

Ficsor Botond¹ – Hegedűs Ernő²

A 3D FÉMNYOMTATÁS ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA MALE-KATEGÓRIÁJÚ UAV-DÍZELMOTOR FEJLESZTÉSRE

**3D nyomtatással gazdaságosan gyártható könnyített
szerkezetű alkatrészek és részegységek a repülő
szakterületen**

INVESTIGATING THE APPLICABILITY OF 3D METAL
PRINTING FOR THE DEVELOPMENT OF A MALE
CATEGORY UAV DIESEL ENGINE

3D printing can be used to economically manufacture
lightweight components and subassemblies in the
aeronautical field.

[HTTPS://DOI.ORG/10.30583/2023-1-2-038](https://doi.org/10.30583/2023-1-2-038)

Összefoglalás

A cikk a 2022-2023. évi orosz-ukrán háborúban alkalmazott UAV-típusok alapján állapít meg fejlődési trendeket a felfegyverzett MALE UAV-kategóriában. Napjaink katonai UAV-alkalmazásának legfontosabb kategóriája a felfegyverzett MALE UAV, amelyre jó példa a török Bayraktar TB-2. 2023-ra felmerült az UAV-k tömeggyártásának igénye, ezért aktuális kérdés az UAV-részegységgyártás gyártástechnológiai vonatkozásainak kutatása, különös tekintettel az olyan új területekre, mint a 3D nyomtatás. A MALE UAV-kategória fejlesztésének egyik fontos területe az erőforrás. A gépjármű-turbódízelmotorok technikai fejlődése lehetővé tette, hogy ezeket az erőforrásokat minimális célszerű átalakítással könnyű repülőgépekbe és MALE UAV-kbe építsék be. Ez gaz-

¹ Ficsor Botond NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Katonai logisztika alapképzési szak, Haditechnikai specializáció, hallgató.

² Dr. Hegedűs Ernő alezredes, PhD, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Haditechnikai Tanszék, adjunktus. ORCID: 0000-0001-8457-5044

daságos UAV-tömeggyártási megoldás lenne, azonban a turbódízel-motorok tömege repülőszakmai szempontból még mindig nagy. A dízelmotorokhoz 3D nyomtatással könnyített szerkezetű alkatrészek és részegységek gyárthatók, amelyet a generatív tervezés, a topológiai-lag optimalizált kialakítás és a zárt belső cellák alkalmazása tesznek lehetővé. A cikk bemutatja a 3D fémnyomtatást, mint a gépjármű-turbódízelmotorok tömegcsökkentésének eszközét, amely fokozhatja elterjedésüket a repülőipari alkalmazásban.

Kulcsszavak: 3D nyomtatás, UAV-fejlesztés, turbódízelmotor, felfegyverzett MALE UAV, orosz-ukrán háború

Abstract

The article identifies trends in the development of the armed MALE UAV category based on the types of UAVs to be used in the Russian-Ukrainian war 2022-2023. Today's most important category of military UAV applications is the armed MALE UAV, of which the Turkish Bayraktar TB-2 is a good example. By 2023, the need for mass production of UAVs has emerged, so research into the production technology aspects of UAV component manufacturing is a topical issue, with a particular focus on new areas such as 3D printing. The engine is an important area for developing the MALE UAV category. Technical advances in automotive turbo-diesel engines have made it possible to incorporate these engines into light aircraft and MALE UAVs with a minimum of modification. This would be an economical UAV mass production solution, but the mass of turbo-diesel engines is still high from an aeronautical-engineering point of view. For diesel engines, 3D printing can be used to produce lightweight structural parts and sub-assemblies, enabled by generative design, topologically optimized design, and closed internal cells. This article presents 3D metal printing to reduce the mass of automotive turbodiesel engines - which could increase their uptake in aerospace applications.

Keywords: 3D printing, UAV development, turbo diesel engine, armed MALE UAV, Russian-Ukrainian war

Bevezetés

Napjaink hadviselését tömeges UAV-alkalmazás jellemzi (UAV: Unmanned Aerial Vehicle – Pilóta nélküli légi jármű). 2023-ra felmerült az UAV-k tömeggyártásának igénye. „Afganisztánban, Irakban, Koszovó-

ban ... a drón-alkalmazás, amelyet most látunk az orosz–ukrán háborúban, még nem jelent meg.”³ Korszakhatárhoz értünk. A változás a hadviselésben – melyet az UAV-k tömeges alkalmazása hozott el – 2020-2023 között szinte kézzelfoghatóan tapintható. A 2020. évi azeri–örmény háborúban magas örmény harckocsiveszteségek és gyors lefolyású háború jellemezte az UAV-k tömeges bevetését.⁴ A 2022-2023. évi orosz–ukrán háború során pedig alapjaiban változtatja meg a korszerű hadviselést az UAV-k elterjedése és széleskörű alkalmazása. Az UAV-alkalmazás mennyiségi mutatói az orosz és az ukrán haderőben ma még csak becsülhetők – pontos számot nem tudunk.

Az orosz alkalmazású UAV-típusok összmennyisége mintegy 3000 db. Az orosz hadiipar UAV-gyártókapacitása véges, a polgári (pl. mezőgazdasági stb.) drónok átalakítását tömegesen nem alkalmazzák, ehelyett importálnak. Példaként: a 2022 októberében megindult tömeges orosz dróncsapáshoz iráni gyártmányú Shahed-136 kamikaze drónokat és/vagy azok orosz klónját, a Gerad-2 típust használták.

Azonban az ukrán haderő UAV-inek száma becsülhetően mintegy 100 000 lehet – eddig ilyen tömeges drónalkalmazással járó háborúra még nem volt példa. Az átalakított polgári drónok aránya a teljes UAV-flottán belül jelentős. A polgári drónok katonai célú átalakítását – más cégek mellett - pl. az Aerorozvidka ukrán cég végzi, ipari méretekben.

Az 1. és 2. táblázatok adatai alapján megállapítható, hogy a felfegyverzett MALE (Medium-Altitude Long-Endurance – közepes magasságú, nagy hatótávolságú) UAV-kategóriát (Bayraktar, Orion, Mohajer-6, Forprost-RU, Shahed-129 stb.) mind az orosz, mind az ukrán haderő alkalmazza a 2022-2023. évi orosz–ukrán háborúban.

Fel kell hívni a figyelmet arra is, hogy a fejlesztések homlokterében egyebek mellett immár a lopakodóképesség áll, melyet számos megoldással (kompozitanyagok, speciális sárkányszerkezeti geometria, behúzható futómű, belső bombakamra, bevonatok stb.) fokozhatnak (pl.: GA-ASI Eaglet, amely típust már lopakodó sárkányszerkezeti geometria jellemez).

³ Böröndi Gábor: Az orosz–ukrán háború új helyzetet teremtett, és erre a Magyar Honvédségnek is fel kell készülnie. Interjú. Híradó.hu 2023.05.09.
<https://hirado.hu/belfold/cikk/2023/05/09/borondi-gabor-az-orosz-ukran-haboru-uj-helyzetet-teremtett-es-erre-a-magyar-honvedsegnek-is-fel-kell-keszulnie>
(Letöltve: 2023.05.30.)

⁴ A jelenlegi generációs harckocsikonstrukció nincs felkészítve felülről érkező csapásra, és ez a felfegyverzett UAV-k, loitering munition-ok (cirkálólőszerek) harcászati eredményességének egyik oka.

AZ OROSZ-UKRÁN HÁBORÚBAN ALKALMAZOTT FONTOSABB OROSZ UAV-TÍPUSOK

1. számú táblázat

Típus (angol átírásban)	Gyártó	Képesség
Mikojan Skat	orosz	merevszárnyú gázturbinás fel-fegyverzett lopakodó UAV
Mirage-532	iráni	loiter munition (cirkálólövedék ⁵)
Zala Lancet-3	orosz	loiter munition (cirkálólövedék)
Forpost-RU	orosz	felderítő/fegyveres változat
Sokol Altius (Altair)	orosz	merevszárnyú felfegyverzett
Lastochka-M	orosz	merev szárnyú katapultindítású felfegyverzett elektromos hajtású
Merlin	orosz	felderítő UAV
Ohotnyik	orosz	merevszárnyú gázturbinás fel-fegyverzett lopakodó UAV
Shahed-129	iráni	merevszárnyú felderítő/felfegyverzett UAV
Takhion	orosz	merevszárnyú
Eleron-3SV	orosz	merevszárnyú felderítő/célmegjelölő
Zala 421-08	orosz	merevszárnyú mikro UAV
Kronshtadt Orion és változatai: Heliosz és Szíriusz	orosz	merevszárnyú felfegyverzett
Qods Mohajer-6	iráni	merevszárnyú felfegyverzett
Orlan-10	orosz	merevszárnyú tűzérzéki felderítő
Shahed-136 (ill. orosz változat: Gerad-2)	iráni	kamikaze drón
Mugin-5	kínai	merevszárnyú átalakítva

⁵ A szó szerinti fordításban „cirkálólövedék” egyfajta járőröző és célkereső kamikaze drón.

**AZ OROSZ-UKRÁN HÁBORÚBAN ALKALMAZOTT FONTOSABB UKRÁN
UAV-TÍPUSOK**

2. számú táblázat

Típus	Gyártó	Képesség
Black Hornet	brit	mikrodrón
Mugin-5	kínai	merevszárnyú felderítő
FlyEye	WB Electronics SA	kézi indítású felderítő UAV
Warmate	lengyel	loither munition (cirkáló-lövedék)
Phoenix Ghost	amerikai	loither munition (cirkáló-lövedék)
Bayraktar TB-2	török	merevszárnyú felfegyverzett UAV
Switchblade 300 és 600	amerikai	loither munition (cirkáló-lövedék)
DJI Mavic 3	kínai	quadroopter átalakítva
Quantum Systems Vector/Scorpion	német	VTOL UAV
Swarmly Poseidon H10/H6	ciprusi	merevszárnyú felfegyverzett
Tu-141 Sztrizs	ex-szovjet	gázturbinás UAV
Leleka-100	ukrán	merevszárnyú UAV
A1-SM Fury	ukrán	katapultos-ejtőernyős
ST-35 Silent Thunder	amerikai	loitering munition (cirkálólövedék)
Boeing Insitu Scan Eagle	amerikai	merevszárnyú UAV
UKRJET UV-22	ukrán	merevszárnyú felfegyverezhető
PD-2	ukrán	merevszárnyú VTOL felderítő

Azonban arra is célszerű rámutatni, hogy az ukrainai orosz hadművelet kezdete óta az ukrán fegyveres erők 3000 drónját semmisítették meg az oroszok – az UAV tehát sebezhető.



