



Nemzeti Közsolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Üzemeltető Intézet
Katonai Repülő Tanszék



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

REPÜLŐGÉPEK VILLAMOS HAJTÓMŰVEL – MEGÚJULÓ ENERGIA A FEDÉLZETEN

A konzulens neve, beosztása:

Dr. Békési Bertold okl. mk. alezredes, egyetemi docens

Prof. Dr. Makkay Imre ny. ezredes, egyetemi tanár

Készítette:

Juhász Márta honvéd tisztjelölt

Szolnok

2014.

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés	3
1. Repülőgép hajtóművek	6
1.1 Légcsavaros meghajtás.....	6
1.2 Sugárhajtóművek	7
1.3 Elektromotorok	8
2. Elektromos repülőgépek	11
2.1 Történeti áttekintés, elektromos meghajtású gépek.....	11
2.2 Napelemes repülőgépek.....	17
2.3 Pilóta nélküli repülőeszközök elektromos meghajtással	22
2.4 Elektromos rendszerek védelme	26
3. Az elektromos energia tárolása	28
3.1 Repülőgép akkumulátorok.....	28
3.1.1 Battery Management System.....	30
3.2 Üzemanyagcellák	31
3.2.1 UAV-k elektromos hajtása	36
4. Jövőkép	38
4.1 Pocket Airport	39
4.2 GPS alapú navigáció-leszállítás	42
4.3 Autonómia	43
4.4 Energiatárolás jövője	43
4.5 Napelemes technológia.....	44
4.6 Aeropak	44
4.6.1 Aeropak kémiai tartállyal	45
Összegzés	48
Felhasznált irodalom.....	50

BEVEZETÉS

„A repülés vágyát őseink hagyományozták ránk, akik a történelem előtti korokban tett fárasztó utazásaik során irigykedve figyelték, ahogy a madarak szabadon, teljes sebességgel szálltak a levegőben, felemelkedve az ég végtelen országútjára.”

(Orville Wright)

Bevezető gondolatok, a téma aktualitása

A repülés, a helyváltoztatás leggyorsabb és legpraktikusabb formája évezredek óta foglalkoztatja az embert. A legelsők között volt Leonardo da Vinci, aki már a 15. században repülőtechnikai eszközök tervezésével foglalkozott, majd következtek a Montgolfier-fivérek, akik hőlégballonjukkal emelkedtek a levegőbe. Az igazi áttörés persze 1903. december 17-én következett be, amikor az észak-karolinai Kitty Hawkban levegőbe emelkedett a történelem első légsavarral felszerelt motoros repülőgépe, melyet egy amerikai testvérpár, Wilbur és Orville Wright épített meg, több éves kitartó kísérletezés tapasztalatai nyomán. Ez volt az első alkalom a világtörténelemben, hogy egy a levegőnél nehezebb szerkezet, pilótával a fedélzetén felszállt a földről. Az ágazat fejlődése innentől kezdve már megállíthatatlan volt, majd a két világháború között megszületett az első működőképes gázturbinás sugárhajtómű, ami forradalmasította a repülés minden területét.

A repülésbiztonság prioritása mellett jelenleg az alkotók próbálnak nagyobb hangsúlyt fektetni a környezetbarát üzemeltetésre is. A légi közlekedésben az egyre gyorsuló ütemben növekedő környezetszennyezés káros hatásai a helyi zajtól egészen a globális éghajlatváltozásig terjednek. Egy felmérés szerint Európában a leggyorsabb tempóban a közlekedés által szennyeződik a környezet; a villamosság és a hő termelése után ez a harmadik legnagyobb szén-dioxid- kibocsátó ágazat. Kevesen tudják, de a szén-dioxid körülbelül 100 évig tartózkodik a levegőben, és ennek tetejében az elkövetkezendő 20 évben 40%-os növekedést jeleznek előre. A repülés a közlekedésen belül 2005-ben körülbelül 20%-kal járult hozzá a globális katasztrófa bekövetkezéséhez, és mivel az ágazat évente 4-5%-kal gyarapodik, 2020-ra ez az érték elérheti a 80%-ot is. A szén-dioxid mellett a kerozin égésekor nitrogén-oxidok is képződnek, amelyek ózon-károsító hatásúak. Egy másik kevés figyelmet kapó, azonban súlyos veszélyforrás a repülőgép fedélzetén lévő üzemanyag mennyisége, amely elérheti a maximális felszálló tömeg felét. Egy Boeing 747-800 esetében ez 240 ezer liter kerozin. Számos légi katasztrófa bizonyítja, hogy egy repülőgép szerencsétlenség esetén

a kigyulladó üzemanyag pár perc alatt képes a gép teljes megsemmisítésére és a mentés megakadályozására.

Ezeket a komoly indokokat felsorolva érthető, hogy egyre inkább nő egy biztonságos, környezetbarát technológia igénye. Ahhoz, hogy egy ilyen technológia teret hódítson a repülésben kultúraváltást kell megvalósítani a legfontosabb szakterületen: a meghajtásban. A jelenleg lehetséges „legzöldebb” formája az energia átalakításának és felhasználásának ezen a területen az elektromos hajtás [19].

A feldolgozás célkitűzései

Munkámban megvizsgálom a repülőgépek, illetve a pilóta nélküli légi eszközök alternatív meghajtásának lehetőségeit. Néhány ismertebb típus példáján keresztül bemutatom működésüket, és külön kitérek a napenergia felhasználásának lehetőségeire egy elektromos repülőgépben. Céлом továbbá, hogy néhány eddig még nem alkalmazott, vagy csak csekély mértékben előforduló új ötletet és irányt fogalmazzak meg, amelyek segíthetik a takarékosabb energiafelhasználást, ezáltal pedig az olcsóbb, gyorsabb és biztonságosabb közlekedést.

A célkitűzések eléréséhez alkalmazott feldolgozási, kutatási módszerek

A célkitűzésem eléréséhez először a jelenleg használatos meghajtások működését elemzem, majd azok hibáit, hiányosságait foglalmazom meg. Összehasonlítok két energiatárolási módszert, aminek segítségével könnyen láthatóvá válnak a jellemző tulajdonságok, előnyök és hátrányok. Felkutatva a külföldön előrébb járó ötleteket és kísérleteket, megvizsgálom megvalósításuk lehetőségeit a jelen technológia felhasználásával.

A hipotézisek

Munkámban előrevetítem, hogy az új lehetőségek mennyiben segítenék a gazdaságosabb repülés elérését. Bemutatom, hogy a közös cél, – avagy, a repülés környezetbaráttá tétele, és könnyű elérhetősége mindenki számára – mennyire áll messze a jelenlegi technológiától, mi akadályozza annak kialakulását, illetve mik lehetnek az akadályozó tényezők, amik az alternatív meghajtások, és energiatárolási módszerek, illetve új elképzelések ellen dolgoznak.

Az írásmű fejezetei tartalmának rövid bemutatása

Az első fejezetben ismertetem a repülőgép hajtóművek fejlődésének történetét és elemzem a különböző típusokat. Röviden megfogalmazom működésüket és üzemeltetésük jellemzőit. Az ismertetést a légszaváros meghajtással kezdem, a sugárhajtóművekkel folytatom, majd az elektromos motorok rövid bemutatásával fejezem be, kiemelve a kiküszöbölendő hátrányokat.

A második fejezet már konkrétan az elektromos repülőgépek jellemzéséről szól. Ezen belül először néhány példát kiemelve bemutatom az elektromos gépek fejlődésének történetét, majd áttérek a napelemes meghajtás, mint megújuló energia-felhasználás lényegi bemutatására, szintén a kapcsolódó repülőgépek ismertetésének segítségével. A fejezet vége betekintést nyújt a pilóta nélküli repülőeszközök világába, illetve azok alternatív energiafelhasználási módszereibe.

A tanulmány harmadik fejezetének középpontja az energia tárolásának lehetőségei. Két energiatárolási módszert hasonlítok össze: az üzemanyagcellákat és az akkumulátorokat. A fejezetből kiderül, hogy melyik típusokat milyen területen érdemesebb használni, illetve fény derül az előnyeikre, az esetleges akadályozó tényezők mellett.

A negyedik fejezet az említett területeket érintő, és azokhoz szorosan kapcsolódó innovatív ötleteket ismerteti és ezzel a téma jövőképét vetíti előre. Ebben a részben részletezem a meglévő akadályok és problémák lehetséges megoldásait. Elemezem különböző kutatások eredményeinek felhasználhatóságát a repülési terület új irányba haladása, egy új koncepció megvalósítása érdekében.

Az összegző részben röviden vázolom bolygónkat és a repülési szakterületet érintő jelenlegi problémákat, felelevenítem a dolgozatban felvázolt és megoldásra váró feladatokat. Összefoglalom a lehetséges ötleteket, amelyekkel kiemelkedőbb eredményeket érhetünk el az elektromos meghajtást területén, valamint azokat a lényeges területeket, amelyeken előrelépéseknek kell történniük a repülési ágazat átalakulása érdekében.

1. REPÜLŐGÉP HAJTÓMŰVEK

Ahhoz, hogy egy komplex képet kaphassunk korunk hajtóműveinek működéséről és lehetséges fejlődési irányokról érdemes megvizsgálnunk a kezdeteket. A repülés együtt jár azzal, hogy a levegőben a repülőgép mozgásakor fellépő ellenállások leküzdésére állandóan mechanikai energiát kell felhasználni. Az energiamegmaradás törvénye kimondja, hogy energia újonnan nem keletkezhet és nem veszhet el, hanem csak átalakulhat egyik energiatípusból a másik energiatípusba, meghatározott összefüggések szerint. A repüléshez szükséges mechanikai energiát, például hő- vagy villamos-energiából kaphatjuk meg külön célra szolgáló gépek segítségével. Azokat a gépeket, amelyek az energia valamilyen formáját mechanikai energiává alakítják át, motoroknak nevezzük.

1.1 Légszárnyas meghajtás

A repülőgép hajtómű olyan hőerőgép¹, amely előállítja a repülőgépek működéséhez szükséges vonó- illetve tolóerőt. Beszélhetünk légszárnyas hajtásról, amikor a vonó-, vagy tolóerőt a légszárnylapátokon ébredő felhajtóerő állítja elő. A légszárny forgását dugattyús motor, légszárnyas gázturbina, vagy tengelyteljesítményt szolgáltatató gázturbina (szabadturbinás hajtómű) biztosítja. A belső égésű motorok ugyan beindították a repülés fejlődését, de jelentős számú szerkezeti egység végez mozgást működés közben, ami nagy igénybevételt, hőterhelést jelent. Ezen alkatrészek kopása miatt folyamatos kenés és hűtés szükséges. Mindezen tényezők megnövelik a hibára való érzékenységet. A 1930-40-es évek repülésében még az egyre tökéletesedő dugattyús motorok játszották a főszerepet a repülőgépek mozgatásában, de elkezdődtek a kísérletek egy új erőforrással, a szintén belsőégésű hajtóművek családjába tartozó gázturbinával. A gázturbinás hajtómű nagy előnye a viszonylag kis tömeg, az olcsóbb tüzelőanyag, a csak körforgást végző alkatrészek és a dugattyús motoroknál nagyságrendekkel nagyobb teljesítmény, melyre jó példák a napjaink legnagyobb és leggyorsabb repülőgépeit mozgató hajtóművek. A légszárnyas gázturbina felépítésénél a légszárny és a gázturbina tengelye közé egy lassító áttétel van beiktatva, ez a reduktor. Az ilyen megoldást turbólégszárnyas megoldásnak nevezzük, mivel a légszárny forgatását egy gázturbina végzi. Ebben az esetben a tolóerő legnagyobb részét nem a gázturbinából kiáramló gáz szolgáltatja, hanem az általa megforgatott légszárny. A tengelyteljesítményt szolgáltatató gázturbinákat főként helikoptereknél használják [25].

¹ Hőerőgép: Olyan gép, amely a hőenergiát mechanikai energiává alakítja

1.2 Sugárhajtóművek

A légszaváros meghajtás mellett a mozgási energia előállításának másik fő formája a sugárhajtás. Először 1930-ban Frank Whittle angol pilóta kezdett el kísérletezni és dolgozni a sugárhajtás ötletével. Az alapelv a következő volt: a forgó légszavar helyett, amely előrehúzza a repülőgépet, a sugárhajtású motor hátsó részéből törnének ki a forró gázok és ez lökné előre a repülőgépet. Felismerte, hogy a hagyományos dugattyús motorral hajtott légszavar nem alkalmas a szükséges tolóerő biztosítására, helyette a motor egy kompresszort hajtott volna, mely után egy égéskamrába vezetve a nagy nyomású levegőt, porlasztott üzemanyaggal keverve elégetik, és a nagy sebességgel hátrafelé kiáramló forró gázok előre hajtják a repülőgépet. 1937-ben Whittle beindította a világ első sugárhajtásos (avagy lökhajtásos) motorját, amely egy próbapadhoz volt rögzítve. A támogatás hiánya és a kutatás magas költségei miatt nem tudta megújítani a szabadalmi díjat, így Hans von Ohain német tervező kölcsönvette terveit és 1939. augusztus 27-én felszállt az első sugárhajtású gép, a Heinkel HE 178. Meg kell azonban említeni, hogy a korabeli sugárhajtású motorok üzemeltetése igencsak kockázatos volt. Nagyon gyakran fordult elő a hajtóművek kigyulladás, például hirtelen gázadás esetében, ami sok légi katasztrófához vezetett. Azóta a sugárhajtású motorok már nagyobbak, erősebbek, biztonságosabbak és kevesebbet fogyasztanak, de ugyanazon az elven működnek, mint Whittle korai kísérleti példányai. Mind a katonai mind pedig a polgári repülésben a legelterjedtebb típus a gázturbinás sugárhajtómű. Itt a belépő levegő a kompresszor lapátkerekére kerül, ami a levegő nyomását megnöveli, majd bejuttatja az égőtérbe. A befecskendező fűvókán keresztül ide tüzelőanyagot adagolnak, amely meggyújtás után a nagynyomású levegő oxigénjével keveredve elég. A felhevült és expandálódott gázok forgatják a turbinát, ami a kompresszor hajtásán kívül a hajtómű táprendszerét és segédberendezéseit működteti [25].

A gázturbinás sugárhajtómű továbbfejlesztésének tekinthető a torlósugárhajtómű, amelynek alapja a nagynyomású levegőbeáramlás. A levegő a hajtómű orr-részen lévő diffúzorban a torlónyomás hatására összesűrűsödik. A tüzelőanyagot a diffúzor mögötti égőtérbe fecskendezik be, majd meggyullad. Ezek után a munkafolyamat meggyezik a gázturbinás sugárhajtóműével, kivéve, hogy a gázok a turbinát nem hajtják meg, hiszen a hajtóműnek nincs kompresszora. Jelenleg a legnagyobb teljesítményt és különösen a katonai repülés manővereihez szükséges tolóerő tartalékot a sugárhajtóművek képesek biztosítani. Üzemeltetésük azonban bonyolult, drága és cseppet sem környezetbarát. Az üzemelés közbeni magas hőmérsékletű vagy nagy sebességgel forgó alkatrészek ellenőrzése és karbantartása

nagy szakértelmet és kiterjedt technikai háttérrel követel. A legtöbb légitársaság rendelkezik ezekkel a képességekkel és vállalják az üzemeltetés költségeit a forgalomsűrűség növekedésének érdekében. Az ilyen kompromisszumok ugyan életképesek, de a legtöbb civil területen kezd felmerülni egy költséghatékonyabb, kevésbé környezetszennyező üzemeltetési lehetőség igénye [25].

1.3 Elektromotorok

Napjainkban egy újabb technológiai irány kezd egyre népszerűbbé válni a hajtóművek családján belül: az elektromosság. Több ország kutatóintézetei foglalkoznak már évek óta a lehetséges új alternatívák kidolgozásával, amelyek elősegítenék a gázturbinás hajtóművek hatékonyabb működtetésének lehetőségeit, majd később részleges kiváltásukat, ami mind gazdaságossági mind pedig környezetvédelmi szempontból fontos előrelépés lenne. Ennek egyik módja lehetne a villanymotor. Ezeknek a terveknek az első komolyabb lépése a digitális hajtómű ellenőrzés és irányítás volt, a FADEC (Full Authority Digital Engine Control). A rendszernek köszönhetően jelentősen csökkent az üzemanyag fogyasztás, a széles körű diagnosztika eredményeképpen pedig növelni tudták a vonó-/tolóerőt. Ezután egymást követték a fejlesztések, de egy teljesen villamosított repülőgép elérése a legtöbb rendszer 100%-os elektromos üzemeltetését igényli. A nagyáramú akkumulátorok, illetve az ezekkel kapcsolatos fejlesztések már nemcsak a szárazföldi közlekedést megkönnyítő tényezőjeként jelentkeznek, hanem a repülőgépiparban is kulcsfontosságú szerepet töltenek be. Ennek legfőbb oka, az energiaválság, illetve a környezetvédelem, hiszen mint minden más ágazatban, a repülésben is növekszik az igény a minél inkább környezetbarát megoldások iránt. A fosszilis energiahordozók elégetésekor keletkező káros anyagok nagymértékben szennyezik a levegőt, nem beszélve áruk jelentős emelkedéséről. Az említett problémakörhöz sorolható még a zajterhelés, illetve a zajhatás elleni védelem. Az elektromotoros kisrepülőgépek lényegesen csendesebbek, mint a robbanó motorok. A környezetvédő mozgalmak, a zöld törekvések, a károsanyag-kibocsátás csökkentésére irányuló fejlesztések felgyorsították az alternatív meghajtások elterjedését a repülésben. Ez a technológia most még csak a kisgépek és UAV²-k, azaz a pilóta nélküli repülőgépek körében terjedt el jelentősen, de reményeink szerint megreformálhatja, és olcsóbbá teheti a nagygépes repülést is [32] [48].

