

MOBILITÁS ÉS KÖRNYEZET JÖVŐFORMÁLÓ JÁRMŰIPARI KUTATÁSOK

Konferenciakiadvány
2025. ősz





MOBILITÁS ÉS KÖRNYEZET JÖVŐFORMÁLÓ JÁRMŰIPARI KUTATÁSOK

2025. őszi konferenciakiadvány

Lektorok:

Dr. Pup Dániel

Csikor Dániel

Szerkesztette:

Dr. Szauter Ferenc

Dr. Pup Dániel

Csikor Dániel

Földesi Rita

Koteczki Réka

Széchenyi István Egyetem

2026

ISBN 978-615-6443-49-6



Tartalomjegyzék

MAGASLÉGKÖRI MÉRŐLÉGHAJÓ	9
DEÁK ERIK	9
TESZTPAD TERVEZÉSE, A VÍZCSEPP ERÓZIÓ VIZSGÁLATÁNAK CÉLJÁBÓL	15
DOBOS BALÁZS	15
RDE MÉRÉSI TERV KIDOLGOZÁSA KÜLÖNBÖZŐ HAJTÁSÚ JÁRMŰVEKRE	28
FARKAS ÁDÁM	28
ALTERNATÍV TÜZELŐANYAGGAL SZENNYEZETT POLIALFA-OLEFIN (PAO) BÁZISOLAJ MESTERSÉGES ÖREGÍTÉSI ELJÁRÁSÁNAK FEJLESZTÉSE	41
KOVÁCS MÁRKÓ	41
AZ AERODINAMIKAI TÉNYEZŐK SZEREPE AZ AUTONÓM JÁRMŰVEK ENERGIAHATÉKONYSÁGÁBAN	54
KULMAN CSANÁD	54
FŰTÖTT ILLETVE HAGYOMÁNYOS KATALIZÁTOR ÖSSZEHASONLÍTÁSA HIDEGINDÍTÁSKOR	64
LÉDECZI GERGŐ JÓZSEF	64
OLAJTARTÁLY TERVEZÉSE VEZÉRMŰLÁNC- TESZTPADHOZ	70
MADÁCSI BELIÁN	70
FORMULA 1 KÖRIDŐ OPTIMALIZÁLÁS SIMRACING SZIMULÁCIÓVAL ÉS TELEMETRIA ELEMZÉSEL	85
MÁRKUS ALÍZ	85
TÁRCSAFÉKEKHEZ ILLESZTHETŐ PASSZÍV FÉKPOR-GYŰJTŐ SZERKEZET KONCEPCIÓJA	100
MARÓTI LEVENTE	100
ÖSSZETETT ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS ÉS KÖLTSÉGVIZSGÁLAT A HAZAI JÁRMŰPARK DEKARBONIZÁCIÓS LEHETŐSÉGEINEK ÉRTÉKELÉSÉRE	115
MECSÉRI BOTOND ÁKOS	115
FS VERSENYAUTÓ ELSŐ SZÁRNYÁNAK SZIMULÁCIÓJA	129
MEZŐVÁRI MÁRTON	129
EGYRÉSZES KARBON KOMPOZIT FELNI TERVEZÉSE FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓHOZ	135
NAGY BÁLINT	135
FÉKRENDSZER TERVEZÉSE ELEKTROMOS FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓHOZ	141
NAGY KRISTÓF	141
JÁRMŰVEK UTASTERÉNEK KOMFORT LÉGTECHNIKAI VIZSGÁLATA	151
NÉMETH JÓZSEF ZSOLT	151
ELEKTROMOS ENERGIA, MINT ALTERNATÍVA A LÉGIKÖZLEKEDÉSBEN	159
NÉMETH TAMÁS	159
KORMÁNYMŰ TERVEZÉSE ELEKTROMOS FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓHOZ	166
OLÁH DOMONKOS	166
FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓ GÁZPEDÁLJÁNAK TERVEZÉSE ÉS GYÁRTÁSA	182
OVAJKA GERGELY LÁSZLÓ	182
ÜTKÖZÉSI ENERGIAELNYELŐ ZÓNA SZIMULÁCIÓJÁNAK VALIDÁCIÓJA	195

PILZ OLIVÉR	195
HIRDOGÉNMEGHAJTÁSÚ HYDROFOIL HAJÓ KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE	207
SCHUBERT AMBRUS	207
SZILÁRDTEST AKKUMULÁTOROK ÉS INTEGRÁCIÓJUK ELEKTROMOS HAJTÁSLÁNCÚ JÁRMŰVEKHEZ	226
SZABÓ CSABA KEVE	226
ALTERNATÍV TŰZELŐANYAGOK NAPJAINKBAN	236
SZEGEDI GERGŐ	236
3D NYOMTATÁS ALKALMAZHATÓSÁGA JÁRMŰALKATRÉSZ UTÁNGYÁRTÁSBAN	244
THEILER BENCE	244

**RRF-2.3.1-21-2022-00002 – AUTONÓM RENDSZEREK NEMZETI
LABORATÓRIUM**

RRF-2.3.1-21-2022-00002

Konzorciumvezető: Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI)

Konzorciumi partnerek:

- Széchenyi István Egyetem (SZE)
- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)

A projekt teljes összege: 6 227 207 003 Ft

Támogatási összeg (SZE): 1 496 077 177 Ft

Támogatás mértéke: 100%

A projekt időtartama: 2022.04.01. – 2025.12.31.

Projektismertető

Az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium tevékenysége alapvetően közúti járművek, légi járművek és drónok, valamint robotok és kiber-fizikai gyártórendszerek különböző szintű autonóm funkcionalitásának és irányításának alap- és alkalmazott kutatásával foglalkozik.

Fő tématerületek a modellezés, modellredukció és modell identifikáció, az adaptív, robusztus, valamint az elosztott és hálózatba kapcsolt rendszerek irányítása. A projekt kiemelt feladata továbbá a kooperatív rendszerek kutatása, amely a földi és a légi járművek biztonságos együttműködését, valamint az emberközpontú gyártásautomatizálást, különösen az ember-robot együttműködést megvalósító alkalmazásaiban testesül meg.

Weboldal: <https://autonom.nemzetilabor.hu/hu>

A projekt megvalósítását Magyarország Kormánya az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének finanszírozásával támogatja az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium program (RRF-2.3.1-21-2022-00002) keretében.

Magaslégköri mérőléghajó

High-altitude measuring balloon

Deák Erik

Széchenyi István Egyetem
deakerik0804@gmail.com

Absztrakt: A sztratoszféra vizsgálata kiemelt jelentőséggel bír a légköri folyamatok megértése, valamint a hosszú távú környezeti monitoring szempontjából. A jelenleg alkalmazott mérési platformok – mint a meteorológiai ballonok, műholdak és pilóta nélküli légi járművek – eltérő előnyökkel és korlátokkal rendelkeznek, amelyek bizonyos mérési feladatok esetén jelentős kompromisszumokat tesznek szükségessé. Jelen tanulmány egy magas légköri mérőléghajó fejlesztését mutatja be, amely a Széchenyi István Egyetemhez kapcsolódó projekt keretében valósult meg. A fejlesztés célja egy olyan mérési platform létrehozása volt, amely képes csökkenteni a meghajtásból eredő mechanikai és elektromágneses zavaró hatásokat, miközben stabil és hosszabb ideig alkalmazható környezetet biztosít a különböző mérőműszerek számára. A cikk ismerteti a mérőléghajó koncepcióját, a tervezési szempontokat, valamint a prototípus-szintű megvalósítás és tesztelés során szerzett tapasztalatokat. A bemutatott eredmények rávilágítanak a léghajós mérési platformban rejlő lehetőségekre, és alapot teremtenek a jövőbeni, részletes összehasonlító vizsgálatokhoz más magas légköri mérési megoldásokkal szemben.

Kulcsszavak: mérőléghajó, sztratoszféra, légköri mérések, környezeti monitoring, pilóta nélküli légi járművek

Abstract: The investigation of the upper atmosphere, particularly the stratosphere, plays a key role in understanding atmospheric processes and long-term environmental changes. Existing measurement platforms such as meteorological balloons, satellites, and unmanned aerial vehicles each offer specific advantages but also impose significant limitations in terms of controllability, operational time, and measurement disturbances. This paper presents the development of a high-altitude atmospheric measurement airship carried out within a project associated with Széchenyi István University. The primary objective of the development was to create a measurement platform capable of minimizing mechanical and electromagnetic disturbances originating from propulsion systems, while providing a stable and long-duration environment for sensitive measurement instruments. The study introduces the conceptual design of the measurement airship, outlines the main engineering considerations, and summarizes the experiences gained during prototype-level implementation and testing. The results highlight the potential of airship-based measurement platforms in atmospheric research and provide a foundation for future comparative studies with other high-altitude measurement solutions.

Keywords: measurement airship, stratosphere, atmospheric measurements, environmental monitoring, unmanned aerial systems

1. Bevezetés és szakirodalmi háttér

A magas légkör vizsgálatának jelentősége

A Föld légkörének felsőbb rétegei, különösen a sztratoszféra, meghatározó szerepet töltenek be a globális környezeti és éghajlati folyamatok alakításában. A hőmérsékleti viszonyok, a légköri

összetétel, valamint a különböző fizikai és kémiai kölcsönhatások vizsgálata elengedhetetlen a klímamodellek pontosításához és a környezeti változások nyomon követéséhez.

A sztratoszférában zajló folyamatok nem elszigetelten hatnak, hanem közvetlen és közvetett módon befolyásolják az alsóbb légrétegek dinamikáját is. Ennek következtében a pontos és megbízható mérési adatok kulcsszerepet játszanak mind a tudományos kutatás, mind az alkalmazott környezeti monitoring területén. [1][2][3]

Jelenleg alkalmazott mérési megoldások és korlátaik

A magas légköri mérésekhez napjainkban többféle platformot alkalmaznak. A műholdas rendszerek nagy területek megfigyelésére alkalmasak, azonban térbeli és időbeli felbontásuk korlátozott, valamint számos paraméter közvetlen mérésére nem nyújtanak lehetőséget. A hagyományos meteorológiai ballonok egyszerűek és költséghatékonyak, ugyanakkor irányíthatóságuk csekély, és jellemzően egyszer használatos megoldást jelentenek.

Az utóbbi években egyre nagyobb szerepet kaptak a pilóta nélküli légi járművek, különösen a drónok, amelyek rugalmasan alkalmazhatók különböző mérési feladatokra. Ezek a rendszerek azonban folyamatos meghajtást igényelnek, ami mechanikai rezgéseket, akusztikus zajt és elektromágneses zavarásokat okozhat. Ezek a hatások érzékeny mérőműszerek esetében jelentős mérési bizonytalanságot eredményezhetnek. [4][5][6]

A mérőlégshajó mint alternatíva

1A fenti korlátozások szükségessé teszik olyan alternatív mérési platformok vizsgálatát, amelyek képesek ötvözni a különböző megoldások előnyeit, miközben csökkentik azok hátrányait. A mérőlégshajó koncepciója ezen igények mentén került kidolgozásra. A légshajó



1. ábra. A magaslégtörő mérőlégshajó koncepciója¹

¹ Forrás: saját szerkesztés

alapvetően felhajtóerő segítségével tartja magát a levegőben, így a meghajtás szerepe másodlagos. Ennek köszönhetően a motorok csak korrekciós célból működnek, ami jelentősen mérsékli a mérési környezet mesterséges megzavarását. Ez a tulajdonság különösen előnyös a hosszabb ideig tartó, stabil mérési feladatok esetén. [7][8]

2. A mérőléghajó koncepciója és tervezési szempontjai

A mérőléghajó mint alternatív mérési platform

A magas légköri mérőléghajó olyan alternatívát kínál, amely egyesíti a ballonok egyszerűségét és a drónok irányíthatóságát, miközben csökkenti azok hátrányait. A léghajó alapvetően felhajtóerő segítségével tartja magát a levegőben, így a repüléshez nem szükséges folyamatos motorüzem. Ez a tulajdonság különösen előnyös mérési szempontból, mivel a motorok kikapcsolt vagy minimális üzemállapotában a zavaró hatások jelentősen csökkenthetők.

A koncepció egyik legfontosabb célja, hogy a mérőléghajó stabil platformot biztosítson különböző mérőműszerek számára, függetlenül attól, hogy a konkrét mérési feladat milyen paraméterek vizsgálatát igényli. Ennek köszönhetően a rendszer rugalmasan alkalmazható eltérő kutatási célokra.

Stabilitás, lebegés és energiaellátás

A mérőléghajó tervezése során kiemelt figyelmet kapott a stabilitás biztosítása. A megfelelő geometriai kialakítás és tömegeloszlás lehetővé teszi, hogy a platform viszonylag állandó pozícióban maradjon, ami elengedhetetlen az adott magasságon végzett mérésekhez.

A lebegési tulajdonságok optimalizálása hozzájárul ahhoz, hogy a léghajó hosszabb ideig képes legyen működni anélkül, hogy folyamatos aktív beavatkozásra lenne szükség. [9][10]

Mérőműszerek elhelyezése és zavaró hatások csökkentése

Mivel a projekt egyik fő célja a meghajtásból eredő zavarások minimalizálása volt, az energiafelhasználás optimalizálása kiemelt szerepet kapott. A rendszer kialakítása lehetővé teszi, hogy a meghajtás csak indokolt esetben aktiválódjon, míg a mérési időszakok során a léghajó döntően passzív állapotban működik.

Ez a megközelítés jelentősen csökkenti az elektromágneses és mechanikai zavarás mértékét, ami közvetlenül hozzájárul a mérési pontosság javításához.

Mérőműszerek integrálása

A mérőléghajó kialakítása lehetőséget biztosít különböző mérőműszerek integrálására. A szenzorok elhelyezése során fontos szempont volt, hogy azok a lehető legtávolabb kerüljenek az esetleges zavarforrásoktól. Ez a kialakítás különösen előnyös érzékeny mérési feladatok esetén, ahol már kis mértékű zavarás is torzíthatja az eredményeket.

Tervezési kompromisszumok és mérnöki megfontolások

A magas légköri mérőléghajó tervezése során számos, egymással összefüggő mérnöki kompromisszumot kellett figyelembe venni. A fejlesztés kezdetben kutatási célként indult, azonban a koncepció kidolgozása során egyre inkább egy komplex, önálló projekt irányába mozdult el, amelyben a gyakorlati megvalósíthatóság kiemelt szerepet kapott.

Az egyik legmeghatározóbb tervezési szempont a tömeg és a felhajtóerő közötti egyensúly volt. A szerkezet tömegének növekedése közvetlenül csökkenti a felvihető mérőműszerek tömegét és számát, ezáltal korlátozva a rendszer mérési kapacitását. Ennek következtében a szerkezeti

elemek kialakításánál és az anyagválasztás során elsődleges cél volt a lehető legkisebb tömeg elérése, a szükséges mechanikai szilárdság megtartása mellett.

A légköri nyomásváltozából adódó térfogatváltozás szintén jelentős kihívást jelentett. A magasság növekedésével fellépő nyomáskülönbség nemcsak a ballontra, hanem a kapcsolódó szerkezeti elemekre is hatással van. A túlzottan merev kialakítás a szerkezet károsodásához vezethet, míg a túl rugalmas szerkezet instabil működést eredményezhet. Ennek megfelelően a tervezés során olyan megoldások kerültek előtérbe, amelyek lehetővé teszik a szerkezet kontrollált alakváltozását, miközben biztosítják a rendszer integritását.

További fontos szempontot jelentettek a hőmérséklet-különbségek. A magasabb légköri rétegekben fellépő alacsony hőmérséklet, valamint a földfelszín közelében tapasztalható magasabb értékek jelentős anyagfeszültségeket okozhatnak. Ez az anyagválasztás során külön figyelmet igényelt, mivel a hőtágulás és az anyagtulajdonságok változása közvetlen hatással van a szerkezet hosszú távú megbízhatóságára.

Az irányíthatóság kérdése szintén fontos mérnöki döntéseket igényelt. A projekt során alkalmazott megközelítés szerint a mérőlégshajó alapvetően egy előre meghatározott, nagy sugarú területen belül mozog, amelyet globális helymeghatározáson alapuló rendszer felügyel. A meghajtás szerepe ebben az esetben másodlagos, és kizárólag akkor aktiválódik, amikor a légshajó elhagyná ezt a kijelölt tartományt. Ez a megoldás lehetővé teszi az energiafelhasználás csökkentését, miközben biztosítja az alapvető pozíciótartást.

3. Megvalósítás, tesztelések és tapasztalatok

A fejlesztés és megvalósítás folyamata

A mérőlégshajó fejlesztése koncepcionális tervezéssel indult, amelyet prototípus-szintű megvalósítás követett. A fejlesztési folyamat során a cél az volt, hogy a tervezési elvek gyakorlati környezetben is értékelhetők legyenek. A tesztelések elsősorban a rendszer stabilitására, működőképességére és kezelhetőségére fókuszáltak

Felmerülő műszaki kihívások

A gyakorlati megvalósítás során több kihívás is jelentkezett. Különösen jelentős problémát okozott a légköri nyomásváltozás hatására fellépő szerkezeti igénybevétel. A ballon térfogatváltozása jelentős terhelést adott le a szerkezeti elemekre, amely többszöri módosítást és finomítást tett szükségessé. A tapasztalatok rávilágítottak arra, hogy a magas légköri mérések esetében a szerkezeti kialakítás és az anyagválasztás kulcsszerepet játszik a rendszer megbízhatóságában.

Üzemeltetési és szervezési tapasztalatok

A fejlesztés során nemcsak műszaki, hanem szervezési kihívásokkal is szembe kellett nézni. A légtérhasználattal kapcsolatos engedélyezési folyamatok időigényesek és összetettek, ami a projekt előrehaladását több alkalommal is befolyásolta. Ezek a tapasztalatok egyértelművé tették, hogy egy ilyen jellegű kutatás sikeréhez a technikai megoldások mellett megfelelő jogi és szervezési háttér is szükséges

Alkalmazási lehetőségek és előnyök más mérési platformokkal szemben

A mérőlégshajós platform egyik legnagyobb előnye a hagyományos pilóta nélküli légi járművekkel szemben a minimális meghajtási igény. A drónalapú megoldások esetében a folyamatos motorüzem elengedhetetlen a levegőben maradáshoz, ami nemcsak jelentős energiafelhasználással jár, hanem mechanikai rezgéseket és elektromágneses zavarásokat is

okoz. Ezek a hatások különösen kedvezőtlenek lehetnek érzékeny mérőműszerek alkalmazása esetén. Ezzel szemben a mérőlégújó alapvetően felhajtóerő segítségével marad a levegőben, így a meghajtás csak korlátozott szerepet tölt be. Ez a tulajdonság lehetővé teszi, hogy a rendszer hosszabb ideig, viszonylag zavartalan mérési környezetet biztosítson. A stabil lebegés különösen előnyös olyan alkalmazásoknál, ahol adott terület vagy légköri réteg hosszabb idejű megfigyelése szükséges.

A mérőlégújó alkalmazási lehetőségei nem korlátozódnak kizárólag klasszikus légköri mérésekre. A koncepció alkalmas lehet például nagyobb területek környezeti feltérképezésére, lassan változó jelenségek megfigyelésére, vagy olyan mérési feladatokra, ahol a pozíció hosszabb ideig történő megtartása kiemelten fontos. Ezek az alkalmazások drónalapú rendszerekkel csak jelentős energia- és erőforrás-ráfordítás mellett lennének megvalósíthatók.

Korlátok és továbbfejlesztési irányok

Bár a mérőlégújó koncepció számos előnnyel rendelkezik, fontos kiemelni a rendszer korlátait is. A projekt jelenlegi szakaszában a fejlesztés elsősorban a koncepció és a prototípus megvalósíthatóságára fókuszált, ezért részletes mérési kampány nem valósult meg. Ennek következtében a mérési teljesítményre vonatkozó következtetések elsősorban elméleti és tapasztalati alapon fogalmazhatók meg.

A rendszer működését jelentősen befolyásolják a külső környezeti tényezők, különösen az időjárási viszonyok. Az erős légmozgások és a hőmérsékleti szélsőségek korlátozhatják az alkalmazhatóságot, ami a jövőbeni fejlesztések során további vizsgálatokat igényel.

A jövőbeni továbbfejlesztési irányok között szerepelhet a szerkezeti kialakítás finomítása, az anyaghasználat optimalizálása, valamint a mérőlégújó alkalmazási területének bővítése. Ezek a fejlesztések lehetőséget teremthetnek arra, hogy a koncepció a későbbiekben komplexebb mérési feladatok ellátására is alkalmassá váljon.

4. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki mindazoknak, akik szakmai tanácsaikkal és támogatásukkal hozzájárultak a mérőlégújó fejlesztéséhez és a kapcsolódó kísérletek megvalósításához. A kapott javaslatok és visszajelzések jelentős segítséget nyújtottak a tervezés során felmerülő kihívások kezelésében. A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Holton, J. R.: An Introduction to Dynamic Meteorology, Academic Press, vol. 88, no. 3, 2004, pp. 1–535.
- [2] Andrews, D. G., Holton, J. R., Leovy, C. B.: Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press, vol. 40, no. 2, 1987, pp. 1–489.
- [3] Wallace, J. M., Hobbs, P. V.: Atmospheric Science: An Introductory Survey, Academic Press, vol. 92, no. 4, 2006, pp. 1–504.
- [4] WMO: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization, vol. 8, no. 1, 2018, pp. 1–1177.

- [5] Smith, M. S., Baumgardner, D.: Observations of the upper troposphere and lower stratosphere using balloon-borne platforms, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 31, no. 6, 2014, pp. 1287–1302.
- [6] Houston, S., Keckhut, P.: Satellite and in-situ measurements of the stratosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, no. 4, 2012, pp. 1957–1972.
- [7] Colozza, A., Dolce, J.: High-altitude, long-endurance airships for scientific applications, *NASA Technical Reports Server*, vol. 1, no. 1, 2005, pp. 1–42.
- [8] Khoury, G. A., Gillett, J. D.: *Airship Technology*, Cambridge University Press, vol. 1, no. 1, 1999, pp. 1–350
- [9] Trincone, G., Cipollini, F.: Design considerations for stratospheric airship platforms, *Aerospace Science and Technology*, vol. 58, no. 2, 2016, pp. 538–547.
- [10] Mueller, J., Paluszek, M.: Development of persistent high-altitude platforms, *Journal of Aircraft*, vol. 47, no. 3, 2010, pp. 1–12.

Tesztpad tervezése, a vízcsepp erózió vizsgálatának céljából

Development of a test bench for water droplet erosion tests

Dobos Balázs

Széchenyi István Egyetem, Járműhajtás Technológia Tanszék - Győr
dobosbalazs2004@gmail.com

Absztrakt: Manapság már a modern belsőégésű motorral ellátott járművek nagytöbbsége rendelkezik turbófeltöltővel és emellett egyéb további fogyasztást és károsanyag-kibocsátást csökkentő kiegészítő rendszerekkel, mint például az alacsony nyomású kipufogógáz visszavezetés (LP-EGR). Azonban ezek a komplikált rendszerek az emisszióra vonatkozó előnyeiken túl hosszú távú felhasználás során sok, akár előre nem várt hátránnyal is járnak. Ebben az esetben egy ilyen káros hatás az LP-EGR rendszerben történő kondenzációképződés, amely során a létrejövő vízcseppek a szívócsatornában tovább haladva aztán a rendkívül magas fordulatszámmal forgó kompresszorkereket fogják megütni, azon idővel így egy eróziós kopást előidézve. Ez a jelenség az ipar számos másik területén is problémát jelent, ahol csak előfordulhat különböző nagy sebességű -, jellemzően forgó mozgást végző alkatrészek és a vízcseppek ütközése. Ebből következően a témában releváns szakirodalom feldolgozása után a kitűzött cél egy olyan tesztpad létrehozása volt, amellyel egyszerűen és költséghatékonyan lehet különböző anyagminőségű vagy bevonatolású próbatesteket vizsgálni egymással összevethető módon, így hozzájárulva akár a kifejtett kompresszorkerekek -, akár más mérnöki területek csepperóziós kopási problémáinak megoldásához. A tervezési folyamat magába foglalta a tesztpad szükséges alkatrészeinek 3D-s CAD szoftverben való megtervezését, műszaki rajzok elkészítését, a modell veszélyes pontjainak végelesemes szimulációval történő szilárdságtani vizsgálatát, a turbófeltöltő tesztpadi célra történő átalakítását, a kiegészítő víz- és elektromos rendszerek felépítését és az első tesztek elvégzését, ezzel igazolva a rendszer és a módszer működőképességét, végül pedig az első eredmények kiértékelését mikroszkópos mérés segítségével. Elmondható, hogy a kutatási projekt során egy olyan egyedülálló turbófeltöltő alapú tesztpad épült fel, ami költséghatékony módon teszi lehetővé vízcsepp erózióknak kitett minták szabványos vizsgálatát különböző precízen szabályozható paraméterek mentén. A későbbiekben a téma továbbvitelével és fejlesztésével cél az esetleges egyéb ipari lehetőségeknek és a tesztpad, illetve az ahhoz definiált vizsgálati eljárás más tudományterületeken való alkalmazhatóságának a megvizsgálása is.

Kulcsszavak: erózió, tesztpad, turbófeltöltő

Abstract: Nowadays, the vast majority of vehicles equipped with modern internal combustion engines feature turbochargers, along with additional systems designed to reduce fuel consumption and emissions, such as low-pressure exhaust gas recirculation (LP-EGR). However, despite their emission-related benefits, these complex systems may also lead to several, sometimes unexpected, drawbacks during long-term operation. One such adverse effect is condensation forming within the LP-EGR system. The resulting water droplets travel through the intake duct and eventually strike the compressor wheel, which rotates at extremely high speeds, thereby causing erosive wear over time. This phenomenon poses challenges in many other industrial fields as well, wherever high-speed—typically rotating—components may come into contact with water droplets. Consequently, after reviewing the relevant literature on the subject, the goal was to create a test bench that would allow for the simple and cost-effective testing for test specimens of different material qualities or coatings in a comparable way, thus contributing to the solution of droplet erosion wear problems in both compressor wheels and other engineering fields. The design process included designing the necessary components of the test bench in 3D CAD software, preparing technical drawings, conducting a strength analysis of the model's critical points using finite element method, converting the turbocharger for test bench purposes, constructing

the auxiliary water and electrical systems, and performing the first tests to verify the functionality of the system and the method, and finally evaluating the first results using microscopic measurements.

It can be concluded that the research project resulted in the development of a unique turbocharger-based test bench that enables cost-effective, standardized testing of samples exposed to water-droplet erosion under precisely controlled parameters. In the future, continued development of the system will focus on exploring additional industrial applications as well as assessing the applicability of the test bench and the associated testing procedure across other scientific fields.

Keywords: erosion, test bench, turbocharger

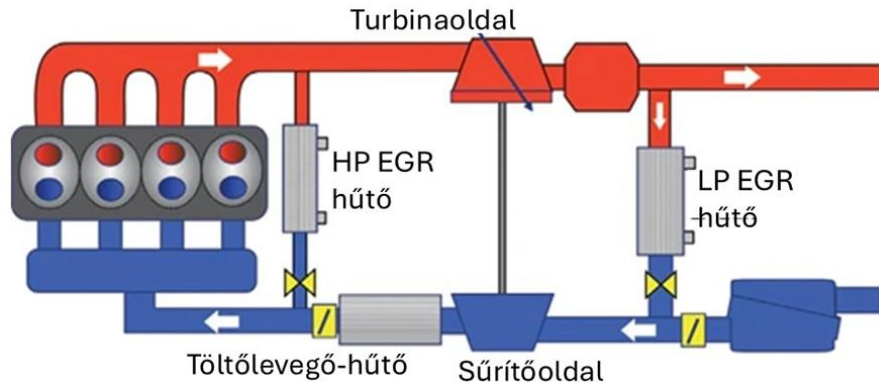
1. Bevezetés

A modern autóipar haladási irányát tekintve a jelenlegi logikus álláspont, hogy mivel a menet közbeni zéró emissziójú technológiákra való nagy mértékű átállás még nem kivitelezhető a közeljövőben, így a belsőégésű motorral ellátott járművek gyártására csakúgy szükség van és részesei kell hogy legyenek a fenntartható közlekedésnek az elektromos járművek mellett. Viszont egy ténylegesen környezetbarát közlekedés megvalósulásához fontos, hogy a megfelelő technológiákkal csökkentjük a jármű élettartama során az emissziót. Ha csak az Európai Unió belül is nézzük, ezt jól jelképezik az egyre szigorodó környezetvédelmi normák, amihez igazodva az ezeknek való megfelelés is vált modern járműgyártás legnagyobb mérnöki kihívásává. [1] Napjainkban már az autók jelentős részében megtalálható a pont ilyen célokból beépítésre kerülő alacsony nyomású kipufogógáz-visszavezetéssel kombiált turbófeltöltő, aminek viszont főleg a NO_x kibocsátást csökkentő előnyös hatásán túl egy nagy hátránya a turbófeltöltő szívócsövében keltett kondenzátumképző hatása, ami a későbbiekben akár jelentős mértékben képes károsítani annak sűrítőkerekét. [2, 3] Ezt a kedvezőtlen eróziós hatást mesterséges körülmények között az ASTM G0073-10 szerinti szabványosított folyamattal lehet vizsgálni. [4] Mindezekből következően a cél egy olyan szabványos tesztpad létrehozása, amely különböző próbatestek egyszerű és összevethető vizsgálatát teszi lehetővé, ezáltal alkalmas a sűrítőkerekéknél is alkalmazott anyagminőségek és bevonatok erózióval szembeni ellenállásának kikísérletezésére. A létrehozott tesztpad kapcsán jelentős potenciált jelenthet a kutatott terület újdonsága, illetve a számtalan további ipari területek – így szélturbinák lapátjai, repülőgépek szárnyai, helikopterek rotorjai, üzemanyagcellás turbófeltöltők turbinalapátjai, gőzturbinák és egyéb olyan területek, ahol problémát jelenthet a vízceppütések miatti kopás kialakulása - fejlesztései során való alkalmazhatósága és hasznosulása. [5-12]

2. Irodalomkutatás

Először is bármilyen probléma vizsgálatához kulcs fontosságú annak megértése, így most én is a kompresszorkerek csepperóziós kopásán keresztül az erózió általános mivoltának bemutatásán át térnék majd át a saját tesztpad felépítésének előkészületeire.

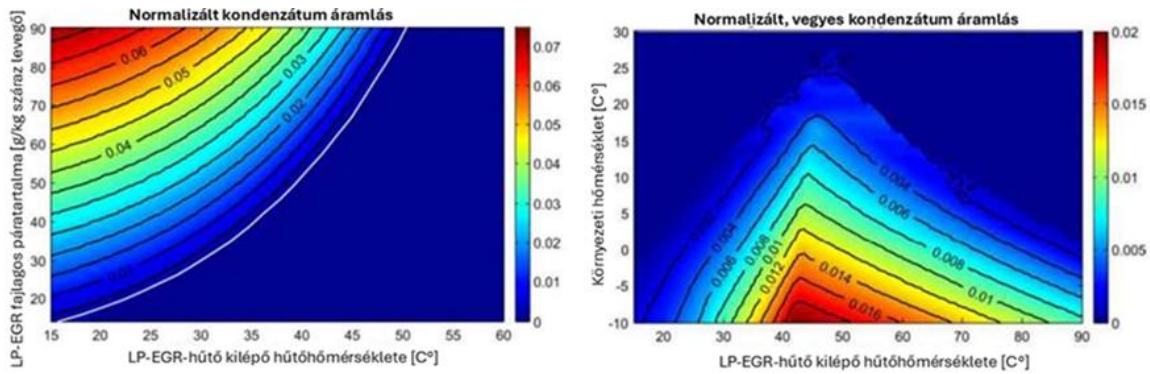
Az LP-EGR rendszerben keletkező kondenzáció vizsgálatához először magának a rendszernek a működését kell megérteni és átlátni. A kipufogógáz visszavezetés fő célja a NO_x emisszió csökkentése a munkatérben lezajló égési folyamatok csúcshőjének csökkentése által. Beszélhetünk néhány esetben magas nyomású körről is, ahol az égés során létrejött gázok egy része közvetlenül visszaterelésre került a szívócsőnkba, de számos előnye miatt jóval elterjedtebb megoldás az alacsony nyomású EGR, ami a turbófeltöltő turbinájának meghajtása és a részecskeszűrőn való áthaladást követően forgatja csak át a kipufogógázokat egy hűtőn való átáramoltatás után a turbó másik oldali, kompresszorkereke elé, ahol az az 1. ábrán látható. [13, 14]



2. ábra: Kettős EGR, ahol a magas és alacsony nyomású kör egyszerre figyelhető meg²

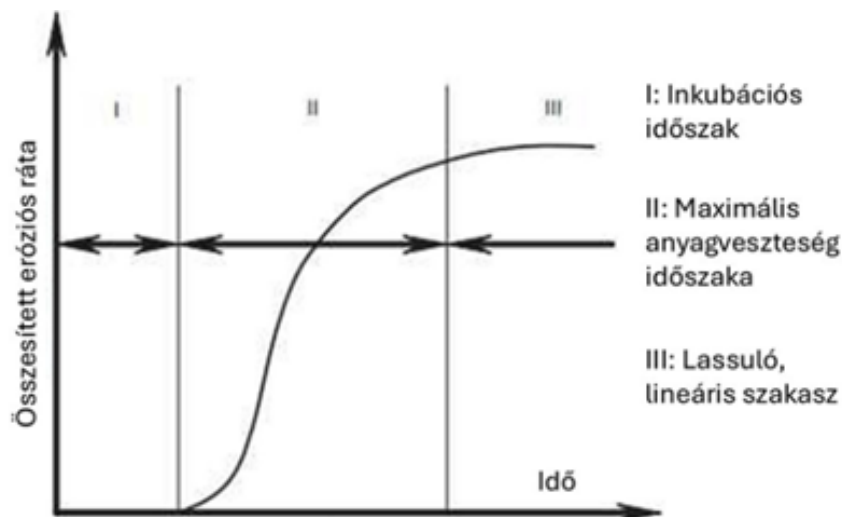
Az ismertetett visszavezetési körben a nagyobb hőmérsékletkülönbségű hűtésnél, illetve – közegek találkozásánál találhatjuk a kondenzációképződés veszélyes pontjait. Egy ezzel foglalkozó kutatás alapján a két kiemelendő pont egyrészt a beszívott környezeti levegő és az EGR felől érkező kipufogógáz keveredésének szakasza, ahol egy enyhébb, ködszerű vízpára keletkezik. Ennek eróziós hatása a kompresszorkeréken alapesetben csekély, viszont a külső, beszívott hőmérséklet csökkenésével egyre erősödik a kondenzációs jelenség, míg nagyon alacsony külső hőmérsékleten már kritikus lehet a páralecsapódás. A másik potenciális helyünk pedig az EGR hűtője, főleg hidegindítást követően, amíg még nem melegszik fel kellőképp a hűtőfolyadék. Ahogy a 2. ábra bal oldali diagramján látszik, a kondenzáció mértéke a hűtési hőmérséklet csökkenésével és a kipufogógázok páratartalmának növelésével drasztikusan nő, valamint megállapításra került továbbá, hogy a nyomás és a környezeti relatív páratartalom növekedésével kis mértékben nő. A hűtési határhőmérséklet pedig 50°C körül alakul, ami felett egyáltalán nem jelenik meg kondenzvíz, ahogy ez a 2., - a kondenzátumot az EGR hűtőben lévő kipufogógázok fajlagos páratartalmának és a lehűtési hőmérsékletnek az arányában megjelenítő - ábra bal oldali grafikonjáról is leolvasható. A környezeti beszívott levegő és az LP-EGR által visszavezetett levegő találkozásával is ugyanúgy foglalkozik a tanulmány; 20%-os EGR arányt és a hőmérséklettől függően 56,2 - 82,3 g/kg száraz levegő fajlagos páratartalmat feltételezve. Ehhez viszont már az ábra jobb oldalára kell áthelyezni a figyelmet, ahol a lehűtött kipufogógázok és az ezzel keveredő külső levegő hőmérséklete a két kiemelt változó. Innen az olvasható le, hogy 25°C környezeti hőmérséklet felett egyáltalán nem valósul meg kondenzáció. Az itt történő kondenzáció folyamán találkozunk a gázok hőmérsékletkülönbségén túl, még fontos tényező a két közeg páratartalma, illetve az EGR arány is, amiknek a növelésével a kondenzáció mértéke is nő. [2]

² Hanig, U. Intake throttle and pre-swirl device for low-pressure EGR systems. BorgWarner Knowledge Library. 2016., 2025. 11. 15., URL: <https://www.borgwarner.com/>



3. ábra: Kondenzációs térképek³

A kondenzációról áttérnék az általa kiváltott probléma, az erózió általános működésének, lefolyásának bemutatására. Először is ismertetném az erózió időbeliségének szempontjából fontos 3. ábrát, ami jól mutatja, hogy az anyagleválasztódás nem lesz egy időben lineáris függvénnyel jellemezhető tényező, igazán függvényt sem lehet megadni rá, viszont három jól elkülöníthető szakaszra osztható. [15]

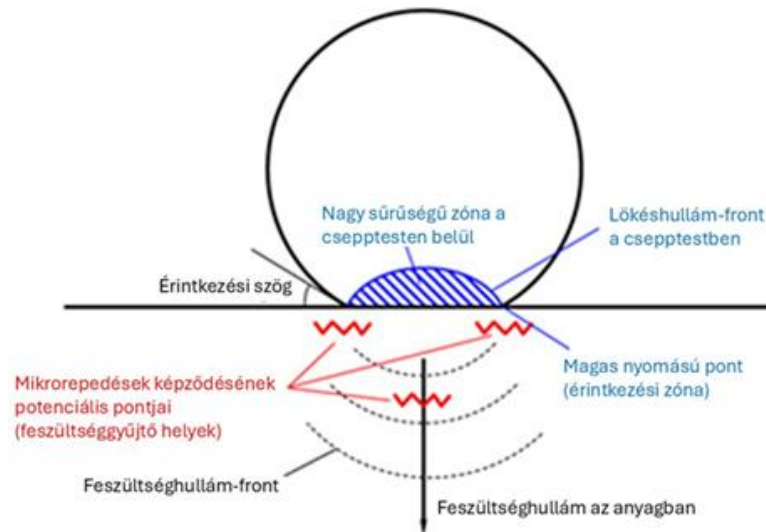


4. ábra: Az erózió 3 fázisa⁴

Ahogy a 3. ábrán látható, kezdetben a becsapódó vízcseppek még okoznak anyagleválást, inkább csak benyomódásokat hoznak létre a felületen és egy érdesítő hatásuk lesz így ebben a kezdeti, inkubációs időszakban. Itt a következő, 4. ábrán látható eróziós mechanizmus fog érvényesülni, amiben a vízcseppek nagy sebességű becsapódásának hatására feszültség hullámok terjednek az anyagban, amik pedig mikrorepedéseket hoznak létre a felület közelében. Ezek a mikrorepedések pedig "fárasztani", gyengíteni fogják az anyagot.

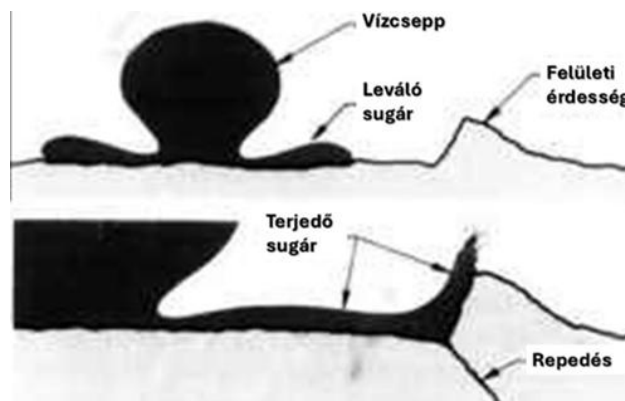
³ Serrano, J. R., Piqueras, P., Angiolini, E., Meano, C., De La Morena, J.: On cooler and mixing condensation phenomena in the long-route waste gas recirculation line, SAE Technical Paper, 2015., DOI: 10.4271/2015-24-2521.

⁴ Li, N., Zhou, Q., Chen, X., Xu, T., Hui, S., Zhang, D.: Liquid drop impact on solid surface with application to water drop erosion on turbine blades, Part II: International Journal of Mechanical Sciences 50, 2008., 1543–1558, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.08.002.



5. ábra: Vízcsepp becsapódás által gerjesztett stresszhullámok⁵

A megnövekedett felületi érdességű anyagon meginduló gyors anyagvesztést pedig már az 5. ábra magyarázza el, ahol felület süllyedésébe érkező következő cseppek oldalirányú kiáramlásainak hatására fognak már olyan mértékű repedések kialakulni, amelyek már nagyobb anyagrészek kiszakadásához vezetnek. [16]



6. ábra: A csepptestről leváló oldaláramlások hatásai⁶

Persze meg kell vizsgálni azokat a tényezőket is, amelyek az eróziót befolyásolják, vagy jelentős hatással vannak a lefolyására. Ezeket részletesen nem kifejtve, de fontossági sorrendben felsorolva a következőkről beszélhetünk [17-19]:

- Ütközési sebesség,
- becsapódási szög,
- vízcsepp mérete, átmérője,
- becsapódó vízcseppek száma,
- az anyag keménysége és felületi érdessége,

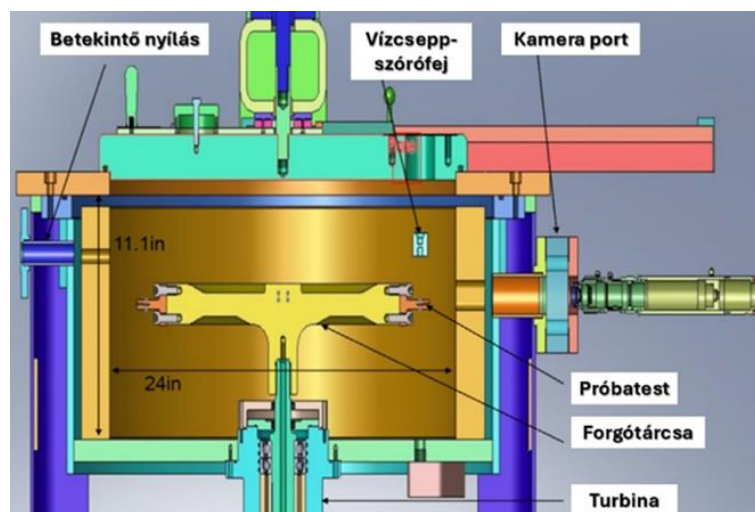
⁵ Lee, B.-E. et al.: Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid-solid impact model, International Journal of Impact Engineering 36, 2009., 1156–1171, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.02.007.

⁶ Kirols, H. S.: Water Droplet Erosion: Influencing Parameters, Representation and Comparisons, PhD thesis, Concordia University, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Montreal, 2015.

- egyéb anyagtulajdonságok, mint a hajlékonyság, folyási- és kifáradási határ, szívósság.

3. Kiindulási pont a tesztpad megtervezéséhez.

A két fontos kiindulási pontot egyrésről ezeknek a mesterséges vízcseppbecsapódásoknak a vizsgálatára vonatkozó ASTM G73-10-es szabvány adta, aminek áttanulmányozása a szabványba foglalt egyes tesztelési paraméterek rögzítése miatt volt fontos. Másrésről a korábbi, hasonló nemzetközi munkák feltérképezése jelentett egy fontos alapot, amik alapján a legígéretesebbnek tűnő a kanadai Concordia egyetem vákuumkamrás tesztpadja tűnt, amit a 6. ábra mutat. Főleg az alkalmazott turbinahajtásos megoldás miatt bizonyult egy erős megoldásnak az eszköz ilyen típusú tesztekhez, hiszen például villanymotoros megoldásokkal szemben itt egyszerre állt rendelkezésre a kellő nyomaték és fordulatszám a próbatestek vízcseppekkel történő ütközésének biztosítására [4, 9]



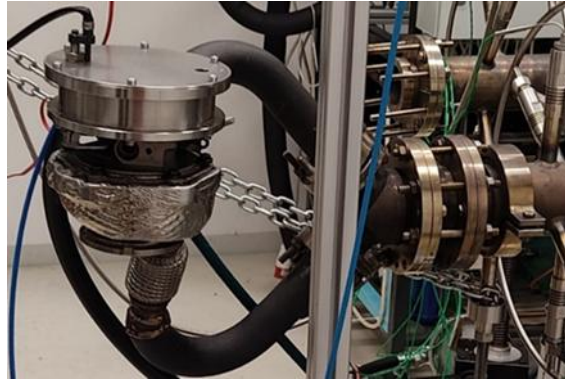
7. ábra: Eróziós tesztgép sematikus ábrája⁷

4. Saját tesztpad felépítése

A lehetőségek felmérése után a saját turbinameghajtású tárcsa létrehozásához a legegyszerűbb utat az Egyetem Járműhajtás Technológiai Tanszékéhez tartozó turbófeltöltő tesztpad és az ott fellelhető korábbi projektekből származó használt turbók biztosították. Az előzetesen meghatározott igényeinknek pedig, miszerint legyen a tesztpad a szabványnak megfelelő, lehetőleg költséghatékony, kicsi, mobilis és könnyen üzemeltethető ezzel az ötlettel még lehetséges is megfelelni, így e vonalon folytatódott az ötletelés és került átalakításra az eróziós tesztpad célú turbófeltöltő és – felépítésre az azt kiszolgáló környezet. Röviden kifejtve, miután a felesleges dolgok, beleértve minden kompresszoroldali alkatrészt leszerelésre került a turbóról, első körben le kellett tömíteni azt például az általunk nem használt gyári szenzorozási furatoknál, vagy épp az EGR turbinaoldali becsatlakozásának helyén a rendszer kifűtésének elkerülése érdekében. Aztán miután a kompresszorkerék is lekerült, az üresen maradt tengelyre zrugorkötéssel illeszkedett egy esztergált közlőtengely, amire pedig a költséghatékonyág kedvéért egy vízvágatással gyártott alumínium próbatárcsa kapcsolódott alakzáró módon. Ezt végül a kompresszorkerékhez tartozó anya biztosította axiálisan. Ezután a kompresszorház helyére felkerült egy vízelvezető furattal ellátott vastagabb acél védőburkolat, amire végül a

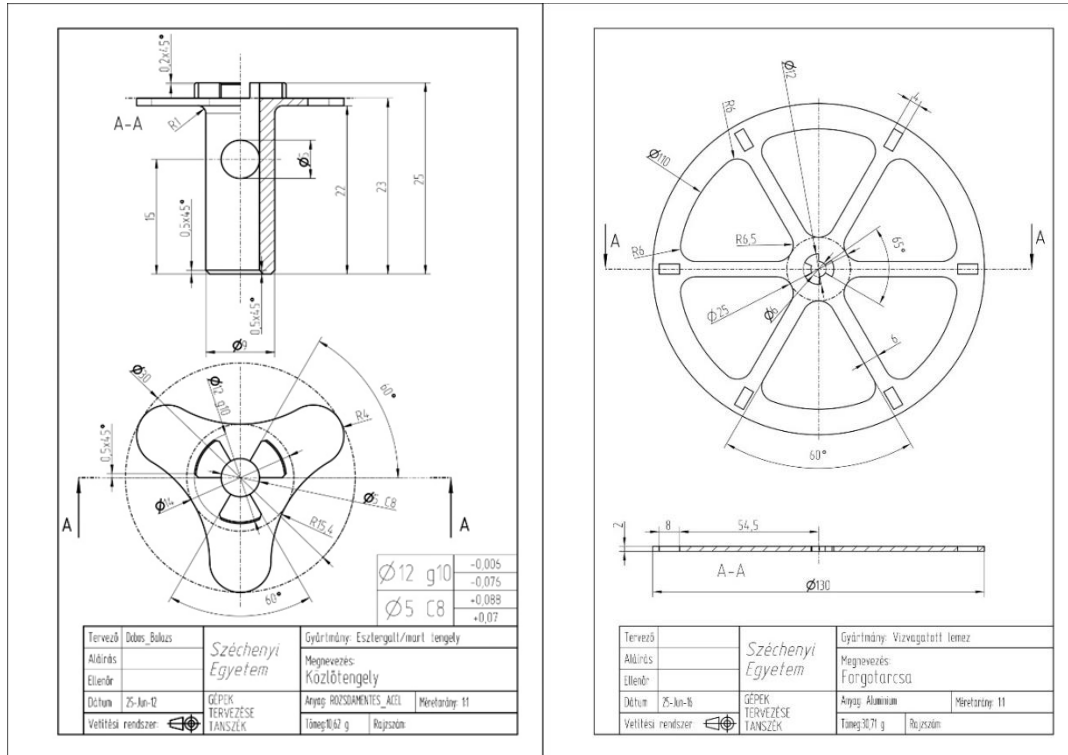
⁷ A.K. Gujba, L. Hackel, D. Kevorkov, M. Medraj: Water droplet erosion behaviour of Ti-6Al-4V and mechanisms of material damage at the early and advanced stages, Wear 358–359, 2016., 109–122, DOI: 10.1016/j.wear.2016.04.008.

szintén biztonsági- és víz széthordását megelőző szempontokból fontos zárólemez lett felcsavarozva, ahogy az a 7. ábrán is látható. Ezen a lemezen egy furat szolgált a víz befecskendezési helyeképp, egy másik pedig egy menetes-csavaros megoldással a fordulatszám szenzor csatlakozási helye lett, úgy, hogy pontosan be lehessen állítani majd a belógó szenzor távolságát a tárcsától.



