

<https://www.edutus.hu/cikk/emisszio-csokkent-es-gyakorlati-megvalositasa-a-legikozlekedesben-nehany-igeretes-zold-megoldas-attekintese/>

EMISSZIÓ-CSÖKKENTÉS GYAKORLATI MEGVALÓSÍTÁSA A LÉGIKÖZLEKEDÉSBEN: NÉHÁNY ÍGÉRETES ZÖLD MEGOLDÁS ÁTTEKINTÉSE

DR. PEREDY ZOLTÁN, intézetvezető

Edutus Egyetem Műszaki Intézet

peredy.zoltan@edutus.hu

VENCZEL MÁRK, PhD hallgató

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Repüléstudományi és Hajózási Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

mvenczel@vrht.bme.hu

CZÉBELY-LÉNÁRT LÁSZLÓ, iparfejlesztési szakértő

laci@czebely.hu

DOI [10.47273/AP.2022.26.60-83](https://doi.org/10.47273/AP.2022.26.60-83)

ABSZTRAKT

A légiközlekedési ágazat a globális gazdasági fejlődés fontos elemét képezi. Hozzájárul a városok és országok közötti kapcsolatok növekedéséhez, lehetővé téve az áruk, az emberek, a tőke és a technológia áramlását a különböző ellátási láncokban elfoglalt szerepe miatt. Azonban a repülőterek működtetése komoly kihívásokat jelent környezetvédelmi szempontból mind azok üzemeltetőinek, mind a légitársaságoknak. Az éghajlatváltozás és ezek hatásai a légi közlekedési iparág szereplői előtt álló egyik legfontosabb kérdések közé tartoznak. Mivel a kereskedelmi repülés felelős a széndioxid-kibocsátás jelentős százalékáért, az iparra jelentős nyomás nehezedik, hogy intézkedéseket tegyen a légi közlekedés környezeti hatásainak csökkentésére. A nemzetközi szervezetek elkötelezettsége a nettó nulla széndioxid-kibocsátás 2050-ig történő elérésére egzisztenciális jelentőséggel bír az iparág jövőbeli globális gazdasági modellváltása megvalósításának szempontjából. A széndioxid kibocsátás mérséklése mellett a repülőgép-üzemanyagok rendelkezésre állása és azok költségei évtizedek óta a légiközlekedési ágazatot érintő egyik fő gazdasági tényező. A repülőgép-üzemanyag árak emelkedése közvetlen hatással van a légitársaságok pénzügyi portfóliójára. Jelen cikk a környezetbarát zöld megoldások közül két fő területet elemez, amelyek ha kisebb mértékben is, de hozzájárulhatnak a karbonsemleges működéshez: az alternatív hajtóanyagokat, valamint a repülőgépeknek a gurulóutakon való zöld mozgatási lehetőségeit. Ezen jó gyakorlatok átvétele és alkalmazásba vétele jelentős lépés lehet az érintett szereplők számára a fenntarthatóság és a költséghatékony működés feltételeinek megteremtéséhez.

Kulcsszavak: zöld gurulás; reptéri vontató; alternatív üzemanyagok, karbon akkreditáció; jó gyakorlatok

ABSTRACT

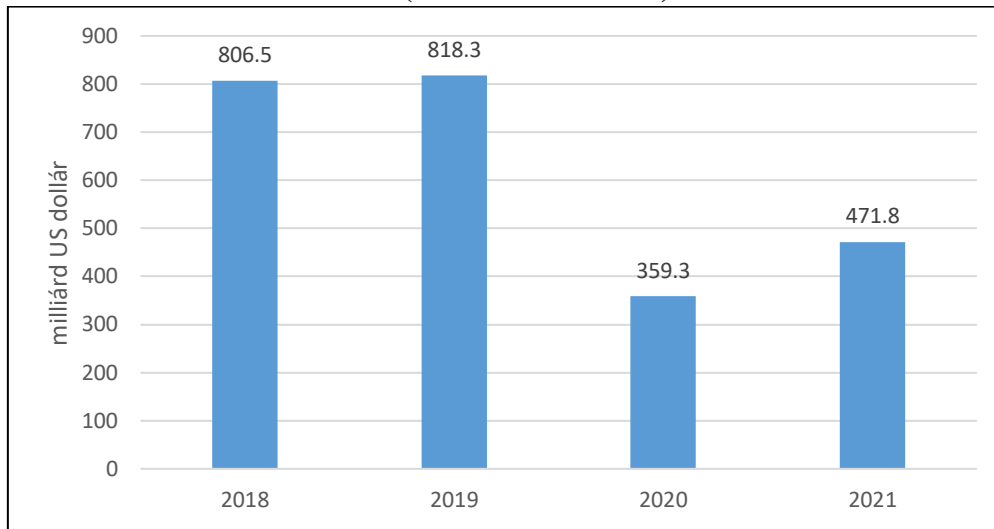
The aviation industry plays crucial role in the global economic development. It significantly contributes to the growth of connections between cities and countries, enabling the flow of goods, people, capital and technology due to its positions in various supply chains. However, the operation of airports poses serious environmental challenges for both their operators and airlines. Climate change and its negative effects are among the most important issues facing the aviation industry. Since commercial aviation is responsible for a significant percentage of carbon dioxide emissions, the industry has been under significant pressure to take concerted actions minimising the environmental impact of air travel. The strong commitment of different international organizations to achieve net zero carbon dioxide emissions by 2050 can also be existential importance for the aviation industry realising its future global economic model transformation. In addition, reducing carbon dioxide emissions, the availability of aviation fuels and their costs have been one of the main economic factors affecting the aviation industry for decades. The increase in jet fuel prices has serious direct impact on the financial portfolio of airlines. This review paper analyses two main areas of environmentally friendly green solutions that even if to a lesser extent but they can contribute to carbon-neutral operation: alternative sustainable aviation fuels (SAF) and the green taxiing of airplanes on runways. Adoption and application of these good practices can be significant step for the interested actors creating the conditions for their sustainable and cost-effective operation.

Keywords: Carbon accreditation, emission, green taxiing, sustainable aviation fuels (SAF), good practices

1. Bevezetés

A COVID-19 világjárvány világszerte jelentős hatással volt a légiközlekedési ágazatra, mind belföldi és nemzetközi utasforgalomra, mind a teherszállító légitársaságokra. Az iparág globális piaci méretét 2020-ban mindössze 359,3 milliárd dollárra becsülték, ami 56 százalékos értékcsökkenést jelent az előző évhez képest. 2021-ben ez 471,8 milliárd USA-dollárra növekedett, azonban ez kismértékű javulás a pandémia előtti adatokhoz, ahogy ez az 1. ábrán látható. A karantén intézkedések miatt bevezetett globális utazási korlátozások a légitársaságok utasforgalmát 2020-ban 60 százalékkal csökkentették 2019-hez viszonyítva. Emellett a kereskedelmi légitársaságok 137,7 milliárd dolláros nettó nyereségvesztésről számoltak be a járvány kitörése után. 2020-ban és 2021-ben a lezárásokon és a korlátozásokon túlmenően a légi utazók biztonságának és egészségügyi intézkedésekkel kapcsolatos bizalmának visszaesését figyelték meg a 2020-ban és 2021-ben (PwC 2022).

1. ábra: A globális légitölekedési iparág piac mérete 2018-2021 között (milliárd US dollár)



Forrás: Saját szerkesztés Statista (2022a) alapján

A Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség (IATA) 2022-re vonatkozó számításai 50%-os utasszám-növekedést jósoltak. Feltételezve a jövőbeni COVID-19-járványhullámok súlyosságának folyamatos csökkenését, az előrejelzések szerint 2023 és 2025 között lesz a „helyreállási időfolyosó”, amelynek során a globális utasszám visszatér a COVID-19 előtti szintre. Az elmúlt 20 hónapban a légitölekedési ágazatot a felmerülő nehézségek, kihívások a vártnál kevésbé „viselte meg”: globálisan 64 légitársaság jelentett csődöt, köztük 30 már beszüntette működését, 15 pedig jelenleg szerkezetátalakítás alatt áll, valamint 19 új légitársaság jelent meg a piacon (IATA 2022; PwC 2022; Statista 2022).

A légitölekedés és a légiszállítás az az iparág, mely a gazdaság fellendülésével párhuzamosan jelentős forgalom növekedést realizál, hozzájárulva az adott térségek fejlődéséhez, versenyképességének erősítéséhez. A légitölekedés az emberiség CO₂ kibocsátásának mindössze a 2%-ért felel, a közlekedés miatti kibocsátásoknak pedig a 12%-ért – szemben a közúti szállítással, mely 74%-ért. A légi úton az áruk csupán 0,5%-át szállítják, ám ezek értéke 35%-a a teljes kereskedelmi értéknek. Azaz olyan nagy értékű vagy romlékony áruk jutnak el a Föld egyik pontjáról a másikra, mint az elektronikai cikkek, műszerek, gyógyszerek, feldolgozott élelmiszeripari termékek, nagy értékű gépek, berendezések (ACI 2019). Amennyiben megtörténik a COVID-19 hatásaiból való kilábalás és az iparág folytatni fogja világszinten az évi kb. 5%-os növekedési ütemét, akkor a repülőipar mérete 15 éven belül megduplázódik, 25 év múlva pedig a triplája lesz a mainak. Az iparággal kapcsolatos egyik legnagyobb kihívás, a repülés környezetre gyakorolt hatása. Egy teljesen feltankolt Airbus A380-as, a hajtóműveit gyártó Rolls Royce cég felmérése szerint körülbelül 3500 autónak elég energiát használ fel egy repülés alatt. Egy New Yorkból San Franciscoba tartó repülőjárat során utasonként 2-3 tonna szén-dioxid jut a levegőbe. Szakemberek szerint a forgalommal együtt a károsanyag-kibocsátás is növekedni fog, 2030-ra már a mai szennyezés kétszeresét fogják majd a gépek a levegőbe juttatni (Varga és Tóth 2017; Larsson and Kamb 2019).

Ezért egyre inkább előtérbe kerülnek a repülés energiahatékonyságát javító, környezetkímélő fejlesztések. Az adatok szerint a 2018 májusát megelőző egy évben mintegy 347 000 tonnával csökkent a légitölekedés szén-dioxid-kibocsátása világszerte, mivel a repülőterek erősítették a klímavédelmi tevékenységüket – legyen szó akár a kibocsátás csökkentéséről, vagy

környezetbarát megoldások (mint például fenntartható energia) használatáról. Ugyanezt több mint nyolcmillió elültetett fa 10 év alatt lenne képes elérni. A repülőterek működtetésével, valamint a légiközlekedéssel kapcsolatos szén-dioxid kibocsátás kezelésének, csökkentésének és végső során semlegesítésének ösztönzése (a „karbon lábnyom” csökkentése), az erőfeszítések egységes követelmények mentén történő összehangolása érdekében indították el 2009-ben az „Airport Carbon Accreditation” programot. (ACI 2018; Arató 2018). A világon jelenleg 274 repülőtér – a teljes globális utasforgalom 43%-ával - teljesítette a különböző szintű karbon akkreditációs minősítés követelményeit, az EU egyik vállalása, hogy 2030-ra 100 európai repülőtér fogja megszerezni a karbonsemleges minősítést (UN CIP 2022).