² Unmanned Aerial Vehicle (UAV) – pilóta nélküli légi jármű

Az elektromos motorok alapelve, hogy az elektromos energiát alakítják át mechanikai energiává. Olyan villamos forgógépek, melyek működése az elektromágneses indukció³ elvén alapul. A motorban lévő állandó mágnesek közötti térben egy tekercset helyeznek el, melybe elektromos áramot vezetnek. A tekercsben kialakuló mágneses mező kölcsönhatásba lép az állandó mágnesek közötti mágneses mezővel, ami elfordítja a tekercset. A tekercs maga a motor tengelye, így jön létre a forgás. Az ilyen rendszereknek a nagy előnye, hogy megbízhatóbbak, mint a belső égésű motorok, hiszen nem alakul ki magas hőmérséklet, az egyetlen mozgó egységük a forgórész, illetve nincs szükség olaj- és hűtőrendszerre. Sok alkatrész feleslegessé válik és – a nagyobb biztonság érdekében –, a motorvezérlés sem tartalmaz mozgó alkatrészeket. Jellegzetes előnyük még, hogy a legcsendesebbek a hajtóművek közül, és a legkisebb hőképpel rendelkeznek⁴ [39] [48].

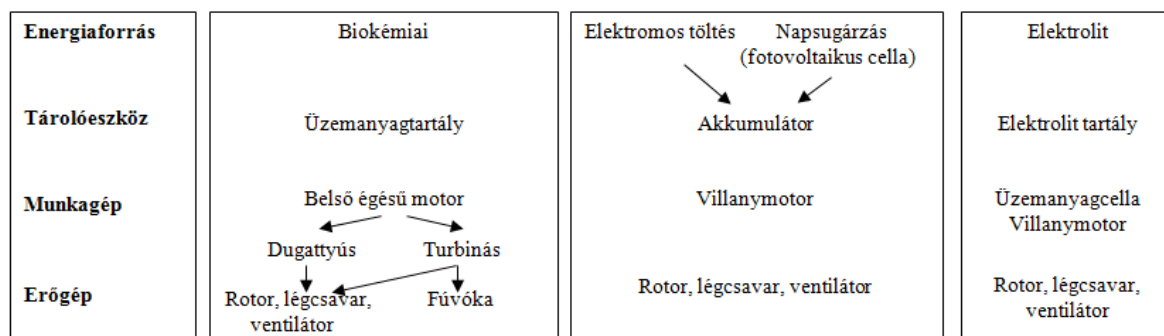
A könnyű elektromos motorok és akkumulátorok tervezésének legújabb fejleményei megvalósíthatóvá teszik az akkumulátorok által biztosított elektromos meghajtást. Különösen az újratölthető akkumulátorok teljesítményének javulása a lítium-kén technológia használatának köszönhetően a tömeg-energia arányt más típusú akkumulátorokhoz képest egynegyedére csökkentette. Sajnos azonban továbbra is a rendszer hátránya az akkumulátorok nagy térfogata és tömege. Egy adott energiatárolás mellett még a lítium-kén akkumulátorok is a megfelelő fosszilis üzemanyagok térfogatának négyszeresét töltik ki, amely nagy problémát jelent minden területen kivéve a rövid hatótávolságú UAV-kat [51].

A hagyományos hajtású repülőgépek energiatároló rendszere üzemanyagtartályból, csövekből és szelepekből áll. Az elektromos repülőgépeknek egy sokkal bonyolultabb energiatároló rendszerre van szükségük, hiszen az elektromos áramot nehéz tárolni, nem úgy, mint a korábbi energiatárolók esetében, mint például a fa vagy a szén. Az elektromos áramot rögtön fel kell használni, vagy rögtön át kell alakítani egy másik energiaformává (helyzeti, mozgási vagy kémiai). Ugyanakkor annak köszönhetően, hogy nem szükséges nagy mennyiségű gyúlékony üzemanyag tárolása a fedélzeten, a biztonsági kockázatok csökkennek. Az elektromos energia tárolása akkumulátorokban, vagy üzemanyagcellákban történhet. Mindkét lehetőségnek megvannak az előnyei és a hátrányai, amelyeket a későbbiekben részletezni fogok. Az 1. ábrán látható összefoglalva, hogy az egyes

³ Elektromágneses indukció: Elektromos feszültség létrehozásának folyamata egy vezetőben, annak mágneses térben való mozgatása, vagy az azt körülvevő mágneses tér megváltoztatása által.

⁴ A katonai repülés egyik fontos szempontja a repülőgép-hajtóművek által létrehozott infravörös karakterisztika. A felderítés és fegyverirányítás kedvelt módszere az ilyen hőképek keresése. Ezért célszerű minél kisebb hőkép kialakítása, amely megnöveli a műveleti területen történő üzemelés biztonságát.

energiaforrásokat, milyen eszközökben tudjuk tárolni, majd az energia átalakítása milyen munkagépekkel történik a megfelelő erőgépekkel kiegészítve [7] [70].



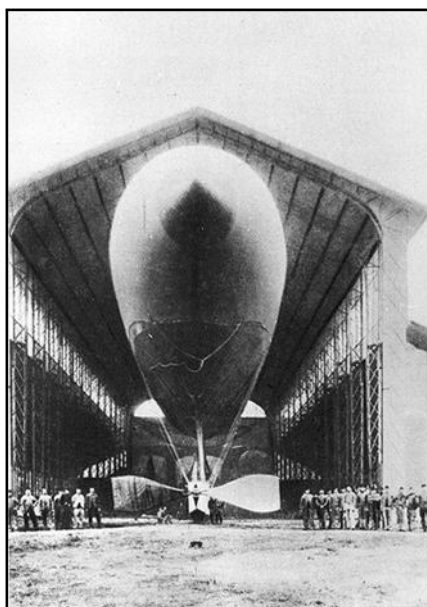
1. ábra Repülésben használt lehetséges hajtóműrendszerek⁵

⁵ Szerkesztette a szerző (MS PowerPoint) az alábbi irodalom alapján - Reg Austin: Unmanned aircraft system UAVs design, development and deployment, John Wiley & Sons Ltd, 2010. Figure 6.5 (2013. 10. 02.)

2. ELEKTROMOS REPÜLŐGÉPEK

2.1 Történeti áttekintés, elektromos meghajtású gépek

Az elektromos repülőgépek fogalma egyáltalán nem új. A fejlesztések és a komolyabb érdekeltség ugyan még csak napjainkban van feltörőben, de már a repülés korai szakaszában is számos kísérletet végeztek ezzel az új technológiával. Erre példa az 1800-as évek vége felé a francia gyártmányú elektromos meghajtású La France léghajó (2. ábra), ami 435 kg-os akkumulátorokkal szállt fel a levegőbe. Természetesen már itt is a legnagyobb probléma az energia tárolása volt. Mostanáig az akkumulátorokat, mint a meghajtást szolgáló energiatárolókat, a súlyuk miatt a vitorlázó repülésen kívül nehezen tudtuk hasznosítani a repülésben, azonban a tömeg-teljesítmény arány javulásával a változások a küszöbön állnak [19] [36].



2. ábra La France léghajó⁶

A világ első elektromos hajtású műrepülő gépe a Cri Cri (3. ábra) nevet kapta. Alapvetően ez a gép az 1970-es években megalkotott MC-10-es típusból lett továbbfejlesztve, melynek az üres tömege is csak 63 kg volt. A világ legkisebb többmotoros műrepülő gépe Michael Colomban francia mérnök nevéhez fűződik. Az elektromos hajtás kifejlesztése az európai légi- és hadiipari csoport az EADS (European Aeronautic Defence and Space Company), az Aero Composites Saintonge vállalat és a Green Cri Cri Egyesület közös munkájának köszönhető. Az elektromos változat célja az volt, hogy több erőt, nagyobb gyorsulást, emelkedéskor elegendőbb teljesítményt tudjanak biztosítani műrepülés során a robbanómotoros meghajtáshoz képest.

⁶ La France airship, url: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/LaFranceAirship.jpg> (2013. 10.04.)

Az új típus tervezésénél az akkumulátoroknak köszönhető többletsúlyt valamivel kompenzálni kellett. Ezért csökkentették a váz súlyát szén-szálalás kompozit anyagok segítségével. A két pár háromágú légcsavart a gép orrából oldalra nyúló konzolokon négy kefe nélküli elektromotor forgatja. Kettő vonó, kettő pedig toló üzemben repíti. A repülés maximális időtartama azonban csak 45 perc. A maximális töltöttség eléréséhez a telepeknek egy óra szükséges, amivel 15 perces műrepülés lehetséges. A maximális repülési sebesség megközelítheti a 250 km/h-t, az emelkedési sebesség pedig az 5,3 m/s értéket. Az új Cri Cri – amely a világ legkisebb ember által vezetett repülőgépe is egyben – akár 20-30%-kal dinamikusabb repülésre képes, mint a kerozint fogyasztó elődjei [45] [59].



3. ábra Cri Cri, a világ legkisebb ember által vezetett repülőgépe⁷

Napjainkban egyre nagyobb az érdeklődés az új technika irányába. Mi sem mutatja ezt jobban, mint az újonnan végrehajtott kísérletek sikeres eredményekkel. Idén tavasszal látott napvilágot a Flying Electron új repülőgépe, a CC01e (4. ábra). A típus elektromos változatának terve két francia mérnök nevéhez fűződik, majd kivitelezésével a szintén francia Electravia nevű cég foglalkozott. A vállalat célja egy új sebességi rekord felállítása volt, az 50 lóerős motor, 4,7 kWh lítium-polimer akkumulátorok segítségével. A típus második próbarepülésén már elérték a 15 perces repülési időt, az akkumulátor 60%-os teljesítmény-maradványa mellett. Ezzel a teljesítménnyel a Flying Electron-nal hamarosan a 300 km/h-s sebesség elérése is lehetséges lesz. Az Electravia nevéhez fűződik egyébként az első kanadai ultrakönnyű gép elektronikus változata is, amely sikeres felszállást teljesített [23] [24].

⁷Cri Cri, url: http://iho.hu/img/repules/111111_elektroplan/EADS-Electric-Cri-Cri.jpg (2013. 10. 04.)



4. ábra Flying Electron: CC01⁸

A hibrid gépek kategóriájában az elsők közé sorolható a GT4 típus (5. ábra), amely az amerikai Volta Volare cég nevéhez fűződik. A vállalat autóiipari fejlesztéseinek köszönhetően előrelépések történtek a négyülékes hibrid repülőgép kidolgozásában is.



5. ábra GT4 hibrid gép⁹

A technika kezdetlegességét mutatja, hogy az akkumulátorok és az elektromotor mellett itt még egy benzines motor is segíti a munkát. A tisztán benzin alapú üzemeléshez képest azonban lényegesen csökken a károsanyag-kibocsátás. Jelenleg 480 kilométert tesz meg akkumulátorról, majd 25%-os töltésnél lép életbe az említett benzines motor. A gép hátulján található a szénszálak anyagból készült toló légcsavar, ami elég erős ahhoz, hogy elviselje az elektromotorok gyors nyomatékleadását, így hatékonyan biztosít tolóerőt. Ez a típus is az úgynevezett kacsaszárnyas modellek közé tartozik, melynek nagy előnye, hogy több hely jut az akkumulátoroknak. Ez pontosan azt jelenti, hogy a szárnyak előtt is vannak

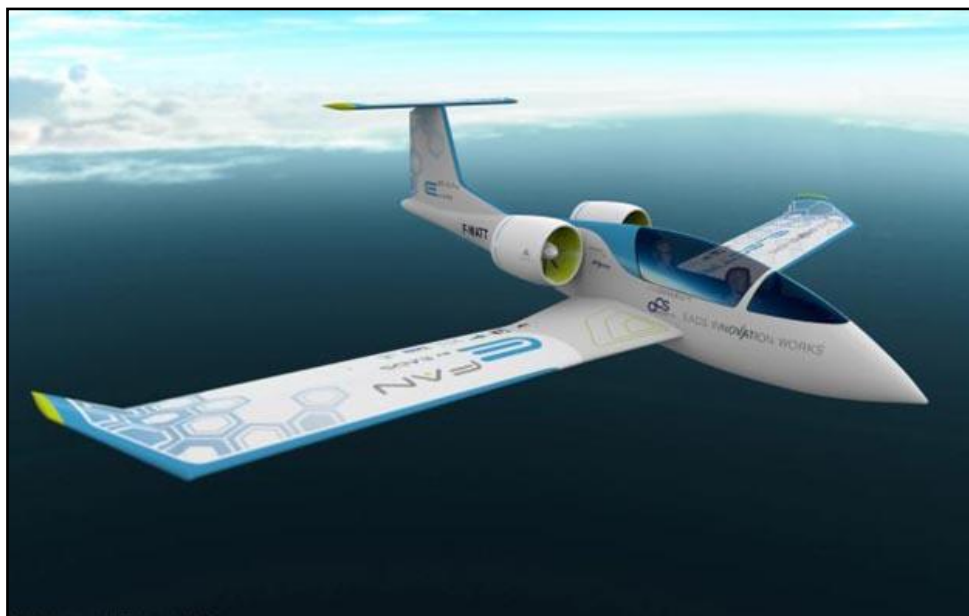
⁸ Electravia CC01e, url: [http://www.technologicvehicles.com/Content/news/2153/CC01e_Flying-electron%20\(5\).jpg](http://www.technologicvehicles.com/Content/news/2153/CC01e_Flying-electron%20(5).jpg) (2013. 10. 04.)

⁹ GT4, url: http://cdn.justluxe.com/articles/images/news/voltavolare_1763941_thumb1.jpg (2013. 10. 06.)

vezérsíkok közvetlenül az orr közelében. A távlati cél itt is a tiszta elektromos energia használta, minél nagyobb utazótávolsággal [31].

A hibrid géppel kapcsolatos legújabb tervek a már korábban említett EADS társulat nevéhez kapcsolódnak. A Rolls Royce-szal – a hajtóműgyártás vezető vállalatával – közösen vágtak bele az E-Thrust projektbe, a hat darab elektromos motor által meghajtott repülőgép tervébe. Az energiaellátást a központi gázturbina biztosítja majd, ami az akkumulátorokat is tölti, így elegendő elektromos energiát tudnak tárolni. A számítások szerint egy hagyományos utasszállító repülőgéphez képest a szén-dioxid kibocsátás 75%-kal kevesebb. Ez a terv jelentősen megváltoztatná a kereskedelmi repülést, mivel akár 120 utas szállítására is alkalmas. Bizonyos források szerint már gondolkodnak egy napelemes, teljesen elektromos változat bemutatásán is [12] [18] [53].

A harmadik említésre méltó EADS „termék” idén nyáron állt elő szintén a Rolls Royce és az ACS vállalat együttműködésének köszönhetően. A tisztán elektromos hajtású légijármű az E-FAN (6. ábra) elnevezést kapta. Érdekesség, hogy a gép kifejlesztésében ugyanaz a pilóta vett részt, aki a Cri Cri elektromos változatán is munkálkodott. Kiemelném a csőlégcsavarok alkalmazását, illetve a kerekbe épített elektromotorokat, amelynek köszönhetően a jármű a földön gurul. Ezt a változatot elsősorban pilótaképzésre használnák, mivel kétülésesre tervezték. Ha a sorozatgyártás elkezdődik, ez a típus egy forradalmi konstrukciót jelenthet a repüléstechnikában [1] [26].



6. ábra E-Fan tisztán elektromos hajtású repülőgép¹⁰

¹⁰ E-Fan, url: [http://www.technologicvehicles.com/Content/news/2500/EADS_E-fan%20\(2\).jpg](http://www.technologicvehicles.com/Content/news/2500/EADS_E-fan%20(2).jpg) (2013. 10. 06.)

Hatalmas sikernek örvendett az újonnan kifejlesztett négyülékes teljesen elektromos, ikertörzsű repülőgép, melyet a szlovén Pipistrel repülőgépgyár fejlesztett ki. A Pipistrel G4 (7. ábra) 2011-ben megnyerte a NASA által szervezett „környezetbarát repülési verseny”-t (Green Flight Challenge), mellyel megkapta a repülés történelmében kiadott legmagasabb pénzdíjat. A Wired, a legújabb technológiák magazinja, kiemelten kezelte a „Hét nagy ötlet, melyek megváltoztatják a világot” című cikkében [2]. A lenyűgöző gépet két Taurus G2 modell kombinálásából hozták létre, ezeket egy 5 méter hosszú rész köt össze, így a fesztávolság 23 méter lett. A 175 kW-os elektromos motor a két kabin között helyezkedik el és egy kéttollú 2 méter átmérőjű légsavart hajt. A Pipistrel mérnökei szerint a Taurus G4 „az első négyülékes elektromos repülőgép, a legerősebb elektromos motorral, és a legnagyobb kapacitású akkumulátorokkal” [30] [63].



7. ábra A Taurus G4, amely két G2-es modellből állt össze¹¹

Ma már nemcsak merevszárnyú elektromos repülőgépekről beszélhetünk, vannak egészen egyedi tervezésű repülőeszközök is, amelyek jó alapot nyújthatnak egy későbbi komolyabb technika kidolgozásához. A teljesség igénye nélkül megemlítek néhány érdekes példát. 2011-ben szállt fel az első elektromos hajtású helikopter (8. ábra), amelyet Pascal Chretien tervezett. A repülés lítium akkumulátorok, kefe nélküli motorok segítségével történt, és több mint két percig tartott. A mérnök egy farokrotor nélküli koaxiális főrotorokkal rendelkező helikoptert alkotott, rendhagyó vezérléssel: a rotorlapátok szöge egy lelógó kormányrúddal állítható, a fordulatszám pedig az azon lévő gázkarral. A szerkezet tömegközéppont áthelyezése is szerepet játszik a vezérlésben, akár egy sárkányrepülőgépnél [62].

¹¹ Taurus G4, url: <http://www.saidaonline.com/en/newsgfx/electric-plane-saidaonline.jpg> (2013. 10. 07.)



8. ábra Elektromos hajtású helikopter¹²

A következő érdekesség az e-Volo elektromos multikopter (9. ábra), melynek alapja egy gömb, rajta egy szék, körülötte 16 elektromos hajtású rotor. A székben egy „pilóta” ül kezében egy RC modelleknél használatos távirányítóval. Érdekes még tudni róla, hogy az alap repülési tulajdonságokat az eszköz számítógépe vezérli, és nem a helikopter elvei szerint repül [61].