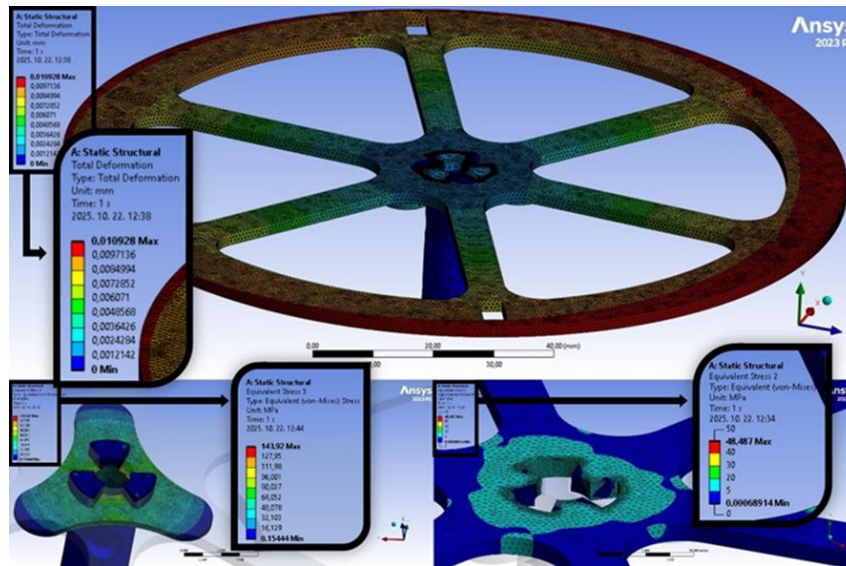
8. ábra: Az átalakított kompresszoroldalú turbó külső lát képe

Ennek a főegységnek a két legfontosabb eleme persze nem a külső takaró lemezek voltak, hanem annál inkább a korábban már említett forgó közlőtengelyünk és alumínium próbatárcsánk, aminek műszaki rajzai a 8. ábrán láthatóak. A fő tervezési szempontok a közlő tengely esetében első sorban a pontos illesztést biztosító tőrés, ami úgy lett számítással meghatározva, hogy biztosan, elforgás nélkül átvigye a kellő nyomatékot, úgy, hogy mindemellett az még számunkra is néhány 100 °C-os hőmérsékletkülönbséggel illeszthető maradjon. Másrésztől nagy jelentőségű a tengely kissé kinyúló váll része, amire billegésmentesen képes felülni a tárcsa. Mindkét alkatrész rajzán jól látható azt a körmös rendszerű radiálisan alakzáró központi kialakítást, ami hosszú járatási fázisok után is biztosította számunkra a tárcsa könnyed le- és felszerelhetőségét. A tárcsa kapcsán főleg a nagy könnyítő kivágások szűrnak először szemet, de az alacsony tömeg mellett az így létrejött karos tartó alap egyébként a sebességet érzékelő szenzorunk működésének szempontjából is hasznos lesz majd. Ahogy az a 8. ábrán látható, a tárcsa szélén, ahol az eróziós csíkok várhatóan ki fog alakulni, szintén megfigyelhetően kisebb kivágások. Ezek a későbbi mikroszkópos mérések referenciahelyeiként szolgálnak az eredmények kiértékelése során, valamint várhatóan az erózió kiinduló pontjai lesznek.



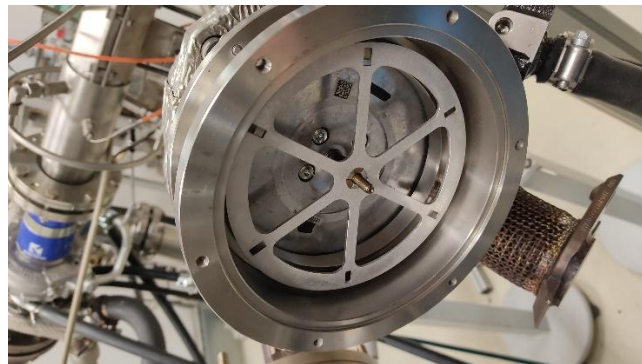
9. ábra: A közlötengely (balra) és a forgótárcsa (jobbra) Creo CAD szoftverben készült műszaki rajzai

A tesztek előtt a két kapcsolódó alkatrészből még Ansys végelemes szimuláció is készült, ahol az erre vonatkozó szabvány felső határértékét, (a tárcsa cseppek ütötte területén) 600 m/s-ot, vagyis 100 000-es fordulatszámot állítottam be, illetve a tárcsát a tengelytől eltávolodni nem engedő kényszereket. A kontakt felületek mentén továbbá egy elfinomított hálózást is kaptam a két test, ami alapján pontosabb feszültségértékek várhatóak. A szimulációs eredményeket a 9. ábra mutatja. A felső kép az összeállítás forgás közbeni deformációját mutatja, míg az alsó kettőről a különálló alkatrészek kontaktfelületeinél keletkező feszültségértékek olvashatóak le. Ez alapján látható, hogy bár az élknél jelentősen megnövekednek a feszültségértékek, de azok nagyrészt mégiscsak egyenletesen oszlanak el a két alkatrész központi részén és ezek mindkét esetben bőven egy biztonsági határon belül mozognak, jóval az egyes alkatrészek alapanyagának folyáshatára alatt. Illetve a deformáció értéke szintén nem aggasztó, csupán néhány századmilliméteres értéket jelent.



10. ábra: Ansys környezetben elvégzett numerikus szimuláció eredményei

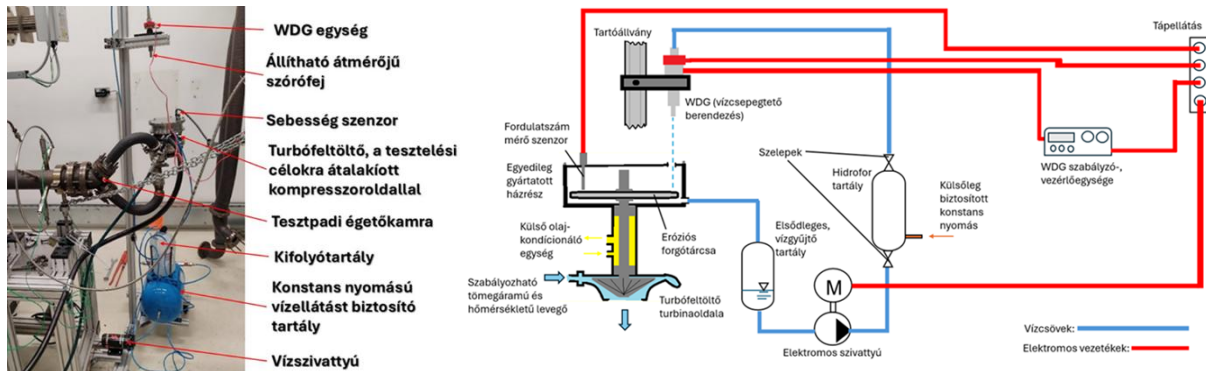
Így hát miután a rendszer stabilitása szilárdságtani szimuláció útján is igazolásra került, következhetett a készre szerelés és az éles tesztek. A tesztpadi égetőkamrára felszerelt főegységet mutatja a 10. ábra.



11. ábra: Átalakított kompresszoroldali turbófeltöltő

A becsapódási sebességünket ugyan a próbatest nagy sebességű forgatásával fogjuk elérni, amit a főegységünk összeállításával már biztosítottunk ugyan, de ennek ellenére gondosan meg kell tervezni a másik ütközési komponensünk, a vízcseppek testtérbe juttatását is. Ehhez egy kiegészítő víz és elektromos kört kellett felépítenünk a tesztpadra. Szerencsére a tanszéken egy korábbi projektből rendelkezésre állt egy piezoelektromos kristályokkal, a Rayleigh–Plateau instabilitási elv alapján vízcseppek létrehozására alkalmas 'Water Droplet Generator' (WDG) eszköz, aminél cserélhető, apró furatú fűvőkákkal állítható be a cseppek átmérője, valamint ehhez mi számolás alapján megadtuk a kellő frekvenciát is az egyenletes cseppszétváláshoz. Ennek az eszköznek viszont egyenletes víznyomásra volt szüksége, ami nem megoldható csak szimplán egy szivattyúval, ami a tesztteréből kiszívott vizet visszatáplálja a cseppgenerátorunk számára, hiszen így egy lüktető nyomás jönne létre. Ebből a célból került a vízkörbe beépítésre egy – szerencsére szintén a tanszéken fellelhető - hidrofor tartály. Ez lényegében egy gumimembránnal megosztott tárolóként funkcionál, aminek egyik oldalán egy sűrített levegő bevezetésre rászertelt nyomásszabályozó szeleppel állandó 3 bar-os nyomásértéket tartottunk, a másik oldalon pedig egy szelep nyitásával ioncserélt vizet juttattunk a WDG-be, a kívánt egyenletes nyomással. A vízkör egybe csoportosításának céljából pedig felépítésre került a 11. ábrán látható ITEM profilokból álló állvány is, ami jól összefogta az egyes egységeket. Ennek a külön szeparálásnak a WDG víz belövési távolságának egyszerű állíthatóságán túl nagy

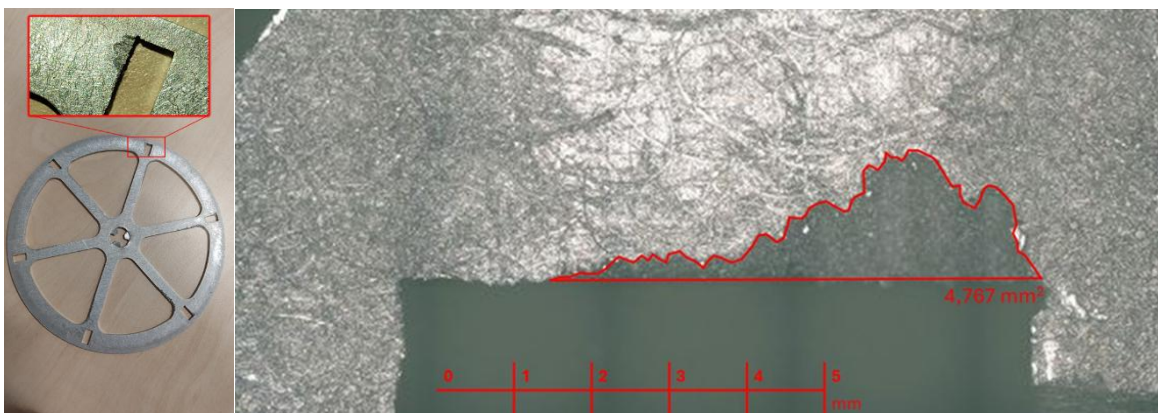
előnye, hogy egy stabil, rezonanciamentes csoportot tud alkotni a vízkör, ami főleg a befeckendezés pontossága miatt kritikus szempont is számunkra. Illetve megtekinthető még a tesztpad és kiegészítő rendszereinek sematikus ábrája is, amin az eddig kifejtett vízrendszeren túl megfigyelhető az elektromos kör is, ahol említésre méltó az a PID szabályozással vezérelt sebesség szenzor, ami egy szabvány határértékein bőven belül eső, maximum 0,3%-os eltérésű fordulatszám szabályozást tett lehetővé.



12. ábra: A megvalósult tesztpad fizikai felépítése és sematikus vázlatrajza

5. A tesztelési eljárás eredményei

A felépítés után már csak az éles tesztek és az eredmények kiértékelése maradt hátra. Összesen nagyjából 4 óra időtartamban és nagyrészt 40 000-es fordulatszámon teszteltünk egy próbatárcsát, ami a vonatkozó szabvány alsó határértékének kétszeresét nagyjából 250 m/s-os ütközési sebességet jelent. Ezek a tesztek rögtön pozitív eredményeket mutattak. A rendszer stabilan, fordulatszám ingadozás nélkül és láthatóan rezonanciamentesen működött. Bízató jel volt, hogy már az 1. óra eltelte utáni ellenőrzés során is láttunk egy nagyon enyhe, de az éleken egyenletesen alakuló kopást, ami aztán a járatások végére egy kiterjedtebb és mélyebb sérüléssé vált a próbatárcsán. Ezek az eredmények a 12. ábrán láthatóak. Szintén megtekinthetőek a 12. ábrán az eredmények kiértékelésének keretében elvégzett mikroszkópos feltételek, ami egy kopási felületmérés alapján teszik egymással összevethetővé a különböző anyagminőségek, vagy bevonati típusok esetében tapasztalható kopási sérüléseket.



13. ábra: A próbatárcsán kapott kopási minta és annak lemérése egy digitalizált optikai mikroszkóppal

6. Összegzés

Az eróziós vizsgálati célokra épülő tesztpad alapötletének megfogalmazódásakor, majd az alapvető szakirodalomkutatást elvégezve a célkitűzés egy szabványos, bármilyen ipari környezetben egyszerűen applikálható és üzemeltethető rendszer felépítése volt, ami költséghatékonyan teszi lehetővé különböző minták csepperózióval szembeni ellenállásának meghatározását, egymással való összevetését. Ezek a pontok végül a felépült gépcsoporra tekintve mind teljesülnek is, illetve talán az egyedüli vitatható pont az egyszerűen és bárhol üzemeltethetősége, mivel amelyek talán kicsit extrább igényei a tesztpadnak az a szoftveres háttér a szabályozáshoz, a megfelelő sűrített levegős csatlakozás a turbina meghajtásához, és főleg az olajkeringetést végző kondicionáló egység. De ezek úgy gondolom a legtöbb nagy ipari helyen adottak lehetnek, vagy valós szándék esetén könnyedén kiépíthetőek vagy beszerezhetőek. Viszont, amit fontos leszögezni, hogy objektíven értékelve is egy olyan eszköz épült fel, amilyenre még nem volt példa az általunk a témában elolvasott-, illetve áttanulmányozott szakirodalmakban. És nem csak a turbófeltöltő alapra történő felépítés miatt tekinthető egy unikális megoldásnak a tesztpad, de szintén egyedülálló a következő -, legfontosabb tulajdonságait tartalmazó felsorolás összes pontjának az egyszerre való teljesítésében:

- megfelel az ASTM G73-10 szabvány előírásainak, így lehetővé teszi nagy sebességű szerkezetek vízütés általi eróziójának szabványos körülmények közötti vizsgálatát és mérését,
- széles skálán precízen változtatható ütközési sebesség és vízcseppátmérő állít-ható be,
- egységnyi nagyságú és frekvenciájú vízcseppek képzése
- pulzációmentes víznyomás,
- könnyű szerelhetőség, egyszerűen cserélhető vizsgálati minták,
- a tesztteréből távozó víz összegyűjtés által akár újra felhasználható.

Mindezekből kiindulva, valamint hasonló kutatásokkal összevetve is objektíven kijelenthető, hogy a projektnek lehetnek valós ipari esélyei. Viszont az ilyen irányú törekvések előtt először még mindenképpen cél egy végleges formát adni a tesztpadnak, akár a különböző továbbfejlesztési lehetőségek megvizsgálásával, valamint lényeges egy pontos vizsgálati módszer definiálása is.

7. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Crown Oil Ltd. Euro 6 Emissions Standards Guide – What is Euro 6 & more., 2025. 11. 22., URL: <https://www.crownoil.co.uk/guides/euro-6-emissions-standards/>
- [2] Serrano, J. R., Piqueras, P., Angiolini, E., Meano, C., De La Morena, J.: On cooler and mixing condensation phenomena in the long-route waste gas recirculation line, SAE Technical Paper, 2015., DOI: 10.4271/2015-24-2521.
- [3] Siokos, K., Koli, R., Prucka, R., Schwanke, J. et al.: Assessment of Cooled Low Pressure EGR in a Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine, SAE International Journal of Engines, 2015., DOI: 10.4271/2015-01-1253.

- [4] ASTM G73-10: Standard Practice for Liquid Impingement Erosion Testing, ASTM International, 2021.
- [5] Wittmann, T., Lück, S., Bode, C., Friedrichs, J.: Investigation of water droplet erosion in the radial turbine of a fuel cell turbocharger, Proceedings of GPPS 2021 Turbomachinery Technical Conference, 2021., DOI: 10.33737/gpps21-tc-72.
- [6] Li, N., Zhou, Q., Chen, X., Xu, T., Hui, S., Zhang, D.: Liquid drop impact on solid surface with application to water drop erosion on turbine blades, Part I: Nonlinear wave model and solution of one-dimensional impact, International Journal of Mechanical Sciences 50, 2008., 1526–1542, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.08.001.
- [7] Lee, B.-E. et al.: Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid-solid impact model, International Journal of Impact Engineering 36, 2009., 1156–1171, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.02.007.
- [8] Ósz János: Hő- és atomerőművek vízüzeme 1.: Az ütköző vízcseppek eróziós hatása, 2019., DOI: 10.1556/9789634543343., pp. 87-102
- [9] A.K. Gujba, L. Hackel, D. Kevorkov, M. Medraj: Water droplet erosion behaviour of Ti–6Al–4V and mechanisms of material damage at the early and advanced stages, Wear 358–359, 2016., 109–122, DOI: 10.1016/j.wear.2016.04.008.
- [10] Leon M. Jr.: Toolbox for optimizing anti-erosion protective coatings of wind turbine blades: Overview of mechanisms and technical solutions, Wind Energy 22(11), 2019., 1636–1653, DOI: 10.1002/we.2378.
- [11] Gohardani O.: Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions, Progress in Aerospace Sciences 47, 2011., 280–303, DOI: 10.1016/j.paerosci.2011.04.001.
- [12] Jing, M., Gujba, A. K., Medraj, M.: Experimental and CFD simulation of interactions between water droplets with different surface features to understand water droplet erosion, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering 46, 2022., 113–130, DOI: 10.1139/tcsme-2021-0168.
- [13] Autoszektor: Kis- és nagy nyomású EGR, 2025. 11. 17., URL: <https://www.autoszektor.hu/hu/content/nagy-es-kisnyomasu-egr-0>
- [14] Nyerges Á., Dr. Zöldy M: Alacsony- és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés hatásvizsgálata haszonjármű dízelmotoron. Műszaki Szemle (EMT), 2018., 71(3), pp. 31–44
- [15] Li, N., Zhou, Q., Chen, X., Xu, T., Hui, S., Zhang, D.: Liquid drop impact on solid surface with application to water drop erosion on turbine blades, Part II: International Journal of Mechanical Sciences 50, 2008., 1543–1558, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.08.002.
- [16] Kirols, H. S.: Water Droplet Erosion: Influencing Parameters, Representation and Comparisons, PhD thesis, Concordia University, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Montreal, 2015.

- [17] Ahmad, M.: An Overview of Droplet Impact Erosion, Related Theory and Protection Measures in Steam Turbines, in: Steam Turbines – Design, Applications and Re-Rating, IntechOpen, London, 2018., DOI: 10.5772/intechopen.80768.
- [18] Lee, B.-E.: Development of a water erosion model for large steam turbine blades, KSME International Journal 17-1, 2003., 114–121, DOI: 10.1007/BF02984292.
- [19] Ahmad, M., Casey, M., Sürken, N.: Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials, Wear 267, 2009., 1605–1618, DOI: 10.1016/j.wear.2009.06.012.

RDE mérési terv kidolgozása különböző hajtású járművekre

Development of an RDE measurement plan for vehicles with different drive types

Farkas Ádám

9026 Győr, Egyetem tér 1. - Széchenyi István Egyetem
wolfadam36@gmail.com

Absztrakt: A járművek valós közúti üzemében tapasztalható emisszió jelentősen eltérhet a laboratóriumi körülmények között mért értékektől, ezért az elmúlt években felértékelődött a valós vezetési emissziók (Real Driving Emissions, RDE) vizsgálatának szerepe. A hordozható emissziómérő rendszerek (PEMS) lehetővé teszik a károsanyag-kibocsátás közvetlen, valós idejű meghatározását, azonban a mérés megbízhatóságát a környezeti tényezők, a szenzorok pontossága, valamint az adatfeldolgozás módszertana jelentősen befolyásolja. A különböző hajtáslánc-típusok, a belső égésű motoros, a hibrid, a plug-in hibrid és az elektromos járművek, eltérő működési sajátosságokkal rendelkeznek, amelyek meghatározzák emissziós viselkedésüket. Ennek megfelelően az összehasonlítható RDE mérések kivitelezéséhez olyan mérési terv szükséges, amely figyelembe veszi a járműtípusok sajátos dinamikáit, a környezeti hatásokat, a töltöttségi állapotot, valamint a mérőrendszer korlátait. A cikk célja egy reprodukálható mérési terv bemutatása, amelyet a Széchenyi István Egyetem laboratóriumában dolgoztam ki. A tanulmány ismerteti a szabályozási hátteret, bemutatja a PEMS rendszerek működését, elemzi a különböző hajtásláncok emissziós sajátosságait, ezt követően részletes módszertant és csekklistát ad közúti RDE mérések kivitelezéséhez. A kidolgozott mérési terv egy Győr térségében kijelölt útvonalon alkalmazható, megfelel az RDE előírásoknak, és alkalmas különböző hajtásláncok összehasonlító vizsgálatára.

Kulcsszavak: RDE, PEMS, emisszió, hibrid hajtás, plug-in hibrid, elektromos járművek, valós vezetési emissziómérés

Abstract: The emissions experienced by vehicles in real road operation can differ significantly from the values measured under laboratory conditions, which is why the role of Real Driving Emissions (RDE) testing has gained importance in recent years. Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) enable the direct, real-time determination of pollutant emissions, but the reliability of the measurement is significantly influenced by environmental factors, the accuracy of the sensors, and the data processing methodology. Different drivetrain types, internal combustion engine, hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicles, have different operating characteristics that determine their emission behavior. Accordingly, a measurement plan is required to perform comparable RDE measurements that takes into account the specific dynamics of the vehicle types, environmental effects, state of charge, and the limitations of the measurement-system. The aim of the article is to present a reproducible measurement plan that I developed in the laboratory of Széchenyi István University. The study describes the regulatory background, presents the operation of PEMS systems, analyzes the emission characteristics of different powertrains, and then provides a detailed methodology and checklist for conducting on-road RDE measurements. The developed measurement plan can be applied on a designated route in the Győr region, complies with RDE regulations, and is suitable for comparative testing of different powertrains.

Keywords: RDE, PEMS, emissions, hybrid drive, plug-in hybrid, electric vehicles, real driving emission measurement

1. Bevezetés

A közúti közlekedésből származó károsanyag-kibocsátás világszerte jelentős környezeti terhelést jelent, ezért az elmúlt évtizedekben egyre szigorodó emissziós előírások léptek életbe. A hagyományos laboratóriumi mérési ciklusok, mint az NEDC és később a WLTP, jól reprodukálhatók, azonban egyre inkább bizonyosodott, hogy nem képesek megfelelően reprezentálni a valós forgalmi körülmények között tapasztalható emissziós profilt.

Az Európai Unió ezért vezette be a Real Driving Emissions (RDE) vizsgálati rendszert, amelyben hordozható emissziómérő eszközök (PEMS) segítségével valós útviszonyok között mérik a jármű emisszióit. Az RDE bevezetése mérföldkő volt, hiszen első alkalommal jelent meg kötelezően alkalmazandó közúti emisszióteszt a típusjóváhagyásban. A PEMS rendszerek azonban nem laboratóriumi környezetben működnek, így számos kihívással kell szembenézni: hőmérséklet-függő drift, áramlásmérési bizonytalanságok, szenzorválaszidő, továbbá a forgalmi helyzetek és a vezetési stílus erős hatása a kibocsátásra.

A különböző hajtáslánc-típusok összehasonlítása tovább bonyolítja a feladatot. A belső égésű motoros járművek emisszióprofilja dominánsan terhelés- és hőmérsékletfüggő, míg a hibrid járművek esetében a gyakori motorindítások és üzemmódváltások eredményezhetnek emissziós csúcsokat. A plug-in hibrideknél a töltöttségi állapot meghatározza, hogy a jármű éppen elektromos vagy belsőégésű motoros üzemmódban közlekedik, ami nagyságrendi különbséget okozhat a kibocsátásban. Az elektromos járművek lokális emissziómentességük ellenére energiamérési szempontból relevánsak, ezért RDE típusú vizsgálatuk is indokolt.

A jelen cikk célja egy olyan, Győr térségére adaptált mérési terv bemutatása, amely a különböző hajtásláncú járművek összehasonlítható és reprodukálható RDE vizsgálatát teszi lehetővé. A mérési terv gyakorlati útmutatóként szolgál fejlesztőmérnökök, kutatók és laboratóriumi szakemberek számára, mivel egyértelműen strukturált lépésekben írja le a mérés előkészítését, kivitelezését és az adatok utófeldolgozását. A dolgozat hosszabb távú célkitűzése olyan mérési protokoll kialakítása, amely alkalmas alternatív üzemanyagok, hibrid stratégiák vagy új emissziócsökkentő technológiák összehasonlító vizsgálatára is.

2. Az emissziómérés története és szabályozási háttere

A járművek károsanyag-kibocsátásának vizsgálata az elmúlt évtizedekben folyamatosan fejlődött annak érdekében, hogy a laboratóriumi körülmények között mért értékek minél jobban közelítsék a valós közúti emissziót. A hagyományosan alkalmazott laboratóriumi ciklusok (NEDC, majd WLTP) ugyan reprodukálhatók és szabványosíthatók, ám egyre több kutatás bizonyította, hogy a tényleges forgalmi körülmények lényegesen magasabb emissziós értékeket eredményezhetnek. A valós vezetési emissziók (Real Driving Emissions, RDE) vizsgálata ennek megfelelően kiemelt szerepet kapott a modern járműfejlesztésben és szabályozásban.

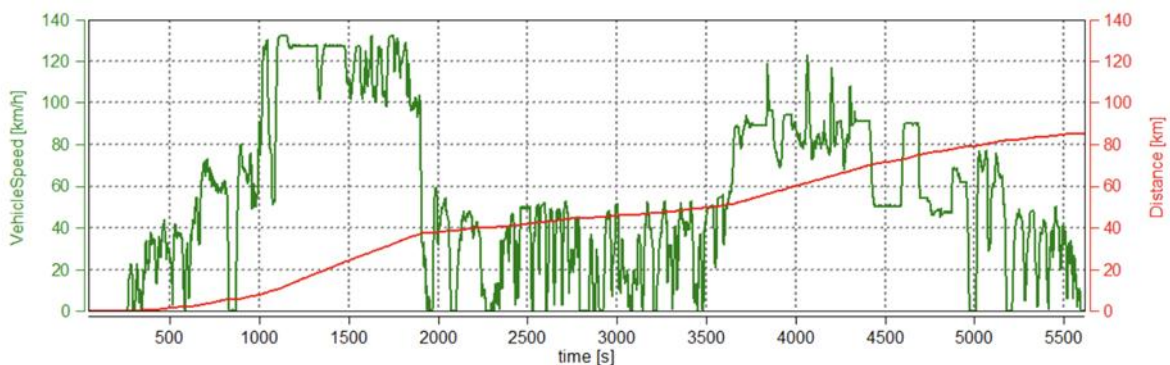
2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Euro 6b		Euro 6c			Euro 6d		
NEDC		WLTC					
Development & Measurement Phase		Conformity Factor (CF)					
		CF _{NOx} = 2.1, CF _{PN} = 1.5			CF _{NOx, PN} = 1.5		
RDE for CO, NO _x , PN emissions: EC 427/2016 and EC 646/2016						CO, NO _x , PN and CO ₂	

14. ábra: A személygépkocsikra vonatkozó tesztek követelményei⁸

⁸ Rahman, S.M.A., et al. (2021). State-of-the-Art of Establishing Test Procedures for Real Driving Gaseous Emissions from Light- and Heavy-Duty Vehicles. *Energies*, 14(14), 4195. DOI: 10.3390/en14144195.

A személygépkocsik kibocsátási szabványainak fejlődését jól szemlélteti az idővonal, amely rávilágít arra, hogy a határértékek fokozatos szigorítása mellett a mérési módszerek is egyre valóságközelibbé váltak [2]. Az NEDC ciklus alacsony dinamikájú, egyenletes gyorsításokat alkalmazó profilja nem tükrözte a mai közlekedési környezet komplexitását, így a járművek laboratóriumi emissziós eredményei gyakran jelentősen alacsonyabbak voltak a valós használati értékeknél. A WLTP ciklus ennek javítására nagyobb sebesség- és terhelési ingadozást vezetett be, azonban továbbra is laboratóriumi környezetben végzett vizsgálat maradt, amely nem képes modellezni a forgalmi torlódást, hőmérséklet-ingadozást, domborzati viszonyokat, vezetési stílus-változatosságot és egyéb valós hatásokat. A szakirodalom egyértelműen kimutatja, hogy bizonyos üzemi körülmények, különösen a hidegindítás, a nagy terhelés, az extrém gyorsítás vagy a hegyvidéki emelkedők, jelentős emissziótöbbletet okozhatnak, amelyeket a laboratóriumi ciklusok nem reprezentálnak megfelelően [1][2]. Emiatt vált szükségessé a valós közúti emissziómérés bevezetése, amelyet az európai szabályozás 2017-től kötelezővé tett. A Real Driving Emissions (RDE) vizsgálat lényege, hogy hordozható emissziómérő rendszerrel (PEMS) felszerelt járművel, közúti forgalomban végzik a mérést. Ez lehetővé teszi, hogy a járművek emissziós viselkedése a valódi működési körülmények között, a mindennapi vezetési profilok alatt legyen vizsgálható. A PEMS alapú mérés ugyanakkor technikailag összetettebb: a terepi körülmények változékonysága, a környezeti hőmérséklet és páratartalom hatása, a tömegáram-mérés bizonytalanságai és az analizátorok driftje mind olyan hibaforrások, amelyek kezelése elengedhetetlen a megbízható eredményekhez [3][4]. Az RDE szabályozás részletesen lefekteti a mérés körülményeire vonatkozó követelményeket:

- úttípus-arányok (város-országút-autópálya),
- dinamikai paraméterek (RPA, v-a határok),
- környezeti korlátok (hőmérséklet, tengerszint feletti magasság),
- műszaki előfeltételek (PEMS pontossági osztályok, mintavételi időállandók).



15. ábra: Jármű sebesség és megtett út ábrázolása az idő függvényében egy RDE mérés közben⁹

Ezek a követelmények biztosítják, hogy a különböző járműtípusok összehasonlítható feltételek mellett teljesítsék a valós mérési ciklust. A gyakorlatban azonban a mérési környezet minden esetben komplex és nem tökéletesen kontrollálható. Kutatások kimutatták, hogy a vezetési stílus, a domborzat, a forgalom és a környezeti hőmérséklet akár 20-40%-os különbséget is okozhat az NO_x -, CO_2 - vagy PN-kibocsátásban [5][6].

⁹ Tóth, Máté. (2025). RDE menetciklus során kibocsátott káros anyagok vizsgálata hordozható emisszió mérő berendezés segítségével. XXXIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2025. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság – EMT. <https://ojs.emt.ro/oget/article/view/1963>.

Az RDE előírás egyik sajátossága a konformitási tényező használata, amely azt hivatott kezelni, hogy a PEMS mérések elkerülhetetlenül nagyobb mérési bizonytalansággal járnak, mint a laboratóriumi műszerek. A legfrissebb kutatások rámutatnak, hogy a PEMS rendszerek bizonytalansága komponensenként eltérő, de a fejlettebb eszközök képesek a laboratóriumi szinthez közelítő stabilitás elérésére [7][8]. Összességében a szabályozási trend egyértelmű: a jövő emissziómérése egyre inkább a valós közúti körülményeket helyezi előtérbe. Az Euro 7 irányelvek várhatóan tovább szigorítják a terepi követelményeket, bevezetik a 10 nm-es PN-határértékeket és kiterjesztik a fedélzeti kibocsátás-monitorozást (OBM). A kutatás és fejlesztés területén ezért kiemelten fontos a terepi mérőrendszerek pontosságának növelése, a dinamikai mutatók finomítása és a különböző hajtásláncú járművek összehasonlítható értékelésének kialakítása.

3. A PEMS rendszerek működése

A hordozható emissziómérő rendszerek (Portable Emission Measurement System – PEMS) alkalmazása mára a valós vezetési emissziómérés (RDE) egyik alapkövetelményévé vált. Ezek a rendszerek képesek a jármű kipufogógázának összetételét és a kibocsátási folyamatokat közúti körülmények között, valós időben mérni. A PEMS technológia fejlődése lehetővé tette, hogy a laboratóriumi mérések (WLTP) mellett a valós használat során is hiteles, szabályozás által elfogadott emissziós eredmények álljanak rendelkezésre. A modern PEMS eszközök azonban összetett rendszerek, amelyek működése szenzorok, gázanalizátorok, áramlásmérők és adatgyűjtő egységek összehangolt működésére épül.



16. ábra: A PEMS rendszer Toyota Yaris-ra szerelve¹⁰

a. A PEMS-rendszer fő komponensei

Az ismertett mérés során alkalmazott Sensors Semtech DS+ rendszer három fő modulból áll:

- Semtech DS+ főegység - a gázkomponensek (CO₂, CO, NO₂, NO_x) folyamatos mérése,

¹⁰ saját fénykép

- CPN / CPN 23/10 részecskeszámláló - PN (Particle Number) koncentráció mérése,
- EFM (Exhaust Flow Meter) - kipufogógáz tömegáramának meghatározása.

Ezek a modulok végzik a teljes emissziós lánc mérését, ahol a koncentrációmintavételezés, a tömegáram-analízis és a környezeti adatgyűjtés együttesen adja a pillanatnyi és integrált kibocsátási értékeket. A rendszerhez kapcsolódnak továbbá:

- OBD interfész - motorüzemi paraméterek, hibrid üzemmódok, ECU-jelek fogadására,
- GPS vevő - pozíció, sebesség, tengerszint feletti magasság mérése,
- időjárás-modul - külső hőmérséklet, páratartalom detektálására.

A PEMS adatrögzítési frekvenciája típustól függően jellemzően 1 Hz, amely elegendő a percekben belül változó emissziós események követéséhez.

b. A mérési elv és adatgyűjtési folyamat

A PEMS rendszerek működése több, szorosan egymásra épülő folyamat együttes eredménye. A mérés első lépése a mintavétel és a gázösszetétel meghatározása, amely során a kipufogógáz a mintavevőcsövön keresztül egy előkondicionáló egységbe jut. Itt történik a víztelenítés, a hőmérséklet stabilizálása és a szükséges szűrés, ezt követően pedig a gázanalizátor cellái, jellemzően infravörös (NDIR) elven működve, meghatározzák a főbb komponensek, például a CO₂ és NO_x koncentrációját. A mérési lánc másik kulcsfontosságú eleme a tömegáram-mérés, amelyet az Exhaust Flow Meter (EFM) végez. Ez határozza meg a kipufogógáz pillanatnyi tömegáramát, amely alapvető fontosságú a g/km vagy g/kWh emissziós értékek kiszámításához. A legújabb kutatások rámutatnak, hogy az EFM bizonytalansága érdemben befolyásolhatja a teljes emissziószámítást [4]. A mérési adatok csak akkor értékelhetők megbízhatóan, ha a rendszer megfelelő időszinkronizálással működik. Az egyes modulok eltérő válaszüzeje miatt elengedhetetlen, hogy a gázanalizátorok, az áramlásmérő, az OBD-jelek és a GPS-adatok időbélyegzése tökéletesen összehangolt legyen. Végül a rendszer egy vezérlőszoftver segítségével valós időben rögzíti és megjeleníti a fő paramétereket, többek között a jármű sebességét, a tömegáramot, valamint a NO_x- és CO₂-koncentrációkat. A teljes mérési útvonal alatt folyamatos adatnaplózás történik, így a PEMS részletes, időalapú emissziós profilt biztosít a valós vezetési körülményekről.

c. A mérés előkészítése

A valós vezetési mérés előkészítése több egymásra épülő lépésből álló, összetett folyamat. Ennek része a PEMS rendszer nullpontjának ellenőrzése, amely biztosítja, hogy az analizátorok kiindulási értékei megfeleljenek a gyári előírásoknak. Ezt követi a standard gázokkal végzett többpontos kalibráció, amely a mérési pontosság és linearitás ellenőrzésére szolgál. A műszeres előkészítés mellett elengedhetetlen a mintavevőcső megfelelő felszerelése a kipufogóra, valamint annak hőszigetelése, hogy a gáz kondenzációja és a mérést befolyásoló hőmérséklet-ingadozások elkerülhetők legyenek. A rendszer működtetéséhez szükséges energiaellátást szintén biztosítani kell, gyakran külön akkumulátorcsomag alkalmazásával. Végezetül a teljes vezérlőrendszer működési stabilitását is ellenőrizni kell, hogy a mérés során minden modul szinkronban és hibamentesen működjön. A kalibrációs jegyzőkönyvek minden esetben a mérési dokumentáció részét képezik, mivel ezek igazolják a mérési lánc pontosságát és visszakövethetőségét.

d. Mintavételi, műszaki és mérési hibák

A PEMS mérések bizonytalansága a szakirodalom szerint több, egymástól jól elkülöníthető kritikus forrásból ered. Az egyik legjelentősebb hibakomponens az analizátorok hosszú távú érzékenység- és nullpontváltozása, az úgynevezett drift, amely a mérési pontosságot fokozatosan rontja [7]. Emellett a mintavételi rendszer sajátosságai, például a mintavevőcső hossza, hajlásszöge, esetleges lerakódásai vagy a csőben kialakuló gázkeveredési viszonyok, szintén torzíthatják a mért koncentrációkat [8]. A kipufogógáz áramlási útjából adódó időkéés (exhaust lag time) szintén meghatározó tényező, különösen gyors tranziens események esetén [8]. A külső környezeti hatások, így a hőmérséklet, a páratartalom és a járművekben fellépő vibrációk további bizonytalanságelemeket eredményezhetnek, és ehhez járul a szenzorok véges válaszüideje, amely gyors terhelésváltozások során alul- vagy túlmintavételezéshez vezethet. A modern PEMS rendszerek ezeket a hibakomponenseket többféle technikai megoldással igyekeznek minimalizálni. Ilyen a folyamatos driftkompenzáció, a beépített referencia-gázok használata, az automatikus kalibrációs rutinok alkalmazása, valamint a fejlett adatfeldolgozási algoritmusok, amelyek szűréssel és időkéés-korrekciónal javítják a mérési eredmények megbízhatóságát.

e. A PEMS mérési adatainak szerepe a járműdiagnosztikában

A közúti emissziómérés nemcsak a szabályozási megfelelés ellenőrzésére alkalmas, hanem a hajtáslánc működésének mélyebb feltárására is. Az OBD-n keresztül gyűjtött adatok lehetővé teszik annak pontos meghatározását, hogy a jármű adott pillanatban elektromos, belső égésű vagy hibrid üzemmódban működik-e, illetve hogyan alakul az energiaáramlás a rendszerben. Az emissziós események és az aktuális üzemállapot közötti összefüggések így jól feltérképezhetők, ami különösen a hibrid járműveknél bír nagy jelentőséggel. Ezeknél ugyanis a motorindítási ciklusok, a generátorüzem és a fékezési energia visszatáplálása mind olyan folyamatok, amelyek jelentős hatással vannak a pillanatnyi NO_x - és CO_2 -kibocsátásra, ezért részletes vizsgálatuk elengedhetetlen a valós emissziós viselkedés megértéséhez.

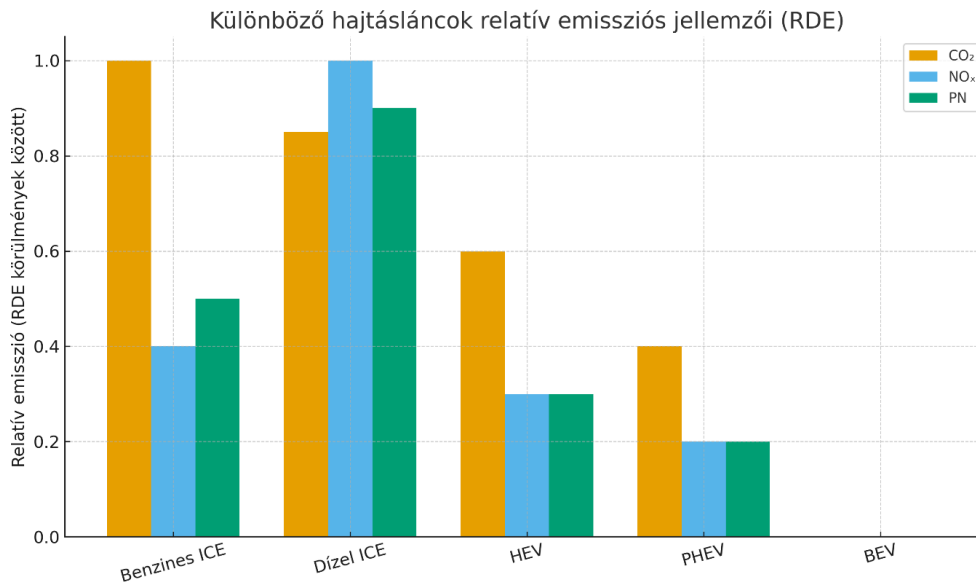
f. A PEMS szerepe az RDE szabályozásban

A PEMS rendszerek kulcsfontosságú szerepet töltenek be a jelenlegi szabályozási környezetben, mivel lehetővé teszik annak ellenőrzését, hogy a járművek valós körülmények között is teljesítik-e az Euro 6d emissziós határértékeket. Ezek az eszközök biztosítják a konformitási tényezőket, elsősorban a NO_x és a részecskeszám (PN), pontos meghatározását, valamint az RDE vizsgálatok környezeti és dinamikai követelményeinek validálását. A PEMS által rögzített adatok alapján egyúttal részletesen értékelhetővé válik a valós vezetési profilok emissziós viselkedése is, ami olyan összefüggések feltárását teszi lehetővé, amelyek laboratóriumi körülmények között nem lennének megfigyelhetők. A szakirodalom szerint a hordozható mérőrendszerek fejlődése a következő években tovább gyorsul, részben az Euro 7 bevezetésével. A várható követelmények között kiemelt szerepet kap a 10 nm-es részecskeszám-mérés támogatása, a szélesebb hőmérséklettartományban való megbízható működés, a gyorsabb reagálású gázanalizátorok alkalmazása, valamint a fedélzeti valós emissziómonitorozás (OBM) integrációja [2][7][9]. Ezek a fejlesztési irányok jelentősen növelik majd a terepi mérések pontosságát és a szabályozási megfelelés ellenőrzésének hatékonyságát.

4. Hajtásláncok emissziós sajátosságai

A különböző hajtásláncú járművek emissziós viselkedése jelentős mértékben tér el, különösen valós vezetési körülmények között. Az égési folyamat, az energiaáramlási struktúra, a

szabályozási stratégia és az üzemi hőmérséklet együtt határozzák meg, hogy a jármű milyen mértékben bocsát ki szennyező anyagokat. A mérési eredmények és szakirodalmi források alapján a belső égésű motoros, a hibrid, a plug-in hibrid és az elektromos járművek emissziós mintázata eltérő mechanizmusokra vezethető vissza.



17. ábra: Különböző hajtásláncok relatív emissziói¹¹

a. Belső égésű motorral szerelt járművek emissziója

A hagyományos Otto- vagy dízelmotoros járművek emisszióját alapvetően a terhelés, a motorüzemi hőmérséklet és a keverékképzés minősége határozza meg. Hidegindítás során a kipufogógáz-kezelő rendszerek még nem érik el a hatékony működéshez szükséges hőmérsékletet, ezért a NO_x-, CO- és HC-kibocsátás többszöröse lehet a meleg üzemi értékeknek [1][9]. Ez különösen a városi, alacsony sebességű szakaszokra jellemző. A valós vezetési körülmények között fellépő gyors terhelésváltások, meredek emelkedők vagy nagy gyorsítások további emissziócsúcsokat okoznak, amelyeket laboratóriumi ciklusok nem minden esetben fednek le [5][6].

b. Hibrid elektromos járművek (HEV) emissziós sajátosságai

A hibrid járművek működése sokkal összetettebb, mivel a belső égésű motor és az elektromos hajtás dinamikusan váltakozik a vezetési körülmények függvényében. A szakirodalom hangsúlyozza, hogy a motorindítások gyakorisága és az akkumulátor töltöttségi állapota (SOC) kritikus tényező az emisszió szempontjából. A hibrid jármű városi közlekedésben gyakran elektromos üzemben halad, ilyenkor a lokális károsanyag-kibocsátás gyakorlatilag nulla. Ugyanakkor minden egyes motorindítás kis ideig magas NO_x- és CO-kibocsátást idéz elő, mivel a katalizátor hőmérséklete ekkor gyakran a hatékony tartomány alatt van. A rendszer a belső égésű motort gyakran részterhelésen, magas hatásfokú tartományban működteti, ami a fajlagos CO₂-kibocsátást csökkenti. A motor működési ciklusai jól követik az elektromos rendszer terhelését: ha a SOC magas, a jármű hosszabb ideig marad EV üzemben, ha pedig alacsony, a motor töltésrámogatással nagyobb terhelésen fut. Ezek a jelenségek a hibrid járművek emisszióját erősen üzemállapot-függővé teszik, ezért az RDE vizsgálat során különösen fontos a SOC megfelelő rögzítése és kiegyenlítése.

¹¹ saját készítés

c. Plug-in hibrid járművek (PHEV)

A plug-in hibridek kettős energiarendszerrel rendelkeznek, és nagy kapacitású akkumulátoruknak köszönhetően jelentős távolságot képesek tisztán elektromos üzemben megtenni. Ez emissziós szempontból kedvező, ugyanakkor a mérések értékelését lényegesen összetettebbé teszi. A szakirodalom hangsúlyozza, hogy a PHEV-ek valós kibocsátása elsősorban az akkumulátor töltöttségi állapotától függ: magas SOC esetén a jármű jellemzően elektromos üzemben működik, míg alacsony töltöttség mellett a belső égésű motor veszi át a hajtást. Ezen felül a felhasználói töltési szokások döntően befolyásolják a tényleges emissziót, hiszen, ha a járművet nem töltik rendszeresen, a működése közelebb kerülhet egy hagyományos belső égésű jármű emissziós szintjéhez. A motorindítási ciklusok szintén meghatározó szerepet játszanak, mivel a hidegindítási fázis a PHEV-ek esetében is jelentős emissziótöbblettel jár. A PHEV-eknél a töltöttségi állapot hatása még erőteljesebben jelentkezik, mint a hagyományos hibrideknél, hiszen a tisztán elektromos hatótáv nagyobb, így az üzemmódváltások emissziós következményei is hangsúlyosabbak. Emissziós szempontból különösen kritikus a charge sustaining üzem, amikor az akkumulátor töltöttsége már alacsony, és a jármű tulajdonképpen hibridként működik tovább. Ebben az állapotban a CO₂- és NO_x-kibocsátás jellemzően a hibrid járművekre tipikus tartományban alakul, bizonyos dinamikus szakaszokban pedig akár magasabb értékeket is mutathat [16].

d. Akkumulátoros elektromos járművek (BEV) energiahatékonysága

Mivel az elektromos járművek nem rendelkeznek kipufogórendszerrel, lokális szennyezőanyag-kibocsátásuk zéró. Ugyanakkor valós vezetési körülmények között továbbra is mérhető a fajlagos energiafogyasztásuk, amely az RDE jellegű vizsgálatokban fontos értékelési paraméterként jelenik meg. Az elektromos járművek energiaigénye (Wh/km) jelentős mértékben függ a sebességtartománytól és a vezetési profiltól: alacsony sebességnél a segédüzemek működése és a gyakori gyorsítások miatt az energiafogyasztás magasabb lehet, országúti haladásnál jellemzően csökken, míg autópálya-tempónál a növekvő légellenállás miatt ismét számottevően emelkedik. A tisztán elektromos járművek egyik fontos előnye a regeneratív fékezés, amely a fékezési energiát visszatáplálva kézzelfogható mértékben csökkenti a fajlagos energiafogyasztást. Ennek hatékonysága azonban jelentős mértékben függ az adott jármű technológiájától, az akkumulátor töltöttségi állapotától, valamint az útvonal jellegétől. Az RDE rendszerben a BEV-ek értékelése elsősorban az energiafogyasztás, a teljesítményfelvétel és a töltési veszteségek vizsgálatára épül. Ezek a paraméterek teszik lehetővé az elektromos és a belső égésű vagy hibrid hajtásláncok közötti energiahatékonyságának közvetlen összehasonlítását.

