

1. ábra. A Magyar Honvédség egyik H145M helikoptere (Forrás: [2]; Airbus)



Varga Béla\*

# Az Arriel 2E turboshaft hajtómű, a megbízható erőforrás

## A Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program helikopterbeszerzései

**A**z ezredforduló után a Magyar Honvédségben hosszú ideig kritikusan alacsony volt az üzemképes helikopterek száma, hiszen a Mil Mi-24-esek ipari nagyjavításukra várva hosszú pihenőre kényszerültek, a Mil Mi-8/Mi-17 típusú helikopterek sok esetben az alkatrészek hiánya miatt vesztegeltek. Ezen felül a NATO-csatlakozással megváltozott a magyar légierővel és ezzel együtt a helikoptercsapatokkal szemben támasztott feladat- és követelményrendszer is. Örömteli azonban, hogy a Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program keretében a helikopteres képességek szempontjából jelentős előrelépés történt. 2018-ban befejeződött a Mil Mi-24 helikopterek nagyjavítása és reaktiválása, valamint a Mil Mi-17 helikopterek ipari szintű javítása is megtörtént. Ugyanakkor – a program ütemezett

végrehajtásának megfelelően – a Magyar Honvédség 20 darab könnyű, többcélú, Airbus H145M típusú (1. ábra), valamint 16 darab H225M típusú közepes, többcélú helikopter beszerzéséről döntött, amelyek közül az előbbi már rendszeresítésre is került.

Ezek a légi járművek a legmodernebb helikopterek közé tartoznak. Korszerű technikájuk a fejlett avionikai rendszerekben, a kivételes képességű HForce-fegyverrendszerben, a fedélzeten lévő precíziós repülésvezérlő és navigációs berendezésekben, valamint szenzorokban rejlik. Mindezek a modern eszközök digitális interfészekon keresztül, folyadékkristályos kijelzők segítségével segítik a helikopter személyzetét a feladatok végrehajtásában. A helikopter a kor legmodernebb alapanyagaiból épül, amelyek nem nél-

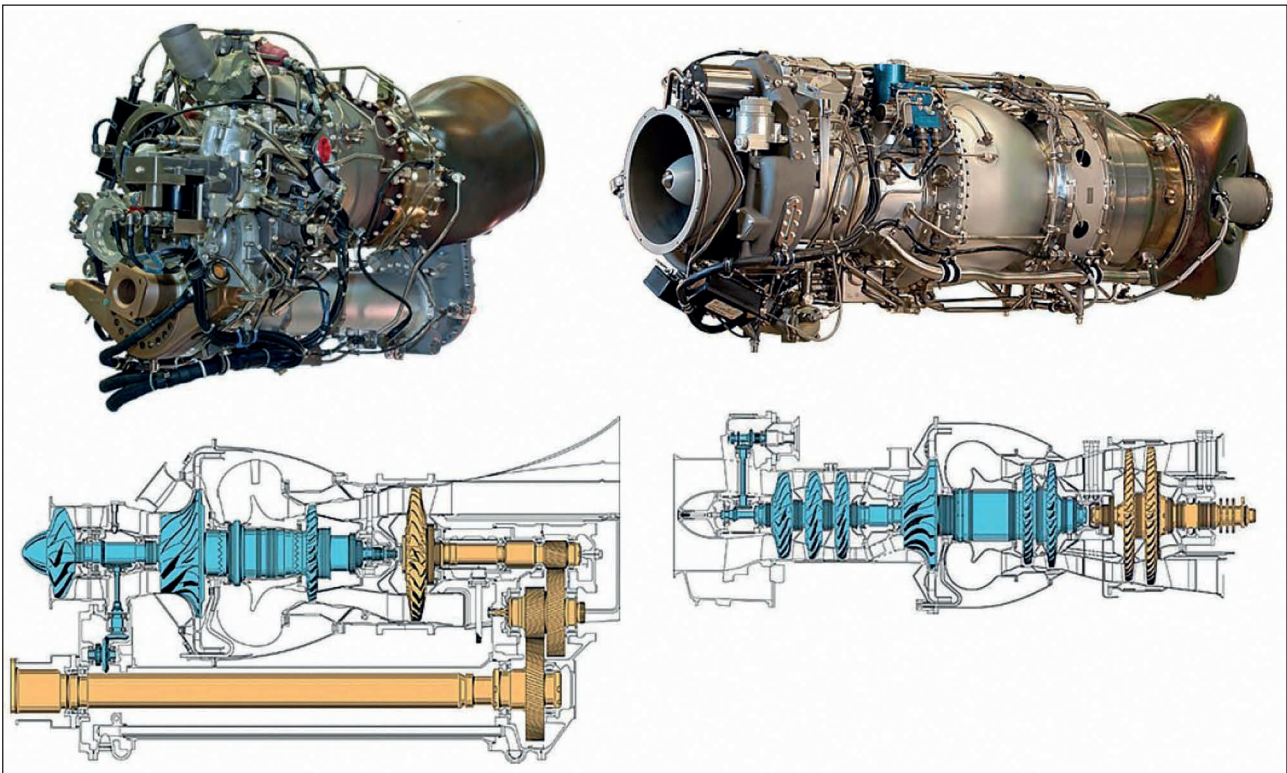
**ÖSSZEFOGLALÁS:** A Magyar Honvédségben befejeződött a H145M helikopterek rendszeresítése. A helikopter új technológiai színvonalat képvisel a korábbi helikopterállományhoz képest. A legkorszerűbb technológia érvényes a beépített Arriel 2E hajtóművekre is, amelynek vizsgálata a jelen tanulmány tárgyát képezi.

**KULCSSZAVAK:** helikopter, H145M, turboshaft hajtómű, Arriel 2E

**ABSTRACT:** The introduction of H145M helicopters in the Hungarian Defence Forces has been completed. The helicopter represents a new level of technology compared to the previous helicopter fleet. This is also true for the built-in Arriel 2E turboshaft engines, whose examination is the subject of this paper.