A repülőterek széndioxid-akkreditációja az egyetlen önkéntes globális szén-dioxid-kibocsátás kezelési szabvány a repülőterek számára, amely ösztönzi őket a szén-dioxid-gazdálkodás legjobb gyakorlatainak megvalósítására. Ahhoz, hogy egy repülőtér megfeleljen a karbonsemlegesség követelményeinek négy, különböző szintű, egymásra épülő, fokozatosan szigorodó akkreditációs eljárásen kell átmenniük. 1. szint: A szén-dioxid kibocsátás forrásainak teljes körű feltérképezése; 2. szint: A szén-dioxid kibocsátás csökkentése; 3. szint: A repülőterek és repülőgépek üzemeltetési folyamataiban a szén-dioxid kibocsátás optimalizálása; és a 3+. szint: Semlegesség, azaz a repülőtér a működtetéséhez nem használ olyan szén-dioxid kibocsátással járó energiaforrást, illetve a minimalizált széndioxid kibocsátást teljes mértékben semlegesíti (például a repülőtéri zöldfelületek növelésével megköti a szén-dioxidot). Az alábbi, 1. táblázat szemlélteti, az európai repülőterek különböző karbon akkreditációs szintjeit.

1. táblázat: Az európai repülőterek karbon akkreditációs szintjeinek megoszlása 2021-ben

Szint	Európai repülőterek száma és részesedésük az európai utasforgalomból
1.	20 ország 63 repülőtere van akkreditálva erre a szintre, amelyek az európai utasforgalom 3,1%-t jelentik.
2.	18 ország 56 repülőtere van ezen a szinten akkreditálva, amelyek az európai utasforgalom 7,8%-t jelentik.
3.	12 ország 26 repülőtere van ezen a szinten, amelyek az európai utasforgalom 20,4%-t jelentik.
3+	16 ország 38 repülőtere teljesítette ezen szint követelményeit, ezek az összeurópai utasforgalom 18,5%-t jelentik.

Forrás: Saját szerkesztés Airport Carbon Accreditation (2022) alapján

Az akkreditációs program alapelveinek hátterét az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye (UNFCCC), valamint a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO), az Egyesült Államok Szövetségi Repülési Igazgatósága és az Európai Bizottság (EC) ajánlásai, és az ISO 14064 szabvány előírásai (üvegházhatású gázok számbavétele) jelentik. A program hitelességét a független akkreditálási eljárás biztosítja. A Repülőtéri Karbon Akkreditációs rendszer a közvetlen és a közvetett szén-dioxid kibocsátásokat is figyelembe veszi (a karbonlábnyomhoz hasonlóan). A kibocsátások semlegesítésére, kompenzálására azonban csak a megelőzés, illetve a hatékony működés magas szintű megvalósítása után van lehetőség (EU 2021; Favrel et al. 2022; ISO 2018; UN CIP 2022; UNFCCC 2018).

A széndioxid-kibocsátás teljes körű feltérképezése és csökkentése érdekében a repülőtér-üzemeltetőknek figyelembe kell venniük a közvetlen ellenőrzésük alatt álló kibocsátási források teljes körét. Az energiahatékonyabb világítás, a fűtés, a hibrid- vagy elektromos földi járművekre való áttérés, a helyszíni megújuló energiaforrások, az energiagazdálkodási

eszközök. a fel és leszállási műveletek innovatív megoldásokon alapuló folyamatos támogatása, az utasok számára tisztább közlekedési megoldások nyújtása a repülőtérre való kijutásra, illetve a városba való bejutásra elektromos vagy hibrid taxikon keresztül és a munkavállalói magatartásváltás rendszeres képzések, szemléletformáló tréningek) mind szerepet játszanak ebben a folyamatban. Jelen tanulmány a különböző környezetbarát zöld megoldások közül két területet: a repülőgépek levegőben eltöltött ideje alatti alternatív meghajtásokat, üzemanyagokat, illetve a földi gurulóúton való zöld gurulási (vontatási) megoldásokat mutatja be átfogóan konkrét gyakorlati példákkal alátámasztva.

2. Módszertan

Jelen cikk az esettanulmány módszerén alapul, leírva a kutatás tárgyához kapcsolódó klímavédelmi, kibocsátás csökkentési, fenntarthatósági döntéseket, kihívásokat, lehetőségeket, melyekkel a légi közlekedési iparág szembesül. Az esettanulmány egy kvalitatív kutatási módszer (a vizsgálat tárgyának mélyreható elemzésére összpontosító kutatás, ahelyett, hogy statisztikákat használna általános következtetések levonására), inkább segít megérteni a folyamatokat, és a köztük lévő összefüggéseket, azaz lényegében egy valós esemény szimulációja (Rashid et al. 2019; Diop and Liu 2020). Az esetmódszer kutatási megközelítése a különböző tényezők közötti kapcsolatot leíró esettanulmányokra (case study) alapoz (Yin, 2003). Fókuszában egy adott szektor, terület vagy szervezet működésével kapcsolatos kihívások jelentik a főbb kérdéseket. A módszer összetett és részproblémákat tár fel, mutat be: az eset feldolgozása a részproblémák megválaszolását jelenti. A bemutatott probléma értelmezhetősége, megoldhatósága miatt, az esettanulmánynak tartalmaznia kell a megfelelő mennyiségű, minőségű információt. Hiteles és hihető: az esettanulmányban foglalt döntési helyzetnek, információnak valósnak, koherensnek kell lenni, hogy konkrét megoldás épülhessen rá. Akkor alkalmazzuk, ha 1) sokszínű tényezők közötti kapcsolatot vizsgálunk, 2) az egyes tényezők közötti kapcsolat meghatározásához nincs egyértelmű algoritmus, szabályrendszer, valamint 3) a tényezők és a kapcsolatok közvetlenül megfigyelhetők. Az esettanulmánnyal egy adott témával vagy témával kapcsolatos hipotézisek vagy elméletek tesztelését, validálását, hasonló helyzetek, jelenségek ellenőrzését vagy összehasonlítását végezzük el akkor, ha költség vagy egyéb okokból nincs lehetőségünk nagyobb számú mintán dolgozni. A kivitelezés módja: kérdőívek, interjúk, adatbázisok, hazai és nemzetközi dokumentumok, publikációk elemzése (Ábrahám, 2018).

Jelen cikkben bemutatott adatok elemzése során levont következtetések, megállapítások, javaslatok a szerzők szakmai magánvéleményét tükrözik.

3. Perspektivikus zöld megoldások

3.1. Alternatív repülőgép üzemanyagok

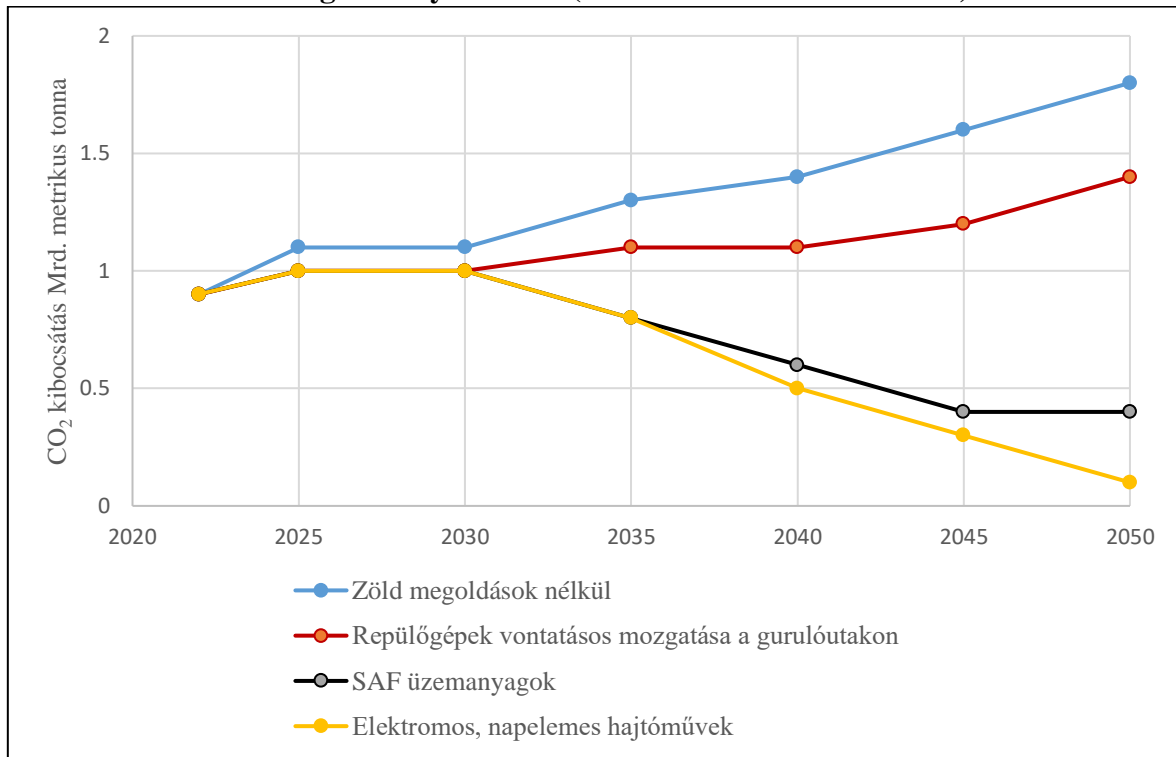
A jelenlegi légi járművek hajtóművei szinte kivétel nélkül olyan szénhidrogén alapú folyékony tüzelőanyagokkal működnek, melyek fűtőértéke 42000–44600 kJ/kg. Ez, dugattyúmotorok esetében repülőbenzin, gázturbinás sugárhajtóműveknél kerozin. A fosszilis energiahordozók korlátozott mennyisége, károsanyag kibocsátás és egyéb környezetszennyezések a hagyományos hajtóanyagok költséghatékony, takarékos felhasználását tette indokolttá különböző műszaki megoldásokkal (korszerűbb, takarékos hajtóművek /turbófan, propfan/ és sárkányok /szuperkritikus szárny, winglet, pontosan meghatározott aerodinamikai formák és csatlakozások/ alkalmazása). Ezekkel párhuzamosan új, alternatív energiaforrások

megtalálására irányuló fejlesztések is elindultak (Óvári és Szegedi 2010). Ez utóbbiakkal szemben elvárás, hogy az energiahatékonyság javításával egyidőben legyenek

- magas fűtőértékű, nem környezetszennyező; kémiaiilag, halmazállapotukat tekintve stabil anyagok, amelyek nem lépnek reakcióba a fedélzeti tüzelőanyag-rendszer elemeivel; hosszú időre, megbízható, költség-és energiahatékonyan, környezetbarát módon kitermelhető, feldolgozható tartalékok álljanak belőlük rendelkezésre;
- alkalmasak a repülőgép szükséges berendezéseinek, hajtóműveinek, légkondicionáló rendszerének és hordfelületeinek (a lamináris áramlási zóna kilépőél irányába történő kitolása érdekében) a kívánt mértékű hűtésére; a jelenleg meglévő repülőgéppark és az annak kiszolgálásához szükséges infrastruktúra változtatás nélkül, vagy minimális átalakítással legyen alkalmas a velük történő működésre. (A jelenleg használt repülőgép típusok üzemanyag tartályaiba feltölthetve, a rendszer elemei ezeket továbbítani képesek, a hajtóművek velük, legalább korábbi hatékonyságukkal működjenek).

