

Békési Bertold, Sári János

A kriogenika felhasználhatósága a modern repülésben

A cikkben a szerzők ismertetik a kriogén rendszerekkel kapcsolatos kutatási tevékenységüket. A bevezetést, valamint a kriogenika rövid történetét követően bemutatjuk a repülésben alkalmazott kriogén gázokat, elemezve a folyékony hidrogén használatát. Egy példán keresztül olyan számítógépes szoftver használatát mutatjuk be, amely a valósághoz hűen képes a közegek áramlásának fizikai-matematikai modellezésére. Célunk egy átfogó, könnyen megérthető összefoglaló elkészítése a modernkori repülés alternatívájáról.

Kulcsszavak: kriogenika, kriogén rendszerek, kriohűtő, repülés, hidrogén

1. Bevezetés

A hibrid-elektromos repülőgépek vizsgálata a légi közlekedés jövőjének egyik lehetséges megoldása, és akár végső megoldást is jelenthet az olyan kihívásokra, mint a repülés gazdaságossága, az üzemanyag-hatékonyság növelése, a csendesebb gépek és a szennyező anyagoktól mentes levegő az Európai Unió Flightpath 2050 szerint. A repülőgéppel utazó utasok száma folyamatosan növekszik, éves szinten körülbelül 4%-kal [26]. Napjainkban a repülés emissziója „csupán” az emberi kibocsátás ~2%-áért felelős, ami a jelenlegi energiaszerkezet és a légi forgalom prognosztizált növekedése (IATA¹ szerint 3,5%/év) mellett, az évszázad közepére meghaladhatja a 3%-ot is. Ez valójában inkább 10% lesz, de elérheti akár a 20%-ot is, amennyiben a közlekedés más – döntően a hagyományos fosszilis energiahordozókat felhasználó – ágazatai (például közúti közlekedés) visszaszorulnak az elektromos meghajtás tömegessé válásával. Ezzel a repülés lehet a legnagyobb szén-dioxid-kibocsátó gazdasági ágazat az összes közül [12].

Ezen fejlemények ismeretében a teljes légi közlekedési ágazat abszolút kibocsátása növekedéséhez vezet – bár ezt a tendenciát kis mértékben csökkenti a jelenlegi Covid-19 miatti kialakult helyzet –, ami éles ellentétben áll azzal a céllal, hogy 2050-ig ezt 50%-kal csökkentsék. A kereskedelmi repülőgépipar további célja a kibocsátási célok elérése: az utaskilométerenkénti szén-dioxid-kibocsátás 75%-os csökkentése (a 2000-es szinthez viszonyítva), 55 dB-es zajcsökkentés és 2050-ig 70%-os tüzelőanyag-felhasználás csökkentés. Ennek egyik

¹ IATA – International Air Transport Association: Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség.

megoldása az ICAO² által bevezetett és működtetett rendszer, amely közvetett gazdasági eszközökkel kívánja a szándékolt emissziócsökkenést elérni [6]. A célok eléréséhez azonban nem hagyományos, hanem hatékonyabb technológiára (például kevesebb tüzelőanyagot felhasználó és tökéletesebb égést biztosító hajtóművek [7]) és alternatív repülőgép-konfigurációkra van szükség (aerodinamikai szempontból kisebb légellenállású sárkányszerkezetek). Ezen technológiák megvalósításához a hibrid-elektromos, elektromos meghajtású repülőgépek, határréteg-beviteli (BLI)³ meghajtási koncepció, magas hőmérsékletű szupravezetők (HTS)⁴ alkalmazására lenne szükség, és számos más tervezési módosítást is be kell vezetni [12], [15], [20], [25], [27].

A repülés modern társadalmunk szerves részét képezi, így nem meglepő, hogy fokozatosan nagyobb hangsúlyt fektetnek a kereskedelmi repülés kutatási és fejlesztési tevékenységeire. Ennek a folyamatnak a hatására létrejövő elektromos légi járművek legnagyobb problémája, hogy a tartós üzemeltetéshez nélkülözhetetlen áramszükségletet jelenleg csak kisgépes kategóriában lehetséges kivitelezni. Megoldásként előszeretettel alkalmaznak olyan magas hőmérsékletű szupravezetőket, amelyek képesek kiszolgálni a nagy teljesítménysűrűség-igényű elektromos rendszereket.

Az elmúlt évek során kevesebb hangsúlyt fektettek a szupravezetést támogató kriogén rendszerek integrálására repülőgépek elektromos szerkezeteiben. A kriogenika az anyagok és azok nagyon alacsony hőmérsékleten történő (< 120 K) viselkedésének a tanulmányozása. Hűtőanyagközegként leggyakrabban folyékony hidrogént (LH₂) alkalmaznak a természetéből adódó kettős alkalmazhatóságát kihasználva.⁵ A tárolt energia visszanyeréséhez elengedhetetlen a kriogén hőcserélő, valamint az áramtermeléshez használt expander.

Az ilyen típusú rendszerek modellezésére előszeretettel alkalmaznak, olyan háromdimenziós szoftvereket, amelyek képesek numerikus áramlástan (Computational Fluid Dynamics – CFD) szimulációkat elvégezni. Cikkünkben az Ansys multifizikai szoftvercsomag mint esetleges vizsgáló eszköz – egy példán keresztül – rövid bemutatását is fontosnak tartottuk. Hisszük, hogy kutatásunk eredményeként az olvasó egy könnyen érthető, átfogó képet kap a kriogén rendszerekről, valamint azok jövőbeni alkalmazhatóságáról [4], [16], [17], [20], [29].

² ICAO – International Civil Aviation Organization: Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet.

³ BLI – Boundary-Layer Ingestion: határréteg bevitel. A repülőgépek hatékonysága javításának egyik módja az, hogy csökkentsük a repülőgép saját hajtóműveinek használatát. A NASA Clevelandi Glenn Kutatóközpontjának mérnökei egy újfajta meghajtórendszert tesztelnek a határréteg bevitel elnevezésű elv alapján. Elemző tanulmányok kimutatták, hogy ez az új technológia potenciálisan akár 8,5%-kal is csökkentheti a repülőgép tüzelőanyag-elégetését a napjainkban használt repülőgépekhez képest. A mai sugárhajtású repülőgépeken a hajtóművek általában a repülőgép testétől távol helyezkednek el, hogy elkerüljék a repülőgép felszínén kialakuló, lassabban áramló levegőréteget, az úgynevezett határréteget. Az új meghajtókialakítás, vagyis a beömlőnyílás és a ventilátor, a törzs hátsó részén található repülőgéptestbe van ágyazva, és magába szívja a lassabb határrétegű légáramlást, felhasználva ezzel a repülőgép meghajtásához szükséges tolóerőt. A lassabb határréteg levegője azt jelenti, hogy a hajtóműveknek nem kell olyan keményen dolgozniuk, ezért tüzelőanyag-fogyasztásuk csökken. Ugyanakkor csökken a repülőgép ellenállása is, mivel a hajtóművek „elnyelik” ennek az ellenállásnak a részét, így a repülőgép általános tüzelőanyag-hatékonysága jobb, és kevesebb tolóerőre van szüksége a repülőgépnek az azonos sebességgel való repüléshez. Ezeknek az új meghajtószerkezeteknek speciális bemenetre van szükségük, amely elősegíti az örvénylő áramlás kiegyensúlyozását, mielőtt az a ventilátorhoz jutna, és egy erősebb, tartósabb ventilátorra, amely ellenáll az áramlás torzítása által okozott állandó ütésnek [21].

⁴ HTS – High Temperature Superconducting: magas hőmérsékletű szupravezető.

⁵ Folyékony hidrogén használható elsősorban repülőgépek lehetséges tüzelőanyagaként, másrészt szupravezető anyagok hűtésére elektromos légi eszközökben. Természetesen e kettő kombinációja is egy lehetséges megoldás.

