

Varga Béla¹ – Békési László²

“TÉNYLEG NEM A MÉRET SZÁMÍT?”, AVAGY HOGYAN BÜNTETI A KIS MÉRET A HELIKOPTER “TURBOSHAFT” HAJTÓMŰVEKET³

A címben szereplő kifejezésre a válasz egyértelmű. Igenis a méret számít. A gázturbinás hajtóművek hatásfokát és fajlagos hasznos munkáját vizsgálva azt tapasztaljuk, hogy a helikopter „turboshaft” hajtóművek említett mutatói jelentősen alatta maradnak az egyéb gázturbináknál megszokott értékeknél, ami napjainkban maximális teljesítménynél (felszálló üzemmódon) 40% feletti, illetve 400 kJ/kg feletti. Ugyanakkor a helikopter hajtóművek esetében a 30% körüli termikus hatásfok már jónak számít, míg a fajlagos hasznos munka értéke 200-250 kJ/kg. Ez a negatív hatás a kompresszorok kis méretével, ennek megfelelően főleg a hátsó fokozatok kis lapáthosszával (a relatív lapátrés növekedésével), illetve az áramlás alacsony Reynolds számával magyarázható. A cikk a kompresszor méret, illetve ezzel összefüggésben a fenti teljesítmény-jellemzők lehetséges változását vizsgálja.

“REALLY THE SIZE IS INDIFFERENT?”, OR HOW THE HELICOPTER TURBOSHAFT ENGINES ARE PENALISED BY THEIR OWN SMALL SIZE

The answer for the question in the title is obvious. The size is extremely important. Examining the thermal efficiency and specific net work output of gas turbine engines, it is well proved that the above mentioned performance indicators of helicopter turboshaft engines are greatly lower than the average of other gas turbine categories, which is today at take off power over 40% and 400 kJ/kg. Meanwhile 30% thermal efficiency and 200-250 kJ/kg specific net work output are considerable at helicopter turboshafts. This negative effect mainly comes from the small size of their compressor and the accordingly low blade length, especially in the rear stages (higher relative blade tip clearance) and the low Reynolds number of the flow. In this paper the compressor size and its correlation with the above mentioned performance indicators are examined.

JELÖLÉSEK

- η_t : a hajtómű valós termikus hatásfoka [%];
- P : a hajtómű tengelyteljesítménye [W, (kW)];
- $F_{ü}$: a tüzelőanyag fűtőértéke (kerozin: 43217080 J/kg);
- $\dot{Q}_b$: hőáram, a hajtóműbe másodpercenként bekerülő hőmennyiség [J/s];
- $\dot{m}_{tüza}$: a hajtómű tüzelőanyag fogyasztása [kg/s];
- $\bar{c}$: a hajtómű fajlagos tüzelőanyag fogyasztása [kg/Nh, kg/kWh];
- σ : a hajtómű nyomásveszteségi tényezője (szívócsatorna, égőtér, gázelvezető rendszer, egyebek) [-];
- η_{pole} : az expanzió politrópikus hatásfoka [%];
- η_m : mechanikai hatásfok, figyelembe véve a segédberendezések teljesítmény felvételét [%];
- η_e : égési hatásfok [%];

¹ főiskolai docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Tanszék, varga.bela@uni-nke.hu

² főiskolai tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Tanszék, bekési.laszlo@uni-nke.hu

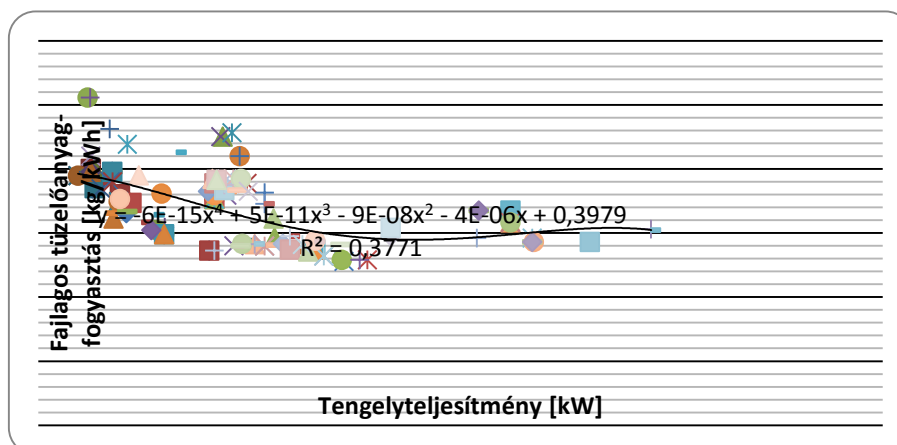
³ Lektor: Dr. Kavas László alezredes, egyetemi docens, NKE Katonai Repülő Tanszék, kavas.laszlo@uni-nke.hu

