow Egyéb veszteségforrásokhoz, (pl. részvesztés) képest nem kritikus! Másrészt az agy mögött (ahol a gyűrűkeresztmetszet felbővül a csatornakeresztmetszetre) a súrlódás egyébként is jelentős veszteséget okoz.

Bizonyos esetekben, pl. kőágyúba [21] épített ventilátoroknál éppen hogy kedvező körülmény, hogy a külső kerületen az axiális sebesség fokozott. Ez ugyanis a külső kerületen bevezetett, diszpergált vízcseppek hatékonyabb továbbítását szolgálja.



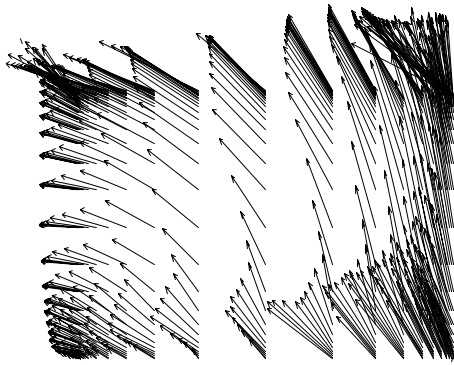
7.5. ábra. Járókerekek mért ideális össznyomás-növekedési és kilépő axiálsebesség-eloszlása [14]

- A változó lapátcikláció következtében a kilépő élről örvények úsznak le (7.6. ábra). Helmholtz 2. tétele [3] értelmében egy örvénycső nem fejeződhet be az áramló közegben: vagy zárt gyűrűt alkot, vagy az áramlási tér határáig ér. Így a lapátcikláció $d\Gamma$ mértékű növekedése (mely egy $d\Gamma$ ciklációjú, lapátmetszetre ágyazott elemi örvény „megjelenésével” szemléltethető) azzal jár együtt, hogy egy $d\Gamma$ erősségű örvény úszik le a kilépő élről, és a lapátforgás megindulásakor keletkező „indulási örvénybe” csatlakozik. A leúszó örvények 3D áramlást hoznak létre a lapátcsatorna belsejében (7.7. ábra). Emiatt a szekunder veszteségek fokozódnak, és a 2D szárny- illetve szárnyrácsméréseken alapuló tervezés közelítő jellege fokozottá válik. Ezért a korszerű tervezést 3D numerikus áramlástani (pl. FLUENT) szimuláció segíti.

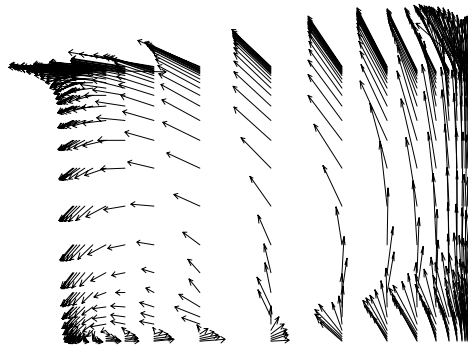


7.6. ábra. A kilépő élről leúszó örvények szemléltetése [22]

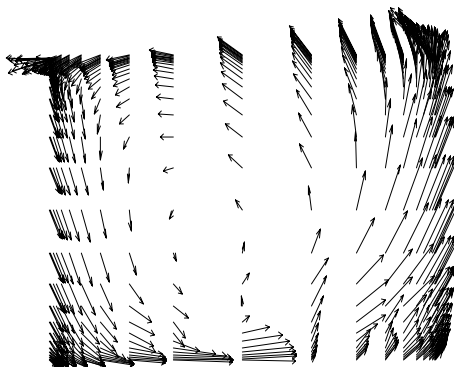
0.22 X:



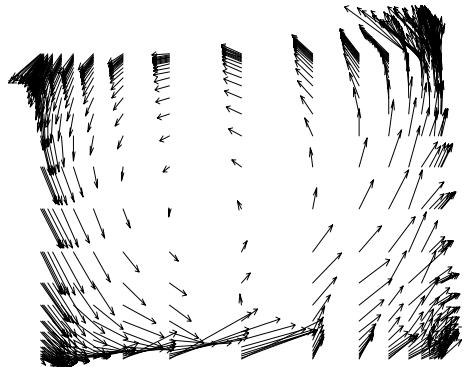
0.50 X:



0.78 X:



1.06 X:



7.7. ábra. A leúszó örvények által keltett 3D áramlás vektordiagramjai a forgástengelyre merőleges síkokban. X: dimenzióatlan axiális koordináta. X = 0: belépő él. X = 1: kilépő él [23]