2. A kriogenika rövid története

Ahogy az a bevezetésben is említettük, a kriogenika a fizikatudománynak azon ága, amely az anyagok ultra alacsony hőmérsékleten való viselkedését vizsgálja. Kriogenikus hajtóműveket használnak az űrprogramokban, szupravezetők esetén, továbbá olyan helyeken, ahol fontos az üzemanyag alacsony hőmérsékleten való tartása, elkerülve a gázhalmazállapotba való átalakulást folyékony állapotából. A kriogenika történetében az első nagyobb áttörést a Joule–Thomson effektus,⁶ felfedezése jelentette az 1800-as évek közepén. Ezt követte 1877-ben az oxigén cseppfolyósítása a kaszkád módszer segítségével, Raoul Pictet Pierre által. Az elkövetkező években a cseppfolyósítási folyamatok fokozatosan fejlődtek. Ezt az állítást alátámasztja James Dewar 1898-as sikeres kísérlete, amelyben képes volt folyékony hidrogén előállítására. Ezt követően 1908-ban Heike Kamerlingh Onnes, az alacsony hőmérséklettel foglalkozó tudományágak egyik jeles képviselője cseppfolyósította a héliumot, majd 1911-ben leideni kutatócsapatával definiálta a szupravezetést.

A kriogén technológia az 1960-as évektől kezdődően fokozatosan nagyobb jelentőségre tett szert, köszönhetően a hűtőrendszerek egyre szélesebb körű alkalmazásának. Természetesen ehhez kulcsfontosságú volt a kriogenikus anyagok hőszivárgásának minimalizálása, ugyanis ez határozza meg a költséghatékonyságot. Az így létrejövő többrétegű szigetelés (MLI)⁷ volt a kriogenikus rendszerek fejlődéstörténetének egyik legfontosabb állomása (vákuumszigetelés) [9], [22], [24].

Franciaország, Németország és az Európai Unió az elmúlt hónapokban bejelentette, hogy milliárdokat fektet be a hidrogén-infrastruktúrába [23]. Az Airbus három hidrogénüzemű, nulla szén-dioxid-kibocsátású repülőgép-koncepciót mutatott be. Kereskedelmi működésük a tervek szerint 2035-ben kezdődik. Mindegyik koncepció más megközelítést tükröz a nulla kibocsátás tervezésében és elérésében. Az első lehetőség egy sugárhajtóművel rendelkező repülőgép (lásd 1. ábra felső részén), amely 120–200 utas befogadására képes, és 2000 tengeri mérföld⁸ (3704 km) feletti repülést hajt végre, beleértve a transzkontinentálisakat is. Ez az elképzelés azon túlmenően, hogy hagyományos fosszilis üzemanyagok helyett hidrogént égető gázturbinás hajtóművet használ, az A320 család potenciális helyettesítőjét képezi. A cseppfolyósított hidrogéntartályok a hermetikus válaszfal mögött a farokrészben helyezkednének el [2], [31].

⁶ Joule–Thomson effektus: Olyan reális gázok vagy folyadékok hőmérséklet-változását írja le, amelyek a környezetüktől elszigetelve, egy fojtást tartalmazó nyíláson át (porózus) kitágulnak.

⁷ MLI – *Multilayer Insulation*: többrétegű szigetelés.

⁸ Nemzetközileg elfogadott 1 tengeri mérföld megegyezik 1852 méterrel.



1. ábra
Az Airbus repülőgép koncepciói [2]

A második lehetőség egy legfeljebb 100 utas befogadására képes turbolégcsavaros repülőgép (lásd 1. ábra alsó részén), amely több mint 1000 tengeri mérföldes (1852 km) repülésekre lesz alkalmas. Itt a hidrogént szintén egy gázturbinás hajtóműben égetik el. A harmadik lehetőség az egyesített szárny-törzs konstrukció (csupaszárny)⁹ rendszer alkalmazása (lásd 1. ábra jobb oldala), ez a repülőgép legfeljebb 200 utast képes befogadni, és repülési hatótávolsága is meghaladja a 2000 tengeri mérföldet. Az ultraszéles törzs használata további lehetőségeket kínál a hidrogéntartályok szárny alatti tárolására, valamint az utasok elhelyezésére az utastérben. A kérdés csak az, hogy miként biztosítható a gyors evakuálás a kabin közepéről vészleszállás esetén. A legérdekesebb, hogy mindhárom koncepcióban hidrogén elégetését javasolják, vagyis úgy döntöttek, hogy felhagynak az áramot előállító és az elektromos motorokat forgató üzemanyagcellákkal [2], [31].

Ennek ismeretében a hidrogénrepülőgép-koncepcióban nincs semmi új, csupán egy kísérlet a régi jó Tu-155¹⁰ feltalálására, amely még 1988. április 15-én (sikeres tesztrepülést követően) az első folyékony hidrogén felhasználású üzemképes légi jármű volt. Az akkori szovjet fejlesztők a CCCP-85035 lajstromszámú repülőgép utasoknak fenntartott részében helyezték el az üzemanyag tárolásához szükséges hidrogéntartályt (lásd 2. ábra jobb oldalán a kék tartály). 1989-ben a repülőgépet átalakították és tüzelőanyagként cseppfolyósított földgázt

⁹ BWB – *Blended Wing-Body*: egyesített szárny-törzs konstrukció (csupaszárny).

¹⁰ A Tu-155-ös, amely valójában a Tu-154-es utasszállító módosított változata. A csaknem 48 m hosszú négyüléses repülőgépet három hajtóművel szerelték fel: két klasszikus Kuznetsov „NK-8-2” turboventillátorossal, összesen 21 t-s tolóerővel, és egy folyékony hidrogénnel üzemelő gázturbinás sugárhajtóművel (ma már NK-88-nak hívják). A Tu-155 képes volt 12 km-es magasságban 1000 km/h sebességgel repülni. A 20 m³ úrtartalmú hidrogéntartály körülbelül 3000 km repülési távolságot biztosított [3], [14], [23], [30], [32].

(hőmérséklet -162 °C) használt.¹¹ Összesen körülbelül 100 repülést hajtottak végre kriogén üzemanyaggal, amelyből mindössze 5 folyékony hidrogénnel, a többi pedig cseppfolyósított földgáz alkalmazásával, majd a Szovjetunió felbomlásával és pénzügyi okok miatt a projekt fokozatosan feledésbe merült [2], [3], [13], [14], [23], [30], [32].



2. ábra
A Tu-155 kísérleti repülőgép [33]

3. Kriogén gázok

A légi járművek működtetésére használatos cseppfolyósított gázok közül leggyakrabban kerozint alkalmaznak. Természetesen léteznek másféle típusú gázok, amelyek esetleges alternatívaként működhetnek. Ilyenek például a különféle szén alapú vegyületek, mint a metán, etán, propán, bután, pentán, hexán. Előnyeik ellenére ellenük szól, hogy égetésük során (legyen az tökéletes vagy tökéletlen égés) üvegházhatást erősítő gáz (például szén-dioxid, nitrogén-oxidok, korom stb.) keletkezik [13], [14], [20].

Az elmúlt évek kutatásai és fejlesztései bebizonyították, hogy a hidrogén a jövő repülésében továbbra is egy lehetséges opció [15]. Cikkünkben a hidrogén felhasználását mint tüzelőanyagot, mint szupravezetők hűtésére szolgáló eszközt vizsgáljuk.

4. Hidrogén mint tüzelőanyag

A folyékony hidrogén (LH_2) mint üzemanyag számos pozitív és negatív tulajdonsággal rendelkezik. A következőkben a hidrogén tulajdonságait a kerozinhoz viszonyítva vizsgáljuk (lásd 1. táblázat).