1. számú ábra. MALE-kategóriájú, turbódízelmotoros orosz Orion UAV és Kornet rakéta⁶

Az UAV okozta változások a hadviselésben az alábbi területeken realizálódnak:

- hangsúlyossá vált a felfegyverzett UAV-k alkalmazása (pl.: Bayraktar TB2);
- az UAV tömeges (több száz, több ezer nagyságrendű) alkalmazása a jellemző, melynek alapja – mennyiségi szempontból – a polgári drónok átalakítása, felfegyverzése);
- az azeri-örmény háborúban megjelent 60-70 db UAV vegyes, lépcsőzött harcrendben (katonai szervezetben: ezred, zászlóalj) szervezése és alkalmazása – azaz megkezdődött az UAV „fegyvernemmé válásának” folyamata;
- jellemző a loitering munition (cirkáló lövedék) UAV-kategória megjelenése, elterjedése.

⁶ Orion-E UAV showcased with Kalashnikov Vikhr missile at MAKS
<https://www.armadainternational.com/2021/08/orion-e-uav-showcased-with-kalashnikov-vikhr-missile-at-maks/> (Letöltés: 2023.06.13.)



2. számú ábra. MALE-kategóriájú, 115 LE-s dugattyús motorral hajtott iráni Mohajer-6 UAV négy rakétával⁷

Az UAV-alkalmazás tömegessé, hatékonyá válik a modern háborúban, azonban hangsúlyozni kell, hogy az UAV nem „csodafegyver”, vannak gyengeségei, ezért konstrukciója, illetve gyártástechnológiája egyaránt további folyamatos fejlesztést igényel. Például a felfegyverzett Bayraktar TB-2 MALE UAV jelentős eredményeket ért el az azeri-örmény háborúban, majd az orosz-ukrán háború első hónapjaiban is, ezt követően azonban – az orosz légvédelem, ill. C-UAV tevékenységeinek hatékonyabbá, szervezettebbé válása miatt – a Bayraktar veszteségei növekedni kezdtek.

Az utóbbi évtizedben ugyanis fejlődik a Counter UAV (C-UAV: Counter-UAV – UAV-elleni eszközök) eszközrendszere is, és egy olyan fejlesztési versenynek lehetünk tanúi, mint korábban (1916-tól) a harckocsi és a páncéltörő eszközök mai napig tartó, versenyt futó fejlődése (pl. Javelin páncéltörő rakéta). Ha tehát ma kezdene el egy haderő vagy gyártó cég, illetve intézet Bayraktar kategóriájú UAV-t fejleszteni, akkor a fentiek figyelembevételével már túl kellene haladnia a Bayraktar képességeit, paramétereit.

⁷ Qods Mohajer-6. https://en.wikipedia.org/wiki/Qods_Mohajer-6
(Letöltés: 2023.06.13.)



3. számú ábra. A Forpost-RU UAV-t felderítő és fegyveres változatban is üzemeltetik, utóbbinál a 85 LE-s motor 120 kg fegyverzet hordozását teszi lehetővé⁸

Fejlesztést célszerű végezni a védettség, a lopakodási képesség, a sebesség, a hatótávolság/járőrözési idő és a függeszthető fegyverzet tömegének/hatótávolságának növelése területén. Mindeközben fel kell készülni a nagy sorozatú gyártásra, lehetőleg minél több szabványos alkatrészszel és lehetőség szerint mérsékelt áron. Vajon megvalósítható a gyakran egymásnak ellentmondó, nehezen teljesíthető követelményekkel rendelkező fejlesztés? Mennyiben támogatja ezt:

- a korszerű anyagtechnológia (pl. a kompozitanyagok, kerámiák stb.) fejlődése;
- a korszerű gyártástechnológia (pl. a 3D nyomtatás, robotizált gyártás stb.) fejlődése?

Ezekre a kérdésekre törekszik választ adni jelen cikk. A tanulmány kiemelt területként vizsgálja a felfegyverzett drónok szerepét, különös tekintettel a Bayraktar UAV-kategóriára. Emellett kiemelt figyelmet szentel a fém 3D nyomtatás technológiai fejlődésének is – hiszen e területen a fejlődés igen dinamikus.⁹

⁸ Таёжный «Форпост»: военные дроны защитят Сибирь от пожаров и паводков <https://iz.ru/1010829/anton-lavrov-aleksei-ramm-roman-kretcul/taezhnyi-forpost-voennye-drony-zashchitat-sibir-ot-pozharov-i-pavodkov> (Letöltve: 2023.06.13.)

⁹ Hisham Abdel-Aal PhD.: Additive Manufacturing of Metals: Fundamentals and Testing of 3D and 4D Printing. 1st Edition. McGrawHill, new York, 2021. 480. p. ISBN 1260464342 illetve Ian Gibson - David Rosen - Brent Stucker – J. B. Speed: Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Department of Industrial Engineering, University of Louisville, Louisville, KY USA. Springer, 2nd. ed. 2015. ISBN: 978-1493921126



4. számú ábra. Az Aurora Flight Sciences UAV szerkezetének 80%-át 3D nyomtatással állították elő¹⁰

Általában a 3D nyomtatott alkatrészek alkalmazásának előnyei az UAV-kon sokrétűek, de elsősorban a szerkezetek tömegcsökkentése érhető el ezzel a gyártástechnológiával. Például a Markforged Onyx folyamatos szénszálerősítésű, vágott szénszállal dúsított PA6 mátrixanyag szilárdsága mintegy megközelítheti az öntött alumíniumét, ill. komplex geometriákkal alkalmas kompozit szerkezetek csomópontjainak kialakítására, szerkezeti tömeg csökkentésére – írja az Aircraft Technology című repülőgéptervezéssel foglalkozó könyv 2018-ban.¹¹ Vagy megemlíthető az Aurora Flight Sciences UAV gázturbinás hajtású, tolóerővektor-vezérléses drónjának gázsugárkormányja, amely magas hőállóságú 3D nyomtatott fém (melynek előállítására az ADAM - Atomic Diffusion Additive Manufacturing technológiájú 3D fémnyomtatás fokozottan alkalmas, akár inconel ötvözzel (nikkel tartalmú hőálló ötvözet). Utóbbi megoldás – az aerodinamikai elven működő kormánysszervek kitérítési mértékének csökkentésével - a lopakodóképesség növelésében, a manőverezőképesség fokozásában és a kormányzás egyszerűsítésében is szerepet kaphat. (Az NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Haditechnikai Tanszék ilyen ADAM-elven működő, Markforged Metal X fémnyomtatóval foly-

¹⁰ 'World's fastest' 3-D printed drone takes flight.
<https://www.cnbc.com/2015/11/09/worlds-fastest-3-d-printed-drone-takes-flight.html> (Letöltve: 2023.06.13.)

¹¹ Melih Cemal Kushan: Aircraft Technology. IntechOpen, 2018. pp. 180.
ISBN-13: 978-1789236446

tat kísérleteket, kutatásokat.) Ugyanakkor az additív gyártástechnológiának a dróniparban betöltött jövőbeni lehetséges kiemelt szerepére utal az is, hogy az Aurora Flight Sciences UAV szerkezetének 80%-át 3D nyomtatással állították elő (4. ábra).

1. A Bayraktar TB-2 szerkezete, alkalmazásának eredményessége és a típus által elszenvedett veszteségek a 2022-2023. évi orosz-ukrán háborúban

A Bayraktar TB-2 kompozitanyagszárnyainak fesztávolsága 12 méter, a gép hossza 6,5 méter, maximális felszálló tömege 650 kg. Rádióhatótávolsága 150 km, ilyen távolságból biztosított a széles sávú adatátvitel. A fedélzetén lévő 300 liter üzemanyaggal (benzin) 22 órán keresztül képes repülni. A motor egy háromtollú, változtatható állásszögű tolólégcsavart forgat, amely maximálisan 220 km/h sebesség elérését biztosítja; a gazdaságos utazósebessége 130 km/h. A Bayraktar felfegyverzett MALE UAV eredményességének fő oka: megfelelő mennyiségű fegyverzet, 60 kg rakéta és bomba megfelelő távolságra – mintegy 200 km hatótávolság mellett - kijuttatva. A felfegyverezhető változat szárnyai alatt négy függesztési pontot alakítottak ki. Két kis tömegű lézervezérlésű bombát és két 70 mm-es irányított bombát hordoz az egyszerű szerkezetű Bayraktar drón, amely az azeri-örmény és az orosz-ukrán háborúban is bebizonyította, hogy képes harckocsik megsemmisítésére is.



5. számú ábra. Bayraktar TB2 fegyverzete¹²

¹² Drónháború. Jetplanes. <https://jetplanes.blog.hu/2020/12/03/dronhaboru>
(Letöltve: 2023.06.13.)