**KEY WORDS:** helicopter, H145M, turboshaft engine, Arriel 2E

\* Alezredes (PhD), egyetemi docens, NKE HHK Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék. ORCID: 0000-0003-3454-0825



2. ábra. A bal oldalon az Arriel 2E, a jobb oldalon a Makila 2A1 hajtóművek külső és metszeti képei láthatók (A szerző szerkesztése a [3] alapján)

külözik többek között a kompozit anyagokat sem. [1] Mindkét kéthajtóműves helikopterbe a Safran Helicopter Engines cég hajtóműveit (Arriel 2E, illetve a Makila 2A1) építették be, amelyek kétszatornás, teljes körű digitális hajtómű-szabályozással (Full Authority Digital Engine Control – FADEC) rendelkeznek. A 2. ábrán képek és szemantikuss ábrák mutatják a napjainkban alkalmazott korszerű helikopter-hajtóművek jellegzetes kialakításait.

Az Airbus helikopterek beszerzése, illetve rendszerbe állítása hosszú időre megoldhatja a Magyar Honvédség helikopterképességének megtartását.

### TURBOSHAFT HAJTÓMŰVEK MEGJELENÉSE A REPÜLÉSBEN

A gázturbinás hajtóművek az 1950-es évektől – a kisépés repüléstől eltekintve – repülőgép propulziós rendszereként egyeduralmukodókká váltak. Az 1940-es és '50-es évek fordulóján a turboshaft hajtóművek is megjelentek a repülésben, amely kategóriába a csak kifejezetten tengelyteljesítményt adó gázturbinák tartoznak. A magyar műszaki szaknyelvben ennek a hajtómű-kategóriának a megnevezésénél találkozhatunk a legnagyobb bizonytalansággal. A magyar terminológiában erre a berendezésre talán ma nincs is olyan jellemző megnevezés, mint a fentebb már említett angol „turboshaft engine”, vagy az orosz „турбовальный двигатель”. A „(turbó)tengelyes gázturbina” elnevezés lehet vitatható, bár a „turbólégcsavaros hajtómű”, „turboprop engine” és „турбовинтовой двигатель” elnevezések analógiájára elfogadható lehet. Ennek ellenére az angol kifejezés elterjedtebb ismerete miatt továbbiakban a turboshaft, vagy a gázturbinás helikopter-hajtómű kifejezést használom. Megjegyzendő, az előbbi szélesebb kört takar, mivel a turboshaft-ok a repülésben először, mint APU – Auxiliary Power Unit (200–600 kW teljesítményű

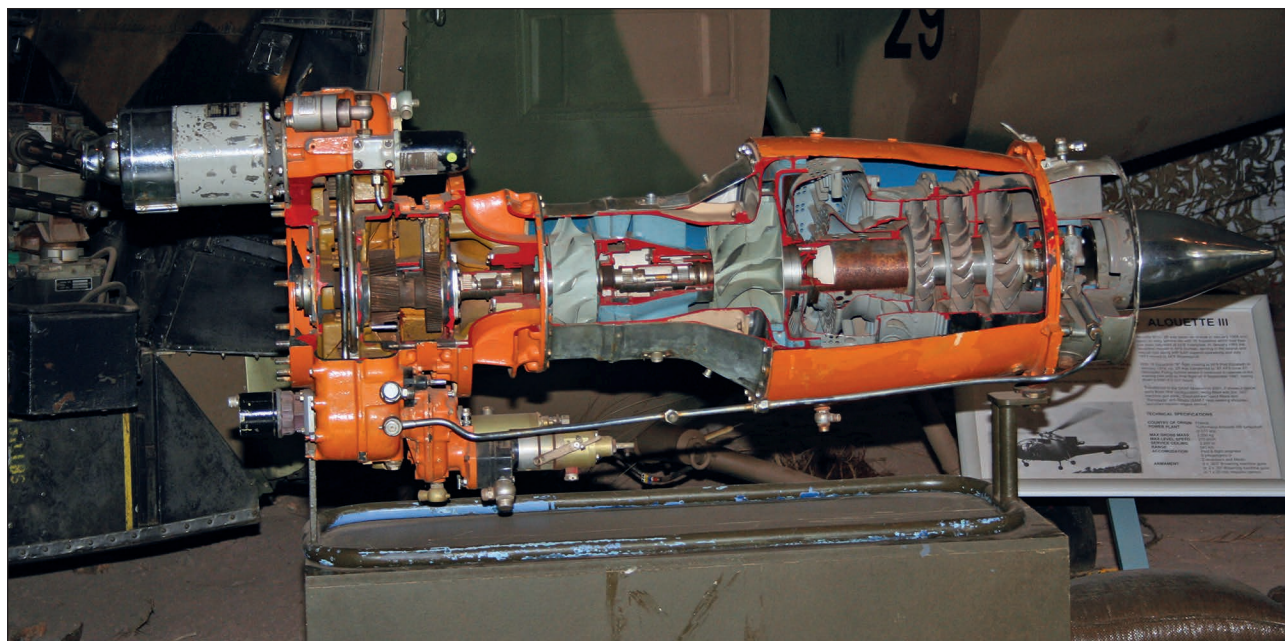
segédhajtóművek) jelentek meg, amelyeknek a feladata a repülőgépek fő hajtóműveinek indítása, a fedélzeti elektromos energiarendszer táplálása, és a légkondicionáló rendszer levegővel történő ellátása volt. Ebbe a csoportba tartoznak még a hajók erőforrásaiként alkalmazott, nagy teljesítményű gázturbinák (15–25 MW), vagy az azoknál is nagyobb teljesítményű ipari gázturbinák is.