Előnyök:

- a hidrogén energiasűrűsége, egységnyi tömegéből nyerhető égéshője a kerozinénak megközelítőleg háromszorosa;
- kisebb az üzemanyag súlya, mint a keroziné (0,36 kg hidrogén 1 kg kerozinnek megfelelő energiataralommal rendelkezik);

¹¹ A tesztek eredményeként kiderült, hogy jelentős előnyei vannak: a „kerozinnal” szemben az üzemanyag-kapacitás tekintetében kb. 70%-kal, a repülőgép tömege szempontjából kb. 40%-kal, amelyek a hidrogén magas fűtőértéke miatt érhetők el [3].

- repülőgépek hajtóműveiben történő égése során nincs CO₂-kibocsátás;
- nincsenek másodlagos (korom, szén-monoxid, elégetlen szénhidrogén) égéstermékek, valamint nem keletkeznek illékony szerves vegyületek (lásd 1. táblázat);
- a kriogén hűtőborda használata jelentősen növeli a gázturbinás hajtómű hőhatékonyosságát;
- üzemanyagcellákkal,¹² illetve elektromos motorokkal is használható;
- kevésbé hajlamos az égési instabilitásra;
- megújuló energiaforrásokkal előállítható.

Hátrányok:

- tárolására nagyobb hely szükséges, mint hagyományos esetben;
- a folyékony hidrogén nem tárolható a szárnyakban, raktározása csak is a törzsben lehetséges;
- az LH₂ tárolásához szükséges kriogén vagy túlnyomásos tartályok elhelyezése nehezen kivitelezhető;
- a cseppfolyósított hidrogén sűrűsége mindössze 1/12-e a kerozinénak;
- a tüzelőanyag költsége magasabb, mint a keroziné;
- a reptéri logisztika nehezen kivitelezhető (hidrogéntartályok tárolása, repülőtér biztonsága);
- az alacsony hőmérséklet, valamint a cseppfolyós halmazállapot fenntartásához hatékony szigetelés szükséges (aktív és passzív hőszigetelő rétegek);
- a repülés közben, nagy magasságokban az elégetés során keletkező vízgőz szintén kedvezőtlenül befolyásolja az üvegházhatást;
- a hidrogén hajlamos a szivárgásra;
- az elektrolízis, valamint a cseppfolyósítás energiahatékonyága alacsony [4], [13], [14].

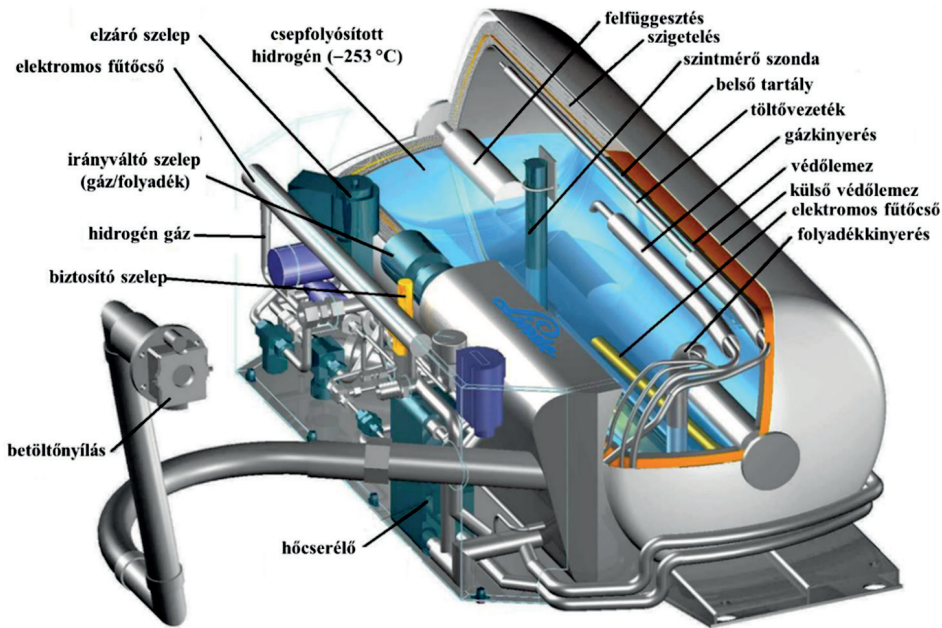
1. táblázat
A kerozin és az LH₂ égéstermékei (Békési Bertold szerkesztése [13] alapján)

Égéstermék	Kerozin	Folyékony hidrogén (LH ₂)
Elsődleges égéstermék	CO ₂ H ₂ O	H ₂ O
Melléktermék	HC NO _x CO SO ₂	H ₂ NO _x

¹² Az üzemanyagcellák működésük során nem juttatnak a környezetükbe olyan káros anyagokat mint a hagyományos tüzelőanyagok (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, illetve lebegő részecskék), így akár környezetbarátoknak is nevezhető (lenne). Viszont a hidrogén betáplálásúak vízgőzt bocsátanak ki magukból, amely a magasabb légrétegekben, ahol a légi járművek közlekednek, hozzájárul az üvegházhatáshoz. Ezenkívül, a működéshez szükséges hidrogén előállítása jelenleg döntő hányadában nem környezetbarát technológiákkal, fosszilis eredetű energiaforrások felhasználásával történik (pl. gőz-, katalitikus reformálás, elektrolízis), ami így kizárja a H₂ környezetbarát besorolását [5].

5. Folyékony hidrogén tárolása

Az ilyen típusú tartályok (3. ábra) tervezésénél a legnagyobb kihívást a folyékony hidrogén -253 °C -os rendkívül alacsony hőmérsékletének megtartása jelenti. A tároló eszköz kivitelezésénél nagy hangsúlyt fektetnek a szigetelésre, hogy megakadályozzák az LH_2 elpárolgását, ugyanis a hőelnyelés következtében az anyag gyorsan tágul. A tartály felrobbanásának, esetleges megrepedésének elkerülése végett szellőztetés szükséges. További bonyodalmat jelent a mérnöki tervezésben, hogy a hidrogén a rosszul hegesztett varratok mentén könnyen szivároghat. Az eddigiekből következtethető, hogy a tartály kialakítása és elhelyezése a jövőben szerves részét fogja képezni a repülőgépek tervezési folyamatainak [4].



3. ábra

Hidrogéntartály lehetséges elvi felépítése (Békési Bertold szerkesztése [4] alapján)

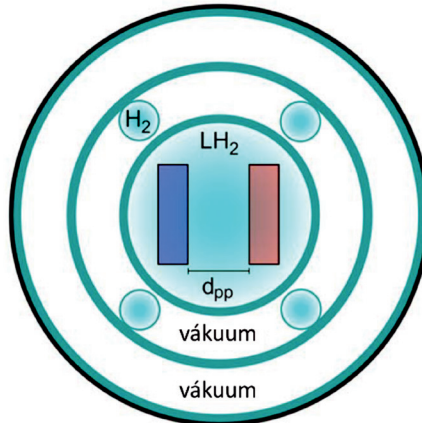
6. A kriogenika alkalmazása szupravezetők esetén

Az elektromos légi járművek elterjedése az elmúlt években folyamatosan nő, annak ellenére, hogy jelenlegi hatótávolságuk, hatásfokuk, valamint teherbírásuk meg sem közelíti a fosszilis tüzelőanyagokkal működő repülőgépekéit. A felsorolt problémák megoldására pillanatnyilag is kutatások folynak, kisebb nagyobb sikerrel [26].

A teljesítményelektronika kriogén hőmérsékleten való használatának alapvetően két fő okát tudjuk megkülönböztetni: a) az üzemi hőmérséklet csökkentése befolyásolja maguknak

az eszközöknek a működését; b) normál hőmérsékleten való üzemelésnél lényegesen megnőne azon vezetékek hossza, amelyek áramot szolgáltatnának a melegtől a kriogén részekig.