A Bayraktar fegyverzetét képező MAM típusú rakétákat a török Roketsan cég szállítja. A 22 kg-os MAM-L félaktív lézeres önirányítású bomba (Mini Akilli Mühimmat Smart Micro Munition) egy rakétaformájú, 1 méter hosszú, 16 cm átmérőjű bomba, amely 22 kg tömegű, 8 km a hatótávolsága (14 km beépített navigációval). Lézeres rávezetésű, ket-tős robbanófeje kumulatív hatással rendelkezik reaktív páncéllal felszerelt harckocsik ellen. Több különböző harci résszel alkalmazható, (repsz-romboló, páncéltörő). A 70 mm-es MAM-C félaktív lézeres önirányítású bomba 7 kg tömegű, a TB-2 szenzortornyában lévő girosztabilizált, kombinált lézeres távolságmérő és célmegjelölő segítségével „látják” a becsapódás kijelölt pontját. Az eszköz 8 km hatótávolságú. A 300 liter üzemanyag feltöltött mennyiségének felére csökkentésével a függeszthető fegyverzet tömege 150 kg-ig növelhető. Fegyverzete nem a harci repülőgépeken széles körben alkalmazott méretkategóriába tartozik, hanem annál jóval kisebb méretű – egyúttal jóval kisebb darabszámban gyártott – pusztító eszközökből tevődik össze. Erőforrása egy osztrák gyártmányú Rotax 912 típusú, négyhengeres benzinüzemű boxer hengerelrendezésű motor. Az 1211 cm³ hengerűrtalmú injektoros erőforrás vízhűtéses, maximális teljesítménye 74 kW (100 LE). A fejlett optikával felszerelt pilóta nélküli repülőgép 8000 méteres magasságban is tud működni. A maximális fordulatszáma 5800 1/min, a légszűrő 2400 percenkénti fordulatszámon üzemel. Futóművének fékrendszere a francia Berlinger Aero, az üzemanyagellátó rendszere a brit Andair terméke. Amerikai gyártmányú az EnerLinks III típusú adatátviteli modul (ViaSat), az LN-200 inerciális (Grumman) és a GCR 255 GPS (Garmin) navigációs berendezés, illetve a fedélzeti rendszerek csatlakozói és elosztói a szintén amerikai MilesTek gyártmányai. Az MX-15D-SW nappali és IR célmegfigyelő és kijelölő rendszer a kanadai WesCam-től származik, amely cég az amerikai L3Harris beszállítója. Számottevő még a német részegységek aránya. A magasságmérő pl. a Hensoldt terméke.

A törzs alatt felszerelt Wescam CMX-15D szenzortorony (FLIR-kúpola) televíziós, illetve infravörös képalkotó kamerával is rendelkezik, és HD minőségű színes képet biztosít a gép alatti területről. Nem tervezték behúzhatóra a gép futóműveit, kivéve az orrfutót, mivel az zavarta volna a kamerák működését. A megrendelő igénye alapján lehetséges fedélzeti lokátor (egyes források szerint külső függesztményként EO/IR/LD Multi Mode AESA radar) beépítése is.¹³

¹³ Hegedűs Ernő - Hennel Sándor - Végvári Zsolt: A Bayraktar drónok I-II. rész. Haditechnika 57. évf. 2023. évi 1. szám pp. 35.-39.

Kijev legalább 66 db Bayraktar TB-2-es drónt kapott Törökországtól (a teljes leszállított mennyiség valószínűleg 100 db alatt van). Az ukránok szerint a Bayraktar-ok összesen 120 harckocsit és egyéb „kemény” célt lőttek ki. Azonban a típus sebezhetőnek bizonyult, veszteségei növekedtek. A probléma: C-UAV-eszközök és -tevékenység terjedése, hatékony légvédelem, elektronikai harceszközök. Az egyik leghatékonyabb C-UAV-eszköz az orosz Krasukha-4 típusú elektronikai hadviselésre szolgáló berendezés, amely a zavaráson túlmenően képes az elektronikai eszközök maradandó károsítására is, maximálisan 300 km hatótávolságig, és amelyhez igazolt Bayraktar drónmegsemmisítés köthető.¹⁴ Az orosz haderőnek is van olyan korszerű légvédelmi rendszere, amely semlegesíteni képes a Bayraktart. Ilyen a Pancir-Sz1 önjáró csapatlégvédelmi, illetve az Sz-400 „Triumf” mobil légvédelmi rakétarendszer, amely parancsnoki járműből, föld-levegő rakétarendszerekkel felszerelt szállító-indítójárművekből és lokátoros járművekből tevődik össze. Egy teljes rendszer 72 indítócsőből és 384 föld-levegő rakétából áll. Rakétái 250 kilométeres lőtávolsággal rendelkeznek, ballisztikus rakéták, cirkálórakéták semlegesítésére is alkalmasak. Ezeket kiegészítik még 9M96E-es típusú, aktív radarkövetéssel működő berendezések, melyek gyorsan mozgó merevszárnyas repülőgépek ellen hatékonyak, illetve elsősorban drónok ellen használatos 9M96-es indítók. Az orosz haderő több tucat TB-2-es drónt lőtt le. *A lassú, könnyen észlelhető drón könnyű prédává válhatott az orosz légvédelmi rendszerek számára. „Az orosz–ukrán háborúban a TB2 drónt elsősorban a harckocsik ellen vetették be, de az orosz logisztikai oszlopokat is ezzel pusztították.”*¹⁵ Az ukránok a kezdeti sikerek után „kemény célpontok” helyett logisztikát támadnak Bayraktarral. Számos sikeres Bayraktar UAV-támadást sikerült végrehajtani kevésbé védett orosz logisztikai gépjárműoszlopok ellen.

Megoldás lehet a Bayraktar UAV – illetve általában a felfegyverzett MALE UAV-kategória – sebezhetőségére a folyamatos célirányos fejlesztése, elmozdulás hatékonyabb (nagyobb tömegű és hatótávolságú) fegyverzet felé, a védettség növelése akár a lopakodóképesség, akár a sebesség növelésével.

¹⁴ Horváth József: Az A2/AD környezet és az elektronikai hadviselés. Sereg Szemle. XV. évfolyam, 2. szám, 2017. április - június, 192. o.

¹⁵ Major Gábor – Békési Bertold: A pilóta nélküli légijárművek felhasználási lehetőségei háborús körülmények között az orosz-ukrán konfliktus árnyékában. Polgári Védelmi Szemle 2023. évi 15. Különszám 304. o.



6. számú ábra. A Bayraktar felfegyverzett drón építésénél a könnyű-repülőgép-építésben elterjedt technológiákat és fődarabokat (motor, légcsonar, futóműelemek) alkalmaztak, amely alacsony szinten tartja a költségeket, és lehetővé teszi a tömeggyártást¹⁶

Fejleszthető-e a Bayraktar kategóriájú UAV harcászati képessége? Fejlesztést célszerű végezni az alábbi területeken:

- *fokozni kell a felfegyverzett UAV védeltségét* akár a lopakodóképesség, akár a sebesség, vagy mindkettő növelésével, például behúzható futómű és belső fegyverkamra alkalmazásával, amely hatékonyan csökkenti a légellenállást és a radar-reflexiót is – azonban ez az UAV sárkányszerkezetének tömegnövekedésével jár, mely növekedési folyamatot technológiai és konstrukciós módszerekkel korlátok között kell tartani;
- az UAV hőképeznek egyidejű csökkentése is célszerű – melynek fő forrása a motor, illetve annak kipufogórendszere és veszteségheí;
- az UAV védeltségét az is növeli, ha fegyvereit (pl. rakéta) nagyobb távolságról képes indítani, ez azonban rendszerint nehezebb fegyverek alkalmazását igényli; ez egyébként is aktuális kérdés, mivel a jelenleg a Bayraktar drónon alkalmazott fegyverzet olyan kisméretű bombákból és rakétákból áll, amelyeket a légierők által széles körben alkalmazott fegyverzetnél jóval kisebb darabszámban gyártanak (emiat árak fajlagosan magas, logisztikai lehetőségeik korlátozottak);

¹⁶ Foreign Import of Locally-Built Bayraktar TB-2 Turkish Drone Parts.
<https://www.1lurer.am/en/2020/10/28/Foreign-Import-of-Locally-Built-Bayraktar-TB-2-Turkish-Drone-Parts/346626> (Letöltve: 2022. október 21.)

- fel kell készülni a korábbinál jelentősebb mennyiségű UAV legyártására többszáz darabos nagyságrendben, azonban úgy, hogy a gyártás költsége ne növekedjen, hanem inkább csökkenjen (pl. kommersz sorozatgyártású fődarabok, alkatrészek beépítésével).

A felsorolt követelmények, fejlesztési célok számos nehezen teljesíthető ellentmondást is magukban hordoznak:

- növelhető-e a hasznos fegyverzeti tömeg úgy, hogy eközben nem nő az UAV szerkezeti tömege;
- növelhető-e a maximális repülési idő a tartálytérfogat (üzemanyagtömeg) növelése nélkül;
- a Bayraktar 300 liter (210 kg) benzint és csak 60 kg fegyverzetet hordoz; lehetne-e ezen az arányon kedvezőbb irányban változtatni.

Még sok fejleszthető terület merülhet fel: lopakodóképesség, maximális sebesség stb. Jelen tanulmányban kiválasztottunk egy fődarabot – a motort –, és megvizsgáltuk annak egyes fejlesztési, illetve gyártási vonatkozásait.



7. számú ábra. Balra: az MQ1 Predator C Gray Eagle, erőforrása Mercedes-alapú Thielert turbódízelmotor. Jobbra: Orosz Altius UAV Audi-alapú V-12 henger-elrendezésű RED-03 típusjelzésű dízelmotorja¹⁷

¹⁷ U.S. Plans To Sell Armed MQ-1C Gray Eagle Drones To Ukraine 'In The Coming Days'. <https://theaviationist.com/2022/06/02/u-s-plans-to-sell-armed-mq-1c-gray-eagle-drones-to-ukraine-in-the-coming-days/> (Letöltve 2023. 06.13.) illetve Russia Unveils New Mega-Drones at MAKS 2019 https://defense-update.com/20190828_russia-unveils-new-mega-drones-at-maks-2019.html (Letöltve 2023. 06.13.)

2. A közepes kategóriájú felfegyverzett UAV-k gépjármű-eredetű turbódízelmotorjainak lehetséges fejlesztési iránya, a 3D nyomtatás

2.1. Az UAV-kban alkalmazott turbófeltöltött járműdízelmotorok

A dízelmotorok a harmincas évektől – a Junkers ellendugattyús két-ütemű dízelmotor sorozatgyártásának megkezdésétől – vannak jelen szórványosan a repülésben. A NASA a 80-as években vizsgálta a könnyű-repülőgépeken alkalmazható dízelmotorok kérdését.¹⁸ A kilencvenes évektől az UAV-gyártók megkezdtek a léghűtéses turbódízelmotorok alkalmazását az UAV-kon.¹⁹ Az utóbbi két évtizedben – a gépjármű turbódízelmotorok teljesítmény/tömeg mutatóinak javulása eredményeképpen – néhány gyártó (Thilert, Rhanklin, Austro Engine stb.) megkezdte egyes Mercedes, Audi stb. turbódízelmotorok repülőgép-motorra alakítását.²⁰ E folyamat tízes nagyságrendű UAV-gyártó esetében vezetett el oda, hogy – a magas járőrözési idő, nagy hatótávolság követelménye szerint – turbódízel gépjárműmotor-eredetű erőforrással szerelje fel a pilóta nélküli légi járművét.