Az EU Fenntartható és Intelligens Mobilitási Stratégia (COM 2020) prioritásként kezeli a fenntartható légi jármű-üzemanyagok (SAF) elterjedését, mivel ezek segíthetik a 2030-ra vonatkozó, uniós éghajlat-politikai és klímasemlegességi célok megvalósítását, amelyek a légiközlekedési iparra is vonatkoznak. A fenntartható légi jármű-üzemanyagok olyan folyékony, „helyettesítő” légi jármű-üzemanyagok, amelyek helyettesíthetik a hagyományos légi jármű-üzemanyagokat. Az emissziók csökkentése érdekében a légiközlekedési ágazatnak csökkentenie kell a fosszilis sugárhajtómű-üzemanyagtól való kizárólagos függőségét, minél előbb váltania kell az innovatív és fenntartható üzemanyag-típusokra és technológiák alkalmazására. Míg az alternatív légi jármű-meghajtási technológiák – például a villamos energia vagy a hidrogén – előrehaladást mutatnak, kereskedelmi célú alkalmazásuk bevezetése erőfeszítéseket és felkészülési időt igényel. Mivel a légi közlekedésnek már 2030-ig kezelnie kell szénlábnyomát valamennyi repülési tartományban, a fenntartható folyékony légi jármű-üzemanyagok szerepe alapvető fontosságú lesz. Egy előrejelzés szerint a becslések szerint a légiközlekedési ágazat összes kibocsátása 2050-re 400 millió tonna szén-dioxidra csökken, ha fenntartható repülőgép-üzemanyagokat alkalmaznak (Statista 2022b)

2. ábra: A légitársasági ágazat várható CO₂-kibocsátása 2022 és 2050 között, forgatókönyv szerint (milliárd metrikus tonnában)



Forrás: Saját szerkesztés Statista (2022b) alapján

Globális szinten a fenntartható légitársasági üzemanyagokat az ICAO szabályozza. Az ICAO részletes követelményeket állapít meg a nemzetközi légi közlekedés kibocsátáskompensációs és -csökkentési rendszere (CORSIA) hatálya alá tartozó légi járatokon használt fenntartható légitársasági üzemanyagok fenntarthatóságára, nyomon követhetőségére és elszámolására vonatkozóan. Bár a CORSIA ösztönzőket határoz meg, és a fenntartható légitársasági üzemanyagok a nemzetközi légi közlekedésre vonatkozó, törekvésként megfogalmazott hosszú távú célok megvalósíthatóságára irányuló munka fontos pillérét alkotják, jelenleg nincs kötelező rendszer a fenntartható légitársasági üzemanyagok nemzetközi járatokon való használatára vonatkozóan (ICAO 2019).

Cseppfolyósított (kriogén) gázok, mint alternatív repülőgép üzemanyagok

Hosszútávú utánpótlás, kitermelhetőség legnagyobb valószínűséggel a vízből biztosítható, mivel belőle gyakorlatilag korlátlanul kinyerhető a hidrogén. Ezenkívül a kőolaj, valamint földgáz kitermelés során melléktermékként megjelenő un. paraffin-szénhidrogének (minden tagjuk a közös, általános - C_nH_{2n+2} - képlettel előállítható homológ sor eleme, kémiaiilag is hasonlóak), közülük az első 5-7 gáznemű, illetve folyékony. Utóbbiakat napjainkig előírások és kimunkált technológia hiányában rendszerint a feltárás helyszínén elégetik. A repülőgépek (járművek) működtetésére az 1. táblázatban felsorolt gázokat, a tárolás gazdaságossága, a hajtóműbe történő adagolás pontossága miatt cseppfolyósított (kriogén) állapotban célszerű alkalmazni.

2. táblázat: Kriogén gázok és jellemzőik*

Üzemanyag képlete	Kerozin JET A	Hidrogén H ₂	Metán CH ₄	Etán C ₂ H ₆	Propán C ₃ H ₈	Bután C ₄ H ₁₀	Pentán C ₅ H ₁₂	Hexán C ₆ H ₁₄
Olvasás (°C)	<-60	-261,9	-182,5	-183,3	-187,7	-138,3	-129,7	-95,3
Forrás (°C)	136÷227	-252,8	-161,7	-88,6	-42,1	-0,5	36,1	68,7
Δt cseppfolyós (°C)	196÷287	kb. 9	kb. 21	kb. 95	kb.145	kb. 138	kb. 166	kb. 163
Kritikus jellemzők								
Hőmérséklet (°C)	374	-240	-82,6	-32,3	96,8	152	196,6	234,7
Nyomás (MPa)	2,42	1,3	4,6	4,9	4,3	3,8	3,3	3
Üzemanyag sűrűsége (kg/m³)								
Olvasáskor	775÷785	71,07	424,4	546,4	582	601,5	610,1	664
Forráskor	835	77,15	453,4	650,7	733,1	736,4	761,2	756,9
Égéshő (20 °C-on) kJ/kg								
Maximális	46470	135380	56290	51910	50380	49535	49045	48710
Minimális	43290	114485	49930	47515	46390	45745	45380	45130

Forrás: Saját szerkesztés Óvári és Szegedi (2010) alapján

* A táblázatban felsorolt gázok közül – rendkívül magas égéshője, és/vagy a hosszú távú, ipari méretekben biztosítható kitermelhetősége miatt – a hidrogén, metán, propán és bután jöhet elsősorban számításba.

Ezen megoldás megvalósítási költségeit - az üzemanyag ipari előállítási árán kívül - a repülőtereken történő tárolás, tisztítás, továbbítás, az oda történő, illetve belső szállítások, a légi járműveken belüli tárolás, ülepítés, szűrés, továbbítás, adagolás, az elégetésre alkalmassá tétel konstrukciós biztosításának anyagi ráfordításai nagymértékben módosítják. A hidrogén (metán) tartós tárolására, továbbítására szolgáló tartályok, csővezetékek anyagának megtalálása, létrehozása - a fémes anyagok ezen a tartós hőmérsékleten bekövetkező ridegedése miatt – még számos kihívást tartalmaz a konstruktőröknek. Hasonló kihívás a mozgó alkatrészek – a nagy nyomáson működő szivattyúk, munkahengerek – kenésének, tömítésének folyamatos, meghibásodás-mentes biztosítása.

A cseppfolyósított gázok tárolása alacsony hőmérsékleten és/vagy magas nyomáson történik (Óvári 2009). Így a tárolásra alkalmas tartálnál lényegesen szilárdabb konstrukció szükséges, mint a hagyományos kerozin tárolótartályok, a reá ható esetenként jelentős nyomáskülönbségek miatt, aminek elviselését az alacsony hőmérsékleteken (t<100 °C) bekövetkező szerkezeti anyag ridegedés nehezíti. Emellett a nagyobb túlnyomások (p>3 bar) esetén tartályformaként nem alkalmazható - a sárkány szabad belső tereit optimálisan kitöltő – bonyolult térbeli alakzat, csak gömb, vagy henger jöhet számításba. A folyékony gáz alacsony hőmérsékletének fenntartására vastag hőszigetelő rétegekkel kell bevonni, illetve párolgásának (térfogat növekedésének) megakadályozására többnyire aktív hőszigetelést is szükséges alkalmazni.⁸ Utóbbiak működtetése rendszerint járulékos energiafelhasználást is igényel. Az üzemeltetés

⁸ A súlyosabb konstrukciót eredményező megoldásnál a tartály falára széles, zárt pórusú fenoplaszt réteget rögzítenek. Ebben a 0,127 mm vastagságú MAAMF, többrétegű alumíniumszálas szövetrétegek hajlékony, porózus fenoplaszt található, amit réteges kompozitból (kevlarból) készült bevonat fed. Ezt viszont már a törzs borítása követi. A hőszigetelés hatásfokának javítására a porózus hőszigetelő rétegbe N₂ gázt vezetnek (amiből, számítások szerint 9000 km megtételéhez 90 kg felhasználása szükséges!). A drágább, könnyebb és vékonyabb kialakításnál (-28 mm) hőszigetelőként vákuumot (9) (p =13 Pa) alkalmaznak, melyet vákuum-szivattyú tart fenn. A vákuumteret a N₂-vel hűtött, hajlékony fenoplaszt rétegből a 0,127 mm vastagságú bor-szilikát zóna választja el.

során további különbség, hogy ezen gázok nagy része (például LH_2 , LCH_4) – külön energia betáplálása nélkül - cseppfolyós állapotban, a repülést követően nem maradhatnak a tartályokban.

A jelenlegi gázturbinás hajtóművek működési elve megfelel, a gázneművé visszamelegített tüzelőanyagokkal történő működtetésre. A teljes hajtómű-elrendezés változatlan maradhat, de az égőtér át kell alakítani a hidrogén (metán) előnyös tulajdonságainak hasznosítására. Az égőtér a kerozinos rendszerhez képest megrövidíthető, lehetővé téve a szükséges hőcserélő beépítését, ami visszaalakítja a cseppfolyós hidrogént (metánt) gázzá az égőtérbe történő betáplálás előtt. A szükséges üzemanyag-mennyiség pontos szabályozása még néhány megoldandó kérdést felvet. Az alacsony hőmérsékletű cseppfolyós gázokkal jól hűthetők az olajrendszer, a légkondicionáló rendszer, a turbinalapátok, a sárkány egyes elemei, miközben az égőtérbe táplált üzemanyag is előmelegíthető. A cseppfolyósított gázokkal üzemelő légijárművek tüzelőanyaggal történő feltöltése (leszívása) különbözik a benzinnel és kerozinnal üzemelő rendszerekétől. A töltő–leszívó berendezés hermetikusan, hőszigetelten csatlakozik a repülőgép farokrészhez. A gépjármű, a földalatti tápcsatornában levő vezetékek és a repülőgép töltőcsönkje összekapcsolására szolgál. Ezt megelőzően, a gépkocsi saját semleges gázrendszeréből héliummal átfúvatja az összekötő csöveket és csatlakozókat a repülőgép tüzelőanyag-rendszerébe a levegő oxigéntartalma bekerülésének megakadályozására. (Üres tartályok feltöltése ugyancsak a teljes rendszer héliummal történő átfúvatásával kezdődik). Ha a repülőgép hosszabb ideig tartózkodik az állóhelyen, a cseppfolyós hidrogén gyors felmelegedésének megakadályozására vákuum-szivattyúval a gázneművé vált felmelegedett hidrogént elszívják és helyére a tartályok folyadék feletti terébe hűtöttet vezetnek. Amikor a feltöltött gép nincs a repülőtéren táprendszerre csatolva, a tüzelőanyag-rendszer biztosító szelepei lehetővé teszik a felmelegedett, gáz-halmazállapotúvá vált hidrogén távozását a szabadba. A hidrogén tárolása is új technológiákat igényel, tárolható például kriogén folyadéktartályokban, nagy nyomású gázként vagy szilárd formában. Szállítására vezetékrendszerek már épültek Észak-Amerikában, Belgiumban és Hollandiában, de még gondot okoz, hogy az anyagok szerkezete ridegebbé válik tőle, elvesztik szívósságukat, valamint meg kell oldani, hogy a hidrogén ne diffundáljon el belőlük. Közúton és vasúton is szállítható. A propán, bután repülőtéren tárolása, szállítása, szivattyúzása is megoldható a jelenlegi technológiákkal ⁹.