Egy a fenti célokra megfelelő HTS-kábel elvi felépítése a 4. ábrán látható. A kábel legbelső héjában helyezkedik el a két pólus és az őt körülvevő folyékony hidrogén (a d_{pp} jelen esetben a pólusok közti távolságra utal). A középső réteg négy darab csövet tartalmaz, ami lehetővé teszi az elpárolgott hidrogén visszafelé történő áramlását. A kriosztát legkülső rétege azon túlmenően, hogy körülveszi a középsőt, mechanikai védelmet biztosít a külső behatásokkal szemben.

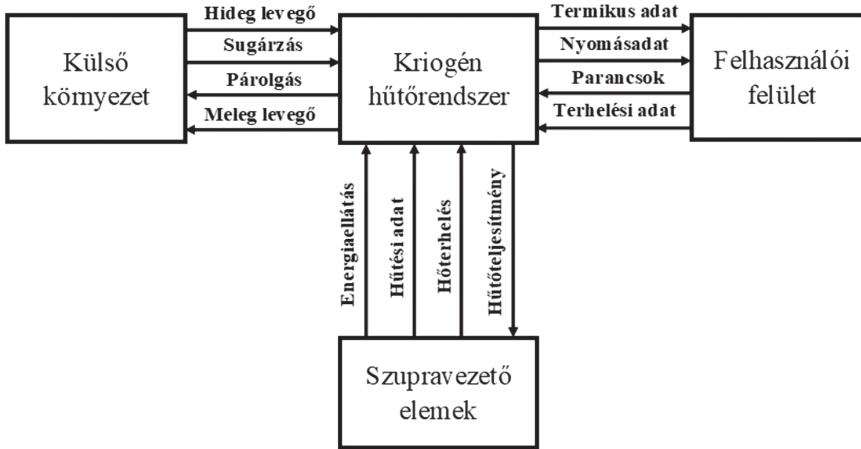


4. ábra

Kriogén vezetékek lehetséges elvi felépítése (Békési Bertold szerkesztése [26] alapján)

A szupravezető hálózatok hűtésének alapvetően három lehetséges felosztását különböztethetjük meg (5. ábra):

- Decentralizált: Ilyen esetben a hűtés helyben, közvetlenül történik, így minden rendszerem egy zárt hűtőkörrel kapcsolódik a kriohűtőhöz;
- Részben központosított: A fő hűtők szolgáltatják a közepes hőmérsékletű hűtőkört, míg a lokalizált kriohűtők biztosítják az üzemi hőmérsékletre való lehűtést;
- Teljesen központosított: A nagy méretű kriohűtő egy zárt körben áramoltatja a hűtőfolyadékot, ami biztosítja a szupravezető üzemi hőmérsékletét [10].



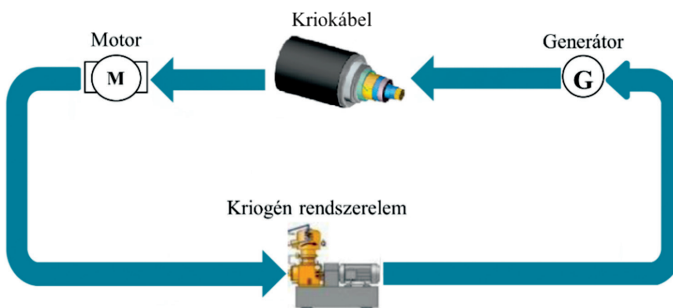
5. ábra

Példa a szupravezető kriogén rendszer felépítésére (Békési Bertold szerkesztése [19] alapján)

Mára már számos lehetséges konfigurációja létezik a HTS-eszközökből álló kriogén rendszereknek. A következőkben négy különböző elvi opciót kívánunk ismertetni az ilyen típusú architektúrák felépítéséről.

1. Integrált kriogén hűtőrendszer három HTS-eszköz soros konfigurációjában:

Egy ilyen típusú elképzelés esetén (6. ábra) három HTS típusú áramellátó készülék van sorba kapcsolva egy kriogén rendszerrel. Ilyenkor lehetőség van méretezett kriohűtők használatára a megfelelő hűtési teljesítmény, valamint az áramlási sebesség beállításához [10], [29].

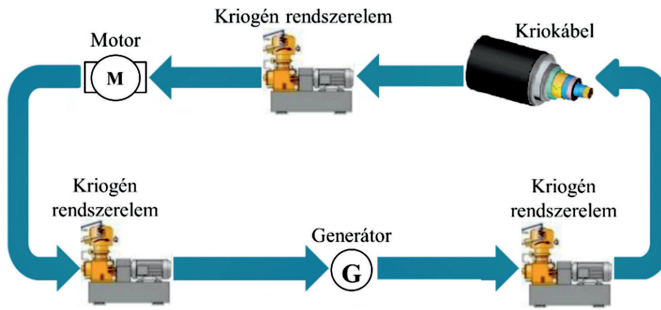


6. ábra

Kriogén hűtőrendszer sorba kapcsolása (Békési Bertold szerkesztése [29] alapján)

2. Különálló kriogén elemek a HTS-eszközök soros konfigurációjában:

Ahogy az a 7. ábrán is látható, a HTS áramellátó készülékek sorba vannak kötve egy már korábban elhelyezett kriohűtőelemmel. A rendszerben lévő hűtőelemek kapacitása, valamint teljesítménye annyi, hogy azzal még képesek legyenek biztosítani az adott HTS-elem szükséges hűtését [10], [29].

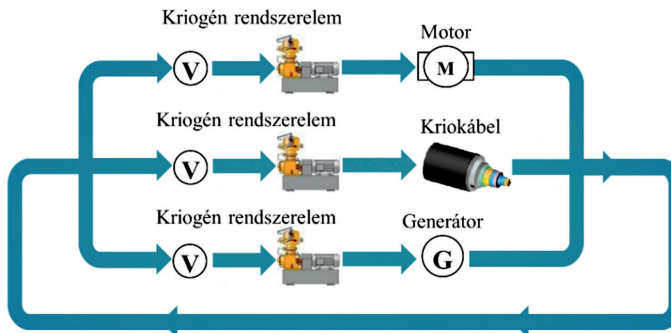


7. ábra

Kriogén elemek a HTS-eszközök soros konfigurációjában (Békési Bertold szerkesztése [29] alapján)

3. Különálló kriogén elemek a HTS-eszközök párhuzamos konfigurációjában:

Ebben az esetben a HTS áramellátó eszközök párhuzamosan csatlakoznak, és minden ág tartalmazza a saját kriogén hűtőrendszerét (8. ábra). Fontos kihangsúlyozni, hogy a különféle tápegységek, különféle hőterheléssel rendelkeznek, így a legnagyobb terhelésű ág rendelkezik a legnagyobb tömegárammal. Abban az esetben, ha a tömegáram egyenlően oszlik el az ágak között, akkor könnyedén előfordulhat, hogy nem lehet a megfelelő hűtési teljesítményt biztosítani az egyes készülékek kívánt üzemi hőmérsékletének fenntartásához. Annak ellenére, hogy ehhez a konfigurációhoz szükséges a legnagyobb számú hűtőelem, az előző példákhoz képest itt van szükség a legalacsonyabb hűtőteliességre [10], [29].