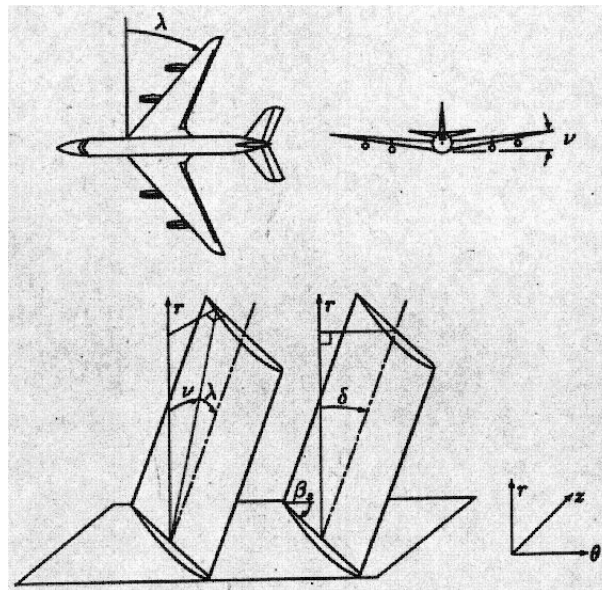
7.2. A lapát-felfűzési vonal kialakítása

7.2.1. Lapátmetszet-felfűzési technikák

Felfűzési vonal: az egyes sugarakon lévő lapátmetszetek súlypontjait összekötő görbe. Hagyományos kiképzésű lapátozásoknál közelítőleg radiális egyenes vonal („egyenes lapátozás”). Modern forgógépek - pl. légkondicionáló egységek ventilátorai, processzor-hűtőventilátorok, ipari és légiforgalmi kompresszorok és gázturbinák – lapátozásain ettől eltérő kialakítást találhatunk.

Radiálistól eltérő felfűzési vonal kialakítására a következő intézkedéseket tehetjük, a repüléstechnikában alkalmazott módszerek analógiájaként (7.8. ábra):

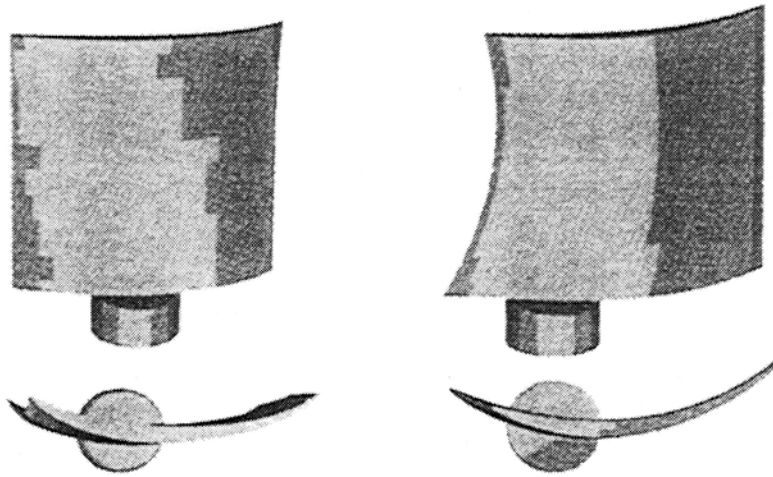
- Nyilazás (sweep, Pfeilung): a vizsgált lapátmetszetet a relatív áramlással párhuzamosan eltoljuk. Nyilazási szög: λ . Gyakran csak a belépő élre korlátozódik (lásd később).
- V-állás (lean, dihedral, V-Stellung): a vizsgált lapátmetszetet a relatív áramlásra merőlegesen eltoljuk. V-állási szög: ν
- Ferdítés (skew, Krümmung, Sichelung): a kettő kombinációja.



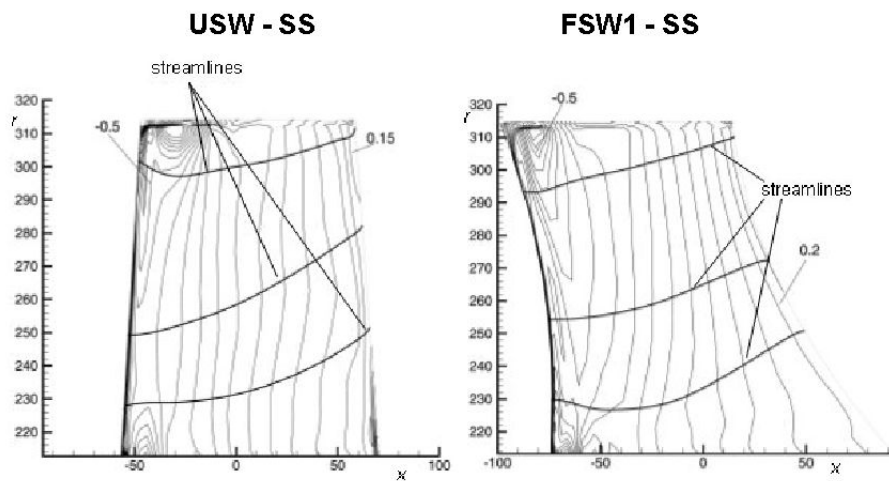
7.8. ábra. Nyilazás, V-állás [24]