Hibrid meghajtású repülőgépek

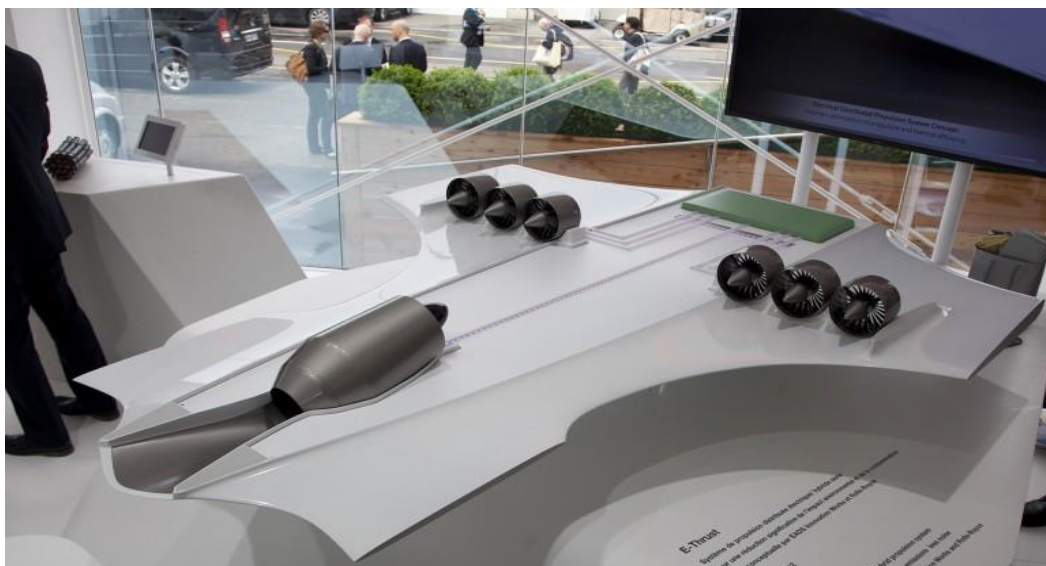
Az európai óriáscég, az EADS elképzelése szerint az új hibrid meghajtással repülő utasszállító 2050-ben már a légiközlekedés alapgépe lehetne (Ecolife 2015). A koncepció, amelyet a Rolls-Royce közreműködésével dolgoztak ki, az E-Thrust nevű meghajtáson alapul, amely az eConcept nevű gépet működtetné. A hibrid meghajtás egyik eleme elektromotorokkal működő csőlégcsavarok sora, hat lenne belőlük a szárny-törzs csatlakozásnál a törzsbe süllyesztve. A gép elektromos meghajtású, de mégsem teljesen: a légcsavarok az áramot az akkumulátorokból

⁹ A másik alternatíva a különböző növényi olajokból készülő, megújuló energiaforrásként tekinthető bioüzemanyagok (biodízel, bioetanol). Az ezekből kinyert olaj közvetlenül alkalmazható üzemanyagként vagy hozzákeverhető hagyományos üzemanyagokhoz (dízel, benzin, kerozin). A SAF követelményeinek is megfelelő bioüzemanyagok: pálmaolaj/szójabab olaj, hulladékolaj (főzőolaj) cukor, keményítő és lignocellulóz alapanyagok (kommunális hulladékok, állati zsiradékok, nem élelmiszer növények). Ezekből különböző fermentációs, katalitikus termokémiai és egyéb folyamatokkal SAF céljaira alkalmas „zöld üzemanyagok” állíthatók elő. Ezeknél már 10%-os részarány mellett is azzal a kihívással kell szembenézni, mint a bioetanol, biodízel esetében: a mezőgazdasági művelésre alkalmas területeket vonnak el az élelmiszertermeléstől egy olyan mezőgazdasággal, ami maga is fosszilis energiákkal működik -szántás, műtrágya (Cabrera and de Sousa 2022).

kapják, de az akkumulátorokat egy gázturbina tölti, amely mögöttük, a gép középvonalaiban, a közel függőlegessé felhajló vízszintes vezérsíkok vonalában helyezkedik el. Feltehetően ez sem lesz azonos a mai szokásos gázturbinákkal, de alapvetően ezek továbbfejlesztett változata. Az Airbus elképzelése szerint a sok kisebb elektromotornak áramot termelő egy nagyobb gázturbina jobb, mint a több kisebb gázturbina. A felszállás előtt a gépakkumulátorait a földön töltik fel, a gázturbinát felszálláskor és emelkedéskor a légsavarak közvetlen meghajtására működtetik, utazómagasságon viszont, nyilván sokkal kisebb fordulatszám mellett, csak az akkumulátorok feltöltésére. Ezért elég egy, és elég egy nem túlságosan nagy szerkezet ehhez, miközben a koncepcióhoz az is hozzá tartozik, hogy a földi áramforrás is valamiféle zöld energiaforrásból termelje az áramot. A kisebb gázturbina erősen csökkenti a zajterhelést, egyébként láthatóan a turbina és a csőlégsavarak is úgy vannak elhelyezve, hogy lefelé, a föld irányába gyakorlatilag maga a gép szigeteli a hajtóművek hangját (IHO 2013). Utazómagasságon a turbina működik, süllyedésre és megközelítésre az eConcept vitorlázógépként repül, így ekkor a légellenállás által forgatott légsavarak visszatáplálják az áramot az elektromos rendszerbe. A leszállásra ismét bekapcsolják az egyetlen gázturbinát, hogy az meghajthassa a légsavarakat, ha erre mégis szükség lenne.

Ezzel a módszerrel mindig van elég áram az akkumulátorokban is a meghajtáshoz. A mai 12:1-es nagy kétáramúságú hajtóművekhez képest az elektromos légsavarak aránya 20:1-hez. Ez csökkenti az üzemanyagfogyasztást, ráadásul ezeket a légsavarakat úgy építik össze a szárnytörzs átmenettel, hogy minimális a zaj és a légellenállás. A turbinát besüllyeszti a törzsbe, és a törzs fölötti decensen lapított beömlőn át kap levegőt. Teljesen új elektromos rendszert kell kiépíteni a termelt, illetve raktározott energia megfelelő elosztásához, és addigra remélhetően megoldódik az áram tárolásának a mai akkukhoz képest sokkal könnyebb, hatékonyabb formája. A repülőgép üzemanyag-igénye és károsanyag-kibocsátása egyaránt alacsony.

3. ábra: Az eConcept makettjének szerkezeti nézete



Forrás: IHO (2013)

Napelemes energiaforrás - Solar Impluse repülőgépek

A villamos meghajtás térhódításának napjainkban legnagyobb gátja az energia megfelelő hatásfokú tárolása, valamint az erre szolgáló eszközök (akkumulátorok) hosszú idejű, körülményes feltölthetősége¹⁰. Az akkumulátorok 25-35%-os tömegaránya látszólag kedvezőbb a kerozinos, benzines rendszerek 45-55%-os arányánál, csak hogy az utóbbi üzemanyagok ~1 dl-ben (0,72-0,86 kg) kb. annyi energia-mennyiség van, mint amennyit egy 20 kg-os ólomakkumulátor tárolni képes. A legkorszerűbb lítium-ion (Li-ion), valamint a lítium-polimer (Li-Po) akkuknak ennél ugyan kedvezőbb az energiatárolási hatékonyságuk, azonban még a mobil-telefonokban sem kielégítően biztonságosak (esetenként kigyulladnak, robbannak), a repülőgép energia-rendszerében történő felhasználásuk is okozott már súlyos baleseti kockázattal járó repülőeseményt. Ezért inkább nikkel-kadmium (NiCd), vagy tartósabb nikkel-fémhidrid (NiMH) akkumulátorokat alkalmaznak. A repülőgépek meghajtásának egyik kézenfekvő megoldása a napenergia hasznosítása, amelyre már hosszabb ideje folytak kísérletek. Az indító prototípus fejlesztése 2006-ban kezdődött és egészen 2009-ig tartott. Vele az első nappali felszállást 2010. április 7-én, míg az éjszakait 2010. július 7-én hajtották végre (Haas 2018). A HB-SIA 1,3 m³ térfogatú, túlnyomás nélküli pilótafülkéjében egy fő foglalhat helyet. Szárnya alatti gondolákban helyezték el az (lítium-polimer) akkumulátorokat. Ezeket a szárny és a vízszintes irányfelületek felső, ~200 m²-es felületén elhelyezett 11 628 db napelem tölti fel energiával. Négy elektromos motorjának teljesítménye egyenként 7,5 kW, melyek átlagosan 70 km/h-s sebesség elérését teszik lehetővé. A repülőgép hossza 28,85 m, a magassága 6,4 m, a szárnyfesztávolsága 63,4 m (összehasonlításképpen Airbus A340-es sorozat szárnyfesztávolságai 60,3–63,45 m). A repülőgép törzskialakítása konvencionális rácsszerkezet, ahol a négy hosszirányú szénszálcsőkeresztmetszetű övrudat, az oldallapok mentén egyenlőszárú háromszög formában elhelyezett rácsrudak kötik össze (Aerospace Technology 2022).

4. ábra: Solar Impulse repülőgép prototípusa



Forrás: Aerospace Technology (2022)

¹⁰ A jelenlegi akkumulátortechnológia mellett az elektromos meghajtású gépek hatótávolsága alig haladhatja meg az ezer kilométert. Így nemhogy a transzatlanti útvonalakon, de még csak Európán belül sem jöhetnek reálisan szóba.