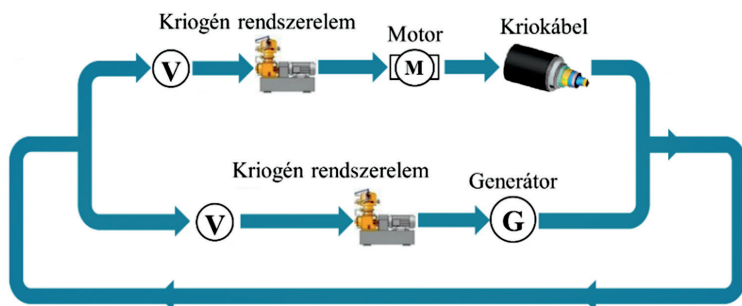
8. ábra

Kriogén elemek a HTS-eszközök párhuzamos konfigurációjában (Békési Bertold szerkesztése [29] alapján)

4. Hibrid rendszer HTS- és kriogén elemek csatolásával

Kriogén rendszerekben egyes áramellátó készülékek működéséhez nincs szükség az elemhez rendelt hűtőre (alacsony hőterhelésüknek köszönhetően), így lehetőség van az első megoldáshoz hasonlóan a motor, a kriokábel, valamint a hűtő sorba kapcsolására. A generátor ilyenkor egy másik hűtővel sorba kapcsolva, párhuzamosan csatlakozik a fentiekben leírt rendszerrészhez (9. ábra).

Az eddigiekből látható, hogy a hűtőkapacitás a konfiguráció változásával módosul, így az ilyen típusú rendszerek optimális beállításának kivitelezését a tervezési fázis alapjaként kell tekinteni [10], [29].



9. ábra

Hibrid rendszer HTS- és kriogén elemek csatolásával (Békési Bertold szerkesztése [29] alapján)

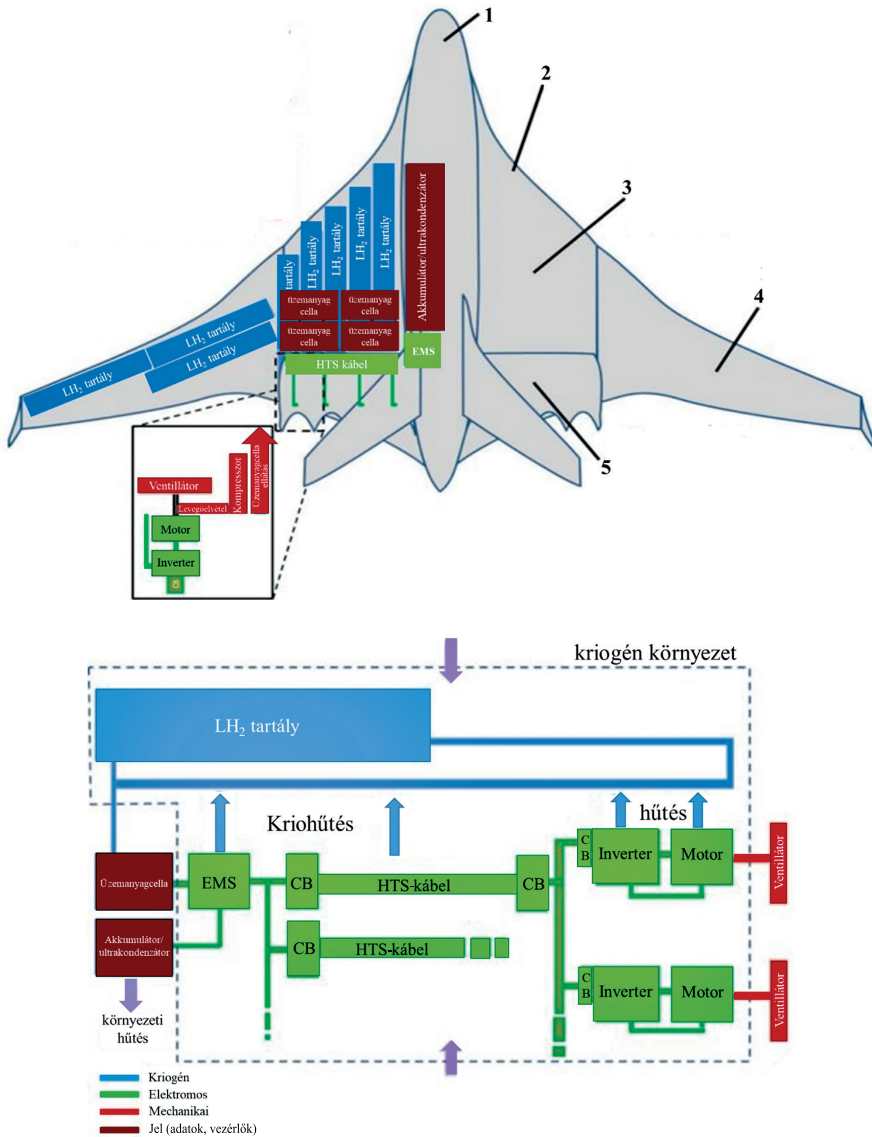
7. Kriogén, nagy hatásfokú elektromos technológiák

Az Illinois-i Egyetem kutatócsoportjának vezetésével és a NASA támogatásával egy teljesen újszerű megközelítés kidolgozása van folyamatban az elektromos rendszerek alkalmazásában. A program, amely a CHEETA (*Cryogenic High-Efficiency Electrical Technologies for Aircraft*) elnevezést kapta, lényegében egy elektromos repülőgéppalatform fejlesztésére összpontosít, amely kriogén folyékony hidrogént használ energiatárolási módszerként. A hidrogén kémiai energiáját üzemanyagcellák sorozatának segítségével elektromos energiává alakítják, amely a magas hatásfokú meghajtási rendszert táplálja. Az ultra alacsony hőmérséklet teszi lehetővé különféle szupravezetők alkalmazását, ezzel a „vesztésmentes” energiaátvitelt [8], [11], [17].

A projekt számos általános technikai akadállyal néz szembe, amelyek többsége a kriogén rendszer alkalmazásából eredeztethető. Ilyenek például:

- a kriogén generátorrendszerek megvalósítható teljesítményének megbecslése;
- a váltakozó áramú alkalmazáshoz megfelelő szupravezető anyagok hiánya, valamint azok pótlása;
- az egyenáramú elosztórendszereknél tapasztalható tranziensek következtében csak az egyenáramot használó tekercs lehet szupravezető;
- olyan méretű rendszerek beépítéséhez, amelyek alkalmasak lennének repülőgépek telepítésébe 1000–1500 Hz kompatibilitású szupravezetőre van szükség;

- a feszültség szabályozás nehezen kivitelezhető a vezetők zérus ellenállása okán;
- a kriogén rendszerek megfelelő üzemi hőmérsékletének biztosítása (minél erősebb a mágneses mező, amelyben a szupravezető anyag működik, annál alacsonyabb kriogén hőmérséklet szükséges);
- a kriohűtőrendszerek biztonsági követelményeknek való megfelelése;
- a kriogén hűtés gyorsasága, valamint a hőszokk elviselése [11], [17].



10. ábra

Az illinois-i Egyetem kutatócsoportjának elgondolása (Békési Bertold szerkesztése [17] alapján)

A 10. ábrán egy teljesen elektromos repülőgéppatformnak a koncepcióvázlatát láthatjuk, amely kriogén folyékony hidrogént használ energiatárolási módszerként. Az ábrán látható számozások és az eddig nem ismertetett rövidítések a következők:

1. A hagyományos törzs kialakítás leegyszerűsíti a tervezés és a gyártás folyamatát;
 2. A nagy kiterjedésű fedélzet felel az alacsony összenyomhatósági veszteségekért, vastag szárnyú tárolással;
 3. Hibrid sárkánytest-konfiguráció a hatékony aerodinamikai teljesítmény és a nagy energiamennyiség érdekében;
 4. Aeroszerkezeti hőoptimalizált szárnykialakítás;
 5. A meghajtás és a sárkányszerkezet integrációja biztosítja a BLI-meghajtás hatékonyságának javítását, valamint a zajvédelmet;
- EMS¹³ – energiamenedzsment-rendszer; CB¹⁴ – hálózatvédő automata; HTS-kábel¹⁵ [8], [11].