Napjainkban a könnyű repülőgépekbe²¹ és a közepes, illetve annál nehezebb UAV-kba (esetenként helikopter-UAV-kba²²) gyakran szerelnek kerozin-üzemanyag felhasználására is alkalmas gépjármű-dízelmotort,

¹⁸ Brouwers P. Alex: 150 and 300 kW lightweight diesel aircraft engine study NASA, 1980. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19800011788/downloads/19800011788.pdf>

¹⁹ Barna Hanula, Stephan Tafel, Andreas Mück & Christian Schlüter: Schnelllaufender Hochleistungs-Dieselmotor für kleine Flugzeuge. MTZ - Motortechnische Zeitschrift volume 64, 2003/4, pages 286–296.; illetve Steven Weinzierl, Roger Wildemann, Barna Hanula: The Design and Development of a Light-Weight, High-Speed, Diesel Engine for Unmanned Aerial Vehicles. SAE Transactions, SAE International, Vol. 111, Section 3: JOURNAL OF ENGINES (2002), pp. 486-497. <https://www.jstor.org/stable/44743077> ;

²⁰ Stephen Pope: Diesel Aircraft Engines Revolution. Flying Magazine. Retrieved 20 April 2017.

²¹ *Dízelüzemű könnyűrepülőgépek*: Alapvetően dízelmotorral épül: Diamond DA-40, DA-42, DA-62, Piper's PA-28, Otto Aviation Group Celera 500L. Dízelmotoros könnyűhelikopterek: DELTA D-2, Agusta-Bell AB 212, Airbus Helicopters H120 Colibri, Rotorway. Egy változata épül dízelmotorral: Jak-52, Cessna 172, Cessna 182, Piper Cherokee, Socata TB-20, Pilatus PC-6/B2.

²² *Dízelmotoros helikopter UAV*: Airbus Tanan 300, Saab Skeldar, Airbus Helicopters VSR700, TGR Helicorp Snark UCAV.

ezért cikkünkben e területtel foglalkozunk. Habár léteznek kimondott repülőgépmotorok, melyeket dízelüzemre terveztek²³, a gyártók többségében mégis inkább gépjárműmotorból átalakított dízelüzemű motorokat építenek be.²⁴ Cél az is, hogy a fejlesztést követően, a gyártás során – járműiparból származó fődarab (motor) beépítésével - alacsony szinten legyen tartható a gyártás költsége. Habár a gépjármű-dízelmotorok fejlődése, azok turbófeltöltővel való felszerelése, a modernizálódó szerkezeti anyagok és gyártástechnológia a turbódízelmotorok teljesítmény-tömeg mutatóinak kedvezőbbé válásához vezettek az utóbbi évtizedben – amely lehetővé tette e motorok repülőipari alkalmazását –, tömegük mégis repülőipari alkalmazásuk egyik korlátja.²⁵ A turbódízelmotorok tömegcsökkentésének egyik technológiai lehetőségét pedig éppen a 3D nyomtatás technológiájának elterjedése szolgáltathatja a jövőben, melyre cikkünkben számos gyakorlati példát sorolunk fel.

A 3. sz. táblázat alapján megállapítható, hogy a dízelerőforrással szerelt UAV-k közül a többség gépjármű-eredetű turbódízelmotort alkalmaz. Látható az is, hogy a Bayraktar TB-2 UAV-t követően a török Baykar gyártó is a dízelmotor alkalmazása felé fordult az Anka-S és Aksungur típusoknál.

Az UAV gépjárműturbódízel-eredetű erőforrásával elérhető előnyök:

- a dízelmotor (gazdaságossági, effektív) hatásfoka – a benzinüzemű Otto-motor 24%-os hatásfokával szemben másfélszer magasabb, mintegy 36%;
- az alacsony fajlagos fogyasztás nagy hatótávolságot, jelentős járőrözési időt jelent;
- olcsóbb a tömeggyártott gépjármű-erőforrás, összevetve pl. a Lycoming, Rotax repülőmotorokkal (amely nem csak dízelmotorra áll fenn, azonban azok fokozottan alkalmasak katonai UAV-üzemre, és kedvezőbb hatótávolságot nyújtanak);
- a dízelmotor kerozinüzemre is alkalmas (NATO Single Fuel Concept, STANAG 4362);

²³ *Dízel repülőgépmotor-gyártók*: Delta Hawk, Wilksch Airmotive, CMD, Technify Motors, DieselJet, Continental Motors, Lycoming, Teos, Zoche aero-diesel, Gemindiesel, SMA Engines (a kis hengerűrtartalmú, részben szikragyújtású UAV „fél-dízelmotorokat” nem felsorolva).

²⁴ *A repülőüzem követelményei szerint módosított dízeljárműmotorokat forgalmazó cégek*: Thielert, Rhenkline RED Aircraft GmbH, Austro Engine.

²⁵ Hannel Sándor: Dízelmotorok felhasználhatóságának lehetőségei a katonai repülésben. Honvédségi Szemle, 65. évf. 2011. évi 5. szám pp. 24-29.

- csekély a hőképe (gázturbinához, Otto-motorhoz képest);
- „robbanásbiztosabb” az üzemanyaga (a benzinhez képest).

NÉHÁNY TURBÓDÍZELMOTOROS UAV-TÍPUS

3. számú táblázat

Típus	Turbódízel-erőforrás típus/teljesítmény (Eredeti gépjármű- gyártó)	Járőrö- zési idő	Függeszthető fegyverzet, hasznos teher
MQ1 Predator C Gray Eagle	Thielert Centurion 125 LE turbódízel (Mercede- des-eredetű)	50 h	360 kg
TAI ANKA S	TEI PD170 170 LE tur- bódízel (Thielert-, ill. Mercedes-eredetű)	30 h	360 kg
CAI HONG CH-5 R	400 LE turbódízel	60 h	500 kg
RQ-5 HUNTER	2x 66 LE 3 hengeres turbódízel (Mercedes- eredetű)	30 h	100 kg
TAI AKSUNGUR	2x PD170 340 LE dízel (Thielert-, ill. Mercedes- eredetű)	50 h	750 kg
Aurora FS ORION	2x Austro Engine AE300 170 LE dízel (Mercedes-eredetű)	120 h	930 kg
Sokol Altair (Altius)	2x500 LE Raikhlín RED- 03 turbódízel (Audi V- 12-eredetű)	24 h	1000 kg
SHADOW M2 (katapultindítású)	Lycoming t.dízel 60 LE	16 h	60 kg
Super Heron	200 LE turbódízel (Fiat-eredetű)	45 h	250 kg felderítőeszköz
Airbus Helicopters VSR700 helikopter UAV	Thielert Centurion 2.0 155 LE turbódízel (Mercedes-eredetű)	10 h	100 kg

Az előnyök konkrét felhasználása, hasznosítása az UAV képességeit illetően akár a nagyobb függeszthető fegyvertömeg is lehet, ekkor a turbódízelmotoros UAV adott távra kevesebb üzemanyagot hordozhat egy Otto-motoros UAV-nál. De lehet alkalmazási előny a jelentősen nagyobb hatótávolság is.

2.2. A 3D fémnyomatás tömegcsökkenést eredményező alkalmazása gépjármű-turbódízelmotorok fejlesztésénél

2.2.1. 3D nyomtatott dízelmotor fejlesztése Németországban: 21% tömegcsökkenés

Németországban a "Leichtbau Motor" (könnyűszerkezetes motor) kutatási projektben szelektív lézerolvasztással készítettek belsőégésű motoralkatrészeket, amely közel 21%-os tömegcsökkentést eredményezett.²⁶ Emellett a hűtőrendszer és az olajkör hatékonyságát is növelték. A dízelmotor hengerfejét és forgattyúházát alumíniumöntés helyett szelektív lézerolvasztással állították elő. Poralapanyagként az AlSi10Mg alumíniumötvözetet használták. Ebből az anyagból additív módon gyártott részegységek mintegy 21%-kal könnyebbek. 3D nyomtatással készült a dugattyú is. A dízelmotor egyes elemeit szálerezősítésű kompozitanyagból készítették.



8. számú ábra. A hengerfejben lévő keresztáramú hűtőrendszer kék színnel ábrázolva²⁷

²⁶ Alexander Stark: 3D printed engine is 20 percent lighter. ETMM 2021.02.09 (<https://www.etmm-online.com/3d-printed-engine-is-20-percent-lighter-a-998651/>) Megtekintve: 2023.01.25

²⁷ Alexander Stark: 3D-printed engine is 20 percent lighter <https://www.etmm-online.com/3d-printed-engine-is-20-percent-lighter-gal-998651/?p=6#gallerydetail> (Letöltve: 2023.02.04.)

A továbbfejlesztett olajkör hidegindításkor és normál üzemben egyaránt előnyöket biztosít. A nyomásvesztést 22%-kal csökkentették a hengerfejen. Egy fordított szifon megakadályozza, hogy az olaj lefolyjon, amikor a motor leáll. Ennek eredményeképpen a motor indítása után gyorsabban áll rendelkezésre a szelepek számára megfelelő olajnyomás, és az olajvisszavezetésekhez üreges válaszfalakat lehet használni.

Az újratervezett hengerfej 2,3 kg tömeget takarít meg, azaz 22%-ot az eredeti alkatrészhez képest. A könnyű és egyúttal merev szerkezet szempontjából a legjobb arányt a kettős T-profil és az integrált, zárt cellák kombinációja jelentette. A kipufogócsatornát is az additív gyártás segítségével lehet elkészíteni. Ennek eredményeként a kipufogógáz-utókezelő rendszerek gyorsabban felmelegedhetnek, és ezáltal a turbófeltöltő hatásfoka is megnő.