9. ábra E-Volo elektromos hajtású multikopter¹³

A gyártó aktuális fejlesztése a VC200 volocopter (10. ábra), amely egy kétüléses ultrakönnyű multikopter. A gép terveit és az ez évi augusztus 30.-ai berlini világpremier olyan sikeres volt, hogy a német légügyi hatóság egy új légi jármű kategóriát tervez bevezetni. A várakozások szerint az utazósebesség elérheti a 100 km/h-t, a repülési magasság az 1900

¹² First successful manned electric helicopter flight, url: <http://s1.blomedia.pl/gadzetomania.pl/images/2011/09/first-successful-manned-electric-helicopter-flight.jpg>

¹³ E-volo elektromos multikopter, url: http://www.wired.com/images_blogs/gadgetlab/2011/11/e-volo_IMG2420.jpeg (2013. 10. 07.)

métert, valamint a 450 kg-os maximális felszállósúly mellett a gép túllépheti az egy órás repülési időt. A tesztrepüléseket 2013 őszén (ez idő tájt) tervezik végrehajtani [74].



10. ábra VC200 volocopter¹⁴

Akárcsak a világ első elektromos helikoptere, az első elektromos hajtású kétéltű repülőgép szintén 2011-ben emelkedett el a földtől. A kétmotoros ultrakönnyű hidroplánt egy amerikai repülőgép tervező álmolta meg, majd hét perc repülés után leszállt vele a háza előtti tóra. A gép az Electric Lazair Amphibia nevet kapta, megalkotója pedig most azon munkálkodik, hogy egy töltéssel akár több órát is képes legyen majd repülni [60].

Láthatjuk, hogy a kizárólag elektromos meghajtású repülőgépek alkalmazása még nagyon kezdetleges stádiumban van. A folyamatos próbálkozások és a bemutatott típusok azonban azt mutatják, hogy a jövő repülőgépeinek tervezői hajlanak az új irány felé és egyre kreatívabb ötletekkel állnak elő. A szállítható személyek száma kis ütemben, de növekszik, és az energiatárolók fejlődése lassan kilátásba helyezi a hosszabb repülési időt, így a sportrepülés és kereskedelmi repülés területén belüli elterjedést.

2.2. Napelemes repülőgépek

A repülési időnek nincs korlátja, ha a repülőgép a működéséhez szükséges energiát nem viszi magával, hanem a környezetéből veszi fel. Erre a legalkalmasabb a napenergia. Nézzük meg közelebbről, hogy hogyan is működnek az elektromos hajtású gépek napenergiával. A napenergiát az emberiség ősidők óta igyekszik hasznosítani, egyre fejlettebb megoldásokkal, mivel legnagyobb előnye, hogy bárhol, mindenki számára elérhető, tiszta és környezetkímélő forrás. Ezen kívül még évmilliókig rendelkezésünkre áll, így ezzel a kimeríthetetlen forrással kímelnénk nyersanyagkészletünket. Az ehhez kapcsolódó technológiák, mint például a fotovoltaikus¹⁵ berendezések, segíthetnek megoldani az emberiség előtt álló legnagyobb kihívásokat, úgy, mint megvalósítani a repülés környezetbarát, költséghatékony művelését.

¹⁴ VC200 volocopter, url: http://www.e-volo.com/wp/wp-content/themes/horizon/extensions/timthumb/timthumb.php?src=http%3A%2F%2Fwww.e-volo.com%2Fwp%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F01%2FVC200_Seite_T_A.jpg&w=612 (2013.10.25)

¹⁵ fotovoltaikus: napenergiahasznosító

A napelemes repülés esetében azonban több faktorról is számolnunk kell. Alapvetően két fontos tényezőre kell gondolnunk, ha azt szeretnénk, hogy a gép a levegőben maradjon. Az egyik a gép tömege, a másik pedig az aerodinamikai tulajdonságai. Egy gép levegőben tartásához jelentős energiára van szükség, a fellépő gravitációs erőhatás és a sebességből adódó légellenállás miatt. A szárnyak úgy vannak kialakítva, hogy a szárny felett a levegő gyorsabban haladjon, így kisebb a nyomása, mint a szárny alatti levegőé. Ennek a nyomáskülönbségnek az eredményeképp jön létre a felhajtóerő, ami a gravitáció ellen dolgozik, viszont ha a gép súlya nagyobb, gyorsabban kell haladni a szükséges felhajtóerő megteremtéséhez. A másik fontos faktor a megfelelő aerodinamikai tulajdonságok kialakítása. Egy egyszerű példát megemlítve, ha hajtogatunk egy papírrepülőgépet, majd összegyűrünk egy másik lapot, és egyszerre eldobjuk mindkettőt, szinte minden esetben a repülő fog tovább siklani a levegőben, és messzebbre szállni. Ezért, ha egy repülőgépből kifogy az üzemanyag, akkor nem fog egyszerűen lezuhanni, hanem egy bizonyos meredekségű, csökkenő magasságú pályán fog végigsiklani. Ennek a siklásnak van számszerűsített értéke is, amit siklószámnak hívunk. Ebből megtudhatjuk, hogy motor vagy hajtómű használata nélkül mennyi a megtett út és az elvesztett magasság hányadosa. Például ha egy gép siklószáma 10, akkor az azt jelenti, hogy 10 méter megtétele alatt 1 métert süllyedt. Minél nagyobb ez az érték, annál energiatakarékosabban repül a gép. Tehát a kedvező aerodinamikai kialakításokkal kisebb lesz a légellenállás, és kevesebb energia befektetésével érhetünk el megfelelő mértékű felhajtóerőt is. Ezért egy napelemes repülőgép kialakításánál a korlátozott von/tolóerő miatt kiemelten fontos a gép súlya, illetve az áramlástani jellemzők megfelelő kialakítása. Ha a repülőgépünk siklószáma jó, az növeli a repülésbiztonságot, ugyanis motorhiba esetén nagyobb távolságra tud siklani így valószínűbb a repülőtér elérése, vagy a megfelelő terület kiválasztása kényszerleszállásra. A siklószám meredekebb emelkedési szöveget is lehetővé tesz, amely a nem előkészített terepről vagy városi környezetben történő felszállást és a terepakadályok könnyebb kikerülését teszi lehetővé. Ez fontos lehet a Pocket Airpark megvalósításánál, amit a későbbiekben részletezek [73].

A napenergia hasznosítása a leghatékonyabb alternatív energiafelhasználás, ugyanis a Napból érkező, a földfelszínre eső sugarak energiája $70\text{--}80 \text{ MW/m}^2$. A Föld atmoszférájának peremén az energia sűrűség átlagosan 1367 W/m^2 , ez azt jelenti, hogy évenként a Földet körülbelül 219 milliárd GWh sugárzási energia éri. Ez az érték 2500-szorosa napjaink teljes energiaszükségletének. A napelemes rendszer szolár cellákat, elektromos csatlakozásokat, illesztési eszközöket, teljesítmény szabályzókat és az akkumulátorokat tartalmazza. Egy cella

körülbelül 0,5 V-ot képes előállítani, ha párhuzamosan vagy sorba kötjük őket, akkor nagyobb áramerősség vagy feszültség generálható. Évente olyan mennyiségű napenergia érkezik a Földre, amelyet 60 milliárd tonna kőolaj elégetésével nyernénk [11] [44] [55].

A napelem cellák működése: A félvezető elektronok kimozdulnak a kötéseikből a fénysugárzás fotonjai által. Az így keletkezett elektrontöbbletet pedig elektromos vezetőkkel elvezetik a fogyasztókhoz [44].

A jellemzően nagy repülési tömegű légi utasszállítás témaköre nehéz feladatnak tűnik napelemek segítségével. Az alábbi példákon keresztül bemutatom a kezdetleges napelemes repülőgépek legismertebb típusait, amiken keresztül a tapasztalatok megszerelhetők a nagyobb repülőgépek későbbi átalakításához.

Napelemes repüléssel már '70-es években is foglalkoztak, ám a komolyabb tervek csak 80-as évek elejére értek be. Paul MacCready a The Dupont társulattal együttműködve alkotta meg a Solar Challenger-t, amit 5 óra 23 percig tartottak a levegőben, 262,3 km-es repülési út során. Ezzel először repülték át a La Manche csatornát napelemmel. A következő nagyobb kaliberű újítás Günter Rochelt Solair 1 típusú gépe. A 16 méter fesztávolságú gép szárnyfelületének több mint a felét napelemek borítják, egészen pontosan 2500 fotocella, 2,2 kW-nyi teljesítménnyel, amelyek segítségével már 4 óra 41 percet töltött a levegőben. Az ezt követő években még rengeteg típus, fejlesztés került a napvilágra, a legnagyobbakkal folytatnám a sort. Mindenképpen meg kell említeni Eric Raymond nevét, aki a Sunseeker-ek (11. ábra) megalkotója.



11. ábra Sunseeker¹⁶

¹⁶ Sunseeker, url: <http://media.treehugger.com/assets/images/2011/10/sunseeker2-solar-airplane-04.jpg> (2013. 10. 20.)

Az első ilyen gépe 1990-ben szállt fel, majd 21 repülést teljesített 121 óra alatt. Ez a típus leginkább egy vitorlázó repülőgépre hasonlít, a leghosszabb egyszerre megtett útja 400 km volt. A kétüléses változata éppen mostanában nyerte el a világ leggyorsabb kétüléses napelemekkel működő repülőgépe címet. Közvetlen napsugárzás mellett órákon át képes repülni, lítium-ion akkumulátoraival pedig 25 percig marad a levegőben [4] [55] [58] [65] [66].

Napjaink populáris napelemes repülőgépe a Solar Impulse. Népszerűségét a Föld körbepülésének tervével vívta ki magának. A repülőgép alkotója Bertrand Piccard svájci orvos és pilóta. A hatalmas, 80 méter szárnyfesztávolságú gép felső felületét és farok részait teljes egészében napelemek borítják. A napenergiát fotovoltaiikus elemek gyűjtik, majd átvezetik az akkumulátorokba, amik a szárny alá felszerelt négy kisebb villanymotort működtetik. A gép óránként 75 km-t tesz meg, tömege 1,6 tonna és 11600 napelem cellával rendelkezik. Első jelentős eredménye egy 26 órás út megtétele 2010-ben, mellyel bizonyította, hogy elég energiát képes gyűjteni az éjszakai repüléshez. A Föld körbepülésének tervét az elmúlt évben sikerült teljesítenie. A gép összesen 6000 km-t tett meg 8 db 800 km-es szakaszon egyetlen csepp üzemanyag nélkül [42] [52] [56] [57].



12. ábra Solar Impulse¹⁷

A napelemes technológia hasznosítása napjainkban már a sportrepülés területén is megjelenik. Ezt bizonyítja a német PC-Aero repülőgépgyártó cég fejlesztése. A vállalat a korábbi együléses elektromotoros ultrakönnnyű sportrepülőgépét (Elektra One) napelem cellákkal látta el, így született meg az Elektra One Solar. Az eredeti repülőgép 400 km-es hatótávolságát a fejlesztés 1000 km-re terjesztette ki. A repüléshez szükséges energia felét (1-1,5 kW) a szárnyon elhelyezett összesen 6 m²-nyi napelem cella szolgáltatja és az átalakított szárnyprofil illetve a sárkányban 100%-ban felhasznált szénszálas ötvözetek segítették elő a

¹⁷ Solar Impulse, url: <http://vitodibari.com/Blogging%20the%20Future/SolarImpulse.jpg> (2013. 10. 21.)

minél gazdaságosabb repülést. A maximális repülési idő eléréséhez a repülőgépen nagy energiasűrűségű¹⁸, 8-25 kWh teljesítményű újratölthető lítium-ion akkumulátorokat helyeztek el. Ezek újratöltése kétféleképpen történhet: ha a repülőgép a szabad ég alatt tartózkodik, akkor a szárny napelem cellái töltik az akkumulátort, ha pedig a gépet a hangárban helyezték el, akkor a napelem cellákkal borított hangár akár 2,4 kWh teljesítménnyel is képes tölteni. A repülőgép üres tömegének a felét (100 kg) a fedélzeti akkumulátorok teszik ki, a maximális felszálló tömeg a hasznos teherrel együtt 300 kg. A típussal 8 óra folyamatos repülési idő érhető el [5] [14] [15] [16] [64].



13. ábra Elektra One(balra) és Elektra One Solar (jobbra) repülőgépek¹⁹

Amint azt láthatjuk a próbálkozásokból nincs hiány. A Solar Challenger óta rengeteg új technikával bővült a kínálat, és még sok új ötlet van születőben. A kérdés azonban továbbra is fennáll: megéri-e a napenergiából való „táplálkozás”? A leírtak alapján egyértelműen kijelenthető, hogy az emberiség egyik leggazdaságosabb energianyerési módszerére sikerült rátalálnunk. Bőséges, tiszta, szabadon hozzáférhető. Mindenütt rendelkezésre álló energiát biztosít. A fosszilis forrásokkal szemben hosszútávon jelentene megoldást a repülőgép elektromos rendszerei által igényelt energiamennyiség kielégítésére. Felhasználása nem jár vízkibocsátással, vagy légszennyezéssel, tehát környezetkímélő. De mi történik akkor, ha nem süt a nap? A napenergia időbeli eloszlása és intenzitása csak korlátozott mértékben tervezhető előre, megoszlása szezonális. Az előrejelzésekre sem számíthatunk mindig, így a kinyerhető energia nem számítható ki teljes pontossággal, ami egy repülőgép esetében komoly kockázatokkal járhat. Emellett a módszer folyamatos energiatárolást igényel borultság közben és a napnyugta és napkelte közötti időszakban végrehajtott repülések érdekében. Nem utolsó

¹⁸ Az energiasűrűség megmutatja, hogy mennyi energiát képes tárolni az adott tömegű és térfogatú akkumulátor. Mértékegysége: Wh/kg (1 Wh/kg=3600 J/kg)

¹⁹ Elektra One, url: http://www.wired.com/images_blogs/autopia/2011/01/Elektra-One_vor-Rollout_20.11.2010_11-660x373.jpg (2013. 10. 26.)
Elektra One Solar, url: <http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2012/09/The-PC-Aero-537x348.jpg> (2013. 10. 26.)

sorban a napenergia hasznosítása jelentős beruházásokkal jár, ami megtérülési számításokat követel, mind pénzügyi, mind környezetterhelési szempontból. A felsorolt előnyöket és hátrányokat összevetve viszont megállapíthatjuk, hogy a módszer ugyan költséges, de hosszútávon megtérülő befektetés, amely nemcsak több embernek tenné elérhetővé a repülést, hanem sokkal biztonságosabbá is tehetné azt.

2.3 Pilóta nélküli repülőeszközök elektromos meghajtással

Szinte minden területen egyre nagyobb szükség van a pilóta nélküli repülőeszközök jelenlétére. A katonai alkalmazáson túl, az elmúlt években egyre nagyobb igény jelentkezett a polgári, katasztrófavédelmi, térképészeti és hasonló területeken történő felhasználásokra. Meghajtásuk, csak úgy, mint a hagyományos repülőgépeknél, sokféle lehet, de a legkisebb ilyen eszközök ezen a területen is akkumulátoros villanymotorral rendelkeznek. A belső égésű motorokkal ellátott, pilóta nélküli repülőgépeknek is – mint ahogyan a „nagyoknak” – véges nagyságú a repülési idejük, de ez légi utántöltéssel növelhető.

A robotrepülőgépek légi és földi rendszereinek megfelelő működtetéséhez létfontosságú eszközöket, folyamatokat és programokat kell megtervezni, létrehozni és üzemeltetni tartalékban is. Ha arra gondolunk, hogy az eszköznek sok esetben zsúfolt légtérben kell repülnie, vagy nagy értékű rakományt szállít, akkor érthető módon különösen fontos feladat a légijármű biztonságának növelése. Ennek egyik legcélszerűbb módja a duplázás (dublírozás), azaz minden eszköz mellé érdemes legalább egy tartalékot is tervezni. Számos UAV esetében a fedélzeti energiatermelés rendszere hasonló a hagyományos repülőgépekéhez. A repülőeszköz a villamosenergia-rendszer vagy a hajtómű által nyeri az energiát, vagy néhány esetben az APU²⁰ (egy kisebb gázturbina) által, ami elektromos, hidraulikus vagy pedig pneumatikus rendszereket táplál a levegőben és a földön egyaránt. A helyzet eltérő a MAV²¹-ok, HALE²² UAV-k esetében, melyek különösen nagy magasságban üzemelnek. Egy ilyen gép hajtómű rendszere a nagy leterheltség miatt nem táplál külső rendszereket, illetve az elektromos rendszer energiatárolási képessége jobb kell, hogy legyen a normálisnál [7].

Az első próbálkozások még az 1970-es évekhez köthetők, ezek a Sunrise I. és Sunrise II. gépek. A Sunrise I nagyjából 20 percet töltött a levegőben 100 méter magasan. Ennek a kevesebb, mint 13 kg-os típusnak a teljesítménye 450W volt 4096 napelemmel.

²⁰ APU: Auxiliary Power Unit- segédhajtómű, egy kisebb turbina

²¹ MAV: Micro Air Vehicle

²² HALE: High Altitude Long Endurance

Továbbfejlesztett változata már 600 W-os teljesítményt biztosított 10 kg-os szerkezeti tömeg mellett [33].

A napelemes repülés világrekordját a már korábban említett Solar Impulse döntötte meg 26 órányi repüléssel. A pilóta nélküli repülőgépek kategóriáját viszont egy brit vállalat vezeti, a Qinetiq, jeletősen túlszárnyalva a Solar Impulse rekordját. Zephyr névre keresztelt nagy magasságra tervezett, nagy hatótávolságú pilóta nélküli repülőgépe (HALE UAV) 14 nap 21 percet töltött a levegőben, ezzel bebizonyítva, hogy akár hetekig is biztosítani tudja az elvárt felderítési képességet. A robotrepülőgépek körében korábban a fosszilis meghajtású Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk tartotta a levegőben egyhuzamban eltöltött idő rekordját 30 óra 24 perccel, ezt azonban a Zephyr már 2008-ban felülmúlta, 82 óra 37 perccel, akkor ez az eredmény még nem lett hitelesítve, viszont a különbség így is szembeötlő volt. A Zephyr szárnyfesztávolsága 22,5 méter, maximális felszálló tömege 50 kg, csúcsmagassága pedig 18000 méter [33] [41] [75] [76].