8. Folyékony hidrogén áramlástan szimulációja

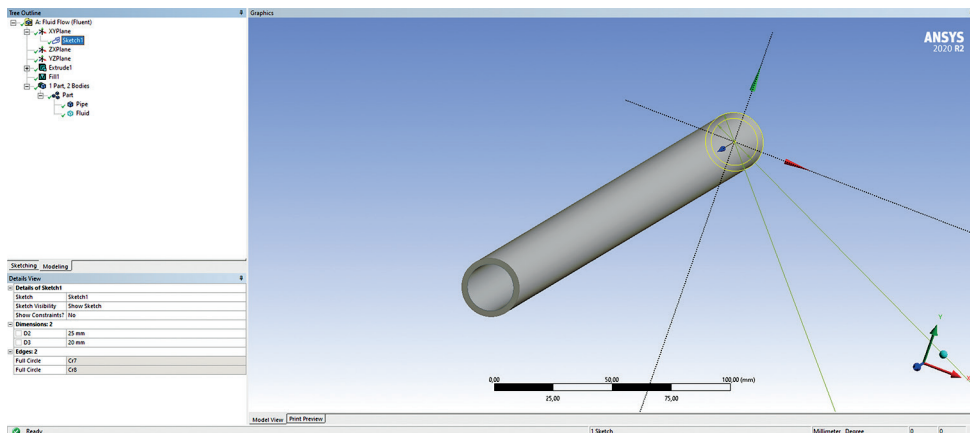
Ahogy azt már a bevezetésben is említettük, a különféle rendszerek, valamint a bennük lejátszódó folyamatok modellezése elengedhetetlen a költséghatékonyság, a precizitás, valamint a tervezhetőség szempontjából. Ennek megfelelően mára már számos cég, vállalat alkalmaz olyan szimulációs szoftvereket, amelyek a valósághoz hűen képesek az egyes folyamatok jellemzésére, leírására. A továbbiakban az Ansys segítségével elvégzett szimuláció lépéseit, eredményeit kívánjuk ismertetni.

Az Ansys típusú, valamint az ezekhez hasonló numerikus áramlástan szoftverek véges térfogatú módszeren alapulnak. Vizsgálatunknál első lépésként (mint minden esetben) magát a geometriát alkottuk meg, ami jelen esetben az áramlási tér háromdimenziós modellje. A modell megvalósítását az Ansys DesignModeler szoftver segítségével hajtottuk végre, de akár különféle CAD-es programokkal is kivitelezhető lett volna, mivelhogy a szoftver képes felismerni e programok formátumait. A csövet úgy terveztük, hogy 1 m-es hosszúsággal, valamint 5 mm-es falvastagsággal rendelkezzen (11. ábra) [1], [16].

¹³ EMS – *Energy Management System*: energiamenedzsment-rendszer.

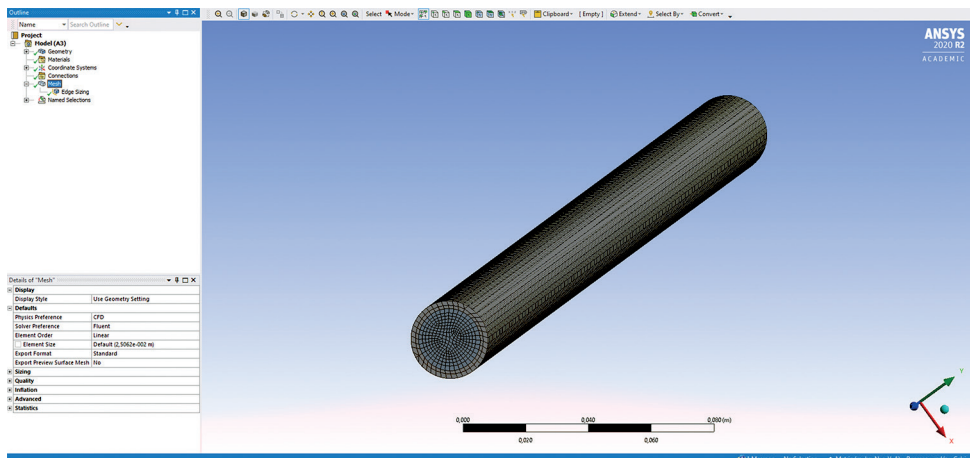
¹⁴ CB – *Circuit Breaker*: hálózatvédő automata.

¹⁵ HTS Cable – *High Temperature Superconducting Cable*: magas hőmérsékletű szupravezető kábel.



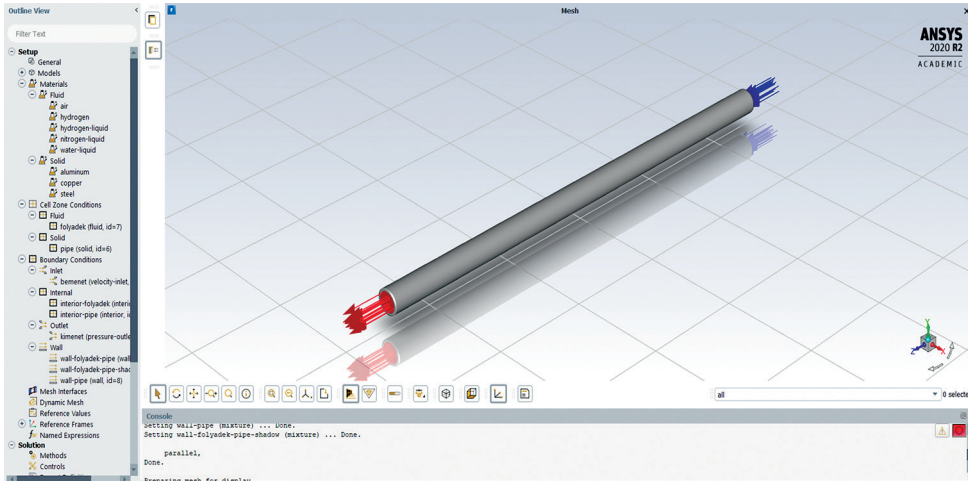
11. ábra
Az áramlási tér háromdimenziós modellje [Sári János szerkesztése]

Következő lépésként a numerikus háló elkészítését, vagyis az áramlási tér diszkrétizációját hajtottuk végre. A hálóelemek geometriai komplexitásuktól és méreteiktől függően különbözőek lehetnek (hexaéder, tetraéder, gúla, hasáb). A 12. ábra az általunk készített cső hálózását szemlélteti. A képen látható a hibrid, hexa- és tetraédes elemeket tartalmazó háló, valamint megfigyelhető a cső kilépési pontjában történő határréteg-sűrítés a pontosabb mérési eredmények végett. A hálózást az élék meghatározásával valósítottuk meg, figyelve arra, hogy a későbbiekben folytatott szimuláció futási ideje lényegesen függ a létrehozott háló összetételétől és kialakításától [16].



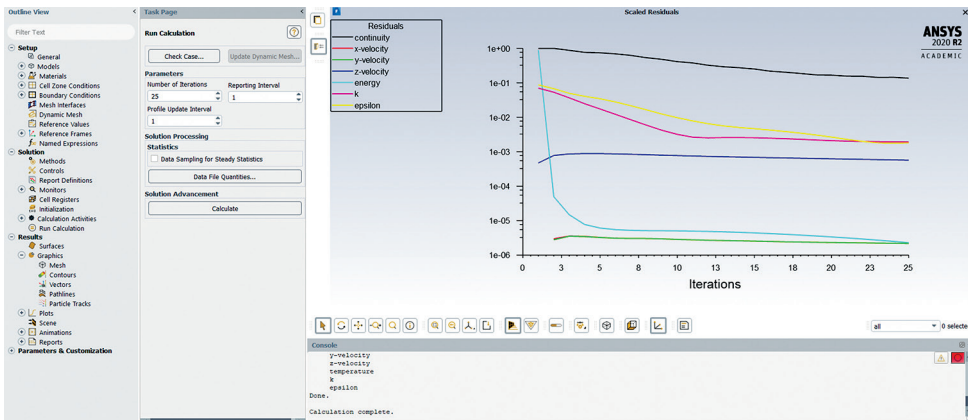
12. ábra
A numerikus háló elkészítése [Sári János szerkesztése]

A hálózfüggelenségi vizsgálatot, valamint annak ellenőrzését követően meghatároztuk a különféle peremfeltételeket, valamint a szimulációra vonatkozó kritériumokat (közegáramlás iránya, anyagtulajdonságok). Ebben a fázisban definiáltuk áramló közegként a hidrogént.