9. számú ábra. A dízelmotor, melynek hengerfejét és forgattyúházát 3D nyomtatták (kék színnel jelölve a továbbfejlesztett olajkör)²⁸

A keresztáramú hűtőrendszer lehetővé teszi a hengerek hőmérsékletének célzott csökkentését, és ezzel egyidejűleg a szükséges hűtőfolyadék-mennyiség redukálását is. Az egyik fő tervezési különbség az, hogy a hengerfejen a nagy térfogatú vízköpeny helyett egyedi hű-

²⁸ Alexander Stark: 3D-printed engine is 20 percent lighter <https://www.etmm-online.com/3d-printed-engine-is-20-percent-lighter-gal-998651/?p=4#gallerydetail> (Letöltve: 2023.02.04.)

tővezetékeket használnak. Ez akár 40%-kal csökkenti az égéstér hőmérsékletét. És annak ellenére, hogy 40%-kal kevesebb hűtőfolyadékot használnak, a falhőmérsékletek jelentősen alacsonyabbak, mint a hagyományos motoroké. Ennek eredményeként mind a hidegindítást követő bemelegedési fázis lerövidíthető, mind a vízszivattyú meghajtási teljesítménye csökkenthető.

Az újratervezett forgattyúház az eredeti alkatrészhez képest 5,1 kg-mal könnyebb. A forgattyúház válaszfalai nyitott, vízszintes teherhordó szerkezeteket kaptak, amelyeket a megfelelő pontokon *keresztbordás kompozit* merevít. További merevítést biztosít a kiegyensúlyozó tengelyek területén két csökkentett tömegű összekötő cső. Topológiai elemzések alapján az alacsony terhelési zónákat rácsszerkezetekkel és üregekkel optimalizálták. A forgattyúház oldalsó burkolatai *üvegszál-erősítésű fenolgyantából* készülnek, és így mintegy 15 %-kal könnyebbek.

A motor 3D nyomtatott dugattyúját az IAV (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr) cég készítette. Az IAV egy német autóipari mérnöki vállalat, amely erőátviteli, elektronikai és járműfejlesztési termékeket tervez. A 3D nyomtatással a dugattyút rétegenként lehet létrehozni, és egy méhsejtszerű rácst teszi szilárdvá a dugattyút, amely mintegy 25%-kal csökkenti a szerkezeti elem tömegét (a hagyományos öntési eljárással készített dugattyúhoz képest).



10. számú ábra. Fém 3D nyomtatott dugattyú metszete. A könnyített szerkezet mintegy 25%-kal csökkenti a szerkezeti elem tömegét²⁹

²⁹ Tom Murphy: IAV Sees Huge Potential With 3D-Printed Pistons
<https://www.wardsauto.com/engines/iav-sees-huge-potential-3d-printed-pistons>
(Letöltve: 2023.02.04.)

Az IAV a fémdugattyúk 3D nyomtatásával a gyakorlatban bizonyította, hogy a dugattyút könnyebbé, a magas hőmérsékletnek ellenállóbbá és gyorsabban gyárthatóvá lehet tenni. Eközben optimalizálták a kritikus területek hűtését, csökkentették a súrlódást és 75%-kal javították az anyagtulajdonságokat a hagyományos dugattyúkhöz képest.³⁰ Ha könnyebb a dugattyú, akkor könnyebb lehet a hajtókar, könnyebb lehet a forgattyús tengely is. Ezáltal kevesebb terhelés jut a csapágyakra, és kisebb a súrlódás. A hőtágulás miatt az, hogy a 3D nyomtatás során komplex geometriájú hűtőcsatornák hozhatók létre a dugattyúban, úttörő jelentőségű, ezáltal nagyobb teljesítménysűrűség érhető el.

Az IAV további lehetőségeket lát a belsőégésű motorok alkatrészeinek, például dugattyúcsapok, motorblokkok, turbina- vagy kompresszoralkatrészek 3D nyomtatására. Például a 3D nyomtatott hengerfejekkel elért eredmény: a teljes tömeg 30%-os, a megmunkálás 50%-os és a kipufogószelep-híd hőmérsékletének 10%-os csökkentése volt.

2.2.2. A Porsche 911 GT2 RS motorjának 3D nyomtatott dugattyúja 10%-kal könnyebb

A gépjárműmotor-dugattyúgyártásban alkalmazott 3D nyomtatás eredményeinek áttekintéséhez célszerű bemutatni a Porsche nagy teljesítményű benzinmotorjához készített dugattyút. Ugyan cikkünk vizsgálati területe a turbódízelmotorok gyártástechnológiájának vizsgálata, mégis célszerű kitérni erre a – gyártástechnológiai megoldásait tekintve jövőbemutató – 3D nyomtatott dugattyúra, melyhez hasonló tömeggyártott termékek feltételezhetően a turbódízelmotorok egy részének sorozatgyártásában is megjelenhetnek.

A Porsche, a Mahle és a Trumpf közös projektjében, a Zeiss-szel együttműködve 3D nyomtatással, generatív tervezési eljárásokkal gyárt dugattyúkat a Porsche 911-es egyik modelljének, a GT2 RS-nek a nagyteljesítményű Otto-motorjához. (Generatív tervezés: A generatív tervezés egy olyan szoftveres gépészeti tervezési módszer, amely támogatja a mérnök munkáját, és felhőalapú számítások és gépi tanulási módszerek segítségével új megoldásokat dolgoz ki. A generatív tervezés olyan tervezési folyamat, amelyben egy algoritmus segítségével az alkatrész alakját egy adott határfeltételhez optimalizálja. Maga a forma megtervezése így már nem kézi tervezési feladat. A tervező

³⁰ Tom Murphy: IAV sees huge potential with 3D-printed pistons. Wardsauto TM. 2018.04.12 <https://www.wardsauto.com/engines/ia-v-sees-huge-potential-3d-printed-pistons> (Letöltve: 2023.01.26.)

meghatározza az alkatrész funkcionális peremfeltételeit, azokat betáplálja a szoftverbe, amely a meghatározott szempontok szerint, iterációs folyamatok során kiszámolja az optimalizált alkatrész alakját.

A generatív tervezés mesterséges intelligenciára (AI – Artificial Intelligence) épülő szoftverekkel és a felhő alapú számítógépes rendszer teljesítményének kiaknázásával teszi lehetővé, hogy a mérnökök több ezer tervváltozatot hozzanak létre egy tervezési probléma meghatározásával, az alapvető paraméterek - például a magasság, a terhelés, a szilárdság, valamint az anyag- és gyártási módszerváltozatok - megadásával. A tervező mérnök megadja a generatív tervezőszoftvernek a tervezési paramétereket, a szoftver pedig nagyszámú tervváltozattal áll elő. Ezután a tervező vagy mérnök kiszűri és kiválasztja az adott igényeknek leginkább megfelelő változatokat.

A generatív tervezés a gépi tanulás segítségével utánozza a természetre jellemző evolúciós megközelítést a tervezési folyamatok során. A generatív tervezéssel létrehozott pl. topológiaiilag optimalizált alkatrészek komplex alakját gyakran célszerű 3D nyomtatással legyártani. A világ jelentősebb ipari vállalatai közül néhány – többek között az Airbus – a generatív tervezés segítségével oldja meg a mérnöki tervezési feladatokat, így hoz létre innovatív tervezési megoldásokat - melyek (pl. topológiaiilag optimalizálva) gyakran csökkentett tömegű részegységek létrehozását eredményezhetik.



11. számú ábra. A Porsche 911 GT2 RS szelektív lézeres olvasással előállított dugattyúja³¹

³¹ 3D Printing Technology Optimises Pistons for the Powerful 911 GT2 RS
<https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons> (Letöltve: 2023.02.04.)

A projekt célja dugattyú-prototípusok gyártása és ezáltal az alkatrészek hatékonyságának javítása mellett egy olyan additív gyártási folyamat kifejlesztése, amely képes megfelelni a legmagasabb minőségi követelményeknek, ugyanakkor gazdaságos marad, hogy lehetővé tegye a sorozatgyártást. A gyártási folyamat alapját egy, a Mahle által kifejlesztett speciális ötvözetből készült fémpor képezi.

A port rétegről rétegre viszik fel a Trumpf fém 3D nyomtatójában, és lézerrel egyes pontokon összeolvasztják, tehát szelektív lézeres olvasztással (SLM) történik a gyártás. A dugattyúk kialakításához 12 óra alatt 1200 réteg kerül felhordásra.³² A topológiai optimalizálás a terhelések szimulálására és ezáltal a terheléseknek megfelelő struktúra meghatározására szolgál. *A hagyományos gyártástechnológiával előállítotthoz képest 10 százalékos tömegcsökkentést tud elérni a dugattyúiban.* A 3D nyomtatott dugattyúk komplex geometriájú integrált hűtőcsatornával is rendelkeznek, ez a hagyományos gyártási módszerekkel nem lenne lehetséges.

A Porsche projektvezetője, Frank Ickinger szerint: „A dugattyú mintegy 30 LE teljesítménynövekedést is generálhat a 700 LE-s ikerturbós motornál, egyúttal magasabb hatásfok mellett.”³³ A Zeiss hatékony minőségbiztosítási eljárással állítja elő a Porsche 911-es modelljének a GT2 RS nagyteljesítményű motorjához szükséges 3D nyomtatott dugattyút. A vállalat számos megoldást alkalmazott a por minőségének elemzésére, a hibák azonosítására és az alkatrészek végső minőségének vizsgálatára.

2.2.3. A Honda által fejlesztett fém 3D nyomtatott forgattyús tengely 50%-kal könnyebb

2016-ban a Honda japán autógyártó bemutatta a Micro Commuter nevű kis haszonjárművét, amelyet részben már a 3D nyomtatás gyártástechnológiájának figyelembevételével terveztek, és részben additív eljárással gyártottak le. A vállalat ennek kapcsán 4 évvel később egy fémből készült, 3D nyomtatott forgattyústengelyt mutatott be.

³² 3D Printing Technology Optimises Pistons for the Powerful 911 GT2 RS
<https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovation/en/porsche-innovation/3d-printed-pistons> (Letöltve: 2023.01.20.)

³³ Ahlam Rais: 3D Printed pistons deliver high performance. ETMM.
<https://www.etmm-online.com/3d-printed-pistons-deliver-high-performance-a-1046022/> (Letöltve: 2023.01.20.)