w_h :	a körfolyamat fajlagos hasznos munkája [J/kg];
$\dot{m}$:	a hajtómű leírásokban megadott névleges tömegáram [kg/s];
π :	kompresszor nyomásviszony [–];
$w_h(\pi)$:	fajlagos hasznos munka, mint a kompresszor nyomásviszony függvénye [J/kg];
T_1 :	kompresszor előtti hőmérséklet [K];
T_2 :	kompresszor kilépő keresztmetszetének hőmérséklete [K];
$\eta_t(\pi)$:	a körfolyamat valós termikus hatásfoka a kompresszor nyomásviszony függvényében [%];
κ :	adiabatikus kitevő a kompresszióra [–];
$R(q_t)$:	a termodinamikai folyamat specifikus gázállandója [J/kgK];
$q_t = \dot{m}_{\text{tüza}} / \dot{m}$:	az égőtérben a tüzelőanyag és a levegőáram viszonzsáma, ami utal az égéstermék összetételére [–];
$\eta_{\text{polk}(i)}$:	az i-edik fokozat politrópikus hatásfoka [%];
$\eta_{\text{polk}(0)}$:	a kompresszor belépő keresztmetszet politrópikus hatásfoka zérus lapátrés értéket feltételezve [%];
K_k :	a tapasztalati képlet kísérletek által meghatározott kompresszorra jellemző konstansa (1) [–];
m_k :	a tapasztalati képlet kísérletek által meghatározott kompresszorra jellemző konstansa (2) [–];
l_r :	az abszolút lapátrés értéke (egy adott kompresszor esetében vehetjük állandó értékűnek az összes fokozatra) [m];
$l_{(i)}$:	az i-edik fokozat lapátmagassága [m];
p_0 :	környezeti nyomás, Nemzetközi Egyezményes Légekör ($H = 0$ m, 101325 Pa);
$p_{2(i)}$:	a kompresszió végnyomása az i-edik lépésnél [Pa];
$T_{2(i)}$:	a kompresszió véghőmérséklete az i-edik lépésnél [K];
$\rho_{2(i)}$:	a közeg sűrűsége az i-edik lépésnél [kg/m ³];
c_a :	a munkaközeg axiális sebessége a kompresszorban [m/s];
d_k :	a kompresszor középátmérője [m];
ξ :	szűkítési tényező, kifejezi a lapátozás keresztmetszet csökkentő hatását [–];
$d\pi_{(i)}$:	elemi nyomásviszony változás az adott lépésnél [–];
$\pi_{(i)}$:	nyomásviszony az i-edik lépés után [–];
$\rho_{2(i)}$:	a közeg sűrűsége az i-edik lépésnél [kg/m ³];

A cikk címében szereplő „turboshaft” gázturbinás hajtómű kategória gyors fejlődése az 50-es években kezdődött döntő részben a helikopterek térhódításának következtében. Néhány év alatt az igényelt egyre nagyobb maximális felszálló-tömeg és hasznos terhelés miatt a helikopterek kinőtték a rendelkezésre álló dugattyús motorokat és a váltás egyetlen alternatívája egy könnyű, nagy tengelyteljesítményt szolgáltató erőforrás volt, amire ez a kategória tökéletesen alkalmas. Természetesen az elmúlt 60 év számtalan fejlesztést és újítást hozott jelentősen javítva ezeknek a hajtóműveknek a teljesítményét és hatásfokát, de ugyanúgy előrelépést jelentett az üzemeltethetőségi, karbantartási és javíthatósági mutatókban, illetve magának a helikopternek a légi üzemeltetésében is. Van azonban ezeknek a hajtóműveknek egy jelentős hátránya, ez pedig méretükből adódik, ami sajnos jelentősen bünteti ezt a hajtómű kategóriát mind a fajlagos hasznos munkája, mind pedig a termikus hatásfoka szempontjából.

HELIKOPTER HAJTÓMŰVEK STATISZTIKAI ELEMZÉSE

A cikknek ebben a részében korántsem teljes, de nagyszámú helikopter hajtómű statisztikai elemzését végeztük el [5]. Az ábrákon a feldolgozásából kapott diagramokat látjuk, ahol Excel függvénykezelővel a teljesítmény függvényében ábrázoltuk a különböző hajtómű jellemzőket.



1. ábra A fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás és a teljesítmény statisztikai összefüggése

Ami első látásra szembevető (1. ábra), hogy teljesítmény szempontjából a helikopter hajtóművek három jól elkülöníthető csoportra oszthatók fel, amelyek között jól érzékelhető szakadás van. A legkisebb teljesítmény kategória 200–800 kW-os felszálló teljesítményt biztosít. A közepes teljesítmény kategóriába 1000–2200 kW-ot szolgáltató hajtóművek tartoznak, míg a nagy kategóriában 2500–3700 kW-os felszálló teljesítményekkel találkozhatunk. Láthatóan ez utóbbi tartalmazza a legkevesebb példányt. Ez nem jelenti azt, hogy összesen ennyi hajtómű létezne ebben a kategóriában, de mindenképpen a „nehéz” szállító helikopter típusok kis száma és egy-egy típuson belül a viszonylag alacsony gyártási szám miatt koránt sincs az a bőség, mint a kis és közepes kategóriákban.

Természetesen, néhány esetben találhatunk a fenti intervallumból kilógó adatokat. A T64-GE-100-as 3228 kW-os teljesítménye 13,3 kg/s-os levegőfogyasztás mellett magasnak számít, de

ez is eltörpül a Mi-26-os helikopter D-136-os hajtóművének 8501 kW-os teljesítményéhez képest. Ez utóbbi hajtóműnek a viszonylag magas levegőfogyasztása miatt a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztása is jó (0,266 kg/kWh). Ugyanakkor a gyári adatok alapján manapság az RTM 322-04/08, az RTM 322-01/9 és az RTM 322-01/9A hajtóművek képviselik az élvonalat 0,258 kg/kWh fajlagos tüzelőanyag-fogyasztással, ami kevéssel 30% feletti termikus hatásfokot eredményez.