Megjegyzendő, hogy a turbólégcsavaros (turboprop) és a turboshaft hajtóművek között jelentős a szerkezeti hasonlóság. Több gyártónál egy adott típusnak létezik „turboprop” és „turboshaft” változata is. Két alapvető különbség mégis van a két kategória között. Az egyik, hogy a légcsavaros gázturbinák esetében általában – kivéve a turbólégcsavaros katonai kiképző repülőgépek (pl. CT–156 Harvard, vagy Pilatus PC–9) hajtóműveit – a gáz energiájának egy része a fúvócsőben hasznosul, biztosítva ezzel a toló(vonó)erő 10–15%-át. A fúvócső helyett egy további turbinafokozat beépítésével, vagy a turbina modifikációval elérhető, hogy a munkaközeg energiájának ez a fennmaradó része is tengelyteljesítményként hasznosuljon. A másik különbség, hogy a légcsavaros gázturbina esetében a légcsavar és a közlőmű szerkezetiileg a hajtómű részét képezi, és a légcsavaron keletkező vonóerő a hajtóművön, illetve annak bekötésein keresztül adódik át a sárkányszerkezetre. Gázturbinás helikopter-hajtóművek esetében a közlőmű szerkezetiileg a sárkányhoz kapcsolódik, és a vonóerő ezen keresztül nem a hajtóműre, hanem közvetlenül a sárkányra adódik át.

A helikopterekben alkalmazott gázturbinák első típusa 1950-ben a Turbomeca Artouste hajtómű volt, amely szintén eredetileg segédhajtóműnek készült. (3. ábra)

A hajtómű 210 kW tengelyteljesítményre volt képes, és számos helikopter típusba beépítésre került, például az Aérospatiale Alouette II, az Aérospatiale Alouette III, az Aérospatiale Lama, az Aerotécnica AC–14, az Atlas XH–1





3. ábra. Turbomeca Artouste, az első, helikopterben alkalmazott gázturbina metszete [4]

Alpha, az IAR 317 típusokba, valamint segédhajtóműként beépítették különböző típusú repülőgépekbe is, többek között a Handley Page Victor, a Hawker Siddeley Trident és a Vickers VC10 típusokba. [4]

Láthatóan a francia tervezők élen jártak az innovációban az új helikopter-erőforrások fejlesztésében, de az 1950-es évek második felében a helikopterek „nagykorúvá” válásával, amikor esetükben is szorítóvá vált a viszonylag kis teljesítményű és nehéz, dugattyús motorok leváltása, a helikopterek és a turboshaft hajtóművek végleg egymásra találtak. Ez alól csak a könnyű helikopterek egyes típusai (pl. Robinson) kivételek, ahol megmaradtak a dugattyús hajtásnál.

Természetesen ezt a területet rövidesen a legtöbb hajtóműgyártó megcélozta, és manapság 10-12 gyártó uralja a piacnak ezt a szegmensét, amelyből a Safran Helicopter Engines, a Safran cégcsoport tagja – korábban Turbomeca – jelentős szezletet képvisel. A cég kis és közepes kategóriában 8 féle helikopter-hajtómű típust, illetve azok számtalan változatát gyártja az Arrius 2R-től (376 kW) az Aneto-1K-ig (1864 kW), beleértve a 2. árán látható Arriel 2E és Makila 2A1 hajtóműveket is. A vállalat emellett szárazföldi, ipari és tengeri alkalmazásokhoz is gyárt gázturbinás repülőgéphajtóműveket és rakétahajtóműveket, valamint turbinákat. Az 1938-as megalapítása óta a Turbomeca, illetve 2001 óta a Safran Helicopter Engines több mint 72 000 gázturbinát gyártott. [3]

### Az ARRIEL 2E RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ADATAI

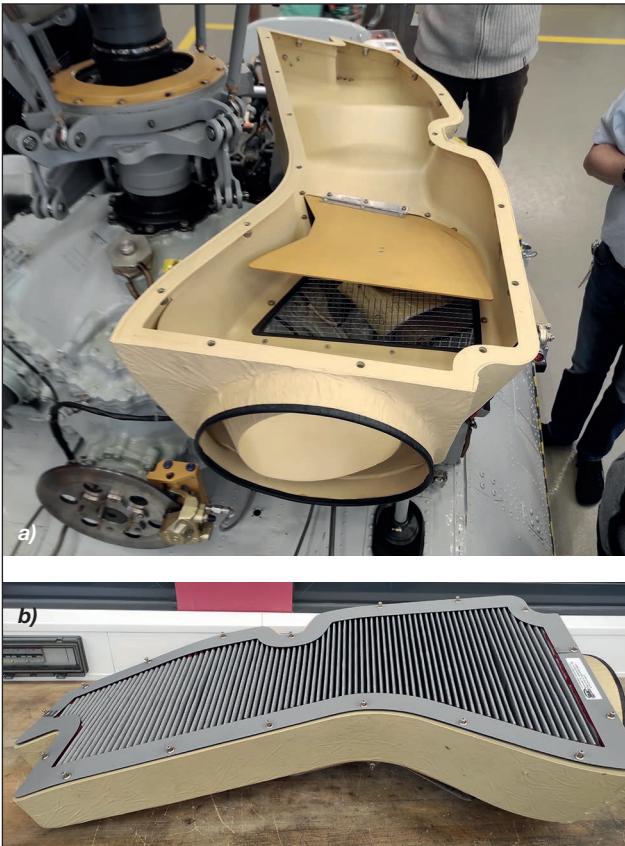
A jellemző hajtóműadatok megjelenítésénél az 1. táblázat jobb oldali oszlopában a helikopter hajtóművekre kategóriáktól független, általánosan jellemző adatok olvashatók, amelyek segítségével az Arriel 2E hajtóművet könnyebb elhelyezni a gyártó termépalettáján.