14. ábra Zephyr²³

A korábbi ember által vezetett napelemes gépek ihlették a Pathfinder megalkotóit. Ez a típus nevéhez hűen úttörőnek számított, hiszen már 1981-ben elkészült a terve, azonban technológiai akadályok miatt egy évtizedet csúszott a megvalósítás. 1994-ben aztán a NASA foglalkozott a géppel az ERAST²⁴ program keretein belül, melynek célja, hogy a Pathfinder kutatási feladatokat végezzen a sztratoszférában. A több mint 30 méter szárnyfesztávú gép első útján a sztratoszférába 15392 méterre emelkedett, majd később 1997-ben elérte a 21802 méter magasságot. 1998-ra készült el a továbbfejlesztett változata, a Pathfinder Plus. A sok új technológiai fejlesztés mellett, alapvetően nagyobb lett a szárnyfesztáv, illetve új nagyobb

²³ Zephyr, url: http://www.windsofchange.net/images/AIR_UAV_Zephyr_Flight_lg.jpg (2013. 10. 27.)

²⁴ Environmental Research Aircraft and Sensor Technology

hatásfokú napelemekkel szerelték fel. A fejlesztéseknek köszönhetően sikerült egy 24303 méteres csúcsmagasságot repülnie [33] [46] [47].



15. ábra Pathfinder Plus²⁵

A fejlesztések tovább folytatódtak, a következő típus a Centurion nevet viseli, melynél szintén a szárnyfesztség növelésével foglalkoztak elsősorban, megduplázva a Pathfinder méreteit. A gépet 14 motor hajtja, ami természetesen együtt jár a cellák számának és azok teljesítményének növelésével. A korábbi változatokkal ellentétben a gépnek nincs törzse, helyette 5 gondola biztosítja a futóművek helyét, illetve szállítmányok tárolására is alkalmasak [11] [33].



16. ábra Centurion²⁶

A sorozat egyik legkorszerűbb darabja a Helios, amely a kétezres évek elején került bemutatásra. A gép 29524 méteres repülési csúcsmagasságával új rekordot állított be. Kiemelkedő tulajdonsága, hogy a szárnyakon lévő napelemek felülről és alulról megvilágítva

²⁵Pathfinder Plus, url: <http://foundwalls.com/wallpapers/2012/04/island-sea-pathfinder-nasa-uav-pathfinder-plus-485x728.jpg> (2013. 10. 27.)

²⁶Centurion, url: http://www.avinc.com/img/uas/524x275_Centurion_bg.jpg (2013. 10. 27.)

is szolgáltatnak energiát. Az UAV megalkotásának célja volt a 25 órás repülési idő elérése, ez azonban nem sikerült, mivel 2003-ban egy teszt során a repülőgép Csendes-óceánba zuhant [11] [34]



17. ábra Helios²⁷

A Dragon Eye egy könnyű elektromos meghajtású pilóta nélküli repülőeszköz, amelyet két háromfázisú villanymotor hajt. Szétszerelése nagyon egyszerű, mindössze 10 percet vesz igénybe, majd egy hátizsákba elpakolható. Maximális repülési időtartama 1 óra, sebessége pedig 70 km/h. Kis mérete miatt, alig látható, így nagy hasznát veszik katonai felderítési műveletekben. Kézből indítható, a vezeték nélküli videó kapcsolat hatótávolsága maximum 10 km. Hasonló felépítésű az FQM-151A Pointer pilóta nélküli repülőeszköz is. Az újítás a repülési időtartam növelésében bontakozott ki, amely ennél a típusnál már 1,5 óra. Kicsi a fenntartási, kiszolgálási és energiaigénye, így az működtetése egyszerű, nem igényel sok felkészülést az üzemeltetőtől [40] [70].

Az egyik legfrissebb eredményt a Puma AE által kifejlesztett ember nélküli elektromos mini napelemes repülőgép birtokolja. A nemrégiben végzett teszt alapján 9 órán át sikerült a levegőben maradnia, ami jelentősen hosszabb, mint az eddigi repülések. A rendszer különlegessége, hogy a legvékonyabb, és leghatékonyabb gallium-arzenid film technológiát alkalmazza, aminek köszönhetően jelentősen megnő az akkumulátorok működésének időtartama, sőt ezen felül az akkumulátor manuális feltöltését is szükségtelenné teszi a nagy mennyiségű energiatermelés miatt. A gallium-arzenid film technika lényege, hogy több rétegben visznek fel egymásra olyan félvezetőket, amik a Napból érkező fény spektrumának más-más részére reagálnak, így nagyobb hányadát hasznosítják [5] [43].

²⁷ Helios, url: http://www.windsofchange.net/images/AIR_UAV_Helios_HASP_lg.jpg (2013. 10. 20.)

2.4 Elektromos rendszerek védelme

Amint azt láthatjuk az UAV-k esetében alkalmazható legegyszerűbben az elektromos hajtás, hiszen nem kell további súllyal, térfogattal (kabin, pilóta, esetleg utasok, létfenntartó rendszerek) számolnunk. Ezen kívül közvetlenül nem veszélyezteteti az emberi életet és mivel a földi kezelőszemélyzet váltása egyszerűen megoldható elméletileg korlátlan repülési idő lenne elérhető. Azonban nem szabad megfeledkeznünk a fontos kockázati tényezőkről, mint például a fedélzeti áramellátás biztonságáról. Egy 100%-ig elektromos és pilóta nélküli repülőgép esetében nincsenek, nem elektromos tartalék rendszerek, a hajtómű villanyáram üzemű, továbbá nincs a fedélzeten pilóta, aki helyzetfelismerésével és döntőképességével alternatív megoldásokat kísérrelhet meg. Egy teljes tápláláskiesés esetén ráadásul a távvezérlés rádiójeleit feldolgozó kormányvezérlő rendszer sem üzemképes, így a gép valószínűleg irányítatlanul fog repülni. Ma már léteznek távvezérlési hiba esetén automatikus navigációt és hazatérést lehetővé tevő rendszerek, ezek azonban jól működő tápegységet vagy tartalék áramforrást igényelnek.

Külső veszélyforrások is fenyegetik a fedélzeti elektromos rendszereket, amelyekkel szemben védelemmel kell ellátni a repülőeszközt, ilyenek:

- Elektrosztatikus kisülés (ESD²⁸)
- Villámcsapás (LEMP²⁹)

Katonai alkalmazás esetén pedig fel kell készülni elektromos rendszerek elleni támadásokra is. Ilyen elektromos zavarjelenségek lehetnek például:

- Alacsonyfrekvenciás elektromágneses interferencia (EMI³⁰)
- Nukleáris elektromágneses impulzus (NEMP³¹)
- Irányított elektromágneses impulzus (DEMP³²) [35]

Korunk technológiai fejlettsége sokféle elektromos zavaró jelenséget tesz lehetővé, az érdekes azonban az, hogy az egyik legveszélyesebb akár irányított terjedési karakterisztikájú fegyver, a DEMP már házilag is elkészíthető különböző elektromos eszközökből. Hatása pedig azonnali: minden előzetes jel nélkül tönkremegy az összes elektromos készülék a hatókörön belül. Ilyen veszélyekkel szemben napjaink, és a közelmúlt terrorista tevékenységei ismeretében a polgári repülésnek is fel kell készülni [35].

²⁸ ESD: Electrostatic Discharge

²⁹ LEMP: Lightning Elektromagnetic Pulse

³⁰ EMI: Low Frequency Electromagnetic Interference

³¹ NEMP: Nuclear Electromagnetic Pulse

³² DEMP: Direct Electromagnetic Pulse

Sajnos még a biztonságos környezet, a tökéletes tápegység, illetve a jól működő központi fedélzeti ellenőrző rendszer sem garantálja a folyamatos, üzembiztos repülést. A fedélzeten található központi processzort (CP) érdemes megemlíteni, mint elsődleges veszélyforrást. Ha bármiféle hiba jelentkezik a processzoron belül, az a rendszer összeomlását vonja maga után, így kiemelten fontos a hibamentes működése. Itt kerül újra előtérbe a lényeges egységek duplázása. A központi adatfeldolgozó egységen belül a melegtartalékolt rendszernek köszönhetően két egyenértékű vezérelt áramkör hozható létre. Mindkét vezérlő ugyanazt a bemenő információt fogadja és mindkét eszközben azonos szoftver fut, ami azt jelenti, hogy hibamentes működés esetén mindkét rendszer ugyanazon döntések sorozatát hozza. Meghibásodás esetén viszont vezérlő jelekben eltérést fedezhetünk fel, mivel a két vezérlő közül az egyik (az aktív) irányítja a folyamatot, a másik csak ellenőrzés céljából van jelen. Ha ez a hiba bekövetkezik, tesztekkel kell kiszűrniük, hogy melyik eszköz hibásodott meg [7].

Számos alapelv és módszer létezik az elektromos rendszerek zavar-hibavédettségének növelésére, általánosságban elmondható, hogy a hagyományos repüléshez képest lényegesen eltérő jellegű és kiforratlansága miatt nagyobb veszélyekkel járó lehetséges problémákkal kell megküzdenünk. Ezeknek a folyamatoknak azonban a jelenlegi technológiai akadályok leküzdésén keresztül, azok eredményeképpen kell végbemenniük. A legjelentősebb ilyen probléma napjainkban a villamos energia tárolása.

3. AZ ELEKTROMOS ENERGIA TÁROLÁSA

Az elektromos energia tárolása jelentős problémákkal járhat a korábban említett eszközöknél. Alkalmazása akkor fontos, ha az energiát villamos áram formájában fel akarjuk halmozni, hogy egy későbbi időpontban munkavégzésre lehessen fordítani, mivel az energia nem áll mindig olyan mennyiségben rendelkezésre, ahogy azt a fogyasztó igényelné. Ilyenkor szokás az energiátárolót feltölteni a felhalmozódott energiából, majd amikor a fogyasztás nagyobb, mint a többletenergia, kisütni. A másik megoldás, hogy az energiátárolót lassan töltik fel, majd gyorsan sütik ki, így rövidebb időre, de elérhetővé válik a szükséges többletteljesítmény. Az elektromos energia tárolása történhet akkumulátorokban, illetve üzemanyagcellákban [70].

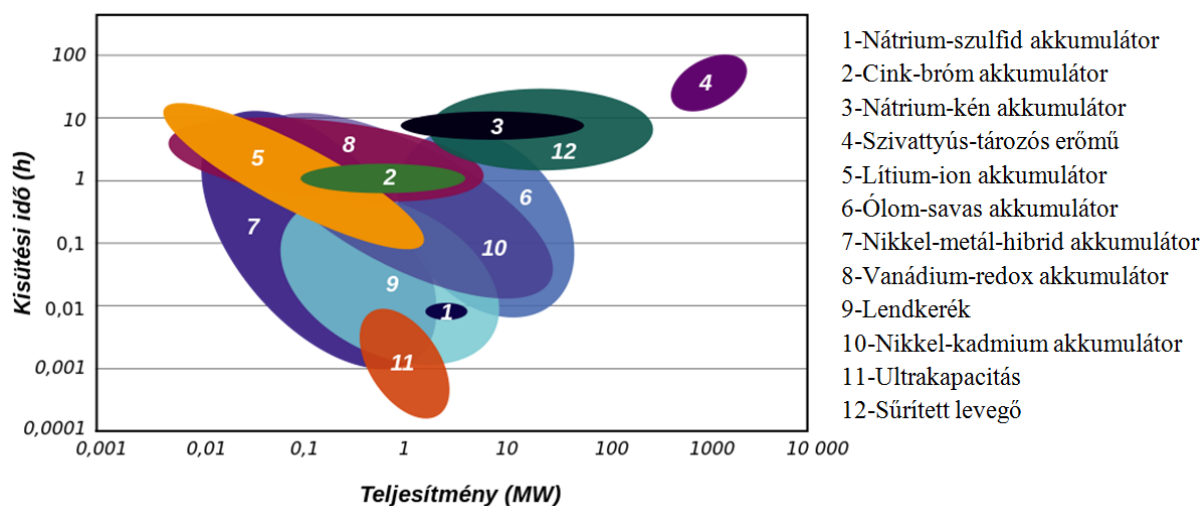
3.1 Repülőgép akkumulátorok

Az elektromos „üzemanyag” tárolás jelenleg legelterjedtebb típusa az akkumulátorokban való tárolás. Az akkumulátorokban zajló folyamat során kémiai energia alakul át villamos energiává, elektrokémiai kisüléseken keresztül. Beszélhetünk savas és lúgos akkumulátorokról. A bennük elhelyezkedő cellák (elsődleges és másodlagos) mindegyike tartalmaz pozitív és negatív elektródákat, szigetelő szeparátorlemezeket és elektrolitot. Az elsődleges, azaz a nem újratölthető akkumulátorokat a reagens lemerülése után ki kell cserélni. A másodlagos akkumulátorok újratölthetőek, teljesen töltött állapotuk helyreállításához egyenáramú forrást igényelnek. A nem újratölthető akkumulátoroknak magasabb az energiasűrűségük, de egy átlagos háztartásbeli alkáli elem 50%-kal több teljesítményt biztosít, mint egy lítium-ionos akkumulátor, ami az egyik legnagyobb energiasűrűségű másodlagos energiahordozó. Az újratölthető elemek előnye, hogy alacsony a belső ellenállásuk, így eleget tesznek a magas áramigénynek. A lítium alapú akkumulátoroknak háromszor magasabb az energiasűrűségük, mint például a nikkel-metál-hibrid, vagy a nikkel-kadmium alapúaknak. Viszonylag alacsony költségük, sűrűségük és energiájuk miatt egyértelműen vonzóbbak az elektromos repülőgép alkalmazásban. A folytatásban az egyszerűbb szemléltetésért két akkumulátor kerül összehasonlításra [40] [49] [51].

A lítium-ion akkumulátornak magas energiasűrűsége miatt nagyobb a kapacitása. Az önkisülés mértéke viszonylag alacsony, kevesebb, mint a fele NiCd és a NiMH akkumulátorok önkisülési értékének. Karbantartása nem igényel sok időt, nincs szükség időszakos kisütésre. Nincs memóriaeffektus, tehát nem csökken a kapacitás, ha rendszertelenül több alkalommal a teljes lemerítés helyett rátöltünk az akkumulátorra. Ezzel szemben védőáramkört igényel. Ha pedig az akkumulátort hideg helyen tároljuk (még ha

nincs is használatban) 40%-os töltöttséget kell megőrizni ahhoz, hogy megtartsuk az élettartamát. Mérsékelt kisütési áram jellemzi. Problémát jelenthetnek a szállítási szabályozások is: nagyobb mennyiségű lítium-ion akkumulátor szállítását korlátozhatják, de ez a szigorítás nem érvényes kézi készülékekhez tartozó akkumulátorra. Gyártása költséges, körülbelül 40%-kal drágább, mint a NiCd gyártása [40].

A lítium polimer akkumulátor ellenállóbb a túltöltésre, kisebb az esély elektrolit szivárgásra. Összehasonlítva a többi akkumulátorral tömege viszonylag kicsi. A zselés elektrolit a folyadékkal szemben könnyebben szállítható. Legfőbb problémája a töltőfolyamat érzékenysége, mivel túlfeszültség esetén exoterm kémiai reakció indulhat be a cellákban, és ez rendkívül tűzveszélyes. Ezen kívül itt is szükség van egy speciális védőáramkör rendszerre (Battery Management System), ami minden cellában kiegyenlíti a feszültséget. Ennek ellenére az egyik legjobbnak mondható hordozható energiatárolási eszköz a lítium polimer akkumulátor. Először a Sony vállalat által került piacra 1990-ben. Azóta már háromszorosára nőtt a kapacitása, sőt a mérnöki fejlesztéseknek és a gyártási folyamatok előrehaladásának köszönhetően új szeparátor anód és katód anyagok kerültek bevezetésre, és még mindig vannak további fejlesztési lehetőségek. Az alábbi grafikon szemlélteti napjaink leggyakoribb energiatárolóinak teljesítmény-skáláit és a jellemző kisütési idejüket (18. ábra) [49] [51].



18. ábra A különböző energiatárolók teljesítménye és kisütési ideje³³

Az akkumulátorok alapvetően biztonságosak. A mai modern lítium alapú akkumulátorok magasan reagens kémiai anyagokat tartalmaznak, alapvetően magas hőmérsékleten reagálnak. A lítium-ion akkumulátorok hagyományos fém oxidokat

³³ Szerkesztett a szerző (MS PowerPoint) az alábbi irodalom alapján - 2008 novemberéig üzembe helyezett energiatároló rendszerek, url: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ed/Energy_storage.svg/400px-Energy_storage.svg.png (2013. 10. 24.)

alkalmaznak, amik közelítenek a fajlagos energiájuk elméleti határához. Ahelyett, hogy ezt az üzemidőt optimalizálnák az akkumulátorgyártó cégek, a gyártási módszereket fejlesztik, hogy megerősítsék a biztonságot és az élettartamot. Itt is fontos szempont a cella túlmelegedésének elkerülése illetve az alkalmazott anyagok az emberi egészségre rendkívül veszélyesek, torok és hasi betegségeket, bőrproblémákat okozhatnak, ezért fokozott elővigyázatosságot igényel kezelésük [51].

Természetesen az akkumulátorok tárolása is nagy kihívást jelent. Hangárban való tárolásuk esetén a folyamatos ellenőrzés mellett, komoly tűzvédelmi szabályokat kell alkalmazni és betartani. Ezen kívül az adott repülőtérnek biztosítania kell a nagyfeszültségű akkumulátorok oltásához szükséges eszközöket.

3.1.1 Battery Management System

A repülőgépeken alkalmazott akkumulátorok esetében különösen akkor, ha azok a repülőgép hajtóművét szolgálják ki fontos az akkumulátorok működésének folyamatos ellenőrzése, üzemi paramétereinek szabályozása az élettartam növelés végett. Ezek mind hozzájárulnak ahhoz, hogy egy megbízható energiarendszer álljon rendelkezésünkre, továbbá diagnosztikai adatokat is szolgáltatnak a rendszer tökéletesítése, továbbfejlesztése céljából.