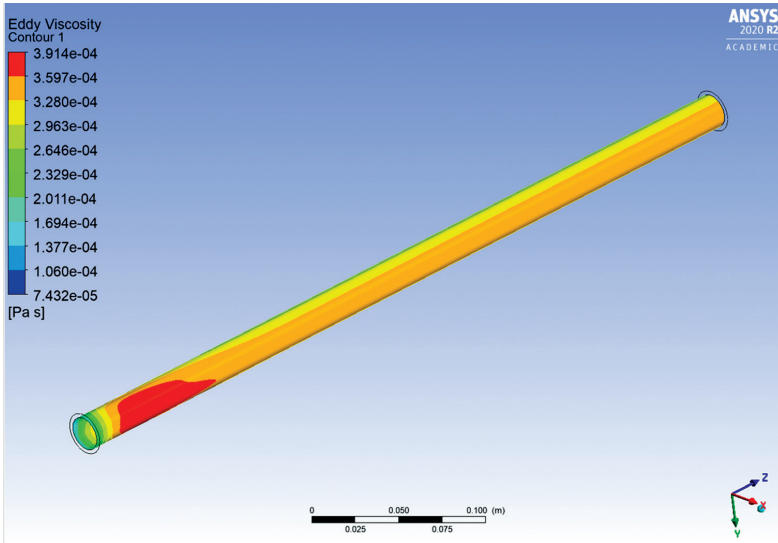
14. ábra
Peremfeltételek megadása Ansys Fluent-ben [Sári János szerkesztése]

A beállítások elvégzése után a megoldó futtatása (*Fluent*) következett, amely során a szoftver az általunk megadott feltételek alapján határozza meg az áramlási térben kialakuló viszonyokat. Ilyenkor a felhasználó beállíthatja az iterációk számát, amit jelen esetben (tekintettel a rendelkezésünkre álló szimulációt futtató laptop képességeire) 25-re állítottunk be, mint ahogy az a 14. ábrán is látható.

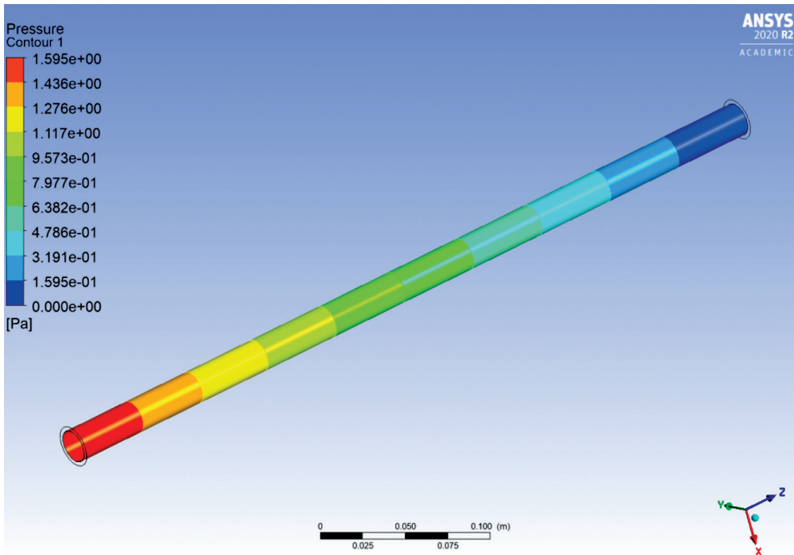


15. ábra
Az áramlási térben kialakuló viszonyok szemléltetése diagramon [Sári János szerkesztése]

A fenti diagramon (15. ábra) megfigyelhető a szimulációs megoldás konvergenciáján túl a hőmérséklet, a sebesség, valamint a nyomáskontúrok változása, izometrikus nézetben. A program továbbá képes az eredmények kiértékelését háromdimenziós nézetben is megjeleníteni, mint ahogy az a 16. és 17. ábrákon is látható.



16. ábra
Az örvényes viszkozitás alakulása a csőben [Sári János szerkesztése]



17. ábra
Nyomásváltozás a csőben [Sári János szerkesztése]

9. Befejező gondolatok

A Covid-19 kitörésének köszönhető csökkent repülőgép-felhasználás, valamint az országok gazdasági helyzetének hatása a repülőgépiparra olyan drasztikus változásokat követelnek, amely a jövő iparának ezen ágazatát a jelenleginél fenntarthatóbbá, költséghatékonyabbá alakítaná át. Számos szakember véleménye szerint a fejlesztési, környezetvédelmi és gazdasági szempontokat figyelembe véve a későbbiekben nem egy vagy kétfajta tüzelőanyagot fognak alkalmazni a repülésben, hanem a légi járművek nagyságát, illetve a hatótávolságát figyelembe véve többet.

Mindemellett kiemelt jelentősége van a légi járművek üzemeltetési rendszerében az emberi erőforrások megfelelő felkészítésének. Az új technológiák bevezetése megköveteli a légi és földi üzemeltetést végző szakemberek korszerű elvek alapján történő felkészítését, valamint a gyakorlati készségek folyamatos, tervezett fenntartását és esetleges fejlesztését [18], [28].

Véleményünk szerint a hidrogént mint tüzelőanyagot, rövid és középtávú repüléseknél, míg az elektromos-akkumulátoros megoldásokat regionális, illetve ingázó járatoknál fogják leginkább alkalmazni a közeljövőben. Természetesen hidrogénüzemű repülőgépek esetén számításba kell venni a kivitelezéshez szükséges átalakítások mértékét (sárkányszerkezet átalakítása, annak tartályokhoz mérten való kiépítése, kiszolgáló infrastruktúrák fejlesztése).

Jelen kutatásunkban a hidrogén felhasználhatóságát vizsgáltuk a repülésben, felhasználva az Ansys multifizikai szoftver előnyös tulajdonságait. Az ilyen típusú szimulációk segítségével a felhasználó viszonylag gyorsan és egyszerűen képes látványos eredményeket kivitelezni, elérni, azonban mindenképpen fontos egy validálási folyamat elvégzése annak érdekében, hogy kijelenthető legyen, hogy a szimuláció megfelel az általa ténylegesen modellezett jelenségeknek [16].

Hivatkozások

- [1] A. Ahmad, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, "CFD modelling of a novel liquid Nitrogen/Air engine and cryogenic heat exchanger for small scale applications," *Energy Procedia*, vol 142, 3654–3660, 2017. Online: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217359921; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.258>
- [2] Frequent Flyers, *Airbus продемонстрировала три варианта водородных самолетов, повторив решения КБ Туполева 1980-х*. 2020. Online: www.frequentflyers.ru/2020/09/21/airbus_zeroe/
- [3] A. Minin, *Airbus опубликовал концепцию создания к 2035 году самолетов с нулевыми выбросами за счет перехода на водородный двигатель*. Nasha Moskovia. Online: <http://nashamoskovia.ru/news-17039.html>
- [4] A. Gangoli Rao, F. Yin, H. G. C. Werij, "Energy Transition in Aviation: The Role of Cryogenic Fuels," *Aerospace*, vol. 7, no. 12, 181, 2020. Online: <https://doi.org/10.3390/aerospace7120181>
- [5] Békési B., Juhász M., „Pilóta nélküli légi járművek energia forrásai,” *Economica*, 7. évf. 1. sz. 92–100. 2014. Online: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2014/7/1/4311>
- [6] Varga B., Tóth J., „A széndioxid, mint a legfőbb ellenség, avagy mi az ICAO által létrehozott CORSIA szerepe ebben a harcban,” *Repüléstudományi Közlemények*, 29. évf. 3. sz. 243–252. 2017.