Az Arriel 2E hajtómű tengelyteljesítménye a gyártó adatai alapján 666 kW, amely alapján még a kis hajtómű kategóriába (200–800 kW) tartozik. A H145M típusú helikopterbe beépítve, kéthajtóműves elrendezésben ezt a teljesítményt a gyártó tovább korlátozta 445 kW-ra. Ez a korlátozás valószínűleg megjelenik a hajtómű élettartam-növekedésé-

1. táblázat. Az Arriel 2E hajtómű adatai

(A szerző szerkesztése az [5], [6], [7], [8] alapján)

| Hajtóműjellezők  | Turboshaft hajtóművek | Arriel 2E |
|--|-----------------------|-----------|
| Tengelyteljesítmény [kW]   | 200–3700              | 666       |
| Kompresszor-nyomásviszony [–]  | 7–16                  | 8,5       |
| Levegőfogyasztás [kg/s]  | 2–15                  | 2,71      |
| Turbina előtti gázhőmérséklet [K]  | 1100–1500             | 1398      |
| Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás [kg/kWh]                                   | 0,25–0,43             | 0,329     |
| Termikus hatásfok [%]  | 20–32                 | 25,3      |
| Fajlagos hasznos munka [kJ/kg]   | 160–310               | 246       |
| Hajtómű tömege [kg]  | 80–400                | 139,2     |
| Fajlagos teljesítmény [kW/kg]  | 3–8                   | 4,78      |
| A H145M helikopter hajtóműadatai   |                       |           |
| Maximális felszállóteljesítmény [kW]                                       |                       | 445       |
| Egy hajtómű üzemképtelensége esetén folyamatos teljesítmény [kW]           |                       | 490       |
| Egy hajtómű üzemképtelensége esetén 2 percig tartó teljesítmény [kW]       |                       | 630       |
| Egy hajtómű üzemképtelensége esetén 30 másodpercig tartó teljesítmény [kW] |                       | 753       |
| A gázgenerátor egység fordulatszáma (100%) [f/perc]                        |                       | 52 110    |
| A szabadturbina fordulatszáma [f/perc]                                     |                       | 39 159    |
| A főreduktor-meghajtótengely fordulatszáma [f/perc]                        |                       | 6000      |



4. ábra. IBF szűrőház a) és szűrőbetét b) (Fotó: Varga Béla)

ben is a turbina előtti gázhőmérséklet csökkenése miatt, amely azonban – minden bizonnyal – a termikus hatásfoknak a táblázatban megjelölt értékhez képesti 2–3%-os csökkenésével, illetve a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás növekedésével jár. Sajnos a gázturbinák egyik jellegzetesége, hogy részüzemmodon (a csökkenő turbina előtti gázhőmérséklet miatt) a termikus hatásfokuk csökken. A kompresszor-nyomásviszony<sup>1</sup> meglehetősen alacsony. Még ebben a kategóriában is ennek az értéke általában 10 feletti. Erre a témára a hajtómű általános értékelésekor még visszatérünk, de valószínű, hogy a gyártó nem kívánt változtatni a jól bevált elrendezésen, így ezzel a konfigurációval magasabb nyomásviszony nem érhető el. [9] A 2,71 kg/s levegőszállítás 246 kJ/kg fajlagos hasznos munkát eredményez. A turbina előtti gázhőmérséklet meglehetősen magas, különös tekintettel a nyomásviszony re-

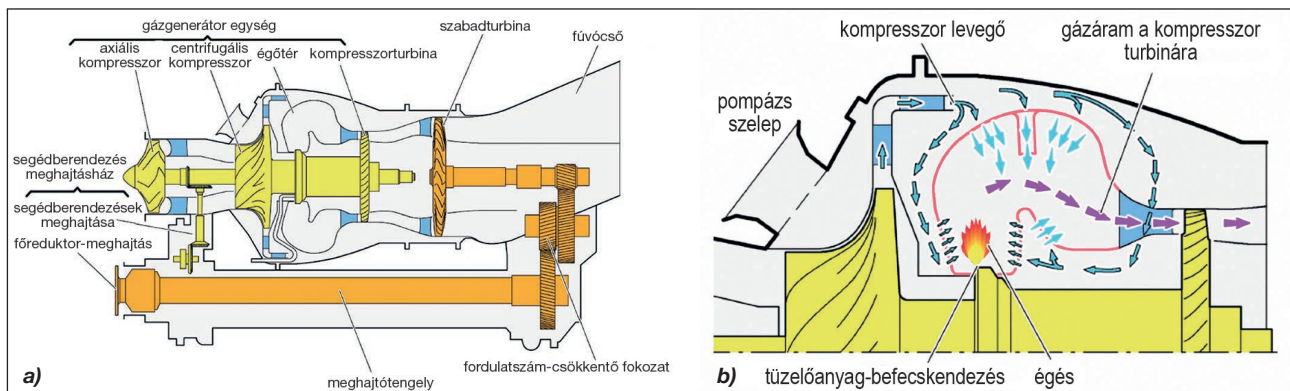
latíve alacsony értékére. A két értéknek ugyanis bizonyos tekintetben együtt kell mozognia, ennek megfelelően ez a gázhőmérséklet magasabb nyomásviszonyt indokolna, ahogy az a 10. ábrán látható. A fentiek alapján érthető, hogy az Arriel 2E az egyhajtóműves repüléshez szükséges 490 kW-os teljesítményt minden nehézség nélkül képes folyamatosan tartani. A 30 másodperces egyhajtóműves repülés 753 kW igénybevétele nagyon korlátozott a turbina extra hőterhelése miatt. A teljesítmény beállításához szükséges szabályozási feladatokat a FADEC-rendszer rendkívül gyorsan képes kezelni. Valószínűleg ebben az utóbbi esetben a 30 másodperces időtartamra – mintegy 50–60 K-nel – még a maximális 1398 K fölé is engedi növekedni a turbina előtti gázhőmérsékletet.