Viszont a kis teljesítmény kategóriában találkozunk 0,5 kg/kWh körüli fajlagos fogyasztás értékekkel is. Pl. a nálunk jól ismert Mi-2 helikopter GTD 350 hajtóművének 0,489 kg/kWh fajlagos tüzelőanyag-fogyasztása is kiugróan magas. Ez magyarázható a hajtómű korával és kis méretével. Az ismertetőkben legtöbb esetben a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás adják meg, de ez könnyen konvertálható termikus hatásfokká a következő módon:

$$\eta_t = \frac{P[W]}{\dot{Q}_b \left[\frac{J}{s} \right]} = \frac{P[W]}{\dot{m}_{\text{tüza}} \left[\frac{kg}{s} \right] \cdot F\ddot{u} \left[\frac{J}{kg} \right]} \quad \text{míg a} \quad \bar{c} = \frac{3600 \cdot \dot{m}_{\text{tüza}} \left[\frac{kg}{s} \right]}{P[kW]} \left[\frac{kg}{kWh} \right] \quad (1)$$

$$\eta_t = \frac{1}{\frac{\bar{c}}{3600} \left[\frac{kg}{kWs} \right] \cdot F\ddot{u} \left[\frac{kJ}{kg} \right]} = \frac{3600}{\bar{c} \cdot 43217,08} [-] \quad (2)$$

Természetesen a (2) képlet akkor ad helyes eredményt, ha a fajlagos tüzelőanyag fogyasztást, $\bar{c}$ a levezetésnek megfelelően kg/kWh mértékegységgel helyettesítjük be. Az átszámításnál és egyáltalán későbbi termikus elemzéseknél a tüzelőanyag fűtőértéke lehet még kérdéses. Itt a Boeing „Jet Fuel Characteristics” munkaanyagában megadott átlagos 18580 BTU/lb⁴ értéket fogadtuk el irányadónak, ami átváltás után 43217080 J/kg-nak felel meg [1].

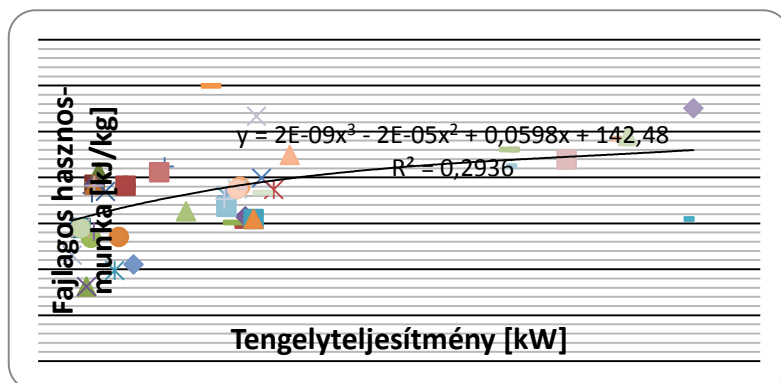
A gázturbinás hajtóművek hatásfokát vizsgálva azt tapasztaljuk, hogy ennek a kategóriának a termikus hatásfokai jelentősen alatta maradnak az egyéb gázturbináknál megszokott értékeknek, ami napjainkban maximális teljesítménynél (felszálló üzemmódon) 40% feletti lehet. Ugyanakkor a helikopter hajtóművek esetében a 30% körüli hatásfok már jónak számít. Ennek megfelelően a termikus hatásfok értéke átlagosan 20–32% között mozog.

Polinommal való közelítésnél a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás trendgörbe (1. ábra) a teljes teljesítmény vertikumban először egy jelentős csökkenést, majd többé-kevésbé állandó (0,3 kg/kWh, megfelel kb. 27–28%-nak) értéket mutat. Az átlagot tekintve mindenképpen az látható, hogy a nagyobb teljesítmények felé csökken a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás, illetve nő a termikus hatásfok.

Ez persze csak áttételesen kapcsolódik a teljesítményhez. A valós ok az, hogy a nagyobb teljesítményhez nagyobb levegőszállítás tartozik, ami a nagyobb geometriai méretek (kisebb relatív lapátrések) miatt jobb gépegység hatásfokokat eredményez. Ez még inkább igaz, ha a levegőfogyasztás maximuma nem 10 kg/s körül van, hanem mint más kategóriák esetében 30 kg/s, vagy afelett. Visszatérve a helikopter gázturbinákra, ennek megfelelően a rosszabb termikus hatásfokok (nagyobb fajlagos tüzelőanyag-fogyasztások) a kisebb, illetve a korábbi tervezésű

⁴ BTU/lb: British thermal unit per pound

hajtóműveknél várhatóak. Természetesen az egyes gyártók közötti technológiai fejlettségbeli különbségek szintén megjelenhetnek hatásfok különbségben, azonban ez a mai globalizálódó világunkban egyre kevésbé jellemző. A fenti termikus hatásfok adatoknak az elemzésére a későbbiekben visszatérünk.



2. ábra A fajlagos hasznos munka és a teljesítmény statisztikai összefüggése

A következő fontos jósági mutató a hajtóművek fajlagos hasznos munkája (2. ábra) Ennek a mutatónak szoros kapcsolata van a hajtómű geometriai méreteivel, illetve tömegével. Minél nagyobb a hajtómű fajlagos hasznos munkája, annál kisebb tömegáram szükséges azonos tengelyteljesítmény létrehozásához, csökkentve ezzel a hajtómű méreteit, illetve esetlegesen tömegét. Sajnos még az alsó kategóriákban is csak a hajtóművek töredékénél állt rendelkezésemre a tömegáram is, így trendvonal felvétele meglehetősen kétséges, de jól láthatóan széles a szórás a fajlagos hasznos munka tekintetében.