További fogalmak:

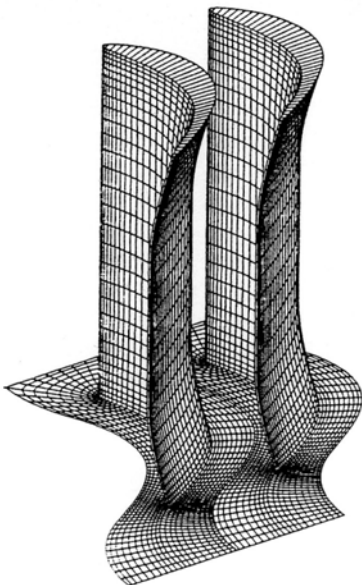
- Pozitív nyilazás: a vizsgált lapátmetszet áramlás irányában előrébb van, mint a rákövetkező, gyűrűfaltól (agytól vagy csatornafaltól) távolabbi lapátmetszet (7.9. ábra).
- Előrenyilazás (forward sweep): a nagyobb sugáron lévő lapátmetszet áramlás irányában előrébb van, mint a kisebb sugáron lévő (7.10. ábra).
- Pozitív V-állás: a végfal és a lapát szívott oldala tompaszöget zár be egymással (7.11. ábra).
- Kerületi irányú előreferdítés (circumferential forward skew): a lapát felfűzési vonalát tangenciális irányban a forgás irányában ferdítjük (7.12. ábra).



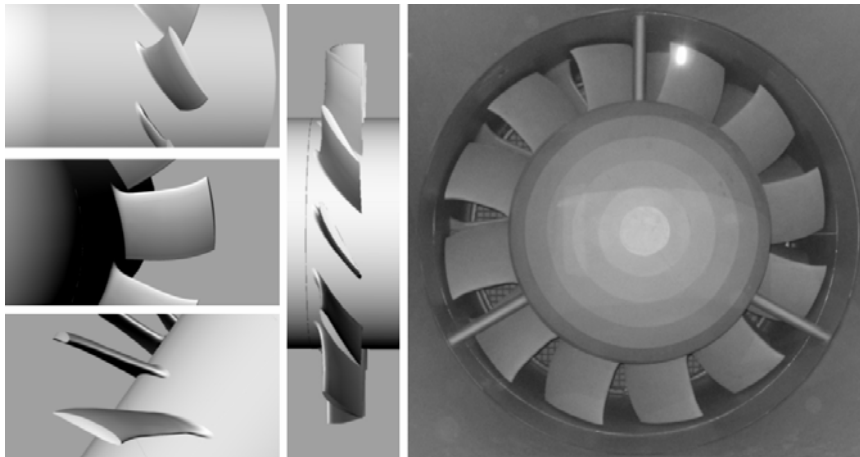
7.9. ábra. Kompresszor-lapát nyilazatlan valamint mindkét gyűrűfal közelében pozitív nyilazású belépő éllel [25]



7.10. ábra. Nyilazatlan és előrenyilazott lapát. CFD összehasonlítás [15]



7.11. ábra. Járókerék-lapátok mindkét gyűrűfal közelében pozitív V -állással [26]



7.12. ábra. Az Áramlástan Tanszék által kifejlesztett szélcsatorna-járókerék, kerületi irányú ferdítéssel [27]

7.2.2. Kedvező hatások

A/ Pozitív nyílazás és/vagy pozitív V-állás a gyűrűfalak közelében: veszteségek csökkentése, hatásfok-javítás

- Mérsékli a falközeli lapátmetszetek terhelését.
- A lapáatterhelés a kilépő él felé tolódik el.

Ezáltal mérsékelhető a gyűrűfalak közelében a nyomott és a szívott oldalak közötti nyomásgradiens.