5. RDE mérés módszertana

A valós vezetési emissziómérések (Real Driving Emissions, RDE) alkalmazása napjainkban az egyik legfontosabb eszköz annak ellenőrzésére, hogy a járművek a közúti használat során is teljesítik-e az előírt emissziós határértékeket. A módszertan célja olyan mérési környezet és eljárás kialakítása, amely képes a jármű tényleges dinamikai és emissziós viselkedésének hiteles leképezésére. Ennek érdekében az RDE mérési rendszer pontosan meghatározott környezeti feltételeket, úttípus-arányokat, mintavételi követelményeket és validálási kritériumokat ír elő [9][11].

a. Mérési körülmények és követelmények

A mérés egyik alapvető eleme a megfelelő útvonal kiválasztása, amelynek összhangban kell állnia az RDE szabályozási követelményeivel. Az előírás meghatározza, hogy a teljes vizsgálat városi, országúti és autópályás szakaszokat tartalmazzon, és ezek aránya a teljes mérésen belül előre definiált tartományon belül maradjon. A gyakorlati megvalósítás során a városi környezetben jellemzően 30–60 km/h, országúton 70–90 km/h, autópályán pedig akár 130 km/h közelében zajlik a haladás, így a mérés képes lefedni a jármű teljes terhelési spektrumát [5][11]. A környezeti feltételek megfelelő rögzítése szintén kulcsfontosságú, mivel a hőmérséklet, a páratartalom és a tengerszint feletti magasság jelentősen befolyásolja a motor üzemi viselkedését és az utókezelő rendszerek hatásfokát. A mérés során a PEMS rendszer kapcsolt időjárásmodulja folyamatosan figyeli ezeket a paramétereket, biztosítva, hogy a vizsgálat teljes időtartama alatt a szabályozási kereteken belül maradjanak. Elektrifikált hajtásláncok esetén külön figyelmet igényel az akkumulátor töltöttségi állapota (SOC), amelyet a mérés elején és végén dokumentálni kell, hiszen a töltöttség változása közvetlen hatást gyakorol az energiafogyasztásra és az emissziós profilra [6][10].

b. Mérendő paraméterek

A vizsgálat során számos fizikai mennyiség részletes rögzítése szükséges annak érdekében, hogy a jármű emissziós és energetikai viselkedése teljeskörűen értékelhető legyen. A legfontosabb mérendő komponensek közé tartoznak a kipufogógázban jelen lévő szabályozott szennyezőanyagok, mint a NO_x , CO_2 , CO és adott esetben a részecskeszám (PN). Ezek mellett a kipufogógáz tömegárama, a jármű sebessége, gyorsulása, pozíciója, valamint a környezeti adatok is folyamatos rögzítést igényelnek [6]. A hibrid és elektromos járművek esetében az emissziókomponensek mellett különös hangsúlyt kap az energiafogyasztás vizsgálata. A villamos teljesítmény időbeli integrálása révén határozható meg a fajlagos energiafelhasználás (Wh/km), amely számos tényezőtől függ: a segédüzemek működésétől, a gyorsítások intenzitásától, a rekuperáció mértékétől vagy éppen az útvonal jellegétől. A mérés így nem csupán a lokális emisszió hiányát, hanem az energiahatékonyság valós alakulását is képes feltárni.

c. A mérési adatok kiértékelése és validálása

A rögzített adatok utófeldolgozása során első lépésben a mérési érvényesség vizsgálata történik. Ennek része az úttípusarányok ellenőrzése, a sebesség–gyorsulás profil elemzése, valamint a dinamikai mutatók, például a Relative Positive Acceleration (RPA) vagy a Maximum Power Acceleration (MPA), kiszámítása és összevetése az előírt követelményekkel [5][11]. A validálási folyamat azt is magában foglalja, hogy a mérési láncban szereplő komponensek működése megfelelt-e a követelményeknek (pl. mintavételi stabilitás, szenzorválaszidő, időszinkronizáció pontossága). A kalibrációs adatok és a mérési jegyzőkönyvek alapján megítélhető, hogy a teljes mérési folyamat reprodukálható és visszakövethető volt-e, ami alapfeltétele a szabályozás szerinti elfogadottságnak. A gyakorlatban a validált adatokból számított kibocsátási értékek, g/km vagy g/kWh formában, képezik a jármű valós körülmények közötti emissziós minősítésének alapját. Az adatelemzés így nem csupán a szabályozási megfelelést igazolja, hanem feltárja a hajtáslánc működésében rejlő sajátosságokat, hatásfokjavítási lehetőségeket és az elektromos energiafelhasználás szerkezetét is.

6. Mérési terv kidolgozása különböző hajtásláncokra

A valós vezetési emissziók vizsgálata során a mérési terv célja, hogy olyan közúti környezetet teremtsen, amely pontosan és reprodukálható módon mutatja meg az egyes hajtáslánc-típusok

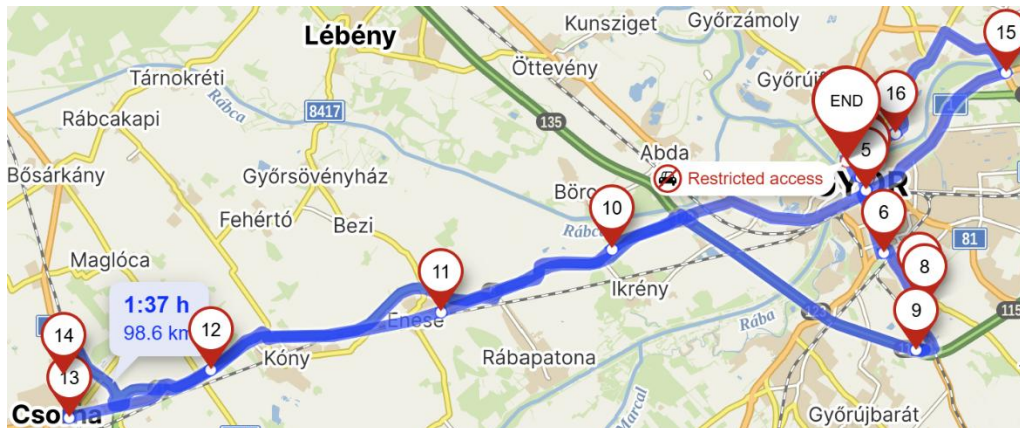
emissziós sajátosságait. A mérési terv összeállításakor figyelembe kell venni a szabályozási előírásokat, a jármű műszaki korlátait, valamint a mérőeszköz-rendszer telepítési sajátosságait. A különböző hajtásláncok, belső égésű, hibrid, plug-in hibrid és elektromos, eltérő működési logikával rendelkeznek, ezért a mérési tervnek alkalmasnak kell lennie ezen rendszerek összehasonlítható értékelésére.

a. A mérés célja, járművek és vizsgálati módszer

A mérés elsődleges célja az volt, hogy valós úton, RDE-kompatibilis körülmények között vizsgálhatóvá váljon a különböző hajtásláncok kibocsátási viselkedése. Ehhez olyan jármű került kiválasztásra, amely képes jól reprezentálni a modern személygépjárművek működését, és amelynek hajtáslánc-felépítése lehetővé teszi az emissziós és energetikai folyamatok részletes vizsgálatát. A mérés során hibrid hajtású járművet alkalmaztunk, amelyben a villamos és a belső égésű motor együttműködése jól nyomon követhető. A hibrid működés sajátosságai, például a motorindítási ciklusok, a generátorüzem, a rekuperációs fázisok, különösen relevánsak az emissziós események értelmezése szempontjából [6][10]. A vizsgálati módszer középpontjában a hordozható emissziómérő rendszer (PEMS) alkalmazása állt. A PEMS-rendszer járműre történő felszerelése lehetővé teszi, hogy a kibocsátott komponensek koncentrációja és a jármű dinamikai paraméterei valós időben kerüljenek rögzítésre, közvetlenül a közúti használat során. A módszer előnye, hogy a jármű nem laboratóriumi körülmények, hanem tényleges használat közben vizsgálható, így a vezetési stílus, a forgalmi viszonyok és az útvonal karakterisztikái is megjelennek a mérésben.

b. Mérési körülmények, útvonal és eszközrendszer

A mérés útvonala egy közel 100 km hosszú, három úttípusból álló ciklus volt, amely városi, országúti és autópályás szakaszokat egyaránt magában foglalt. A szakaszok aránya a szabályozási előírásoknak megfelelően alakult, biztosítva a dinamikai változatosságot és a hajtáslánc különböző üzemállapotainak előhívását. Az útvonal jellemzően sík terepen haladt, a domborzati hatások minimális szerepet játszottak. A környezeti feltételek stabilnak bizonyultak: a külső hőmérséklet, a páratartalom és a légnyomás az RDE-szabályozás által meghatározott tartományban maradt. A forgalmi viszonyok közepes terhelést mutattak, ami lehetővé tette a vezetési profil egyenletes kialakítását, torlódások vagy extrém lassulások nélkül. A mérés technikai alapját egy többmodulos PEMS rendszer adta, amely gázanalizátorokból, részecskeszámlálóból, kipufogógáz-tömegáram-mérőből (EFM), GPS-modulból, időjárás-egységből és OBD-kapcsolatból épült fel. A gázanalizátorok 1 Hz-es frekvencián mérték a fő komponenseket (CO_2 , CO , NO_x , PN), az OBD-n keresztül rögzítésre kerültek a fontosabb motorparaméterek (fordulatszám, terhelés, üzemanyag-áram, akkumulátor-teljesítmény), míg a GPS-modul a sebességet és a pozíciót adta hozzá az időalaphoz [3][6]. A rendszer energiaellátását külső akkumulátor biztosította, a főegység és a tömegáram-mérő pedig a jármű csomagtartó részén és hátsó szerelési pontjain kapott helyet. Az eszközrendszer stabil működést mutatott, az adatvesztés aránya 1% alatt maradt.



18. ábra. A mérés útvonala¹²

c. Csekklista, adatfeldolgozás és tapasztalatok

A valós vezetési emissziómérés egyik legösszetettebb feladata az adatgyűjtés utófeldolgozása. A PEMS, a GPS és az OBD párhuzamos rendszereinek köszönhetően minden másodpercben több tucat paraméter kerül rögzítésre, amelyek szinkronizálása és validálása nélkülözhetetlen a későbbi elemzéshez. A mérési folyamat egységesítésére egy strukturált csekklista készült, amely három fő modulból állt: előkészítés, adatgyűjtés és utófeldolgozás. Az előkészítési modul tartalmazta a jármű- és mérőeszköz-azonosítókat, a környezeti feltételeket, a PEMS konfigurációját, a kalibrációs jegyzőkönyvek fő paramétereit, valamint a nullpont-ellenőrzés eredményeit. Az adatgyűjtési modul az időalapú rögzítést egységes CSV-formátumban kezelte, amely egyesítette a kibocsátási komponensek koncentrációit, a tömegáramot, a hőmérsékleti adatokat és az OBD-ből származó hajtásláncparamétereket. Az utófeldolgozás során került sor az időszinkron ellenőrzésére (PEMS–GPS–OBD egyezés), a szenzorok driftvizsgálatára, a fizikai hibák kiszűrésére, valamint a vezetési profil RDE-kompatibilitásának igazolására. A validált adatok alapján megállapítható volt, hogy a mérés technikailag stabilan zajlott, a driftértékek a megengedett tartományon belül maradtak, és a kibocsátási idősorok jól tükrözték a különböző üzemi állapotokat. A jármű hibrid működése például egyértelműen megjelent az NO_x-csúcsokban, amelyek a belső égésű motor aktiválásához köthetők.

7. Eredmények és értékelés

A valós vezetési vizsgálat során rögzített adatok alapján a jármű dinamikai viselkedése megfelelt az RDE-előírásoknak, a sebességeloszlás és gyorsítási tartomány pedig jól tükrözte a három úttípus jellegét. Az emissziós idősorok elemzése azt mutatta, hogy a NO_x- és CO₂-kibocsátás elsősorban a belső égésű motor aktiválásához és a hirtelen terhelésváltozásokhoz köthető, míg stabilabb haladásnál a kibocsátás csökkenő tendenciát mutatott. A hibrid működés sajátosságai egyértelműen megjelentek a mérési eredményekben: magas töltöttségi állapotnál a jármű jellemzően elektromos üzemben haladt, míg alacsonyabb SOC esetén gyakoribbá vált a belső égésű motor bekapcsolása és az emissziós csúcsok megjelenése. Az energiafogyasztás időbeli alakulása jól követte a vezetési környezet változásait, a regeneratív fékezés pedig mérhetően hozzájárult a fajlagos energiaigény csökkentéséhez.

¹² saját készítés

8. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálámat külső konzulensemnek, Szávicza Zoltánnak, aki a munka teljes folyamatában végig támogatta a kutatást. Szakmai útmutatásai, gyakorlati tapasztalata és a mérési környezet kialakításában nyújtott segítsége meghatározó szerepet játszott abban, hogy a vizsgálat szakszerűen és eredményesen valósulhasson meg. A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Suárez-Bertoa, R., Valverde, V., Clairotte, M., Pavlović, J., Giechaskiel, B., Franco, V., Kregar, Z., & Astorga, C. (2019). On-road emissions of passenger cars beyond the boundary conditions of the real-driving emissions test. *Environmental Research*, 176, 108572. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108572.
- [2] Rahman, S.M.A., et al. (2021). State-of-the-Art of Establishing Test Procedures for Real Driving Gaseous Emissions from Light- and Heavy-Duty Vehicles. *Energies*, 14(14), 4195. DOI: 10.3390/en14144195.
- [3] Su, S., Hou, P., Wang, X., Lyu, L., Ge, Y., Lyu, T., Lai, Y., Luo, W., & Wang, Y. (2023). Evaluating the Measurement Uncertainty of On-Road NO_x Using a Portable Emission Measurement System (PEMS) Based on Real Testing Data in China. *Atmosphere*, 14(4), 702. DOI:10.3390/atmos14040702.
- [4] Reisinger, G., & Pischinger, S. (2025). Traceable Uncertainty of Exhaust Flow Meters Embedded in Portable Emission Measurement Systems. *Emission Control Science and Technology*, 11(9). DOI:10.1007/s40825-025-00260-z.
- [5] Gallus, J., Kirchner, U., Vogt, R., & Benter, T. (2017). Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a Portable Emission Measurement System (PEMS). *Transportation Research Part D*, 52, 215–226. DOI: 10.1016/j.trd.2017.03.011.
- [6] Suárez-Bertoa, R., Valverde, V., Clairotte, M., Pavlovic, J., & Astorga, C. (2020). Regulated and Non-Regulated Emissions from Euro 6 Diesel, Gasoline and CNG Vehicles under Real-World Driving Conditions. *Atmosphere*, 11(2), 204. DOI: 10.3390/atmos11020204.
- [7] Giechaskiel, B., Valverde, V., & Clairotte, M. (2021). Real Driving Emissions (RDE): 2020 assessment of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) measurement uncertainty. JRC Technical Report, EUR 30591 EN. DOI: 10.2760/440720.
- [8] Giechaskiel, B., Lähde, T., Melas, A. D., Valverde, V., & Clairotte, M. (2021). Uncertainty of laboratory and portable solid particle number systems for regulatory measurements of vehicle emissions. *Environmental Research*, 197, 111068. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111068.

- [9] Tschöke, H. (ed.) (2019). Real Driving Emissions (RDE): Gesetzgebung, Vorgehensweise, Messtechnik, Motorische Maßnahmen, Abgasnachbehandlung, Auswirkungen. Springer Vieweg, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-21079-3.
- [10] Tóth, Máté. (2025). RDE menetciklus során kibocsátott káros anyagok vizsgálata hordozható emisszió mérő berendezés segítségével. XXXIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2025. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság – EMT. <https://ojs.emt.ro/oget/article/view/1963>.
- [11] Varella, R. A., Faria, M. V., Mendoza-Villafuerte, P., Baptista, P. C., Sousa, L., & Duarte, G. O. (2019). Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions. Science of the Total Environment, 658, 879–894. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.053.

Alternatív tüzelőanyaggal szennyezett polialfa-olefin (PAO) bázisolaj mesterséges öregítési eljárásának fejlesztése

Development of a laboratory ageing method for polyalphaolefin (PAO) base oil contaminated with E20 alternative fuel

Kovács Márkó

Széchenyi István Egyetem
kovacs.km.marko@gmail.com

Absztrakt: Napjainkban az autóiparra vonatkozó fenntarthatósági követelmények és környezetvédelmi szabályozások hatására az alternatív tüzelőanyagok – például a kutatás során vizsgált, 20% etanolt tartalmazó benzin (E20) – egyre inkább előtérbe kerülnek, mint megújuló energiából előállítható üzemanyagok. Ezen tüzelőanyagok átfogó tribológiai vizsgálata kulcsfontosságú, mivel a kenőolajrendszerbe jutva hatást gyakorolhatnak a kenőolaj kémiai-fizikai tulajdonságaira. Jelen kutatás során egy mesterséges öregítési eljárás került kidolgozásra E20 kísérleti tüzelőanyaggal szennyezett polialfa-olefin (PAO) bázisolaj felhasználásával. A kutatás célja egy olyan mesterséges öregítési beállítás meghatározása volt, amelynek alkalmazásával az így létrejött, mesterségesen öregített olajhoz tartozó súrlódási együttható és átlagos kopásátmérő értékek a kutatás szempontjából kedvező tartományban helyezkednek el. A paraméterek optimalizálásához kísérlettervezési módszertan (DoE) került felhasználásra R szoftver környezetben, amely lehetővé tette az öregítési idő és a hőmérséklet hatásainak feltérképezését is. A tribológiai tulajdonságok meghatározása Optimol SRV5 oszcilláló tribométerrel történt, míg a próbatesteken megfigyelt kopásnyomok elemzése Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóppal valósult meg. A kísérlettervezési modellek eredményei alapján az optimális paraméterekként a 140 °C-os hőmérséklet és a 48 órás öregítési idő került meghatározásra. E paraméterek alkalmazásával további mesterséges öregítési vizsgálatok valósultak meg kopásgátló adalék (ZDDP) hozzáadásával, a kenőanyagra gyakorolt hatásainak, valamint az általa kialakított tribofilm összetételének feltárása érdekében, Thermo Scientific Nexsa G2 röntgen-fotoelektron spektrométer felhasználásával.

Kulcsszavak: Alternatív tüzelőanyag, Mesterséges olajöregítés, Kísérlettervezési módszertan

Abstract: In recent years, as a result of increasing sustainability requirements and environmental regulations imposed on the automotive industry, alternative fuels such as 20% ethanol-blended gasoline (E20) discussed in this thesis have gained increasing attention as renewable energy-based fuels. Comprehensive tribological evaluation of these alternative fuels is essential, as their ingress into the lubrication system may influence the chemical and physical properties of the lubricant. In this research, an artificial ageing method was developed using polyalphaolefin (PAO) base oil contaminated with E20 experimental fuel. The aim of the thesis was to define ideal ageing parameters that allow the average wear scar diameter and coefficient of friction values corresponding to the artificially aged oil to fall within a favourable range for the purposes of the research. To optimise the ageing parameters, Design of Experiments (DoE) methodology was applied in R software, which enables the effects of ageing time and temperature to be mapped. To determine tribological properties an Optimol SRV5 oscillating tribometer was used, while the wear marks observed on the test specimens were analyzed using a Keyence VHX-1000 digital microscope. Based on the results of DoE models, the optimal ageing

parameters were determined to be a temperature of 140 °C and an ageing time of 48 hours. Using these parameters, further artificial ageing tests were conducted with the addition of an anti-wear additive (ZDDP) to examine its effects on the lubricant and the composition of the tribofilm formed. These investigations were carried out using a Thermo Scientific Nexsa G2 X-ray photoelectron spectrometer.

Keywords: Alternative fuel, Artificial ageing, Design of Experiments

1. Bevezetés

Az utóbbi évek során az elektromos és hibrid hajtások dinamikus elterjedése [1], valamint a gépjárműgyártókkal szemben támasztott egyre szigorúbb környezetvédelmi szabályozások miatt arra lehetett következtetni, hogy a belsőégésű motorok háttérbe szorulása kezdetét veszi. Azonban az utóbbi időszak történései azt mutatták, hogy az elektromos és hibrid járművekre történő átállás nem zökkenőmentes, mivel a folyamatot számos akadály hátráltatja. Ezen akadályok közé tartozik többek között az elektromos autók relatív magas előállítási költsége, a piaci igényeket nem teljes mértékben kielégítő hatótávolság és az elektromos töltőhálózat kiépítettségének a hiánya [2].

Ebből kifolyólag a belsőégésű motorok fejlesztése, optimalizálása továbbra is fontos feladata a mérnököknek. Ezen célok elérhetők a hatásfok növelésével, különösen a mechanikai veszteségek, azaz a súrlódó felületek közötti súrlódás mérséklése révén, mindemellett a környezetvédelmi normáknak való megfelelés továbbra is elengedhetetlen. Erre a feladatra megoldást jelenthetnek az akár megújuló energiaforrásból is előállítható alternatív tüzelőanyagok, például etanol, metanol, biodízel. Ezen tüzelőanyagok szemben a hagyományos üzemanyagokkal, sokkal stabilabb forrásból előállíthatók, ugyanis nem igényelnek fosszilis energiaforrást, így függetlenek az egyre inkább kimerülő kőolaj- és földgázkészletektől [3].

Jelen környezetvédelmi normákat tekintve is előnyösebbek az alternatív tüzelőanyagok, ugyanis kedvezőbb károsanyag-kibocsátás érhető el például az etanollal [4]. Azonban ahhoz, hogy a fosszilis tüzelőanyagokról az átállás alternatív tüzelőanyagokra lehetséges legyen, az alternatív tüzelőanyagok széles körű vizsgálata szükséges, technológiai és gazdasági szempontból egyaránt. Kiemelt figyelmet igényel a tüzelőanyag hatásának vizsgálata a kenési rendszerben alkalmazott kenőanyagra, mivel üzemeltetés során a tüzelőanyag egy része bejuthat a kenőolaj-rendszerbe, ahol annak fizikai és kémiai tulajdonságait befolyásolhatja [5, 6]. Mivel a kenőolaj biztosítja az alkatrészek kenését, védelmét, ezért a belsőégésű motor élettartama szempontjából jelentős szerepet tölt be. Tehát a kenőanyag degradációjával csökkenhet a motor várható élettartama, így a tüzelőanyag hatására végbemenő degradációs folyamatok, illetve azok mértékének meghatározása kiemelt jelentőséggel bír. Jelen kutatásban E20 tüzelőanyaggal szennyezett polialfa-olefin (PAO) bázisolaj kerül öregítésre. Az öregítés során alkalmazott paraméterek ideális beállításainak meghatározása kísérlettervezési módszertan segítségével valósul meg. A módszertannal meghatározott optimális paraméterbeállítások jövőbeli kísérletek alapjául szolgálnak, amelynek célja az etanol-tartalmú tüzelőanyagok hatásának vizsgálata a bázisolajhoz hozzáadott kopásgátló adaléokra.

A kísérlettervezési módszertan vagy Design of Experiments (DOE) egy széles körben alkalmazott statisztikai módszer, amely jelen kutatás esetén a mesterséges öregítési eljárás fejlesztésére szolgált. A feltalálása az 1920-as években történt Ronald A. Fisher által, aki a mezőgazdaságban kamatoztatta a kísérlettervezést. A kísérlettervezés során célzottan kiválasztott bemeneti paraméterek kimeneti értékekre való hatása kerül vizsgálatra. A módszer alkalmazásával a bemeneti változóknak a kimeneti változóra való hatásán túl meghatározhatók a változók közötti kölcsönhatások is. Ez különösen hasznos abban az esetben, ha a vizsgált mérési rendszer komplex, így a módszertan alkalmazása nélkül már nincs lehetőség ezen kölcsönhatások meghatározására. A kísérlettervezés célja, hogy a lehető legkevesebb

kísérletből a lehető legtöbb információ kinyerhető legyen, ezzel jelentős mennyiségű pénzt és időt megtakarítva. Legnagyobb előnye – a kiadások csökkentése és idő-megtakarítás mellett – az, hogy azokban a tartományokban is szolgál információval, ahol nem történt mérés, azonban az ilyen tartományokban csak becslő értékkel szolgál. Többféle modell építhető a kísérletek köré, amely a vizsgált rendszer, valamint a változók és az elvégzendő kísérletek száma alapján kerül kiválasztásra [7].

A mai modern kenőanyagok összetételük szempontjából két meghatározó komponensből tevődnek össze, bázisolajból és kémiai adalékanyagokból. Az olajnak számos feladata van üzemeltetés közben, elsősorban egymáson elmozduló felületek kenése, a felületek között fellépő súrlódás és kopás mértékének minimalizálása. További feladatai közé tartozik a kopás során keletkező részecskéknek az eltávolítása, valamint a gépalkatrészek hűtése. A készre formulázott kenőanyag alapvető fizikai tulajdonságait elsősorban a felhasznált bázisolaj határozza meg, míg a teljesítményjellemzők és a tartósság javítása érdekében kémiai adalékanyagok hozzáadása szükséges. Ez biztosítja, hogy a kenőanyag a teljes használati ciklus során megfeleljen az adott alkalmazás követelményeinek. Ilyen adalékanyagok például az antioxidánsok, amelyek az egyik legfontosabb adalékanyagoknak számítanak, ugyanis javítják az olaj fizikai és kémiai tulajdonságait is. Nagymértékben növelik a kenőanyag hőstabilitását, illetve lassítják az oxidációs folyamatokat, aminek köszönhetően az olaj élettartama megnő. További fontos adalékok például a kopásgátló-, korróziógátló-, viszkozitásmódosító adalékok. A készre formulázott olajban az adalékanyagok koncentrációja akár a 20%-ot is elérheti [8].

Azonban a kenőanyagok legmeghatározóbb komponense a bázisolaj, amely az adott kenőanyag főbb fizikai és kémiai tulajdonságainak az alapját képezi, így ez határozza meg legnagyobb mértékben a kenőanyag tribológiai teljesítményét. A bázisolajokat az Amerikai Kőolajintézet (American Petroleum Institute) 5 csoportba sorolja: I. II. III. csoportba tartozó bázisolajok kőolaj-alapú szénhidrogénekből állnak, míg a IV. és V. csoportba tartozó bázisolajok szintetikus polimerekből készülnek [9].

A bázisolajokat 4 fizikai tulajdonsággal jellemzik, ezek alapján meghatározható, hogy milyen teljesítménnyel bírnak használat közben. Egyik ilyen tulajdonság a dermedéspont, ami az a legalacsonyabb hőmérséklet, amelynél még önthető az olaj. Ez kiemelten fontos, ha a kenőanyag tartósan alacsony hőmérsékleteknek van kitéve. Az egyik legfontosabb jellemző a viszkozitás, valamint a viszkozitás index (VI). A viszkozitás megmutatja az olaj áramlással szembeni ellenállását, vagyis azt, hogy mennyire sűrű, vagy híg az adott olaj. A viszkozitás növekedésével nő az áramlással szembeni ellenállása, vagyis magasabb viszkozitási érték sűrűbb olajat jelent. A viszkozitás index megmutatja a viszkozitás változását hőmérséklet függvényében, tehát, hogy mennyire képes stabilan teljesíteni az olaj különböző hőmérsékleteken. További szempont a kenőanyag kiválasztása során annak kémiai tisztasága. Bizonyos kenőanyag összetevők, például nitrogén, kén és egyéb aromás vegyületek szabályozott értékek között kell maradjon, hiszen ezen anyagok túlzott mennyiségben az olaj fokozott degradációját okozhatják [10].

A mesterséges olajöregítés gyakran alkalmazott módszer a tribológia területén, ugyanis a kenőolajdegradáció vizsgálata kulcsfontosságú feladat. Ezzel az eljárással laboratóriumi körülmények között tudjuk bizonyos mértékig szimulálni azokat a degradációs folyamatokat, amelyek az olajban történnek üzemi körülmények között. A valóságot azonban nem képes minden aspektusában reprodukálni, a belsőégésű motorban végbemenő komplex folyamatoknak köszönhetően. Így a mesterségesen öregített olaj nem ugyanazokkal a tulajdonságokkal rendelkezik, mint egy motorból vett olajminta, azonban a költség- és időhatékonyság miatt a mesterséges olajöregítés széles körben alkalmazott eljárás. Nem igényel járműflottát, sem motorfékpadi járatást, illetve sokkal nagyobb mennyiségű olajminta előállítására alkalmas, amivel aztán további kísérleteket például tribométeres járatást, viszkozitás elemzést lehet elvégezni.

Charlotte Besser [11] egy korábbi saját kísérletéből [12] származó olajmintának az állapotát szerette volna reprodukálni mesterséges öregítés során. A reprodukálni kívánt minta egy 1,4 literes turbófeltöltésű benzinmotorból származott, aminek futásteljesítménye kb. 20,000 km volt. 180 liter 5W-30 típusú olaj elhelyezésre került egy rozsdamentes acéltartályba, ahol folyamatos keverés, nagyjából 480 percenkénti fordulatszámon 110-140 °C között volt tartva az olaj, NO₂ és levegő áramlása mellett. A Besser által használt olajöregítési eljárást a 4. ábra mutatja be. Az oxidáció és a nitráció is hasonlóképp alakult: 100 óráig minimális emelkedést mutattak ezek az értékek, majd az ezt követő 100 órában jelentősen növekedett mindkettő és a végső értékük is közel állt egymáshoz. A kopásgátló adalék koncentrációja drasztikusabb változást mutatott, 100 óra után a felére csökkent, 200 óránál pedig már csak 5% maradt. Az összes paramétert figyelembe véve, a mesterségesen öregített olaj nagyon hasonló értékeket mutatott a motorból vett mintához képest.

A korábban már említett emissziós normák betartására és a kőolajalapú erőforrások leváltására az alternatív tüzelőanyagok jelenthetnek megoldást. Alternatív tüzelőanyagok azok az energiaforrások, amelyek megújuló forrásból is előállíthatók, ezzel eltérnek a hagyományos benzin és dízel üzemanyagoktól. Alternatív tüzelőanyagok közé tartoznak a különböző bioüzemanyagok, etanol, hidrogén, illetve benzin-alkohol keverékek, például a kísérletben használt E20 tüzelőanyag is [13].

A hidrogén (H₂) többféle iparágban alkalmazott üzemanyag, a nagy energiasűrűsége és magas lángsebessége miatt. A napjainkban előállított hidrogén 90%-a fosszilis energiaforrásból történik, de előállítható biomasszából és víz elektrolízissel is, amihez a szükséges energiát a nap- és szélenergia biztosítja. A cseppfolyósított gáz (LPG) folyékony halmazállapotú gázok elegye, amely szintén a fosszilis energiaforrásokra támaszkodik. A világon termelt LPG 60%-a üzemanyag kitermelés során történő visszanyerési eljárással készült LPG teszi ki, míg a maradék 40% a kőolaj-finomításból származik. Mivel akárcsak a hagyományos üzemanyagok, a hidrogén és a gáz is javarészt fosszilis energiára támaszkodik, ezért a megújuló forrásból előállítható alkoholok jelenthetik a megoldást a környezetvédelmi szabályozások betartására. Az alkoholok tüzelőanyagként való használatát már a 20. század környékén növekvő érdeklődés övezte. Azon túl, hogy megújuló energiából előállíthatók, használatukkal csökkenteni lehet a belsőégésű motor által kibocsátott üvegházhatású gázokat, amely környezetvédelmi szempontokat szem előtt tartva rendkívül kedvező [14]. A legígéretesebb alkohol-alapú alternatív tüzelőanyagoknak a metanol (CH₃OH), az etanol (C₂H₅OH), a propanol (C₃H₇OH) és a butanol (C₄H₉OH) bizonyultak [13].

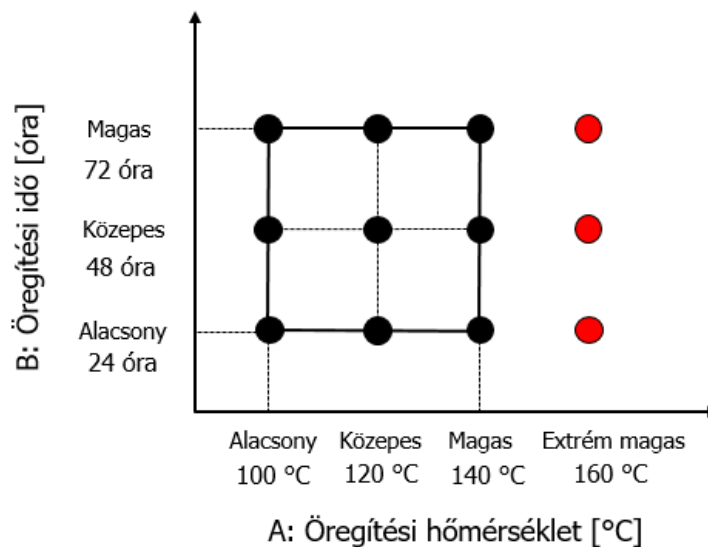
2. Módszertan

2.1. Kísérlettervezési módszertan

A kísérlettervezési módszertan kidolgozásához egy központi kompozit középpontos elrendezés (FCCD) került felhasználásra, amely gyakran kerül alkalmazásra másodrendű válaszfelület illesztésére, tartalmaz axiális, illetve faktoriális pontokat, továbbá középponti ismétléseket. Köszönhetően a felsoroltoknak, a FCCD használatával nem csak a lineáris hatások, hanem a változók közötti kölcsönhatások és kvadratikus tagok is vizsgálhatók [15].

A kísérletek során két bemeneti változó volt: az öregítési idő és az öregítés során alkalmazott hőmérséklet, amely változók együttesen határozzák meg az olaj degradációjának mértékét. A változók alacsony (-1), közepes (0), illetve magas (+1) szintjét, valamint azok valós értékét a 1. ábra mutatja be. A 12 órás fűtési periódusok miatt, az öregítési idő meghatározásánál a 24 órás lépésközök alkalmazása szükséges volt. A Járműhajtás Technológia Tanszéken végzett

korábbi kísérletek során Group III bázisolaj került szennyezése alternatív tüzelőanyaggal, 120 °C-os öregítési hőmérséklet mellett. Így jelen kísérletekhez alkalmazott modell közepes értékének 120 °C-os öregítési hőmérséklet került meghatározásra. A rendszer viselkedésének részletesebb vizsgálata érdekében a hőmérséklet egy magasabb (+2) szinten is vizsgálatra került a későbbiekben az eredeti modell kiegészítésével, amely hozzájárult a modell megbízhatóságának növeléséhez. A vizsgált kimeneti változók a tribométeres kísérletekből származó átlagos kopásátmérő és súrlódási együttható eredmények voltak. A kísérlet során használt központi kompozit középpontos modellt az alábbi 1. ábra mutatja be. Az ábra fekete pontjai az kiinduló modellt jelölik, a későbbiekben kiegészített modellt pedig a fekete és piros pontok együttese alkotja.



19. ábra. A kísérletekhez használt központi kompozit középpontos elrendezés¹³

2.1. Mesterséges olajöregítés

A mesterséges olajöregítés a Széchenyi István Egyetem, Járműhajtás Technológia Tanszéke által épített berendezésén került alkalmazásra. Ennek az eszköznek a célja, hogy laboratóriumi körülmények között szimulálja a kenőolaj üzemi körülmények során lejátszódó degradációs folyamatait, hőkezelés és oxidáció segítségével. Ennek következtében az öregítés során a kenőanyagot hevíteni kell, továbbá folyamatos levegőáramlást kell biztosítani. A levegőáram beállítása rotaméterek segítségével valósult meg, mely 0-10 l/min érték között állítható, a levegőáramlást pedig egy 2 bar-os sűrített levegős rendszer biztosította. A lombikok egy Shoxlet extra-tor erre a célra kialakított fészkeiben kerültek elhelyezésre. A kenőanyag egy háromnyakú üveg lombikba került elhelyezésre, melynek egyik oldalsó nyakán jutott be a meghatározott térfogatáramú levegő. A másik oldalsó kivezetése egy hőmérséklet-érzékelővel volt ellátva, amely közvetlen az öregítendő mintában került elhelyezésre, melynek segítségével szabályozásra került a fűtéshez szükséges teljesítményt. A lombik harmadik (középső) nyaka lezárásra került. Az olajpára és a bevezetett levegő elvezetése egy gázmosó edényen keresztül történt, ezáltal csökkentve a levegőbe juttatott károsanyagok mennyiségét. További szűrés és tisztítás céljából a levegő tovább haladt egy aktív szén tartalmazó üvegbe.

¹³ Saját ábra

2.2. Tribométeres vizsgálatok

A tribológia területén egyik leggyakrabban alkalmazott vizsgálati berendezés a tribométer, ami nagy pontosságú méréseket biztosít különböző anyagok közötti súrlódás és a mérés során használt kenőanyag tribológiai tulajdonságának megismerésére. Jelen kutatás mérései golyó-tárcsa próbatest párosítással történtek, amelynek anyagminősége 100Cr6 volt. A golyó próbatest átmérője 10 mm, a tárcsa átmérője 24 mm, míg magassága 7.9 mm volt. A berendezés lehetőséget adott számos paraméter beállítására, amelyek beállítása a tribométer szoftverében történt. A tribométer 0,001 és 500 Hz közötti frekvenciatartományban képes üzemelni, a mozgás löketének a hossza pedig 0,01 mm és 5 mm között változtatható. A terhelőerő széles tartományban módosítható, ezt figyelembe véve két oszcilláló keret és két kazetta áll rendelkezésre. Az egyik párosítás 200 N-os maximális terhelésig használható, a másik pedig 2000 N-os terhelésig. Ennek értelmében 200 N feletti terhelőerő használatánál a 2000 N-ra hitelesített keret-kazetta párosítást kell használni. További módosítható paraméterek a mérés ideje, az olaj és próbatest-tartó hőmérséklete, mely az olaj esetén maximum 150 °C, míg a próbatestek maximálisan 350 °C-ig fűthetők. A csúszási sebesség pedig 0,0001 m/s-től 0,5 m/s-ig változtatható. Az berendezés egy olajpumpával van ellátva, amely révén végezhető mérések keringtetett közeg használatával, illetve anélkül is. Ez széleskörű lehetőséget biztosít a mérési módszer meghatározásához. A próbatesttartók mind a golyó mind a tárcsa esetében 2,5 Nm-es nyomatékkal lettek meghúzva, ami nyomaték csavarhúzóval történt. A tribométer szoftveres beállítására a hozzá tartozó programban van lehetőség. Itt lehetőség nyílik előre megírt programok kiválasztására, valamint a már említett paraméterek változtatására. A mérés elindítása után a mért értékek – terhelőerő, súrlódási együttható, hőmérséklet stb. - valós időben nyomon követhetők a szoftverben, valamint a szoftver lehetőséget nyújt a súrlódási együttható rögzítésére, még hozzá két lehetőséget kínálva: HRA és SRA adatrögzítéssel. A HRA adatrögzítés 20 kHz frekvenciával rögzíti a löket mentén az értékeket, míg az SRA másodpercre átlagolja a mért értékeket [16].

A kutatáshoz tartozó méréseknél SRA adatrögzítési mód került felhasználásra. A mérések során alkalmazott paraméterek a következők voltak:

- lökethossz: 1 mm
- frekvencia: 50 Hz
- hőmérséklet: 100 °C
- terhelőerő: 50 N
- időtartam: 1 óra
- keringtetett olaj térfogatárama: 225 ml/óra

2.3. Kopásnyom elemzés

A tribométeres mérések után a próbatestek kopásnyomainak vizsgálata következett, amihez egy Keyence VHX-1000 digitális optikai mikroszkóp került felhasználásra, amely segítségével lehetőség nyílik nagyfelbontású képek készítésére a kopásnyomokról, így megállapítható a kopás jellege és mérete is. A próbatest az objektív alatt lévő asztalra került elhelyezésre, majd az irányító konzol segítségével a kopásnyom megkeresésére került sor, majd az optimális élesség és fényerő beállítása következett. Az objektív által rögzített kép egy optikai kábel segítségével volt látható az összekötött számítógépen. A felületanalitika első lépése az átlagos kopásátmérő (AWSD) meghatározása volt, amely az ISO 19291 szabvány szerint történt, tehát a kopásnyomok magasságainak és szélességeinek az átlagából adódott az AWSD

érték [17]. A mikroszkóp egy VH-Z100R típusú objektívvel volt ellátva, jelen esetben a golyók vizsgálata 200x-os, míg a tárcsáké 100x-os nagyítással történt.

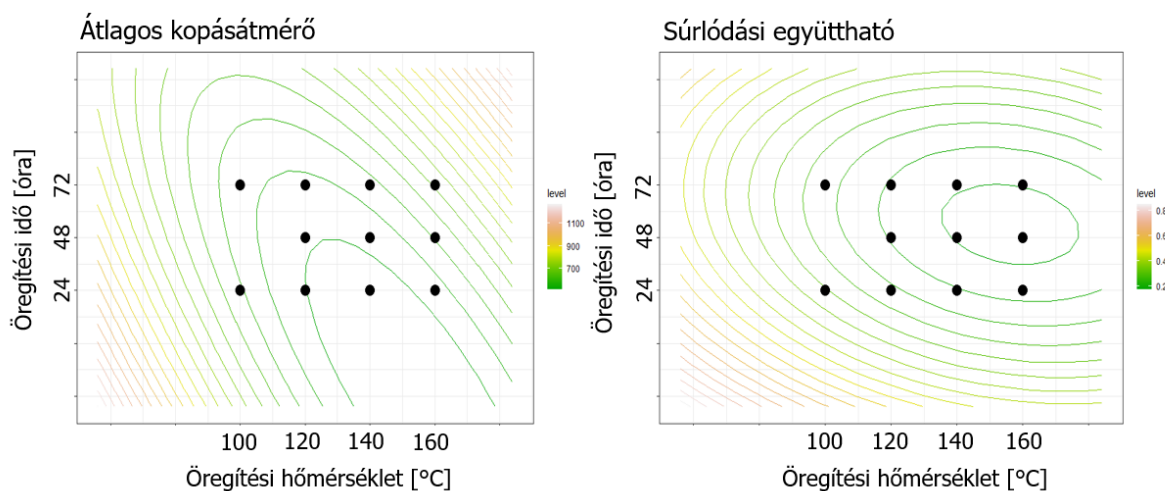
2.4. Felületanalitikai vizsgálatok

Tribométeres járatást követően a létrejött kopásnyomok felületanalitikai elemzése következett. Ehhez egy Thermo Scientific Nexsa G2 röntgen fotoelektron spektrométer (XPS) került felhasználásra, amely egy monokromatizált Al K α röntgenforrással volt ellátva, melynek energiája 1486,4 eV volt. Az XPS technológia széles körben használt a tribológia területén, az egyik lefontosabb felületelemző technológia. Magas vákuum alkalmazása mellett a spektrométer röntgensugárzással gerjeszti a vizsgált minta felületét, a kilépő fotoelektronok energiáját pedig egy detektor elemzi. Ebből meghatározható milyen elemek, milyen arányban vannak jelen a felületen, amely a tribofilm összetételének vizsgálata szempontjából nélkülözhetetlen. A vizsgált próbatestek a vizsgálatokat megelőzően egy ultrahangos tisztítóban, 3 lépcsős eljárással kerültek tisztításra. Először 15 percet töltöttek ciklohexánban 50 °C-on, majd 15 percet acetonban 0 °C-on, végül 15 percet izopropil alkoholban szintén 50 °C-on [18].

3. Eredmények

3.1. Másodfokú modellek kidolgozása

Jelen fejezetben bemutatásra kerülnek a kísérlettervezési módszertan eredményei. Elsőként modellek kontúrdiagramjai.

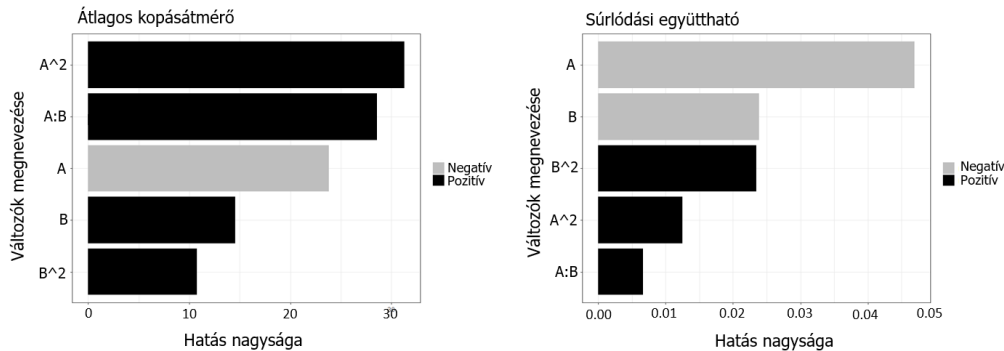


2. ábra. A modellek kontúrdiagramjai¹⁴

A kontúrvonalak színe jelöli a válaszváltozó értékének változását, lehetővé téve a rendszer viselkedésének kétdimenziós értelmezését. A kontúrvonalak elhelyezkedéséből pedig meghatározható, hogy melyek azok a paramétertartományok, amely mentén a válaszváltozó értéke csökken vagy növekszik. Az átlagos kopásátmérő kontúrdiagramja alapján jól látszik, hogy a hőmérséklet és az idő növelésével először csökken majd egy ponton túl nő a

¹⁴ R-program által készített kontúrdiagramok

kopásátmérő értéke, ezt mutatja az alacsonyabb és magasabb paramétertartományban a kontúrvonalak piros színbe tolódása. Az A és B tengelyek mentén megfigyelhető görbület kvadratikus hatások (A^2 , B^2) jelenlétére, míg a szintvonalak ferde lefutása az A:B interakció szignifikanciájára utal. A legalacsonyabb kopásértékek a vizsgált tartomány középső régiójában figyelhetők meg, ami arra utal, hogy az optimális öregítési feltételek nem a szélső paramétereknél, hanem egy köztes tartományban adódnak. A súrlódási együttható kontúrdiagramja alapján bebizonyosodik, miszerint magasabb öregítési hőmérséklet alacsonyabb súrlódási együttható értékeket eredményez, azonban a mélyebb hatás-elemzés a Pareto-diagramok segítségével végezhető el, amelyeket a 3. ábra mutat be.



3. ábra. A modellek Pareto-diagramjai¹⁵

Kopásátmérő tekintetében az öregítési hőmérséklet négyzetes hatása, míg súrlódási együttható szempontjából az öregítési hőmérséklet bizonyult szignifikáns tényezőnek.

3.2. Optimális öregítési pont meghatározása

A modellek véglegesítése után meghatározásra került az az optimális öregítési pont, amely jelen kutatás céljaként szolgált. Olyan paraméterek meghatározása volt a cél, amely mind az átlagos kopásátmérőt (AWS), mind a súrlódási együtthatót (CoF) minimalizálja. Tehát egyik kimeneti változó esetén sem a globális minimumpont meghatározása volt a cél, hanem egy kompromisszumos pont definiálása, amely mindkét kimeneti változó esetén kedvező eredményeket biztosít. Az ideális beállítások meghatározását a két válaszváltozó kontúrdiagramjának elemzése alapozta meg. A két válaszfelület összevetése során a kiválasztott paraméterkombináció az „A” változó esetén +1, „B” változón esetén pedig 0. A rendszer optimális öregítési pontja tehát 140 °C-os öregítési hőmérséklet és 48 órás öregítési idő lett. A meghatározott pont egyik esetben sem igényli a változók szélsőértékre történő beállítását, ami kedvezően hat a modell stabilitására. Az optimum meghatározása megalapozta a későbbi E20 tüzelőanyaggal szennyezett PAO bázisolajjal történő mesterséges olajöregítéseket. A kísérlettervezési modell kidolgozását követően, az optimumpontban további egy olajminta öregítése következett ZDDP kopásgátló adalék hozzáadásával.