KOMPRESSZOR POLITRÓPIKUS HATÁSFOK, FAJLAGOS HASZNOS MUNKA ÉS A TERMIKUS HATÁSFOK ÖSSZEFÜGGÉSEI

A gázturbinás hajtóművek paraméter érzékenységi vizsgálata alapján a kompresszor politrópikus hatásfokának⁵ van az egyik legjelentősebb hatása a hajtómű termikus jósági jellemzőire. Csökkenése az összes többi gépegység veszteségnél intenzívebben rontja a fajlagos hasznos munkát. A termikus hatásfokra gyakorolt hatás szempontjából csak a turbina politrópikus hatásfok csökkenésének van némileg nagyobb hatása. Figyelembe véve mindkét jellemzőt, kijelenthetjük, hogy a kompresszor politrópikus hatásfokának kiemelt szerepet kell tulajdonítani [2]. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy ennél a gázturbinás hajtómű kategóriánál a kompresszor maga és ezen keresztül a kompresszor politrópikus hatásfok érzékeny terület. Ez megjelenik már a tervezési folyamat során. Mint többször említettük, ezeknek a hajtóműveknek a viszonylag kis méretei (kisebb levegőszállítás) kis kompresszor méreteket is eredményez. Törekedve a magas termikus hatásfokra és ennek megfelelően növelve a kompresszor nyomásviszonyt, rendkívül alacsony hátsó fokozat lapátmagasságok adódnak. A kis lapátmagasságok egyébként sem kedvezőek, de figyelembe véve, hogy még kis lapátrés esetén is a relatív lapátrés (a lapátvég és ház közötti rés, valamint a lapáthossz viszonyzáma) túlságosan nagyra adódik drasztikusan lerontva a hátsó fokozatok politrópikus hatásfokát, ami természetesen érezteti a hatását az egész kompresszor

⁵ Politrópikus hatásfok: áramlási gépek veszteségességét kifejező fogalom

politrópikus hatásfokán is. Ennek az az eredménye, hogy lehetetlen ugyanazokat a jósági mutatókat produkálni ezekkel a hajtóművekkel, mint egy nagyobb gázturbinás hajtóművel, amelynek a levegőfogyasztása meghaladja a 30–40 kg/s-ot.

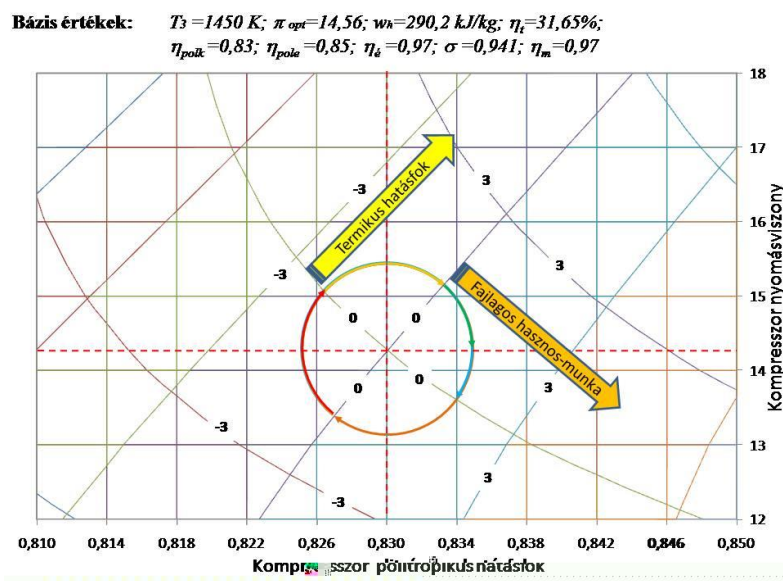
Másik jellemző probléma, hogy a helikopterek jellegükből adódóan (különösen a katonai helikopterek) gyakran használnak kiépítetlen le és felszállóhelyeket akár sivatagos területen is. Sokszor maga a repülési magasság is igen alacsony, ezzel nagymennyiségű szennyeződés, por, homok hajtóműbe való beszívását okozva. Ez a külső hatás szintén elsősorban a kompresszort, annak is az első fokozatát érinti jellemzően radikálisan csökkentve a politrópikus hatásfokát, a létrehozható maximális nyomásviszonyt és a stabilitási tartalékát.

Ebben a fejezetben először az első problémára szeretnénk rávilágítani, nevezetesen, hogy ennél a hajtómű kategóriánál milyen szempontokat vehetnek figyelembe a tervezés folyamatánál és ezek milyen hatással lesznek a hajtóművek termikus jósági jellemzőire (termikus hatásfok, fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás, fajlagos hasznos munka).

1.1 Termikus hatásfok, fajlagos hasznos munka, kompresszor politrópikus hatásfok és a kompresszor nyomásviszony összefüggései

A szerzők egyikének PhD értekezésében [2] létrehozott modell segítségével ábrázolásra került a termikus hatásfok, fajlagos hasznos munka görbesereg a kompresszor politrópikus hatásfok és a nyomásviszony függvényében (3. ábra).

A vizsgálathoz tartozó bázis adatok (hatásfokok, turbina előtti gáz hőmérséklet) az ábra felső részén olvashatóak. Ez az ún. optimális nyomásviszonyra (termikus hatásfok és a fajlagos hasznos munka maximumai közötti optimum) 290,2 kJ/kg fajlagos hasznos munkát és 31,65%-os termikus hatásfokot adott meg (a „0”-al jelzett görbék metszéspontja 3. ábrán). Megjegyzendő, hogy ezek az értékek körülbelül megfelelnek egy mai korszerű helikopter hajtómű vonatkozó adatainak.



3. ábra Termikus hatásfok és fajlagos hasznos munka a kompresszor politrópikus hatásfok és nyomásviszony függvényében

Jelen esetben nem is az alapadatok a lényegesek, hanem a változások mértéke és iránya a kompresszor politrópikus hatásfokának változásakor rögzített turbina előtti gázhőmérséklet esetében. A 0-val jelzett görbékhez képest a ± 3 -al jelölt görbék mind a fajlagos hasznos munka, mind a termikus hatásfok 3%-os eltérését mutatják a bázis értékhez képest az előjeleknek megfelelően.