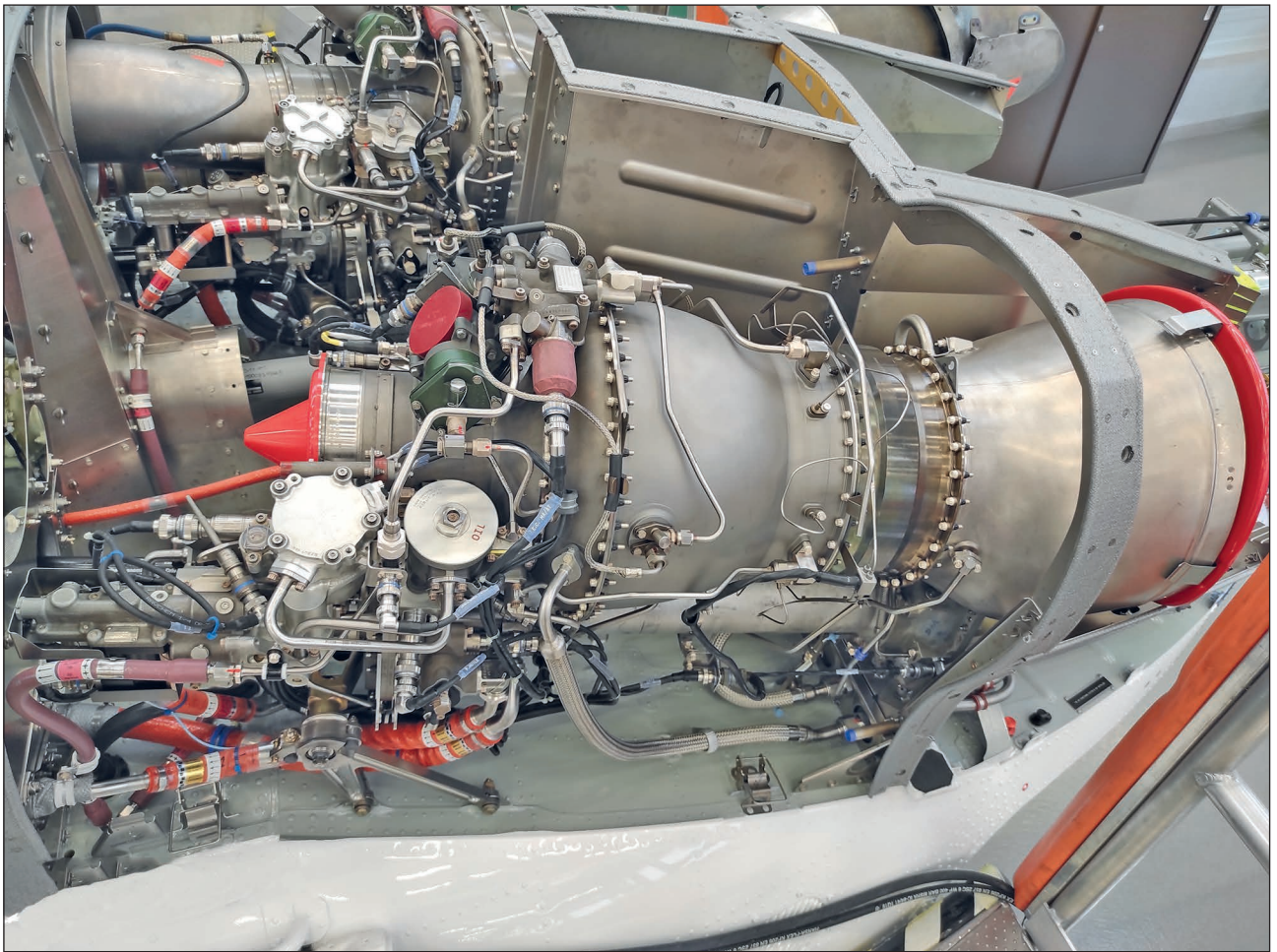
### A HAJTÓMŰ ÁLTALÁNOS FELÉPÍTÉSE

A hajtómű szívócsatornájába egy nagy méretű IBF – Inlet Barrier Filter (levegőszűrő) (4. ábra) kerül beépítésre. A berendezés, a beáramló levegő aktuális szennyezettségének függvényében 1-2%-os teljesítményvesztést okoz. Valamilyen típusú porkiválasztó rendszer alkalmazását ma-napság minden gyártó felvállalja, mert annak elmulasztása – különösen poros környezetben – súlyosan csökkenti a hajtóművek élettartamát, a károsodás előtt pedig a hatásfokát. A szűrő szennyezettségi állapotáról a személyzet a pilótafülkében visszajelzést kap. Hirtelen állapotromlás (eltömődés) esetén a 4. a) ábrán látható, nagy méretű megkerülő szelep nyit, biztosítva a hajtómű levegőellátását.

A szívócsatorna után a levegő beáramlik az egyfokozatú axiális kompresszorba, majd a centrifugális kompresszorba. A tüzelőanyag a gyűrűs égőtérben centrifugális befecskendező keréken keresztül jut az égőtérbe. Ez a megoldás meglehetősen egyedi, de úgy tűnik a francia tervezőknél ez egy bevált technikai mód. Az 5. ábrát összehasonlítva a 3. ábrával, az Arriel 2E általános szerkezeti felépítése nagy hasonlóságot mutat a Turbomeca Artouste hajtóművel (1950). Az égőtér után a magas hőmérsékletű égéstermék tovább áramlik a kompresszorturbinára, majd a szabadturbinán át közel környezeti nyomásra expandálva, a gázvezető rendszeren keresztül elhagyja a hajtóművet. A szabadturbinára a kompresszorturbinával csak gázdinamikai kapcsolatban van (a közös munkaközeg miatt). A hajtóművel egybeépített első fordulatszámcsökkentő fokozat a 39 159 f/perc fordulatszámot 6000 f/perc értékre csökkenti. Innen egy csőburkolattal védve megy előre a hajtás a segédberendezés meghajtásházon keresztül, amely egyben a hajtómű mellső támaszát is képezi. Ugyanitt helyezték el a nyomatókmérő referenciatengelyét is.

5. ábra. A hajtómű fő szerkezeti egységei a) és kapcsolódásuk b) (A szerző szerkesztése a [10] alapján)





6. ábra. Arriel 2E elhelyezése a hajtóműtérben (Fotó: Varga Béla)

A segédberendezések – az olaj- és tüzelőanyag-szivattyúk, a 28,5 V-os váltóáramú generátor, az olajrendszer centrifugális levegőkiválasztója, a fordulatszámadó fogaskereke – a gázgenerátor egységtől kapják a meghajtást, illetve azon keresztül kapcsolódik a hajtóműhöz az indítómotor-generátor is. Bár a két hajtás itt egy házon belül található, semmilyen mechanikai kapcsolat nincs köztük. [10]

### HAJTÓMŰVEZÉRLŐ RENDSZER (FADEC)

A hajtóműveket kétcsatornás FADEC-rendszerrel szerelik fel. A számítástechnika fejlődésével lehetőség nyílt a digitális jelek gyors és sokoldalú feldolgozására, amely egyben a szabályozás lehetőségeinek határait is kiterjesztette. Az 1980-as, '90-es évektől ezek a rendszerek felváltották a hidromechanikus és analóg elektronikus vezérlőrendszereket. A FADEC-rendszer általában szerves részét képezi a repülőgépek digitális adatrendszerének is, elektromos (digitális és analóg) jelek formájában kommunikálva a repülőgép (helikopter) más rendszereivel. Az ilyen módon kialakított szabályozás magasfokú érzékenységgel, pontossággal és nagy teljesítőképességgel rendelkezik, és ezek segítségével a hajtómű teljesítményének, illetve hatásfokának rendkívül kedvező értékei érhetők el.