A BMS (Battery Management System) ellenőrzi és megvédi az akkumulátor celláit. Elsődleges feladata, hogy megvédje az akkumulátort, azáltal, hogy megakadályozza, hogy bármely cella a biztonságos működési értékeket túllépve működjön. Másodlagos feladata az akkumulátorok kapacitásának maximalizálása (az akkumulátorok töltöttségi állapotának kiegyenlítésével). Ezen kívül ellenőrzi az akkumulátor állapotát, környezetét, másodlagos adatokat számol, jelenti azokat, megvédi a cellákat, kiegyensúlyozza működésüket. Ezeket különböző szempontok alapján teszi:

- feszültség: teljes feszültség, az egyes cellák feszültsége;
- áram: be vagy kimenő áramerősség;
- hőmérséklet: teljes hőmérséklet, beszívott levegő vagy távozó levegő hőmérséklete, vagy az egyes cellák hőmérséklete;
- környezeti feltételek: levegő áramlás a léghűtéses akkumulátorok esetében.

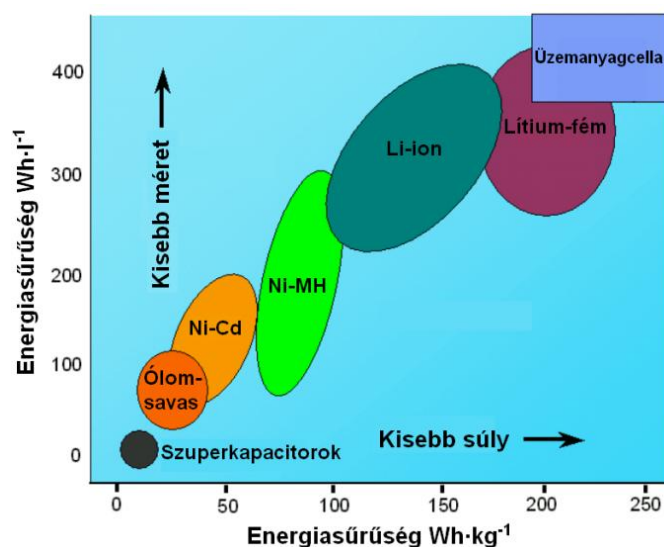
A BMS tehát megvédi az akkumulátort, hogy ne hagyja túllépje a biztonságos működési tartományokat, például: túláram, túlfeszültség (töltés közben), alacsony feszültség (kisütés közben). Ez különösen fontos az ólomsavas és a lítium ion celláknál, túlmelegedés vagy túl alacsony hőmérséklet, túlnyomás (jellegzetesen NiMH akkumulátoroknál) esetén [9].

3.2 Üzemanyagcellák (FC³⁴)

Az elektromos energia tárolásának másik jelenleg is gyors fejlődésben lévő formája az üzemanyagcella. Üzemanyagcellákkal eddig elsősorban az űrhajókon találkozhattunk elektromos áramfejlesztés céljából, de ma már egyre több hétköznapi alkalmazási területen megtalálhatóak. Ez egy olyan galvánelem, amely képes a benne lévő üzemanyag kémiai energiáját elektromos energiává alakítani. Alapvetően lényegesen nagy a teljesítménysűrűségük. Az üzemanyagcella esetében az „újrátöltés” azonnal megvalósul, amíg a legújabb gyorstöltésű akkumulátorok minimálisan is körülbelül egy órát és külső elektromos áramforrást igénylenek az újrátöltéshez.

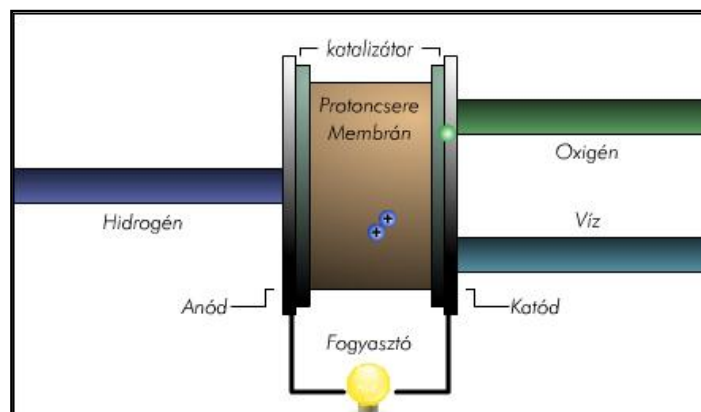
Az üzemanyagcella katalitikus folyamatként működik, tehát elválasztja a reagens üzemanyag összetartozó elektronjait és protonjait, így kényszeríti az elektronokat mozgásra, tehát elektromos áramot termel. Az elektromos üzemanyagcellákban a leggyakrabban felhasznált üzemanyag a hidrogén, de nevezzük inkább energiahordozónak. A tiszta hidrogén a természetben nem jelenik meg, előállításához energiatárolók szükségesek, ami történhet kémiai szénhidrogén vegyületekből, vagy víz segítségével, elektrolízissel. Utóbbi esetben a vízbe elektromos áramot vezetnek, aminek hatására a vízmolekulák kötése felbomlanak, azaz hidrogénre és oxigénre válnak szét. Ezt követően az alkotók gáz-halmazállapotban távoznak. Az üzemanyagcellákban ennek a reakciónak a fordítottját tapasztalhatjuk, azaz az árammal való vízbontás megfordítását. Tehát az akkumulátor hidrogénből és oxigénből elektromos áramot állít elő, mellékterméke pedig a víz. Víz helyett más anyagot is lehet használni, mint például az alkohol, de ebben az esetben már az áram mellett víz és szén-dioxid is felszabadul a folyamat során. A hidrogén alapú üzemanyagcellák hátránya, hogy az üzemanyagot veszélyes nagy mennyiségben tárolni, illetve előállítsa energiaigényes. Egy üzemanyagcella energiahatékonysága alapvetően 40-60% közé tehető, de akár 85% is elérhető, ha a hulladékhő is felhasználásra kerül. Emellett egy belső égésű motor hatékonysága 35% körül mozog. Az alábbi grafikon szemlélteti a különböző energiaforrások adott energiához tartozó tömegét és térfogatát (19. ábra). Jól látható, hogy a technológiai fejlődés előrehaladtával a kezdetleges akkumulátorok energiasűrűségét minden egyes új típus sikeresen felülmúlta. A jelenleg vezető szerepet betöltő lítium alapú energiatárolókat azonban egyértelműen túlszárnyalja az üzemanyagcellás megoldás, melynek a kilogrammonkénti, illetve literenkénti energiája jelenleg a legnagyobb [8] [34] [51] [71].

³⁴ FC: Fuel Cell -üzemanyagcella



19. ábra Különböző energiaforrások adott energiához tartozó tömege és térfogata³⁵

Az üzemanyagcella szerkezetileg egy anódból áll, amihez a tüzelőanyagot vezetjük és egy katódból melyhez az oxidáló anyagot vezetjük, valamint a két elektródát elválasztó elektrolitból (20. ábra). Az elektrolitnak kettős feladata van, egyrészt az elektródákat kell egymástól elszigetelnie, hogy a két elektródához juttatott kiindulási anyagok egymással ne érintkezzenek, másrészt ionvezetőnek kell lennie, hogy a kémiai reakció létrejöhessen. A reakció megfelelő sebességének eléréséhez katalizátort használnak. Katalizátorként olyan anyagot alkalmaznak, mely felgyorsítja a reakciót anélkül, hogy abban részt venne. Működésük alapja, hogy a gáz halmazállapotú anyagok hajlamosak a szilárd anyag felületén megkötődni, ami a molekulák szétválasztódásához vezet, így lehetővé téve a más molekulákkal való reakciót. Hidrogén gáz esetén katalizátorként platinát, ródiumot és ruténiumot alkalmaznak. [3] [34] [72].



20. ábra Az üzemanyagcellák működési elve³⁶

³⁵ Szerkesztette a szerző (MS Paint), az alábbi irodalom alapján - Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.- Mgr. Jaromír Hammer, Safety aspect of electric powered New Trends in Civil Aviation 2013, 97. oldal; Figure 1. (2013. 10. 21.)

A különböző alkalmazási területek eltérő igényei, többféle megoldást eredményeztek. Az üzemanyagcellák mobil alkalmazásához (például repülőgépekhez) a legmegfelelőbb típusok a polimer elektrolit membrános cellák, vagy más néven protoncsere membrános cellák (PEMFC³⁷). Ez a típus termeli a legtöbb energiát, a többi üzemanyagcellához képest sokkal jobb energiasűrűségi paraméterekkel rendelkezik, illetve jó a hidegindítási képessége is. A PEMFC működési hőmérséklete a membrán anyagától függ, alapvetően alacsony üzemi hőmérsékletű 50 és 100°C között mozog, átlagosan 80°C. Elektrolitként protonvezető membránt alkalmaznak, ami hidrogénionokat szállít. Sokoldalúsága alkalmassá teszi a stabil, a mobil és a hordozható rendszerek kiszolgálására [28] [34] [50].

A DMFC³⁸ a másik ígéretes megoldás, aminek már több kereskedelmi forgalomban is kapható változata látott napvilágot. Ez a tüzelőanyag-cella metanolból közvetlenül állít elő villamos és hőenergiát. Az anódhoz metanol vizes oldatát vezetjük, ahol a PEMFC- nél megismert folyamat megy végbe [68].

Az elektród anyaga a cellákban szilárd polimer membrán, amely a protonokat átengedi, az elektronokat nem. Az anódon a beáramló hidrogén szétesik protonokra és elektronokra. A protonok a membránon keresztül haladnak a katódok felé, amíg az elektronok egy külső áramkörön keresztül áramlanak, eközben pedig elektromos energia keletkezik. Az elektron az oxigénnel és a hidrogén ionokkal egyesül és víz keletkezik. Az üzemanyagcellák előnyei közé sorolható a gyors indítás, a szilárd elektrolitnak köszönhetően pedig nagymértékben csökken a korrózió. A belső égésű motorokhoz képest elméleti hatásfokát elvi termodinamikai határok nem korlátozzák, a belső égésű motorok hatásfokát viszont a Carnot ciklus diktálta termodinamikai határok szabják meg³⁹. Hátrányai a drága platina katalizátorok, az üzemanyag szennyeződésre való érzékenysége, illetve az alacsony hőmérsékleten való nagy hőveszteség. Az üzemanyagcella membránja mindig nedves kell, hogy legyen. A gyakorlatban a tüzelőanyag-cellákat sorosan összekapcsolják, így nagyobb kimeneti feszültség érhető el. A sorba kapcsolt cellák száma függ az elvárt kapocsfeszültségtől, felületük pedig az elvárt áramerősségtől. Egy cella (100 W esetén) terhelés alatti feszültsége kb. 0,7 V; maximális feszültsége kb. 1,2 V. Az alábbi táblázatban

³⁶ A protoncsere-membrános üzemanyagcella működése, url:

http://www.fuelcell.hu/fchu_engine/images/stories/fuelcell/PEM_hu.jpg

³⁷ PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell = Proton Exchange Membrane Fuel Cell

³⁸ DMFC: Direct Metanol Membrane Fuel Cell

³⁹ Carnot-féle körfolyamat során az adott hőmérsékleti határok között lejátszódó körfolyamatok közül a Carnot körfolyamat hatásfoka a legnagyobb, így elvi felső korlátot jelent az adott hőmérsékleti határok között működő más körfolyamatok hatásfokára.

láthatóak az üzemanyagcellák különféle fajtái és üzemelési tulajdonságaik a legjellemzőbb felhasználási területek mellett (1. táblázat) [37].

Az üzemanyagcella kis mérete, és nagy teljesítmény-tömeg aránya ideálissá teszi az alkalmazását repülőgépekben. A fő probléma az üzemeléshez szükséges hidrogén előállítása, szállítása és biztonságos tárolása.

A hidrogén tárolásának fő módszerei közül számunkra a legcélszerűbb a gáz halmazállapotú tárolás nagynyomású tartályokban. Az ipari felhasználáshoz alkalmazott nagynyomású tartályok nyomása eléri az 50-70 MPa-t. Ennek a nyomásnak az előállításához a tárolt energia 15-20%-ára van szükség. A gáz halmazállapotú tárolásmód viszonylag kis energiasűrűséget eredményez, ezért van szükség ilyen nagy nyomás előállítására [34].

Egy gáz alapú repülőgép hangárban való tárolása komoly aggodalmakat von maga után. A hidrogén kis szivárgásai az emelkedő és eloszló hajlama miatt zárt térben különösen veszélyes szituációt teremthetnek. Normál üzemelésnél elengedhetetlen, hogy ellássuk a hangárokat hidrogén érzékelőkkel és ventilátorokkal [34].

Jól szemlélteti az üzemanyagcellák hatékonyságát, hogy a Protonex üzemanyagcellás villanymotoros UAV 9 órás repülést teljesített ellentétben a két órás repülési időt elérő akkumulátoros villanymotorral ellátott PUMA UAV-val. Természetesen ezek a kis repülőtömegre tervezett eszközök még nem alkalmasak a nagy teljesítményt igénylő repülőgépek hajtására, de a katonai repülésben a kisebb pilóta nélküli robotrepülőgépek energiaszükségletét kielégíthetik, illetve a polgári repülésben a kis teljesítményű repülőgépeken lehetséges a használatuk [21].

Mivel az üzemanyagcellákat maximális teljesítményre kell tervezni, nagy és nehéz üzemanyag tárolót igényelnek kiegészítő egységekkel. Mobil alkalmazásnál általában kombinálják az üzemanyagcellákat és az akkumulátorokat. A repülőgépeknél különösen szükségesek speciális könnyű alkatrészek az alkalmazásukhoz.

Az amerikai Boeing repülőgépgyár volt az első, amely pilóta által vezetett üzemanyagcellás repülőgéppel végrehajtott sikeres repülést. 2008 márciusában, egy Diamond Aircraft Industries Dimona HK 36 kétszemélyes motoros vitorlázó repülőgépet elektromotorral, üzemanyagcellával, lítium-ion akkumulátorral és protonátermesztő membrános üzemanyagcellával láttak el. Ezzel a konstrukcióval 1000 méteres magasságba emelkedtek, majd a további 20 perces vízszintes repüléshez kizárólag az üzemanyagcellát használták. A Boeing mérnökei szerint amellet, hogy a PEMFC üzemanyagcella a jövőben kisebb méretű pilóta által vezetett vagy pilóta nélküli motoros gépek számára hosszabb repülési időt tehet

lehetővé, kilátásba helyezhető az utasszállító repülőgépek segédhajtóműveinek kiváltása is ezzel a technológiával. Így a segédberendezéseket ellátó jelenleg kerozinnal üzemelő sugárhajtóművek fogyasztása és károsanyag-kibocsátása kiküszöbölhető lenne. A fejlesztéseknek jelenleg nem célja a nagy utasszállító repülőgépek fő hajtóműveinek lecserélése, mivel ahhoz a technológia és az energiatárolás területén még nagy előrelépések szükségesek, de ez a kezdeményezés egy jó kezdet lehet az új irányzat integrálására a közforgalmi repülésben [10] [20] [37].

Üzemanyagcella típusa	Elektrolit	Működési hőmérséklet	Elektromos hatásfok	Üzemanyag	Felhasználási terület
AFC alkáli elektrolitos cella	30% kálium-hidroxid oldat, gél	80°C	elméleti: 70% gyakorlati: 62%	- tiszta H ₂ - O ₂	- járműipar - hadiipar
PEMFC membránú cella	protonáteresztő membrán	80°C	elméleti: 68% gyakorlati: 50%	- tiszta H ₂ - O ₂ - levegő	- blokkfűtő erőmű - járműipar - hadiipar
DMFC direkt metanol membrán	protonáteresztő membrán	80°C-130°C	elméleti: 30% gyakorlati: 26%	- metanol, - O ₂ - levegő	- mobiltelefon - laptop, stb. áramforrása
PAFC foszforsavas cella	tömény foszforsav	200°C	elméleti: 65% gyakorlati: 60%	- tiszta H ₂ - O ₂ - levegő	- blokkfűtő erőmű - áramforrás
MCFC alkáli-karbonátsó cella	lítium-karbonát, kálium-karbonát	650°C	elméleti: 65% gyakorlati: 62%	- H ₂ - földgáz - széngáz - biogáz - levegő - O ₂	- gőzturbinás, kétlépcsős blokkfűtő erőmű - áramforrás
SOFC oxidkerámia cella	yttrium-cirkon oxidkerámia	800°C- 1000°C	elméleti: 65% gyakorlati: 62%	- H ₂ - földgáz - széngáz - biogáz - levegő, - O ₂	-gőzturbinás, kétlépcsős blokkfűtő erőmű - áramforrás

1. táblázat Üzemanyagcella típusok és üzemelési jellemzőik⁴⁰

⁴⁰ Szerkesztette a szerző (MS Word), az alábbi irodalom alapján - <http://www.foek.hu/korkep/enhat/uzemanyagcella/uzemanyagcella.html> (2013. 10. 29.)

Röviden összefoglalva felsorolhatóak az üzemanyagcellák legfőbb előnyei és hátrányai. A rendszer előnyei:

- más fosszilis üzemanyag alapú technológiánál nagyobb hatékonyság;
- könnyen telepíthető;
- legtöbb esetben az üzemanyagcellák károsanyag-kibocsátása elenyésző;
- 0, vagy nagyon alacsony zajszint, eltekintve alkalmi vibrációktól.

Az üzemanyagcellás rendszerek ugyanakkor hátrányokkal is rendelkeznek:

- magas ár;
- a különleges anyagoknak és bonyolult tervezésnek, összeszerelésnek köszönhetően nagy érzékenység az üzemanyag szennyezettségre, emiatt pedig további ráfordítások szükségesek a szűrőkre és tisztítókra;
- képzett szakszemélyzet szükséges a karbantartáshoz és a javításhoz [34].