3.3. ZDDP kopásgátló adalék által kialakult tribofilm vizsgálata

A kutatás következő lépése a ZDDP kopásgátló adalék jelenlétéből adódó tribológiai határréteg vizsgálata volt. A vizsgálat során 3 olajminta került felhasználásra. Ebből egy a DoE modellek elkészítéséhez használt KM_01_4-es jelzésű olajminta volt, amely kiválasztásának oka, hogy öregítési paraméterei megegyeznek a korábbiakban meghatározott optimális öregítési pont paramétereivel. A további két olajminta jelzése KM_06_2 és KM_06_1 volt. A KM_06_2-es minta friss PAO bázisolaj volt, amely 1 m/m%-os koncentrációban tartalmazott ZDDP-t. Ennek

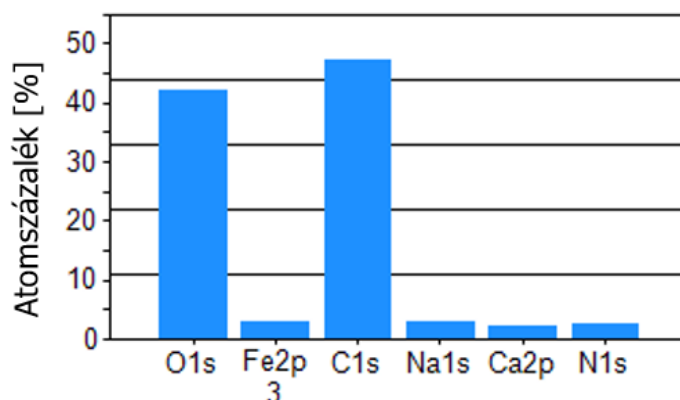
¹⁵ R-program által készített Pareto-diagramok

célja a ZDDP kopásgátló adalék bekeverési eljárásnak sikerességének vizsgálata. A KM_06_1-es jelzésű olajminta a DoE modell által meghatározott optimumpontban került öregítésre. A minta 10 m/m%-ban tartalmazott E20 tüzelőanyagot, illetve 1 m/m%-os koncentrációban ZDDP kopásgátló adalékot. A minta vizsgálatával feltérképezhető a kopásgátló adalék degradációja a mesterséges öregítés során, valamint jövőbeli vizsgálatok során a tüzelőanyag ZDDP-tribofilmre gyakorolt hatása is. A KM_06_1, illetve KM_06_2-es mintákba 1 m/m%-ban került bekeverésre ZDDP, mely por alapú volt (CAS 68649-42-3). A felhasznált por biztonsági adatlapja szerint csupán 68-72% volt a cinksó tartalma, így ennek megfelelően került korrigálásra az olajhoz adott mennyiség. A kísérletekhez felhasznált por alapú ZDDP kopásgátló adalék molekuláris formája az alábbi: $C_{28}H_{60}O_4P_2S_4Zn$. A bekeverés lépései az alábbiakban kerülnek ismertetésre. A poralapú ZDDP olajba való bekeveréséről nem áll rendelkezésre szakirodalom által meghatározott módszer. Az adalék bekeverésére először mágneses keverőn került sor, különböző fordulatszámok és időtartamok mellett, azonban a módszer rendkívül inhomogén mintákat eredményezett. Ennek következtében Tóth Á. D. és Szabó Á. I. valamint munkatársaik által fejlesztett felületaktiválás módszerrel került sor az adalék bekeverésére, melyet elsősorban nanorészecskékhez fejlesztettek ki. Az eljárás lehetővé tette a minta stabilitásának növelését. A felületaktiválás során 1.14 gramm ZDDP-hez 0.1 gramm 90%-os tisztaságú olajsav és 65 gramm 99.8%-os tisztaságú etanol került hozzáadásra. Az így készített minta egy fűthető keverőn 2 órán keresztül 77 °C-os hőmérséklet mellett került folyamatos keverésre. A folyamat során az etanol és az olajsav reakcióba lépett egymással, amelyből etil-oleát keletkezett, amely az adalékanyag részecskéinek a felületén egyfajta védőréteget képez. A keverés során az etil-alkohol elpárolgott, majd az így elkészített keverék egy hőlégsterilizálóban került szárításra 78 °C-os hőmérséklet mellett 16 órán keresztül. Ezt követte a szárított adalék PAO bázisolajba történő bekeverése, mely során 80 gramm olajhoz és 8 gramm toluolhoz került hozzáadásra a felületaktivált ZDDP. A toluol a minta homogenizálásának elősegítése céljából került hozzáadásra, azonban ez teljes mértékben elpárolgott a mintaelőkészítés további lépéseiben. Az így kapott keverék mágneses keverőn került elhelyezésre annak érdekében, hogy az adalék felkeveredjen a főzőpohár aljáról, majd ultrahangos tisztítóban került elhelyezésre 50 °C-on 15 percen keresztül. Utolsó lépésként pedig a minták visszahelyezésre kerültek a mágneses keverőre további 16 órára. A bekeverési eljárást követte a KM_06_1-es minta öregítése, mely a korábbiakban meghatározott paraméterkombinációk mellett történt. A vizsgálathoz szükséges minták az eddigi módszertanhoz hasonlóan tribométeren kerültek járatásra. Az vizsgálathoz szükséges minták azonosítóját és öregítési paramétereit az alábbi 1. táblázat tartalmazza.

Olajazonosító	Öregítési paraméter	Típus
KM_01_4	140 °C, 12 ó, 48 ó	PAO + 10 m/m% E20
KM_06_2	-	PAO + 1 m/m% ZDDP
KM_06_1	140 °C, 12 ó, 48 ó	PAO +10 m/m% E20 + 1 m/m% ZDDP

1. táblázat. A ZDDP-vel szennyezett minták azonosítója és öregítési paramétere

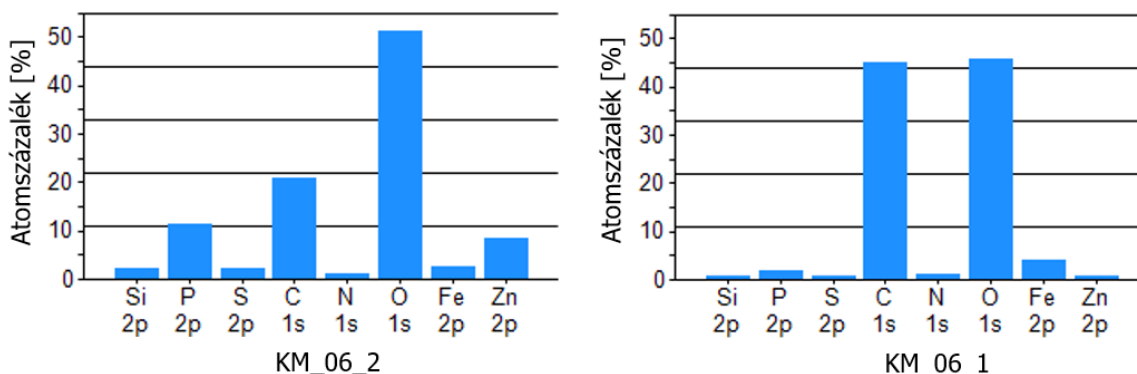
Tribométeres járatást követte a tárcsa próbatestek 3 lépcsős tisztítása, majd a kopásnyomon kialakult tribológiai határreteg vizsgálata. Elsőként a DoE modell kidolgozásához használt KM_01_4-es olajminta által képzett tribofilm került vizsgálatra. A mérések úgynevezett „survey” spektrum eredményei, amely a felületen jelen lévő összes elem azonosítására szolgál, azonban nem ad mélyebb információt azok kötésiállapotáról. A KM_01_4-es minta által képzett tribofilm összetételét az alábbi 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. KM_01_4-es minta által képzett tribofilm atomszázalékos összetétele¹⁶

Az eredmények alapján megállapítható, hogy ZDDP hiányában nem alakult ki funkcionális tribofilm, ahogy ez várható volt. Ennek bizonyítéka, hogy cink, foszfor és kén komponensek nincsenek jelen a tribofilmbe. Az oxigén és szén komponensek dominánsok, melyek feltehetően oxidált szénhidrogén rétegre vezethetők vissza.

A ZDDP tartalmú olajminták bekeverési eljárását, majd a KM_06_1-es minta öregítését követően a tribométeres vizsgálatok kerültek lebonyolításra. A mérések során a KM_06_2, illetve KM_06_1-es minták által képzett határrétegeket az alábbi 4. ábra mutatja be.



4. ábra. A ZDDP tartalmú olajminták által képzett tribofilm atomszázalékos összetétele¹⁷

Az eredmények alapján jól látható, hogy a ZDDP bekeverése sikeres volt, ugyanis mindkét tribofilmbe detektálhatók a ZDDP-re jellemző cink, foszfor és kén komponensek, tehát ZDDP tartalmú tribofilm jött létre a felületeken. Az öregített KM_06_1-es mintánál azonban megfigyelhető az öregítés során végbemenő degradációja az adaléknak, ugyanis jelentősen kisebb mennyiségben van jelen a felületen a cink, foszfor és kén, mint a friss minta esetében. A két határréteg összehasonlítása nem ideális, mivel a KM_06_2-es jelzésű olajminta nem került szennyezésre E20 tüzelőanyaggal, a mesterségesen öregített KM_06_1-es jelzésű mintával ellentétben. Az összehasonlítás elvégzésére a kísérlet tervei szerint egy friss PAO + 10 m/m% E20 + 1 m/m% ZDDP-t tartalmazó olajminta szolgált volna. Így az ugyanilyen adalékokat tartalmazó öregített KM_06_1-es mintával került volna összehasonlításra, azonban a spektrométer váratlan meghibásodása okán jelen kísérletek során ez nem került kiértékelésre. Amint a berendezés megjavításra kerül, a szükséges vizsgálatok elvégzésre kerülnek.

¹⁶ A mikroszkóp kiértékelő szoftverében készített diagram

¹⁷ A mikroszkóp kiértékelő szoftverében készített diagram

A ZDDP kopásgátló adalék bázisolajba történő bekeverése a kísérlet keretei között ugyan sikeresnek bizonyult, azonban megfigyelhető volt, hogy 1 óra után ülepedni kezdett az olajmintában a ZDDP por. Mivel a tribométeres mérések hossza 1 óra volt, a mesterséges öregítés során pedig a folyamatos levegőáram nem hagyta ülepedni a mintát, így jelen kísérletekhez megfelelő volt a bekeverés módszertana. Ugyanakkor egyéb módszertan kidolgozása indokolt a ZDDP bekeveréséhez, hogy a minta hosszabb ideig stabil maradjon. Lehetséges megoldást jelentheti a por alapú ZDDP használata helyett egy folyékony, készre formulázott ZDDP alkalmazása, ami jelen kísérletekhez nem állt rendelkezésre, azonban ez már beszerzésre került, így a további kísérletek fókuszában ez áll.

Jelen alfejezet egy jövőbeli kutatás kezdeti lépéseit mutatta be, melynek célja a ZDDP bekeverési eljárásának fejlesztése, a ZDDP degradációjának a vizsgálata mesterséges öregítés során, valamint az E20 tüzelőanyag hatásának feltérképezése a PAO bázisolaj és ZDDP által képzett tribofilm kialakulására. Ezen jövőbeli kutatási tervek alapját biztosította a kísérlettervezési módszertannal meghatározott optimális mesterséges olajöregítési beállítás.

4. Összegzés

Jelen kutatás során egy mesterséges öregítési eljárás került kidolgozásra, alternatív E20 tüzelőanyaggal szennyezett polialfa-olefin (PAO) bázisolaj alkalmazásánál. A kutatás elsődleges célja egy olyan optimális öregítési pont meghatározása volt, mely alkalmazásával az öregített minta tribométeres vizsgálataiból adódó átlagos kopásátmérő és súrlódási együttható értékek minimális tartományban helyezkednek el. Az ideális öregítési paraméterek meghatározásához kísérlettervezési módszertan került alkalmazásra, központi kompozit középpontos elrendezésben, melynek segítségével a lehető legtöbb információ nyerhető ki, viszonylag kevés kísérletből. Ennek megfelelően összesen 9 különböző E20 tüzelőanyaggal szennyezett olajminta öregítése következett, amelyek tribométeres mérésekhez kerültek felhasználásra. Az öregített minták tribométeres járatásaiból adódó AWSD és CoF eredmények kiértékelését követte a másodfokú modellek kidolgozása, amely az RStudio szoftverben valósult meg. A modellek Pareto-diagramjai alapján meghatározható volt, hogy a kopásátmérő értékek alakulása szempontjából az öregítési hőmérséklet négyzetes hatása szignifikáns, míg a súrlódási együttható esetében az öregítési hőmérséklet. A két modell kontúrdiagramjai alapján kiválasztásra került a kutatás céljaként megjelölt optimális öregítési pont, amely a 140 °C-os öregítési hőmérséklet és 48 órás öregítési időtartam volt. A kutatás következő lépésének központjában a ZDDP kopásgátló adalék által képzett tribológiai határreteg összetétele került vizsgálatra. A vizsgálatokhoz három olajminta került felhasználásra, egy a DoE modellekhez használt PAO + E20-at tartalmazó minta volt, amely a meghatározott optimális öregítési paraméterek mellett került öregítésre. Mindkét további minta 1 m/m%-os koncentrációban tartalmazott ZDDP kopásgátló adalékot. Így készült egy friss PAO + ZDDP-t tartalmazó minta, valamint egy, az optimális paraméterbeállítások mellett öregített PAO + E20 + ZDDP-t tartalmazó olajminta. A két minta vizsgálatával megállapítható volt a ZDDP por bekeverési eljárásának eredménye, valamint az adalék degradációja mesterséges öregítés közben. A tribométeres járatások és a tárcsa tisztítását követte a határretegek összetételének vizsgálata. A vizsgálandó minták hatására képzett tribofilmeik összehasonlításra kerültek. Az eredmények alapján megállapítható volt, hogy az adalékot nem tartalmazó mintánál nem alakult ki funkcionális tribofilm, ahogy erre számítani lehetett. A ZDDP tartalmú minták vizsgálata igazolta, hogy az adalék bekeverése jelen kísérletekhez megfelelő volt, hiszen mindkét kopásgátló adalékot tartalmazó minta hatására létrejött tribofilmben megfigyelhetők az adalék bomlástermékei. Azonban a bekevert mintákban 1 óra után elkezdett ülepedni a ZDDP por, így a bekeverési eljárás fejlesztése indokolt a minták stabilizálása érdekében. Az öregített ZDDP-t

tartalmazó mintánál a tribofilmben kisebb mennyiségben voltak kimutathatók a bomlástermékei az adaléknak, ennek oka az adalék kimerülése az öregítés során.

Összességében a kutatás céljaként megjelölt optimális öregítési pont meghatározásra került kísérlettervezési módszertan segítségével. Az adott pontban ZDDP adalék hozzáadása mellett felületanalitikai vizsgálatok megállapították, hogy az adalék bekeverése sikeres, hisz bomlástermékei kimutathatók a tribofilmben. A kutatás folytatásának tervezett iránya a bekeverési módszertan fejlesztése, a keverékek stabilitása érdekében, valamint az E20 tüzelőanyag hatásának vizsgálata a ZDDP által képzett tribológiai határreteg kialakulására.

5. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] E. Maklári, „Eszter, Maklári, and Béresné Mártha Bernadett. "AZ ELEKTROMOS JÁRMŰVEK SZÁMÁNAK ELTERJEDÉSE ÉS AZ EZT KIVÁLTÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA GLOBÁLIS SZINTEN, AZ EURÓPAI UNIÓBAN ÉS MAGYARORSZÁGON,” *Current Social & Economic Processes/Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok*, 2023.
- [2] A. Pamidimukkala, S. Kermanshachi, J. M. Rosenberger, G. Hladik: „Barriers and motivators to the adoption of electric vehicles: A global review,” *Green Energy and Intelligent Transportation*, vol. 3, no. 2, 2024.
- [3] B. Choongsik, K. Jaeheun: „Alternative fuels for internal combustion engines,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 3, 2017, pp. 3389-3413
- [4] P. Iodice, C. Massimo: „Ethanol/Gasoline Blends as Alternative Fuel in Last Generation Spark-Ignition Engines: A Review on CO and HC Engine Out Emissions,” *energies*, vol. 14, no. 13, 2021, p. 4034
- [5] L. Henera Costa, T. Cousseau, R. S. Martins: „Current Knowledge on Friction, Lubrication and Wear of Ethanol-Fuelled Engines - A Review,” *lubricants*, vol. 11, no. 7, 2023, p. 292
- [6] H. Stancic, H. Mikulcic, B. Wang, N. Diuc: „A review on alternative fuels in future energy system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 128, 2020.
- [7] R. P. Niedz, T. J. Evens: „Design of experiments (DOE)—history, concepts, and relevance to in vitro culture,” *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, vol. 52, no.6, 2016, pp. 547-562
- [8] D. Xia, Y. Wang, H. Liu, J. Yan, H. Lin, S. Han: „Research Progress of Antioxidant Additives for Lubricating Oils,” *lubricants*, vol. 12, no. 4, 2024, p. 115
- [9] N. Hourani, H. Muller, F. A. M, S. P. K, M. Witt, A. A.-H. A, M. S. S: „Structural Level Characterization of Base Oils Using Advanced Analytical Techniques,” *energy&fuels*, vol. 29, no. 5, 2015, pp. 2962-2970
- [10] S. Brown: „Base Oil Groups: Manufacture, Properties and Performance,” *Tribology & Lubrication Technology*, vol. 71, no. 4, 2015.

- [11] C. Besser, A. Agocs, A. Ristic, M. Frauscher: „Implementation of Nitration Processes in Artificial Ageing for Closer-to-Reality Simulation of Engine Oil Degradation,” *lubricants*, vol. 10, no. 11, 2022, p. 298
- [12] N. Dörr, A. Agocs, C. Besser, A. Ristic, M. Frauscher: „Engine Oils in the Field: A Comprehensive Chemical Assessment of Engine Oil Degradation in a Passenger Car,” *Tribology Letters*, vol. 67, no. 68, 2019
- [13] C. Bae, J. Kim: „Alternative fuels for internal combustion engines,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 3, 2017, pp. 3389-3413
- [14] P. Iodice, M. Cardone: „Ethanol/Gasoline Blends as Alternative Fuel in Last Generation Spark-Ignition Engines: A Review on CO and HC Engine Out Emissions,” *energies*, vol. 14, no. 13, 2021, p. 4034
- [15] M. Balachandran, S. Devanathan, R. Muraleekrishnan, S. S. Bhagawan: „Optimizing properties of nanoclay–nitrile rubber (NBR) composites using Face Centred Central Composite Design,” *Materials and Design*, vol. 35, 2012, pp. 854-862
- [16] „Optimol Instruments,” [Online]. Available: https://optimol-instruments.de/en/products/srv5/?utm_source. [Hozzáférés dátuma: 4 december 2025].
- [17] ISO 19291, *Lubricants — Determination of tribological quantities for oils and greases — Tribological test in the translatory oscillation apparatus*, 2016.
- [18] D. R. Baer, K. Artyushkova, C. R. Brundle, J. E. Castle, M. H. Engelhard, K. J. Gaskell, J. T. Grant, R. T. Haasch, M. R. Linford, C. J. Powell, A. G. Shard, P. M. Sherwood, V. S. Smentkowski: „Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy: First steps in planning, conducting, and reporting XPS measurements,” *Journal of Vacuum Science & Technology*, vol. 37, 2019

Az aerodinamikai tényezők szerepe az autonóm járművek energiahatékonyságában

The Role of Aerodynamic Factors in the Energy Efficiency of Autonomous Vehicles

Kulman Csanád

Széchenyi István Egyetem

csaszki.k2002@gmail.com

Absztrakt: A projekt központi feladata egy kompakt, költséghatékony szélcsatorna megtervezése és megépítése volt, amely kifejezetten alkalmas autonóm járművek tetőre szerelt szenzorrendszerei környezetében kialakuló áramlási jelenségek vizsgálatára. A mérési folyamat során az áramlási struktúrák láthatóvá tételét ultrahangos párástíróval oldottam meg; az így képződő részecskéket nagy felbontású kamerával rögzítettem, majd a felvételeket részecskékövetésen alapuló sebességméréssel (PIV) elemeztem. A vizsgálókamra méretezésénél törekedtem arra, hogy a tetőszenzor-modell részletei kellő pontossággal megjelenjenek, ugyanakkor a berendezés fizikai mérete kezelhető maradjon. A szélcsatorna további elemeit – legyen szó a bevezető, a mérő vagy a kilépő szakaszról – ehhez a kamrához igazítva alakítottam ki, hogy az egész rendszer optimálisan működjön. A tesztszakaszban egy Pitot-csővet is elhelyeztem, amelynek statikus és dinamikus nyomásértékeit differenciálmánométerrel mértem. Ezekből az adatokból meghatározhatóvá vált az áramlási sebesség, így a mérési eredmények pontosabbá és hitelesebbé váltak. A belépő oldalon elhelyezett méhsejtrács és a két finomszűrő a turbulens komponensek csökkentését szolgálta, elősegítve az egyenletes, jól definiált beáramlási profil kialakulását. A kilépő szakaszban a négyszög keresztmetszetű csatornarészt fokozatosan kör alakúvá alakítottam át, ezzel biztosítva a levegő áramlásának akadálymentes továbbítását a ventilátor felé. A ventilátor lapátgeometriáját és lapátszámát úgy választottam meg, hogy az alacsony sebességű áramlásokhoz is megfelelő legyen, míg a hub sapka alkalmazása az áramlás homogenitásának javítását szolgálta. A megépített szélcsatorna működését és aerodinamikai viselkedését numerikus CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációval is ellenőriztem, amely lehetővé tette az áramlási mezők, sebességprofilok és turbulencia-intenzitások részletes vizsgálatát. A projekt dupla céllal valósult meg: egyrészt a tetőre szerelt szenzorok környezetében kialakuló turbulenciák feltérképezése és hatásuk értékelése volt a feladat, másrészt a saját tervezésű szélcsatorna mérési pontosságának és megbízhatóságának vizsgálata. Az elkészült rendszer így nemcsak egy konkrét mérési igény kielégítésére alkalmas, hanem alapot teremt további légáramlástanai kísérletekhez és fejlesztésekhez is.

Kulcsszavak: Szélcsatorna, tetőszenzor, áramlásvizualizáció, PIV mérés, CFD szimuláció

Abstract: The main objective of the project was to design and construct a compact, cost-effective wind tunnel specifically suited for examining airflow phenomena around roof-mounted sensor systems on autonomous vehicles. During the measurement process, airflow structures were visualized using an ultrasonic mist generator; the resulting particle patterns were captured with a high-resolution camera and later analyzed through Particle Image Velocimetry (PIV). When designing the test chamber, I ensured that the details of the sensor model were accurately represented while keeping the overall size of the structure manageable. All additional components of the wind tunnel—including the inlet, test, and outlet sections—were adapted to the dimensions of this chamber to ensure optimal system performance. A Pitot tube was installed in the test section to measure both static and dynamic pressures with a differential manometer. These pressure readings enabled the calculation of airflow velocity, thus enhancing the precision and reliability of the measurements. To reduce turbulence at the inlet, a honeycomb structure and two fine filters were incorporated, helping to establish a uniform and well-defined incoming flow profile. At the outlet, the originally square cross-section was gradually transitioned into a circular shape to ensure smooth airflow toward the fan. The fan blade geometry and

blade count were selected specifically for low-speed airflow conditions, while a hub cap was used to further improve flow uniformity. The performance and aerodynamic behavior of the constructed wind tunnel were verified using numerical CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations, which enabled detailed examination of flow fields, velocity distributions, and turbulence intensities. The project was driven by two primary goals: first, to investigate the turbulence developing around roof-mounted sensors, and second, to assess the measurement accuracy and reliability of the custom-built wind tunnel. As a result, the completed system not only meets the requirements of the specific experimental setup but also provides a solid foundation for future aerodynamic research and development.

Keywords: Wind tunnel, roof sensor, flow visualization, PIV measurement, CFD simulation

1. Bevezetés

A dolgozat célja egy olyan aerodinamikai vizsgálat megvalósítása volt, amely autonóm járművek tetőre szerelt szenzorrendszeréhez kapcsolódik, továbbá a numerikus (CFD) és a kísérleti (PIV) áramlásvizsgálati módszerek eredményeinek összehasonlítására is lehetőséget ad. Az autonóm járművek működésében a szenzorok kulcsfontosságú szerepet töltenek be, mivel elhelyezésük és kialakításuk jelentős mértékben befolyásolja a jármű körül kialakuló áramlási viszonyokat, ami közvetlen hatással van a mérési pontosságra és a rendszer megbízhatóságára.

A téma kiválasztását az motiválta, hogy az önvezető technológiák a jövő közlekedésének meghatározó elemei lesznek, és ezek aerodinamikai optimalizálása egyre hangsúlyosabb tervezési követelménnyé válik. A dolgozat gyakorlati részében egy kisméretű szélcsatorna megtervezése, megépítése és működésének vizsgálata valósult meg, amelyben a tetőszenzorrendszer méretarányos modellje szolgált tesztalapként. A vizsgálat numerikus oldalát CFD-szimulációk biztosították, melyek segítségével feltérképeztem az áramlási mezőt, míg a PIV-mérések lehetőséget teremtettek a numerikus eredmények kísérleti úton történő ellenőrzésére. A két módszer összehasonlításának célja az volt, hogy meghatározható legyen a kisméretű szélcsatorna mérési pontossága, valamint értékelhető legyen a kialakított szenzormodell megbízhatósága. A dolgozat ezért átfogóan bemutatja az autonóm járművek aerodinamikai hátterét, ismerteti a szélcsatorna és a makett tervezésének és gyártásának folyamatát, elemzi a CFD- és PIV-vizsgálatok eredményeit, valamint összegezi a két módszer összehasonlításából levonható következtetéseket.

2. Irodalomkutatás

2.1. Autonóm járművek fogalma

Az autonóm, vagy más néven önvezető járművek olyan speciális gépjárművek, amelyek képesek a környezetük valós idejű érzékelésére és a forgalmi helyzetek elemzésére. Ezek a járművek különböző szenzorok, például kamerák, lidar, radar és ultrahangos érzékelők segítségével gyűjtik az adatokat, majd fejlett algoritmusokkal és mesterséges intelligenciával értelmezik azokat. Ennek eredményeként képesek önállóan meghozni a vezetési döntéseket, mint például a sebesség szabályozása, sávváltás, fékezés vagy kanyarodás, anélkül, hogy emberi beavatkozásra lenne szükség. Az önvezető rendszerek célja, hogy a lehető legbiztonságosabb és leghatékonyabb közlekedést biztosítsák, akár mindennapi forgalmi helyzetekben, akár váratlan, rendkívüli körülmények között. A technológia előnyei között szerepel a balesetek számának csökkentése, mivel a járművek képesek gyorsan és pontosan reagálni a veszélyhelyzetekre, valamint a közlekedés hatékonyságának növelése, amely

hozzájárul a dugók mérsékléséhez és a járművek üzemanyag-felhasználásának optimalizálásához. Emellett az autonóm járművek használata csökkentheti a környezetre gyakorolt terhelést, mivel az optimalizált vezetési stratégia kevesebb üzemanyagot igényel, és mérsékli a károsanyag-kibocsátást, ezáltal hozzájárul a fenntarthatóbb közlekedés kialakításához. Összességében az önvezető járművek a közlekedésbiztonság, a hatékonyság és a környezettudatosság szempontjából is jelentős előrelépést jelentenek a modern közlekedési rendszerekben.

2.2. Autonóm járművek története

Az autonóm járművek fejlődése hosszú, fokozatos folyamat volt, amely évtizedeken átívelő kísérletek és innovációk sorozatán alapult. A kezdeti rendszerek működéséhez gyakran a környezet módosítása vált szükségessé, például mágnescsíkok vagy útfelszín alatti vezetékek alkalmazásával. Az első kísérletek már a 20. század elején megkezdődtek: 1921-ben a Radio Air Service mérnökei a McCook Légierő teszthelyszínén mutatták be az első rádióhullámokkal irányított járművet, amely emberi beavatkozás nélkül haladt, míg 1925-ben a Houdina Radio Control cég megalkotta az American Wonder nevű, szintén rádióvezérelt autót. Ezek a kezdeti fejlesztések főként a hadipar támogatásával valósultak meg, amely később az autonóm járművek technológiai alapját is képezte [1].

1940-ben Bell Geddes a „Magic Motorways” című könyvében már az önvezető járművek koncepcióját tárgyalta, felvetve például az automatizált sávváltás és a járműirányítás lehetőségét. Az 1950-es években a kutatások egyre gyakorlatorientáltabbá váltak: Nebraska állam útügyi hivatala L. N. Ress mérnökkel együtt burkolatba épített érzékelőkkel felszerelt járműveket tesztelt, majd 1957-ben bemutatták az első teljesen automatikus járművezérlő rendszert. Hasonló vizsgálatok folytak az Ohio Állami Egyetemen is, ahol különféle érzékelők működését értékelték a rendszer hatékonyságának növelése érdekében [2, 3].

A Continental az 1960-as években kezdett önvezető járművekkel kapcsolatos fejlesztésekbe. 1968 szeptemberében a Heide tesztpályán bemutatták az első prototípust, ami a kor technikai korlátaihoz képest jelentős előrelépésnek számított. Az embereket különösen meglepte, hogy a jármű volánjánál nem ült senki, ezért elnevezték „szellemautónak” [4].

Az 1980-as évek új mérföldkövet jelentettek a területen: Ernst Dickmanns a Mercedes-Benz TN furgonját kamerákkal felszerelve, forgalomtól elzárt úton 100 km/h sebességgel vezette, miközben az Autonomous Land Vehicle (ALV) projekt a Carnegie Mellon Egyetem és a DARPA közreműködésével neurális hálózatok segítségével valósította meg az önvezetést [5], [6].

Az első nagyszabású nyilvános próbát a DARPA 2004-ben rendezte a Mojave-sivatagban. Bár a résztvevő járművek többsége nem teljesítette a pályát, a verseny jelentősen felgyorsította az autonóm technológiák fejlődését. Ma ezek a rendszerek már megjelennek robot-taxi szolgáltatásokban és más önvezető járművekben. Az önvezető járművek előnyei közé tartozik az utasok életminőségének javítása és a közlekedésbiztonság növelése, ugyanakkor gazdasági hatásaik is jelentősek, például a járművezetői munkakörök csökkenése [5].

2.3. Autonóm járművek jogi és etikai kérdései

Az önvezető járművek kérdéskörét nem csupán műszaki, hanem jogi szempontból is vizsgálni kell, hiszen balesetek vagy káresetek esetén tisztázni szükséges, hogy kit – vagy kiket – lehet, illetve kell felelősségre vonni.

A legfontosabb jogi kérdés az emberi élet védelme, amelyet az önvezető járművek irányítását végző program döntései is érinthetnek. Mivel az élethez való jog mindenkit megillet, etikai és jogi problémát jelenthet, ha a jármű baleseti szituációkban kalkulációk alapján értékeli, kinek az élete „ér többet” [7].

A balesetek olykor elkerülhetetlenek, és csak rossz kimenetek közül lehet választani. Mivel a gépek nem hoznak morális döntéseket, az önvezető járművek jogi kérdéseinek rendezéséhez szükség van a törvényalkotók és a gyártók együttműködésére.

2.4. Automatizáltsági szintek

Az önvezetésnek hat szintjét a SAE 2014-ben határozta meg. A 0. szinten a jármű teljesen emberi irányítás alatt áll. Az 1. szintnél megjelennek az alapvető vezetéstámogató rendszerek, amelyek a kormányzást, fékezést vagy gyorsítást segítik. A 2. szint a részleges automatizáltság, ahol a jármű ezeket a műveleteket egyszerre is átveheti. A 3. szinten, a feltételes automatizáltságnál, a szoftver irányítja a dinamikus vezetési feladatokat, de az ember szükség esetén beavatkozhat. A 4. szint már magas szintű automatizáltságot jelent, ahol a rendszer önállóan vezet, bár az ember átveheti az irányítást. Az 5. szintnél pedig teljes önvezetés valósul meg: a jármű akár utasok nélkül is képes biztonságosan közlekedni [8].

2.5 Közlekedési infrastruktúra változása

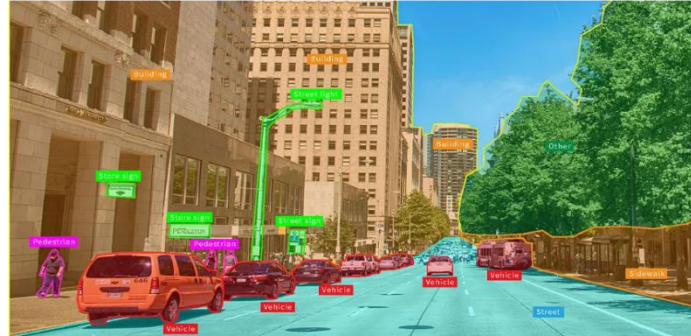
Az önvezető járművek bevezetése előtt fontos elemezni az előnyöket és a hátrányokat. Előnyt jelent a gyorsabb reakcióidő és a pontosabb távolságbecslés, hátrány viszont a korlátozott szögfelbontás, ami megnehezítheti az egymáshoz közeli tárgyak megkülönböztetését. Vegyes közlekedésben ezért különösen lényeges a megfelelő környezet kialakítása, mivel az ember és az autonóm jármű más szögből és magasságból érzékel. A táblák, jelzőlámpák és útburkolati jelek ideális elhelyezése elengedhetetlen, és a kommunikáció javításával az idővesztés is csökkenthető. A jelzőtáblák felismerése problémás lehet kosz, kopás vagy kedvezőtlen fényviszonyok miatt, amit egy útburkolatba épített jelzőrendszer orvosolhat. Emellett biztosítani kell az önvezető járművek kommunikációját a hagyományos járművek sofőrjeivel, a kerékpárosokkal és a gyalogosokkal is [9].

Mivel az önvezető járművek gyorsabban reagálnak és pontosabban tartják a sávot, felmerült annak lehetősége, hogy számukra eltérő sebességhatárokat határozzanak meg. A gyalogosok és kerékpárosok azonban továbbra is fokozott védelmet igényelnek, mivel nincs passzív vagy aktív biztonsági felszerelésük, valamint gyakran hoznak kiszámíthatatlan döntéseket. Ennek kezelése érdekében a járműveknek kommunikálniuk kell velük — például külső kijelzőkkel vagy az útra vetítő fényszórókkal —, és képesnek kell lenniük felismerni az emberi gesztusokat és viselkedésmintákat, hogy biztonságosan reagáljanak a közlekedési helyzetekre [9].

2.6. Tetőszenzor rendszer

Az autonóm járművek környezetérzékelését szenzorok, például lidar segítik, amely az idő alapú távolságmérés elvén működik: a lézerrimpulzus visszaverődésének idejéből számítja a tárgy távolságát, és pontfelhőt hoz létre. A lidar fő előnye az SLAM, amely pontos járműpozíció meghatározását teszi lehetővé, más érzékelőkkel nem elérhető pontossággal. 905 nm-es hullámhossza láthatatlan az emberek számára, így biztonságos. Hátránya, hogy hibái összeadódnak, és kevésbé ellenálló a kedvezőtlen időjárási viszonyokkal, például köddel vagy porral szemben [10, 11].

A kamerák olcsó és részletes képet adnak a környezetről, képesek alak, méret, távolság, mozgás és színek érzékelésére. A gépi látás az 1. ábrán látható. Pontos működésükhöz fontos a felbontás (0,25–40 Mpx), a képkockasebesség (akár több ezer fps) és a dinamika tartomány (általában 60–75 dB, akár 120 dB is), amely segít sötét és világos területek egyidejű megjelenítésében, például alagútban. Hátrányuk, hogy árnyékok, tükröződések vagy



szennyeződések zavarhatják az algoritmusokat [11].

1. ábra. A gépi látás¹⁸ [12]

A GPS három szegmensből áll: az űrszegmens 24 műholdat tartalmaz 6 pályán, így mindig legalább négy műhoddal lehet kommunikálni a pontos helymeghatározáshoz; a vezérlőszegmens 16 földi egységből áll, amelyek felügyelik a műholdakat; a felhasználási szegmens a vevő, amely antennából, processzorból, kijelzőből és áramellátásból áll. Ezek együtt lehetővé teszik a hely, idő és sebesség meghatározását [13].

A radar szenzor nem része általában a tetőszenzor rendszernek. Nagyfrekvenciás elektromágneses hullámokat bocsát ki, amelyek a tárgyról visszaverődve az érzékelőbe jutnak. Ma FMCW (folytonos hullám) technológiát alkalmaznak, amely a frekvenciaeltolódásból számolja a távolságot, és a Doppler-effektus segítségével a relatív sebességet is képes mérni [11].

2.7. Szenzor fúzió

A szenzor fúzió azt jelenti, hogy a szenzorok adatait a járművet vezérlő számítógép összeveti, egyezteteti, hogy minél pontosabb képet kapjon a körülötte lévő környezetről és még az egyes szenzorok hiányosságait is kiküszöböli [14].

Az érzékelőadatok kombinálása három szinten történhet: magas szintű fúzió, ahol a szenzorok külön dolgozzák fel adataikat, majd az eredményeket vetik össze (kevésbé összetett, de pontatlanabb); alacsony szintű fúzió, ahol a nyers adatok egyesülnek, így pontosabb, de bonyolultabb a megvalósítás. A harmadik meg a kettő között helyezkedik el [14].

2.8. Autonóm autók hatása a környezetre

Az autonóm járműveknek a fentartható fejlődésben is kiemelkedő szerepe van, hiszen az emberi tényező ki van zárva és a gép veszi át a helyét. Ennek köszönhetően gépkocsi működése a legoptimálisabban, leghatékonyabban mehet végbe [15].

Az önvezető járművek alkalmazhatók termékelosztó szolgáltatásokban, sofőr nélkül. Egyetlen önvezető autó 11 hagyományos gépkocsit válthat ki, csökkentve az idő-, energia- és pénzráfordítást, valamint a környezeti terhelést: az energiafogyasztás 12%-kal, az üvegházhatású gázok kibocsátása 5,6%-kal mérséklődhet [15].

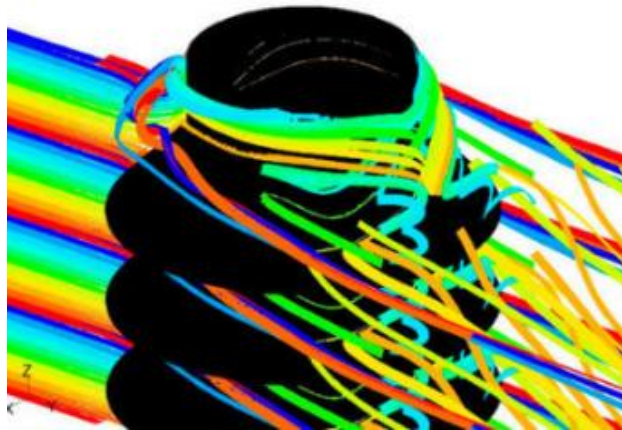
¹⁸ A gépi látás Forrás.: Ambika: What is Computer Vision? (History, Applications, Challenges), Medium, 18 Sept 2023

A megnövekedett járműhasználat miatt csökkenő parkolóhelyek problémáját az önvezető járművek oldhatják meg. Los Angeles-ben az emberek átlagosan 3,3 percet keresnek parkolóhelyre, ami késést, energia- és környezeti veszteséget okoz. Az önvezető autók lehetővé teszik a kettős parkolást, azaz két sorban történő parkolást ugyanazon a helyen, amit a hagyományos járművekkel nem lehet megvalósítani [15].

2.9. Aerodinamika

Az áramlástan a fizika azon ága, amely a folyadékok és gázok mozgásával, valamint nyugalmi állapotával foglalkozik, vizsgálva a közegben fellépő erőket és energiaváltozásokat. Jelentősége széles körű: segíti a járművek energiahatékonyságának növelését, az utastér komfortjának javítását, a biztonsági rendszerek működését, valamint a megújuló energiaforrások, például a szélenergia tervezését [16].

A folyadékokat és gázokat közegként kezeljük, amely lehet összenyomhatatlan (állandó sűrűségű) vagy összenyomható (nyomás, hőmérséklet és térfogat befolyásolja). Az áramlások leírásához fontos fogalmak a pálya, áramvonal, nyomvonal, áramfelület és áramcső, amelyek segítségével a folyadék mozgása geometriailag jellemezhető. A 2. ábrán numerikus szimulációban láthatóak az áramvonalak [16].



2. ábra. A tárgy körüli áramvonalak¹⁹ [17]

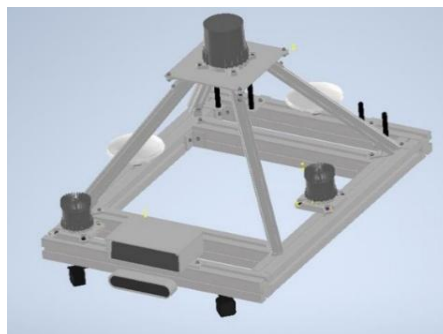
Az áramlástanban az állapotváltozások egyszerű (például izobár vagy izotermikus) és összetett, politropikus formában is vizsgálhatók. A politropikus változások során a hőmérséklet ingadozása a kitevő értékétől függ: minél közelebb van egyhez, annál kisebb a változás, míg az értéktől való eltérés növeli a hőmérséklet-változást [16].

¹⁹ A tárgy körüli áramvonalak Forrás.: Real-Ramirez, C. A.; Carvajal-Mariscal, I.; Gonzalez-Trejo, J.; Gabbasov, R.; Miranda-Tello, J. R.; Klapp, J.: Numerical Simulations of the Flow Dynamics in a Tube with Inclined Fins Using Open-Source Software, Fluids, vol. 7, no. 8, 2022, Paper: 282, DOI: 10.3390/fluids7080282

3. Autonóm járművek tetőszenzor rendszerének 3D modellje

3.1. A makett megtervezése és gyártása

A projekt elsődleges célja az autonóm járművek tetőszenzor rendszerének 3D modelljének elkészítése volt a szélcsatorna vizsgáló szakaszának tervezéséhez. A kezdeti 3D szkennelési próbálkozások, lidar és fotogrammetria alkalmazása nem adta meg a szükséges pontosságot a fényes felületek és színek miatt. Végül a kézi 3D modellezés bizonyult a legalkalmasabbnak, az Autodesk Inventor szoftverben készítettem el a modellt. A modell kisebb méretű autóhoz igazodott a gyártási költség és idő optimalizálása érdekében, az alkatrészeket gyártói adatok vagy műszaki rajzok alapján terveztem meg. A tetőszenzor rendszer különböző lidar szenzorokat, GPS kupolákat, antennákat és kamerákat tartalmazott a valós elrendezésnek megfelelően. A váz alumínium profilokból állt, sarokelemekkel és ISO szabványú kötőelemekkel szerelve. A gyártáshoz 3D nyomtatást alkalmaztam PLA anyaggal, a modellt 46 külön alkatrészből készítettem el 1:5 arányban. Az elemeket ragasztással és alapozott, lakkozott festéssel rögzítettem a kontraszt és tartósság érdekében. A kész makett tartalmazott bakot is, hogy az alatti áramlások jól láthatóak legyenek a szélcsatorna tesztek során. A végső modell pontosan tükrözte a valós tetőszenzor geometriai arányait, és alkalmasnak bizonyult a kísérleti áramlásvizsgálatokhoz, miközben a 3D nyomtatás hatékony és gazdaságos gyártási módszernek bizonyult. A megtervezett modell az 3. ábrán látható.



3. ábra. Megtervezett tetőszenzor rendszer modell²⁰ [19]

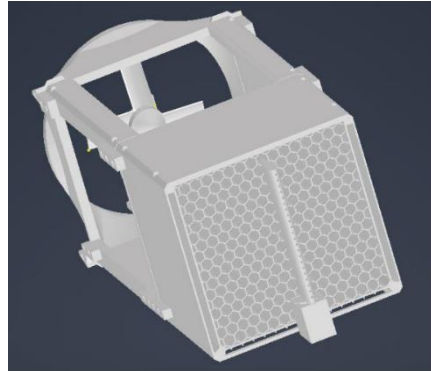
3.2. Szélcsatorna tervezése, gyártása

A projekt célja egy kisméretű és költséghatékony szélcsatorna megtervezése volt, amely megfelel a modell elhelyezésének és megfigyelésének követelményeinek. A vizsgálókamrát a szélcsatorna többi részének paramétereire igazítva terveztem, a keresztmetszetet 200 mm × 200 mm-re választva, sarkait 45°-ban letörve a határréteg leválásának csökkentésére. A hidraulikus átmérő meghatározása lehetővé tette az egységes képletek alkalmazását a különböző szakaszokhoz. A szélcsatorna mérete, alkatrészeinek száma és elrendezése teljes mértékben megfelelt a tervezési követelményeknek, biztosítva a pontos mérési eredményeket. Bár a szélcsatorna kisméretű, a tervezés rendkívül időigényes volt a részletes optimalizáció és a precíz geometriai illesztés miatt.

A szélcsatorna gyártásánál a költséghatékonyság és az időoptimalizálás volt a fő szempont, ezért az elemeket külön-külön készítettem, optimalizált anyagválasztással és gyártási paraméterekkel. A modell FMD típusú 3D nyomtatóval készült PLA anyagból, 0,28 mm rétegvastagsággal és 0,4 mm fűvókával, minimalizálva a támaszok használatát a felületminőség megőrzése érdekében. Az elemek összeszereléséhez M4 csavarokat és sárgaréz betétanyagokat használtam, amelyeket előmelegített forrasztóval helyeztem be, az üvegszakaszokat pedig

²⁰ Megtervezett tetőszenzor rendszer modell Forrás.: Saját szerkesztés.

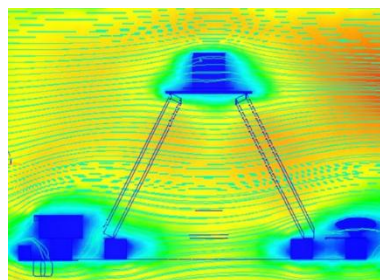
folyékonyragasztóval rögzítettem. A gyártási folyamat során az FMD nyomtatás gyors és költséghatékony prototípusgyártást tett lehetővé, bár sorozatgyártás és nagy pontosság szempontjából korlátai vannak. Az elkészült szélcsatorna megfelelt a tervezési követelményeknek, biztosítva a megbízható működést és a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges pontosságot. A 4. ábra a megtervezett szélcsatornát szemlélteti.



4. ábra. A szélcsatorna 3D-s modellje²¹ [20]

4. Eredmények

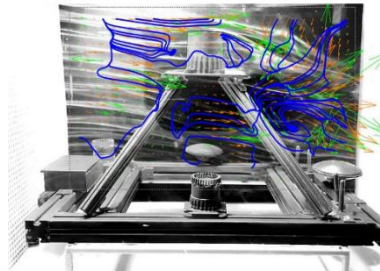
A vizsgálat során először a CFD szimulációval kapott áramvonalakat elemeztem, amelyek jól definiált, sima pályákat mutattak a numerikus simítás és a stacioner megoldás miatt. Az áramvonalak folytonossága egyértelműen kirajzolta a tetőszenzor körüli áramlási mintázatot. Ezt követően a PIV-mérésekből származó áramvonalakat vizsgáltam, amelyek kissé szakaszosabbak voltak, és kisebb lokális örvényeket mutattak a turbulens régiókban. A PIV-eredmények a CFD-modellhez képest változó örvényességet mutattak, de a fő áramlási struktúra jól rekonstruálódott. Összességében a CFD-szimuláció megbízhatóan reprodukálta a PIV-mérések során tapasztalt áramlási mintázatot. A CFD-modellt tekinthetjük referenciának, mivel a numerikus környezetben a határfeltételek és peremparaméterek pontosan beállíthatók. A PIV-mérés, a szélcsatorna méretéből adódó korlátok és a mérési zaj ellenére, jó egyezést mutatott a CFD-eredményekkel. A kisebb eltérések főként peremhatásokból, mérési zajból és a kamera felbontásából származtak. A vizsgálat megerősítette, hogy a kisméretű szélcsatorna alkalmas a járművek tetőszenzor-rendszerének aerodinamikai elemzésére oktatási célokra. A numerikus és kísérleti eredmények együtt biztosítják az áramlási struktúrák megbízható értékelését. A 5. ábra a CFD eredményét szemlélteti, míg a 6. a PIV eredményét szemlélteti [30].



5. ábra. CFD eredménye²² [21]

²¹ A szélcsatorna 3D-s modellje Forrás.: Saját szerkesztés.

²² CFD eredménye Forrás.: Saját szerkesztés.



6. ábra. PIV eredménye²³ [22]

5. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Fabian Kröger: Automated Driving in Its Social, Historical and Cultural Contexts, in: Autonomous Driving, Springer, Cham, 2016, pp. 41–68.
- [2] Shladover, S. E.: Opportunities, Challenges, and Uncertainties in Urban Road Transport Automation, Sustainability, vol. 14, no. 3, 2022, pp. 1853, DOI: 10.3390/su14031853
- [3] Hussein, N.: From da Vinci to cybersecurity: tracing the evolution of autonomous vehicles and ensuring safe platooning operations, Discover Mechanical Engineering, vol. 3, 2024, article number 20, pp. 1–20.
- [4] Lattarulo Arias, R. A.: Validation Of Trajectory Planning Strategies For Automated Driving Under Cooperative, Urban, And Interurban Scenarios, PhD értekezés, Faculty of Engineering Bilbao (ESI), Department of Automatic Control and Systems Engineering (DISA), Bilbao, 2019.
- [5] Behringer, R.: The DARPA Grand Challenge – Autonomous Ground Vehicles in the Desert, IAV2004 – PREPRINTS, 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, July 5–7, 2004
- [6] D. Stamenković, V. M. Popović, I. Blagojević: Az önvezető járművek irányítására használt stratégiák rövid áttekintése, Karbantartási Fórum 2017, Belgrád–Budva, 2017. január.
- [7] A. Hevelke, J. Nida-Rümelin: *Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis*, Science and Engineering Ethics, vol. 21, no. 3, 2015, pp. 619–630, DOI: 10.1007/s11948-014-9565-5.

²³ PIV eredménye Forrás.: Saját szerkesztés.