A FADEC-rendszer ebben az esetben is a tüzelőanyag-mennyiségének változtatásával a repülési állapot követelményeihez igazítja a hajtómű teljesítményét. Ezzel egyidejűleg az összes korlátozást felügyeli, a túllépéseket jelzi és tárolja. A rendszer legfontosabb része az EECU – Engine

Electronic Control Unit (a hajtómű elektronikus vezérlőegysége), amely hajtóművenként egy-egy kétcsatornás, a helikoptertörzsben elhelyezett vezérlő-számítógépet jelent.

Az EECU-nak biztosítani kell a következő fő követelményeket:

- Indítás, indítás-megszakítás, újraindítás, hideg átfogatás vezérlése;
- Pompázs<sup>2</sup>, tranzien্স kontroll, stabilitás biztosítása;
- A forgószárny fordulatszámának/szabadturbina fordulatszámának (N2) fenntartása minden üzemi körülmény között a helikopter forgószárnyának fordulatszám-szabályozási programja szerint;
- A nyomaték korlátozása (a hajtáslánc mechanikai védelme érdekében);
- A gázgenerátor fordulatszámának (N1) korlátozása, az N1 fordulatszám szabályozása egyhajtóműves üzemben, a minimum N1 fordulatszám határolása a hajtóműléállás és a kritikus fordulatszám elkerülése érdekében;
- A TOT – Turbine Outlet Temperature – (turbina kilépő gáz hőmérséklet) korlátozása (a hajtómű forróterét, főként a turbina védelme érdekében);
- A terhelés megosztása, mindkét hajtómű egyenlő terhelésének biztosítása.

A EECU elektromos táplálása létfontosságú, mert ellenében a hidromechanikus rendszerekkel, elektromos táplálás nélkül a hajtómű teljesen működésképtelen. Ennek megfelelően redundáns elektromos táplálással rendelkezik. Az EECU elektromos táplálása a gázgenerátor (N1) fordulatszámától függ. A hajtómű indításakor 61%-os (N1)

alatt, vagy a generátor meghibásodása esetén, repülés közben az EECU a helikopter elektromos rendszeréből kapja a táplálást. 61% (N1) felett, normál üzemben az áramellátást az adott hajtómű generátora biztosítja [10].

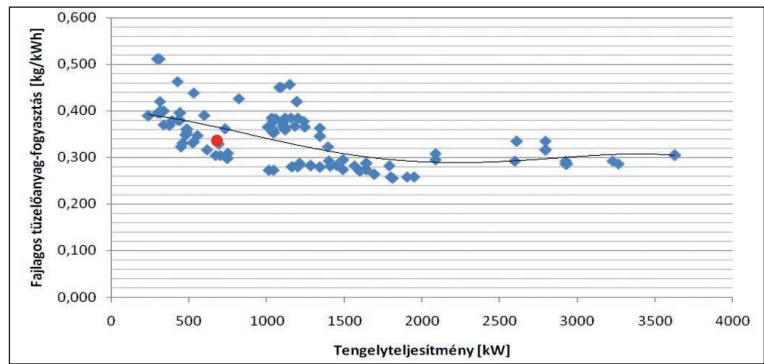
### Az ARRIEL 2E HAJTÓMŰ ÉRTÉKELÉSE

A hajtóművek értékelésénél sok tényezőt kell figyelembe vennünk. Ezek közé tartozik a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás (teljesítményegységre eső tüzelőanyag-fogyasztás), a fajlagos hasznos munka (tengelyteljesítmény és a hajtómű tömegáramának viszonyozása), a fajlagos teljesítmény (a tengelyteljesítmény és a hajtómű tömegének viszonyozása), a megbízhatóság, üzemeltethetőség, amelyek természetesen kihatással vannak a helikopterek harcászati-technikai jellemzőire is.

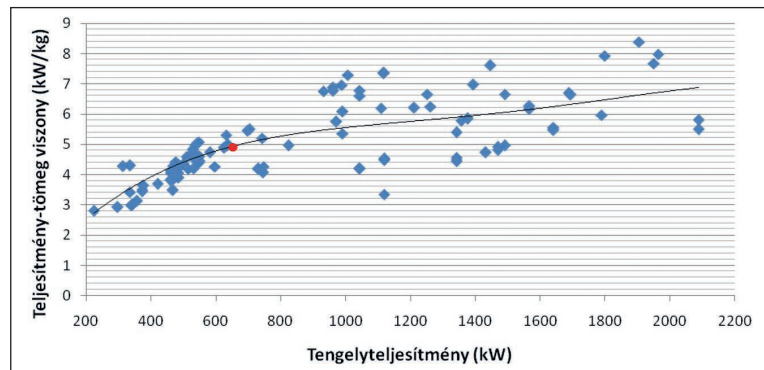
Ha értékelni szeretnénk az Arriel 2E hajtóművet, érdemes összehasonlítani a legfontosabb jósági mutatókat más, hasonló kategóriájú hajtóművekkel. Egy korábbi tanulmányomban korántsem teljes, de nagyszámú (145 db) helikopter-hajtómű statisztikai értékelését végeztem el a [11] szakirodalom alapján. A 8–10. ábrákon ezek a statisztikai feldolgozásából kapott diagramok láthatók, ahol MS Excel-függvénykezelővel a teljesítmény függvényében ábrázoltam a különböző jellemzőket a hajtóművek adataiból képzett trendgörbével. [5] Ebbe illeszttem az Arriel 2E-hez tartozó értékeket piros ponttal jelölve.