- [7] Varga B., Békési L., „»Tényleg nem a méret számít?«, avagy hogyan bünteti a kis méret a helikopter „turboshaft” hajtóműveket,” *Repüléstudományi Közlemények*, 26. évf. 2. sz. 81–93. 2014.
- [8] “Cryogenic liquid hydrogen to fuel fully electric aircraft? NASA thinks so,” *Desing Fax*, vol. 15, no. 19, 2019. Online: www.designfax.net/cms/dfx/opens/article-view-dfx.php?nid=4&bid=897&aid=8414&et=featurearticle&pn=01
- [9] Wikiwand, *Cryogenics*. Online: www.wikiwand.com/en/Cryogenics
- [10] F. Berg, J. Palmer, L. Bertola, et al., “Cryogenic system options for a superconducting aircraft propulsion system,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 101, 012085, 2015. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/101/1/012085>
- [11] FuelCellsWorks, *NASA to Develop a Novel Approach for All-Electric Aircraft Using Cryogenic Liquid Hydrogen as Energy Storage*. 2019. Online: <https://fuelcellsworks.com/news/nasa-to-develop-a-novel-approach-for-all-electric-aircraft-using-cryogenic-liquid-hydrogen-as-an-energy-storage/>
- [12] Óvári Gy., Békési B., Fehér K., Az elektromos meghajtású repülés lehetőségei. in *XVIII. Természet-, Műszaki- és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia – 18th International Conference on Application of Natural-, Technological- and Economic Sciences*. Pozsgai A., Puskás J. szerk., Szombathely, 2019. 05. 18. ELTE Savaria Egyetemi Központ, 2020. 23–33.
- [13] Óvári Gy., Szegedi P., „Hagyományos repülőgép-üzemanyagok kiváltásának lehetőségei és korlátai,” *Hadmérnök*, 5. évf. 4. sz. 16–37. 2010. Online: http://hadmernok.hu/2010_4_ovari_szegedi.pdf
- [14] Óvári Gy., „Gázok és villamosság, mint lehetséges repülőgép-üzemanyagok. I. rész,” *Haditechnika*, 48. évf. 2. sz. 5–10. 2014.
- [15] Airbus, *Hydrogen in aviation: how close is it? Understanding the challenges to widespread hydrogen adoption*. 2020. Online: www.airbus.com/newsroom/stories/hydrogen-aviation-understanding-challenges-to-widespread-adoption.html
- [16] Sári J., Beneda K., Kavás L., „Repülőgép hajtóművek égéstereinak áramlástani vizsgálata számítógépes szimulációban,” *Repüléstudományi Közlemények*, 32. évf. 3. sz. 93–103. 2020. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.8>
- [17] Sári J., *Az elektromos meghajtás jelenlegi és jövőbeni alkalmazhatósága a repülésben*. Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, 2020.
- [18] Tóth J., „A repülő műszaki tisztai kompetenciák kvalitatív vizsgálata,” in *Repüléstudományi Szemelvények*, Békési B., Szilvássy L. szerk., Szolnok Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet, 2016. 177–189.
- [19] J. Palmer, E. Shehab, “Modelling of cryogenic cooling system design concepts for superconducting aircraft propulsion,” *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 6, no. 3, 170–178. Online: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0020>
- [20] Fehér, K., „A repülésben használható korszerű bioüzemanyagok,” *Hadmérnök*, 12. évf. 2. sz. 108–122. 2017. Online: http://hadmernok.hu/172_09_fehér.pdf
- [21] K. Kafantaris, *Boundary Layer Ingestion Propulsion*. National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center, 2019. Online: www1.grc.nasa.gov/aeronautics/bli/
- [22] Wikiwand, *Kriogenika*. Online: www.wikiwand.com/hu/Kriogenika#/overview

- [23] L. Tamburelli, *The Tupolev which flew on hydrogen 32 years ago*. Private Jet Finder, 2020. Online: <http://blog.privatejetfinder.com/tu-155-hydrogen/>
- [24] M. Strandberg, *Analysis, Simulation and Cryogenic/Mechanical Design for ALMA Band 5 Cartridge*. Göteborg, Sweden, Department for Earth and Space Sciences Chalmers University of Technology, 2011. Online: <https://core.ac.uk/download/pdf/70588713.pdf>
- [25] M. Darecki, C. Edelstenne, T. Enders, et al., *Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation*. Report of the High Level Group on Aviation Research, European Union, 2011. Online: <https://doi.org/10.2777/50266>
- [26] M. Boll, M. Corduan, S. Biser, et al., "A holistic system approach for short range passenger aircraft with cryogenic propulsion system," *Superconductor Science and Technology*, vol. 33, no. 4, 044014, 2020. Online: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ab7779>
- [27] M. Pial, R. Bayezid, R. Karim, *Electric Aircraft with HTS (High Temperature Superconductor) Motor, Design & Simulation*. BRAC University, 2018. Online: http://dSPACE.bracu.ac.bd/xmlui/bitstream/handle/10361/10052/14321011,13321083,14321054,14110011_EEE.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- [28] Szegeci P., Turcsányi K., Tóth J., "Competence-Centered Education of Officers Thoughts about a recent Research of Competencies in Military Aviation Maintenance," *Land Forces Academy Review*, vol. 22, no. 2. 103–109. 2017. Online: <https://doi.org/10.1515/raft-2017-0014>
- [29] S. Satyanarayana, S. Indrakanti, J. Kim, et al., "Coupled Cryogenic Thermal and Electrical Models for Transient Analysis of Superconducting Power Devices with Integrated Cryogenic Systems," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 278, 012023, 2017, Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012023>
- [30] Avia Simply, Криогенное топливо в авиации. 2012. Online: <http://avia-simply.ru/kriogennoe-toplivo-v-aviatsii/>
- [31] О. Бахтина, *Airbus удивила прототипами самолетов на водородном топливе*. 2020. Online: <https://neftegaz.ru/news/aviatehnika/632380-vodorodnyy-/>
- [32] Yandex. Ту-155 – единственный советский самолёт на водороде. 2019. Online: <https://zen.yandex.ru/media/they/tu155-edinstvennyi-sovetskii-samolet-na-vodorode-5cc16142bdd0e700b379016c>

The Applicability of Cryogenics in Modern Aviation

In this article, the authors describe their research activities related to cryogenic systems. After the introduction and the history of cryogenics the cryogenic gases used in aviation are presented, with a detailed analysis of the use of liquid hydrogen. Then we show an example with using a computer software that is able to physically and mathematically model the different kind of fluid flows. Our goal is to provide a comprehensive, easy-to-understand summary of the alternative future of modern aviation.

Keywords: *Cryogenics, Cryogenic systems, Cryo-cooler, Aviation, Hydrogen*

<p>Dr. Békési Bertold alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék</p> <p>bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X</p>	<p>Bertold Békési, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems</p> <p>bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X</p>
<p>Sári János BSc-hallgató Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék</p> <p>sari.janos1999@gmail.com orcid.org/0000-0001-8861-3300</p>	<p>János Sári BSc student University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems</p> <p>sari.janos1999@gmail.com orcid.org/0000-0001-8861-3300</p>