A 3. ábrából látható, hogy a kompresszor nyomásviszony növelésekor „vékony jégen” egyenúlyoznak a tervezők. Egyértelműen pozitív hatást csak a gyűrű zöld szektorában várhatunk. Ebben az esetben a nyomásviszony növekedése együtt járna a politrópikus hatásfok növekedésével. Itt mind a fajlagos hasznos munka, mind pedig a termikus hatásfok növekszik. Ennek a nehézsége abban rejlik, hogy a kompresszor politrópikus hatásfok csökkenés fokozottan sújtja ezt a hajtómű kategóriát, különösen abban az esetben, ha a hajtómű kívánt nyomásviszonyát a kompresszor fokozatok számának növelésével próbálják elérni. Ehhez maguknak a fokozat politrópikus hatásfokoknak kell jelentősen javulniuk, hogy a kompresszor teljes politrópikus hatásfoka ne csökkenjen, sőt emelkedjen. Ez manapság nagyon nehéz, mert az alkalmazott 3D-s tervező rendszerekkel többé kevésbe elérték a lehetséges legjobb értékeket.

Adott esetben (kék szektor), a nyomásviszony csökkenése, ha ez együtt jár a kompresszor politrópikus hatásfokának növekedésével, pozitív hatással lehet, mind a fajlagos hasznos munkára, mind pedig a termikus hatásfokra. A sárga szektorok esetében legalább az egyik jellemző növekszik. A piros szektor mindkét jellemző szempontjából negatív hatást hoz. Látható, hogy még a vízszintes szaggatott vonal feletti része, ahol a nyomásviszony növekedésétől termikus hatásfok növekedést várnánk el, sem hoz pozitív eredményt.

Az elkészített program a fent elemzett hálót bármely turbina előtti gázhőmérsékletnél, illetve gépegység veszteségek esetében képes a kiválasztott nyomásviszony és politrópikus hatásfok tartományra felrajzolni és ezzel szemléletesen bemutatni, hogy adott nyomásviszony és politrópikus hatásfok változások hatására hogyan változnak a hajtómű jósági jellemzői.

1.2 Kompresszor lapáthossz és a politrópikus hatásfok összefüggése

A kompresszor fő méretei, ezen belül a lapáthossz jelentősen befolyásolja a kompresszor politrópikus hatásfokát. Ez természetesen összefügg a vizsgált hajtómű teljesítményével (tolóerejével). Kis teljesítményű hajtómű esetében értelemszerűen kisebb kompresszor méretekre van szükség rövidebb lapátokkal. A sűrítés miatt, figyelembe véve a folytonosság tételét az egymást követő fokozatok lapáthosszai folyamatosan csökkennek. A lapátrés méret (lapátvég és a kompresszorház közötti rés nagysága) nem csökkenhet zérusra. Természetesen a gyártók törekszenek ennek a résnek a minimalizálására (aktív részvezérlés), de ezt teljesen megszüntetni nem lehet. Értéke erősen függ az adott kor technológiai színvonalától és bizonyos mértékben az adott gyártó számára rendelkezésre álló technológiai lehetőségektől. Azt azonban leszögezhetjük, hogy az abszolút rés nagysága nem függ a hajtómű mérettől, vagyis elfogadható, hogy maga a lapáthossz nem befolyásolja a részt. Ez azt jelenti, hogy különböző méretű hajtóművekre felvehetünk azonos lapátrést, másrészt egy adott hajtómű esetén az összes fokozatra feltételezhetjük az azonos lapátrés értéket. Annál inkább befolyással lesz a lapáthossz a fajlagos lapátrés értékére, mivel az a lapátrés és a lapáthossz viszonzyszámaként definiálható. A fajlagos lapátrés ($l_r/l_{(i)}$) értéke a hátsó fokozatok felé egyre nagyobb lesz, mivel ahogy említettem, azonos lapát-

rés társul az egyre kisebb lapátmagasságokhoz. Ennek a hatását figyelembe kell venni a kompresszorok politrópikus hatásfokának meghatározásánál. Ehhez Prof. Dr. Pásztor Endre több kutató (Andenburg, Brown-Boveri, Kirillov, Stepanov) kutatásain és mérésein alapuló (3) tapasztalati képletét használtam fel a kompresszor nyomásviszonya és a politrópikus hatásfoka összefüggéseinek vizsgálatára [3]. Az egyenletben megjelenő K_k és m_k állandók a fentebb említett kutatók mérésein alapulnak, jól szimulálva a lapát magasság csökkenéséből adódó fokozatonkénti politrópikus hatásfok csökkenést.

$$\eta_{polk(i)} = \eta_{polk(0)} \left(1 - K_k \left(\frac{l_r}{l_{(i)}} \right)^{m_k} \right) \quad (3)$$

1.3 A kompresszor politrópikus hatásfokának a meghatározása

A kompresszor politrópikus hatásfokának meghatározásához szükséges a nyomásviszony folyamatosan növelése minden lépésben meghatározva az adott lépéshez tartozó munkaközeg jellemzőket (nyomás, hőmérséklet, sűrűség). Ebben az esetben a nyomásviszony növekedését nem fokozatonként vizsgáljuk, hanem elemi változásokkal dolgozunk, hogy lehetőség legyen továbbra is a $\frac{dw_h(\pi)}{d\pi}$ és a $\frac{d\eta_t(\pi)}{d\pi}$ derivált függvények meghatározására. Ez a kiemelt (maximális fajlagos hasznos munkához, maximális termikus hatásfokhoz, valamint a köztük lévő közös optimumhoz tartozó) nyomásviszonyok és a hozzájuk tartozó jellemzők meghatározása miatt szükséges.