A négyszög keresztmetszetű, szénszál erősítésű kompozit főtartóra, 50 cm-ként, hasonló anyagú 120 db bordát rögzítettek. A szárny szendvics szerkezetű, méhsejt (hexagonális cellás) töltőanyaggal, alját könnyű, rugalmas filmréteggel vonták be. A szárnyak alatt négy, a törzssel azonos szerkezeti kialakítású gondolában helyezték el a légcsavarokat meghajtó villanymotorokat, és az energiát tároló 70 db lítium-polimer akkumulátort, valamint az akkumulátorok töltöttségét és hőmérsékletét ellenőrző irányító rendszert. Ugyancsak ide építettek be gondolánként 2–2 MPPT (Maximum Power Point Trackers) nevű szabályzó egységet, melyek elektromos áramkörként optimalizálják a villamos energia felvételét a napelemekből, és szabályozza az akkumulátorok töltését. Nagy repülési magasságokon (~8500 m) és/vagy éjszakai repüléskor a környezeti alacsony hőmérséklettől a gondolában lévő berendezéseket hőszigetelő réteg védi. Az elektromos motorok kétlapátos, 3,5 m átmérőjű légcsavarokat hajtanak meg, percenként 400 fordulattal. A Solar Impulse repülőgépen elhelyezett központi fedélzeti számítógép begyűjti, majd elemzi a repülőgép és a repülés aktuális paramétereit, információkat ad a pilótának, telemetriai kapcsolatot tart fenn a földi, műszaki személyzettel, optimális teljesítmény leadásra állítja a motorokat, miközben ellenőrzi az akkumulátorok töltöttségét is. A Solar Impulse több repülési rekordot állított fel, leszállt négy kontinensen (Ázsia, Észak-Amerika, Európa és Afrika), átkelt két óceánon (Csendes- és Atlanti-óceán), átrepült a Földközi-tenger és az Arab-félsziget felett is. Az út Japán és Hawaii közötti szakaszában André Borschberg megdöntötte a leszállás nélküli leghosszabb szóló repülés rekordját (117 óra 52 perc), Bertrand Piccard pedig elsőként repülte át az Atlanti-óceánt napelemes repülőgéppel (Haas 2018). A Föld körbepülésére tett kísérlete során a Solar Impulse-nak számos kihívással kellett megküzdenie, mint például a napelemek energiatermelésének maximalizálása, a megújuló energia integrálása a villamosenergia-elosztó rendszerekbe és az energiahatékonyság javítása¹¹. A Solar Impulse 2 négy lítium-polimer akkumulátorral működik, mindegyik 38,5 kilowatt per órás teljesítménnyel – így összesen 154 kilowatt per órás akkumulátorteljesítménnyel repül a gép. Napközben szolárgenerátor repteti az SI-t, ami egyszerre tölti fel ezeket az akkumulátorokat is. A nappali 5500 méteres magasságból éjszaka a gép körülbelül 2500 méterre ereszkedik, ahol csak az akkumulátorok energiájából jut előre.

3.2. Repülőgépek gurulótakon való mozgatásának környezetkímélő lehetőségei

A nemzetközi repülőtereken a légijárművek, a repülésre feltöltött üzemanyaguk 2-4%-át a felszálló pálya eléréséig, majd a leszállásukat követően az állóhelyre történő eljutáshoz, a megállásokkal, várakozásokkal tarkított gurulás közben használják fel. Ez nem csak a nagytömegű, főlegesen felhasznált üzemanyag ára miatt kedvezőtlen, de az eközben működő

¹¹ A napelemes repülő prototípusának kifejlesztése, tesztelése rávilágított arra, hogy a távolsági vitorlázó repülőgépekhez hasonló jellegű komplex problémákat kell megoldani. A csendes, környezetbarát vitorlázó repülőgépek a repüléshez szükséges energiát a különböző sebességű szelekből és a felfelé tartó meleg légáramlatokból (termikek) nyerik. A termikek azonban bizonytalan légköri jelenségek, jellemzően megszűnnek éjszakára, így többnapos repülést nem lehet ezekre alapozni. A távolsági vitorlázó repülőgépek fejlesztésére több irányban folynak a kísérletek. Az Ausztráliai Robotikai Kutatóközpont (ACFR) dinamikus szárnyalásra programozott robotpilótával látta el a vitorlázó repülőgépet. A rendszer a gyors légmozgások kihasználására irányítja a gépet, így a felhalmozott lendületet fel lehet használni az emelkedésre. A gép ciklikusan használja fel az erősebb szeleket, így vagy a sebességet, vagy a repülési magasságot tudja növelni. „A rendelkezésre álló szélenergiával mindig tud repülni, gyakorlatilag addig maradhat a levegőben, amíg anyagfáradás miatt nem történik valami”. A Lange Aviation vállalat évek óta gyárt moovitokat (segédmotoros vitorlázógépek). Az legkorszerűbb típusok akkuról hajtott légcsavarral, vontatás, csörlés nélkül, önállóan képesek vitorlázó magasságba emelkedni. Ott a villanymotort kikapcsolva, a légcsavart a törzsbe hajlíthatják. Szükség esetén (kifogynak az emelések, termikek), ismét üzembe állíthatják az elektromotort (Szűcs 2012).

hajtóművek üzemeltetési költsége, amortizációja is magas, számottevő az okozott környezetszennyezés. A folyamatosan növekvő energia- és üzemanyagárak, az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások és a fenntarthatósági szempontok a konstruktőröket, repülőgéptársaságokat, valamint a repülőterek üzemeltetőit a repülőgép működése minden fázisának e szempontok szerinti alapos vizsgálatára és átértékelésére kényszerítették. A vizsgálat főbb megállapításait az alábbi, 3. táblázat tartalmazza:

3. táblázat: Légijárművek működtetésével kapcsolatos megállapítások

Sorsz.	Megállapítás lényege
1.	A légitársaságok közvetlen üzemeltetési költségeiben jelenleg már 30-40%-os összetevő az üzemanyagár
2.	Jelentősebb repülőtereken - főleg rövid távú járatoknál - egyetlen repülőúton, közvetlen a teleszkópikus utas folyosótól történő kitolás utáni hajtómű indítás, a felszállás előtti, és a leszállást követő, guruló utakon, működő hajtóművekkel történő haladás (forgalmas repülőtereken, napszakokban az ezt megszakító tetemes idejű megállások, várakozások) során az üzemanyag-felhasználás eléri az egész repülőúthoz szükséges mennyiség 4%-át.
3.	Repülőtéren történő haladást biztosító működő hajtóművek számottevő járulékos tüzelőanyag fogyasztásán túl a por, szennyeződés, idegen tárgy beszívása miatt kopásuk, elhasználódásuk is nagyobb, de önmagába az üzemidő felhasználásuk is növeli az üzemeltetési költséget.
4.	Esetenként a hajtóművek akár alapjáratú üzemeltetési módján leadott teljesítménye is több, mint ami a repülőtéren történő gurulási sebesség fenntartásához szükséges, így a kerekek folyamatos, vagy szakaszos fékezése is szükséges.
5.	A hajtóművek károsanyag- és zajkibocsátása jelentősen terheli a környezetet, miközben a repülőtereknek és légitársaságoknak egyre szigorúbb környezetvédelmi előírásoknak kell megfelelniük és hiányosságok esetén folyamatosan szigorodó bírságokra számíthatnak.
6.	A légijárművek üzemeltetése során egyre inkább előtérbe kell kerülniük a gazdasági megfontolások mellett a „zöld tervezési” szempontoknak”, amelyeket különböző modellezési és szimulációs módszerekkel lehet megalapozni, figyelembe véve a repülőgép típusok szerkezeti kialakítását, méreteit, terhelését, a gurulóúton eltöltött időt, valamint a fel- és leszálláskor elhasznált üzemanyag mennyiségét, szennyező anyag kibocsátást.

Forrás: Saját szerkesztés Kavas et al. (2015) és Ferra et al. (2020) alapján

A légitársaságok és a repülőgépgyártók is intenzíven foglalkoznak azzal a kérdéssel, hogyan lehet a földi guruláskor a hajtóművek erejét a csendes és károsanyag-kibocsátás nélküli elektromos rendszerekre cserélni. Az elsődleges ok, ami a légitársaságoknak vonzóvá teszi ezeket a megoldásokat, a költségcsökkentés: a zsúfolt reptereken nagyon sok üzemanyag takarítható meg, ha a pályáig nem kell beindítani a hajtóműveket, főleg, ha a gurulás közben adódik forgalmi probléma, ami miatt a gépeknek várakozniuk kell felszállás előtt. Minden olyan megoldás, amely kíméli a környezetet, csökkenti a zajterhelést, a károsanyagkibocsátást, egyben növeli a hajtóművek élettartamát is. Ezen megoldásokat mutatja be a 4. táblázat.

4. táblázat: Főbb zöld gurulási megoldások

Megoldás	Leírás	Hivatkozás
Személyzet nélküli tolvontató (push-back) gépjárművel Taxibot rendszer	Nem a repülőgép kap hibrid meghajtást, hanem a pilóták által a gépből vezérelt vontató, amely az utashídtól a pályáig viszi a gépet felemelt orrfutóval, hogy csak röviddel felszállás előtt legyen szükség a hajtóművek bekapcsolására, majd a légijárműről lekapcsolva, a vontató eszköz a központi diszpécser szolgálat utasításai alapján – a repülőtéren üzemeltetett indukciós vezetékkel, illetve GPS segítségével – automatikusan közlekedik következő feladatának színhelyére.	(Ganev et al. 2016; IHO 2015; Taxibot 2020)

	A landolás után ugyanez a sorrend fordítottan, hajtóművek kikapcsolása után a taxibot a géphez gurul, majd irány a terminál, csendesen, ráadásul télen még stabilabban is.	
Orrfutó kerekek meghajtása villanymotorral WheelTug® rendszer	A repülőgépezető fülkéből kormányozhatja az orrfutómű kerekeket és fokozatmentesen szabályozhatja a haladási sebességet (max. 20 km/h-ig). Az előre és hátramenetet egyaránt biztosító indukciós villanymotorokat a repülőgép gázturbinás segédhajtóműve (Auxiliary Power Unit) látja el elektromos árammal. A felépített rendszer össztömege 136 kg, a motor elhelyezése és működése nem zavarja a kerékféket. A megoldás hátránya, hogy az orrfutóműre a repülőgép tömegének 7-10%-a jut, ami a leszállást követően akkor problematikus, ha például egy 75 tonna felszálló tömegű A320 esetében 44 tonna alá csökken a leszálló tömeg, mivel a villanymotorral meghajtott 5-7 tonnás orrfutókerék terhelése úgy lecsökken, hogy megcsúszhat a pályán. Ilyenkor rajta ébredő nyomaték ~6000 Nm-ig is növekedhet, ami lényegesen meghaladja az engedélyezett 3500 Nm-t. E terhelés a pálya valamilyen talajegyenetlenségén való áthaladáskor is elérheti az 5800 Nm-t. Guruláskor a meghajtott kerék alacsony részterhelése miatt, csúszós és/vagy már minimális emelkedésű pályán akár haladásképtelenné is válhat a repülőgép.	(Kavas et al. 2015)
Főfutómű kerekek meghajtása villanymotorral (Electric Green Taxiing System-EGTS)	A WheelTug hátrányait küszöböli ki a Honeywell és a Safran cégek együttműködésben kimunkált Electric Green Taxiing System (EGTS) elnevezésű rendszer. Ennek lényege, hogy a villanymotoros meghajtást a főfutóművekre telepítik (referencia modell az AIRBUS A-320).	(Kavas et al. 2015; Thierry Safran, Warwick 2012)
Repülőgép mozgatása a repülőtéren az orrfutóműre csatolt, külső elektromos vontató kocsi (Mototok® rendszer)	A Mototok rendszerű, orrfutóműre csatolható önjáró, 4 darab zselés, 200 Ah-ás akkumulátoros toló-vontató eszköz működéséhez nem szükséges semmilyen belsőégésű motor (de szükség szerint akkumulátora működésközben a repülőgép APU-járól is utántölthető. Olyan, max. 50 tonna tömegű légi jármű mozgatására alkalmas, ahol az orrfutóműre jutó terhelés nem haladja meg a 6 tonnát. Saját tömegével is terheli a repülőgép orr-részét, így az nem csúszik meg, felszállás előtt leválaszthatják a repülőgépről, így repülés közben nem jelent plusz tömeget.	(Frank et al. 2016; Kavas et al. 2015)
Okos gurulóutak	A gurulóút betonjába épített középvezetőjelzők a gépek előtt csak azon az irányon világítanak, amerre a gépnek a futópálya és a terminál közötti úton haladnia kell. Az eredmények azt mutatják, hogy a gurulás ideje 10-37%-kal csökkenthető látási viszonytól és a rendszer automatizáltságának mértékétől függően, a kerozin fogyasztás és károsanyag-kibocsátás pedig 20-40%-kal csökkenthető a rendszer használatával. Az okos jelzőberendezések (optikai és elektromechanikai szenzorok, big data és online platform megoldások a repülőtéren környezeti adatok gyűjtésére, elemzésére) segítségével a repülőtér hatékonyabban is tud működni, mivel csökkenti az üzemeltetési költségeket, és a gépek földi mozgatása is sokkal előnyösebb: rossz látási viszonyok között is olyan jó hatékonysággal üzemelhet a repülőtér, mint tiszta időben.	(Autopro 2017; Körtvélyes 2017a; Liu et al. 2022))

Forrás: Saját szerkesztés a táblázatban hivatkozott referenciák alapján

A fenti megoldások közül leginkább a repülőgépek álló helyről egy erre a célra tervezett vontató járművel (traktorral) való indulás előtti push-back kitolatása terjedt el. Ezen Taxibot-szerű tolatás kétféle módon történhet: nagy teherbírású vontató tengellyel (towbar) vagy hidraulikusan megemelt orrfutóval (towbarless).