Az Arriel 2E hajtómű fajlagos tüzelőanyag-fogyasztása (7. ábra) ez alapján kismértékben jobb, mint az átlag, de ebben a teljesítmény-kategóriában a legjobbak már 0,3 kg/kWh fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás (27–28%-os termikus hatásfok) körül teljesítenek. Megjegyzendő, hogy a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás csak a termikus hatásfoktól függ, tehát mind a kettő egyértelműen kifejezi a hajtómű tüzelőanyag-hatékonyságát. Sajnos a helikopter-hajtóművek termikus hatásfokai jelentősen alatta maradnak az egyéb gázturbináknál megszokott értékeknél, ami napjainkban akár 40% feletti is lehet. Ugyanakkor a helikopter-hajtóművek esetében a 30% körüli hatásfok már jónak számít. Ennek oka a hajtóművek relatíve kis mérete, amely kis hajtómű tömegáramot, rövid lapátokat, jelentős lapátvégi veszteségeket eredményez, valamint az erőforrások kompakt elrendezése, amely sokszoros irányváltást okoz az áramlásban. A méret hatása még kategórián belül is jól látszik a 7. ábrán, ahol a kisebb tengelyteljesítményű, vagyis méretükben is kisebb hajtóművek fajlagos tüzelőanyag-fogyasztása (ezzel termikus hatásfoka) jelentősen rosszabb. Ha megvizsgáljuk a 8. és 9. ábrákat, látható, hogy ez igaz a többi fajlagos mutatóra is. Ez azt jelenti, hogy a (kis) méret „bünteti” ezeket a hajtóműveket, vagyis minél kisebb mérettel rendelkeznek, annál nehezebb jó hatásfokot (fajlagos tüzelőanyag-fogyasztást), fajlagos hasznos munkát stb. elérni. [12]

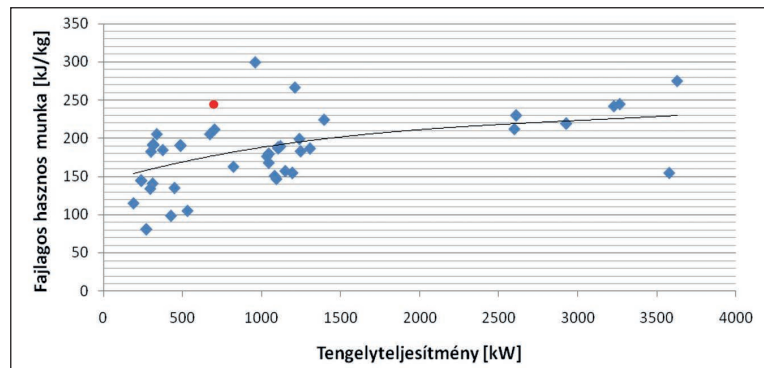
A hajtómű, a fajlagos teljesítmény (8. ábra) szempontjából pontosan hozza a trendgörbe szerinti átlagot.



7. ábra. A hajtómű fajlagos tüzelőanyag-fogyasztása a teljesítmény függvényében (A szerző szerkesztése az [5] alapján)



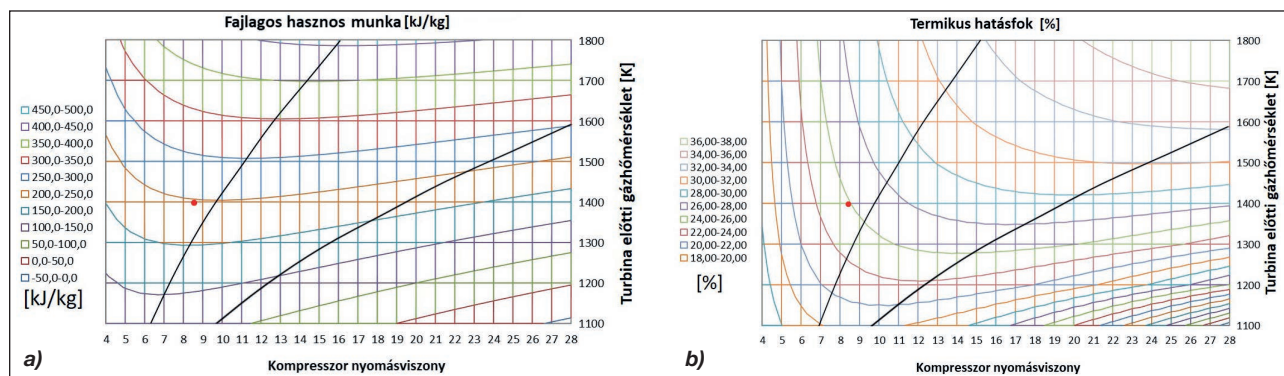
8. ábra. A hajtómű tömegegységre jutó teljesítménye a teljesítmény függvényében (A szerző szerkesztése)



9. ábra. A hajtómű fajlagos hasznos munkája a teljesítmény függvényében (A szerző szerkesztése)

Az 9. ábra a fajlagos hasznosmunka-értékeket ábrázolja a tengelyteljesítmény függvényében. Az Arriel 2E jelentősen jobb mutatóval rendelkezik, mint az átlag adatok.

Ez jól szemléltethető és magyarázható a 10. ábrán látható diagramok görbeségeivel, amelyek egy korábbi turboshaft szimulációs programból származnak. [13] A bal oldali görbesereg a fajlagos hasznosmunka-görbéket, a jobb oldali pedig a termikus hatásfokgörbéket tartalmazza. Ezek helyzete függ az adott hajtómű aktuális üzemmódjától, de jelen esetben körülbelül megfeleltethető az Arriel 2E hajtómű eddig is tárgyalt felszálló üzemmódjával. A hajtómű munkapontját ebben az esetben is piros ponttal beillesztettük mindkét diagramba. A diagramonkénti két plusz görbe magyarázata: a bal oldali diagramból a bal görbe megadja azokat a pontokat, ahol az adott turbina előtti hőmérséklet-hez a maximális fajlagos hasznos munka társul, kijelölve



10. ábra. A fajlagos hasznos munka a) és a termikus hatások b) a nyomásviszony és a turbina előtti gázhőmérséklet függvényében (A szerző szerkesztése a [13] alapján)

ezzel a hozzá tartozó nyomásviszonyt is. Ugyanakkor a jobb oldali diagramból a jobb görbe megadja azokat a pontokat, ahol az adott turbina előtti hőmérséklethez a maximális termikus hatások társul. Mindkét diagramban megjelenik a másik görbe is, szemléltetve a nyomásviszony-határokat.