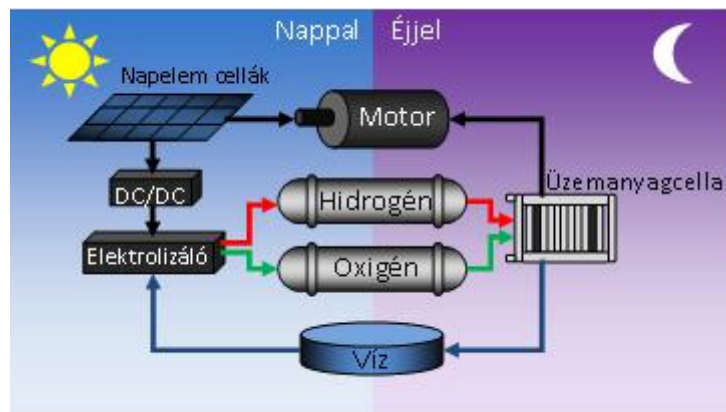
A fejezetből kiderül, hogy jelenleg két fő energiatárolási módról beszélhetünk: hidrogén üzemanyagcellák vagy akkumulátorok. Mindkét megoldásnak megvannak az előnyei és a hátrányai. Az üzemanyagcellákat használó hajtómű egyértelműen biztonságosabb. Ugyanakkor a kizárólag üzemanyagcellát alkalmazó gépek esetén nehezebb az üzemképes megvalósítás, a kis teljesítménytartálék több kockázati tényezőt is tartalmaz. Ezért a legtöbb elektromos hajtású üzemanyagcellás repülőgép kiegészítésképpen akkumulátorokat is használ, hogy leküzdje az energiacsúcs igényt. Az üzemanyagcella rendszernek szintén több mozgó mechanikus alkotóelme van, ami csökkenti a rendszer megbízhatóságát. Mint azt látjuk az energiatároló rendszer akkumulátorokkal egyszerűbb és könnyebb. Ahhoz azonban, hogy lecseréljük a belső égésű motorokat hasonló súlyú és teljesítményű akkumulátorok által táplált villanymotorokra, majdnem tízszer nagyobb energiasűrűségű akkumulátorok szükségesek, mint a mostaniak. Az akkumulátoros rendszerekben nincs mozgó alkatrész, és mivel több kisebb részből áll, egy cella meghibásodása nem okozza az akkumulátor teljes meghibásodását. A fő probléma a cellák érzékenysége a túlfeszültségre, vagy az intenzív kisülésre, ami a cellák robbanásához vezethet. További hátrány, hogy nem lehet üríteni, tehát mindenképpen el kell használni [8] [34].

3.2.1 UAV-k elektromos meghajtása

Jelenleg a pilóta nélküli repülőgépek közül egyedül mikro- és mini UAV-k meghajtását biztosítják akkumulátorok és villanymotorok együtt. Habár jelentős előrelépések folyamatosan történnek az akkumulátorok tervezésben és gyártásban, nemcsak a motor áramfelvételére, hanem a hasznos teher, és a kommunikációs rendszer energiaigényére is

gondolnunk kell. Így az ilyen UAV rendszereknek a repülési hatótávolsága és sebessége, illetve a kommunikációs rendszerük és a hasznos teherrel kapcsolatos képességeik korlátozottak. A rendszerek elég kicsik és könnyűek, hogy hátizsákban szállíthatóak legyenek így a nagyon rövidtávú műveletekben, és relatíve jó körülmények között használhatóak. A hatékony alkalmazáshoz taralék akkumulátorokat is biztosítani kell rendszeres töltéssel, hogy az elektromos táplálás fennálljon. A folyamatos áramellátás más módjai kifejlesztés alatt állnak, hogy megnöveljék az elektromos hajtású rendszerek hatótávolságát és képességeit. Jelenleg is folynak az UAV rendszerekkel kompatibilis napenergiás fotovoltaikus cellák és üzemanyagcellák követelményeinek kialakítása. A kombinált rendszer lehetővé tenné a napelem cellák által termelt energia közvetlen felhasználását, éjjel vagy felhős időben pedig az üzemanyagcella biztosítaná a hajtómű energiaszükségletét. Mindkét energiabiztosító rendszer repült már UAV-val, de jelenleg ezen technológiáknak a korai időszakában vagyunk.

Az alábbi vázlat bemutatja egy ilyen kombinált rendszer lehetséges felépítését és működését. Kiforrott gyakorlati alkalmazása viszont a távoli jövőbe tehető, ezért szükségeszerű addigra kidolgozni az új biztonsági és üzemeltetési előírásokat. Ehhez pedig elengedhetetlen még több üzemeltetési tapasztalat szerzése az elektromos hajtású gépekkel kapcsolatosan [27].



22. ábra Egy napelemes-üzemanyagcellás repülőgép működése⁴¹

⁴¹ Szerkesztette a szerző (MS Word), az alábbi irodalom alapján, Fuel Cell System for Solar-Powered Airplane url: http://www.avinc.com/img/engineering/solarpowerairplane_bg.jpg (2013. 09. 28.)

4. JÖVŐKÉP

Nagyon sokat tanulhatunk azoktól, akik jelenleg foglalkoznak az elektromos hajtás és napelemes repülés kérdéseivel és kis méretben bár, de használják is a technológiát. Kísérleteik és tapasztalataik meghatározzák az elkövetkezendő fejlődési irányokat, de alapvetően kijelenthető, hogy a maximális felszálló tömeg növekedése fogja meghatározni az elektromos repülés evolúcióját. Érdeemes kiemelni napjaink legnagyobb kihívásait, amivel mindenképp foglalkoznunk kell és az újító elgondolások által megcélozhatóak. Ezek a következők:

- a globális felmelegedés;
- a légszennyezés;
- a populáció növekedése miatt a közutak zsúfoltsága;
- a közforgalmi repülés hiányosságai, pl.:
 - hosszú sorban állás a reptéren;
 - pilótahibákból adódó biztonsági kockázat;
 - a hagyományos hajtóművek és a tüzelőanyag által okozott biztonsági kockázat;
 - körülményesség, utazási költségek;
 - meghatározott járatsűrűség;
- a megújuló energiák kihasználatlansága;
- a munkalehetőségek hiánya;
- a fosszilis üzemanyagoktól való függés és az üzemanyagárak;
- a polgári repülőképzés költségei;
- a hajtóművek élettartama.

Ezekre a problémákra egy esetleges megoldást jelenthet az elektromos repülés forradalma. A NASA 2013 augusztusában tartott Evolution of Transformational Flight konferenciáján foglalkozott részletesebben az elektromos repülés kérdésével. Jelenlegi elképzeléseik szerint 40 éves távlatra előre vetítve megvalósítható lesz a 10 MW-ot meghaladó teljesítményű elektromos motorok alkalmazása a közforgalmi repülésben. Ezzel már egy Boeing 737-150-es utasszállító repülőgép meghajtása is megoldható lenne. A konferencia felvonultatott számos ötletet a fedélzeti elektronika és az elektromos repülés területén. Az egyik ilyen kezdeményezés a CAFE⁴² vállalat által kifejlesztett pitot-statikus barográf, amely

⁴² CAFE: Comparative Aircraft Flight Efficiency

vezeték nélküli (wi-fi) adatforgalom segítségével továbbítja a kabin kijelzőire a repülőgép sebességét 1/10 MPH pontossággal, a magasságot pedig 15 cm pontossággal [67].

Az energiagazdálkodás egyik lényeges eszköze lehet a „Dyno+eTotalyzer”. Ez dugattyús motorokhoz nem alkalmazható, viszont képes meghatározni a villanymotor pontos áramfelvételét és a teljes villanyáram felhasználást a repülés során majd kWh-ban jelzi azt [22].

A NASA kutatói a jövővel kapcsolatban konszenzusra jutottak, miszerint létre kellene hozni egy személyi automatikus, bárhol alkalmazható légi szállítási képességet (Sky Taxi) Mindehhez meghatározták a követelményeket: csendes, biztonságos, környezetbarát, olcsó, repülőtértől független, fenntartható, gyors, autonóm gépre van szükség [22] [67].

4.1 Pocket Airport

A koncepciók közül az egyik leglényegesebb a Pocket Airport ötlete, amely akár helyszínt is biztosíthatna a Sky Taxi képességnek és sok mai problémát küszöbölne ki. Egy órás repülőút után több órát várakozni a forgalmi dugóban nemcsak fárasztó, de nagy időpocsékolás is. A Pocket Airport koncepció kiküszöbölhetné ezt, azáltal, hogy egy nagy repülőtér helyett több (akár városrészenként elhelyezett) kis repülőpark kerülne kialakításra. Ezáltal otthonról elindulva akár pár perc utazás után repülőgépbe ülhetünk és megkezdhetjük gyors és biztonságos repülőutunkat a célállomás felé. Ahhoz hogy ez megvalósítható legyen, olyan környezetbarát és gazdaságos repülőtechnológia kialakítása szükséges, amely zajszintjével (ami kisebb, mint 65 dB) lehetővé teszi a lakóhelyhez közeli üzemelést. Ez egyedül elektromos motorokkal képzelhető el. Maga a repülőpark futópályája nem lehet több 150-200 méternél, így a felszállási sebesség körülbelül 70 km/h kell, hogy legyen. Ehhez nagy siklószámmal rendelkező repülőszerkezet tervezése szükséges [22].

A NASA által felsorakoztatott ötletek mellett megfogalmazhatunk néhány kiegészítő elképzelést, amely hozzájárulhat a Pocket Airport koncepcióhoz. A repülőgép felgyorsítása álló helyzetből, felszálló sebességre az egyik legtöbb energiát igénylő mozzanat, különösen elektromotoros repülőgépek esetében. Ezért érdemes kiegészítő módszerekben gondolkodnunk. Ahhoz, hogy rövid távolságon elérjük a megfelelő felszálló sebességet, használhatunk futóművekhez épített gyorsító motorokat is. Mivel az ilyen repülőparkokban civil járókelők is közlekedhetnek a munkaterületen, nagyban növelné a gurulás biztonságát, ha nem kellene forgó légcsavart használni. A futóművekhez rögzített villanymotorok lehetővé teszik az álló légcsavarral való gurulást is, illetve repülés közben is felhasználhatóak bizonyos rendszerek működtetéséhez. A futóművek leszállás előtti felpörgetése is számos előnnyel

járhat. Finomabb földet érést tenne levetővé csökkentve a leszálláskor érzett lökés erejét az álló kerekek fékező hatása miatt. Szintén fontos szempont a gumiabroncsok élettartama, melyet egy ilyen technológia megnövelne. Ehhez olyan rendszert kell kifejleszteni, amely nem túl nehéz, képes elviselni a földet éréskor keletkező erőket, képes a kerekeket a leszálló sebességre felpörgetni kis karbantartás-igényű és üzembiztos. A '40-'50-es években már végrehajtottak kísérleteket, melyek során leszállás előtt felpörgették a futóműveket a légáramlat és lapátok segítségével. A legénység arról számolt be, hogy a földet érés így finomabb és a repülőgép mozgása stabilabb. A földön. A levegőben azonban a nagy tömegű felpörgetett kerekek giroszkópként működtek a repülőgép tömegközéppontja alatt, amely megnehezítette a fordulók végrehajtását, különösen kis sebességeknél. Hozzá kell tenni, hogy a közforgalmi repülésben használt repülőgépek futómű rendszerei sok és nagy tömegű gumiabroncsokból állnak. Minden egyes kerék felpörgetése sok energiát venne igénybe. Így az ötlet alkalmazása jelenleg kis repülőgépek esetében elképzelhető el és kizárólag a végső megközelítés végrehajtása során, ahol már további fordulók nem várhatóak. Ki kell kísérletezni azt a szerkezetet, tömeget, amely esetében az említett hatás a minimális. Említésre méltó veszélyfaktor, ha a „kerékmotorok”, vagy az üzemeltetés hibája miatt a fő futóműveket leszállás előtt lényegesen eltérő sebességre sikerül felpörgetni. Ilyenkor a földet éréskor fellépő azonnali eltérő fékező erők miatt a repülőgép kitörhet valamelyik irányba, ami különösen veszélyes jelenség. Egy ilyen rendszernek tehát üzembiztosnak, ellenőrzöttnek és megbízhatónak kell lennie. Éppen ezért a kevesebb mozgó alkatrészrel rendelkező villanymotor alkalmazása elképzelhető az ötlet kapcsán. Napjainkban egyik példa a hasonló rendszer alkalmazására a Cessna Citation business jet, amely a hajtóműből kivezetett nagynyomású levegő és lapátok segítségével leszállás előtt felpörgeti az orrfutóművet. Ezzel csökkenti a kavicsfelverődés lehetőségét, amely károsítaná a hajtóművet, megműveletlen szemcsés, kavicsos futópályákra történő leszállás esetén. A felpörgetett futómű előnyeit tehát már felismerték, alkalmazzák. A kerékmotorok ötlete még számos kísérletet igényel, azonban megvalósulása kézzel fogható eredményekkel járhat [22].

Egy külvárosban elhelyezett kisméretű futópályára történő leszálláshoz a kilebegtetésig körülbelül 7 m/s-os süllyedési ráta és alacsony repülési sebesség szükséges, ami többszörösen réselt fékszárnyakkal, áramlásrontókkal és féklapokkal oldható meg. A megvizsgálandó ötletek között megtalálunk egy hátrasikló fékszárnyak által kifeszített kevlár anyagot is, amely a szárny felületét megnövelve lehetővé teszi az átesési sebesség 56 km/h alá csökkentését, ezáltal a kívánt lassú bejövételt [22].

Az Airport légi jármű elfogó rendszert is tartalmazhat a biztonság növelése érdekében. Ma már futópálya szélességű több méter magas elfogó hálók léteznek, amelyeket a működtető rendszer pár másodperc alatt képes semleges helyzetből függőleges helyzetbe állítani. Így a rövid leszálló terület sem válik nagy veszélyforrássá, egy fékhiba, futóműhiba vagy bármilyen túlfutási szituáció esetén a repülőgépek biztonságosan megállíthatóak.

A robotika mai fejlettsége mellett lehetséges automatikus akkumulátorcserélő robotok üzembe helyezése is. Így nemcsak leparkolni és tölteni nem kell a gépet, de akár ki sem kell szállni, és az akkumulátor cseréje automatikusan megtörténik. A hatótávolság miatt beiktatott kényszerpihenők így gyorsabbak, az energiapótlás kényelmesebbé válik, és már indulhatunk is tovább [22].

Természetesen a megújuló energia területe is nagy hangsúlyt kaphatna a koncepcióban. A napelem cellákkal borított nagy felületű hangárok lehetővé tennék a repülőgép akkumulátorok szinte folyamatos töltését. Ma már kezdenek elterjedni olyan szélérőművek, amelyek lapát formái eltérőek a hagyományostól, így nem szükséges több tíz méteres magasságban elhelyezkedniük. Ezek telepítése már elképzelhető a repülőtér akadálymentes repülési zónáján kívül, így nem jelentené további biztonsági kockázatot. Az egyik legújabb itt bevethető fejlesztés az Echo Whisper turbina (21. ábra), amely 20 kW áramot képes termelni 20 méteres magasságban.



21. ábra Echo Whisper turbina⁴³

⁴³ Echo Whisper, url: http://www.allsmallwindturbines.com/images/uploads/turbine_images/turbine_image_1343105361.jpeg (2013. 10. 28.)

Különleges tölcser alakú 30 lapából álló forgórészének köszönhetően 30 %-kal több energiát termel, mint a jelenlegi szélérőművek. Teljesítménye 250 m²-nyi napelem cella energiatermelésének megfelelő. Rendkívül alacsony zajszintje pedig lehetővé teszi a kertvárosi házak, így a Pocket Airportok közelében történő telepítést. Természetesen a Pocket Airport-on alkalmazható gépek hatótávolsága erősen korlátozott. 800 km-t meghaladó repülések esetében a Sky Taxi nem váltaná le a légitársaságok repülőgépeit, de akár a mai nagy repülőtereken is megoldható lenne alkalmazásuk Pocket Airport-ok segítségével. Így egy több órás taxiút a nagyvároson keresztül a repülőtérre kiváltható lenne egy 20 perces Sky Taxival [13].

4.2 GPS alapú navigáció-leszállítás

Ha megvalósulna a Pocket Airport ötlete, akkor nagyon nagy forgalmat kellene lebonyolítani, ráadásul változó időjárási viszonyok között. Ahhoz hogy ez biztonságosan kivitelezhető legyen műszeres leszállító rendszerre van szükség. Napjaink repülőterein ezt különböző kategóriájú ILS⁴⁴ rendszerekkel valósítják meg. Az ilyen földi telepítésű navigációs rendszerek üzembe helyezése azonban rendkívül költséges és körülményes, érdemes foglalkozni más alternatívák vizsgálatával is. A GPS alapú navigáció manapság kiegészítő (sok esetben önálló) navigációs módszerként működik a repülésben. Az egyik legújabb magyar szabadalmi beadvány ezt a területet próbálja kiaknázni. Gálusz Antal és Krauth Péter ötlete megvalósítaná a GPS alapú navigációs adatok átvitelét a repülőgép rádió navigációs műszereire. Az ötlet abból áll, hogy egy fedélzeti GPS vevő, és egy azzal összekapcsolt számítógép a repülőgép aktuális pozíció adatait begyűjti és feldolgozza, és ezek segítségével az előre betáplált repülési pálya, illetve leszállópálya adatokból kis teljesítményű adóantenna segítségével egy rádió navigációs rendszer (ILS/VOR⁴⁵/NDB⁴⁶) jeleinek megfelelő vezérlőjeleket generál. Ezeket a jeleket a repülőgép fedélzetén lévő hagyományos vevőantenna, és a rádió navigációs műszerek valós jelként értelmezik. Ilyenkor a műszerek mutatója kitér, leköveti a vezérlőjeleket, ezzel asszisztálva a pilótának vagy robotpilótának a repülés és a megközelítési eljárás pontos végrehajtásához. Mivel a földi telepítésnek nincs költsége, ez a rendszer jóval elképzelhetőbb a Pocket Airport rendszerében, mint bármely más rádió navigációs rendszer. Egy autonóm elektromos meghajtású repülőgép esetében pedig teljesen mindegy, hogy a leszállító rendszer jeleit a földről vagy a fedélzetről sugározzák, ha azok pontosak, megbízhatóak [29].