Első lépésként meghatározzuk az aktuális lapátmagasságot ($l_{(i)}$), felhasználva a folytonosság tételét, illetve ebből az ahhoz tartozó politrópikus hatásfokot.

$$l_{(i)} = \frac{\dot{m}}{\rho_{(i)} \cdot c_a \cdot d_k \cdot \Pi \cdot \xi} \Rightarrow \eta_{polk(i)} = \eta_{polk(0)} \left(1 - K_k \left(\frac{l_r}{l_{(i)}} \right)^{m_k} \right) \quad (4)$$

Az elemi nyomásviszony növekedés definiálásához a felírjuk a Poisson egyenletet, a kompresszió vég hőmérsékletét ($\Delta T = T_{2(i)} - T_{2(i-1)} = 2 \text{ K}$) fokenként növelve.

$$d\pi_i = \left(\frac{T_{2(i)}}{T_{2(i-1)}} \right)^{\frac{\kappa_{l(i)} \cdot \eta_{polk(i)}}{\kappa_{l(i)} - 1}} \quad (5)$$

Ennek megfelelően a nyomásviszony:

$$\pi_{(i)} = \pi_{(i-1)} \cdot d\pi_{(i)} \rightarrow p_{2(i)} = p_0 \cdot \pi_{(i)} \rightarrow \rho_{2(i)} = \frac{p_{2(i)}}{R(q_t) \cdot T_{2(i)}} \quad (6)$$

Ahol az első lépésnél $\pi_{(i-1)}=1$, a továbbiakban pedig az előző lépésig létrejött teljes nyomásviszony. Ebből az általános gáztörvénnyel meghatározható az adott keresztmetszetben a sűrűség. Ezzel végezve a ciklus visszatér az (4) egyenletekhez addig, amíg a keresett nyomásviszonyt el nem érjük:

- tetszőleges turbina előtti hőmérsékletnél azt a három nyomásviszonyt, ahol

$\frac{dw_h}{d\pi} = 0; \frac{d(w_h \cdot \eta_t)}{d\pi} = 0; \frac{d\eta_t}{d\pi} = 0$, illetve bármely egyéb tetszőlegesen definiált nyomásviszonyt;

- 100 K fokenként növekvő turbina előtti gázhőmérsékleteknél azt a három nyomásviszonyt ahol $\frac{dw_h}{d\pi} = 0; \frac{d(w_h \cdot \eta_t)}{d\pi} = 0; \frac{d\eta_t}{d\pi} = 0$.

A ciklusból kilépve meghatározhatjuk az adott nyomásviszonyú kompresszorra a politrópikus kompresszor hatásfokot az (6) egyenlettel.

$$\eta_{polk} = \frac{\kappa_l}{\kappa_l - 1} \cdot \frac{\ln \pi}{\ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (6)$$

1.4 A hajtómű (kompresszor) méret hatásának vizsgálata a hajtómű jósági jellemzőire

A modell segítségével két méretében (levegőfogyasztásában) jelentősen eltérő hajtómű koncepciót vizsgálunk meg. Ez azt jelenti, hogy mindkét méret (levegőfogyasztás) esetében a ma elfogadható turbina előtti gázhőmérséklet tartományt vesszük figyelembe, illetve az adott kiinduló feltételek melletti lehetséges kompresszor nyomásviszony illesztést az optimum keresés jegyében. A kiinduló feltételeket ennek megfelelően azonosra állítjuk be. A gépegység veszteségek ($\eta_{pole}=0,87$; $\eta_e=0,97$; $\sigma=0,941$; $\eta_m=0,97$). A levegőelvitel 2% használati levegő a kompresszor utolsó fokozatától és 2% hűtőlevegő szintén a kompresszor utolsó fokozatától.

további fokozat politrópikus hatásfokokat és ebből az adott nyomásviszonyú kompresszorra vett politrópikus hatásfokot a program számolja az (4) és a (6) egyenletek alapján. További adatok az 1. táblázat felső sorában jelennek meg. A szállított levegő értéke 5 kg/s, megfelel egy korszerű helikopter hajtómű esetében ($T_3 \approx 1500$ K) kb. 1500 kW tengelyteljesítménynek, ami ezeknél a hajtóműveknél a közepes teljesítmény-kategóriát képviseli.

A középátmérőt és az axiális sebességet (0,22 m, 120 m/s) hozzávetőlegesen került megadásra figyelembe véve hasonló hajtóművek vonatkozó adatait. A lapátrésre fokozattól függetlenül 0,3 mm-t vettünk fel. A szűkítési tényező⁶ (0,98) a kompresszor lapátozás keresztmetszet csökkentő hatását fejezi ki. Az első fokozat lapáthossz (0,0502 m) már számított érték az előzőekben felsorolt adatok alapján. A turbina előtti gázhőmérséklet 1100 K-tól 1800 K-ig terjed.

Az 1100 K manapság már nem jellemző, míg az 1800 K a felső határt képezi a turbina előtti gázhőmérsékletek tekintetében. Lehet ennél magasabb hőmérséklet értéket olvasni egyes szakirodalmakban, de ezek inkább találgatás szintjén vannak. Ezek a turbina előtti gázhőmérsékletek nem specifikusan helikopter gázturbinákra, hanem általánosan gázturbinákra vonatkoznak. Az 1. táblázatot elemezve, a második oszlop nyomásviszony értékei azt jelzik, hogy az adott turbina előtti hőmérséklet mellett a fajlagos hasznos munka (a táblázat első része), a termikus hatásfok (a táblázat utolsó része), illetve a kettő közötti optimum (a táblázat középső része)

⁶ Szűkítési tényező: becsült érték, a kompresszor áramlás szempontjából szabad belépési keresztmetszetének (a lapátozás figyelembe vételével) és a névleges belépési keresztmetszetének viszonya.

milyen nyomásviszonynál éri el a lehetséges maximumát a fenti feltételek mellett.