- [8] Kecskés Gábor: Az autonóm járművek jogi kérdéseinek nemzetközi kontextusa, különös tekintettel a környezetjogi vetületekre. Állam- és Jogtudomány, LXI. évf., 2020/4., 52–64.
- [9] Borsos Attila, Koren Csaba: Az autonóm járművek és a biztonságos közúti infrastruktúra, Közlekedéstechnika, 2021/3, DOI: 10.24228/KTSZ.2021.3.1
- [10] Fink, M., Schardt, M., Baier, V., Wang, K., Jakobi, M., Koch, A. W.: Teljes hullámforma modellezés a fotonok érkezési idején alapuló repülési idő mérésekhez, arXiv preprint arXiv:2208.03426v1 [physics.ins-det], 2022, DOI: 10.48550/arXiv.2208.03426
- [11] Zhou, J.: A LiDAR szenzortechnológiák áttekintése az automatizált vezetés érzékelésében, Tudományos és Technológiai Akadémiai Folyóirat, vol. 3, no. 3, 2022, pp. 255–261, DOI: 10.54097/ajst.v3i3.2993
- [12] Ambika: What is Computer Vision? (History, Applications, Challenges), Medium, 18 Sept 2023
- [13] Krošelj, B.; Igrac, D.: Overview of GNSS Systems and Their Operation, JET, vol. 15, no. 2, 2022, pp. 31–42.
- [14] De Jong, Y., Velasco-Hernandez, G., Barry, J., Walsh, J.: Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review, *Sensors*, vol. 21, no. 6, 2021, 2140, DOI: 10.3390/s21062140
- [15] Szűcs, H.; Szűcs, J.: Az autonóm járművek környezeti fenntarthatósági potenciálja, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, vol. 52, no. 3, 2024, pp. 246–256, DOI: 10.3311/PPtr.23933
- [16] Író Béla: Hő- és áramlástan, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2010, 198 oldal
- [17] Real-Ramirez, C. A.; Carvajal-Mariscal, I.; Gonzalez-Trejo, J.; Gabbasov, R.; Miranda-Tello, J. R.; Klapp, J.: Numerical Simulations of the Flow Dynamics in a Tube with Inclined Fins Using Open-Source Software, Fluids, vol. 7, no. 8, 2022, Paper: 282, DOI: 10.3390/fluids7080282
- [18] Gnatowska, R., Sosnowski, M., Uruba, V.: CFD Modelling and PIV Experimental Validation of Flow Fields in Urban Environments, E3S Web of Conferences, vol. 14, 2017, 01034, DOI: 10.1051/e3sconf/20171401034
- [19] Megtervezett tetőszenzor rendszer modell Forrás.: Saját szerkesztés.
- [20] A szélcsatorna 3D-s modellje Forrás.: Saját szerkesztés.
- [21] CFD eredménye Forrás.: Saját szerkesztés.
- [22] PIV eredménye Forrás.: Saját szerkesztés.

Fűtött illetve hagyományos katalizátor összehasonlítása hidegindításkor

Comparison of heated and conventional catalytic converters during cold starts

Lédeczi Gergő József

9026 Győr, Egyetem tér 1. - Széchenyi István Egyetem
ledezi.gergo@gmail.com

Absztrakt: A tanulmány a hagyományos és a fűtött katalizátorok működését hasonlítja össze személygépkocsik hidegindítása során. A kutatás célja, hogy bemutassa, milyen hatékonyságbeli különbségek adódnak a két technológia között a károsanyag-kibocsátás szempontjából. A hagyományos katalizátor csak a kipufogógázok hőjének hatására éri el a működéshez szükséges hőmérsékletet, így a hidegindítás utáni első percekben a kibocsátás akár 100%-os is lehet. Ezzel szemben a fűtött katalizátor integrált fűtőelemmel rendelkezik, amely azonnali felmelegedést biztosít, és már néhány másodpercen belül képes megkezdeni a káros anyagok átalakítását. A vizsgálatok alapján a fűtött katalizátor akár 40–50%-kal is csökkentheti a kibocsátást azonos útvonalon. A technológia különösen fontos szerepet kaphat a jövőben, mivel az EU7-es környezetvédelmi előírások szigorodása a gyorsabb és hatékonyabb katalizátorok alkalmazását teszi szükségessé. Bár a rendszer jelenleg fejlesztési szakaszban van, várhatóan hamarosan elterjed az új járműmodellekben.

Kulcsszavak: fűtött katalizátor, hagyományos katalizátor, hidegindítás, károsanyag-kibocsátás, autóipar, EU7 szabvány, emissziócsökkentés, katalizátor hatékonyság

Abstract: This study compares the operation of conventional and electrically heated catalytic converters during cold start in passenger vehicles. The aim is to demonstrate the efficiency differences between the two technologies in terms of harmful emission reduction. A traditional catalytic converter reaches its effective operating temperature only through the heat of exhaust gases, resulting in up to 100% emissions in the first minutes after cold start. In contrast, the heated catalytic converter is equipped with an integrated heating element, allowing it to warm up rapidly and start converting pollutants within seconds. Research indicates that heated catalysts can reduce emissions by 40–50% on the same driving cycle. This technology will play an increasingly important role in the future, as the stricter EU7 emission regulations require faster and more efficient aftertreatment systems. Although still in the development phase, heated catalytic converters are expected to become more widespread in upcoming vehicle models.

Keywords: heated catalytic converter, conventional catalytic converter, cold start, exhaust emissions, automotive industry, EU7 regulation, emission reduction, catalyst efficiency

1. Bevezetés

Az autóipar az elmúlt évtizedekben egyre szigorodó környezetvédelmi szabályozásokkal néz szembe. A belső égésű motorok károsanyag-kibocsátása, különösen a szén-monoxid (CO), szénhidrogének (HC), valamint nitrogén-oxidok (NOx) kibocsátása meghatározó tényező a környezeti légszennyezésben. A hagyományos háromutas katalizátorok kulcsfontosságú szerepet játszanak a káros komponensek semlegesítésében, azonban működésük hatékonysága nagymértékben függ az üzemi hőmérséklet gyors elérésétől.

A hidegindítás során a motor és a katalizátor is környezeti hőmérsékleten van, így a katalizátor nem tudja ellátni feladatát az üzemi hőmérséklet eléréséig. A szakirodalom egyértelművé teszi,

hogy a hidegindításból származó emisszió kiemelten nagy arányban járul hozzá a teljes emisszióhoz városi környezetben.

Ennek a problémának a kezelésére fejlesztették ki a fűtött katalizátor technológiát (Heated Catalyst – HCAT), amely elektromos energia felhasználásával gyorsítja a katalizátor bemelegedését. A technológia jelentős fejlődésen ment keresztül az elmúlt tíz évben, és napjainkra az EU7 szabályozás egyik lehetséges kulcseleme lett.

2. Szakirodalmi áttekintés

A fűtött katalizátorok fejlesztésének szükségességét elsőként a nagy arányú hidegindítási emisszióra vonatkozó kutatások támasztották alá. Kutatók kimutatták, hogy egy városi ciklus során a teljes károsanyag-kibocsátás akár 60–80%-a is hidegindításhoz köthető [1]. Ez a jelenség főként annak tudható be, hogy a katalizátor csak a 250–300 °C-os üzemi hőmérséklet hőmérséklet elérése után kezd hatékonyan működni.

Kutatók tanulmánya részletesen vizsgálta az elektromosan fűtött katalizátorok hőmérséklet-szabályozását, és arra jutott, hogy megfelelően vezérelt fűtési stratégia esetén akár 50%-os emissziócsökkentés is elérhető [2]. Más kutatók ugyancsak kiemelik, hogy a hagyományos katalizátorok késleltetett aktiválódása a városi körülmények között jelentős mértékű CO- és HC-kibocsátást okoz [3], [4].

A fűtött katalizátorok energiahatékonyságát és működési karakterisztikáit több tanulmány is vizsgálta. Egy tanulmány szerint az optimális fűtési algoritmusok akár 20–30%-kal csökkenthetik az energiafelhasználást, míg más kutatások azt találták, hogy a 48 V-os fedélzeti rendszer jelentős előnyöket biztosít a fűtés gyorsasága és stabilitása tekintetében [5], [6], [7]. Kutatók arra is rámutatnak, hogy a fűtött előkatalizátorok különösen hatékonyak hibrid járművekben, ahol a gyakori motorleállítások és hidegindítások miatt kritikus fontosságú az emisszió gyors csökkentése [8]. Az EU-s normák szigorodását vizsgálva elengedhetetlen, hogy az EU7 teljesítéséhez új katalizátortechnológiák – köztük a fűtött katalizátor – bevezetése [9]. A szakirodalom összességében négy fő területet emel ki:

1. **Gyorsabb üzemi hőmérséklet elérés** – akár 70%-kal rövidebb idő.
2. **Jelentős CO–HC–NO_x csökkentés** – 40–60% tartományban.
3. **Energiaoptimalizálás szükségessége** – akkumulátor- és vezérlésfejlesztés.
4. **EU7 megfelelés és jövőbeli alkalmazások** – hibrid és belső égésű járművekben egyaránt.

3. Hagományos és fűtött katalizátorok működése

A hagyományos katalizátor szerkezete alapvetően egy extrudált, méhsejt szerkezetű kerámiatömbből áll, amelyet nemesfémek – jellemzően platina (Pt), palládium (Pd) és ródium (Rh) – vékony rétege von be. A reakciók során ezek a nemesfémek biztosítják a kémiai átalakításokhoz szükséges katalitikus felületet.

A katalizátor lelke a méhsejtszerkezetű kerámia (többnyire kordierit alapú), amely nagy hőállósággal és mechanikai stabilitással rendelkezik. A porózus felület lehetővé teszi, hogy a nemesfémeket tartalmazó bevonat (washcoat) egyenletesen tapadjon rá. A kerámia feladata, hogy maximális felületet biztosítson a kipufogógáz és a katalizátor aktív komponensei között.

Emellett a kerámia jó hőtároló képessége segíti a katalizátor gyors felmelegedését, ami elengedhetetlen a hatékony károsanyag-átalakításhoz.

A palládium napjaink egyik leggyakrabban használt katalizátor-féme, különösen benzinmotorokban. Kiemelkedően hatékony az oxidációs reakciókban: elősegíti a szén-monoxid (CO) és a nem elégett szénhidrogének (HC) átalakítását kevésbé káros anyagokká (CO₂ és H₂O). Előnye, hogy olcsóbb, mint a platina, és jobb ellenállóságot mutat a kénnel és más szennyezőkkel szemben. Az utóbbi években a palládium iránti kereslet emelkedett, részben a szigorodó emissziós szabályozások miatt.

A ródium különleges szerepet tölt be a háromutas katalizátorokban: ez a legfontosabb fém a nitrogén-oxidok (NO_x) redukciójához. A ródium képes a NO_x-ot nitrogénné (N₂) alakítani, amely már ártalmatlanul távozik a környezetbe. Ritka és nagyon drága nemesfém, emiatt a katalizátorokban kis mennyiségben alkalmazzák, mégis nélkülözhetetlen a károsanyag-kibocsátási normák teljesítéséhez.

A platina sokáig a katalizátorok legfőbb aktív féme volt. Rendkívül hatékony mind oxidációs, mind redukációs folyamatokban, ezért dízelmotorok katalizátoraiban ma is gyakori. Nagy hő- és korrózióállósága hosszú élettartamot biztosít. Hátránya a magas költség és az, hogy bizonyos szennyezőanyagokra érzékenyebb lehet, mint például a palládium.

A katalizátorok hatásfoka a kerámia hordozó és a nemesfémek (palládium, ródium, platina) együttes alkalmazásán alapul. A kerámia biztosítja a struktúrát és a hatalmas aktív felületet, míg a nemesfémek végzik a káros gázok átalakítását. A palládium főként oxidációs folyamatokban jeleskedik, a ródium a NO_x-redukció nélkülözhetetlen komponense, míg a platina sokoldalú, de drága katalitikus anyag. Együtt alkotják azt a rendszert, amely a modern motorok környezetterhelését nagyságrendekkel csökkenti.

A katalizátorok élettartama alapvetően 120–200 ezer kilométer közé tehető, de ideális körülmények között akár a jármű teljes élettartamát is kiszolgálhatják. A valós élettartam azonban jelentősen függ a motor állapotától és az üzemeltetés minőségétől. A túl dús keverék, az olajégés, a gyújtáshibák vagy az elégetlen üzemanyag jelenléte a katalizátor túlmelegedéséhez, eltömődéséhez vagy a kerámia hordozó károsodásához vezethet. A szennyező anyagok – például kén, ólommaradványok vagy bizonyos adalékok – hosszú távon „mérgezik” a nemesfémeket, csökkentve a katalitikus aktivitást. Mechanikai igénybevétel, kátyúk, ütközések szintén kárt okozhatnak a törékeny kerámia struktúrában.



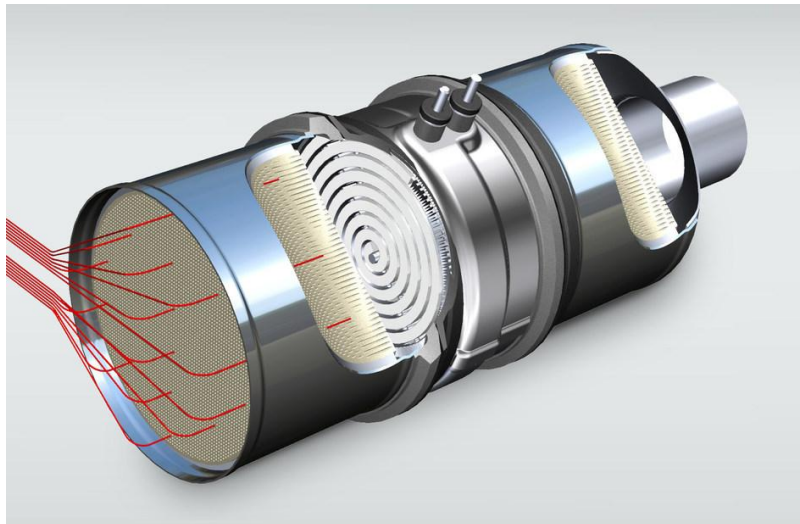
1. ábra. Hagyományos katalizátor szerkezete²⁴

A katalizátor működési elve az oxidációs és redukációs reakciókon alapul. Az oxidáció során a CO és a HC komponensek oxigén jelenlétében szén-dioxiddá és vízzé alakulnak, míg a

²⁴ <https://debrouxautomotive.com/catalytic-converters-their-purpose-and-importance/>

redukciós folyamat a NO_x vegyületek bontását végzi, nitrogén és oxigén atomokra. A katalizátor akkor működik optimálisan, ha a keverék aránya közel van a sztöchiometrikus értékhez ($\lambda = 1$).

A fűtött katalizátor ugyanazon az alapelven működik, mint a hagyományos, azonban kiegészül egy integrált elektromos fűtőelemmel, amelyet az elektronikus vezérlőegység (ECU) szabályoz. A fűtőszál segítségével a katalizátor magja már néhány másodperccel a motorindítás után eléri a 250–300 °C-os hőmérsékletet, így a katalitikus folyamat szinte azonnal megkezdődhet. A fűtés teljesítménye általában 500–1000 W közötti, amelyet a jármű 12 V-os vagy 48 V-os elektromos rendszere táplál.



2. ábra. Fűtött katalizátor szerkezete²⁵

Ezzel a megoldással jelentősen csökkenthető a „hidegindítási emisszió”, azaz a kibocsátás, ami a katalizátor üzemi hőmérsékletének eléréséig keletkezik.

4. Hidegindítás és emissziós különbségek

A hidegindítás utáni első percek a városi közlekedés során a legkritikusabbak. Egy átlagos, 10–15 perces városi útvonalon a teljes károsanyag-kibocsátás 60–80%-a ebben az időszakban történik. A hagyományos katalizátor csak 30–60 másodperc után kezdi meg a reakciót, és az üzemi hőmérsékletet 1–3 perc alatt éri el. Ez idő alatt a kipufogógázok szinte szüretlenül jutnak a légkörbe.

A fűtött katalizátor ezzel szemben már 5–10 másodperc után képes megkezdni a katalitikus reakciókat, és 15–30 másodperc alatt eléri a teljes hatékonyságot. Mérések és modellezések alapján egy azonos városi ciklus során a fűtött katalizátor akár 40–50%-kal is képes csökkenteni a kibocsátást a hagyományos rendszerhez képest. Alacsony környezeti hőmérsékletnél (–10 – +5 °C) még jelentősebb különbségek mérhetők a hagyományos és fűtött katalizátorok között. A technológia bevezetése azonban nem mentes a kihívásoktól. Az elektromos fűtés többletenergiaigényel, amelyet vagy nagyobb akkumulátorkapacitással, vagy fejlettebb energia-visszanyerő rendszerekkel kell biztosítani. További nehézséget jelent a hőterhelés kezelése és a fűtőelem élettartamának biztosítása. Emellett a gyártási költségek is magasabbak, ami befolyásolja a technológia piaci elterjedését.

A környezetvédelmi szabályozások, különösen az EU7 normák azonban egyre szigorúbb határértékeket írnak elő. Ez a trend hosszú távon arra ösztönzi az autógyártókat, hogy a fűtött

²⁵ https://mma.prnewswire.com/media/1200437/BENTELER_Catalytic_Converter.jpg?p=publish&w=950

katalizátorokat vagy azok kombinált megoldásait (pl. elektromos előmelegítő rendszerrel vagy hőtárolós megoldásokkal) alkalmazzák a jövőbeli motorfejlesztések során.

5. Összefoglalás

A fűtött katalizátor technológia hatékony és ígéretes megoldást kínál a hidegindításból származó emissziók csökkentésére. Az integrált fűtőelemek lehetővé teszik, hogy a katalizátor a motorindítást követően néhány másodpercen belül elérje a szükséges üzemi hőmérsékletet, így drasztikusan csökken a szén-monoxid, a szénhidrogén és a nitrogén-oxid kibocsátás.

A kutatások egyértelműen alátámasztják, hogy a fűtött katalizátorok alkalmazásával akár 40–50%-os emissziócsökkentés is elérhető. Ugyanakkor a technológia jelenleg még fejlesztési és optimalizálási fázisban van, különös tekintettel az energiaigényre, költséghatékonyságra és megbízhatóságra.

A jövő járművei várhatóan integrált, hibrid megoldásokat alkalmaznak majd, ahol a fűtött katalizátor, az elektromos előmelegítés és a hőtároló anyagok kombinációja biztosítja a lehető leggyorsabb és leghatékonyabb károsanyag-átalakítást.

A szigorodó európai kibocsátási normák (EU7) bevezetésével a fűtött katalizátorok beépítése nemcsak technológiai előrelépést, hanem környezetvédelmi kötelezettséget is jelent. A fejlesztések iránya egyértelműen abba az irányba mutat, hogy a jövő járművei még tisztább, fenntarthatóbb és hatékonyabb közlekedési eszközökké váljanak.

6. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Ning, Jianhua (2016): *Temperature Control of Electrically Heated Catalyst for Reducing Cold-Start Emissions*. Journal of Automotive Engineering.
- [2] Müller, Thomas – Schaub, Alexander (2018): *Activation Delay of Three-Way Catalysts Under Urban Driving Conditions*. Emission Control Science and Technology.
- [3] Hada, Kiyoshi – Yamamoto, Shun – Takeda, Hiroshi (2020): *Impact of Cold-Start on Urban Driving Emissions*. International Journal of Vehicle Design.
- [4] Kim, Seongmin – Lee, Jinhyuk (2019): *Light-Off Behavior of Heated Catalysts in Low-Temperature Environments*. Applied Thermal Engineering.
- [5] Nakamura, Yuto – Suzuki, Kenji – Arakawa, Daichi (2021): *Energy Optimization Strategies for Electrically Heated Catalysts*. IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [6] Fuchs, Leonhard – Berger, Markus – Schneider, Paul (2017): *Thermal Conductivity of Catalyst Substrates and Light-Off Performance*. SAE Technical Paper.

- [7] Lee, Jinwoo – Kim, Hyunsoo (2022): *Advantages of 48V Architectures for Catalyst Heating Systems*. Journal of Power Electronics.
- [8] Brehm, Andreas – Schuster, Daniel – Varga, Tobias (2015): *Cold-Start Emission Modelling in Real-World Driving Cycles*. Transportation Research Part D.
- [9] Romano, Davide – Caruso, Marco – Bellini, Stefano (2020): *EU Emission Standards and Aftertreatment System Requirements*. Environmental Engineering Review.
- [10] Zhang, Yu – Cheng, Wei – Huang, Long (2019): Heated Pre-Catalysts in Hybrid Vehicles. Journal of Cleaner Production.
- [11] Szalai, Péter – Tóth, Ádám (2018): Cold-Start Emission Trends in the Hungarian Vehicle Fleet. Közlekedéstudományi Szemle.
- [12] Küllei, Károly (2021): Elektromosan fűtött katalizátor. Autótechnika.

Olajtartály tervezése vezérműlánc-tesztpadhoz

Design of Oil Tank for Timing Chain Test Bench

Madácsi Belian

Széchenyi István Egyetem

belian0722@gmail.com

Absztrakt: Dolgozatom témája a Széchenyi István Egyetemen épült vezérműlánc-tesztpadhoz tervezett olajtartály fejlesztése. Az átalakítás fő célja, hogy megoldást nyújtson a tesztelt láncok kenésére szolgáló motorolaj hőveszteségének minimalizálására, ugyanis a tesztpad próbaüzeme során az olaj nem tudta elérni a kívánt 100 °C hőmérsékletet. Ez azért jelent problémát, mert a motorban ez a jellemző olajhőmérséklet, így jellemzően a tribológiai vizsgálatokat is ezen a hőmérsékleten szokás végezni, ha üzemileg motort kívánnak szimulálni. Az olajtartály kialakítása során különös figyelmet fordítottunk arra, hogy egyszerűen legyártható és szigetelhető legyen, valamint szükség esetén fűthető, így képes legyen minimalizálni, illetve kompenzálni a hőveszteséget a rendszerben. A jelenlegi tartály alakja, anyaga és űrtartalma szempontjából sem ideális, ezért új tartályt kell tervezni, melynek űrtartalma, alakja, anyaga és elhelyezése is jobban megfelel a kitűzött céloknak. Az olajtartály tervezése során a hőszigetelés optimalizálásán túl figyelembe vettük a fűtés lehetőségét, mivel az olajkondicionáló önmagában nem fogja tudni a kívánt hőmérsékletre fűteni az olajat még az optimalizált tartállyal sem. Az olajtartály így kulcsfontosságú elem a vezérműlánc-tesztpad működésében, hozzájárulva a valós körülményeket jobban közelítő és megismételhető tesztparaméterek eléréséhez, amelyek elengedhetetlenek a modern járműipari fejlesztésekhez.

Kulcsszavak: kenési rendszer, motorvezérlés, vezérműlánc-tesztpad, olajtartály

Abstract: The topic of my thesis is the development of an oil tank designed for a timing chain test bench built at Széchenyi István University. The main objective of the modification is to provide a solution for minimizing the heat loss of the engine oil used for lubricating the tested chains, since during the trial operation of the test bench the oil was unable to reach the desired temperature of 100 °C. This poses a problem because this is the typical oil temperature in an engine, and tribological tests are usually carried out at this temperature when simulating an engine at operating conditions. During the design of the oil tank, special attention was paid to ensuring that it is easy to manufacture and insulate, as well as capable of being heated if necessary, so that it can minimize and compensate for heat losses in the system. The current tank is not ideal in terms of shape, material, and capacity, therefore a new tank must be designed with improved volume, geometry, material, and placement to better meet the intended objectives. In addition to optimizing thermal insulation, the possibility of heating was also taken into account, since the oil conditioner alone will not be able to heat the oil to the required temperature, even with an optimized tank. Thus, the oil tank becomes a key component of the timing chain test bench, contributing to the achievement of more realistic and repeatable test parameters, which are essential for modern automotive development.

Keywords: lubrication system, timing system, timing chain test bench, oil tank

1. Bevezetés

Az autóipar gyors átalakuláson megy keresztül, mivel a technológiai fejlődés üteme rendkívül gyors. Egyre több hibrid és elektromos autó jelenik meg az utakon. Ennek ellenére a belsőégésű motorok várhatóan még sokáig jelen lesznek, különösen a hibrid hajtásláncok részeként, mivel évekbe telik, amíg kiépül világszerte a teljesen elektromos közlekedést és az ehhez szükséges teljes töltési infrastruktúra. Ezen kívül a nyersanyagok globális hiánya és az infláció az utóbbi években valószínűleg lelassítja az elektromos járművek terjedését [1].

Ezért fontos feladat a belsőégésű motorok emissziójának csökkentése. Ez egyrészt a motorok hatékonyságának növelésével, másrészt CO₂-semleges üzemanyagok használatával érhető el. A motorok hatékonyságát javíthatjuk az égési folyamat fejlesztésével vagy a motor belső veszteségeinek, például a súrlódási veszteségek csökkentésével. A mechanikai és hőterhelés mellett az üzemanyagok is jelentősen befolyásolják a kenőolaj öregedését és a motor tribológiáját, ezért az újonnan bevezetett CO₂-semleges üzemanyagokat is figyelembe kell venni [2] [3].

Az új típusú motorolajok és üzemanyagok használata esetén a kenőolaj minőségére érzékeny alkatrészekre különös figyelmet kell fordítani. Ilyen komponensek például a turbófeltöltő csapágyak, a főtengely csapágyak és a vezérműlánc. Ezek közül a vezérműlánc a legkényesebb a kenésre, így a kopás sebessége kritikus tulajdonság, mivel ezt a láncot az egész motor élettartama alatt használni kell. Ezért fontos ellenőrizni a kenőolaj minőségében bekövetkezett változások hatását a lánc kopására, valamint az olaj öregedését és szennyeződését befolyásoló tényezőket, mint például az égési folyamat és az üzemanyag [3].

A fentiek alapján a lánc tesztelésének fontossága kiemelkedő szerepet játszik, ezért a Széchenyi István Egyetemen egy tesztpad fejlesztése van folyamatban, amely jelenleg mechanikailag elkészült, és már tesztüzemben működik. A teljes funkcionalitáshoz már csak egy megfelelő vezérlőprogram megírása szükséges. Az első tesztek során kiderült, hogy az olajkör optimalizálásra szorul, mivel az üzemeltetés alatt a rendszer nem éri el a kívánt 100 hőmérsékletet. A dolgozat célja ennek a problémának a megoldása, különös tekintettel az olajkörhöz szükséges olajtartály tervezésére.

2. Vezérműlánc feladata

A vezérműlánc a belsőégésű motorok kulcsfontosságú alkatrésze, amely a főtengelyt és a vezérműtengelyt összekötve biztosítja a szívó- és kipufogószelepek pontos időzítését. Ennek a feladatnak a végrehajtása elengedhetetlen a motor hatékony működéséhez, mivel a megfelelő időben nyíló és záródó szelepek garantálják a megfelelő mennyiségű friss töltetet, valamint a kipufogógázok hatékony távozását [4].

A vezérműlánc működése hozzájárul a motor teljesítményének és üzemanyag-hatékonyságának növeléséhez, csökkenti a motor vibrációját, és javítja a teljesítmény leadását, ezáltal csökkentve a károsanyag-kibocsátást is [5].

A vezérműlánc tartóssága miatt hosszabb élettartamot biztosít, mint a vezérműszíj, és nem igényel olyan gyakori cserét. Ez nemcsak a motor megbízhatóságát növeli, hanem a karbantartási költségeket is csökkenti. Mindezek mellett a pontos időzítés és a motor hatékony működése révén a vezérműlánc hozzájárul a környezetvédelmi normák betartásához, mivel csökkenti a motor által kibocsátott káros anyagok mennyiségét [5].

3. Alternatív tüzelőanyagok

Az alternatív tüzelőanyagok olyan megoldásokat jelentenek, amelyek csökkenthetik az üvegházhatású gázok kibocsátását és fenntarthatóbb közlekedési lehetőségeket biztosítanak. Ezek közé tartoznak többek között a bioüzemanyagok, a hidrogén és a szintetikus üzemanyagok (e-fuel) [6].

Az EU célja, hogy 2035-re fokozatosan betiltsa a fosszilis tüzelőanyaggal működő belső égésű motorok forgalmazását, részeként a "Fit for 55" programnak, amely az Európai Zöld Megállapodás része. Ez a stratégia az EU klímasemlegességét kívánja elérni 2050-re. Az alternatív tüzelőanyagok, például a bioüzemanyagok, hidrogén és szintetikus üzemanyagok viszont kivételek lehetnek a szabályozás alól, mivel ezek karbonsemleges vagy alacsony szén-dioxid-kibocsátású lehetőségeket kínálnak [6].

Az e-fuel (szintetikus üzemanyagok), amelyeket hidrogénből és szén-dioxidból állítanak elő, valószínűleg továbbra is használható lesz a belső égésű motorokban, mivel ezek gyakorlatilag semlegesítik a szén-dioxid-kibocsátást. Emellett a bioüzemanyagok is fontos szerepet kaphatnak a jövő közlekedési rendszereiben, mivel fenntartható forrásokból származnak. Továbbá például az E10, E85 – etanolt tartalmazó keverékek, amelyek fosszilis üzemanyagok és megújuló energiaforrások kombinációjával készülnek.[7] [8].

A szintetikus üzemanyagok jobban hasonlítanak a hagyományos üzemanyagokhoz, így kevésbé befolyásolják a motor alkatrészeit. Az égés során kevesebb káros melléktermék képződik, ami csökkenti a korrózió és a lerakódások kockázatát, így javítja a vezérműlánc élettartamát [7] [8].

4. Olaj szennyezői

A közvetlen befecskendezésű motorok hatékony égési folyamataik révén népszerűek a modern járműiparban, ám ennek ellenére több olyan szennyezőanyag is keletkezik, amely negatívan befolyásolja a motor élettartamát és a környezetre gyakorolt hatást. Az olaj szennyezése ezekben a motorokban különösen fontos kérdés, mivel magasabb az égési hőmérséklet és a befecskendezett üzemanyag közvetlenebbül érintkezik az égéstérrel, ami szennyeződést okozhat az olajban.

a. Kormosodás

A koromrészecskék motorolajhoz való hozzáadása jelentős hatással van a motoralkatrészek kopására. A kutatások azt mutatják, hogy a koromszennyezés növeli a kopást, és a kopás nem egyenesen arányosan nő a koromtartalom növekedésével. A korom akadályozza a kenőolaj adalékainak hatását, és gátolja a ZDDP reakciófilmek képződését és ezzel növeli a kopást, A korom abrazív hatása a motorokban további jelentős kopást okoz [9].

4.2. Üzemanyag és égéstermékek

A korom mellett egyéb szennyezőanyagok, például a nem elégett üzemanyag és az égés során keletkező savas vegyületek is bekerülhetnek a motorolajba. A nem elégett üzemanyag a hengerfal és a dugattyúgyűrűk közötti olajjal keveredve jut a forgattyúházba, és ott hígítja az olajat, ami csökkenti annak kenési tulajdonságait. Ezen túlmenően a motorban képződő savas égéstermékek reakcióba léphetnek a motorolajjal, ami oxidációs folyamatokat indíthat el. Az oxidációs melléktermékek hozzájárulnak az olaj elsavasodásához, amely szintén károsíthatja a motor alkatrészeit, például a csapágyakat és a tömítéseket [10].

4.3. Fémtartalmú részecskék

A közvetlen befecskendezésű motorokban a kopás miatt apró fémtartalmú részecskék is bekerülhetnek az olajba, különösen a vezérműtengely csapágycsapágyai, a dugattyúk és a szelepvezérlő rendszerek kopása révén. Ezek a fémrészecskék tovább növelik az olajban lévő szennyezőanyagok mennyiségét, ami felgyorsíthatja a motor alkatrészeinek kopását és korrózióját [11] [10].

5. Vezérműlánc kopásának típusai

A vezérműlánc kopása többféle módon jelentkezhet. A leggyakoribb probléma a lánc megnyúlása, amely a hosszabb távú használat során a fémek közötti súrlódás eredményeként alakul ki. A lánc megnyúlása a motor teljesítményét és a vezérműtengely-főtengely szinkronizációját is veszélyeztetheti, ami súlyos mechanikai problémákhoz vezethet. Az ilyen jellegű hibák észlelése és megelőzése különböző diagnosztikai módszereket igényel. Számos módszer létezik a vezérműlánc kopásának vizsgálatára, kezdve a motorfékpadai teszttől a tribológiai modellkísérleteken át a szimulációkig. Az elmúlt évtized kutatásai kimutatták, hogy a komponens- vagy tribométeres tesztek sok esetben helyettesíthetők a költséges motoros tesztelési tesztekkel. A szimulációk tovább csökkenthetik a fejlesztési költségeket és időt, de kísérleti adatokra van szükség a modellhez, ezért azokat nem lehet teljesen elkerülni.

6. Mérési technikák

a. Lánckopás mérése

A lánckopás mérésére egyedi tervezésű mérőműszereket használnak, amelyek a lánc hosszabbodását mérik. Ezek a műszerek nagy merevségű vázra épülnek, és általában két állítható koronggal vannak ellátva. Miután a láncot elhelyezték a korongokon, egy meghatározott erővel megfeszítik, és a korongok közötti távolságot mérőórával vagy optikai módszerrel mérik. A távolság változásából a lánc teljes hosszabbodása vagy annak egyes csuklóra vetített hossza kiszámítható. Más lánccnyúlás-mérő eszközök is léteznek, amelyek csak a lánc egy szegmensét fogják meg és mérik meg feszített állapotban. Az eredményt ezt követően vetíthető a teljes lánc hosszabbodására.

b. Üzemi vizsgálat

Az üzemi tesztek általában ritkák, mivel a teljes terméket valós működési körülmények között tesztelik. A járműveket hosszú távú teszteknek vetik alá közutakon vagy tesztpályákon, majd a teszt végén a motort szétszerelik, és a vezérműlánc kopását mérik, ahogy az feljebb említésre került. Az ilyen tesztek tökéletesen tükrözik a valós felhasználást, de természetükből adódóan sok véletlenszerű befolyásoló tényezőt tartalmaznak, amelyek nehezítik a megismételhetőségüket [13].

c. Motorfékpadi tesztek

Ennél a tesztelésnél általában magasabb terhelésnek és intenzívebb használatnak vannak kitéve, mint amire a valós használat során számítunk. Modellezzük a legrosszabb esetet, hogy felgyorsítsuk az alkatrészek öregedését, és időt és pénzt takarítsunk meg. A motorfékpádon a motorok folyamatosan működhetnek magas terhelés mellett, akár nagyobb terhelések vagy szélsőségesebb körülmények között is, mint amilyeneket járműben lehetne létrehozni. A tartóssági teszt során az alkatrészek kopását hagyományosan periodikus kopásmérésekkel ellenőrzik. Ehhez a tesztet meg kell szakítani, és a motort szétszerelni, hogy ellenőrizzék a lánc kopását a feljebb bemutatott módszerekkel [14].

d. Égés nélküli motortesztek

A vezérműláncokat gyakran tesztelik motorokban égés nélkül (külső hajtással), hogy meghatározzák a zajszintet, a súrlódási veszteségeket vagy a kopást. Az ilyen tesztek fontos információkat nyújthatnak a motor súrlódási veszteségeiről, kopásáról, vibrációiról és zajáról. Bár a láncra ható terhelés amplitúdója égés nélkül kisebb, a láncot egy forgás során érő erők közel állnak a valós működéshez. Az egyetlen jelentős különbség az égési eseményekből származó gerjesztések. Következésképpen ez a módszer alkalmas különböző láncok és olajminőségek összehasonlítására egy adott motorban [16] [17].

e. Komponens tesztek tribométeren

A tribométeres tesztek vezérműláncok esetében is használhatók. Általában a lánc egyetlen csuklóját tesztelik a tribométeren. A hüvelyes lánc esetében ez egy csap és egy hüvely vizsgálatát jelenti, de az összeszerelés többféleképpen is történhet, például csap-a-hüvelyben (mint az eredeti lánccsukló esetében) vagy hüvely-a-csapon konfigurációban. A csap-a-hüvelyben konfiguráció egyértelmű előnye, hogy valóság-hű összeállításban és terhelés mellett vizsgálja a lánccsuklót, ezért nevezik lánccsukló tribométernek is [18]. A hüvely-a-csapon konfiguráció távolabb áll a valós rendszertől, mint a csap-a-hüvelyben, mivel a csap a hüvely külső felületével érintkezik, és ez a kontaktus pontszerű. Előnye, hogy a meglévő oszcilláló tribométerek többsége alkalmas erre a beállításra, csak egy egyedi adapter tervezése szükséges, így nem kell külön tribométert fejleszteni vagy vásárolni erre a célra [19]. A golyó-tárcsa teszt széles körben használatos motorolajok vizsgálatára. Pontszerű érintkezése, a terhelés és a kenési mód, valamint a kopásnyom formája hasonló a korábban bemutatott hüvely-a-csapon teszthez. A fő különbség a vizsgálati minták anyagában rejlik. A golyó-tárcsa teszthez általában lepellát tárcsákat és polírozott 10 mm-es csapágygolyókat használnak; mind a golyó, mind a tárcsa 100Cr6 anyagú, az ISO 19291:2016 szabvány szerint, mivel nagy kopásállóságú és a magas széntartalom miatt jól mutatja a kenőanyag viselkedését nagy terhelés és pontszerű érintkezés alatt [20] [21].

f. Kopásszimuláció

Napjainkban a számítógépes szimulációs modellek egyre inkább átveszik a kísérleti módszerek szerepét a kutatás és fejlesztés számos területén. Azonban a kopást annyi tényező befolyásolja, hogy csak empirikus képletek segítségével lehet szimulálni nagyobb felületek vagy alkatrészek szintjén. Ez azt jelenti, hogy a kopás alapvető folyamatát ismerni kell ahhoz, hogy a szimuláció során meg lehessen határozni a kopási térfogatot. Ehhez szükséges egy sor hagyományos tribológiai vizsgálat és mérés az adott rendszer tribológiai modelljén [22]. Megfelelően felépített szimulációs modellekkel a valós folyamatok modellezhetők, ha elegendő adat áll rendelkezésre a korábbi mérésekből. A szimuláció tehát költséghatékony eszköz, de az adott tribológiai rendszerhez kapcsolódó empirikus adatok elengedhetetlenek [23].

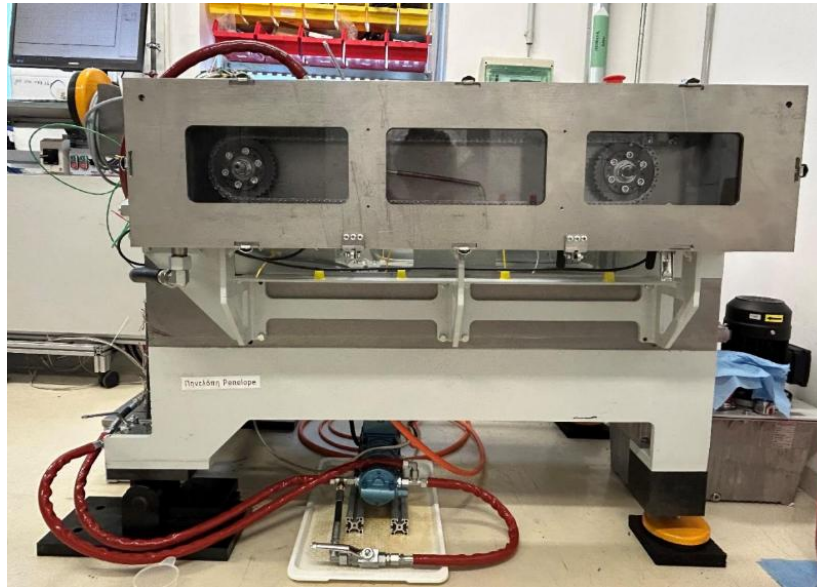
g. Lánc tesztpadok

A meghajtó lánc gyártói és kutatóintézetek gyakran használnak komponens tesztelő padokat a láncok tesztelésére. A tesztek célja a láncok súrlódási veszteségeinek, kopásának vizsgálata. A céloktól függően a tesztpadok felépítése is eltérhet, de általában egy elektromos motor hajtja a vezérműláncot. Amikor a cél az, hogy a láncot egy adott belsőégésű motorhoz optimalizáljuk a zaj és a súrlódás minimalizálása érdekében, a teljes lánchajtást lánccavezetőkkel és feszítővel szokásosan egy merev vázra építik, amely geometriailag megfelel a motornak. A láncot ezután dinamikus terhelésnek vetik alá. Egyszerűbb elrendezésű tesztpadokat – tipikusan lánccavezetők nélkül általában a kopásállóság tesztelésére használják. A kopást általában egy állandó feszítőerő nyomaték generálásával idézik elő. A láncokat általában párban tesztelik, két láncot egyszerre szerelnek fel a meghajtó és a hajtott tengelyek végén elhelyezett lánckerekekre. A feszítést úgy lehet megvalósítani, hogy az egyik tengelyt elmozdítják, a két lánckerék egymáshoz képest forgatásával, vagy két elektromos motor szinkron használatával, amikor az egyik motor hajt, és a másik fékez a láncokon keresztül [24] [25]. A komponens tesztpadok előnye, hogy a teljes láncokat a lánckerekekkel együtt lehet tesztelni. A terhelés egyszerűsített a motoros tesztekhez képest, de a tesztek költségei is jelentősen alacsonyabbak. Ugyanakkor a terhelés még nagyobb is lehet a motorban lévő terheléshez képest, így a kopást gyorsítani lehet [24] [26]. A komponens tesztpadokon végzett méréseket rendszeres időközönként meg kell szakítani a lánc hosszabbodásának méréséhez. Ezeket a megszakításokat azonban el lehet kerülni, ha a tesztpadot megfelelő pontosságú pozíció- vagy szögérzékelővel szerelik fel, amely lehetővé teszi a láncok hosszabbodásának mérését működés közben [24].

7. Tanszéki tesztpad felépítése

A vezérműlánc tesztpad célja, hogy a lánchajtások dinamikus és tartóssági vizsgálatát támogassa, reprodukálva a valós üzemi körülményeket különböző terhelési és hőmérsékleti viszonyok között. A tesztpad egy villanymotorral van felszerelve, amely különböző fordulatszámokon tudja működtetni a láncokat, lehetővé téve a lánc viselkedésének alapos elemzését különböző üzemi környezetben. A lánc feszességét egy állítható láncceszítő eszköz segítségével módosítják, ami tovább növeli a tesztelési lehetőségeket. Hőmérséklet-érzékelőkkel is fel van szerelve, amik folyamatosan figyelik a láncok és a tartályba visszaérkező olaj hőmérsékletét, ami azért lényeges, mert a hőmérséklet erősen befolyásolja a kenést. Emiatt, valamint a megismételhetőség miatt rendkívül fontos a pontos hőmérsékletszabályozás. A

tesztelési eljárás során a vezérműláncot különböző fordulatszámok, terhelési szintek és hőmérsékleti viszonyok mellett vizsgálják, lehetővé téve a lánc kopásának üteméről, az anyagfáradásról és a lánchajtás általános megbízhatóságáról szóló pontos adatok gyűjtését. Ezek az adatok lehetőséget adnak a vezérműláncok fejlesztésére, például az anyagösszetétel javítására vagy a kenési rendszerek optimalizálására, így növelve a lánc teljesítményét és élettartamát. Ez a tesztpad tehát egy rendkívül fontos eszköz a vezérműláncok fejlesztési folyamatában, amely megbízható adatokat szolgáltat a tervezési és gyártási folyamatok finomhangolásához és lehetővé teszi a lánchajtások hosszú távú optimalizálását és megbízhatóságának javítását.

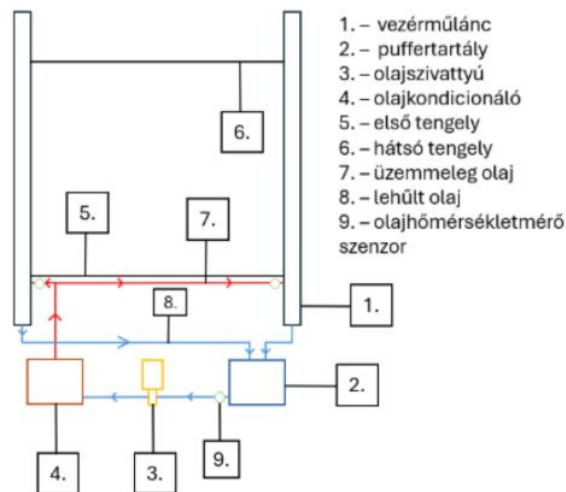


20. ábra. Széchenyi István Egyetem vezérműlánc-tesztpadja²⁶

8. Korábbi olajkör és olajtartály problémái

Az olajkör alapvető fontosságú volt a próbapad működésében. Feladata az volt, hogy felmelegítse, szállítsa és eljuttassa a kenőanyagot a vizsgálandó vezérműláncokhoz, ezáltal szimulálva a belsőégésű motorban fennálló valós üzemi körülményeket. Az olajkör egy puffertartályból, olajszivattyúból, befecskendező fűvókából és egy olajkondicionálóból állt. Három különböző ponton hőmérséklet-érzékelőket telepítettek az olaj hőmérsékletének mérésére.

²⁶ Saját szerkesztés



2. ábra. Előző olajkör felépítése²⁷

A tesztpad fő problémája korábban a kenőolaj hőntartása volt, ugyanis az olaj túl gyorsan vesztett hőmérsékletéből, miközben végighalad a rendszeren. Az olaj hőmérséklete azonnal csökkenni kezdett, miután elhagyta az olajkondicionálót, a szállítócsövek hőmérséklet különbsége miatt. A legnagyobb hőmérsékletcsökkenést a vezérműláncról visszatérő olaj szenvedte el a láncdoboz felületén. Ezt követően az olaj visszafolyt a puffertartályba, ahol tovább hűlt, mielőtt újra eljutott volna az olajkondicionálóba. Az egység nem tudta elég gyorsan visszamelegíteni az olajat a kívánt hőfokra, mielőtt az visszaindult volna a vezérműlánc felé.

a. Korábbi olajtartály problémái

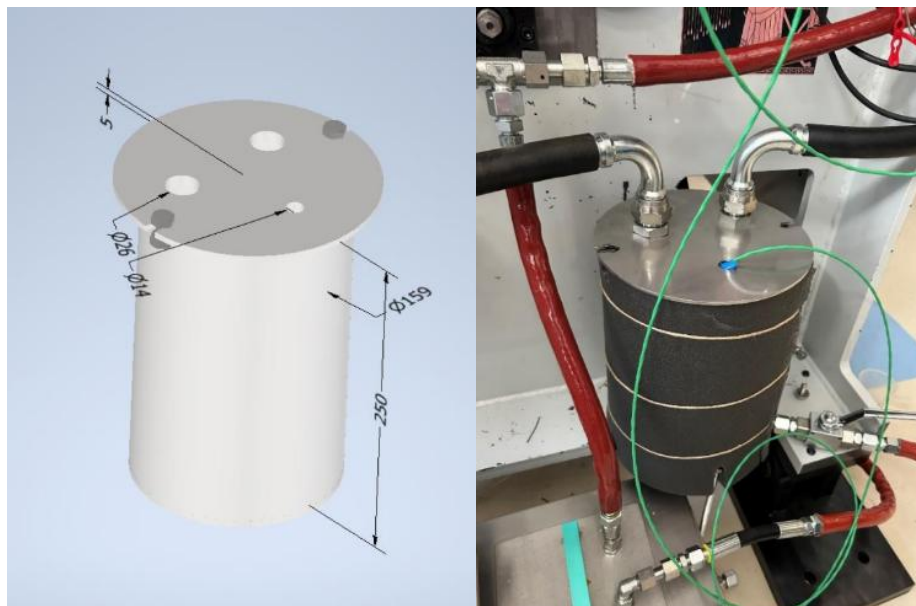
Az előző puffertartály egy benzintartály átalakításával készült. Alumíniumból készült, 20 cm magas, 18 cm széles és 30 cm hosszú, amely megközelítőleg 10 liter folyadék tárolását teszi lehetővé. Feladata az olajfelesleg tárolása és folyamatos ellátása volt a szivattyú számára, amely így az olajkondicionálót is kiszolgálja. A vezérműláncokról lefolyó kenőolaj két csövön keresztül érkezik a tartály felső nyílásán keresztül, azonban ez a két cső bele van préselve ebbe az egy nyílásba. Emiatt nem volt zárható a tartály felülről, ami forró olajnál a szagok és a párolgás miatt nem előnyös, főleg, ha szennyezni akarjuk például üzemenyaggal. Ebben az esetben a zárt rendszer elengedhetetlen. A tartály kivezetőnyílása az oldalán volt elhelyezve, ami megakadályozta, hogy a tartály teljesen kiürüljön, ha arra lenne szükségünk. A külső szivattyú ezen a kimeneti nyíláson keresztül szívta ki az olajat és továbbította az olajkondicionáló felé. Ez a puffertartály egy verseny célú alumínium üzemenyag-tartály volt, amit azért használtunk, mert ez állt rendelkezésre és tudtuk, hogy ideiglenes megoldás lesz. A cél az, hogy a lehető legkevesebb olajtérfigatot keringtessük a rendszerben. Azért volt szükség rá, mert a láncdobozba érkező nyomott olajat a lánc szétfröcskölte a doboz belső falára, ahonnan csak lassan folyt vissza. A kezdeti olajmennyiség nagy része a két láncdobozban és a visszafolyó csőben maradt, viszkozitástól függően ez dobozonként akár 2-3 dl is lehetett. A tartálynak ezt az elvesztett olajmennyiséget kellett pótolnia a tesztelés előtt. Emellett fontos volt biztosítani, hogy a szivattyúba buborékmentes olaj érkezzon, vagyis a tartályban lévő olajsint elegendően magas legyen a kifolyónyílásnál. Az alumínium magas hővezetése miatt a tartály átadta a benne lévő olaj hőjét a környezetnek, ami hátrányos volt, mivel a kondicionálónak több

²⁷ H. Balázs, „Vezérműlánc-tesztpad olajkörének optimalizálása,” Széchenyi István Egyetem, Győr, 2024.

energiára és időre volt szüksége az olaj üzemi hőmérsékletre történő visszafűtéséhez. Azonban több megoldás is létezik ennek a problémának a kezelésére, például a tartály külső hőszigetelése vagy fűtőszálak beépítése.