Láthatóan a két nyomásviszony – különösen magasabb turbina előtti hőmérsékletek esetében – jelentősen eltér egymástól, lásd 10. ábra két-két ferde görbéjét. Láthatóan balról jobbra mozogva egy állandó hőmérsékleti egyenesen, pl. ~1400 K, először mindkét jellemző javul, majd az első görbénél elérjük a fajlagos hasznos munka maximumát. Innen a fajlagos hasznos munka romlik, de a termikus hatások emelkedik a jobb oldali határig. Innen azonban mindkettő romlik. Általában a hajtóművek munkapontjait a két nyomásviszony közé illesztik valamilyen kompromisszumos elvek alapján attól függően, hogy mit preferálnak a tervezők. Itt a 8,5-ös kompresszor-nyomásviszony az 1398 K-es turbina előtti gázhőmérséklet mellett még csak a maximális fajlagos hasznos munka görbéhez közelít. Ebből az következik, hogy a nyomásviszony optimális esetben lehetne jóval magasabb (a piros pont az ~1400 K-es vonalon jobbra tolnódna). 9,75-os nyomásviszonynál elérné a maximális fajlagos hasznos munkát, és kb. 11-es nyomásviszonynál lenne nagyjából ugyanannyi a fajlagos hasznos munka, mint a kiindulási helyzetben, ugyanakkor a hatások közel 2%-kal lenne magasabb.

Mi az oka ennek? Valószínűleg az, hogy a jól bevált, több Arriel 1 és 2-es változatlan alkalmazott kompresszoron nem akartak változtatni, amelyből – ahogy már korábban is említettük –, nem lehetett nagyobb nyomásviszonyt előállítani. Bár a fajlagos hasznos munka szempontjából ez minimális csökkenést okoz, de így erősen közelít a lehetséges maximális értékhez. Ugyanakkor tüzelőanyag-fogyasztásban lehetett volna nyerni, de valószínűleg ebben kompromisszumot kötöttek. Ez okozza, hogy a hajtómű a fajlagos hasznos munkában jóval kedvezőbb adatokat mutat a trendgörbéhez képest, mint a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás vonatkozásában.

Fajlagos mutatók szempontjából ezzel együtt is tény, hogy a hajtómű a kor követelményeinek megfelelő, vagy annál egy kicsit jobb paraméterekkel rendelkezik.

#### HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Réz Levente, „A helikopterképesség fejlesztésének aktuális kérdései”, *RepTudKöz*, köt. 31, sz. 3, pp. 77–88, jún. 2020;
- [2] H145M. Elérhető: <https://htka.hu/wp-content/uploads/2018/06/H145M-HForce-Bakony.jpg>, (Letöltve: 2021.12.10.);

- [3] <https://www.safran-group.com/companies/safran-helicopter-engines>, (Letöltve: 2021.11.10.);
- [4] Turbomeca Artouste. Elérhető: [http://en.wikipedia.org/wiki/Turbomeca\\_Artouste](http://en.wikipedia.org/wiki/Turbomeca_Artouste), (Letöltve: 2020.03.31.);
- [5] Varga Béla, „Helikopter gázturbinás hajtóművek technikai elemzése”, *RepTudKöz*, köt. 30, sz. 1, pp. 7–28., 2018;
- [6] Training Notes, 1st Line Maintenance Course, Safran Helicopter Engines Academy, 2017.;
- [7] B. Varga, G. Barta, „Az Arriel 2E turboshaft hajtómű termikus elemzése”, *RepTudKöz*, köt. 32, sz. 3, pp. 69–82, 2021;
- [8] <https://www.safran-group.com/products-services/arriel-2e-airbus-h145-engine>; (Letöltve: 2022.3.4.);
- [9] Pásztor, E., Varga, B. (2015) “Energy- and Aerodynamic Examination of Slightly Backward Leaning Impeller Blading of Small Centrifugal Compressors”, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 43(4), pp. 199–205. <https://doi.org/10.3311/PPtr.8093>;
- [10] Training Notes, 1st Line Maintenance Course, Safran Helicopter Engines Academy, 2017;
- [11] Engine Manufacturers, Helicopter Annual, 2009, p. 57–63;
- [12] B. Varga; L. Békési: „Tényleg nem a méret számít?”, avagy hogyan bünteti a kis méret a helikopter „turboshaft” hajtóműveket *RepTudKöz*, (1997-től) XXVI: 2014, 2 pp. 81–93.;
- [13] Varga Béla, „Gázturbinás hajtóművek teljesítmény és hatások növelésének műszaki technológiai háttere, és ezek hatása a katonai helikopterek korszerűsítésére” (PhD értekezés, Budapest, 2013) [http://uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2013/varga\\_bela.pdf](http://uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2013/varga_bela.pdf), pp. 47–81. (Letöltve: 2022.3.4.).

#### JEGYZETEK

- 1 A kompresszor kilépő és belépő keresztmetszetében mért fékezett nyomások hányadosa.
- 2 Kompresszorompázs: a kompresszorban az áramlás részleges vagy teljes összeomlása. Számos kiváltó oka lehet, de a végeredmény minden esetben a kompresszor tömegáram-csökkenése, ezzel az áramlás axiális sebességének csökkenésén keresztül a kompresszorlapátok sebességi háromszögeinek torzulása, és az áramlás leválása. Eredményes védekezés a kompresszor megcsapolásával (pompázs szelep, mint jelen esetben is), az előperditő (ha van) és az álló lapátok elfordításával, illetve a gázgenerátor forgórészeinek szétválasztásával (kétforgórészes hajtóművek) történhet.