⁴⁴ ILS: Instrumental Landing System- műszeres leszállító rendszer

⁴⁵ VOR: Very High Frequency Omni-Directional Range- nagy frekvenciás körsugárzó irányadó

⁴⁶ NDB: Non-Directional Beacon- navigációs irányadó

A Pocket Airportok esetében a jövőben még GPS-en alapuló automata gurulási rendszer is elképzelhető, természetesen kiegészítő biztonsági rendszerek alkalmazásával. Az ilyen rendszerek azonban, mivel teljesen elektronikusak, áramfelvételük miatt stabil és megbízható fedélzeti energetikai rendszereket igényelnek. Így a napelemes technológiával gyakorlati megvalósításuk nehézkes, azonban egy jövőbeni fejlődési irányként mindenképpen figyelembe kell venni őket.

4.3 Autonómia

A RITS⁴⁷ ötlete egy virtuális repülőtér, amelyet a fedélzeten egy számítógép által futatott alkalmazás hoz létre akár 1000 méteres magasságban. Erre a virtuális repülőtérre végrehajtható leszállások sorozata, amit a számítógép megfigyel és rögzít. Akár különböző időjárási viszonyok mellett is, a feladatot megismételve, módszeresen betanítható a robotpilóta a leszállás pontos végrehajtására. Bár az ötlet találékony és biztonságosnak tűnik, felmerül a kérdés, hogy a betanítás során a tesztpilóta ugyanúgy hajtja-e végre a leszállást egy olyan légtérben, ahol semmi vonatkoztatási pont, vagy veszélyfaktor nincs, mint egy valós repülőtérre, ahol a földi tereptárgyak, a repülőtér, a futópálya látása, a domborzat által okozott széllekedések észlelése mind befolyásoló tényezők [22].

4.4 Energiatárolás jövője

Egy lehetséges új koncepció a lítium-levegő akkumulátor, a jelenlegi lítium-ion akkumulátorok váltótípusa lehet. Ez a fejlesztés akár a hibrid technológia alkalmazását is szükségtelessé teheti, mivel teljesítmény-tömeg eloszlása eléri 1000 Wh/kg-ot. Működési elve: egy katalitikus levegő katódot használnak, ami oxigénnel táplál egy lítium anódot. Azonban fejlesztése még problémákkal küszködik. Az első prototípusok hatékonyak voltak, de élettartamuk rövidnek bizonyult, mindössze pár tucat töltési ciklust vészeltek át, emellett lassan szabadítják fel a bennük tárolt energiát és a légköri oxigén alkalmazása miatt a szennyeződések is sok gondot okoznak. Peter G. Bruce skóciai professzornak sikerült előrelépéseket tennie ezen a területen, gyakorlatilag egy megfordítható ciklust ért el, azaz egy olyan kémiai reakciót demonstrált, ami lehetővé teszi az akkumulátor töltését az elektródák kopása nélkül. Ha ez valóban megvalósul, a lítium-levegő akkumulátor akár 800 km-es utazásokat is lehetővé tenné egyetlen töltéssel. Ez a koncepció gyakorlatilag csaknem egyenértékűvé tenné az elektromos járműveket a belső égésű motorral hajtottakkal [69].

⁴⁷ RITS: Runway In The Sky- égi futópálya

4.5 Napelemes technológia

A napelemes technológia területén történő folyamatos előrelépések miatt számolnunk kell ennek a fellendülésben lévő ágazatnak a repülőgép fedélzeten betölthető szerepével. Napjainkban akár $160\text{--}180\text{ W/m}^2$ energiasűrűség érhető el napelem cellák használatával. Az egész szárny beborításával 3 kW folyamatos energiatermelés lehetséges, ami akár parkolás közben is töltheti a gépet. Jelenleg a már korábban említett Elektra One repülőgéptípus további ötletekkel gyarapodik. A napelem cellákkal borított repülőgép már rendelkezik napelemes hangárral, és a közelmúltban került kifejlesztésre a hozzá kapható napelemes utánfutó is, amely egy mobil töltőállomásként is funkcionál. A Solar Trailer kihajtható napelem celláival képes akár folyamatos $2,4\text{ kWh}$ teljesítménnyel tölteni az akkumulátorokat. Az Elektra One Solar és más napelemes repülőgépek további előnye az egyéb ultrakönnyű repülőgépekkel szemben, a zajszennyezés rendkívül csekély mértéke. A fosszilis üzemanyagok mellőzése pedig egy újabb lépés a károsanyag-kibocsátás megszüntetése felé [5] [15] [17].

4.6 Aeropak

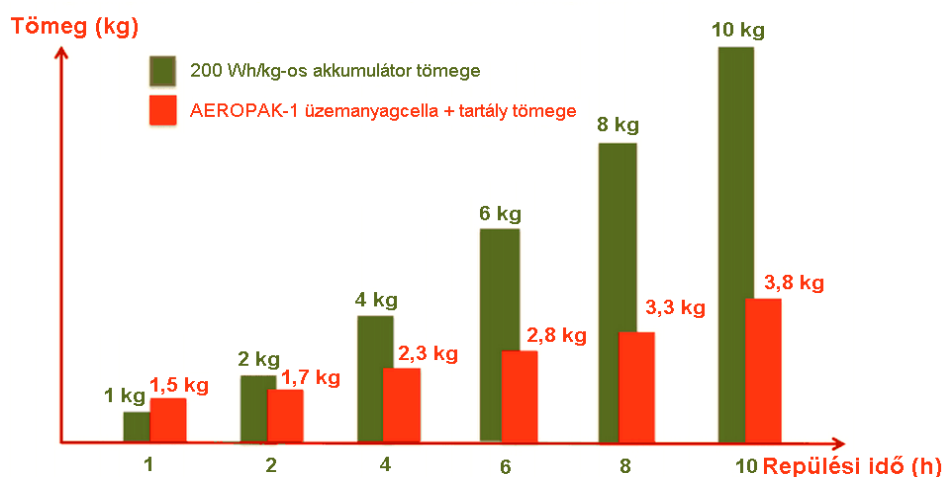
Az Aeropak, egy ultrakönnyű üzemanyagcellás energiatároló rendszer, ami arra lett tervezve, hogy megnövelje a repülés hatótávolságát a kisméretű elektromos UAV-k esetében. A fedélzeten egy cserélhető tárolóban elhelyezett hidrogén ellátó rendszert használ. Az Aeropak speciális jellemzői lehetővé teszik, hogy csökkentsük a repülőgép súlyát a repülési útvonal során, azáltal, hogy a felhasznált üzemanyag repülés közben távozik. Ennek köszönhetően egy 2 kg -os rendszer átlag energiasűrűsége elérheti a 675 Wh/kg -ot, mivel az üzemanyag felhasználásával a tömeg 1 kg -ra csökken. A rendszer előnyei:

- nagy energiasűrűség;
- hibrid alkalmazás akkumulátorral csúcsteljesítmény eléréséhez (felszállás, emelkedés, gyorsítás);
- nem gyúlékony kémiai üzemanyag;
- a sűrített hidrogént használó rendszerekhez képest fele akkora térfogatigény;
- skálázható előre beállított időtartamokra;
- névleges teljesítmény, csúcsteljesítmény számításával [38].

4.6.1 Aeropak kémiai tartállyal

Az Aeropak rendszer néhány centiméteres mérete megkönnyíti a kis repülőeszközökön való alkalmazást. Három szekcióból áll: üzemanyagtartály, ahol a hidrogénben gazdag NaBH_4 ⁴⁸ keverék található, a reaktorrendszer, ami egy speciális katalizátor segítségével tiszta hidrogén gázt állít elő. A harmadik szekció magába foglalja az üzemanyagcella egységet, az elektronikát és a kisebb perifériákat. A csúcsteljesítmény eléréséhez lehetséges az Aeropak kombinálása egy külső akkumulátorral. A hybrid üzemanyagellátó rendszer csökkenti a helyigényt, ami jellemző a sűrített hidrogén tartályokra, gáz kezelésével kapcsolatos berendezésekre. Továbbá nincs szükség komplex újratöltő rendszerekre. 20-32 V tartományban képes kimenő feszültséget biztosítani. A cella súlya 470 g. A tároló mérete igény szerint változtatható, módosítható, az alapfelszereltséghez egy 2,3 literes tartály tartozik. Hybrid akkumulátor egység alkalmazása esetén a teljesítmény tovább növelhető egy 230 g-os lítium-polimer akkumulátorral, ami 400 W -tal növelheti az összteljesítményt. Az üzemanyagcella rendszer folyamatos kimenő teljesítménye 200 W, csúcsteljesítménye akkumulátorral 600 W, 2 percen keresztül [38].

A 24. ábra bemutatja a különböző repülési időtartamokhoz szükséges Aeropak rendszer össztömeget, összehasonlítva az eredetileg szükséges akkumulátorok tömegével.



24. ábra Aeropak és hagyományos akkumulátorok tömege a repülési idő függvényében⁴⁹

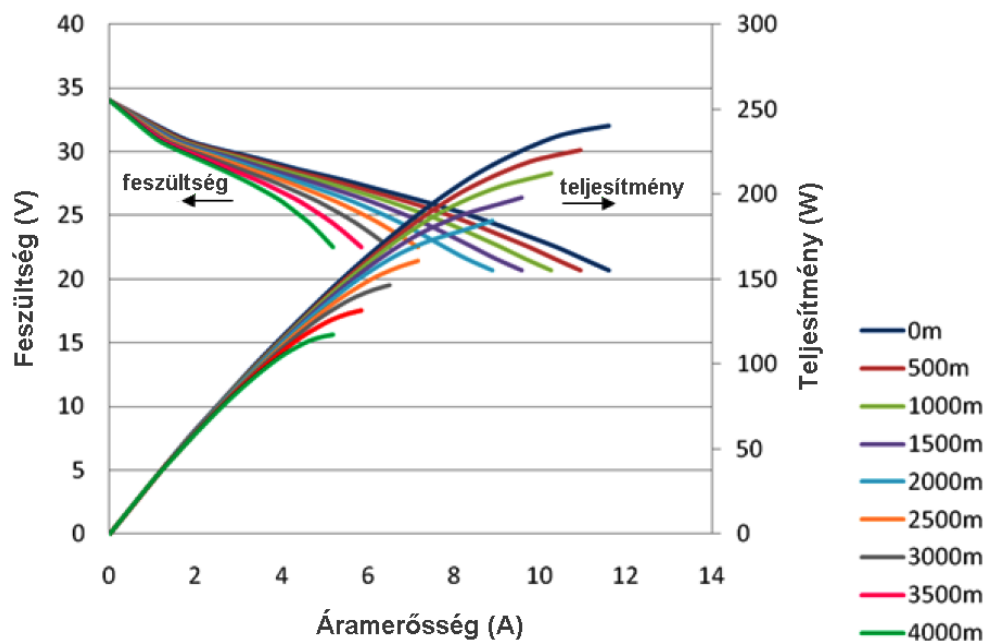
Alkalmazásának másik lehetősége az Aerostak rendszer sűrített hidrogén tartályokkal. Ez a módszer tovább növelheti az energiasűrűséget 450 Wh-tól akár 700 Wh-ig az üzemanyagtartály méretének függvényében. Az Aerostak is rendelkezik akkumulátorral a csúcsteljesítmény eléréséhez. További előnye, hogy csökkenti a költségeket, ha a hidrogén

⁴⁸ NaBH_4 :nátrium-tetrahidroborát

⁴⁹ Szerkesztett a szerző (MS Paint), az alábbi irodalom alapján –Aeropak 1, url: <http://resources.arcolaenergy.com/docs/Brochures/AEROPAKBrochure.pdf> (2013. 10. 20.)

ellátás rendelkezésre áll. Használata egyszerű, ideális tesztrepülésekhez, kísérletekhez. Fontos megemlíteni, hogy az üzemanyagcellás megoldások jellegzetesen sokkal kisebb tömegűek, viszont nagyobb méretűek, mint az akkumulátorok. Levegőáram szükséges ahhoz, hogy beinduljon a rendszerben a reakció, valamint a rendszer hűtéséhez is. Ahhoz hogy a legnagyobb hatótávolságot elérjük, a repülőgépet ennek megfelelően kell megtervezni és a legoptimálisabb szerkezetet kell kialakítani. Kis teljesítményigényű repülésnél (útvonalrepülés vagy süllyedés) feszültségfelesleg keletkezik az üzemanyagcellákban, amit a rendszer az akkumulátor töltésére használ fel [38].

A rendszer nagyon érzékeny a szennyeződésekre, teljesítménycsökkenés mellett javíthatatlan károsodásokat is okozhat. Ha az alkalmazási környezet poros, mindenképpen szűrőket kell alkalmazni. Nagy magasságon az oxidáns reakciókészsége csökken, így a kimenő feszültség is. Ez a probléma a rendszer egyik nagy hátránya. Ahogy az alábbi grafikon is mutatja, tengerszint felett 4000 méteren a leadott teljesítmény és az áramerősség csaknem a felére csökken (25. ábra).



25. ábra Feszültség-, teljesítmény- és áramerősség-változás a magasság függvényében⁵⁰

Az ideális alkalmazási körülmények 0 és 1000 méteres magasság, 0-40°C-os hőmérséklet, illetve 10-90%-os páratartalom közé tehetőek. Jelenlegi képességei miatt így a rendszer korlátozottan alkalmazható VTOL⁵¹ típusú konfigurációkhoz.

⁵⁰ Szerkesztett a szerző (MS Paint), az alábbi irodalom alapján – Aeropak, Technical data sheet, 2012, Figure 6.
url: http://www.hes.sg/files/AEROPAK_Technical_Data_Sheet.pdf (2013. 10. 29.)

⁵¹ Vertical Take-Off and Landing - függőleges fel- és leszálló képesség

Az Aeropak rendszer teljesítménye 500 órás élettartamig garantált, azután megközelítőleg 5%-kal csökken 100 óránként. Az üzemanyagtárolók egyszer használatosak. Hosszú távú tárolás esetén jelentős (akár 30 %) de visszafordítható teljesítménycsökkenéssel kell számolni, ezért ajánlott a rendszert havonta legalább egyszer használni, ezzel kiküszöbölhető a fenti probléma [38].

Az Aeropak rendszer gyártása már folyamatban van több különböző járműhöz is, mint például mini UAV-khez (5-12 kg felszálló tömeg), kis taktikai UAV-khez (12-80 kg felszálló tömeg), ember nélküli víz alatti járművekhez, földi robotjárművekhez, illetve katonai hordozható és kitelepített rendszerekhez egyaránt. Már most látható, hogy a széles körű alkalmazás és a rendszerrel szerzett gyakorlati tapasztalatok nagyban hozzájárulnak majd az elektromos hajtás megújulásához [6].

Az itt felsorolt újítások részben vagy egészében felhasználhatóak egy új generációs repülőtechnika kifejlesztésében. A jelen felsorolás célja megvalósítható ötletek bemutatása, melyek szerepet vállalhatnak az elektromos repülés forradalmában. Tegyük fel, hogy mindezt a technológiát kombinálva alkalmazzuk, tehát egy repülőgépben egyesítjük a napelem cellák villamos energia termelését, a kis tömegű üzemanyagcellák kémiai energiáját, a kerékmotorokat, és a GPS alapú leszállító rendszert valamint az 1000 Wh/kg-os akkumulátort, így kapunk egy 1600 km-t meghaladó hatótávolságú elektromos repülőgépet, amely akár a szomszéd utcában lévő Pocket Airportról is képes üzemelni. Mindennek azonban nemcsak technológiai akadályai vannak, hanem jogi és szabályozási nehézségei is felmerülnek. Az Amerikai Egyesült Államokban például egy robotpilóta típus engedélyeztetési költsége jelenleg eléri a 20 millió USD-t. Egy polgári repülőgéptípus hatósági engedélyeztetése 100 millió USD-ba kerül, míg egy kétmotoros fly-by-wire rendszerű VTOL gép engedélyeztetése eléri a csillagászati értékű 1 milliárd 100 millió USD-t. Ilyen összegeket jelenleg csak nagyvállalatok, illetve komoly fejlesztő cégek képesek befektetni, amihez kiforrott technológia és egy már bizonyított repülőgéptípus elengedhetetlen.

Ezek a jogi és anyagi körülmények a kísérletező kedvű fejlesztő magánszemélyeket, kutatókat, egyetemi karokat és professzorokat jelentős mértékben korlátozzák, nem beszélve a fejlesztésekhez szükséges mérnöki infrastruktúráról és a használt kémiai anyagok által okozott biztonsági kockázatokról. Ugyanakkor az UAV-kal végrehajtott kísérletek megmutatják, hogy alacsony költségvetéssel is végrehajthatóak kísérletek, amik a valós alkalmazási körülményeket megközelítő viszonyok között teszik próbára a jövő technikáját. Így kis lépésekben, de megvalósítható az elektromos repülés forradalma.

ÖSSZEGZÉS

A repülés az elmúlt 100 évben a közlekedési ágazat vezető területévé nőtte ki magát. Ez a rohamos fejlődés nagymértékű technológiai előrelépéseket követelt, különösen a repülőgép hajtóművek területén. Ezért súlyos árat fizetünk nap, mint nap, az élővilág, különösen a légkör szennyezése mellett a fosszilis energiahordozók hatalmas mennyiségben történő elfogyasztása súlyosan veszélyezteti civilizációnk és bolygónk jövőjét. Emellett a populáció növekedésének köszönhetően egyre égetőbbé válik a közúti közlekedés és a közforgalmi repülés hiányosságainak kiküszöbölése. Egyértelműen látható tehát, hogy egy átfogó nézőpontváltásra van szükség. A repülésen belül az elektromos hajtás lehet a megoldás.

Munkám során a különböző hajtóműtípusokon keresztül szemléltettem a jelenlegi belső égésű motorok üzemelési jellemzőit és legnagyobb hiányosságait. A légsaváros és a sugárhajtóműves meghajtáson keresztül eljutottunk az elektromos motorok bemutatásához. Kiemelve a villanymotorok sajátosságait világossá vált, hogy ezen a területen érdemes tovább vizsgálni.