5. ábra: Merev vontatótengelyes repülőgép vontató



Forrás Trepel Airport GmbH weboldal <https://trepel.com/products/aircraft-tractors/>

Az 5. ábrán látható vontató tengelyes megoldások esetében a földi kiszolgáló személyzet feladata, hogy a nehéz vontató tengely vonóhorogját megbízhatóan csatlakoztassák a repülőgép orrfutójához. Ez potenciálisan veszélyes, sérülések kockázatait magában rejtő folyamat. Másfelől azt is biztosítani kell, hogy a vonóhorog ne váljon működés közben, ezért a repülőgépeket viszonylag kis sebességgel lehet csak mozgatni. Ezen megoldásnál minden repülőgéphez típus más-más vontatótengelyt kell alkalmazni. Ezért csak abban az esetben kifizetődő, ha az adott repülőtéren mozgatott repülőgépek típusvariációja csekély. Ezzel szemben a hidraulikusan megemelt orrfutós vontatóknál nincs szükség merev vontatótengelyre és az adott repülőgép típushoz csatlakoztatható vontatóhorogra (és ezek raktározására). A vontató a különböző típusú repülőgépek orrfutómű kerekeit felemeli a földről és egy fő kezelőszemélyzet szükséges csupán, aki a vontató vezetőfülkéjében a volán mögé ül. A megemelt orrfutóműves vontatók sokkal hatékonyabbak - nagyobb gurulási sebesség, jobb manőverezhetőség, kevesebb holtér, költség optimalizáltabb, biztonságosabb működés (ASR Admin 2020; Aviation 2017; Eagle 2022; Martin 2008; Salamon 2012).

A hidraulikusan megemelt orrfutós vontatók, illetve ezek szerkezeti elemeinek kialakítását z érintett gyártó cégek többféleképpen oldották meg.

Különböző típusú repülőgépek álló helyzetből való vontatására alkalmas, integrált szerkezetű elektromos meghajtású vontató traktor. A repülőgép orrfutómű kerekét teleszkópos, hidraulikus emelőszerkezet emeli meg a vontatáshoz és helyezi el az orrfutóműkerekek biztonságos rögzítésére szolgáló dobogóra (kerék tartóba). A vízszintes kialakítású felvevődobogó függőlegesen emeli meg az orrfutómű kerekeket (Guizhou Inst. of Technology 2014).

Egy másik megoldás a gépjármű karosszéria hátsó részére épített emelőszerkezetet foglal magában, amely egy kábel segítségével emeli meg az orrfutómű kereket. A vezérlő mechanizmus a megemelt orrfutómű kereket összenyomja, és a keréktartóba süllyeszti. A kábellel való összeköttetés megmarad a repülőgép vontatásának teljes időtartama alatt (Xinxiang Pingyan Aviation Tech. Eng.Co.Ltd. 2018).

További kivétel egy hidraulikusan megemelt orrfutóműves vontatási megoldást foglal magában. A vontatószerkezet hornyos kialakítású, amikor a repülőgép orrfutómű kerekei belépnek a horonyba, ezek egy reteszeléssel rögzítésre kerülnek, és egy hidraulika megemeli őket (Shanghai Hangfu Airport Equipment Co Ltd. 2013).

Európában a német Goldhofer GmbH fejleszt és gyárt különböző megoldású, a különböző repülőgépek orrfutókerekeit hidraulikusan megemelő vontató típusokat (lásd 6. ábra). A „PHOENIX” típusú termékcsalád minden tagja kompakt és moduláris járműkonceptión alapul. Igény szerint különböző kapacitású elektromos hajtásláncokkal (66 – 165 kWh kapacitás tartomány, gyorsan tölthető zselés ólom vagy lítium-ion akkumulátorok) vagy hibrid hajtással lehet ellátni, a vezetőfülke és a vontató mérete, geometriai kialakítása ergonomikus, egyedileg testre szabható, kis terhelés mellett is maximális úttapadás, szűk fordulókör. A repülőgépek számos típusának vontatására alkalmas 352 tonnáig, 32 km/h maximális sebességgel, alacsony üzemeltetési költséggel és hosszú élettartammal (Goldhofer 2021; Goldhofer 2022).

Az intenzív mérnöki fejlesztések célja, a meglévő és működő towbarless vontató megoldások mellett újabb prototípusok kifejlesztése, tesztelése, gyártásba vitele, akár formatervezési, akár belső szerkezeti kialakítások, akár újabb szabadalmaztatható megoldások megvalósítása révén.

6. ábra: Orrfutókereket megemelő „PHOENIX E” Goldhofer vontató



Forrás: Lufthansa Group (2022)

4. Jó gyakorlatok a légiközlekedési iparágban a szén-dioxid kibocsátás csökkentése és karbonsemlegesség elérése érdekében

4.1. Fenntartható alternatív üzemanyagok (SAF) alkalmazása

Qatar Airways

2009-ben a Qatar Airways egyik - kettő Rolls Royce Trent 556 kétáramú gázturbinás hajtóművel felszerelt Airbus A340-600 repülőgépe (első kereskedelmi légitársaságként a világon) - földgázból előállított üzemanyag keverékkel repült Londontól Doháig. A Shell fejlesztett ki és gyártotta az 50%-ban szintetikus Gas to Liquids (GTL) cseppfolyósított gázt, valamint 50%-ban hagyományos olajalapú kerozint tartalmazó üzemanyagot. Elégetése során kevesebb kéndioxid és más káros anyag kerül a levegőbe, mint tiszta kerozin elégetésekor, így a levegőt is kevésbé szennyezi. A hagyományos üzemanyag és GTL elegyének új neve GTL Jet Fuel lesz. Ez a repülőút volt az utolsó lépcsője annak a több, mint két éve zajló tudományos kutatásnak, melyet az Airbus, a Qatar Airways, a Qatar Petroleum, a Qatar Science & Technology Park, a Rolls-Royce, a Shell és a WOQOD konzorciuma folytatott a GTL Jet Fuel használatának előnyeiről a kereskedelmi repülésben. A munka java része a Qatar Science & Technology Parkban folyik Dohában. Az együttműködésnek köszönhetően Katar lehet majd a világ vezető GTL kerozin-előállítója. Másfelől Qatar Airways kulcsfontosságú lépést tett a 2030-ra kitűzött fenntarthatósági céljainak elérése felé azzal, hogy aláírt egy öt évre szóló megállapodást 25 millió amerikai gallon SAF-nek a GEVO cégtől való megvásárlásáról is, amelyet a GEVO évente 5 millió gallonos részletekben szállít a megrendelő részére (Hardiman 2022).

Air France: a világ egyik legalacsonyabb CO2 kibocsátású légitársasága

Az Air France-KLM-csoport 2030-ra kerozinigényének 10 százalékát fenntartható forrásból származó repülőgép-üzemanyaggal (SAF) elégíti ki, ennek érdekében szerződést írt alá a Neste és a DG Fuels vállalatokkal, amelyek 1,6 millió tonna kerozint szállítanak a légitársasági csoportnak 2036-ig. Ennek révén a teljes életciklusra vetítve 4,6 millió tonna szén-dioxid kibocsátása kerülhet el a hagyományos kerozinhoz viszonyítva (Airportal 2022). A világon elsőként az Air France 1 óra 20 perces repülőútja Toulouse-Blagnac és Párizs-Orly között a világ legalacsonyabb széndioxid-kibocsátású járata volt. Ennek érdekében az Air France mindent megtett a zajsint és a széndioxid-kibocsátás csökkentése terén:

Fenntartható üzemanyagok 50%-os keverékének használata: A hagyományos kerozin és hidrogénezett elhasznált növényi olajból készült biokerozin használatával az Air France AF6129-es járata a repülőgépek legfontosabb széndioxid-forrását csökkentette. A járat során keletkező emisszió értéke 54 g CO₂/utas-km volt, ami fele a hagyományos járatok emisszióinak. A felhasznált bioüzemanyag egy megújuló, fenntartható energiaforrás, ami nem rendelkezik a mezőgazdasági biomassa használatához kapcsolódó környezeti és társadalmi hatással: az elhasznált növényi olajból készült bioüzemanyag előállítása nem történik az élelmiszer-termelés kiszorításának kárára, és nem csökkenti a vízi erőforrásokat. Ezen típusú bioüzemanyag használatát az Amerikai Anyagvizsgálati Társaság (ASTM), a tervezeteket és műszaki szabványokat kibocsátó szabványügyi intézet is elismerte 2011 nyarán. A teljes életciklusa alatt az emissziók 80%-os csökkenése történik. Az A321-es repülőgép meghajtását biztosító kerozint az Airbus szolgáltatta, és ez biztosította az üzemanyag megfelelő minőségét a Toulouse-ba való kiszállítástól a repülőgép feltöltéséig. Az Air France már több éve aktívan vesz részt a fenntartható bioüzemanyagok fejlesztésében. 2008. szeptember 25-én az ASTM

egy fenntartható bioüzemanyag chartát írt alá, amit a WWF és a Természetes Erőforrások Védelmi Tanácsa (NRDC) állítottak össze. Az Air France KLM ugyanakkor részt vesz a Fenntartható Bioüzemanyag Keresasztal (RSB) által végzett kutatásban is, aminek fenntarthatósági kritériumait 2011 júliusában az Európai Bizottság is elismerte.

Öko-repülés és optimalizált repülési eljárások: Az üzemanyag-fogyasztás és a széndioxid-kibocsátás csökkentésére maximális repülésbiztonság mellett az Air France pilótái a légiforgalmi irányítással együttműködve a leginkább üzemanyag-hatékony eljárásokat alkalmazták a repülőút minden szakaszában. Összesen 11 000 tonna széndioxidot lehetne megtakarítani, ha az összes Toulouse-i ingajarat esetén ezeket az öko-repülési eljárásokat alkalmaznák. Ez a kereskedelmi járat a társaság ambiciózus programjának része, hogy hozzájáruljon a klímaváltozás hatásainak mérsékléséhez.