9. Az olajtartály tervezése

A vezérműlánc kopás teszteléséhez olyan tesztpadot kellett kialakítani, amely képes hosszú távú és valós üzemi körülmények szimulálására. A megfelelő kenés elengedhetetlen a vezérműlánc zavartalan működéséhez, ezért az olajtartály elsődleges funkciója, hogy biztosítsa a folyamatos olajáramlást a lánchoz. Emellett fontos szempont volt a hőmérséklet szabályozása, mivel a motorolaj hőmérséklete befolyásolja a kenés minőségét és a lánc kopási jellemzőit. A tervezés másik fontos célja az volt, hogy egy olyan rendszert alakítsunk ki, amely képes fenntartani az olaj megfelelő áramlását, valamint minimalizálni az olajban keletkező szennyeződések. Az olajtartály kapacitása és formája szintén meghatározó volt, hogy könnyen legyártható és szigetelhető legyen, továbbá szükség esetén fűthető.



3. ábra. A tartály 3D modellje, valamint beépítve a tesztpadra²⁸

A tartály anyagválasztása során különös figyelmet kellett fordítani az anyagok korrózióállóságára, hőállóságára és mechanikai tulajdonságaira. Olyan anyagot kell választani, amely rosszul vezeti a hőt. Ez segít lelassítani az olaj hőmérsékletének csökkenését a tartályban, minimalizálva a hőveszteséget a környezetbe. Az anyagnak ellen kell állni az olaj kémiai adottságaival szemben is. Az olajtartályhoz rozsdamentes acélt választottuk mivel hővezetési tényezője (kb. 15-25 W/mK) alacsonyabb, mint az előzőben használt alumíniumé (205-250 W/mK), ami jobb hőszigetelést eredményez. Ezzel egyetemben képes ellenállni a szélsőséges hőmérsékleteknek anélkül, hogy deformálna. A rozsdamentes acél kiváló korrózióállósággal rendelkezik, ellenáll a különböző kémiai anyagoknak, beleértve az olajokat is. Ez hosszabb élettartamot és kevesebb karbantartási igényt eredményez. Ez az anyag jól alkalmazható a motorolajjal érintkező alkatrészeknél, és hosszú távon megőrzi tartósságát.

²⁸ Saját szerkesztés

Az olajtartály térfogatának meghatározása kulcsfontosságú volt a rendszer megbízható működése szempontjából. A tartály térfogata 2,5 liter, ami elegendő ahhoz, hogy a tesztpadfolyamatos működése során megfelelő mennyiségű kenőanyagot biztosítson, figyelembe véve az olaj szükség szerinti utánpótlását. A tartály alakja hengeres, mivel ez a forma ideális a tartály könnyű gyárthatóságához, ugyanis rozsdamentes acél csövet olcsón lehet venni és így nincs szükség hajlításra, valamint hegeszteni is csak az alját kell, a tetejét pedig 2 csavarral rögzítjük. Ezen kívül a tisztítást, hőszigetelést és a fűtést is jóval egyszerűbben tudjuk megoldani szükség esetén. A korábbi tartállyal ellentétben most az aljára került az elvezető nyílás, így könnyebb az áramlás, illetve kiürítés esetén nem marad bent felesleges olaj. A tartályba visszavezető csövek bevezetését is átalakítottuk, így már nem egy, hanem külön-külön nyíláson mennek keresztül. amik hermetikusan zártak, a szabványos elemekből épített csatlakozóknak köszönhetően.

10. Hőmérséklet szabályozás

Az olajtartály első tesztelése során hamar szembesültünk egy váratlan problémával: az olaj hőmérséklete nem érte el a kívánt üzemi tartományt, ami jelentősen befolyásolta a vezérműlánc kopásának szimulációját. A cél az volt, hogy a tesztpad valós motorüzemi körülményeket szimuláljon, ahol az olaj hőmérséklete 90-100°C közötti tartományban mozog. Azonban a tartályban használt olaj nem melegedett fel kellőképpen, még folyamatos működés mellett sem. Ez azért volt különösen fontos, mert az olaj viszkozitása és kenőképessége nagymértékben függ a hőmérséklettől. A kezdeti tesztek során a hőmérséklet stabilan 50-60°C körül mozgott, ami nem volt elegendő a megfelelő kenési körülmények létrehozásához, valamint a lánc terhelésének szimulálásához. Ennek a problémának a megoldására úgy döntöttünk, hogy a csőhosszokat a lehető legkisebbre vesszük és ezeket, valamint szükség esetén a tartályt is szigeteljük, az áramlási sebesség ne legyen túl gyors, mert akkor az olajkondicionálóban lévő spirálban nincs ideje felmelegedni az olajnak, továbbá egy fűtőrendszert integrálásán gondolkodtunk az olajtartályba. Az egyszerűség és költséghatékonyság érdekében fűtőpaplan alkalmazását választottuk, amelyet közvetlenül a tartály külső felületére helyeznénk. A fűtőpaplan olyan elektromos fűtőelem, amely gyorsan és egyenletesen képes hőt juttatni a tartály falán keresztül az olajhoz, biztosítva ezzel a kívánt hőmérséklet elérését és fenntartását. A fűtőpaplan teljesítményét úgy választjuk meg, hogy az képes legyen a tartályt hőn tartani a szigetelés alatt. A fűtéshez 567 W teljesítményű fűtőpaplant kell használnunk. A számítást 2.5 l olajjal csináltam, mert kezdetben ennyi olajra terveztük a tartályt, később azonban a biztonság kedvéért hosszabbra vágtuk a csövet, amiből a tartály van.

11. Jelenlegi olajkör

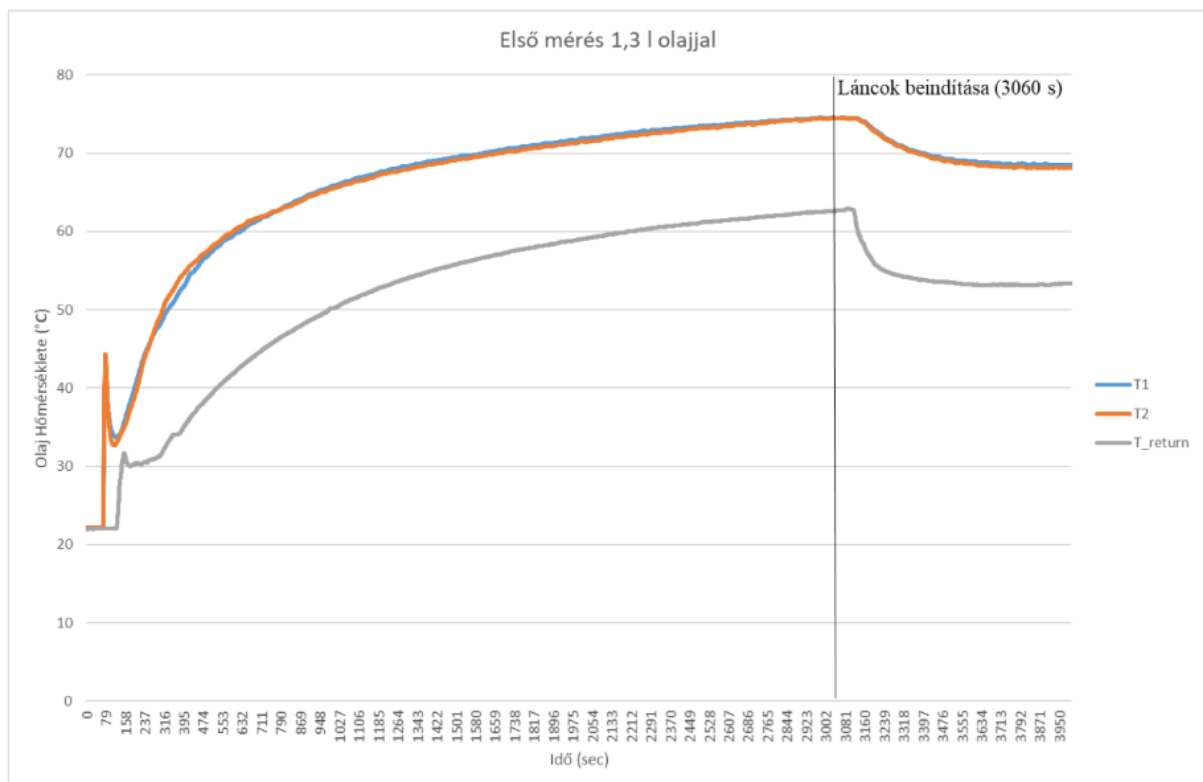
A mostani olajkörünk felépítése annyiban tér el az előzőtől, hogy új puffertartály került beszerelésre, valamint az olaj már rövidebb és szigetelt csöveken keresztül a láncok felé. Innét, mint korábban, lefolyik a láncokat körbevevő dobozokról és elindul az olajtartályba, majd egy elvezető körön keresztül, ahol az olaj térfogatáramát szabályozzuk vissza az olajfűtő berendezéssel ellátott tartályba.

12. Tesztelések

Elértünk a tervezésnek ahhoz a szakaszához, ahol a tartályt a teljes rendszeren belül tudjuk tesztelni. Arra vagyunk kíváncsiak, hogy a két általunk választott olajmennyiséggel (1,3 és 3,2l) van-e eltérés abban, hogy mekkora hőmérsékletet tudunk elérni, valamint ez a hőmérséklet mekkorára csökken, amikor elindítjuk a láncokat és hogy szükség van-e a tartály melegítésére, hogy elérjük a 100 °C-ot a láncoknál.

a. Első tesztelés menete

Elsődlegesen az olajtartályt 1,3 l olajjal töltöttük fel, majd a teszt megkezdése előtt az olajat az olajkondicionálóban 150 °C-ra hevítettük. Ez a berendezés fűtőszál segítségével hevíti a nagyhőállóságú, hőátadó olajat, ami a tartályon belül van keringtetve a fűtőszál körül, hogy az egyenletesen hevüljön (10. ábra). A teszthez használt motorolaj ezen a hőátadó olajon egy spirál segítségével van átvezetve és innét indul el rendszerbe. Miután elértük a kívánt hőfokot a kondicionálóban, beindítottuk az olajkört, egyelőre még a vezérműláncok üzemeltetése nélkül. Ahogy a 9. ábrán látjuk, az olaj hőmérséklete el is kezdett nőni, azonban elég gyorsan kialakult egy nagyjából 20 °C-os különbség a láncoknál, illetve a tartályba visszafolyó olaj hőmérséklete között. Megvártuk, amíg a hőmérséklet minden ponton beálljon, ez 74 °C-nál történt meg, majd 3060 másodpercnél beindítottuk a láncokat 300 fordulat/ perc sebességgel. Ennek hatására 1-1,5 perc múlva esni kezdtek a hőmérsékletek és végeredményül a láncoknál 6, a tartályban 10 °C-kal esett a hőmérséklet.



4. ábra. Első tesztelés eredménye²⁹

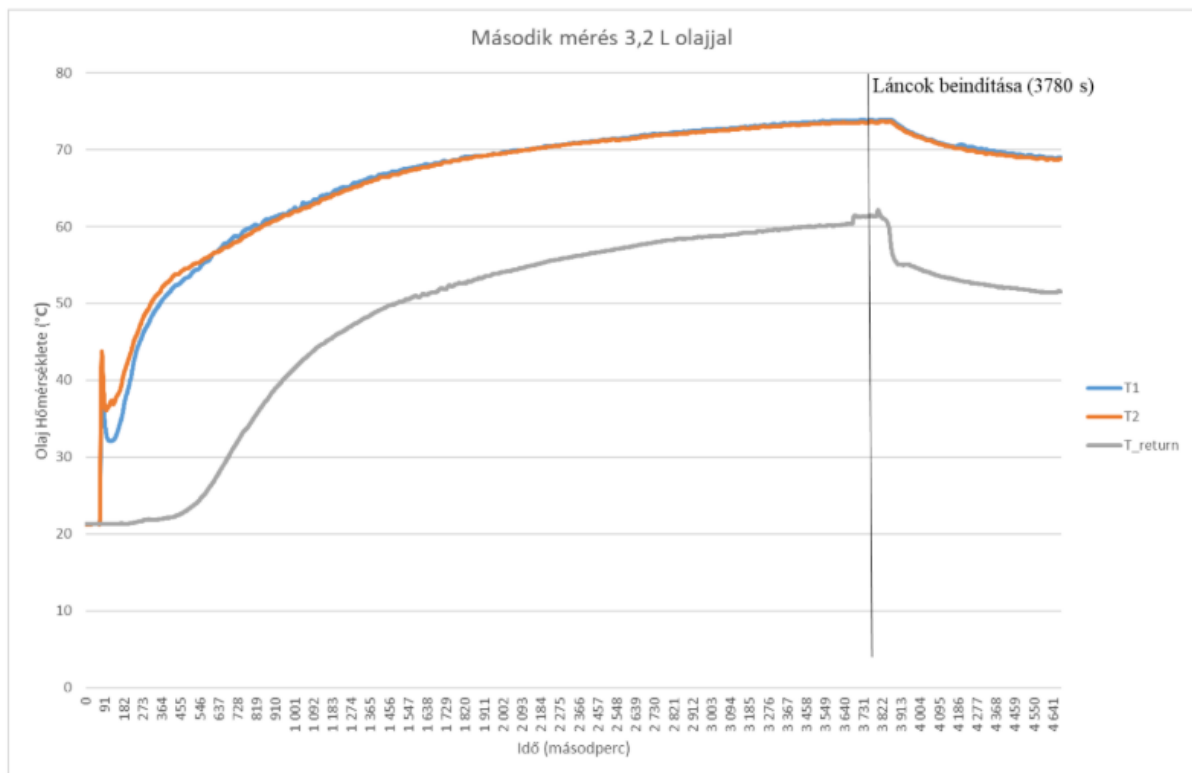
²⁹ Saját szerkesztés

T1	Bal oldali láncnál az olaj hőmérséklete
T1	Jobb oldali láncnál az olaj hőmérséklete
T_return	Tartályba visszafolyó olaj hőmérséklete

1. táblázat. Diagram adatok

b. Második tesztelés menete

Másodjára a tartályt 3,2 l olajjal töltöttük fel. Itt is 150 °C-ra felhevített olajjal kezdtük meg a rendszer elindítását. A diagramon látható hasonló emelkedő tendencia az olaj hőmérsékletében és a 15-20 °C-os különbség is kialakult. Elértük a 74 °C-os beállt hőmérsékletet, azonban most 3780 másodpercnél tudtuk indítani a láncokat, vagyis a különbség az olajmennyiségben extra 720 másodpercet eredményezett. Az első teszttel megegyezően, mikor beindítottuk a láncokat, akkor itt is az 1-1,5 perc elteltével csökkenni kezdett a rendszerben lévő olajnak a hőmérséklete mind a láncoknál, mind a tartályba visszafolyva. A csökkenés mértéke a mérési pontokon megegyezők voltak, vagyis a láncoknál 6, a tartályban 10 °C-ot esett a hőmérséklet.



5. ábra. Második tesztelés eredménye³⁰

c. Konklúzió

A kétféle olajmennyiséggel végzett teszt eredményeit összevetve, azt mondhatjuk, hogy ugyan a jelenlegi körülmények között maximálisan elérhető hőmérsékletet a kevesebb olajjal, 12 perccel korábban elérjük, mégis a láncok beindításával nagyjából egy ütemben ugyanakkora

³⁰ Saját szerkesztés

mértékkel csökkennek. Ezek alapján már biztosan tudjuk, hogy a későbbiekben szükség lesz a fűtőpaplanra a tartály köré, mellyel csökkentjük a láncok és a tartályban lévő olaj hőmérsékletkülönbségét, így a számítások szerint el fogjuk tudni érni a kívánt 100 °C-ot. Az viszont egy pozitív visszajelzés adott számunkra, hogy az olajkört kevesebb olajjal is fogjuk tudni működtetni és a felmelegítési idő is rövidebb lesz.

13. Összegzés

Dolgozatom célja a Széchenyi István Egyetemen épült vezérműlánc-tesztpadhoz tervezettolajtartály fejlesztése volt. A dolgozat keretében végzett kutatási munka során átfogó projektet valósítottam meg, amelynek középpontjában egy olajtartály tervezése és tesztelése állt. A projekt célja a tesztelt láncok kenésére szolgáló motorolaj hőveszteségének minimalizálása volt, ugyanis a tesztpad próbaüzeme során az olaj nem tudta elérni a kívánt 100 °C hőmérsékletet. Emellett fontos szempont volt az optimális méretezés, könnyű gyárthatóság, szigetelhetőség és fűthetőség, figyelembe véve a biztonsági és funkcionálitási követelményeket. Ennek érdekében változott a tartály anyaga, ki- és bevezető nyílásai, valamint geometriája is, mivel a kisebb alapterületnek köszönhetően már kevesebb olajjal is tudjuk működtetni a rendszert. Az új tartállyal végzett tesztelések arra világítottak rá, hogy ezzel a koncepcióval és a körülötte levő polifoammal tudtuk javítani az olajkör hőmérsékletén az előző tartályhoz képest, mégis a rendszerbe bemenő olajnak a láncokhoz érve esik a hőmérséklete, mivel a kenőolaj a túl rövid spirálban nem veszi át a 150 °C-ot és hosszabb spirálnak pedig nincs hely. Ezek az adatok arra engednek következtetni, hogy mind a tartály, mind az olajkör vezetőkei további szigetelésre szorulnak, valamint egy fűtőpaplan alkalmazása is szükséges lesz a tartályon, annak érdekében, hogy minimalizálni tudjuk az ott és a láncokon mért hőmérsékletnek a különbséget és elérjük a kívánt 100 °C-ot a rendszerben. Összességében az olajtartály tervezése hozzájárul a vezérműlánc-tesztpad fejlesztéséhez, az olajkör optimalizálásához, javítva annak hatékonyságát, valamint megbízhatóságát. Hasznos adatokat és fejlesztéseket kínál a dolgozat a további mérésekhez, illetve kutatásokhoz, ami hosszútávon elősegítheti a járműipari kutatások és innovációk előrehaladását.

14. Köszönetnyilvánítás

Szeretném kifejezni hálámat konzulensem, Paulovics László felé, aki értékes szakmai tanácsaival és támogatásával végig segítette a munkámat. Külön köszönet illeti a Járműhajtás Technológia Tanszék munkatársait, akik lehetőséget biztosítottak a tesztpad megvalósítására és a kísérletek elvégzésére. Végül szeretném megköszönni családomnak és barátaimnak a biztatást és a türelmet, amely nélkül ez a dolgozat nem készülhetett volna el.

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

[1] D. Punch és E. Abderson, „The Future of ICE Powertrain and Hybrid Powertrain Systems in North America,” S&P Global Mobility, 21. Június 2024.

- [2] A. Priddle, „The Auto Industry and EVs: Where We Are and What’s Coming Next, After Years of Crying Wolf?,” *Motortrend*, 26 Április 2021.
- [3] J. Pan, H. Wei és R. Y. Dahham, „Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges,” 10 Augustus 2022.
- [4] B. Mitchell, „Timing Chains Explained: How They Work and Why They Matter,” 5 Augustus 2024.
- [5] L. Evans, „Timing Belts vs Chains – Which Drive System is Best?,” 23. Április 2024.
- [6] „European Alternative Fuels Observatory,” European Comiision, 14. Július 2021.
- [7] J. Barker, „Can green synthetic fuels save the internal combustion engine?,” *Wired*, 11. Április 2021.
- [8] J. Slocock, „Synthetic fuels could keep internal combustion engines running beyond 2030,” *Institution Of Mechanical Engineers*, 02. December 2021.
- [9] W. Feng, S. Hui, S. Rohung, Y. Binxun és X. Hu, „Effect of Diesel Soot on the Distribution, Composition and Mechanical Properties of ZDDP Tribofilm,” *ResearchGate*, Szeptember 2021.
- [10] I. R. Taylor, „Fuel-Lubricant Interactions: Critical Review of Recent Work,” *MDPI*, 14. Szeptember 2021.
- [11] J. Doe, „Contaminants in lubricants: Their effects on wear performance.,” 2023.
- [12] L. Paulovics, J. Rohde-Brandenburger és C. Tóth-Nagy, „Timing Chain Wear Investigation Methods,” 2022.
- [13] P. Bauer, „Die Bibliothek der Technik,” *Verlag Moderne Industrie*, 2013.
- [14] H. Schwarze, L. Brouwer, G. Knoll, M. Kopnarski, F. Schlegel, U. Müller-Frank és S. Emrich, „Lubricant degradation and wear behaviour in a spark-ignition,” *MTZ Worldwide*, 2008.
- [15] M. Scherge, K. Pöhlmann és A. Gervé, „Wear measurement using radionuclide- technique (RNT)”.2003.
- [16] B. Sauber, A. Nicola és R. Frierl, „Features of timing chain drives,” *MTZ Worldwide*, 2007.
- [17] C. Weber, W. Hermann és J. Stadtmann, „ Experimental Investigation into the dynamic engine timing chain behaviour,” *Internal Congress and Exposition*, 1998.
- [18] A. Becker és B. Sauer, „Wear investigation on timing chains using a chain joint tribometer,” *STLE’s 73rd Annual Meeting and Exhibition*, 24. Május 2018.
- [19] D. Sappok, R. Merz, B. Sauer és M. Kopnarski, „Surface Analysis of Chain Joint Components after tribological load and usage of antiwear additives,” *Conference Papers in Science*, vol. 2015, 2015.

- [20] „Determination of tribological quantities for oils and greases”.Tribological test in the translatory oscillation apparatus.
- [21] „Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat sliding Wear”.ASTM G133 - 05(2016).
- [22] S. Andersson, „Wear Simulation,” Advanced Knowledge Application in Practice, 10 Március 2022.
- [23] D. Tong, Z. Diao, N. Sun, X. Du, Y. Zhang és Z. Liu, „A review of dynamic-tribological simulation methods for sliding bearings in internal combustion engines,” Január 2021.
- [24] D. T. Schiller, „Evaluation of Chain Drives: Testing and Analysis Methods,” International Journal of Automotive Technology, 2022.
- [25] J. Zhang és Z. Yuan, „Research on the Wear Characteristics of Timing Chains Using Component Test Benches,” Journal of Mechanical Engineering, 2020.
- [26] R. Tandler, N. Bohn, U. Gabbert és E. Woschke, „Experimental investigations of the internal friction in automotive bush chain drive system,” Tribology International, Július 2019.
- [27] S. Andersson, „Wear Simulation,” Advanced Knowledge Applicationin Practice, 2010.

Formula 1 köridő optimalizálás SimRacing szimulációval és telemetria elemzéssel

Formula 1 lap time optimization with SimRacing simulation and telmetry analysis

Márkus Alíz

9026 Győr, Egyetem tér 1. – Széchenyi István Egyetem
markusalizka@gmail.com

Absztrakt: A SimRacing több aspektusa is pozitív hatással van a motorsportokra. A pilóták gyakorlása, csapatok mérnöki munkájának megkönnyítése mellett a sport iránt érdeklődők lehetőséget kapnak arra, hogy a virtuális térben, téték nélkül betekintést nyerjenek a versenyzés izgalmaiba. A versenycsapatok a legpontosabb rekreálhatóság érdekében rendkívül részletes, egyedi szimulátor eszközökkel rendelkeznek. A mérnökök a beállítások tesztelésével tudnak témérdek hasznos információhoz jutni, melyet később a valóságba is képesek átültetni. A korlátlan tesztelhetőség lehetővé teszi a szokatlan specifikációk kipróbálását, könnyebbé teszi a kísérletezést. A virtuális tér legnagyobb előnye a hibalehetőségek megengedése. Amennyiben mégis formabontó ötletet vélnek felfedezni, hatalmas versenyelőnyre tehetnek szert. A cikk célja egy valóságban megtörtént, rajtelsőséget jelentő, időmérő futamon teljesített kör telemetriájának összehasonlítása, saját mérésű SimRacing szimulációban teljesített körökkel, eltérő jármű specifikációk mellett. A gyűjtött adatok különböző szempontok szerinti elemzése, összehasonlítása után összegzés, konklúzió készítése a kapott eredményekről.

Kulcsszavak: Formula 1, motorsport, telemetria, SimRacing, szimuláció

Abstract: SimRacing has several positive effects on motorsports. In addition to training pilots and facilitating the engineering work of teams, those interested in the sport are given the opportunity to gain insight into the excitement of racing in the virtual space, without any stakes. Racing teams have extremely detailed, unique simulator tools for the most accurate recreation. Engineers can obtain a lot of useful information by testing settings, which they can later transfer to reality. The unlimited testing possibilities allow for the testing of unusual specifications and make experimentation easier. The biggest advantage of the virtual space is that it allows for the possibility of errors. If they do discover a groundbreaking idea, they can gain a huge competitive advantage. The goal of this article is a comparison of the telemetry of a lap completed in a real qualifying race, which indicates pole position, with laps completed in a self-measured SimRacing simulation, with different vehicle specifications. Analysis and comparison of the collected data according to different aspects, then summarization and conclusion of the results obtained.

Keywords: Formula 1, motorsport, telemetry, SimRacing, simulation

1. Formula 1, a motorsport királykategóriája

A világ nagyrészen, ha megemlítjük a Formula-1-et, vagy a sport valamelyik mára már legendává vált versenyzőjét, például Ayrton Sennát vagy Michael Schumachert, beszédpartnerünk tudni fogja miről beszélünk. Általánosságban elmondható, hogy a Formula-1 magasan kiemelkedik a motorsportok közül. Nemzetközi szinten a legtehetségesebb pilóták mérik össze tudásukat, emellett a folyamatos technológiai fejlesztések is rengeteg izgalommal szolgálnak, ezáltal egyedülálló hírnévvel és nézettséggel rendelkezik a sport.

A Formula-1 elnevezés eredete nem túl bonyolult. A formula szó a szabályok összességére utal, ilyen például a versenyautó formatervezése, motorjának méretei. Az 1 pedig a szabályrendszer fontosságát hivatott jelezni. [1,2]

A motorsportok esetében szigorú szabályozó szervezetre van szükség, amely biztosítja az egységes, biztonságos és tisztességes versenyt. A Formula 1 esetében ezt a feladatot az FIA látja el. A szervezet fő feladata a technikai, biztonsági szabályozások mellett a költségek kézbentartása is. Az előírások betartása kiemelten fontos, hiszen ezek nélkül biztonsági és etikai problémák léphetnek fel. Mivel ekkora szerepet kap az FIA irányítása a Formula-1 berkein belül, ezért a bajnokság hivatalos megnevezése az „FIA Formula One World Championship”. Egy ekkora rajongótáborral rendelkező sport esetében kiemelt szerepe van a marketingnek és a kereskedelmi jogok képviselőinek. Ezt a feladatot a Formula-1 esetén a Liberty Media látja el. [1,3]

A versenyszériában jelentős szerepe van a csapatmunkának. Minden verseny csapatnak két versenyautót és pilótát kell indítani az egyes futamokon, ezáltal fontos a versenyzők közti összhang fenntartása, a túlzott, versenyre veszélyes rivalizálás elkerülése. A nagydíjak folyamán a boxutca személyzetétől is precíz, összehangolt munkát várnak el, a motorsportok közül a Formula-1 során történnek a leggyorsabb kerékcserek. Jármű nélkül nem lenne lehetséges a futamon való részvétel, így nem szabad megfélemlíteni a mérnökök kiemelkedő munkájáról sem, akik folyamatosan a koncepció fejlesztésén dolgoznak, hogy a többi csapat előtt találjanak olyan újításokat, amikkel kiemelkedhetnek, és bajnokokká válhatnak. Az egyéni és konstruktóri világbajnoki cím egyaránt kiváló teljesítményt igényel az egész verseny csapatától.

2. Technikai sport, technikai áttörések

A Formula széria nyitott, együlékes versenyautói jellegzetes külsővel bírnak. Ezek a járművek hatalmas változásokon estek át az évek folyamán. Az egykori versenyautók közel sem hasonlítottak a ma ismert gépekre, technikai sport révén hatalmas fejlődés történt a kezdetekhez képest. A folyamatos szabályrendszer változtatások pár évente felélesztik a fejlesztési versenyt, esélyt adva több csapatnak a feltörekvésre, bizonyos domináns csapatok megfékezésére.

A sport kezdetekor még egyáltalán nem az aerodinamika volt az elsődleges. Ez sok esetben negatívan befolyásolta a pilótákat a járművek irányításában. Más okból is meghatározó volt az 1958-as szezon, hiszen ekkor készült az első olyan Formula 1 versenyautó, amelynek motorja a pilóta mögött helyezkedett el, ez pedig a Cooper volt. Ez elemeiben változtatta meg a sportot, hiszen az újítás óta ezt az elrendezést használják. [2]

Az 1960-as évek első nagy fejlesztése a Lotus nevéhez köthető. 1962-ben alumínium monocoque készítését kísérelték meg, mely könnyítette az autót, lágyított a felfüggesztés merevségén, ez kedvezőbb gumihasznaletet eredményezett. Ezt követően 1968-ban megjelent az első szárny is a Lotus versenyautón. [2]

Az előző évtized végén a szárnyak megjelenése megnyitotta a kaput az 1970-es évek legnagyobb változásának, ez nem volt más, mint az aerodinamika. A csapatok rájöttek, hogy az aerodinamika kihasználásával jelentősen gyorsabbá, stabilabbá tehetik járműveiket. Ez a

felfedezés alapjaiban változtatta meg a Formula 1 versenyautóinak kinézetét. Ebben az évtizedben jelent meg először a ground effect is, a már sokat emlegetett Lotus csapat által. A venturi csatornák használata hatalmas leszorító erőt ért el, ez jelentősen gyorsította a járműveket. Idővel a többi csapat is átvette ezt a fejlesztést. A sportban bekövetkező hirtelen gyorsulás nagyobb balesetveszéllyel rendelkezett, amely miatt a ground effect használatát 1982-ben betiltották. Az évtized kiemelkedő fejlesztése volt ezek mellett a Renault turbófeltöltő rendszere 1977-ben. [2,4,5]

1981-ben ismét áttörés következett a monocoque készítésében. Ebben az évben a McLaren MP4/1 modell ugyanis az eddigi alumínium helyett karbonszálas megoldással kísérletezett, amely a járművet könnyebbé téve vált gyorsabbá. A karbonszál eleinte fenntartásokat keltett a külső szemlélőkben biztonsági szempontokat tekintve, viszont ezeket a kételyek hamar eloszlottak, mikor látták, hogy a pilóták komolyabb balesetek után is sértetlenek maradnak. Ez az újítás mára a legtöbb motorsportra, csúcskategóriás sportautókra is áterjedt, és mai napig megállja helyét. A következő áttörést 1989-ben a Ferrari csapata hozta, ez pedig a félautomata váltó volt. Később ez az elképzelés átalakult, és a mai napig használt szekvenciális váltó lett az utódja. [2,4]

Az 1990-es évek meghatározó fejlődési iránya az elektronikus készülékekben rejlett. Az évtized első nagyobb felfedezése a Lotus által alkalmazott aktív felfüggesztés volt. Eleinte nem volt teljesen megbízható a technika, a hibák kiküszöbölése után viszont olyan jól szerepelt a megoldás, hogy később betiltásra került. 1997-ben bevezették a futam közbeni tankolás lehetőségét, a jövőben viszont ez is betiltásra került. [1,4]

Az ezredfordulót követően tovább fejlődtek az elektronikus berendezések. Az évtized legmeghatározóbb eleme a KERS volt, amely a fékerőt felhasználható energiává alakította, emellett az aerodinamika is szerepet kapott, mivel az első és hátsó szárnyak állíthatóvá váltak. [1,6]

2010 után ismét nagy változások következtek. A legmeghatározóbb a 2011-ben bevezetett, és mai napig alkalmazott DRS, amely az előzés segítésére hivatott. 2014-től a hibrid rendszer bevezetésével a turbófeltöltők visszakerültek az autókba, emellett megjelent az ERS is, amely az eddigi KERS-hez hasonló feladatot lát el. [1,4]

3. Adatgyűjtő rendszerek

3.1. Telemetria jelentősége

A telemetria rendszerek kiemelkedő jelentőséggel bírnak a motorsport világában. Szerepe a vezeték nélküli összeköttetést biztosítása a versenyautó és a mérnökállás között, a jármű állapotát közvetíti részletes adathalmazokon keresztül. Az adatok valós idejű, könnyen visszakövethető elérhetősége rendkívül fontos a megfelelő járműbeállítások, stratégiák eléréséhez, nehézségek, problémák felismeréséhez. [3,6]

A telemetria szó jelentése görög eredetű tele, vagyis távoli, és metreo, tehát mérés szavakból tevődik össze, ez jól leírja az adatrögzítő rendszer lényegét. [1]

A legfontosabb összehasonlítási alapot képző telemetriák a sebességfokozat, a kormányoszögállás, a sebességgörbe, és a gáz- és fékpedál lenyomásának mértéke. Amennyiben nem csak egy adott kört vizsgálunk, lehetőség van az időkülönbségek szemléltetésére. [3]

A telemetria rendszereknek a motorsporton kívül is széles felhasználási skálája van. Az úrkutatás alapjait adja a távolsági adatrögzítés, emellett a meteorológia, és vadvilág megfigyelésére, egészségügy támogatására is alkalmas. [6]

3.2. Telemetria fejlődése a Formula 1-ben

A telemetria rendszerek közel sem voltak mindig voltak olyan szerves részei a motorsportnak és járműiparnak mint napjainkban. Az adattovábbítás mára már hatalmas fejlődéseken ment keresztül.

Az 1960-as és 1970-es években igen kevés számítógépes technológiát használtak a Formula 1 berkeiben. Az elsődleges problémamegoldási lehetőség a kétkezi tapasztalat és a megérzések voltak. A beállítások csupán a pilóta visszajelzései alapján történtek. A kör- és szektoridők manuálisan kerültek kiszámításra. Ez jelentősen lassabb folyamat, pontatlanabb eredménnyel napjainkhoz viszonyítva. [7]

Az első elektronikus eszközök az 1980-es években jelentek meg. Ezek betekintést nyújtottak a motor teljesítményéről, az üzemanyag áramlásáról, gumiabroncsok állapotáról. A ma ismert valós idejű távolsági adatátviteli rendszerekkel az 1980-as évek közepétől kezdtek kísérletezni a csapatok. [7]

Az 1990-es évek hozták a telemetria rendszerek fellendülését. A csapatok témérdek új adathoz fértek hozzá valós időben. Megjelent a számítógépes adatelemzés, amely stratégiai hasznot hozott, emellett a szélcsatorna használat is egyre nagyobb szerepet kapott. [7]

Az ezredforduló újabb kinyerhető adatokat, és a pilóták szimulátor használati lehetőségét hozták magukkal. A sport történetének egy rövid időszaka lehetővé tette a pilótákat asszisztáló eszközöket, ilyenre példa a kipörgésgátló használata. [7]

Napjainkra az adatfeldolgozás szerves részévé vált a mesterséges intelligencia. Ez lehetővé teszi a legjobb stratégiai opciók, megfelelő beállítások könnyebb meghatározását. A különböző tesztelesek elvégzését mára leginkább a digitális térben végzik. [7]

3.2. Telemetria rendszer működése

A versenyautó különböző pontjaira rögzített szenzorok sokrétű, precíz betekintést adnak a jármű állapotába. Egy Formula 1 versenyautón több mint háromszáz szenzor található, ezek hihetetlen sebességgel küldik a mért adatokat a csapat számára antennákon keresztül. A pilóta számára legfontosabb értékek kormányon való kijelzése is szükséges. Az adatok szinkronizációját követően számadatként továbbítódnak a mérnökállásra, ahol megfelelő szoftver segítségével megtörténik grafikonná alakításuk. Fontos a megfelelő infrastruktúra a zökkenőmentes adatátvitelhez. A múltban a csapatok közt ez verseny tárgyát képezte, napjainkban ezt már egységesítették. Az adatátvitel jelenleg a járműipar információkövetítő protokolljával, a CAN-busszal teljesül. A Controller Area Network az általános diagnosztikában használt, és az elektronikus vezérlőegységek közötti kommunikációt teszi lehetővé. [1,3,6,8,9]

A mért adatokat a jármű CAN hálózata egy feldolgozó chipen továbbítja a mikrovezérlőbe, ez megadott időközönként egy SPI kommunikációs protokoll segítségével juttatja az információt a rádiófrekvenciás egységbe. Ezen a ponton az adatok rendszerezésre kerülnek, majd rádióállomás és a csapatok antennáján keresztül megtörténik az adatátvitel. A kapott adatok ismét egy SPI protokollon keresztül továbbítódnak, majd egy CAN feldolgozó küldi a végső adatokat a számítógépnek. [6]

4. Mérést befolyásoló tényezők

4.1. Ideális ívek

A megfelelő köridő elérésének egyik legfontosabb tényezője a megfelelő pályáiv megválasztása. Általánosan a legtöbb idővesztés a nem megfelelő kanyarbevétel okozza, így erre a tényezőre különös hangsúly került a mérések során. Legegyszerűbb csoportosítási mód szerint gyors, közepes sebességű és lassú kanyarokat különböztetünk meg. Ezeket szortírozhatjuk forma alapján is, ilyen például a hajtű, a síkán, és dupla apex. A féktáv hossza meghatározó, hiszen a cél, hogy a lehető legtávolabbi haladjunk egyenes szakaszhoz illő sebességgel. Minden kanyarnak van egy kanyarcúspontja, ideális esetben innen kezdődik a fokozott gázadás. Törekedni szükséges a lehető legkorábbi gyorsulásra, ez kritikus tényező. A sebesség mellett az ideális ív megválasztása is rendkívül fontos. A versenypálya teljes

szélességének kihasználása elengedhetetlen, ez utcai pályák esetén fokozott kihívást jelent, a legapróbb hiba is komoly anyagi kárt okoz, emellett személyi sérülés veszélye is nagyobb. [10,11]

4.2. Gumi komponensek

A cikk megírásának idején, emellett a vizsgált 2024-es szezon folyamán is 3 száraz és 2 esős körülmények esetén használható Pirelli abroncs típus elérhető. A tiszta időben használt 3 abroncs az úgynevezett slick nevet viseli, ezek felülete teljesen sima, ezáltal a lehető legnagyobb tapadófelületet érik el. Megkülönböztetjük a fehér színű kemény, a sárga színű közepes és a piros színű lágy keveréket, melyek lágyuló sorrendben C1-től C6-ig terjedő összetételből állhatnak, az adott futamok minőségét a Pirelli határozza meg, ezzel hatást gyakorolva a futamra megfelelő stratégia kialakítására. Minél keményebb az abroncs, annál hosszabb élettartamra lehet számítani, ezzel szemben a lágyabb keverék gyorsabban eléri az üzemmeg állapotot, és gyorsabb köridőt eredményez. Enyhén nedves körülmények esetén az enyhén barázdált, zöld színnel jelzett, úgynevezett intermediate, erősen vizes időjárás pedig a sűrűn barázdált, kék színű extrém esőgumi a választható abroncs. Ezen tényező helyes megválasztása sorsdöntő lehet taktikai szempontból. A futamok elején látványos lehet a különbség, amennyiben két eltérő gumikomponenssel harcol két pilóta egy pozícióért. A kemény keverékekről rajtoló versenyző abroncsai lassabban érik el a megfelelő hőmérsékletet, addig egy esetleges csatában hajlamosabb elfékezésre, kicsúszásra, ellenben elegendő később kereket cserélnie, mely stratégiai előnyt jelenthet, a lágyabb keveréket az üzemanyag folyamatos fogyása miatt könnyebb, ezáltal még gyorsabb autóval használhatja fel. A lágy keverékkel rajtoló pilóta a futam kezdetétől fogva terhelheti a gumikat, ezzel kezdeti előnyt kovácsolva, akár megelőzve kemény keveréken rajtoló óvatosabb versenytársát, azonban hamarabb tönkremegy az abroncs, korábban kerül sor kerékcserére, ezzel el is veszítheti nyert pozícióit. Időmérő esetén a lehető leggyorsabb idő teljesítéséhez általánosan a lágy keverék a legoptimálisabb, a cikkhez szükséges mérések során is C5 jelzésű lágy Pirelli abroncs került felhasználásra. [3]

4.3. Időjárási viszontagságok

Az egyik legnagyobb befolyásoló erővel rendelkező hatás az időjárás milyensége. A száraz, napos körülmények között teljesített idő akár 10 másodperccel is megnőhet vizes pályán. Eső esetén a fokozott megcsúszási veszély mellett a látási viszonyok romlása is jelentős. A csapadék mennyiségen kívül a környezet hőmérséklete, és a tengerszint feletti magasság is különbségeket okozhat. A hűvösebb és a forróbb körülmények egyaránt jelentősen hatnak a jármű teljesítményére. A tengerszinthez viszonyítva magasabb helyeken található pályák fokozott mérnöki problémamegoldást igényelnek, a ritkább levegő negatívan befolyásolja a járművek hűtését, ezt a motorborításon ejtett, a megszokottnál jelentősen nagyobb méretű kivágásokkal tudták orvosolni. Mivel a vizsgált időmérő kör mellett a saját mérések is száraz körülmények közt, ugyan azon helyszínen teljesültek, így ez nem volt jelentős ráhatással a mérésre.

4.4. Egyéni vezetési stílusok

A hétköznapiakban és a Formula 1 eseményein is megfigyelhető, hogy minden embernek kialakul egy sajátos, egyéni vezetési stílusa. A hétköznapi emberek különbsége nem számottevő, hiszen a közlekedési szabályok bizonyos mértékben korlátozzák a sofőrt, ennek ellenére a jármű fogyasztásán látszódnak eltérések, az autó költséghatékonysága és élettartama is megmutatkozik. A Formula széria során ez kiemelkedő szerepet kap. A hatalmas igénybevételek által jelentősen rövidebb az alkatrészek élettartama, ezek kímélése tökéletes, rendkívül gyors körök teljesítése mellett nagy kihívást jelent. A versenyautó élettartama mellett pedig a köridőket és járműbeállításokat is nagy mértékben befolyásolja az egyéni vezetési stílus. Két kiemelendő példa Max Verstappen és Daniel Ricciardo pilóták közti különbség. Míg Daniel Ricciardo a későn megkezdett féktávjairól, bevetődéseiről híres, addig Max Verstappen inkább a korai fékezést, élesebb kanyarodást, ezáltal erősebb kigyorsítást fejlesztette

tökéletesre. Mindkét említett pilóta kiemelkedő teljesítményről tett tanúvallomást, így elmondható, hogy a vezetési stílus különbsége nem egyenlő a pilóták tehetségének mértékével. Mivel minden jármű személyre szabható bizonyos paraméterek között, így a csapatok pilótái egyaránt finomhangolhatják beállításukat stílusuknak megfelelően, a csapattárs pilóta hátráltatása nélkül. A már említett Max Verstappen köztudottan jobban kedveli a rendkívül érzékeny, kis hibahatárral rendelkező járműbeállításokat az éles, kockás kanyarbevételi stílusa miatt. A mérő személy és a pilóta egyéni stílusának eltéréséből adódóan a cikk mérése során nem volt lehetséges a pilóta stílusának rekreálása.

4.5. Időmérő és futam beállítások

Fontos kiemelni a versenyhétvégék egyik mérnöki problémáját, a parc fermét. A megfelelő beállítás elérésekor törekedni kell arra, hogy az időmérőn jól teljesítő specifikációk megállják a helyüket a futamon is. A leggyorsabb körért folyó küzdelem során használt beállítások rövid távon használatosak, alacsony üzemanyagszint mellett, ellenben a futamon hosszú ideig, változó üzemanyagszint mellett is előnyösnek kell lenniük. Az általános beállításokon felül az erőforrások elhasználódását is figyelembe kell venni. A parc fermé szabályok értelmében az időmérő és a futam közt tilos változtatni a jármű specifikációját, ha egy csapat mégis megszegné ezt a szabályt, a versenyzőnek a boxutcából szükséges elkezdenie a futamot. Jelentős kiemelni az időjárás hatását a versenyhétvégék beállításaira. A Formula autók rendkívül érzékenyek az időjárás legapróbb változásaira, ez sok esetben néhány percenként jelentősen megváltozhat. Mivel az időmérő és a futam között körülbelül egy teljes nap eltelik, így kihívást jelenthet a különböző időjárásoknak megfelelő beállítás elérése. A verseny csapatok folyamatosan nyomon követik a részletes meteorológiai előrejelzéseket, és ennek megfelelően mérlegelnek, a leoptimalisabb beállítások eléréséhez. Ezen tényezők tehát negatív hatással lehetnek az időmérő eredményekre, hiszen nem lehetséges a rövid távhoz igazodó szélsőséges beállítás használata. [12]

4.6. SimRacing és valóság

A SimRacing jelentős segítséget jelent egyaránt a versenyzők, és a mérnökcsapat számára is. A fejlett szimulátor rendszerek ennek ellenére bizonyos tényezőket nem tudnak olyan mértékben érzékelteni, mint ahogy az a valóságban történne. Az egyik legjelentősebb a G erők hiánya, mely hatalmas terhelést okoz a pilótáknak a futamok közben. A versenypályán érzékelhető egyéb pálya és természeti viszonyok, mint például a jármű úton haladása okozta rázkódás, vagy eső esetén a bukósisakon nehezített kilátás sem érzékelhető szimulátor használata során, ez egy jelentősen sterilebb környezet. A pilóta pszichésen is teljesen más állapotban van egy valós versenyautóban, mint egy szimulátorban ülve, ez leginkább a versenyző testhőmérsékletén, szívverésén, pszichológiai leterheltségén jelentkezik. Ezek a körülmények is észrevehetőek, hiszen bizonyos esetekben a valós pályarekordokat is képesek hétköznapi szimulátor felhasználók megdönteni. [13]

5. Mérések részletezése, telemetria összehasonlítás, elemzés

5.1. Mérési folyamat beállítása

5.1.1. F1 24

A cikkhez szükséges méréseket az F1 24 programban teljesítettem. A szimulátor megnyitását követően az F1 World menüpontban található Time Trial üzemmódot indítottam el. A következőkben kiválasztottam az F1 2024 kategóriát, a RedBull csapatot, majd az Ausztriában található RedBull Ringet. A programot futtató Xbox konzolhoz a Logitech kormány szerkezet csatlakoztattam. A jármű paramétereinek megváltoztatására a boxutcában van lehetőség. Elérhető több általános beállítás, a kiegyensúlyozott mellett, növelt leszorítóerő, vagy növelt végsebesség irányában is változtathatunk. Ezek elsősorban a paraméter választásban nem jártas felhasználóknak szolgálhat hatalmas segítségként. Pontosabb adatok megadására a Custom Setup ad lehetőséget. A mérések során kizárólag az utóbbi említett opciót használtam fel.

5.1.2. Telemetria program

A teljesített szimulátor körök telemetria adatainak kigyűjtését a Sim Racing Telemetry program segítségével volt lehetőségem megtenni. A laptopról elindított programot első használat esetén szükséges összehangolni a szimulátorprogrammal, az adatátvitel közös internethálózaton történt. A kalibrálást követően a rögzítő, majd a start gombra kattintva el is indul a mérési folyamat. Amint elegendőnek érezzük a lemért körök mennyiségét, a stop gombra kattintva leállítjuk az adatátvitelt. A mért szakaszok a választott program főoldalán sorakoznak, a legújabb adathalmazok a lista tetejére kerülnek, feltüntetve a legjobb köridőt és szektoridőket, mérés idejét, körök számát. Ezekre kattintva az adott szakasz köreit látjuk időrendi sorrendben listázva, ezeket megnyitva férünk hozzá a részletes telemetria adatokhoz. Lehetőségünk van megtekinteni többek között a telemetria grafikonokat, a használt pályáiveket, és a szimulátorprogramban beállított jármű paramétereiket. A telemetria rögzítő program rendkívül felhasználóbarát, könnyed használati élményt biztosít, a kinyert adatokat szemléletesen, egyszerűen értelmezhetően mutatja be.