A továbbiakban az elektromos hajtás repülőgépeken történő alkalmazásának történeti előzményeit foglaltam meg. Az újabb és újabb repülőgépek bebizonyították, hogy a villamos hajtáson belül még nagy fejlesztési potenciálok lelhetőek fel, mivel minden egyes gép bizonyos tulajdonságaival túlszárnyalta az előző típusokat. A fejlesztések napjainkban is folyamatosan történnek és ezeknek köszönhetően még új légijármű-kategóriák is születőben vannak (pl.: elektromos multikopter). Ezen kutatások nem titkolt célja, hogy minél zöldebb alkalmazást tegyen lehetővé, ezért innentől kezdve a napenergia, mint kimeríthetetlen forrás hasznosításának sajátosságai kerültek előtérbe. A pilóta által vezetett napelemes repülőgépek mellett bemutatásra kerültek a pilóta nélküli repülőeszközök, és azok csúcsteljesítményei is rávilágítva az elektromos rendszerek érzékenységre és a zavar-hibavédelem fontosságára.

A továbbiakban, mint a legnagyobb technológiai akadály a villanyáram tárolása merült fel megoldandó problémaként. Jelenleg elterjedt technológia az akkumulátorok alkalmazása, ez azonban tartalmaz megfontolandó biztonsági és környezetvédelmi szempontokat, illetve tömeg teljesítmény arányuk is fejlesztésre szorul. A BMS rendszerek alkalmazása segíthet az akkumulátorok megfelelő üzemi paramétereinek fenntartásában, és élettartamuk növelésében. Van azonban egy technológia, amely a jövőben az elektromos repülés teljes villanyáram szükségletét képessé válhat majd biztosítani: ez az üzemanyagcella. A jelenlegi

villamosenergia-tárolókhoz képest a legnagyobb energiasűrűséget képviselik. Itt is vannak biztonsági kockázatok, amiket figyelembe kell venni, de a már végrehajtott kísérletek és tesztrepülések bizonyítják, hogy (egyelőre akkumulátorokkal kombinálva) képesek pilóta által vezetett repülőeszköz villanymotorját is gazdaságosan táplálni.

Ahhoz, hogy meghatározhassuk a jövő fejlődési irányait ki kell emelni a legfontosabb kihívásokat és követelményeket a jövő elektromos üzemű repülési kultúrájával szemben. Egy a jelenlegi közlekedési formákat teljes egészében átalakító ötlet lehet a Pocket Airport, amely színteret biztosítana a jövő kistávolságú személyszállító légi fuvarozásának (Sky Taxi). Környezetbarát és gazdaságos megoldásokat összegyűjtve megfogalmaztam egy ilyen helyszín lehetséges jellemzőit. Ehhez már megvalósítható újítások szükségesek:

- az elektromos hajtás;
- a sárkányszerkezetek;
- a robotika;
- a repülésbiztonság;
- a megújuló energia;
- a navigációs rendszerek;
- és az autonómia területén.

Ahhoz, hogy a repüléstechnika alapvetően átalakuljon, hosszú időre van még szükség, ám amint azt láthatjuk kis lépésekkel ugyan, de egyre közelebb jutunk a teljes technikai váltáshoz. Az energiatárolás és a napelemes technológia területén folyó fejlesztések még hatékonyabb akkumulátorokat és villamosenergia-termelési módszereket tesznek lehetővé. Az eddigi kísérletekből még korai messzemenő következtetéseket levonni, de annyi biztos, hogy a fejlesztések eljutottak arra a szintre, hogy egy valós képet mutassanak a technológia jelenlegi képességeiről, jövőbeni lehetőségeiről. Az üzemanyagcellák és akkumulátorok kombinálása és miniaturizálása (Aeropak rendszer) pedig lehetővé teszi az elektromos hajtás üzemeltetési tapasztalatainak megszerzését kis tömegű repülőeszközökön, alacsony költségvetés és kockázatok mellett. Ezáltal megszerezhetők az alapvető ismeretek a környezetbarát, elektromos repülés elterjedéséhez.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] 2013 Paris Air Show EADS E-FAN, an electric airplane for training purposes url: <http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/2500/video-2013-paris-air-show-eads-e-fan-an-elect> (2013. 07.29.)
- [2] 7 Massive Ideas That Can Change the World url: <http://www.wired.com/business/2013/01/ff-seven-big-ideas/> (2013. 08. 02.)
- [3] A hidrogén üzemanyagcellák működése url: <http://www.alternativenergia.hu/wp-content/themes/alternativenergia/tudjmegtobbet.php?catid=20#63> (2013. 09. 01.)
- [4] A leggyorsabb kétüléses napelemes repülő url: <http://energiaoldal.hu/a-leggyorsabb-ketuleses-napelemes-repulo-video/> (2013. 08. 11.)
- [5] A Solar Trailer Can (Re)Charge Your Solar Airplane url: <http://www.treehugger.com/corporate-responsibility/heres-solar-trailer-charge-your-solar-plane.html> (2013. 09. 20.)
- [6] Aeropak Technical data sheet url: http://www.hes.sg/files/AEROPAK_Technical_Data_Sheet.pdf (2013. 10. 01.)
- [7] Békési Bertold, Wühl Tibor: Redundancy for micro uavs – control and energy system redundancy Deterioration, Dependability, Diagnostics 2012, Brno, University of Defence, 2012. pp. 123-130. (ISBN:978-80-7231-886-5) (2013. 10. 02.)
- [8] Berkes Balázs, Platina vizsgálata tüzelőanyagcellák katalitikus folyamatainak modellezéséhez url: http://www.fuelcell.hu/downloads/recomend/BBB_tdk.pdf (2013. 08. 26.)
- [9] BMS url: http://lilionbms.com/php/white_papers.php (2013. 08.21.)
- [10] Boeing Flies First Ever Battery Fuel Cell Plane! url: <http://inhabitat.com/transportation-tuesday-boeing-flies-first-fuel-cell-plane/> (2013. 09. 18.)
- [11] Dr. Techn. Turmezei Péter, Napelemes energiaellátó rendszerek katonai célú alkalmazásának kérdései, Budapest, 2003(CENTURION HELIOS)url: http://portal.zmne.hu/download/konyvtar/digitgy/phd/2003/turmezei_peter.pdf (2013. 08. 11.)
- [12] EADS E-Thrust elektromos hibrid repülőgép url: http://www.youtube.com/watch?v=_axFTZQ3tQw (2013. 08. 03.)
- [13] Eco Whisper Turbine 650 small wind turbine by Renewable Energy Solutions Australia kép url: http://www.allsmallwindturbines.com/turbine_detail.php?turbine_id=132&owner=211 (2013.09.12.)
- [14] Electric Airplane Designer Wants Aviation Energy Autonomy url: <http://www.wired.com/autopia/2011/07/electric-airplane-designer-wants-aviation-energy-autonomy/> (2013. 08. 10.)
- [15] Electric- and Solar aircraft Elektra One Solar url: <http://www.aircraft-certification.de/index.php/elektra-one-solar.html> (2013. 10. 03.)
- [16] Elektra One árammal repül url: <http://repulnijo.hu/2011/05/12/electra-one-arammal-repul/> (2013. 09. 30.)
- [17] Elektra One solar aircraft to fly 1,000kms url: <http://www.solarpowertoday.com.au/blog/elektra-one-solar-aircraft-to-fly-1000-km/> (2013. 09. 27.)
- [18] Elektromos légi utasszállítás 2050-re url: <http://energiaoldal.hu/elektromos-legi-utasszallitas-2050-re-video/> (2013. 08. 30.)
- [19] Elektromos repülőgépek url: <http://gepmadarak.repulnijo.hu/elektromos-repulo/gepek/> (2013. 08. 10.)
- [20] Első repülés üzemanyagcellákkal url: <http://www.mernokbazis.hu/cikkek/elso-repules-uzemanyagcellakkal> (2013. 09. 03.)
- [21] Energiaforrások url: http://www.energiakaland.hu/energiaotthon/energiaforrasok/hidrogen_uzemanyagcellak (2013. 09. 12.)
- [22] Evolution of Transformational Flight - NASA Dryden 2013 url: <http://www.youtube.com/watch?v=-yo820YZWqU> (2013. 09. 20.)
- [23] Flying Electron, a French project of electric plane url: <http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/2153/video-flying-electron-a-french-project-of-ele> (2013. 08. 11.)
- [24] Flying Electron: first flight of the CC01e electric aircraft url: <http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/2389/video-flying-electron-first-flight-of-the-cc0> (2013. 08. 05.)
- [25] Fodor Ferenc, Repülőgép hajtóművek: dugattyús repülőgép-motorok, Szolnok: Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, 1985.
- [26] Forradalmi konstrukció az EADS közreműködésével url: <http://radarfigyelo.htka.hu/2013/07/09/forradalmi-konstrukcio-az-eads-tol/> (2013. 08. 22.)
- [27] Fuel cell system for solar-powered airplane url: <http://www.avinc.com/engineering/solar-plane> (2013. 08. 29.)
- [28] Fuel Cells url: <http://www.fuelcells.org/> (2013. 08. 30.)
- [29] Gálusz Antal- Krauth Péter Eljárás GPS alapú navigációs adatok átvitelére a repülőgép eredeti beépített navigációs műszereire hordozható fedélzeti (ILS) rádiótechnikai eszközzel, valamint az eljárás alkalmazására szolgáló berendezés Szabadalmi Közlöny és Védjegyértesítő 117. évfolyam 8. szám, 211.

- oldal Szabadalmi bejelentések közzététele url: http://www.sztnh.gov.hu/kiadv/szkv/201204b-pdf/B_02_Szab_kozzetetel_8_1204.pdf (2013. 09. 23.)
- [30] Green Flight Challenge – Pipistrel kettős győzelem url: <http://repulnijo.hu/2011/10/06/green-flight-challenge-pipistrel-kettos-gyozelem/> (2013. 08. 11.)
- [31] Gyártásra kész a hibrid repülőgép url: http://index.hu/tech/2012/05/02/gyartasra_kesz_az_elektromos_repulo/ (2013. 08. 05.)
- [32] Hibrid repülőgépmotor url: <http://www.energiacentrum.com/elektromos-jarmuvek/hibrid-repulogepmotor/> (2013. 08. 05.)
- [33] History of Solar flight url: http://www.asl.ethz.ch/research/asl/skysailor/History_of_Solar_Flight.pdf (2013. 08. 30.)
- [34] Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.- Mgr. Jaromír Hammer, Safety aspect of electric powered New Trends in Civil Aviation 2013, 93. oldal
- [35] Kovács Tibor DSc, A terroristák láthatatlan fegyverei, url: http://www.zmne.hu/dokisk/hadtud/terror/lekt_Kovacs_Tibor.pdf
- [36] La France url: [http://en.wikipedia.org/wiki/La_France_\(airship\)](http://en.wikipedia.org/wiki/La_France_(airship)) (2013. 08. 22.)
- [37] Levegőben a hidrogéncellás repülőgép url: http://www.jetfly.hu/rovatok/jetfly/hirek/hidrogencellás_repulogep/ (2013. 09. 08.)
- [38] Long Endurance Battery Alternatives for Electric UAS-Aeropak 1 url: <http://resources.arcolaenergy.com/docs/Brochures/AEROPAKBrochure.pdf> (2013. 09. 26.)
- [39] Makkay Imre: Elektromos hajtású repülőgépek konstrukciós megoldásai url: http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2012_cikkek/62_Makkay_Imre-Elektromos_hajtasu.pdf (2013. 08. 10.)
- [40] Molnár András: Elektromos hajtású robotrepülőgépek url: <http://portal.zmne.hu/download/bjkmk/bsz/bszemle/kulon0202.html> (2013. 08. 21.)
- [41] Napelemes repülőgép url: <http://www.alternativenergia.hu/napelemes-repulogep/3019> (2013. 08. 12.)
- [42] Napfénnel repül url: <http://repulnijo.hu/2009/11/06/napfennel-repul/> (2013. 08. 20.)
- [43] Nem játék a napelemes repülőgép url: <http://www.mnnsz.hu/nem-jatek-a-napelemes-repulogep/> (2013. 08. 24.)
- [44] Óvári Gyula-Szegedi Péter, Hagyományos repülőgép-üzemanyagok kiváltásának lehetőségei és korlátai, Hadmérnök, V. évfolyam 4. szám-2010 december
- [45] Párizs 2011 – Cri Cri, a villanyrepce url: <http://repulnijo.hu/2011/06/21/parizs-2011-cri-cri-a-villanyrepce/> (2013. 08. 03.)
- [46] Pathfinder Plus url: http://www.avinc.com/uas/adc/pathfinder_plus/ (2013. 08. 28.)
- [47] Pathfinder url: <http://www.avinc.com/uas/adc/pathfinder/> (2013. 08. 28.)
- [48] Pranav Patel, Chief Marketing Officer, Electric power technologies for all electric aircraft url: <http://www.yumpu.com/en/document/view/3949016/electric-power-technologies-for-all-electric-aircraft-ge-aviation> (2013. 09. 21.)
- [49] Pranav Patel, Chief Marketing Officer, Advanced battery systems for More Electric Aircrafts (MEA) url: <http://www.yumpu.com/en/document/view/10006356/advanced-battery-systems-for-more-electric-aircrafts-ge-aviation> (2013. 09. 13.)
- [50] Protoncsere Membrános Cella url: <http://www.fuelcell.hu/index.php/hu/tuezelanyag-elemek/pemfc> (2013. 09. 15.)
- [51] Reg Austin, Aeronautical Consultant, Unmanned aircraft system UAVs design, development and deployment;105-106, 291-293. oldal url: [http://raha UAV.com/Library/Unmanned%20Vehicles/Unmanned-Air-Systems\(www.RahaUAV.com\).pdf](http://raha UAV.com/Library/Unmanned%20Vehicles/Unmanned-Air-Systems(www.RahaUAV.com).pdf) (2013. 09. 26.)
- [52] Repülni csendesen, új energiákkal – 2 url: <http://iho.hu/hir/repulni-csendesen-uj-energiakkal-2-121101> (2013. 08. 30.)
- [53] Rolls Royce and EADS Plan "E-Thrust" Hybrid Electric Aircraft for 2050 url: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9551> (2013. 08. 10.)
- [54] Schatz Solar Hydrogen Project url: http://schatzlab.org/projects/archive/schatz_solar.html (2013. 09. 09.)
- [55] Solar flight url: <http://www.solar-flight.com/> (2013. 08. 13.)
- [56] Solar Impulse url: <http://www.solarimpulse.com/> (2013. 08. 13.)
- [57] Solar Impulse url: http://www.greenfo.hu/hirek/2009/11/22/solar-impulse_1258877439 (2013. 08. 13.)
- [58] Sunseeker Duo: World's Fastest Solar-Powered Two-Seater Plane Unveiled at AERO Friedrichshafen url: <http://inhabitat.com/sunseeker-duo-worlds-fastest-solar-powered-two-seater-plane-unveiled-at-aero-friedrichshafen/> (2013. 08. 10.)
- [59] Szűcs József, Elektromos és embermentes repülőgépek url: <http://iho.hu/hir/merre-tart-a-repulogep> (2013. 09. 04.)
- [60] Tarcsai Miklós: A világ első elektromos hajtású kétéltű hidroplánja url: <http://vizirepules.hu/2011/08/06/a-vilag-első-elektromos-hajtasu-keteltu-hidroplanja/> (2013. 08. 15.)
- [61] Tarcsai Miklós: Először ült pilóta az elektromos multikopteren url: <http://repulnijo.hu/2011/11/14/eloszor-ult-pilota-az-elektromos-multikopteren/> (2013. 08. 15.)

- [62] Tarcsai Miklós: Felszállt az első elektromos hajtású helikopter url: <http://repulnijo.hu/2011/09/21/felszallt-az-elso-elektromos-hajtasu-helikopter/> (2013. 08. 15.)
- [63] Taurus G4- a világ első négyüléses elektromos repülőgépe url: <http://www.pipistrel-hungary.hu/?c=media&sc=article&v1=57&v2=show&p=7&lang=hu> (2013. 08. 26.)
- [64] Teljesítette küldetését az első napelemes repülőgép url: http://hvg.hu/vilag/20120725_napelemes_repulo_svajc_erkezes (2013. 08. 15.)
- [65] Tesztrepülésen a Napkereső II url: <http://ecolounge.hu/zoldmotor/tesztrepulesen-a-napkereso> (2013. 08. 19.)
- [66] The electric airplane Sunseeker Duo seeks funding url: <http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/2117/the-electric-airplane-sunseeker-duo-seeks-fun> (2013. 08. 12.)
- [67] The International Powered Lift Conference url: <https://www.aiaa.org/EventDetail.aspx?id=16563> (2013. 09. 27.)
- [68] Új generációjú üzemanyagcellák url: <http://epa.oszk.hu/00700/00775/00049/1564-1569.html> (2013. 09. 25.)
- [69] Újabb lépés a lítium levegő akkuk felé, url: http://sg.hu/cikkek/91003/ujabb_lepes_a_litium_levego_akkuk_fele (2013. 10. 08.)
- [70] Unmanned system roadmap 2007-2032, 45., 52. 84., 87. oldal url: <https://www.fas.org/irp/program/collect/usroadmap2007.pdf>
- [71] Üzemanyagcellák url: http://aeromagazin.hu/index.php?option=com_k2&view=item&id=251:%C3%BCzemanyagcell%C3%A1k&Itemid=105 (2013. 08. 30.)
- [72] Üzemanyagcellák url: <http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozati/mukodes/uzemanyagcellak.html> (2013. 08. 30.)
- [73] Van-e jövője a napelemes repülésnek?, url: <http://www.mnnsz.hu/van-e-jovoje-a-napelemes-repulesnek/> (2013. 09. 10.)
- [74] VC200- the first Volokopter to carry two people url: <http://www.e-volo.com/ongoing-developement/vc-200> (2013. 10. 09.)
- [75] Zephyr Solar-Powered HALE UAV, United Kingdom url: <http://www.airforce-technology.com/projects/zephyr/> (2013. 09. 03.)
- [76] Zephyr UAV, Personal Unmanned Aerial Vehicle url: <http://www.marcusuav.com/zephyruav/> (2013. 09. 03.)