4.2. Zöld elektromos energia a repülőtereken

Schipol Nemzetközi Repülőtér (Hollandia)

Zöldenergia felhasználására kötött megállapodást a The Schipol Group, így 2020-tól az összes nagy holland repülőtér megújuló energiaforrásból, az Eneco szélérőműfarmjaitól kapja az elektromos energia ellátását. A légiközlekedési szektor számára létfontosságú az energiafelhasználás átállítása a fenntarthatóság jegyében. Ebben a Royal Schipol Group úttörő szerepet játszik, mivel példát mutat másoknak, az Eneco pedig a befolyó pénzből újabb szélérőműveket tud telepíteni. A holland repülőtér-üzemeltető lépése nem csak a fenntarthatóság, de a karbonsemlegesség szempontjából is fontos lépés, mivel egyes kutatások szerint 2050-re a légiközlekedés adja majd a karbon-kvóta negyedét. A repülőterek azonban már egyre több helyen állnak át fenntartható forrásból származó energia használatára. Legutóbb a helsinki repülőtér kapott karbonsemleges minősítést, amely azt tanúsítja, hogy a repülőtér üzemelése közben nem használ szénhidrogén erőforrásokat (Körtvélyes 2017b).

4.3. Karbonsemleges működési mód elérése

Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér

Ismét megszerezte a karbonsemleges minősítést a Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér, az üzemeltető Budapest Airport a szén-dioxid-kibocsátásban további tíz százalékos csökkentést jelentett be (Airportal 2018; JetFly 2018).

A Budapest Airport először 2018. áprilisában érte el ezt a magas környezetvédelmi minősítést a Repülőterek Nemzetközi Tanácsának európai divíziójától, amelynek lényege, hogy a repülőtér működése során keletkező széndioxid-kibocsátást teljes mértékben képes ellensúlyozni. Ezeket a szigorú környezetvédelmi normákat Európában mindössze 39 repülőtér teljesíti, javarészt skandináv és olasz repülőterek, a régióban a budapesti az egyetlen karbonsemlegesen üzemelő repülőtér. A karbonsemleges minősítést 2019-ben újabb egy évre ismét sikerült megszereznie. A repülőtér üzemeltetője saját környezetvédelmi programot indított, hogy optimalizálja saját, illetve a repülőtéren működő partnercégek tevékenységét, ezzel csökkentse a repülőtér szén-dioxid-kibocsátását és egyéb környezeti hatásait. A Budapest Airport az elmúlt időszakban elérte, hogy a repülőtéren működő cégekkel közösen egyre több területen alkalmazzanak elektromos meghajtású járműveket, számos helyen növelte az épületek és hangárok hőszigetelését, optimalizálták a vízhálózatot és a vízfelhasználást, emellett egy kínai szélérőműprojekt működése által megtakarított, úgynevezett karbonkrediteket is vásárolt

a Budapest Airport, ezzel hozzájárulva a klímaváltozás elleni nemzetközi küzdelemhez. A karbonsemlegességet célzó környezetvédelmi programjukat összehangolták a Green Airport programmal, amelynek keretében optimalizálták az elektromos áramfogyasztást, modernizálták a fűtési rendszert, illetve felújították az ivóvízhálózatot. A Budapest Airport a program 2016-os elindítása óta közel ötven százalékkal csökkentette a repülőtér az egy főre eső szén-dioxid-kibocsátást. A repülőtér üzemeltető társaság bejelentette: 2019 és 2021 között a 2016-os szinthez képest további tíz százalékkal csökkentette az egy utasra számított széndioxid kibocsátást együttműködve a repülőtéren működő légitársaságok közül például a Wizz Airrel, földi kiszolgáló szervezetekkel, kereskedelmi, logisztikai partnereivel, valamint a légiforgalmi irányítást végző HungaroControlal, a NAV repülőtéri kirendeltségével és a Magyar Posta repülőtéri Nemzetközi Logisztikai Központjával is.

4.4. Zéró emissziós, elektromos meghajtású, a repülőgépek orrfutóműkerekeit megemelő vontató

Frankfurti Nemzetközi Repülőtér (Németország)

A Lufthansa LEOS, a Lufthansa csoport földi kiszolgálója a német Goldhofer cég Phoenix E, teljesen elektromos vonóhorog nélküli repülőgép vontatóinak egyik fő használója. A tisztán akkumulátoros elektromos járművek a frankfurti repülőtéren üzemelnek. Egy-egy jármű legfeljebb 352 tonna felszálló tömegű repülőgépeket képes mozgatni rövid és nagy távolságokon a parkolóhelyek, a karbantartó hangárok és az indulási helyek között. Az elektromos vontató előnyei nyilvánvalók; kibocsátások, zaj vagy rezgés nélkül mozgatja a repülőgépeket. A 165 kilowattórás akkumulátorkapacitás és 240 kilowatt hajtási teljesítmény révén a repülőgépek akár 32 kilométeres óránkénti sebességgel is mozgathatók. A vonórúd nélküli repülőgép vontatók működésének ellenőrzésekor figyelembe kell venni, hogyan alakul az akkumulátorok töltöttségi állapota. A járművenként akár napi 20 vontatási feladat energiaszükséglete majdnem kétszerese az akkumulátor kapacitásának. A hőszabályozású lítium-ion akkumulátor rendszer lehetővé teszi a gyors újratöltést még rövid munkamegszakítások esetén is, ami egy dedikált töltési infrastruktúra felhasználásával, zöld árammal történik. A Lufthansa LEOS évek óta elkötelezett a fenntarthatóság mellett. 2014 óta a cég új, fenntartható földi kiszolgálási koncepciókat tesztl a Fraporttal az E-PORT AN kezdeményezés részeként. A teljesen elektromos vonóhorog nélküli repülőgép-tractoron kívül már két hibrid vontatójármű is üzemel a frankfurti repülőtéren. A Lufthansa Csoport 2020 óta kizárólag zöld áramot szerez be a belföldi piacokról. További intézkedésként a Csoport 2030-ra áttér a CO₂-semleges földi mobilitásra (Lufthansa Group (2022)).

Összefoglalás

Egy adott repülőtér kapacitása számos tényező függvénye, beleértve infrastruktúrájának kapacitását (kifutópálya, guruló utak és földi közlekedést kiszolgáló úthálózat minősége és fejlesztése, terminálok és földalatti létesítmények), valamint az infrastruktúrák működtethetősége, menedzselése. Számos klímavédelmi, fenntarthatósági kérdés azonban olyan működési korlátozásokhoz vezethet, amelyek megakadályozzák a rendelkezésre álló létesítmények teljes körű használatát. A repülőtérfejlesztők sokszor több százmillió eurót/dollárt/fontot fektetnek be az új infrastruktúrákba (például egy terminál megépítésébe, beüzemelésébe), de nem rendelkeznek elegendő ismeretekkel a repülőtér környezetvédelmi kapacitásának feltérképezéséhez, megbecsléséhez, így az új létesítményeket nem lehet teljeskörűen kihasználni.

A jövőbeni megfelelő környezeti kapacitás biztosítása érdekében a repülőtereknek elegendő erőforrást kell befektetniük a környezetirányítási rendszerek kiépítésébe és a környezeti hatások enyhítésébe a fenntartható és környezetbarát működtetés érdekében. Ez szükségessé teszi a szolgáltatási partnereikkel való széleskörű és szoros együttműködéseket, valamint a repülőtér által megfogalmazott környezetvédelmi célok teljesítése érdekében a rendszeres ellenőrzéseket, hogy a repülőterek teljes működésének környezeti hatásait (kereskedelmi szempontból fenntartható) minimumra tudják csökkenteni. Jelen cikk a klímavédelem és a szén-dioxid kibocsátás szempontjából a különböző, fenntarthatóság irányába mutató zöld megoldások közül két területet: a repülőgépek levegőben eltöltött ideje alatti alternatív meghajtásokat, üzemanyagokat, illetve a földi gurulóutakon való zöld gurulási (vontatási) megoldásokat mutatta be széleskörűen, nemzetközi jó gyakorlatokkal alátámasztva. Ezek kombinált megvalósítása a jövőben hozzájárulhatnak a légi közlekedési iparág szén-dioxid kibocsátási volumenének csökkentéséhez.

Másfelől a közúti, és a vasúti járműtechnika egyértelműen az önvezető rendszerek irányában történő elmozdulásról szól napjainkban. A közúti technika közismertebb, de a vasúti vontatásban is megjelentek az önvezető forgóvázak (Bogie-k), amelyek megfelelő informatikai rendszerhez kapcsolódva képesek önállóan feladatot ellátni, önállóan dönteni. Az említett technikának a megvalósítása - előkészítése, bevezetése – előremutató, a közúti, vasúti és légi földi közlekedés rendszer szintű egységesítése, fejlesztése irányában mutató lépés lehetne.

A változó befektetői preferenciákból adódóan egyre több tőke áramlik olyan térségekbe, ágazatokba, vállalatokba, amelyek a fenntarthatóság szempontjából és az Environmental, Social and Governance (ESG) megközelítés alapján jól teljesítenek. Az ESG-szemlélet három fő területe a környezeti hatások vizsgálata, a társadalmi kérdések kezelése és a vezetői döntéshozatal folyamata. A rendszeren belüli minősítések (ratings) segítenek a nehezen értelmezhető működési tulajdonságokat lefordítani a számok nyelvére. Az ESG-stratégiát követő pénzügyi szakemberek már a fenntarthatósági szempontok alapján rangsorolják a cégeket, ágazatokat és ez alapján hozzák meg befektetési döntéseiket. Az előbb említett jó gyakorlatok megvalósításával a repülőterek és légitársaságok lépéseket tehetnek az ESG szemléletű üzleti modell kialakítása felé, amelynek előfeltétele egy szervezeti kultúra- és szemléletváltás egyidejű megvalósítása.

Köszönetnyilvánítás

Jelen esettanulmány az alábbi projekt keretében valósult meg:

Az EFOP-3.6.1-16-2016-000 kódszámú, *“Lézertechnológiai és energetikai alap kutatás megvalósítása az Edutus Főiskolán, tudástranszfer, továbbá a vállalati kapcsolatok és a társadalmi szerepvállalás erősítését célzó tevékenységekkel kiegészítve”*.