5.2. Mérési beállítások, vizsgált helyzetek

5.2.1. Időmérő futam körülmények

A vizsgált, Max Verstappen rajtelsőségét jelentő, időmérőn teljesített kör a 2024-es szezon osztrák RedBull Ring pályáján zajlott le. Körülményeit a méréshez fontos volt megfigyelni, a rekreálhatóság miatt. Az 1:04.314 idő alatt teljesített kör ideális, száraz, kissé felhős időjárás mellett történt. A Pirelli ezen hétvégén a C3, C4 és C5 keverékeket biztosította a csapatoknak. A leggyorsabb kör C5 komponensű lágy keverékkel teljesült. A pályán Max Verstappent több, szám szerint három pilóta is elengedte, mivel ők nem mért kört teljesítettek. Mivel a környező pilóták időben biztonságos helyre irányították járműveiket, így nem történt úgynevezett feltartás, amely hosszabb köridőt eredményezett volna. A többi pályán tartózkodó lassú haladása nem okozott pozitív hatású szélárnyékot, így ezt a tényezőt figyelmen kívül hagyhatjuk. Az alacsony forgalom emellett lehetővé tette a legoptimálisabb pályáivek használatát. Max Verstappen maximális pontossággal haladt az ideális íveken, a pálya, és a kerékvetők használható szélességét tökéletesen kihasználta.

5.2.2. Legalacsonyabb megengedett értékű beállítások

Az első mért beállítás során minden lehetőséget a legkisebbre választottam. Ez azt jelenti, hogy az első és hátsó szárnyszögállás is 0 fok, amely a legkevesebb leszorítóerőt eredményezi. A differenciál gázadás és annak hiányakor is a nyitott 10 %-os értéken van, ez kanyar béli stabilitás jelent. A motorfék 0%-os beállítása, vagyis teljes hiánya esetén csak a fékpedál lenyomásával érünk el lassító hatást. Az első tengely -3,5, a hátsó -2,2 fokos kerékdőlést kap, ez azt eredményezi, hogy a kerekek teteje a jármű irányába áll, a szélsőséges érték által pedig a terhelés leginkább az abroncs belső peremét közelíti. Az első tengely esetében 0 fokos kerékszéttartásról, a hátsó tengely esetében 0 fokos kerékösszetartásról beszélünk, tehát minden kerék a jármű hossz tengelyével párhuzamos. Mindkét tengely lágy, 1-es értékű felfüggesztést és keresztstabilizátort kapott, ez stabilitást, nagyobb tapadást eredményez, ellenben nem alkalmas a hirtelen kormánymozdulatok megfelelő átvitelére. Az autó elejének hasmagassága 10-es, hátulja 40-es értéket kapott, ez a beállítás az aerodinamikára hat leginkább, mivel alacsony légellenállást ér el, viszont kritikusan alacsony érték, és lágy felfüggesztés esetén a rázókövekre rendkívüli érzékenység és a jármű alján túlzott padlólemez kopás történhet. A fékerőt 80%-nak választva a fékpedál teljes lenyomásával nem érünk el teljes, éles fékhatást. A tengelyek fékerő eloszlása az első tengely irányába került eltolásra, ezen a tengelyen 70%-os értéket választottam. Ez a beállítás kritikussabb az elfékezésekre, és a túlkormányozottságra. A keréknyomás mindkét első keréken 22,5 PSI, ez 1,5 bár nyomásnak felel meg, a hátsó kerekeken 20,5 PSI, vagyis 1,4 bár nyomást választunk. Az alacsony keréknyomás nagyobb tapadófelületet ad, ez jobb tapadást, ellenben lassabb autót eredményez, gyorsabban melegedő abroncsokkal.

5.2.3. Legnagyobb megengedett értékű beállítások

Az előzőkben leírt beállítás ellentéte következik, ebben az esetben minden értéket maximálisra választottam meg. Az első és hátsó szárnyak szögállása 50 fok, ez jelentős leszorítóerőt eredményez. A differenciál gázadáskor és gázadás nélkül is teljesen zárt, 100%-os értéket kapott, ez az egyenes szakaszokban jelent jobb eredményt. A motorfék 100%, a gázadás hiánya esetén erőteljesen lassítja az autót. Az első tengelyen -2,5 fok, a hátsó tengelyen -0,7 fok a kerékdőlés mértéke, ebben az esetben is a jármű felé mutat a kerekek teteje, ám inkább az abroncs közepe felé terelődik a terhelés. Az első tengelyen 0,5 fokos kerékszéttartásról, a hátsó tengelyen 0,5 fokos kerékösszetartásról van szó, ez azt jelenti, hogy az első tengely kerekei menetirány szerint kifelé, a hátsó kerekek befelé mutatnak. A tengelyek 41-es értékű, kemény felfüggesztést, és 21-es értékű keresztstabilizátort kaptak, ez kisebb stabilitást, de jobb kanyarodóképességet ad, ellenben növeli az abroncsok terhelését. A hasmagasságot a jármű elején 40, hátulján 100-as értékre állítjuk, ez nagyban növeli a légellenállást, emellett a súlyközéppont is magasabbra kerül, ez a kanyarokban okozhat problémát. A fékerő 100%, így a fékpedál teljes lenyomásával teljes fékhatást érünk el. A tengelyek közti fékerő egyenlően oszlik el, 50-50% jut mindkét tengelyre. Az első kerekek keréknyomása 29,5 PSI, amely 2 bárnak felel meg, a hátsó kerekeken ez az érték 26,5 PSI, vagyis 1,8 bár. A magas keréknyomás kisebb tapadófelületet, gyorsabb autót eredményez, ellenben csökkenti a tapadást, és negatívan hat a gumikopásra, stabilitásra.

5.2.4. Optimalizált beállítás

Az optimalizált beállítások a pályakarakterisztika, és a szélsőséges beállítások hatásainak figyelembevételével jöttek létre. A beállítás megfelelősége mérés során érzékelhető volt, ezen specifikációkkal teljesültek a legkonzisztensebb köridők, emellett a jármű stabilitása is megfelelő volt. Az első szárny 35 fokos, a hátsó szárny 20 fokos szárnyszögállást kapott, ez kiegyensúlyozott, mégis inkább nagyobb leszorítóerőt szolgál. A differenciál gázadáskor 25%, gázadás nélkül 40%, ez segít a túlkormányozottság elkerülésében. A motorfék esetében a szélsőséges 100% megfelelő, a gyors kanyarok esetében hasznos. Az első tengely -3,2 fokos, a hátsó -1,8 fokos kerékdőlést kapott, ez erőteljesebb dőlést jelent. Az első tengely 0,05 fokos kerékszéttartást, a hátsó tengely 0,05 fokos kerékösszetartást kapott, előbbi az élesebb kanyarbevételt, utóbbi a túlkormányozottság elkerülését segíti. Az első felfüggesztés keményebb, 30-as, a hátsó tengely lágyabb, 15-ös értékű. Ezek az értékek segítik az éles kanyarodást, míg a jármű hátulját stabilan tartják, emellett lehetővé teszik az autó elején a hasmagasság alacsony beállítását. A keresztstabilizátorok az első tengelyen 15-ös, a hátsó tengelyen 10-es keménységet kaptak, ez egy inkább kiegyenlített beállítás, amely jobb stabilitást biztosít. A hasmagasság a jármű elején 15, hátulján 50, így kifejezetten alacsony értékről beszélünk, ez segít a légellenállás csökkentésében, leszorítóerő növelésében. A fékerő 100%-os értéket kapott, a tengelyek közti eloszlás enyhén az első tengely felé tolódik, ezen 55% a választott érték. A gyorsabb autó elérésének érdekében a keréknyomások magasabb értéket kaptak, az első kerekek 29 PSI, vagyis 2 bárt, a hátsó kerekek 25 PSI, tehát 1,7 bárt.

5.3. Telemetria elemzés, összehasonlítás

5.3.1. Teljes köridő, szektoridők

Az 1.táblázat bemutatja a teljes köridőket, és szektoridős felbontásukat. Jól látható, hogy Max Verstappen köridejét az egyéni beállítások használatával lehetett leginkább megközelíteni, míg a két szélsőséges beállítás közel azonos, jelentősen lassabb eredményt hozott.

Vizsgált kör	Teljes köridő	1.szektor	2.szektor	3.szektor	Köridő különbség
Max Verstappen pole	1:04.314	16.254	28.791	19.269	0.000
Legalacsonyabb megengedett értékű beállítás	1:09.138	16.614	30.810	21.302	+4.824
Legnagyobb megengedett értékű beállítás	1:09.040	17.128	30.855	20.983	+4.726
Optimalizált beállítás	1:06.339	16.462	29.664	20.212	+2.025

1.táblázat. Összehasonlítás köridő és szektoridők alapján³¹

5.3.2. Legkisebb és legnagyobb elért sebességek

A különböző vizsgált körök minimum és maximum sebességeit a 2.táblázat mutatja be. A legmagasabb sebességre kapott értékek nem rejtenek nagy meglepetéseket, az aerodinamika beállításait jól mutatja, ezzel ellenben a legalacsonyabb sebességek értéke nem olyan egyértelmű. Az alacsonyabb értékek esetén a beállítás a kanyar beveteléhez lassabb autót igényelt, míg a nagyobb sebességek esetén gyorsabban meg lehetett kezdeni a kanyarodást, ebből a szempontból előnyösebb, ezzel szemben a kanyarban gyorsabb autó instabilabbá is válhat, ez kockázatos lehet. Az átlagsebességeket a telemetria program kimutatja, ellenben a valós térben történt körről nincs hivatalos adat, így közelítő számítást szükséges végezni. A számítás a következőképpen néz ki. [14]

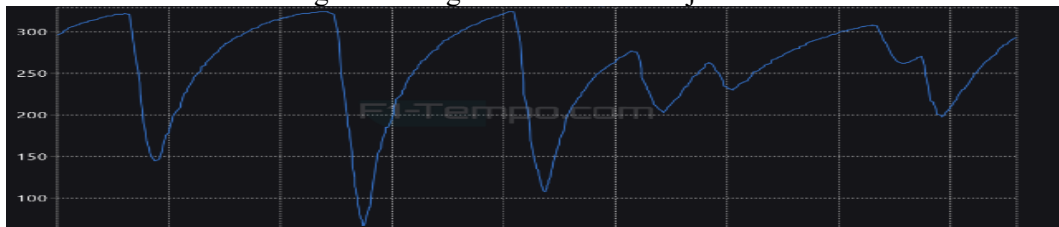
$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} = \frac{4318 \text{ m}}{64,314 \text{ s}} = 67,1394 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 242 \text{ km/h} \quad (1)$$

Az átlagok vizsgálatokor láthatjuk, hogy az optimalizált beállítások érték el a legnagyobb eredményt, ez azért lehetséges, mert ezen esetben az átlag értékét kisebb intervallum befolyásolja. Az egyenesek enyhe tempóhiányát kompenzálja a magasabb kanyarsebesség.

Vizsgált kör	Legalacsonyabb sebesség	Legmagasabb sebesség	Átlagsebesség
Max Verstappen pole	67 km/h	324 km/h	~242 km/h
Legalacsonyabb megengedett értékű beállítás	77 km/h	313 km/h	241 km/h
Legmagasabb megengedett értékű beállítás	67 km/h	307 km/h	240 km/h
Optimalizált beállítás	74 km/h	318 km/h	248 km/h

2.táblázat. Összehasonlítás sebesség alapján³²

Az 1. ábrán Max Verstappen sebesség grafikonját láthatjuk. A telemetrián nem látható rendellenesség. A következőkben a mért sebességeket ezen grafikonhoz hasonlítjuk.



1.ábra. Max Verstappen sebesség-út grafikon³³

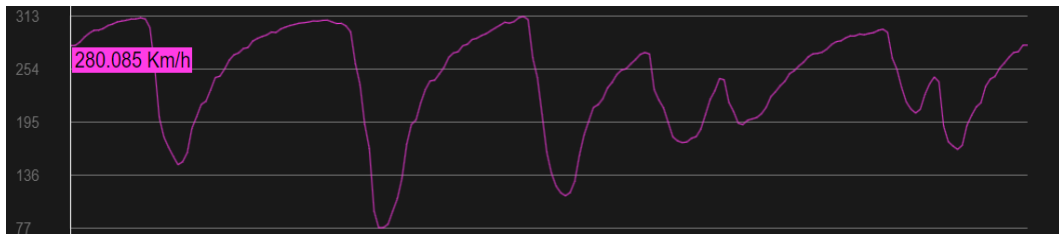
A következő 2.ábra a Legalacsonyabb megengedett értékű beállítások sebességgörbét mutatja. Az első és harmadik kanyar laposabb csúcspontot mutat, ez lágyabb fékezésre utal. Az alsó csúcspontok

³¹ saját szerkesztés

³² saját szerkesztés

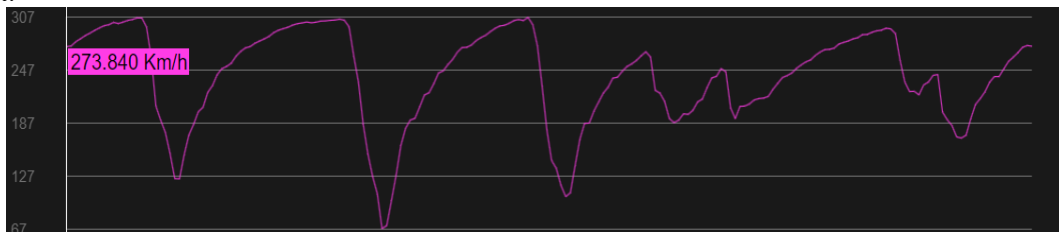
³³ www.f1-tempo.com, megtekintés dátuma:2025.12.05.

szintén nem hegyesek, ez lassabb kigyorsítást jelent. A hatodik kanyartól minden esetben mélyebb, erősebb fékezést láthatunk.



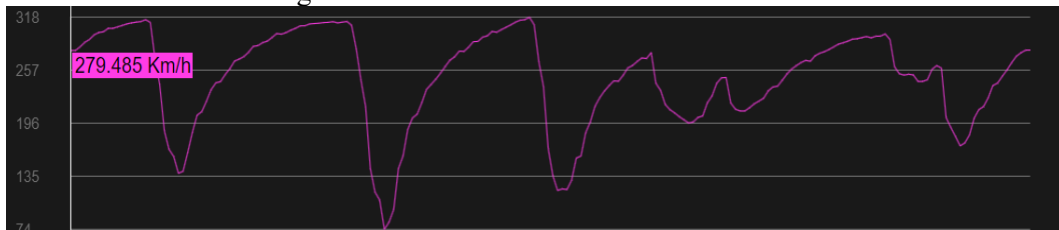
2.ábra. Legalacsonyabb megengedett értékű beállítások sebesség-út grafikon ³⁴

Az alább látható 3.ábra a Legnagyobb megengedett értékű beállítások sebesség telemetriáját mutatja be. A grafikon egészen észrevehető, hogy darabosabb, szakadozottabb, ez nem egyenletes sebességváltozásra utal. Az első, hatodik, hetedik és kilencedik kanyar bevétele kisebb sebesség mellett történt.



3.ábra. Legnagyobb megengedett értékű beállítások sebesség-út grafikon ³⁵

Az Optimalizált beállítások sebesség telemetriáját a 4.ábra ismerteti. A hatodik kanyar kigyorsítása laposabb ívet mutat, az hetedik és tizedik kanyar bevétele kisebb sebességgel történt. A kilencedik kanyarban lassulás közben kiingást láthatunk.



4.ábra. Optimalizált beállítás sebesség-út grafikon ³⁶

³⁴ saját készítés

³⁵ saját készítés

³⁶ saját készítés

5.3.3. Fordulatszám

A fordulatszámok bemutatását a 3.táblázat szolgálja. Max Verstappen köridejének átlag fordulatszámáról nincs nyilvánosan elérhető adat. Jól látható a valós tér és a szimulátor legmagasabb fordulatszámai közti különbség. A mérés során elért fordulatszámok hosszú távon károsan hatnának a jármű hajtására, ez szimulátorban nem probléma, ellenben valós körülmények között jelentős az élettartamra gyakorolt hatás, amely a meghatározott maximum komponens csere miatt problémákat vonhat maga után.

Vizsgált kör	Legalacsonyabb fordulatszám	Legmagasabb fordulatszám	Átlag fordulatszám
Max Verstappen pole	6434 RPM	11866 RPM	nincs adat
Legalacsonyabb megengedett értékű beállítások	5065 RPM	13940 RPM	11132 RPM
Legnagyobb megengedett értékű beállítások	4405 RPM	14200 RPM	11473 RPM
Optimalizált beállítás	6811 RPM	14174 RPM	11451 RPM

3.táblázat. Összehasonlítás fordulatszám alapján³⁷

A valós tér vizsgált körének fordulatszám adatait az 5.ábra jeleníti meg. A mérések telemetriáját ezen ideális grafikonhoz hasonlítjuk.



5.ábra. Max Verstappen fordulatszám-út grafikon³⁸

A Legalacsonyabb megengedett értékű beállítások mérés fordulatszám grafikonját a 6.ábra mutatja be. A harmadik kanyarnál hosszabb ideig volt alacsonyabb fordulatszámon az autó motorja. A negyedik kanyar fordulatszám mélypontja laposabb ívet mutat. A hetedik, kilencedik és tizedik kanyar után kiugróan eltérő értékeket látunk, ennek oka az eltérő sebességfokozat és mélyebb fékezetség.



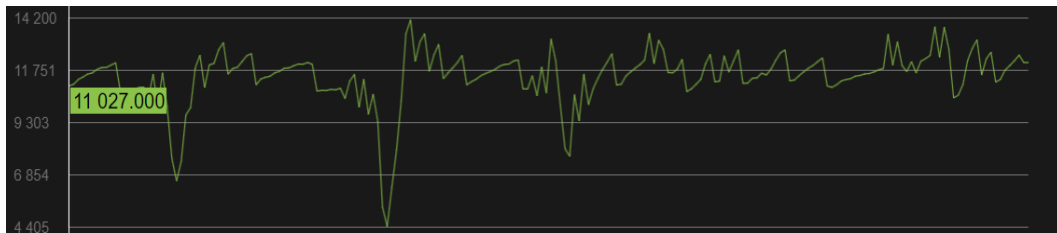
6.ábra. Legalacsonyabb megengedett értékű beállítások fordulatszám-út grafikon³⁹

³⁷ saját szerkesztés

³⁸ www.fl-tempo.com, megtekintés dátuma:2025.12.05.

³⁹ saját készítés

A Legnagyobb megengedett értékű beállítások mérés fordulatszám telemetriáját a 7.ábrán láthatjuk. Az első kanyarban nagyobb mértékű fordulatszám visszaesést vehetünk észre, ezt leszámítva az általános karakterisztikában nincs eltérés.



7.ábra. Legnagyobb megengedett értékű beállítások fordulatszám-út grafikon ⁴⁰

Az Optimalizált beállítás fordulatszám telemetriáját a 8.ábra szemlélteti. A harmadik kanyarban látható egy hirtelen fordulatszám ugrás, a negyedik kanyar kigyorsítása laposabb karakterisztikát mutat, ezt leszámítva nem érzékelhető jelentős eltérés.



8.ábra. Optimalizált beállítás fordulatszám-út grafikon ⁴¹

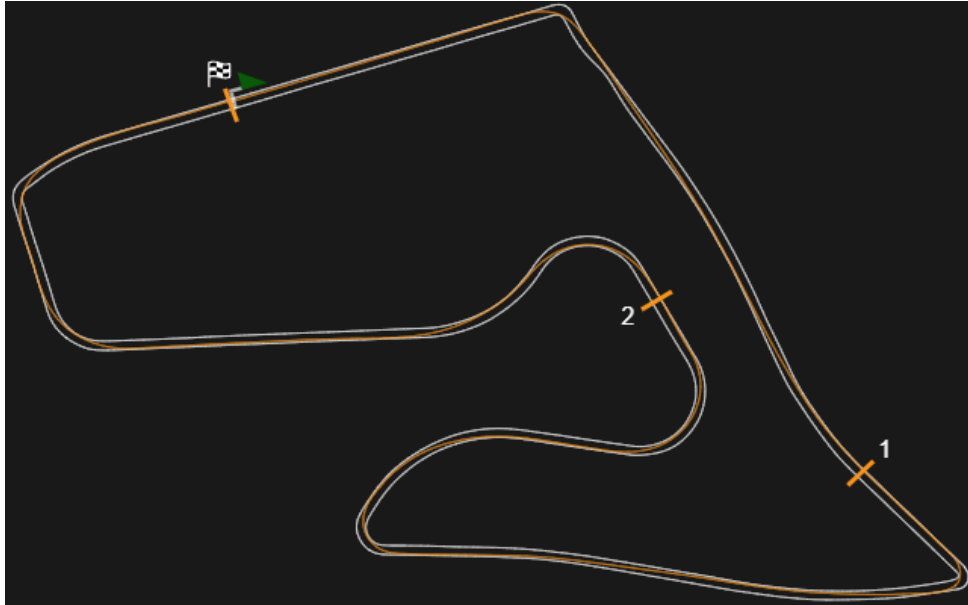
A leglassabban bevett harmadik kanyar esetén értük el a legalacsonyabb fordulatszámot, ez egy látványosan kiugró szakasz a telemetrián. A grafikon összhangban van a sebességváltásokkal, a pálya lassú kanyarjai jól kivehetőek. Az első kanyar előtti különbség oka a valós és a szimulátor körök között, hogy a mért kör megkezdése után Max Verstappen korábban érte el a 8. fokozatra váltást, mint a mérések, ez okozza a karakterisztika eltérését.

5.3.4. Egyéb kiemelendő tényezők

A használt, ideális pályaívet, és a szektorhatárokat az alábbi 9.ábra szemlélteti. Mivel egyik vizsgált kör esetében sem volt fellelhető számottevő eltérés, így az Optimalizált beállítással teljesített kör pályaívet vizsgáljuk a következőkben, általánosítva a többi általunk vizsgált helyzetre. Jól látható, hogy a kanyarok csúcspontján a lehető legjobban megközelítjük a belső ívet. Az egyenes szakaszok lehetővé teszik, hogy a kanyar megkezdése előtt a külső ívre irányítsuk a járművet, hirtelen irányváltás nélkül.

⁴⁰ saját készítés

⁴¹ saját készítés



9.ábra. Optimalizált beállítás pályaíve ⁴²

A DRS telemetriáját az alábbi 10.ábra mutatja be. Mivel az összes vizsgált kör ugyan azt a karakterisztikát mutatja, ezért jelenleg elegendő egyetlen grafikon vizsgálata, ez jelen esetben Max Verstappen pole pozíciós köre. A DRS használatát Ausztriában 3 DRS zóna teszi lehetővé, ezek helye jól kivehető a telemetria alapján. A mért kört DRS segítségével kezdjük meg és fejezzük be, ezentúl az első és harmadik, majd a harmadik és negyedik kanyar között is láthatjuk a DRS nyitott állapotát.



10.ábra. Max Verstappen DRS-út telemetria ⁴³

6. Köridő optimalizálásra való javaslattétel

6.1. Pálya karakterisztika és hozzá tartozó beállítások

A Red Bull Ring alapjaiban véve egy rövid, gyors pálya, változatos kanyartípusokkal. Az első, harmadik, és negyedik kanyarok leginkább lassú kanyarnak felelnek meg. A hatodik, hetedik, kilencedik és tizedik kanyarok közepes sebességűek. A második, ötödik és nyolcadik kanyarok gyors kanyarok, melyek teljes gázadás mellett bevehetők. A pálya több, hosszabb egyenes szakaszt tartalmaz, a három DRS zóna mellett a nyolcadik és kilencedik kanyar közt is fellelhető egy ilyen.

A Red Bull Ring ideális beállítási tartománya a következőkben kerül kifejtésre. A tartományos megadás a különböző vezetési stílusok és időjárési viszonyok miatt szükséges. Az első szárny 30-40, a hátsó 15-25 közötti tartományon a legelőnyösebb, ez ideális, inkább nagyobb mértékű leszorítóerőt jelent, a stabilitás megtartása mellett. Az első szárny nagyobb értékének jelentősége az alulkormányozottság elkerülése. A pálya gyorsasága, kanyartípusai miatt ez a legelőnyösebb választás. A differenciál megválasztása gázadáskor 20-30%, gázadás nélkül 35-45%-on legmegfelelőbb, ezzel a túlkormányozottság ellen tehetünk. A motorféket érdemes a maximum 100%-nak beállítani, így erőteljes, gyors féktávokat teljesíthetünk, ennek legnagyobb jelentősége a hosszú egyenesek után következő lassú kanyarok esetében van. Az első tengely -3 és -3,5 fok, a hátsó tengely kerékdőlése -2 és -1,5 fok között ajánlott. A kerékszéttartást az első tengelyen 0 és 0,1 foknak, a kerékösszetartást a hátsó tengelyen szintén 0 és 0,1 foknak ideális megválasztani. A felfüggesztést elől 25-35, hátul 10-20

⁴² saját készítés

⁴³ www.f1-tempo.com, megtekintés dátuma:2025.12.05.

tartományon a legmegfelelőbb. Az első tengelyen 10-20, a hátsó tengelyen 5-15 között ideális a keresztstabilizátorok beállítása. A felfüggesztés és a keresztstabilizátor választott értékeivel stabilabb kanyarbevételt érhetünk el. A jármű hasmagasságát alacsony, elől 10-20, hátul 45-55 tartományokon érdemes megválasztani, ez fokozza a pozitív aerodinamikai hatásokat. A fékerőt maximális 100% értéknek választjuk, ismét a hosszú, gyors egyenesek után következő éles kanyarok miatt. A tengelyek közti fékerő eloszlást enyhén el lehet tolni az első tengely irányába, 60-50 fok között érdemes értéket választani, ezáltal elkerülve az alulkormányozottságot. A keréknyomást az első tengelyen 27,5 és 29,5 PSI, a hátsó tengelyen 24,5 és 26,5 PSI között ajánlott beállítani. A pályán jelentős mennyiségű egyenes szakasz található, így fontos tényező a megfelelő specifikációkhoz. A szükséges gyorsaság elérését segíti a magas keréknyomás.

6.2. Nyert idő mértéke, szemléltetés fontosságra

A kapott eredményekből jól látható, hogy a Legalacsonyabb megengedett értékű beállítások és a Legnagyobb megengedett értékű beállítások körideje közel azonos, a specifikációk hatalmas eltérése ellenére. Az Optimalizált beállítás jelentős 2,7-2,8 másodperc előnyt jelentett. A nem megfelelő beállítás okozta közel 3 másodperc egy időmérő futamon hatalmas hátrány, a pilóták a különböző versenyautók, beállítások és vezetési stílusok ellenére is egymáshoz rendkívül közel kvalifikálnak. A futamon a mezőny hátuljáról indulás pedig szinte lehetetlen helyzetbe hozza a pilótát.

7. Konklúzió

Az optimalizált beállítással teljesített kör nem haladja meg Max Verstappen vizsgált időmérős köridejét, ennek legfőbb oka a szimulátor felhasználó tapasztalathánya. Ezen tényező ellenére a beállítás eredményessége jól látható, szemléletes javulást láthatunk, ezáltal a mérés sikeresnek tekinthető.

A kapott eredmények röviden összefoglalva a következők. A pálya gyorsasága, változatos kanyarösszetétele kiegyensúlyozott, alacsonyabb leszorítóerőt igényel, erős fékhatással. A gyorsaságot az aerodinamika fejlesztésével, vagyis a szárnyszögállások magasabbra vételével, a hasmagasság alacsonyra állításával kaphatjuk meg, emellett jelentős hatása van a magas keréknyomásnak. Az erős fékhatást a maximális motorfék és fékerő beállításokkal tudjuk biztosítani. A különböző kanyartípusok szükségessé teszik az alul- és túlkormányozottságra fektetett hangsúlyt. Ezt az első szárny hátsó szárnyhoz viszonyított nagyobbra vételével, a differenciál alacsonyabb tartományú megválasztásával, a felfüggesztés és keresztstabilizátor magasabb első, alacsonyabb hátsó értékével, kiegyensúlyozott fékerő eloszlással érhetjük el.

Összességében elmondható, hogy a megfelelő beállítások elérése a tökéletes versenyhétvégehez komoly kihívást jelent, amelyhez a virtuális tér hatalmas segítséget biztosít. A cikk bemutatja ezen komplex és szignifikáns feladat alapvető lépéseit, betekintési lehetőséget nyújt a vizsgálat fő elemeibe.

8. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

[1] Wéber Gábor: Forma-1 A-tól Z-ig, Agenc Magyarország, Budapest, 2023.

[2] Bánhalmi János, Szalay Péter: F-1 Autómodell história, Révai Nyomda, Eger, 1987.

[3] Wéber Gábor: Forma-1 Az új korszak küszöbén, Agenc Magyarország, Budapest, 2021.

- [4] Amanda Clark: Evolution of F1 cars, www.redbull.com, 2025.02.17., megtekintés dátuma:2025.12.05.
- [5] Zizhao Lian: The technology of Formula 1 racing car, *Applied and Computational Engineering* 70 vol., 2024.07.26., pp.156-160-, 5 pages
- [6] Ország András, Gulyás Péter: Energiahatékony versenyjármű telemetria rendszerének mérése, *Mobilitás és környezet JÖVŐFORMÁLÓ JÁRMŰIPARI KUTATÁSOK*, 2022.11.02., pp. 146-153., 8 pages
- [7] Jeff Bell: The History of Technology in Formula 1 Racing, www.linkein.com, 2024.10.13., megtekintés dátuma: 2025.12.06.
- [8] Gianfranco Modoni, Marco Sacco, Walter Terkaj: A Telemetry-driven Approach to Simulate Data-intensive Manufacturing Processes, *Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems* 57 vol., 2016.05.25., pp. 281–285., 5 pages
- [9] Peszleg Richárd, Baráth Balázs, Pekk Leticia, Dr. Hány András: A járműipari kommunikációs hálózatok fejlődése és innovatív CAN alapú hibrid jármű diagnosztikai eljárás bemutatása, *Mobilitás és környezet – Jövőformáló járműipari kutatások*, 2023.11.08., pp. 8-27., 20 pages
- [10] Luigi Cardamone, Daniele Loiacono, Pier Luca Lanzi, Alessandro Pietro Bardelli: Searching for the Optimal Racing Line Using Genetic Algorithms, *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games*, 2010.09.21., pp. 388-394., 7 pages
- [11] Johannes Betz, Hongrui Zheng, Alexander Liniger, Ugo Rosolia, Phillip Karle, Madhur Behl, Venkat Krovi, Rahul Mangharam: Autonomous Vehicles on the Edge: A Survey on Autonomous Vehicle Racing, *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems* 3 vol., 2022.01.01., pp. 458-488., 31 pages
- [12] Fédération Internationale de l'Automobile: 2025 Formula 1 Sporting Regulations, Issue 5, 2025.04.30.
- [13] Justin Holland, Megan Davis, David Ferguson: Physiological responses of race car drivers in authentic and simulated motor-racing, *Frontiers in Sports and Active Living* 7 vol., 2025.03.06., 9 pages
- [14] Prof. Dr. Égert János, Dr. Kupi Gábor, Dr. Pere Balázs: *MOZGÁSTAN BSc jegyzet és példatár*, Universitas-Győr, Győr, 2025., pp. 25

Tárcsafékekhez illeszthető passzív fékpor-gyűjtő szerkezet koncepciója

Concept of a Passive Brake Dust Collector for Disc Brakes

Maróti Levente

Széchenyi István Egyetem
mlevente03@gmail.com

Absztrakt: A fékek kopásából származó részecskék (fékpor) jelentős forrásai a városi légszennyezésnek, komoly egészségügyi és környezeti kockázatot hordozva. A dolgozat egy egyszerű, kazettás, passzív fékpor-gyűjtőrendszer koncepcióját mutatja be, amely külső energia nélkül, a féktárcsa forgásából és a keletkező légáramlásból származó áramlatokat használja a részecskék begyűjtésére, majd eltávolítható kazettában tárolja azokat a fékbetétcsere periódusáig. A rendszer előnyei közé tartozik az egyszerű gyárthatóság, a felhasználóbarát karbantartás, a modularitás és a könnyű integrálhatóság. Jelenleg a csatlakozási megoldások és a geometria finomhangolása további fejlesztést igényel. A kazettás koncepció ígéretes alternatívát jelent a nem kipufogógáz-eredetű kibocsátások mérséklésére, hozzájárulva a fenntarthatóbb és egészségesebb városi közlekedéshez.

Kulcsszavak: fékpor, passzív gyűjtő, kazettás rendszer, városi légszennyezés, fenntartható közlekedés

Abstract: Brake wear particles (brake dust) are a significant contributor to urban air pollution, posing notable health and environmental risks. This work presents a simple, cassette-based, passive brake dust collection system that captures particles without external energy, utilizing airflow generated by disc rotation and braking, and stores them in a removable cassette until the brake pad replacement interval. The system's advantages include easy manufacturing, user-friendly maintenance, modularity, and straightforward integration. Connection interfaces and geometric optimization currently require further development. Nevertheless, the cassette concept offers a promising alternative for reducing non-exhaust emissions, supporting more sustainable and healthier urban mobility.

Keywords: brake dust, passive collector, cassette system, urban air pollution, sustainable transportation

1. Bevezetés

A közúti közlekedés környezeti hatásainak mérséklése napjaink egyik legfontosabb feladata. Míg az elmúlt évtizedekben a szabályozások, mint például az Euro-normák, sikeresen csökkentették a belső égésű motorok kipufogógáz-kibocsátásait, addig a nem kipufogógáz-eredetű kibocsátások, mint a fék- és abroncskopásból származó részecskék, mindmáig szabályozatlanok. A járművek teljes részecskékibocsátásának mintegy 90%-a ezekből a folyamatokból ered, jelentős mértékben hozzájárulva a városi levegő szennyezettségéhez.

Az Euro 7-es szabvány 2026-os bevezetésével először jelennek meg mennyiségi határértékek a nem kipufogógáz-eredetű részecskékre, ami cselekvésre készíti az autóiipart. A gyártók egy része a dobfékek visszatérését, mások különböző szűrő- és gyűjtőberendezések fejlesztését látják megoldásként. Bár több aktív és passzív elven működő megoldás is létezik, ezek gyakran túl bonyolultak, költségesek vagy energiaigényesek a széles körű alkalmazáshoz.

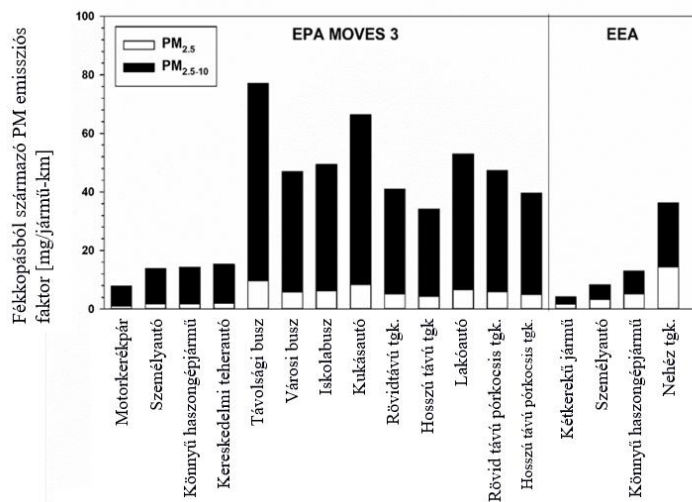
Jelen tanulmány célja egy kazettás rendszerű, passzív fékpor-gyűjtő koncepció bemutatása, amely a fékezés során keletkező áramlási viszonyokat felhasználva, külső energia bevitel

nélkül képes a keletkező részecskék összegyűjtésére, mely részecskéket magában tárol, egészen fékbetétcsere periódusig. A megoldás a hatékonyság mellett a gyárthatóság, és a felhasználóbarát karbantarthatóság szempontjait is szem előtt tartja, egyszerű és fenntartható alternatívát kínálva a jövő emissziós kihívásaira.

2. Nem kipufogógáz-eredetű kibocsátások

A városi közlekedés légszennyezésének jelentős részéért mára már a nem kipufogógáz-eredetű kibocsátások felelősek, amelyek közé a fékek, gumiabroncsok és az útfelület kopásából, illetve a porfelverődésből származó részecskék tartoznak. Ezek a részecskék a járművek összes részecskékibocsátásának mintegy 90%-át adják, így környezeti és egészségügyi szempontból egyaránt meghatározó szerepet töltenek be. A legkárosabbnak a mikrométer alatti mérettartományba eső részecskék számítanak, mivel képesek a tüdő mélyebb rétegeibe jutni, és hosszú távon szív- és légzőszervi megbetegedéseket okozhatnak [1][2].

A fékek kopásából származó úgynevezett fékpor a városi PM₁₀ kibocsátás akár 16–55%-áért is felelős [3]. A sűrűlódási folyamat során keletkező részecskék nagy része vasat (Fe), rezet (Cu), cinket (Zn) és más nehézfémeket tartalmaz, melyek oxidatív stresszt válthatnak ki a szervezetben [2][3][4]. A különböző fékbetét-típusok (organikus, félfémes, alacsony fémtartalmú) eltérő mértékű és összetételű kibocsátást eredményeznek, de közös jellemzőjük, hogy a finom részecskéket bocsájtanak ki, melyek egy része a biztosan levegőbe kerül [3][4]. A becslések szerint egy személyautó fékezésenként átlagosan 7,4 mg/km PM₁₀ és 2–3 mg/km PM_{2,5} tömegű részecskét bocsát ki, ami már meghaladja az Euro 6 norma által engedélyezett kipufogógáz-részecske határértéket [3]. A különböző járművek által kibocsátott fékpor részecskék eloszlását az 1. ábra mutatja be.



21. ábra. A különböző járművek által kibocsátott fékkopási részecskék⁴⁴

Ez alapján kijelenthető, hogy a modern járművek emissziós profilját ma már nem a motor, hanem a kopó alkatrészekből származó kibocsátás határozza meg.

A fékporhoz hasonlóan a gumiabroncsok és az útfelület kopása is növekvő figyelmet kap, azonban a fékek esetében a keletkezés helye és a kibocsátási mechanizmus jól azonosítható, így a csökkentésük célzott műszaki beavatkozásokkal megvalósítható. Ez képezi az alapját a

⁴⁴J. C. Fussell és mtsai., *A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles: Emissions, Physicochemical Characteristics, Health Risks, and Mitigation Measures*, Environ. Sci. Technol., köt. 56, sz. 11, o. 6813–6835, jún. 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c01072

különböző aktív és passzív fékpor-gyűjtő rendszerek fejlesztésének, amelyek az Euro 7 követelményeinek való megfeleléshez is kulcsfontosságúak lesznek.

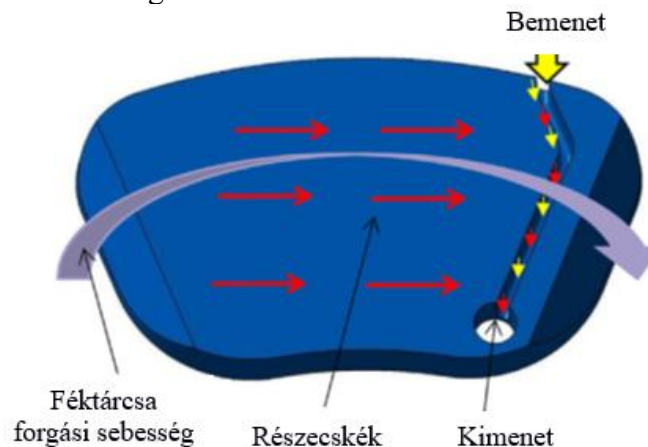
3. A fékpor kibocsátás csökkentésére alkalmazott jelenlegi megoldások

A fékpor kibocsátás mérséklésére az elmúlt években számos kutatási és ipari kezdeményezés indult, elsősorban az Euro 7-es norma közeledtének hatására. A megoldások alapvetően aktív és passzív rendszerekre oszthatók, attól függően, hogy alkalmaznak-e külső energiabevitelt a részecskék összegyűjtéséhez.

3.1. Aktív rendszerek

Az aktív rendszerek egyik legfejlettebb képviselője a TAMIC (Tallano Technologies), amely egy turbinával működtetett szívórendszerrel gyűjti össze a fékezéskor keletkező port közvetlenül a féknyereg környezetéből. A rendszer különlegessége, hogy az áramlást egy speciális horonnyal és furattal kialakított fékbetét segíti a szívócsatorna felé (2. ábra). A fékpor ezután egy cserélhető szűrőbe kerül [5]. A rendszer a kibocsátott fékpor tömegének akár 80%-át is képes felfogni [5].

Az aktív rendszerek fő előnye a nagy hatékonyság és a működés függetlensége a menetszélről, azonban energiaigényesek, bonyolultak és komponens igényesek. A TAMIC esetében például külön elektromos motor, csövezés és egyedi fékalkatrészek szükségesek, ami megnehezíti a sorozatgyártást és növeli a költségeket.



2. ábra. A TAMIC működési elve⁴⁵

3.2. Passzív rendszerek

A passzív rendszerek külső energiaforrás nélkül, kizárólag a fékezéskor keletkező áramlási viszonyokat használják ki. A legismertebb megoldások közé tartoznak a Mann+Hummel által fejlesztett gyűjtőegységek (3. ábra), amelyek félhold alakú házban, közvetlenül a féktárcsa környezetében helyezkednek el. A fékezéskor felszabaduló részecskék az áramlás irányában sodródva a gyűjtőbe kerülnek, ahol fémszálas szűrőréteg fogja meg őket [6]. A szűrő élettartama a fékbetét-csere ciklussal azonos, így a rendszer karbantartásmentesnek tekinthető [6][7].

⁴⁵ M. Hascoët és L. Adamczak, *At source brake dust collection system*, Results Eng., köt. 5, o. 100083, márc. 2020, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100083.

A passzív megoldások előnye az egyszerűség, az alacsony költség, valamint az energiafüggetlenség. Hátrányuk, hogy hatékonyságuk nagyban függ a jármű sebességétől és a féktárcsa körüli légáramlástól, valamint nehéz egységesen alkalmazni őket a különböző fékszerkezet-geometriák miatt.



3. ábra. Mann+Hummel passzív fékpor-gyűjtő rendszer⁴⁶

3.3. Anyagtudományi megközelítések

Az ipar egy része nem különálló gyűjtőegységekben, hanem a fékkomponensek anyagában látja a megoldást. A Brembo Greentell (4. ábra) például nikkelmentes, lézerrel felvitt bevonattal csökkenti a féktárcsa kopását és ezáltal a kibocsátást. A laboratóriumi vizsgálatok során akár 80–90% kibocsátáscsökkenést is kimutattak, ám a bevonat élettartama korlátozott, és a megoldás főként prémiumkategóriás járművekhez készült [8][9][10][11][12].

Bár ezek az anyagtudományi irányok ígéretesek, hosszú távú hatásaik és költséghatékonyságuk még nem bizonyítottak. Emellett nem minden esetben garantálható, hogy csökken a kibocsátott részecskék toxikológiai kockázata.



4. ábra. Brembo Greentell⁴⁷

3.4. Jelenlegi fejlesztési irányok összegzése

⁴⁶ Brake dust particle filter, MANN+HUMMEL. Elérés: 2025. szeptember 29. [Online]. Elérhető: <https://oem.mann-hummel.com/en/oem-products/fine-dust-filters/brake-dust-particle-filter.html>

⁴⁷ Brake Dust Is a Problem. Brembo Has a Solution, Motor1.com. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.motor1.com/news/760847/brembo-greentell-reducing-brake-emissions/>

A jelenlegi megoldások jól mutatják, hogy a fékpor-kibocsátás csökkentésének problémája több irányból is megközelíthető. Az aktív rendszerek hatékonyak, de bonyolultak és drágák, míg a passzív megoldások egyszerűek és költséghatékonyak, de hatékonyságuk korlátozott. Az anyag-alapú fejlesztések pedig még inkább kísérleti fázisban vannak.

E hiányosságok indokolják új, egyszerűbb, de mégis hatékony koncepciók kidolgozását, mint például a jelen tanulmányban bemutatott kazettás rendszerű, passzív fékpor-gyűjtő szerkezet.

4. Kazettás, passzív fékpor-gyűjtő rendszer koncepciója és tervezési megfontolásai

A fékpor-kibocsátás mérséklésére számos megoldás született, azonban ezek többsége kompromisszumokat igényel. A bevonatos tárcsák bár csökkentik a kibocsátást, anyagösszetételük miatt kérdéses a környezeti hatásuk, míg az aktív szívórendszerek hatékonyak, de bonyolultságuk és energiaigényük miatt kevésbé alkalmasak széleskörű alkalmazásra.

Az új koncepció célja egy passzív, kazettás elvű gyűjtőrendszer kidolgozása, amely a fékezéskor keletkező részecskéket közvetlenül a keletkezés helyén felfogja, és egy kazettában tárolja egészen a fékbetétsere időpontjáig. A kazetta szervizeléskor gyorsan üríthető vagy cserélhető, így nem igényel külön karbantartási műveletet. A működés külső energiaellátást nem igényel, a fékezéskor keletkező légáramlatokat használja a por irányított befogására.

A fő kihívást a hőterhelés és hőtágulás kezelése jelenti, ezért a ház és a kazetta anyagpárosítását úgy kell megválasztani, hogy az a fékezés során fellépő hőmérsékletek mellett is stabil maradjon. A cél a kompromisszum megtalálása a felhasználó és gyártói igények között.

A rendszerrel szemben támasztott alap elvárások az alábbiakban foglalhatók össze (prioritás szerint):

1. Hőállóság – a szerkezetnek el kell viselnie a fékezéskor fellépő hőterhelést.
2. Kompakt méret – illeszkednie kell a féktárcsa környezetébe anélkül, hogy akadályozná a működést.
3. Stabilitás – a jármű haladása közben a fékpor gyűjtő rendszer nem lazulhat ki, nem eshet le.
4. Megfelelő tárolókapacitás – a kazettának a fékbetétsere periódusáig biztonságosan kell tárolnia a port.
5. Könnyű hozzáférhetőség és csere – a karbantartás során gyorsan kezelhetőnek kell lennie.
6. Alacsony tömeg – nem növelheti jelentősen a rugózatlan tömeget.
7. Gazdaságos gyárthatóság – a rendszer sorozatgyártásban is költséghatékonyan előállítható legyen, az anyag- és gyártási költségek lehetőleg minimálisak legyenek.

A fentiek képezik a kazettás fékpor-gyűjtő rendszer további tervezési és fejlesztési lépéseinek alapját, melyek célja a passzív rendszerek egyszerűségének és a gyakorlatban elvárt karbantarthatóságnak az összehangolása.

5. Feltételezett kialakítások

A gyűjtőegység kialakításánál több kihívással kell szembenézni annak érdekében, hogy a 4. fejezetben meghatározott követelményeknek megfeleljen. A fékszerkezetek közötti jelentős különbségek megnehezítik a rögzítést és a kazettás gyűjtés egységes megvalósítását.

Mivel az autógyártók eltérő méretű és formájú féknyergeket alkalmaznak, a passzív rendszerű fékpor-gyűjtők adapterek nélkül nem illeszthetők univerzálisan. Az adapterek elhagyásához minden gyártónak házon belül kellene kifejlesztenie a saját rendszeréhez illeszkedő gyűjtőegységet, ami ipari szinten jelenleg kivitelezhetetlen. A csatlakozási megoldások sokfélesége önmagában külön kutatási területet jelentene, ezért nem része e kutatási anyagnak. Alapvetés azonban, hogy a gyűjtőegységet a féktárcsa forgási irányával megegyezően kell rögzíteni. Így a fékezéskor keletkező részecskék többsége a gyűjtőbe jut, mivel a keletkező erők és légáramlatok a forgásirányba sodorják a kibocsátott fékport [13]

A kazettás rendszer kialakítását az is nehezíti, hogy egy fékszerkezet két fékbetétet tartalmaz, amelyek mindegyike kibocsátó. Ezért szükséges mindkét oldal kibocsátását gyűjteni, ennek értelmében két alapvető kialakítást feltételeztem:

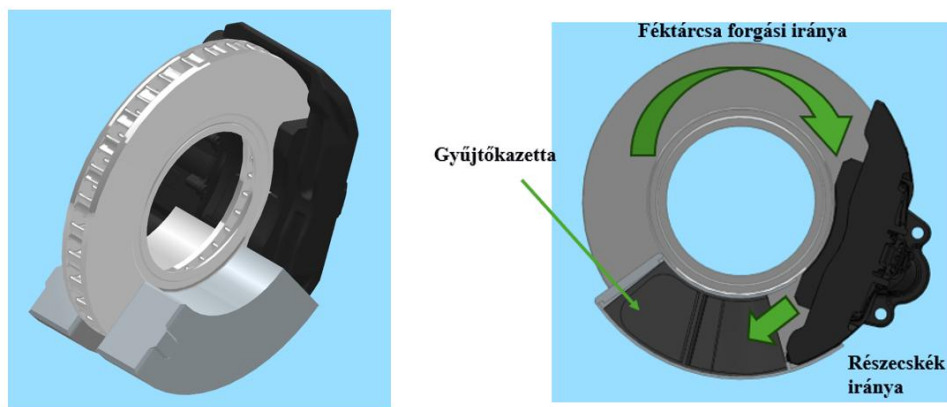
- féloldalas kialakítás, ahol oldalanként külön kazetta gyűjti a port
- kétoldali kialakítás, ahol a házban elhelyezett csatornák a port egy közös kazettába vezetik.