A fajlagos hasznos munka 127 kJ/kg-tól (1100 K, maximális termikus hatásfokra optimalizálva) 465 kJ/kg-ig (1800 K, maximális fajlagos hasznos munkára optimalizálva) terjedő értékeket vehet fel. A termikus hatásfok alsó értéke 21,13% (1100 K, fajlagos hasznos munkára optimalizálva), míg felső értéke (1800 K, maximális termikus hatásfokra optimalizálva) 37,17%. A kompresszor nyomásviszony 5,58-tól 28,42-ig terjed. Ami szembeütő, hogy magasabb turbina előtti gázhőmérséklet tartomány (hozzátartozó magas kompresszor nyomásviszonyokkal) milyen rövid hátsó fokozat lapáthosszakát eredményez (1400–1500 K-nél 0,01 m körüli értékek).

Már ez is határértéknek számít a lapáthossz szempontjából. Ez indokolja, hogy manapság általános elrendezésnek tekinthető, hogy a fenti feltételeknek megfelelő vagy ennél kisebb, 12–16-os kompresszor nyomásviszonyú hajtóművek utolsó centrifugális fokozattal készülnek. A hajtómű hosszmeretének csökkentésén felül ennek az oka, hogy az utolsó centrifugális fokozat politrópikus hatásfoka szintén viszonylag gyenge, de még mindig jobb, mint a 0,01 m-es lapáthosszal alatti axiális fokozatoké.

szállított levegő [kg/s]	középátmérő [m]	lapátrés [m]	fedettségi tényező [-]	axiális sebesség [m/s]	első fok lap. hossz [m]	
5	0,22	0,0003	0,98	120	0,0502	
A maximális fajlagos hasznos munkához tartozó értékek						
T_3 [K]	π [-]	utolsó fok lap. hossz [m]	η_{polk} [-]	wh(max) [kJ/kg]	η_t [%]	P [kW]
1100	5,58	0,0161	0,831	137,38	21,13	687
1200	6,53	0,0146	0,829	175,46	23,63	877
1300	7,54	0,0132	0,827	216,75	25,85	1084
1400	8,63	0,0121	0,825	261,03	27,85	1305
1500	9,79	0,0111	0,823	308,13	29,65	1541
1600	11,01	0,0103	0,821	357,89	31,28	1789
1700	12,29	0,0096	0,819	410,20	32,77	2051
1800	13,63	0,0089	0,817	464,94	34,14	2325
A maximális fajlagos hasznos munka és a maximális termikus hatásfok közötti optimum						
1100	6,75	0,0142	0,828	135,14	22,05	676
1200	8,10	0,0126	0,826	172,41	24,74	862
1300	9,58	0,0113	0,823	212,77	27,14	1064
1400	11,20	0,0102	0,821	256,04	29,30	1280
1500	12,95	0,0092	0,818	302,02	31,25	1510
1600	14,83	0,0085	0,816	350,58	33,03	1753
1700	16,84	0,0078	0,813	401,60	34,65	2008
1800	18,95	0,0072	0,810	455,00	36,14	2275
A maximális fajlagos termikus hatásfokhoz tartozó értékek						
1100	8,41	0,0123	0,825	127,11	22,46	636
1200	10,44	0,0107	0,822	161,08	25,24	805
1300	12,75	0,0093	0,819	197,60	27,74	988
1400	15,34	0,0083	0,815	236,50	30,00	1183
1500	18,21	0,0074	0,811	277,66	32,04	1388
1600	21,36	0,0067	0,807	320,94	33,90	1605
1700	24,76	0,0061	0,803	366,31	35,61	1832
1800	28,42	0,0055	0,799	413,71	37,17	2069

1. táblázat 5 kg/s levegőszállítású hajtómű várható adatai a turbina előtti gázhőmérséklet függvényében

Természetesen, mivel a hajtómű tömegárama, a kompresszor nyomásviszonya és politrópikus

hatásfoka közötti összefüggéseket vizsgáljuk, így ez utóbbi értékét előre nem került definiálásra, de megadtuk az első kompresszor fokozat (rés nélküli) politrópikus hatásfokát ($\eta_{pol0}=0,86$).

A 2. táblázat tartalmazza az 50 kg/s-os levegőfogyasztás esetében az aktuális értékeket. A fajlagos hasznos munka 132,5 kJ/kg-tól (1100 K, maximális termikus hatásfokra optimalizálva) 489,5 kJ/kg-ig (1800 K, maximális fajlagos hasznos munkára optimalizálva) terjedő értékeket vehet fel. A termikus hatásfok alsó értéke 22,69% (1100 K, fajlagos hasznos munkára optimalizálva), míg felső értéke (1800 K, maximális termikus hatásfokra optimalizálva) 40,53%. A kompresszor nyomásviszony 6,12-től 40,30-ig terjed. Természetesen a lapátmagasságok is jóval nagyobbak lesznek, még a 40,3-as kompresszor nyomásviszony esetében is az utolsó lapát magassága 0,0155 m.