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Ábrahám Zsolt (2018): Mit adnak nekünk az esettanulmányok. Az esettanulmány módszer áttekintése, Budapesti Corvinus Egyetem, 169. sz. Műhelytanulmány, ISSN 1786-3031, URL: http://unipub.lib.uni-corvinus.hu/3639/1/Abraham_169.pdf
2. ACI (2018): <https://www.airportcarbonaccreditation.org>
3. ACI (2019): Global carbon standard for airport operators marks 10 years; ACI Press Release; <https://www.aci-europe.org/press-releases.html>
4. Aerospace Technology (2022): Solar Impulse HB-SIA Solar Airplane; <https://www.aerospace-technology.com/projects/solar-impulse/>
5. Airportal (2018): Három év alatt felére csökkentette szén-dioxid kibocsátását a Budapest Airport; <https://airportal.hu/harom-ev-alatt-felere-csokkentette-szen-dioxid-kibocsatasat-a-budapest-airport/>
6. Arató Gergely (2018): Évről-évre csökken a repülőterek szén-dioxid kibocsátása; <https://www.kozlekedesvilag.hu/2018/10/evrol-evre-csokken-repuloterek-szen-dioxid-kibocsatasa/>
7. ASR Admin. (2020): Benefits of Towbarless Tractors; <https://aviationspares.com/benefits-of-towbarless-tractors/>
8. Autopro (2017): Jelentősen csökkenthető a környezetszennyezés az okos repülőtéri gurulóutakkal egy tanulmány szerint; <https://autopro.hu/szolgaltatok/jelentosen-csokkenthető-a-kornyezetszennyezés-az-okos-repuloteri-guruloutakkal-egy-tanulmány-szerint/183952/>
9. Aviation (2017): What are the advantages of towbarless pushback tugs?; <https://aviation.stackexchange.com/questions/45109/what-are-the-advantages-of-towbarless-pushback-tugs>
10. Cabrera, E. and de Sousa, J.M.M (2022): Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. Energies, 15, 2440. doi: <https://doi.org/10.3390/en15072440>
11. K. A. S. Diop and E. Liu (2020): Categorization of case in case study research method: new approach; Knowledge and Performance Management, Volume 4 (1) 1-14; doi: 10.21511/kpm.04(1).2020.01
12. Eagle (2022): Aircraft Tractors: Traditional vs. Towbarless Tugs; <https://eagletugs.com/towbarless-versus-traditional-aircraft-tugs>
13. Ecolife (2015): Sci-fi vagy valóság? Így változnak a repülőgépek; https://ecolife.blog.hu/2015/09/09/sci-fi_vagy_valóság_így_változnak_a_repülőgépek
14. European Commission (2020): Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future, COM(2020) 789
15. A. Favrel; C. Foucherot; J. Grimault and V. Bellassen (2022): Recommendation for the European Carbon Certification Framework; Institute for Climate Economics; <https://www.i4ce.org/en/publication/recommendations-european-carbon-certification-framework/>
16. Marcello Fera, Raffaele Abbate, Mario Caterino, Pasquale Manco, Roberto Macchiaroli and Marta Rinaldi (2020): Economic and Environmental Sustainability for Aircrafts Service Life; Sustainability 2020, 12, 10120; doi:10.3390/su122310120 www.mdpi.com/journal/sustainability

17. Christopher Frank; Jean-Guillaume Durand; William Levy; Frederic Allair and Dimitri N. Mavris (2014): Design of an Improved Green Taxiing System. Focused around the Landing Gear; AIAA 2014-3010, Session: Aircraft Subsystems Design and Integration; doi: <https://doi.org/10.2514/6.2014-3010>
18. Ganev, E., Chiang, C., Fizer, L., and Johnson, E. (2016): "Electric Drives for Electric Green Taxiing Systems"; SAE Int. J. Aerosp. 9(1):62-73; <https://doi.org/10.4271/2016-01-2013>.
19. Guizhou Inst. of Technology (2014): CN203958627U jelű, 2014.11.26-n közzétett szabadalmi bejelentés; <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/051919247/publication/CN203958627U?q=CN203958627U>
20. Goldhofer (2021): Goldhofer's Electric Towbarless Aircraft Tractor Passes Test; HeavyLiftNews; <https://www.heavyliftnews.com/goldhofers-electric-towbarless-aircraft-tractor-passes-test/>
21. Goldhofer (2022): Towbarless tow tractors; <https://www.goldhofer.com/en/towbarless-tractors>
22. Maya Wei-Haas (2018): Inside the First Solar-Powered Flight around the World; <https://www.smithsonianmag.com/innovation/inside-first-solar-powered-flight-around-world-180968000/>
23. J. Hardiman (2022): Qatar Airways Signs Deal For 25 Million Gallons Of SAF From 2028; <https://simpleflying.com/qatar-airways-25-million-liter-saf-deal/>
24. IATA (2022): Airlines Cut Losses in 2022; Return to Profit in 2023; <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-12-06-01/>
25. ICAO (2019): CORSIA Emission Unit Eligibility Criteria; https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO_Document_09.pdf
26. ICAO (2022): CORSIA Emission Units; https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/TAB/ICAO%20Document%2008_Eligible%20Emissions%20Units_November%202022.pdf
27. IHO (2013): Hibrid utasszállítóval repülünk 2050-ben?; <https://iho.hu/hirek/hibrid-utasszallitoval-repulunk-2050-ben-130625>
28. IHO (2015): Csendes gurulás, Frankfurtban a pilóta vezet!; <https://iho.hu/hirek/csendes-gurulas-frankfurtban-a-pilota-vezet-150222>
29. ISO (2018): ISO 14064-1:2018; Greenhouse Gases; <https://carbon.landleaf-tech.com/wp-content/uploads/2022/04/ISO14064-1-2018.pdf>
30. JetFly (2018): Budapesté az első "karbon semleges" repülőtér!; <https://www.hsz.hu/phirek/8/budapest-airport/budapeste-az-első-karbon-semleges-repuloter>
31. Kavás László; Óvári Gyula és Rozovicsné Fehér Krisztina (2015): A Gazdaságos és környezetkímélő repülés feltételei megteremtésének a lehetőségei a repülőtereken; Repüléstudományi Közlemények XXVII. évfolyam 2015. 1. http://epa.oszk.hu/02600/02694/00067/pdf/EPA02694_rtk_2015_1.pdf
32. Körtvélyes Tivadar (2017a): Jelentősen csökken a gurulóidő az okos középvaljelzőkkel; Airportal; <https://airportal.hu/jelentosen-csokken-a-guruloido-az-okos-kozepvaljelzokkel/>
33. Körtvélyes Tivadar (2017b): Zöldenergiával látják el a nagy holland repülőtereket; <https://airportal.hu/zoldenergiaval-latjak-el-nagy-holland-repulotereket/>

34. Jörgen Larsson and Anneli Kamb (2019): Travel and Climate Methodology Report. Version 2.0. Chalmers University of Technology Gothenburg; <https://travelandclimate.org/sites/default/files/Methodology-report-Travel-and-Climate-Version-2.pdf>
35. Lufthansa Group (2022): Emission-free aircraft towing: Lufthansa LEOS is the launch customer of the all-electric towbarless aircraft tractor Phoenix E; <https://www.lufthansagroup.com/en/newsroom/releases/emission-free-aircraft-towing-lufthansa-leos-is-the-launch-customer-of-the-all-electric-towbarless-aircraft-tractor-phoenix-e.html>
36. Xing Liu, Qi Wang, Chengming Zou, Mei Yu, Denghong Liao (2022): Edge intelligence for smart airport runway: Architectures and enabling technologies; Computer Communications, Volume 195, pages 323-333; ISSN 0140-3664; doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.09.003>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366422003437>
37. J. Martin (2008): Conventional or Towbarless Tractors?; <https://www.aviationpros.com/gse/article/10375718/conventional-or-towbarless-tractors>
38. Óvári Gyula (2009): Merev és forgószárnyas repülőgépek szerkezetana III. Repülőgépek rendszerei, (egyetemi/főiskolai jegyzet) KGYRMF, Szolnok, 1990.és lényegesen átdolgozott, multimédiás (PDF) változata (kézirat), ZMNE RLI 2009
39. Óvári Gyula; Szegedi Péter (2010): Hagyományos repülőgép üzemanyagok kiváltásának lehetőségei és korlátai; Hadmérnök V. évfolyam 4. szám; http://hadmernok.hu/2010_4_ovari_szegedi.pdf
40. Robert K. Yin (2003): Case Study Research, Design and Methods. Third Edition. Applied Social Research Methods Series, Vol. 5. SAGE Publications. 2003 .
41. SAFRAN (2015): EGTS; <http://www.safranmbd.com/systems-equipment-178/electric-green-taxiing-system/>
42. Michael R. Salamon (2012): Use of Towbarless Tractors at Airports—Best Practices; Federal Aviation Administration Airport Cooperative Research Program; ISBN 978-0-309-21393-6; DOI 10.17226/14649; <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3716.pdf>
43. PwC (2022): Aviation Industry Outlook; <https://www.pwc.ie/reports/aviation-industry-outlook-2022.html>
44. Rashid, Y., Rashid, A., Warraich, M. A., Sabir, S. S., & Waseem, A. (2019): Case Study Method: A Step-by-Step Guide for Business Researchers; International Journal of Qualitative Methods, 18. <https://doi.org/10.1177/1609406919862424>
45. Shanghai Hangfu Airport Equipment Co Ltd (2013): CN 202966671U jelű, 2013.06.05-n közzétett szabadalmi bejelentés; <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/048507779/publication/CN202966671U?q=CN%20202966671U>
46. Statista (2022a): Market-size airline industry worldwide (2018-2021); <https://www.statista.com/statistics/1110342/market-size-airline-industry-worldwide/>
47. Statista (2022b): Projected CO₂ emissions from the aviation industry between 2022 and 2050, by scenario; <https://www.statista.com/statistics/1189613/projected-co2-emission-aviation-worldwide/>

48. Szűcs József (2012): Repülni csendesen, új energiákkal -1; <https://iho.hu/hirek/repulni-csendesen-uj-energiakkal-1-121031>
49. Taxibot (2020): Taxiboting Concept; <https://www.taxibot-international.com/concept>
50. D. Thierry: WheelTug, Safran-Honeywell and IAI Offer Three Rival Solutions for Airline Engine-off Taxiing AVIATION NEWS 2014. 02. 11. (e-dok.) <http://www.ainonline.com/aviation-news/airtransport/2014-02-11/wheeltug-safran-honeywell-and-iai-offer-three-rival-solutions-airline-engine-taxiing>
51. UN Climate Initiative Platform (2022): Airport Carbon Accreditation; [https://climateinitiativesplatform.org/index.php/Airport_Carbon_Accreditation_\(ACI\)](https://climateinitiativesplatform.org/index.php/Airport_Carbon_Accreditation_(ACI))
52. UNFFC (2018): Yearbook of Global Climate Action. Transport Case Story – Airport Carbon Accreditation; https://unfccc.int/sites/default/files/resource/GCA_Yearbook2018_Annex03_Transport_Airport.pdf
53. Varga Béla, Tóth József (2017): Széndioxid, mint legfőbb „ellenség”, avagy mi az ICAO által létrehozott „CORSIA” szerepe ebben a harcban; Repüléstudományi Közlemények XXIX. évfolyam 3. szám http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-19-0437_Varga_Bela-Toth_Jozsef.pdf
54. G. Warwick (2012): Electric taxiing systems make development progress; https://www.researchgate.net/publication/292875095_Electric_taxiing_systems_make_development_progress
55. Xinxiang Pingyuan Aviation Tech. Engineering Co. Ltd (2018): CN207725643U jelű, 2018.08.14-n közzétett szabadalmi bejelentés; <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/063084582/publication/CN207725643U?q=CN207725643U>