A Honda már évek óta alkalmazza az additív gyártást különböző alkatrészek (biztonsági övtartók, motorvezérlő egységek, motorkerékpár-vázak) súlyának csökkentése érdekében. Így merült fel a fémnyomtatott forgattyústengely ötlete. Az autógyártó az Autodesk vállalattal dolgozott a projecten (amely számos 3D tervező szoftverről, például az AutoCAD és a Fusion 360-ról is ismert).

Az Autodesktel együttműködésben létrehozott alkatrész tervezését teljesen újragondolták, hogy csökkentsék az alkatrész végső súlyát, valamint a tüzelőanyag-fogyasztást. A forgattyústengely az autó motorjának alapvető fontosságú, szilárdságot és tartósságot igénylő része, amely acélból készül hagyományos gyártási módszerekkel. Az additív gyártás alkalmazása azonban – a hagyományos gyártástechnológiájú főtengelyhez képest - tömeget takarít meg. A Honda egyelőre csak egy működő prototípust mutatott be, de a végső cél a méretnövelés és a tömeggyártás lenne.



12. számú ábra. A Honda és az Autodesk közös projektjében tervezett és 3D nyomtatott forgattyústengely³⁴

A 3D nyomtatott forgattyústengely a Honda fejlesztői szerint 50%-os tömegcsökkentést mutat.³⁵ Hagyományos gyártási módszerekkel lényegében nem tudtak volna ilyen geometriájú alkatrészt előállítani. Nem tették nyilvánossá, hogy milyen fém 3D nyomtatási technológiát vagy milyen

³⁴ Carlota V.: Honda designs lightweight 3D printed crankshaft <https://www.3dnatives.com/en/honda-3d-printed-crankshaft-120320205/> (Letöltve: 2023.02.05.)

³⁵ Carlota V.: Honda designs lightweight 3D printed crankshaft <https://www.3dnatives.com/en/honda-3d-printed-crankshaft-120320205/> (letöltve:2023.02.05.)

anyagot használtak, de az eredmény, hogy a 3D nyomtatás és a generatív tervezés lehetővé tette egy jobb teljesítményű alkatrész előállítását.

2.2.4. A Renault által fejlesztett 3D nyomtatott szelephimbák 25%-kal könnyebbek

A francia Renault vállalat mérnökeinek és tervezőinek egy csoportja a fém 3D nyomtatást alkalmazza motorjai teljesítményének növelésére. A 3D nyomtatást a DTI 5 négyhengeres Euro 6-os besorolású teherautómotor fejlesztéséhez alkalmazták. A projekt során additív gyártástechnológiára optimalizálták a teljes motort, így az eredetivel összevetve 25%-os tömegcsökkentést tudtak elérni.³⁶ Végül a hőerőgép szelephimbáit fémnyomtatták és beépítve tesztelték. A cég mérnökei elégedettek voltak az eredményekkel, ugyanis az additív gyártástechnológiával előállított alkatrészek tartósnak bizonyultak a 600 órás teszten. A 3D nyomtatásnak köszönhetően csökkenthetik majd a motor alkatrészeinek számát is (pl. egy darabból készülhetnek korábban több komponensből összeállított alkatrészek).



13. számú ábra. Renault DTI 5 motor eredeti szelephimbája (bal oldali kép) és a 3D nyomtatott könnyített szelephimba (jobb oldali kép)³⁷

Megállapították, hogy a kisebb szerkezeti tömegű motor az eredetihez képest nagyobb terhelésre lesz alkalmas alacsonyabb tüzelőanyag-felhasználás mellett. A Renault mérnökei további fejlesztésekre törekednek majd az additív gyártástechnológia alkalmazásával.

³⁶ Sarah Saunders: Metal additive manufacturing helps Renault trucks reduce weight of 4-cylinder engine by 25% using 3D printed components. <https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/> 3Dprint.com 2017.01.11. (Letöltve: 2023.02.05.)

³⁷ Sarah Saunders: Metal additive manufacturing helps Renault trucks reduce weight of 4-cylinder engine by 25% using 3D printed components. <https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/> (Letöltve: 2023.02.05.)

Összegzés és következtetések

Megállapítható, hogy az additív gyártástechnológia többféle új fejlesztési lehetőséget kínálhat a belsőégésű motorok számára.

Jelen cikk két fejlődési tendencia – a 3D nyomtatás megjelenése a dízelmotorgyártásban, illetve a dízelmotorok megjelenése a repülésben - lehetséges szinergiáját vizsgálta. Megállapítható, hogy a két folyamat közötti összekötőkapocs a szerkezeti tömeg csökkenése. *A 3D nyomtatás alkalmazása csökkenti a dízelmotorok tömegét, amely további, a jelenlegi intenzív elterjedésüknél is nagyobb mértékű felhasználásukat teszi lehetővé a könnyűrepülőgép- és az UAV-kategóriában.* A Kaliforniai Egyetem kutatóinak 2018-as publikációja szerint „Napjainkban a repülőgépes alkalmazásokhoz használt dízelmotorok ritkán jelentenek választási lehetőséget. *Ez a technológia azonban nagyon komoly versenytársnak bizonyul a nagy hatótávolságú pilóta nélküli légijárművek repüléseihez.* ... Mivel a fajlagos üzemanyagfelhasználási mutatók kedvezőek, ezért nagy hatótávolságú repüléseknél – ahol az üzemanyag tömege számottevő - előnyös a dízel, hozzáátve, hogy a gázturbinák fajlagos fogyasztás mutatói 300 kW alatt kedvezőtlenek.”³⁸ Hasonló eredményre jutott 2018-ban PhD értekezésében Dr. Hannel Sándor okleveles repülőmérnök, amikor Thilert és Austro Engine turbódízelmotorokat vetett össze Rotax és Lycoming benzinüzemű repülőgépmotorokkal, és kimutatta, hogy mintegy 2,5 óra járőrözési idő felett – az üzemanyag tömegét és kifogyasztását is figyelembe véve – a turbódízelmotorok alkalmazása egyértelműen előnyösebb még akkor is, ha szerkezeti tömegük nagyobb az Otto-motorokénál.³⁹ Napjainkban a kutatók a legelterjedtebb soros henger-elrendezésű gépjármű-turbódízelmotorok gazdaságossági tulajdonságait vizsgálják, mivel az 5. számú táblázatban látható módon az a legelterjedtebb dízelrepülőgépmotor-kialakítás.⁴⁰

³⁸ Daniele Cirigliano - Aaron M. Frisch - Feng Liu - William A. Sirignano: Diesel, Spark-Ignition, and Turboprop Engines for Long-Duration Unmanned Air Flights. Journal Of Propulsion And Power (2018.01.23.) <https://doi.org/10.2514/1.B36547> 1. o.

³⁹ Hannel Sándor: Állami és polgári felhasználású többfeladatú könnyű-repülőgép koncepciója 198 p.

Nemzeti Közzolgálati Egyetem (NKE), Katonai Műszaki Doktori Iskola, Turcsányi Károly; Hegedűs Ernő Disszertáció benyújtásának éve: 2018, Védés éve: 2018 Megjelenés/Fokozatszerzés éve: 2018.

⁴⁰ Peter Korba - Ozgur Balli - Hakan Caliskan - Samer Al-Rabeei - Utku Kale: Thermodynamics, environmental damage cost, exergoeconomic, life cycle, and exergoenvironmental analyses of a JP-8 fueled turbodiesel aviation engine at take-off phase. Case Studies in Thermal Engineering, Volume 43, March 2023, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102806>

Több szakirodalomban merül fel a dízelmotor alkalmazása helikopter-UAV-kon és könnyűhelikoptereken.⁴¹ Összességében a 2018-as vizsgálatokhoz képest jelenleg annyiban változott a helyzet, hogy a *3D nyomtatás gyártástechnológiája megjelent a gépjármű-turbódízelmotorok fejlesztése területén, amely – szerkezeti tömegük 20-25%-os csökkenthetősége miatt – a jövőben növelheti elterjedésüket a repülésben, különös tekintettel az UAV-kra.*

TURBÓFELTÖLTÉSES FOLYADÉKHŰTÉSŰ GÉPJÁRMŰDÍZELMOTOR- ALAPÚ REPÜLŐ-/UAV-MOTOROK⁴²

5. számú táblázat

Gyártó	Thilert	Thilert	Thilert	Austro engine	RED Aircraft GmbH	Mercedes	Diesel-jet	Diesel-jet	Diesel-jet
Típus	Centurion 2.0	Centurion 2.0s	Centurion 4.0	AE 300	RED A03 v13	HFE 800	TDA CR 1.9	TDA CR 2.0 16V	TDA CR 3.0 24V
Alap-motor	Mercedes	Mercedes	Mercedes	Mercedes	Audi	Mercedes	Fiat 1.9 JTD	Fiat	Fiat
Telj. kW (LE)	99 (135)	114 (155)	257 (350)	123 (168)	368 (500)	49 (66)	147 (200)	160 (217)	240 (320)
Löket-térfogat (cm ³)	1991	1991	3996	1991	6134	800	1900	2000	3000
Tömeg (kg)	134	134	272,2	185	372	80	125	219	n.a.
Fogy. (g/kWh)	214	220	215	198	215	n.a.	210 g/kWh	210 g/kWh	n.a.
Hengerek	4, soros	4, soros	8, v motor	4, soros	12, v motor	3, soros	4, soros	4, soros	4, soros

A cikkünkben bemutatott példák alapján elsősorban azt célszerű megemlíteni, hogy a 3D fémnyomtatás alkalmazásával különböző gépjárműgyártók 20-25% közötti tömegcsökkenést értek el a gépjármű-turbódízelmotoroknál. Ez az eljárás nem csak turbódízelmotoroknál eredményez tömegcsökkenést, azonban a cikkünkben vizsgált UAV-

⁴¹ Nihad E. Daidzic - Luca Piancastelli - Andrea Cattini: Diesel engines for light-to-medium helicopters and airplanes. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2014. 1(3). <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2014.1023>

⁴² Hannel, Sándor: A repülésben használt dízelmotorok: kitekintéssel a hazai repülőgépmotor-előállítás jövőbeni lehetőségeire. KATONAI LOGISZTIKA 20 : 3 pp. 83-100, 18 p. (2012)

tömeggyártás szempontjából a katonai követelmények (kerozin-üzemanyag, hőkibocsátás, üzemanyag-gyúlékonyság, hatótávolság-igény, adott repült időre eső alacsony üzemanyagtömeg stb.) a turbódízelmotorra szűkítik le a vizsgálatot. A 3D nyomtatásos motoralkatrész-gyártás eredményeit a jelenleg repülőműszaki szempontból még mindig kissé túlsúlyos turbódízelek fejlesztése érdekében célszerű mozgósítani a repülőipari felhasználás érdekében. Egy példa: a jövő részben 3D nyomtatott német dízelmotorja („Leichtbau Motor” project) 22%-kal könnyebb, amely elősegítheti az esetleges jövőbeni repülőipari alkalmazást.