szállított levegő [kg/s]	középátmérő [m]	lapátrés [m]	fedettségi tényező [-]	axiális sebesség [m/s]	első fok lap. hossz [m]	
50	0,6	0,0003	0,98	120	0,1879	
A maximális fajlagos hasznos munkához tartozó értékek						
T_3 [K]	π [-]	utolsó fok lap. hossz [m]	η_{pol} [-]	$wh_{(max)}$ [kJ/kg]	η_t [%]	P [kW]
1100	6,12	0,0556	0,851	145,41	22,69	7270
1200	7,24	0,0500	0,850	185,29	25,32	9264
1300	8,46	0,0449	0,849	228,60	27,68	11430
1400	9,79	0,0408	0,848	275,06	29,79	13753
1500	11,23	0,0371	0,848	324,52	31,72	16226
1600	12,77	0,0339	0,847	376,85	33,47	18842
1700	14,43	0,0313	0,846	431,85	35,08	21593
1800	16,19	0,0290	0,845	489,50	36,56	24475
A maximális fajlagos hasznos munka és a maximális termikus hatásfok közötti optimum						
1100	7,63	0,0482	0,850	142,66	23,84	7133
1200	9,31	0,0422	0,849	181,57	26,70	9079
1300	11,20	0,0371	0,848	223,74	29,28	11187
1400	13,31	0,0331	0,846	268,90	31,62	13445
1500	15,66	0,0297	0,845	316,94	33,74	15847
1600	18,24	0,0267	0,844	367,72	35,68	18386
1700	21,07	0,0242	0,842	421,13	37,47	21056
1800	24,12	0,0220	0,840	477,04	39,12	23852
A maximális fajlagos termikus hatásfokhoz tartozó értékek						
1100	9,91	0,0405	0,848	132,53	24,36	6626
1200	12,61	0,0344	0,847	167,20	27,36	8360
1300	15,80	0,0295	0,845	204,33	30,07	10217
1400	19,53	0,0255	0,843	243,77	32,54	12188
1500	23,82	0,0223	0,841	285,38	34,80	14269
1600	28,71	0,0196	0,838	329,06	36,87	16453
1700	34,20	0,0174	0,835	374,70	38,77	18735
1800	40,30	0,0155	0,833	422,42	40,53	21121

2. táblázat 50 kg/s levegőszállítású hajtómű várható adatai a turbina előtti gáz hőmérséklet függvényében

Ilyen tengelyteljesítményekre (13–18 MW, 1300–1500 K-es átlagosnak tekinthető turbina előtti gáz hőmérséklet mellett) nincs szükség helikopterek esetében, de ez nem azt jelenti, hogy ilyen kategóriájú vagy ennél is erősebb „turbohaft” hajtóműveket nem építenek ipari gázturbinaként, vagy kisebb hajók erőforrásaként. Példa erre a GE LM 2500-s hajtóműve (4. ábra),

amelynek tengelyteljesítménye ~ 24 MW.

Az 1. és a 2. táblázatokat összehasonlítva láthatjuk, hogy a kisebb méretű hajtóművek méretük révén hátrányban vannak nagyobb méretű társaikkal szemben fajlagos mutatóik tekintetében. 30 kg/s feletti levegőfogyasztás esetén a különbség nem jelentős. Ez alatt azonban minél kisebb lesz a hajtómű levegőfogyasztása, annál jelentősebben befolyásolja (rontja) a hajtómű fajlagos jellemzőit.



4. ábra Két GE LM 2500-as gázturbina képezi a fenti 127 m hosszú US Partiőrség hajójának erőforrását [4]

ÖSSZEGZÉS

A teljesítmény adatokból jól látható, hogy a helikopter gázturbinák is jelentős fejlődésen mentek keresztül. A magasabb kompresszor nyomásviszonnyal és turbina előtti gázhőmérséklettel, a FADEC⁷ rendszerrel jelentősen javultak ezeknek a hajtóműveknek a fajlagos és hatásfok mutatói. Ezek a pozitív változások mégis kisebbek, mint az egyéb kategóriákban elért eredmények. Ennek az oka, hogy ezek a hajtóművek viszonylag kisméretűek. Egy helikopter gázturbina 250–3500 kW tengelyteljesítményt szolgáltat 2–15 kg/s levegőszállítás mellett. Kompresszoruk kicsi, rövid lapátmagasságokat eredményezve, különösen a hátsó fokozatokban (esetleg utolsó centrifugál fokozattal). Ez jelentősen csökkenti a kompresszor politrópikus hatásfokát. Ezt tovább erősíti, hogy a tervezők a fajlagos hasznos munka növelésével igyekeztek csökkenteni a hajtómű tömegét és geometriai méreteit. Ez a kettősség erősen bünteti a helikopter hajtóműveket, különösen az alsó teljesítmény osztályban, ahol egyébként is kicsik a geometriai méretek. Mivel a nyomásviszony növelése tovább csökkenti a politrópikus hatásfokot, ezeknél a hajtóműveknél a kompresszor nyomásviszony általában nem haladja meg a ~ 15 -ös értéket. A viszonylag alacsony nyomásviszony és kompresszor politrópikus hatásfok miatt az elérhető termikus hatásfok általában nem több mint 35%, míg a nagyobb méretű gázturbinák (a tömegáram 30 kg/s felett) a termikus hatásfok általában magasabb, mint 40%. Jó példa erre az LM2500-as „turboshaft” hajtómű, amelynek hatásfoka ugyan nem éri el a 40%-ot, de 36%-os termikus hatásfoka jelentősen magasabb, mint a legjobb hatásfokkal rendelkező helikopter gázturbináké.

⁷ FADEC rendszer: Full Authority Digital Engine Control (teljes hatáskörű digitális hajtómű szabályzó rendszer).

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] LAWICKI Dave: Jet Fuel Characteristics, Boeing, 2002, e-doc, url: <http://www.docstoc.com/docs/7654823/JET-FUEL-FACTS> , (2013.07.05.)
- [2] VARGA Béla: Gázturbinás hajtóművek teljesítmény és hatásfok 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
- [3] DR. PÁSZTOR Endre: Szállító repülőgépek gázturbinás hajtóművei nyomásviszonya növelésének termikus problémái, 2007, Repüléstudományi Közlemények, p. 36-45.
- [4] GE Delivers LM2500 Gas Turbines to Austal USA, e-doc, url: <http://www.marinelink.com/news/delivers-turbines-austal348871.aspx>, (2013.03.15.)
- [5] Engine Manufacturers, Helicopter Annual, 2009, p. 57–63