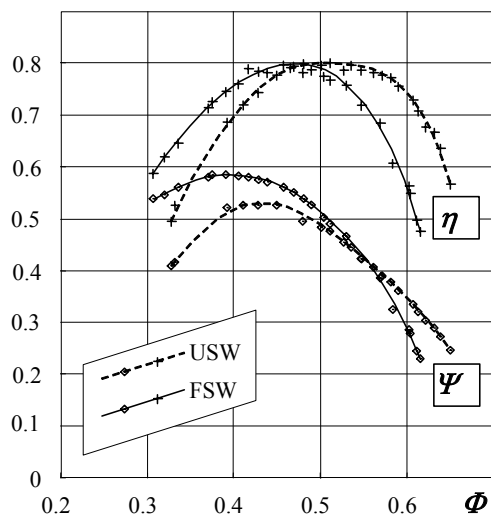
- Ez a szekunder áramlásokat valamint
- A lapáttól leválási hajlamát mérsékli,
- A légrés-áramlás és a hozzá kötődő veszteségek is mérséklődnek.

B/ Előrenyílazás: össznyomás-csúcs fokozása, leválásmentes üzemállapot-tartomány kiterjesztése.

A szívott oldali határrétegben a fokozott sűrűdési veszteségekkel rendelkező közeg radiálisan kifelé áramlik. Ez a hatás fokozottan érvényesül fojtott üzemállapotban. A kisodródó közeg pangó zónát alkot a lapátcsúcsnál és a teljes lapátcsatornában kedvezőtlenül teszi az áramlási viszonyokat. Szélsőséges fojtásnál a pangó zóna a teljes lapátcsatornát blokkolja és a jellegzőbe letörik („leválás határa”).

Előrenyílazás révén a pangó közegrész ki tud ürülni a lapátcsatornából. Így a „leválás határa” nagyobb össznyomás-csúcsnál, kisebb térfogatáramon (nagyobb fojtás) jelentkezik (7.13. ábra).

A kerületi irányú előferdítéssel ugyanezek a kedvező hatások elérhetőek anélkül, hogy a járókerék axiális irányú kiterjedése nemkívánatos módon megnőne. Szilárdságilag is kedvezőbb, mint az előrenyílazás.



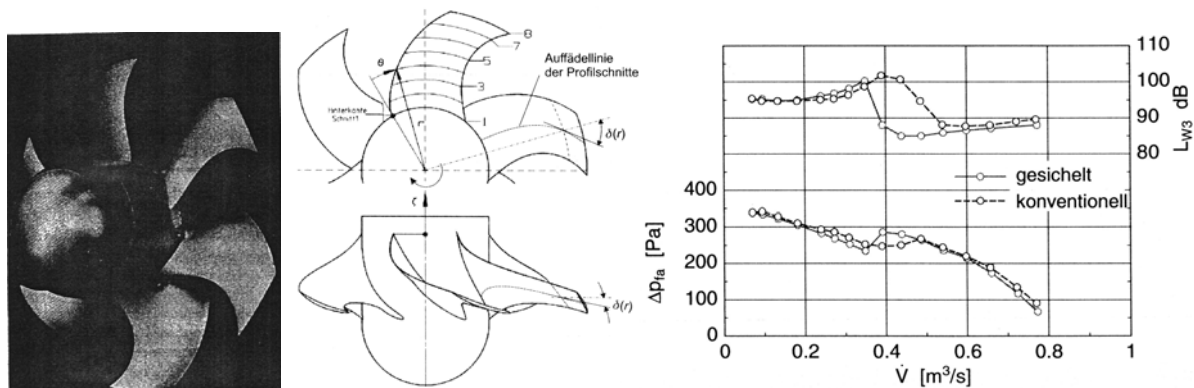
7.13. ábra. Nyilazatlan (unswept, USW) és előrenyilazott (forward swept, FSW) lapátok összehasonlító mérése [17]

C/ Nyilazás: lökeshullám-veszteségek mérséklése

Ventilátoroknál nem, de kompresszoroknál (transzonikus kompresszorok) jelentkeznek lökeshullám-veszteségek. A szívott oldalon a helyi sebesség elérheti a hangsebességet (mint a repülőgépek szárnyának szívott oldalán is). Nyilazás révén a felfűzési vonalra merőleges sebességkomponenst hangsebesség alatt tudjuk tartani, miáltal a lökeshullám-veszteségek elkerülhetőek.

D/ Nyilazás, kerületi ferdítés: zajcsökkentés

A ferde kilépő él révén a mozgó lapátok mögötti elemek, (pl. utóterelő lapátok, tartóborda, stb.) és a járókerék egymásrahatás-zaja mérsékelhető (az „egyidejű” gerjesztés helyett időben elnyújtott gerjesztés adódik). 7.14. ábra.



7.14. ábra. Sarló alakú („gesichert”, előrefordított) lapátok és a mért légtéchnikai valamint akusztikai jelleggörbék: összehasonlítás hagyományos („ungesichert”) lapátokkal [24][28]