Megemlítenéd, hogy ennek a témának hazai vonatkozásai is vannak, hiszen a Széchenyi István Egyetem kutatói is foglalkoznak 3D nyomtatott motorfejlesztéssel. „A 3D nyomtatott motor ötlete az Audi Hungaria mérnökeivel folytatott konzultáció során merült fel, majd 2016-ban szoros együttműködésben megkezdődött a fejlesztése. Célunk elsősorban a 3D nyomtatás gyártástechnológiájának és autóipari felhasználásának vizsgálata, valamint a kutatás-fejlesztési lehetőségek vizsgálata volt. Az Audi Hungaria Zrt. Pilot Engine Manufacturing Center és az általuk használt fém 3D nyomtató, amelyet az SLM Solutions AG fejlesztett ki, segítette ezt a célt. A kutatás tárgyát képező egység alapját a csapatunk által korábban kifejlesztett és összeszerelt EVO4 motorkonstrukció képezte, melynek alkatrészeit a nyomtatási technológia igényeinek megfelelően módosítottuk. *A henger, a hengerfej, a teljes forgattyúház és a motort körülvevő összes burkolat 3D színterezett alumínium alkatrészekből készült.* Nyomtatás után minden alkatrész CNC-megmunkálásra került. ... A belső égésű motor legnagyobb alkatrészei sokkal kedvezőbb és hatékonyabb gyártástechnológiával készülnek, melynek további előnye a jobb anyagszerkezet, tömeg- és költséghatékonyság az egyedi, prototípus-alkatrészek vizsgálatánál. Ezen kívül összetett geometriák elkészítésekor a lézeres színterezésnek köszönhetően lehetőség nyílik a hagyományos konstrukcióktól eltérő alkatrésztervek kipróbálására is.”⁴³

A jövőben tehát mintegy 20-25%-kal lehet könnyebb a dízelmotor, ha gyártástechnológiájában a 3D nyomtatás is szerephez jut. Számszerűleg mit jelent ez? A kismértékben – repülőipari szabványoknak való megfelelés érdekében – módosított gépjármű-dízelmotorokat jellemzően a Mercedes háromhengeres motorjától az Audi 500 LE-s V-

⁴³ A 3D nyomtatás és a motorfejlesztés fúziója. Széchenyi István Egyetem Formula Student Development Team. <https://szengine.hu/3d-nyomtatott-motor/> (Letöltve: 2022. 08.12.)

12 erőforrásáig bezárólag alkalmazzák MALE UAV-kon. A Mercedes-Benz alumíniumöntvény-motorblokkal rendelkező háromhengeres Smart dízelmotorja 795 cm³-es, 33 kW (45 LE) teljesítményű 3800-as fordulatszámon, turbófeltöltéssel 66 LE. Ez a jelenlegi legkisebb UAV-ban alkalmazott sorozatgyártású járműdízelmotor, amely tömege 80 kg. Additív nyomtatásos gyártástechnológiával – 25% tömegcsökkenéssel számolva - egy ilyen motor elméletileg 20 kg-mal lehetne könnyebb. A legnagyobb UAV-erőforrások közé tartozó Audi gyár V12 TDI turbófeltöltéses dízelmotorja 6000 cm³ hengerűrtartalmú, 12 hengeres, 368 kW (500 LE) teljesítményű turbódízelmotorjának tömege 363 kg, melynél elméletileg mintegy 90 kg tömegcsökkentést lehetne elérni additív gyártástechnológia alkalmazásával. Ezek az eredmények – abban az esetben, ha a kifejlesztett additív gyártástechnológiájú motorok sorozatgyártásba kerülnek – jelentős mértékben támogatják a katonai alkalmazású MALE felfegyverzett UAV-k jövőbeni gyártását. A motor szerkezeti tömegének csökkentése eredményeképpen lehetővé válik az üzemanyag vagy a fegyverzet tömegének növelése.

ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁVAL ELŐÁLLÍTOTT DÍZELMOTOR-ALKATRÉSZEK TÖMEGCSÖKKENÉSE

4. számú táblázat

Gyártó cég	Alkatrész	Tömegcsökkenés
Leichtbau Motor	hengerfej	22%
IAV	dugattyú	25%
IAV	hengerfej	30%
Porsche 911 GT2 RS	dugattyú	10%
Honda	forgattyús tengely	50%
Renault	szelephimba	25%

Már napjainkban is számos MALE UAV-n alkalmaznak kismértékben módosított gépjármű-turbódízelmotorokat (3. sz. táblázat). Azonban ezek tömege még nem teljes mértékben versenyképes a kimonodottan repülőipari célra tervezett és gyártott erőforrásokéval (Lycoming, Rotax stb.). A MALE UAV meghajtása céljából beépített turbódízelmotorok 3D nyomtatással elérhető 20-25%-os jövőbeni tömegcsökkenése egyfelől a jelenleginél fokozottabban felel meg a repülőtechnikával szemben támasztott tömegkövetelményeknek, másfelől – a tömeggyártott fődarab miatt - továbbra is gazdaságosan előállítható termék maradhat. A 2022-2023. évi orosz-ukrán háború az

UAV-k tömeges katonai alkalmazását vetíti előre. Mindez – a katonai célú felfegyverzett MALE UAV-k közeljövőben prognosztizálható tömeggyártása esetén – kedvező fejlesztési feltételeket teremt, melynek egyik kulcseleme az alkatrészek 3D fémnyomtatása lehet.

Természetesen jelen cikk következtetéseirez kiegészítésképpen hozzá kell tenni azt is, hogy nemcsak a MALE UAV-k egy részénél alkalmazott turbódízel erőforrások területén okoz gyökeres átalakulást a 3D nyomtatás, hanem a kisebb kategóriába tartozó – pl. léghűtéses kétütemű Otto-motorok – területén is a 14. ábra alapján. Viszont a 3D nyomtatás gyártástechnológiájának bevezetése elsősorban a dízelmotorok gyártása esetén eredményezhet jelentős tömegcsökkenést.



14. számú ábra. A Cobra Aero léghűtéses kétütemű UAV Otto-motorjának új geometriájú, 3D nyomtatással előállított, optimalizált hűtésű hengere⁴⁴

Célszerű azonban ismét rámutatni arra is, hogy a 2022-2023. évi orosz-ukrán háborúban az összes ukrán UAV darabszáma mintegy 100 000 db, azonban ebből csak néhány ezer darab a kimondottan katonai. Az átalakított és felfegyverzett polgári drónok kerültek itt nagy mennyiségben alkalmazásra – átalakításukban a 3D nyomtatott alkatrészek is szerepet játszottak. Néhány következtetést levonva:

- a jövő részben 3D nyomtatott német dízelmotorja 22%-kal könnyebb lehet, amely elősegítheti a repülőpari alkalmazást (pl. „Leichtbau Motor” project);

⁴⁴ Drone Engine Maker Illustrates How Additive Manufacturing Well Suited to OEMs. <https://www.additivemanufacturing.media/articles/drone-engine-maker-illustrates-how-additive-manufacturing-well-suited-to-oems> (Letöltve: 2023.06.13.) illetve Combustion engine cylinder heat sink designed by Cobra Aero. <https://www.ntop.com/innovation/combustion-engine-cylinder-heat-sink-designed-by-cobra-aero/> (Letöltve: 2023.06.13.)

- a 3D nyomtatás előnye – pl. a polgári drónok felfegyverzésénél, átalakításánál - a szükséges kis darabszámú alkatrészek gyártási költségének csökkentése, gyors gyártás, kis szerkezeti tömegű alkatrészek;⁴⁵
- a nagy darabszámban gyártott gépjárműmotor katonai MALE UAV-ba való beépítése a háborús ellátásbiztonság szempontjából is kedvező;
- a 3D fém nyomtatott UAV-alkatrészek ADAM-technológiájú nyomtatóval hőálló ötvözetből is előállíthatók, amely pl. gázturbinás hajtású, tolóerővektor-vezérléses drónok gázsugárkormányra esetében jelenthet kedvező megoldást.

Összességében, a 3D nyomtatás alkalmazása dízelmotorok gyártásánál – és elsősorban az ezáltal elérhető mintegy 20-25%-os tömegcsökkenés - számos előnnyel járhat a járműiparban, személygépkocsik, haszongépjárművek, de akár harcjárművek esetében is. A 3D nyomtatott dízelmotor szerkezeti tömegének csökkenése azonban elsősorban a repülőipari felhasználás esetében nevezhető kiemelkedően jelentős előnynek.

Jelen kutatás első számú és legfontosabb eredménye az, hogy a felfegyverzett MALE UAV-kategóriában a fejlesztő szakemberek számára megalapozott javaslatot tesz arra, hogy az erőforrás-kiválasztás során a jövőben fokozottan számoljanak azokkal a gépjárműgyártókkal, akik turbódízelmotorjaik gyártástechnológiájába beemelik az additív gyártástechnológiát, és ezzel motorszerkezeti tömegcsökkenést érnek el, amellyel célszerűen átalakítható/beépíthető motorhoz juttatják az UAV-gyártókat.

Köszönetnyilvánítás

A 2022-2.1.1-NL-2022-00012 azonosító számú Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriuma projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL Nemzeti Laboratóriumok Létrehozása, Komplex Fejlesztése pályázati program finanszírozásában valósul meg.

⁴⁵ További publikációk e tárgyban: Dr. Zentay Péter – Dr. Hegedűs Ernő – Végvári Zsolt: A 3D nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I-III. rész. Haditechnika 57. évf. 2023. évi 1-2. sz. pp. 49-55., pp. 57-62. DOI:10.23713/HT.57.1.09 illetve Ember István: 3D nyomtatott lyukasztó töltetek hatásvizsgálata. Hadmérnök, 2022.évi 17. szám, 63-73. o. továbbá Rákosi Sára - Sebők István - Szalai Tamás - Dr. Vég Róbert László: A 3D nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai. Katonai Műszaki Közlöny 32. évf. 4. sz.

Források

'World's fastest' 3-D printed drone takes flight.

<https://www.cnbc.com/2015/11/09/worlds-fastest-3-d-printed-drone-takes-flight.html> (Letöltve: 2023.06.13.)

3D Printing Technology Optimises Pistons for the Powerful 911 GT2 RS <https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovation/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons> (Letöltve: 2023.01.20.)

A 3D nyomtatás és a motorfejlesztés fúziója. Széchenyi István Egyetem Formula Student Development Tam. <https://szengine.hu/3d-nyomtatott-motor/> (Letöltve: 2022. 08.12.)

Ahlam Rais: 3D Printed pistons deliver high performance. ETMM 2021.08.05 <https://www.etmm-online.com/3d-printed-pistons-deliver-high-performance-a-1046022/> (Letöltve: 2023.01.20.)

Alexander Stark: 3D printed engine is 20 percent lighter. ETMM 2021.02.09 <https://www.etmm-online.com/3d-printed-engine-is-20-percent-lighter-a-998651/> (Letöltve: 2023.01.25.)

Barna Hanula, Stephan Tafel, Andreas Mück & Christian Schlüter: Schnelllaufender Hochleistungs-Dieselmotor für kleine Flugzeuge. MTZ - Motortechnische Zeitschrift volume 64, 2003/4, pages 286–296.;

Böröndi Gábor: Az orosz-ukrán háború új helyzetet teremtett, és erre a Magyar Honvédségnek is fel kell készülnie. Interjú. Híradó.hu 2023.05.09. <https://hirado.hu/belfold/cikk/2023/05/09/borondi-gabor-az-orosz-ukran-haboru-uj-helyzetet-teremtett-es-erre-a-magyar-honvedsegnek-is-fel-kell-keszulnie> (Letöltve: 2023.05.30.)

Brouwers P. Alex: 150 and 300 kW lightweight diesel aircraft engine study NASA, 1980. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19800011788/downloads/19800011788.pdf>

Carlota V.: Honda designs lightweight 3D printed crankshaft 3D Natives <https://www.3dnatives.com/en/honda-3d-printed-crankshaft-120320205/> (Letöltve:2023.02.05.)

Combustion engine cylinder heat sink designed by Cobra Aero. <https://www.ntop.com/innovation/combustion-engine-cylinder-heat-sink-designed-by-cobra-aero/> (Letöltve: 2023.06.13.)

Daniele Cirigliano - Aaron M. Frisch - Feng Liu - William A. Sirignano: Diesel, Spark-Ignition, and Turboprop Engines for Long-Duration Unmanned Air Flights. Journal Of Propulsion And Power (2018.01.23.) <https://doi.org/10.2514/1.B36547>

Dr. Zentay Péter – Dr. Hegedűs Ernő – Végvári Zsolt: A 3D nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I-III. rész. Haditechnika 57. évf. 2023. évi 1-2. sz. pp. 49-55., pp. 57-62.
DOI:10.23713/HT.57.1.09

Drone Engine Maker Illustrates How Additive Manufacturing Well Suited to OEMs. <https://www.additivemanufacturing.media/articles/drone-engine-maker-illustrates-how-additive-manufacturing-well-suited-to-oems> (Letöltve: 2023.06.13.)

Drónháború. Jetplanes. <https://jetplanes.blog.hu/2020/12/03/dron-haboru> (Letöltve: 2023.06.13.)

Ember István: 3D nyomtatott lyukasztó töltetek hatásvizsgálata. Hadmérnök, 2022.évi 17. szám, 63-73. o.

Ficsor Botond: Fém 3D nyomtatás alkalmazásának lehetséges előnyei belsőégésű hőerőgépek fejlesztése és gyártása során, polgári és katonai aspektusból. NKE HHK ITDK. Budapest, 2023.

Foreign Import of Locally-Built Bayraktar TB-2 Turkish Drone Parts. <https://www.1lurer.am/en/2020/10/28/Foreign-Import-of-Locally-Built-Bayraktar-TB-2-Turkish-Drone-Parts/346626> (2022. október 21.)

H. A. J. Badiru - V. V. Valencia - D. Liu: Additive Manufacturing Handbook - Product Development for the Defense Industry. Routledge - CRC Press, 2020. 948. p. ISBN 9780367871215

Hegedűs Ernő - Hennel Sándor - Végvári Zsolt: A Bayraktar drónok I-II. rész. Haditechnika 57. évf. 2023. évi 1. szám pp. 35.-39.

Hennel Sándor: Állami és polgári felhasználású többfeladatú könnyű repülőgép koncepciója 198 p. Nemzeti Közszerződési Egyetem (NKE), Katonai Műszaki Doktori Iskola, Turcsányi Károly; Hegedűs Ernő Disszertáció benyújtásának éve: 2018, Védés éve: 2018 Megjelentés/Fokozatszerzés éve: 2018.

Hennel Sándor: Dízelmotorok felhasználhatóságának lehetőségei a katonai repülésben. Honvédségi Szemle, 65. évf. 2011. évi 5. szám pp. 24-29.

Hennel, Sándor: A repülésben használt dízelmotorok: kitekintéssel a hazai repülőgépmotor-előállítás jövőbeni lehetőségeire. Katonai Logisztika 20: 83-100. o. (2012)

Hisham Abdel-Aal PhD.: Additive Manufacturing of Metals: Fundamentals and Testing of 3D and 4D Printing. 1st Edition. McGrawHill, new York, 2021. 480. p. ISBN 1260464342

Horváth József: Az A2/AD környezet és az elektronikai hadviselés. Sereg Szemle. XV. évfolyam, 2. szám, 2017. április - június, 192. o.

Ian Gibson - David Rosen - Brent Stucker – J. B. Speed: Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Department of Industrial Engineering, University of Louisville, Louisville, KY USA. Springer, 2nd. ed. 2015. ISBN: 978-1493921126

Major Gábor – Békési Bertold: A pilóta nélküli légijárművek felhasználási lehetőségei háborús körülmények között az orosz-ukrán konfliktus árnyékában. Polgári Védelmi Szemle 2023. évi 15. Különszám pp. 297-324.

Melih Cemal Kushan: Aircraft Technology. IntechOpen, 2018. pp. 180. ISBN-13: 978-1789236446

Mohsen Attaran: Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics. School of Business and Public Administration, California State University, Bakersfield, California. Journal of Service Science and Management, 2017. június, 10. évf. 3. sz. 189–206 o., doi: 10.4236/jssm.2017.103017.

Nihad E. Daidzic - Luca Piancastelli - Andrea Cattini: Diesel engines for light-to-medium helicopters and airplanes. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2014. 1(3).
<https://doi.org/10.15394/ijaaa.2014.1023>

Orion-E UAV showcased with Kalashnikov Vikhr missile at MAKS
<https://www.armadainternational.com/2021/08/orion-e-uav-showcased-with-kalashnikov-vikhr-missile-at-maks/> (Letöltés: 2023.06.13.)

Peter Korba - Ozgur Balli - Hakan Caliskan - Samer Al-Rabeei - Utku Kale: Thermodynamics, environmental damage cost, exergoeconomic, life cycle, and exergoenvironmental analyses of a JP-8 fueled turbodiesel aviation engine at take-off phase. Case Studies in Thermal Engineering, Volume 43, March 2023,
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102806>

Qods Mohajer-6. https://en.wikipedia.org/wiki/Qods_Mohajer-6 (Letöltés: 2023.06.13.)

Rákosi Sára - Sebők István - Szalai Tamás - Dr. Vég Róbert László: A 3D nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai. Katonai Műszaki Közlöny 32. évf. 4. sz.

Russia Braces for Attack by 50 000 Ukrainian Kamikaze Drone. Forbes, 2023. 03. 24. <https://www.forbes.com/sites/davidhambling/2023/03/24/russia-braces-for-attack-by-50000-ukrainian-kamikaze-drones-seeks-shotguns/?sh=23c5262f6ffc> (Letöltve: 2023.05.30.)

Russia Unveils New Mega-Drones at MAKS 2019 https://defense-update.com/20190828_russia-unveils-new-mega-drones-at-maks-2019.html (Letöltve 2023. 06.13.)

Sarah Saunders: Metal additive manufacturing helps Renault trucks reduce weight of 4-cylinder engine by 25% using 3D printed components. <https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/> (Letöltve: 2023.02.05.)

Stephen Pope: Diesel Aircraft Engines Revolution. Flying Magazine. Retrieved 20 April 2017.

Steven Weinzierl, Roger Wildemann, Barna Hanula: The Design and Development of a Light-Weight, High-Speed, Diesel Engine for Unmanned Aerial Vehicles. SAE Transactions, SAE International, Vol. 111, Section 3: JOURNAL OF ENGINES (2002), pp. 486-497. <https://www.jstor.org/stable/44743077> ;

Tom Murphy: IAV sees huge potential with 3D-printed pistons. Wardsauto TM. 2018.04.12 <https://www.wardsauto.com/engines/iav-sees-huge-potential-3d-printed-pistons> (Letöltve: 2023.01.26.)

U.S. Plans To Sell Armed MQ-1C Gray Eagle Drones To Ukraine 'In The Coming Days'. <https://theaviationist.com/2022/06/02/u-s-plans-to-sell-armed-mq-1c-gray-eagle-drones-to-ukraine-in-the-coming-days/> (Letöltve 2023. 06.13.)

Ukraine Update: Is Ukraine developing a 100,000-strong drone swarm attack? Daily Kos, 2023.03.26. <https://www.dailykos.com/stories/2023/3/26/2160305/-Ukraine-Update-Is-Ukraine-developing-a-100-000-strong-drone-swarm-attack> (Letöltve: 2023.05.30.)

Таёжный «Форпост»: военные дроны защитят Сибирь от пожаров и паводков <https://iz.ru/1010829/anton-lavrov-aleksei-ramm-roman-kretcul/taezhnyi-forpost-voennye-drony-zashchitiat-sibir-ot-pozharov-i-pavodkov> (Letöltve: 2023.06.13.)