5.1. Féloldalas kialakítás

A modern tárcsafékes szerkezetekben két fékbetét található, így mindkét oldal porát gyűjteni kell. A féloldalas kialakításnál minden fékbetéthez külön gyűjtőegység tartozik, tehát a féktárcsa mindkét oldalán elhelyezkedik egy-egy kazetta.

A működési elv megegyezik a passzív fékpor-gyűjtők működési elvével. A gyűjtő a forgásirányban helyezkedik el, így a fékezéskor kialakuló áramlás a kazettába sodorja a részecskéket. A gyűjtő lefedi a kibocsátási irány környezetét is, ezért kevés por jut a környezetbe.

A kialakítás előnye, hogy a két oldal gyűjtőegységei függetlenek egymástól, így rögzítésük univerzálisabban alakítható. Emellett kezelni tudja, ha az egyik oldalon porvédő lemez található. A szerkezet egyszerű, mivel a ház fő feladata a kazetta rögzítése és védelme, míg az áramlástani elemek a kazettában kapnak helyet. A kialakítást és annak feltételezett működési elvét szemlélteti az 5. ábra.



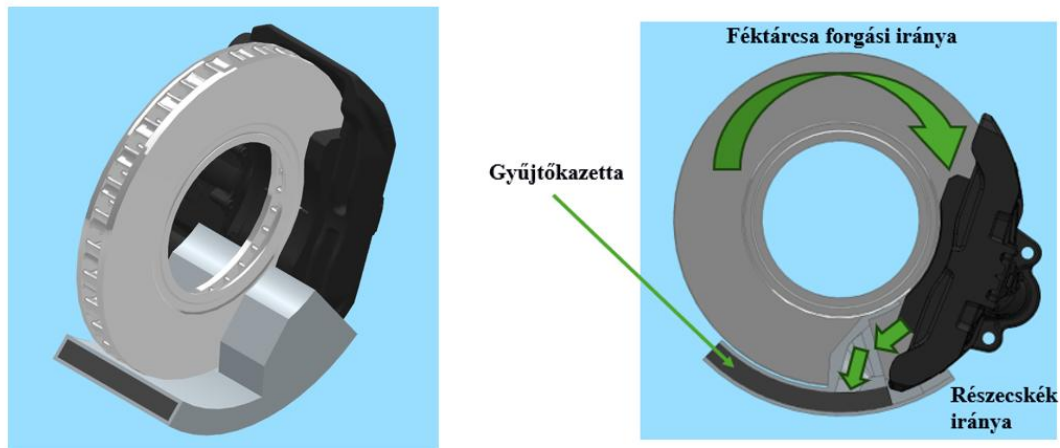
5. ábra. Féloldalas kialakítás⁴⁸

5.2. Kétoldali kialakítás

⁴⁸ Saját készítés

A kétoldali kialakítás lényege, hogy mindkét oldal kibocsátását egy közös kazetta gyűjti. A gyűjtőházban két légcsatorna található, amelyek az egyes oldalokról érkező port a kazettába vezetik.

A ház ebben az esetben nemcsak a kazetta védelmét és csatlakozását biztosítja, hanem a fő áramlási szekciót is tartalmazza, így geometriailag bonyolultabb, de kevesebb alkatrészből áll. Egy fékszerkezethez elegendő egy ház és egy kazetta. A kétoldali kialakítás és annak működési elve látható a 6. ábrán.



6. ábra. Kétoldali kialakítás⁴⁹

5.3. Kialakítások kiértékelése

A két megoldás összehasonlítását döntési mátrix (7. ábra) segítségével végeztem, a 4. fejezetben meghatározott alapkövetelmények alapján.

Szemponatok	Prioritás	Féloldalas kialakítás	Kétoldali kialakítás
Hőállóság	2,5	10	10
Kompakt méret	2,25	8	6
Stabilitás	1,75	10	10
Tárolókapacitás	1,25	10	10
Könnyű hozzáférhetőség és csere	1	8	9
Alacsony tömeg	0,75	6	6
Egyszerű és gazdaságos gyárthatóság	0,5	7	6
Összpontszám		89	85

7. ábra. Döntési mátrix⁵⁰

⁴⁹ Saját készítés

⁵⁰ Saját készítés

A kialakítástól függetlenül szabályozható paraméterek (pl. hőállóság, tárolókapacitás, stabilitás) maximális értéket kaptak, így az értékelés csakis a kialakításból adódó különbségekre fókuszált.

A kétoldali kialakítás előnye a könnyebb kazettacsere, ugyanakkor kevésbé képes alkalmazkodni az eltérő geometriájú fékszerkezetkehet, valamint túlnyúlása is nagyobb mértékű. A féloldalas kialakítás összességében kompaktabb, egyszerűbb és univerzálisabban alkalmazható, ezért a kutatás további részében a koncepció kidolgozásának alapját a féloldalas kialakítás jelenti.

6. Kazettaház tervezése

A tervezés első lépéseként a kazettaház kialakítása meghatározó, mivel a fékezéskor keletkező hőhatások először ezt az elemet érik. A ház anyagának és geometriájának ismerete szükséges ahhoz, hogy a kazetta anyagválasztása később megfelelő alapokra épüljön. A szerkezet kialakításánál alapvető követelmény, hogy íves, a féktárcsa kontúrját követő formát kapjon, miközben méretei nem haladhatják meg jelentősen a féknyereg által biztosított helyet. Ezzel biztosítható a rendszer zavartalan illeszkedése és működése.

6.1. A ház anyagának megválasztása

Az anyagválasztás során az ipari szempontok, tömeg, hőállóság, korrózióállóság és megmunkálhatóság, egyaránt meghatározóak voltak. A feltételek alapján az alumínium bizonyult a legcélszerűbb alapanyagának: alacsony tömegű, jól formázható és hővezető, valamint széles körben alkalmazott az autóiparban, többek között féknyergek és szerkezeti elemek esetében is.

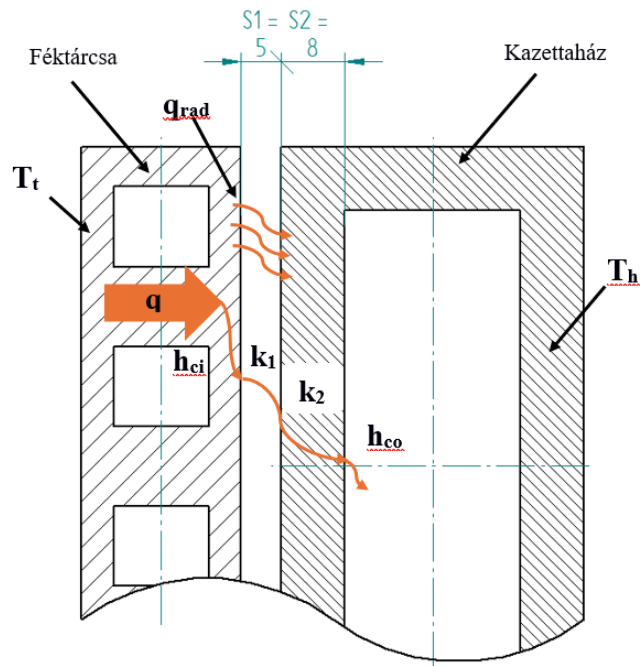
A vegytiszta alumínium azonban nem rendelkezik kellő mechanikai és hőtani tulajdonságokkal, ezért alumíniumötvözet alkalmazása szükséges. A 6061-es (Al-Mg-Si) ötvözet a kedvező korrózióállósága, jó hővezetése, megfelelő alakíthatósága és olvadáspontja miatt került kiválasztásra [14]. Az iparban elterjedt, könnyen beszerezhető és költséghatékony anyag, így a fékpor-gyűjtő kazetta házához ideális választásnak bizonyult.

A T6 hőkezelt állapotban lévő 6061 ötvözet mechanikai és hőtani tulajdonságai megfelelő biztonságot nyújtanak a fékezés közben fellépő hő- és erőhatásokkal szemben.

6.2. Hőtani ellenőrzés

A kiválasztott anyag megfelelőségét egyszerűsített hőtani számításokkal vizsgáltam. A modell egy rendkívül extrém, 40 másodperces folyamatos fékezést feltételez, amely során a féktárcsa hőmérséklete állandóan 550 °C. Bár ez irreális feltételezés, alkalmas az anyagválasztás biztonságos értékelésére. A számításnál feltételezett helyzet vázlatát a 8. ábra szemlélteti.

A számítások során a hőátadás konvekcióval, hővezetéssel és hősugárzással egyaránt figyelembe lett véve. Az eredmények szerint a házat érő összes hőterhelés kb. 14,8 kJ volt, ami 33 °C-os hőmérséklet-emelkedést okozott a szerkezetben. Így a ház végső hőmérséklete mindössze 78 °C körüli, ami bőségesen az ötvözet olvadáspontja (650 °C) alatt marad. Ez a számítás igazolja a 6061-T6 alumínium hőállóságát és alkalmazhatóságát az feltételezett körülmények között.

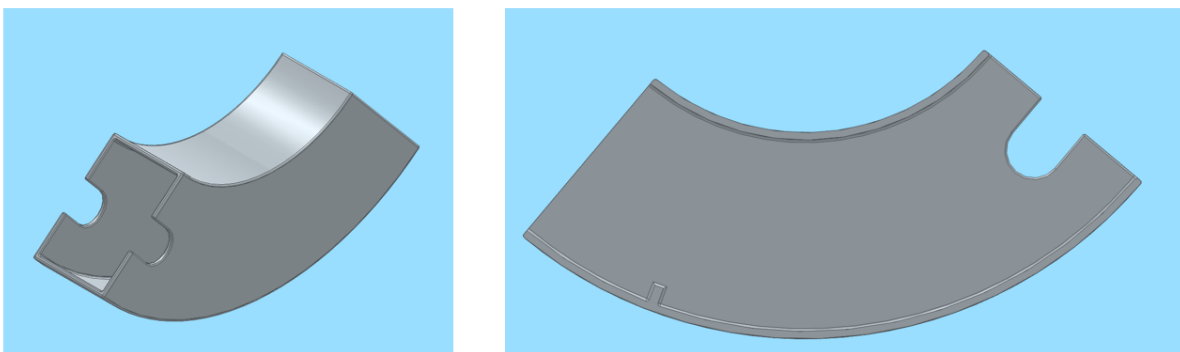


8. ábra. Feltételezett hőközlési folyamatok vázlata⁵¹

A hőtágulás meghatározására elvégzett számítás szerint egy 100 mm-es kiterjedés esetén a ház méretváltozása mindössze 0,078 mm, ami a gyakorlatban elhanyagolható, és nem befolyásolja jelentősen a szerkezet illeszkedését vagy működését.

6.3. A ház kialakítása

A kazettaház féloldalas kialakítása (9. ábra) egyszerű formát tesz lehetővé, mivel nem vesz részt a levegőáramlás irányításában. A cél a könnyű hozzáférhetőség és a szerelhetőség biztosítása volt. A ház végén található kivágások megkönnyítik a kazetta cseréjét, illetve a zárófedelek illesztését.



9. ábra. Kazettaház kialakítása⁵²

A geometria az adott fékszerkezethez igazítható, de általánosságban a külső ív sugara csak minimálisan haladja meg a féknyereg kontúrját. Ez a megoldás garantálja, hogy a ház minden

⁵¹ Saját készítés

⁵² Saját készítés

esetben elfér a rendelkezésre álló térben, miközben megtartja strukturális stabilitását és a szükséges hőtani teljesítményt.

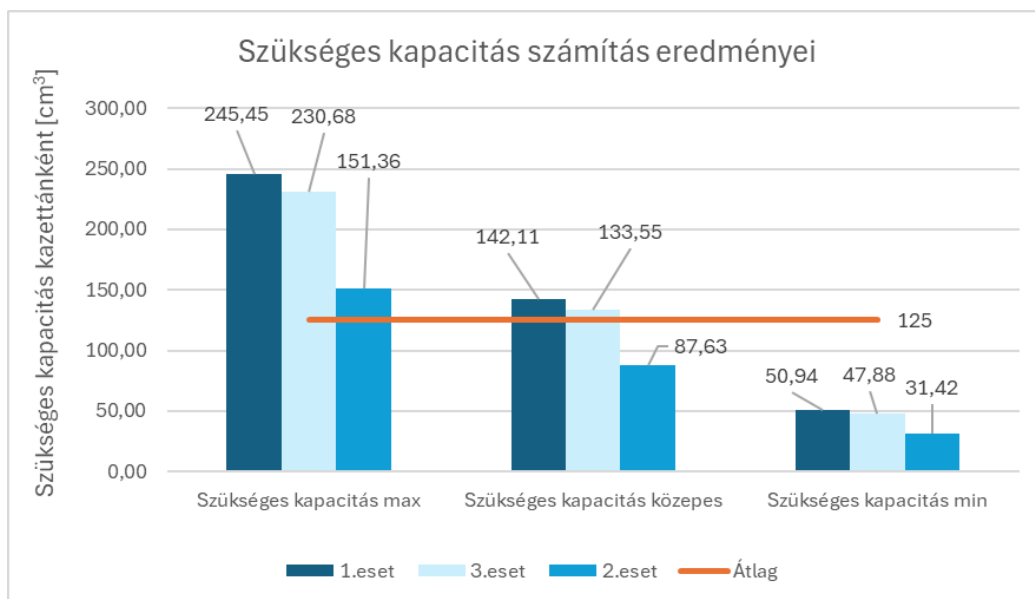
7. Gyűjtőkazetta tervezése

A gyűjtőkazetta elsődleges feladata a fékpor hatékony begyűjtése és annak tárolása, egészen a fékbetétszere periódusig, miközben a rendszer egyszerűen gyártható és passzívan működő marad. A tervezés során a kazetta anyagát, belső kialakítását és áramlástani viselkedését egyaránt figyelembe vettem, hogy a gyűjtés potenciálisan minél hatékonyabb lehessen.

7.1. A gyűjtőkazetta kapacitásának meghatározása

A kazetta tárolókapacitása kulcsfontosságú, hiszen, ha nem képes elegendő fékport befogadni, az egész koncepció hatékonysága csökken. A szükséges kapacitás meghatározásához figyelembe vettem a fékpor sűrűségét, az egy gépjármű által kilométerenként kibocsátott fékpor mennyiségét, valamint a fékbetét átlagos élettartamát kilométerben.

A szakirodalom szerint a fékpor sűrűsége jelentősen eltérhet, $0,75\text{--}2,65\text{ g/cm}^3$ közötti értékekkel [13][15], míg az egy járműre jutó kibocsátás $5,4\text{--}7,4\text{ mg/km}$ [2][16]. Ezek az eltérések a vizsgálati módszerek és a fékbetét típusának különbségeiből adódnak. A bizonytalanságok miatt három forgatókönyvet vizsgáltam: pesszimista (1. eset, magas kibocsátás, rövid élettartam), optimista (2. eset, alacsony kibocsátás, hosszú élettartam) és közepes eset (3. eset). A 10. ábrán láthatók a kapacitás számítás során kapott eredmények. A számítás során minden esetben feltételeztem egy maximális, közepes és minimális szükséges kapacitást, a minél pontosabb számítás érdekében.



10. ábra. A kazettánkénti szükséges kapacitás számítás eredményei grafikonon⁵³

A kazetták elhelyezése szerint egy fék szerkezethez két kazetta tartozik, így a keletkező fékpor ideálisan feloszlik a két gyűjtő között. Figyelembe vettem egy biztonsági tényezőt ($n = 1,2$) az esetleges egyenlőtlen eloszlás miatt. A számítások eredményeként átlagosan kazettánként 125 cm^3 , a biztonsági tényező figyelembevételével 150 cm^3 minimális gyűjtőkapacitás szükséges.

⁵³ Saját készítés

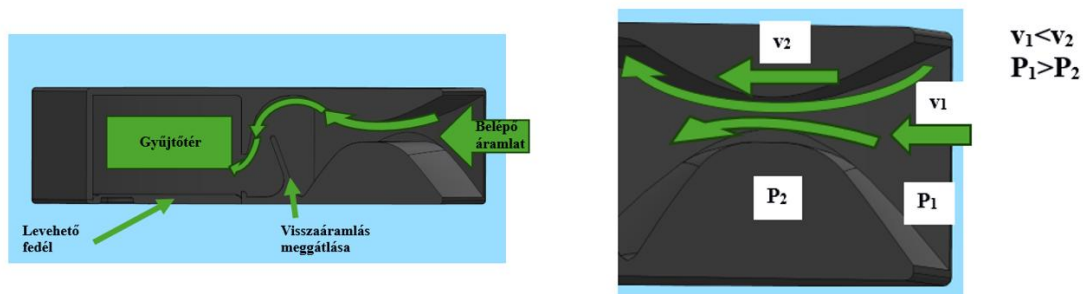
7.2. Anyagválasztás

A kazetta anyagának kiválasztásakor a fő szempontok a tömegcsökkentés, hő- és mechanikai ellenállás, valamint a kémiai stabilitás voltak. A polipropilén (PP) mind homopolimer, mind kopolimer állapotában ideális választásnak bizonyult, alacsony sűrűsége ($0,905 \text{ g/cm}^3$), jó mechanikai tulajdonságai, aránylag magas hőtűrése és kémiai stabilitása miatt [17][18]. Az ABS alternatíva lehet, azonban a PP előnyei és széleskörű ipari alkalmazhatósága miatt a végső választás a polipropilénre esett.

A kazetta kialakításánál figyelembe vettem a hőtágulást is: a polipropilén $\Delta t \approx 0,22 \text{ mm-t}$ tágul az adott hőmérsékletváltozásnál, ami közel négyszerese az alumínium ház tágulásának. A megfelelő tervezés biztosítja, hogy a kazetta a hőtágulásból adódó feszültségeket elkerülje.

7.3. Gyűjtőkazetta kialakítása

A kazetta belső kialakításánál az áramlástani hatékonyságot helyeztem előtérbe. A belépő keresztmetszet szűkítésével a Bernoulli törvény alapján alacsony nyomású régió jön létre, ami a környező levegőt a gyűjtőkazetta felé tereli [19]. A féloldalas, íves kialakítás a Coandă-hatást használja ki, minek értelmében az áramló levegő hajlamos követni a görbült felületet [20], ezáltal a részecskék a gyűjtőtér felé irányulnak. Ezt szemlélteti a 11. ábra.



11. ábra. A kazetta belső kialakítása és a kialakuló nyomásviszonyok⁵⁴

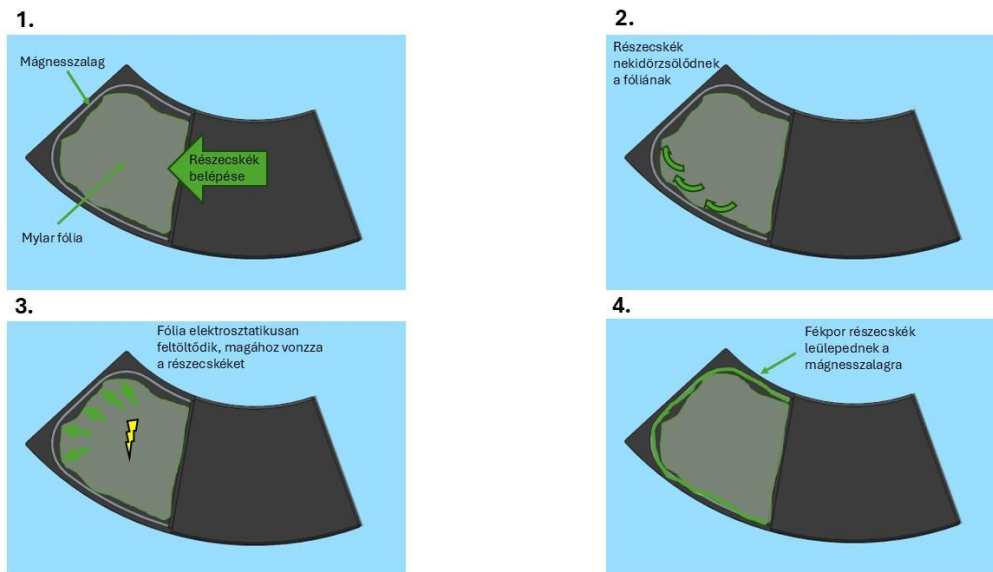
Az előszűrésről egy perforált lemez gondoskodik, ami megakadályozza a nagyobb szennyeződések, például kavicsok bejutását, miközben a milliméternél kisebb részecskék áthaladnak. A kazetta levehető fedéllel rendelkezik, amely gumigyűrűs tömítéssel biztosítja, hogy a fékpor ne szivárogon ki a gyűjtőtérből, és jusson vissza a környezetbe.

7.4. A gyűjtőtér kialakítása

A gyűjtőtér működése ötvözi az elektrosztatikus és mágneses elveket. A belső felület vékony mágnesszalaggal borított, míg a tényleges tároló a könnyen eltávolítható Mylar (BoPET) zsák. A zsák elektrosztatikusan feltöltődik, és vonzza a fékpor részecskéket, míg a mágnescsík megtartja azokat, így az összegyűjtött fékpor könnyen eltávolítható a zsák cseréjekor.

Ez a megoldás lehetővé teszi a fékpor potenciális újrahasznosítását, miközben a gyűjtés hatékonysága optimális marad, és a kazetta védett a környezeti szennyeződésektől. A kialakítás működését mutatja be a 12. ábra.

⁵⁴ Saját készítés



12. ábra. A gyűjtőtér feltételezett működése⁵⁵

7.5. A kazetta kialakításának összefoglalása

A gyűjtőkazetta kialakítása ötvözi a megfelelő kapacitást, hő- és mechanikai ellenállást, valamint a passzív áramlástani elveket, lehetővé téve a fékpor hatékony begyűjtését és tárolását a fékbetét csereperiódusáig. Az elvi működés kedvező, azonban a valós hatékonyság igazolásához további kísérletek szükségesek.

8. Összegzés

A dolgozat célja egy passzív, kazettás fékpor-gyűjtőrendszer koncepciójának kidolgozása volt, amely egyszerű felépítése ellenére képes a fékezés során keletkező részecskék jelentős részének begyűjtésére, külső energiaforrás nélkül. A tervezés fő szempontjai a funkcionalitás, anyagválasztás, hőállóság és karbantarthatóság voltak, a rendszer célja pedig minimális többletterhet jelenteni gyártói és felhasználói szempontból.

A kazettás felépítés előnye az egyszerűség és modularitás: a karbantartás a fékbetét-csere periódusához igazítható, így felhasználóbarát megoldást kínál. Az alapelv logikailag koherens, és a koncepció költséghatékony megoldást kínál a fékpor problémájára.

Jelenleg azonban a rendszer nem rendelkezik valós csatlakozási megoldással a fékszerkezethez, és a geometria, valamint a hőtani viselkedés optimalizálása további fejlesztést igényel. A következő lépésben javasolt a validációs fázis: CFD- és hőtani szimulációk a részecskeáramlás és hőterhelés vizsgálatára, majd kísérleti prototípus készítése.

Fontos kiemelni, hogy a rendszer még nem egy kizárólagos megoldást jelent a fékpor problémájára, hiszen a jövőben új anyagok, fékbetét-típusok vagy integrált szűrőrendszerek is előtérbe kerülhetnek. A kazettás koncepció azonban értékes kiindulópont, amely egyszerű, passzív elvekkel ötvözi a felhasználói és gyártói szempontokat.

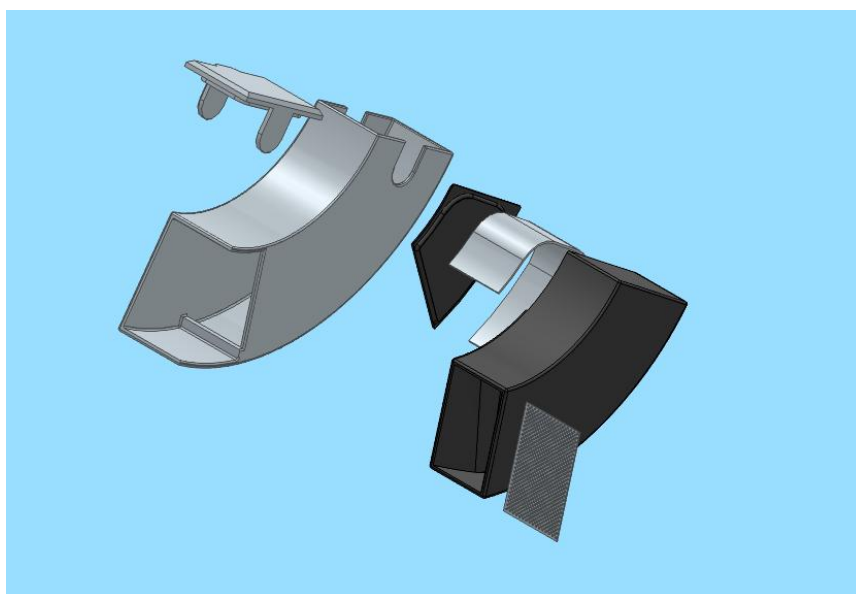
Fő tanulságok:

- Az egyszerű, passzív rendszerek ígéretesek a fékpor-kibocsátás csökkentésére.
- A kazettás rendszer fő előnye az integrálhatóság és a könnyű karbantarthatóság.

⁵⁵ Saját készítés

- Legnagyobb kihívás a csatlakozás, a hőtani viselkedés és a gyárthatóság optimalizálása.
- A rendszer valódi potenciálja a szimulációs és prototípus-fejlesztési fázisokban mutatkozik meg.

Összességében a dolgozat új, mérnöki megvalósított, további fejlesztést igénylő alternatívát kínál a fékpor kibocsátás csökkentésére, hozzájárulva a fenntarthatóbb városi közlekedéshez. A kutatás során a rendszerhez tervezett fő alkatrészeket a 13. ábra foglalja össze.



13. ábra. A fékpor gyűjtő szerkezet megtervezett alkatrészei⁵⁶

9. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] L. Zhou és mtsai., Health impacts of PM_{2.5} emissions from brake pad wear: A comprehensive study on pulmonary, metabolic, and microbiota alterations, *Toxicology*, köt. 511, o. 154055, febr. 2025, doi: 10.1016/j.tox.2025.154055.
- [2] J. C. Fussell és mtsai., A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles: Emissions, Physicochemical Characteristics, Health Risks, and Mitigation Measures, *Environ. Sci. Technol.*, köt. 56, sz. 11, o. 6813–6835, jún. 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c01072
- [3] A. Piscitello, C. Bianco, A. Casasso, és R. Sethi, *Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures*, *Sci. Total Environ.*, köt. 766, o. 144440, ápr. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144440.

⁵⁶ Saját készítés

- [4] M. A. Costagliola és mtsai., *Non-Exhaust Particulate Emissions from Road Transport Vehicles, Energies*, köt. 17, sz. 16, o. 4079, aug. 2024, doi: 10.3390/en17164079.
- [5] M. Hascoët és L. Adamczak, *At source brake dust collection system*, *Results Eng.*, köt. 5, o. 100083, márc. 2020, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100083.
- [6] *Brake dust particle filter*, MANN+HUMMEL. Elérés: 2025. szeptember 29. [Online]. Elérhető: <https://oem.mann-hummel.com/en/oem-products/fine-dust-filters/brake-dust-particle-filter.html>
- [7] S.-H. Woo, G. Lee, B. Han, és S. Lee, *Development of Dust Collectors to Reduce Brake Wear PM Emissions*, *Atmosphere*, köt. 13, sz. 7, o. 1121, júl. 2022, doi: 10.3390/atmos13071121.
- [8] *Car brake pads to change under new rules to curb pollution*. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.bbc.com/news/articles/cp314qz119qo>
- [9] *Brembo Greentell Set*, Brembo. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.brembo.com/en/solutions/greentell/greentell-set>
- [10] *Brembo Greentell Set at Auto Shanghai 2025*, BremboGroup. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.brembogroup.com/en/media/news/brembo-greentell-set>
- [11] J. M. Gitlin, Brembo develops brakes with almost no brake dust and less wear, *Ars Technica*. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://arstechnica.com/cars/2025/05/brembos-new-brakes-cut-particulate-emissions-by-90-percent/>
- [12] *Brake Dust Is a Problem. Brembo Has a Solution*, Motor1.com. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.motor1.com/news/760847/brembo-greentell-reducing-brake-emissions/>
- [13] *Breaking the Cycle of Brake Dust Emissions*. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.ansys.com/blog/breaking-the-cycle-of-brake-dust-emissions>
- [14] A. H. Committee, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International, 1990. doi: 10.31399/asm.hb.v02.9781627081627.
- [15] O. Nosko és U. Olofsson, *Effective density of airborne wear particles from car brake materials*, *J. Aerosol Sci.*, köt. 107, o. 94–106, máj. 2017, doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.02.014.
- [16] F. H. F. zum Hagen és mtsai., *Study of Brake Wear Particle Emissions: Impact of Braking and Cruising Conditions*, *Environ. Sci. Technol.*, köt. 53, sz. 9, o. 5143–5150, máj. 2019, doi: 10.1021/acs.est.8b07142.
- [17] B. P. Federation, *Polypropylene (PP)*, British Plastics Federation. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/PP.aspx>
- [18] *Polypropylene (PP) - Types, Properties, Uses & Structure*. Elérés: 2025. október 17. [Online]. Elérhető: <https://www.specialchem.com/plastics/guide/polypropylene-pp-plastic>

- [19] R. Qin és C. Duan, *The principle and applications of Bernoulli equation*, J. Phys. Conf. Ser., köt. 916, o. 012038, okt. 2017, doi: 10.1088/1742-6596/916/1/012038.
- [20] C. Lubert, *On Some Recent Applications of the Coanda Effect*, Int. J. Acoust. Vib., köt. 16, sz. 3, 2011, doi: 10.20855/ijav.2011.16.3286.

Összetett életciklus-elemzés és költségvizsgálat a hazai járműpark dekarbonizációs lehetőségeinek értékelésére

Integrated life cycle analysis and cost assessment to evaluate decarbonization options for the hungarian passenger vehicle fleet

Mecseri Botond Ákos

Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar, Alkalmazott Fenntarthatóság Tanszék
mecseri.botond.akos@sze.hu

Absztrakt: Magyarország előregedő személygépjármű-állománya és az ezzel kapcsolatos szakmai elemzések hiánya szükségessé teszik a járműpark rendszerszintű vizsgálatát. A komplex probléma több szempontú megközelítést igényel, ezért a kutatás során két, a fenntarthatóság tudományán belül elterjedt módszert alkalmaztam: az életciklus-elemzést (LCA: Life Cycle Assessment) és az életciklus-költség-elemzést (LCC: Life Cycle Cost). Az LCA során öt környezeti indikátor került figyelembevételre: a globális felmelegedési potenciál (GWP), a savasodási potenciál (AP), a finom- és durvarészecske-szennyezés (PM2.5 és PM10), valamint az illékony szerves vegyületek (VOC). Az LCC elemzésben a teljes életciklus költségéből számított éves tulajdonlási költség került meghatározásra, amely tartalmazza a beszerzési, üzemeltetési, karbantartási és energiafogyasztási kiadásokat. A vizsgálat nyolc év historikus járműtípus-eloszlásán és villamosenergia-mix adatain alapult, valamint 2040-ig terjedő statisztikai előrejelzéssel egészült ki. Az átlagos környezeti hatásindexek 2040-ig minden esetben csökkenő tendenciát mutat, kivéve a savasodási potenciált, amely az elektrifikációval párhuzamosan növekedést jelez. A plug-in hibrid és tisztán elektromos járművek éves tulajdonlása Magyarországon jelentősen drágább, mint a belsőégésű motoros járművéké. A két eredmény együttes értelmezése alapján a kibocsátáscsökkentés gazdasági értéke nem fedezi a többletköltséget, még a karbonkötvény társadalmi árát figyelembe véve sem, így a fejlesztési pálya jelenlegi állapotában gazdaságilag nem indokolt. Az időszeri statikus adatok korlátozottsága, különösen a belsőégésű motoros járművek kipufogó-kibocsátásainak hiányos felbontása miatt, indokoltá teszi a módszertan továbbfejlesztését. Az adatbázis részletesebbé, például EURO vagy környezetvédelmi kategóriák szerinti bontásban, lehetővé tenné a hazai járműpark környezeti és gazdasági lenyomatának átfogóbb és tisztább értékelését.

Kulcsszavak: járműállomány, fenntarthatóság, karbonkötvény

Abstract: Hungary's aging passenger vehicle fleet and the lack of related professional analyses make the systematic examination of the vehicle stock necessary. The complex problem requires a multi-perspective approach, therefore two methods widely used within sustainability science were applied in the research: Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC). In the LCA, five environmental indicators were taken into account: Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), fine and coarse particulate matter (PM2.5 and PM10), and Volatile Organic Compounds (VOC). In the LCC analysis, the annual ownership cost was determined from the total life-cycle cost, which includes purchase, operation, maintenance, and energy consumption expenses. The study was based on eight years of historical vehicle-type distribution and electricity-mix data, and was supplemented with statistical forecasts extending to 2040. The average environmental impact indicators show a decreasing trend in all cases until 2040, except for acidification potential, which indicates an increase in parallel with electrification. The annual ownership of plug-in hybrid and fully electric vehicles in Hungary is significantly more expensive than that of internal combustion engine vehicles. Interpreting the two results together shows that the economic value of emission reduction does not cover the additional cost, even when considering the social price of carbon credits, therefore in its current state the development pathway is not economically justified. The limitations of time-series-based static data,

especially the incomplete resolution of exhaust emissions for internal combustion engine vehicles, justify further development of the methodology. Detailing the database, for example by breaking it down according to EURO or environmental categories, would enable a more comprehensive and clearer assessment of the environmental and economic footprint of the domestic vehicle fleet.

Keywords: vehicle fleet, sustainability, carbon credit

1. Bevezetés

Napjaink egyik legaktuálisabb és leginkább kiszolgáltatott tématerülete a fenntarthatóság akár mobilitás, akár energiaipari kontextusában. Valóban egy komplex problémáról van szó, amely egyszerre érinti a műszaki tudományokat, a kémiai folyamatokat, a közgazdaságtant, a szociológiát és a politikát, ezért a téma vizsgálata több irányból történő megközelítést igényel. Ugyanakkor elengedhetetlen a szakmai precizitás fenntartása a harmonizáltság, az átláthatóság és a következetesség érdekében. A tudományos irodalom például rámutat arra, hogy a fenntarthatósági jelentések szabványosításának hiánya összehasonlíthatatlansághoz vezet és gyengíti az átláthatóságot [1]. Emellett a mobilitás területén is megjelenik a kihasználtság, az egyenlőtlenségek és a rendszerkialakítási kérdések vizsgálata, amelyre egyes tanulmányok rámutatnak, hogy a mobilitási szolgáltatások kialakítása során gyakran érvényesülnek gazdasági és társadalmi kiszolgáltatottsági elemek is [2]. A Magyarország által 2023 júniusában benyújtott frissített Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT) [3] hangsúlyozza a közlekedés és energia szoros összefonódását, valamint a két szektor közötti integrált tervezés szükségességét. A terv célja, hogy erősítse az energiafüggetlenséget és biztonságot, miközben elősegíti a dekarbonizációt, különös figyelmet fordítva a közlekedési szektor környezeti hatásainak csökkentésére. Viszont alapvetően a politikai döntéshozatalban a mobilitás fenntarthatósága nem kap elég figyelmet és finanszírozást Magyarországon, amennyit arányosan kellene erre fordítani, akár ipari fejlesztés szintjén vagy lakossági ösztönzésként. A Deloitte áttekintése rámutat arra, hogy Magyarország 2014-2020-as uniós támogatási ciklusában mindössze ~17 millió eurót kapott a „intelligens, környezetbarát és integrált” közlekedés kategóriájában, összehasonlítva az EU-összeggel ez alacsony arány. Emellett azt is kiemeli, hogy a közlekedés-mobilitás és energia szektorban jelentős beruházási források állnak rendelkezésre az EU-n belül, de a magyar részvétel és kihasználtság viszonylag korlátozott [4].

A fenntarthatóság egyik legkomplexebb kihívása a mobilitás és az energiafelhasználás szoros kapcsolatában rejlik, ami rendszerszintű megközelítést kíván. A mobilitás (közlekedés és szállítmányozás), mint dinamikus energiafogyasztó szféra, és az energiaipar, mint stacionárius háttérrendszer, elválaszthatatlanul összefonódik. Ezt a szektorok közötti összekapcsolás fontosságát hangsúlyozzák a nemzetközi gyakorlatok is, például a német energiaátmenet stratégiája is, amely különösen a megújuló energiaforrások, a tárolás és a szektorok közötti összekapcsolás technológiáira helyezi a hangsúlyt [5]. Kutatási eredmények alapján a szigorúbb CO₂-korlátozások ugyan a megújuló források elterjedését gyorsítják, de a rendszer stabilitása végső soron az energiahatékonyság és a rugalmas technológiák alkalmazásán múlik. Ez a megközelítés támasztja alá, hogy a döntéshozatal és a stratégiai tervezés során csak a valós alternatívákon alapuló, a teljes rendszert átfogó elemzés eredményezhet megalapozott választásokat.

A jelen tanulmány újdonsági értékét és indokoltságát elsősorban az magyarázza, hogy a magyarországi járműállományra vonatkozó, ilyen átfogó és integrált vizsgálat egyértelmű hiányosságként vehető számba. Bár a nemzetközi szakirodalom számos példát kínál a módszertani úttörő szerepre, legyen szó egyetemi kutatócsoportok önálló kezdeményezésű munkáiról, vagy a fejlett országokban gyakori, állami és uniós megbízásból létrejövő, nemzeti

stratégiákat támaztó alá kutatásokról, ezek az értékes referenciák a hazai gyakorlatban eddig nem öltöttek testet. Magyarországon ugyanis se nem jött létre hasonló, kormányzati megbízás alapján indított, nagyléptékű kutatás, se nem készült teljes körű, független szakértői elemzés, amely a személygépjármű-állomány fenntarthatósági problémakörét egységes keretben vizsgálná.

A részletes szakirodalmi áttekintés ezt a hiányt egyértelműen alátámasztja. Kimutatható, hogy Magyarországon eddig nem készült olyan, nyilvánosan hozzáférhető, flottaszintű és teljeskörű életciklus-elemzés (LCA) és életciklus-költség-elemzés (LCC), amely a hajtáslánc-technológiákat, az életciklus-költségeket, az energia-mix szerepét és a jövőbeli szcenáriókat integrált módon modellezné. A meglévő hazai tanulmányok (bár értékes részeredményeket mutatnak be) legtöbbször az üvegházhatású gázok kibocsátásának statisztikai elemzésére korlátozódnak, vagy egy-egy specifikus kérdéskörre fókuszálnak, így nem pótolják a teljes járműparkra kiterjedő, harmonizált LCA/LCC-keretrendszer hiányát. (Megjegyzés: ezzel együtt nem zárható ki olyan, zárt körben, intézményi megbízásra készült jelentések létezése, amelyek a nyilvános hozzáférés hiánya miatt nem kerültek be a jelen áttekintésbe.)

2. Módszertan

Az életciklus-elemzés (LCA) és az életciklus-költségelemzés (LCC) olyan, a fenntarthatósági vizsgálatokban széles körben alkalmazott módszerek, amelyek a környezeti, műszaki és gazdasági szempontokat egyaránt képesek rendszerszinten értékelni. Az LCA lehetővé teszi egy termék vagy technológiai rendszer teljes életútjának környezeti hatásvizsgálatát a nyersanyagok kitermelésétől a gyártáson és üzemeltetésen át a hulladékkezelésig. A teljes életciklus fő szakaszait az 1. ábra szemlélteti. A személygépjármű-állomány vizsgálatában az LCA kiemelten fontos, mivel a járművek teljes élettartamuk során jelentős energiafelhasználással és emisszióval járnak; ezek objektív összehasonlítása nélkülözhetetlen a fenntarthatósági döntések megalapozásához. A vizsgálat célját és hatókörét úgy határoztam meg, hogy a különböző hajtástípusok időbeli alakulása és a villamosenergia-mix változása éves bontásban legyen összevethető. A kutatás Cradle-to-Grave rendszerhatárok között értékelte a jármű- és üzemanyagciklus teljes életútját. A leltárfázis során a GREET modell paraméterezhető adatbázisa szolgált alapul, amely nemzetközileg validált forrás a közlekedési rendszerek anyag- és energiaáramainak meghatározására. Az életciklus-hatáselemzés során a vizsgálat a GWP, AP, PM2.5, PM10 és VOC indikátorok szerint értékelte a járműpark környezeti teljesítményét, amelyekhez a GREET adatbázisból származó impaktfaktorok és más legitim forrásokkal végzett folyamatos keresztvalidáció biztosított megbízható numerikus alapot. Az értelmezés szakaszában a környezeti mutatók időbeli alakulása alapján meghatározhatóvá váltak a hajtástechnológiák környezeti rangsorai és az azokhoz kapcsolódó fejlesztési irányok.

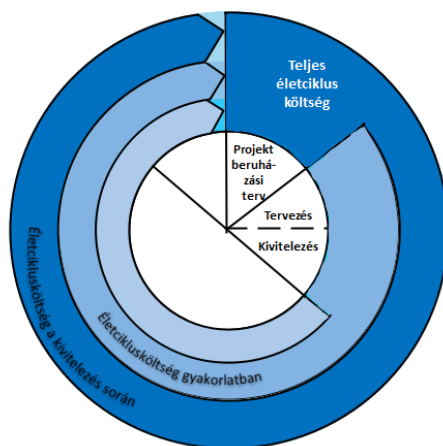


22. ábra. A teljes életciklus fő szakaszai⁵⁷

Az életciklus-költségelemzés (LCC) a vizsgálat gazdasági aspektusát adta, amely a termékek és technológiák teljes élettartama alatt felmerülő költségek átfogó értékelésére szolgál. A teljes életciklus költségszerkezetének fő szakaszait a 2. ábra mutatja be. A módszer alkalmazása különösen indokolt a közlekedési rendszerekben, ahol a gazdasági versenyképesség és a költséghatékonyság a legfontosabb döntési tényezők közé tartozik. Az LCC felépítése a hatókör meghatározását, a beruházási, üzemeltetési, karbantartási, energia- és adójellegű költségek azonosítását, valamint ezek jelenértékre történő diszkontálását foglalja magában. A módszer lehetővé teszi, hogy a különböző hajtásláncú személygépjárművek teljes tulajdonlási költsége összevethető legyen, és megmutassa, mely technológiák kínálnak hosszú távon gazdaságilag is fenntartható alternatívát. A GREET modell alkalmazása mindehhez szintén alapot adott, hiszen a modell Well-to-Wheel (GREET1) és Cradle-to-Grave (GREET2) komponensei segítségével a magyar járműpark energiafelhasználása és emissziós jellemzői időben dinamikus módon értékelhetők. A teljes jármű- és üzemanyagciklus különválasztása lehetőséget adott annak feltárására, hogy az emissziók mely szakaszokban koncentrálnak, és hogy az energiahordozók gyártástechnológiája milyen mértékben befolyásolja a végeredményeket.

A modell paramétereizhetősége lehetővé tette, hogy a hazai villamosenergia-mix és a különböző hajtástípusok arányainak időbeli alakulása alapján saját adatbázist hozzak létre, amelyből az eredmények teljes életútra, éves bontásra és kilométerre vetítve egyaránt levezethetők. Lényeges, hogy időben dinamikus adatok elsősorban az elektromos energiával működő hajtásláncok esetében voltak elérhetők, míg a hagyományos benzines és dízel technológiák csak statikus emissziós adatokkal rendelkeznek, ami korlátozza a pontosabb összehasonlíthatóságot. Ennek ellenére a modell validálása több független forrással lehetővé tette, hogy a magyar járműpark régióspecifikus kibocsátási eredményei jól kövessék a valós trendeket és illeszkedjenek az európai dekarbonizációs célkitűzésekhez.

⁵⁷ N. Réka, "Villamosított utak életciklus elemzése," *Útügyi Lapok*, 5. évf., 10. szám, 2017.



2. ábra. A teljes életciklus költség szerkezetének fő szakaszai⁵⁸

3. Saját vizsgálat

Első sorban, ahogy már említettem nyilvános elérhetőségű adatok segítségével, a központi statisztikai hivatal és a villanyautósok.hu (akik a belügyminisztériumtól kértek nyilvános adatlekérést, mint újságírók) által megosztott szám adatok segítségével 2017-től 2024-ig kaptam egy hét hajtástípusra bontható historikus adatsort [6], [7]. Ezáltal a vizsgált hajtástípusok a következők: benzin, dízel, normál hibrid, plug-in hibrid (vagy hatótáv-növelt elektromos jármű), akkumulátoros elektromos, hidrogén üzemanyagcellás és vegyes tüzelésű.

Nyolc év historikus adat és idej jelentés (2017–2025) alapján készült a vizsgálat, ahogy látható az 1. táblázatból. A vizsgált időszak alatt a teljes magyarországi személygépjármű-állomány 25,2%-kal növekedett, 3,47 millióról 4,34 millió darabra. A benzines hajtású járművek száma viszonylag stabil maradt, mindössze 9,4%-os növekedést mutatott a vizsgált időszakban, ami évi átlagban kevesebb mint 1,2%. A dízelhajtású járművek száma ennél dinamikusabban bővült, 29,2%-kal 2017 és 2025 között, ami átlagosan évi 3,3%-os növekedésnek felel meg.

A 2020–2025 közötti időszakban az elektrifikált hajtású járművek száma Magyarországon robbanásszerű növekedést mutatott. A hibrid elektromos (HEV) járművek állománya 102 555-ről 233 896-ra nőtt, ami több mint 2,3-szoros emelkedést jelent. A plug-in hibrid (PHEV/EREV) járművek száma 14 557-ről 51 193-ra emelkedett, ez 3,5-szeres növekedésnek felel meg. A teljesen elektromos (BEV) járművek esetében figyelhető meg a legmarkánsabb bővülés: 2020-ban még 11 012 darabot tartottak nyilván, míg 2025-re ez a szám több mint hétszerezésre, 78 908 darabra nőtt.

Ez az aránytalanul gyors növekedés egyértelműen mutatja, hogy a magyar járműpark elektrifikációja az elmúlt években felgyorsult, viszont sajnos a teljes állományon belüli arányuk továbbra is viszonylag alacsony. A tendencia mögött részben az elektromobilitást támogató kormányzati ösztönzők (pl. vásárlási támogatások, zöld rendszám), részben a beszerzési árak csökkenése és a töltőinfrastruktúra bővülése áll. A regisztrált autók számának elérhetősege miatt a különbséggel számolva kiszámítható a kivont járműveknek a mennyisége az évek során, ami alapvetően nincs adatként megadva a nyilvántartásban. A regisztrált járművek száma a vizsgált időszakban éves szinten átlagosan mintegy 259 ezer darabot tett ki, míg a kivont

⁵⁸ saját készítésű ábra

járművek átlagos száma körülbelül 141 ezer volt. Ennek eredményeként a járműpark évente átlagosan közel 118 ezer darabbal növekedett. A magas éves kivonási arány hozzájárul a járműállomány technológiai megújulásához és fokozatos tisztulásához.

[GWh]	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Nukleáris	16098	15733	16288	16055	15990	15812	15918
Szén és széntermékek	5098	4834	4184	3826	3105	3064	2509
Földgáz	7869	7282	8700	9091	9653	8873	7279
Kőolajtermékek	86	91	71	45	59	59	55
Biomassza	1645	1798	1769	1664	1775	1693	1126
Biogáz	348	336	321	324	295	315	320
Kommunális hulladék megújuló része	159	162	137	167	161	130	118
Víz	220	222	219	244	212	178	222
Szél	0758	607	729	655	664	610	646
Nap	349	629	1497	2459	3796	4732	6925
Geotermikus	1	12	18	16	12	4	16
Egyéb	284	361	358	384	398	331	412
Összesen	32915	32067	34291	34930	36120	35802	35546

1. táblázat: Villamosenergia előállítási forrásainak alakulása 2017-2023⁵⁹

Az 1. táblázatból kiolvasható, hogy a nukleáris energia stabil, domináns szerepet tölt be a magyar villamosenergia-termelésben: a vizsgált időszak (2017–2023) során a nukleáris termelés éves GWh-értékei viszonylag ingadozóan, de nagyjából 15 000–16 000 GWh körül mozogtak, ami arra utal, hogy az atomerőmű, mint alapenergiaforrás állandó pillér. Ezzel párhuzamosan a fosszilis források, különösen a szén és széntermékek, termelése markánsan csökkent: 2017-ben még 5 098 GWh-t tett ki, de 2023-ra 2 509 GWh-ra esett vissza. A földgáz is ingadozóbb pályát futott be: 7 869 GWh-ról 7 279 GWh-ra csökkent, ám közben voltak magasabb évei is. A megújuló energiaforrások közül a napenergia látványos növekedést mutat: 2017-ben csupán 349 GWh-t termelt, 2023-ra pedig már 6 925 GWh-t, amely a teljes termelés egyre jelentősebb részét teszi ki [8], [9].

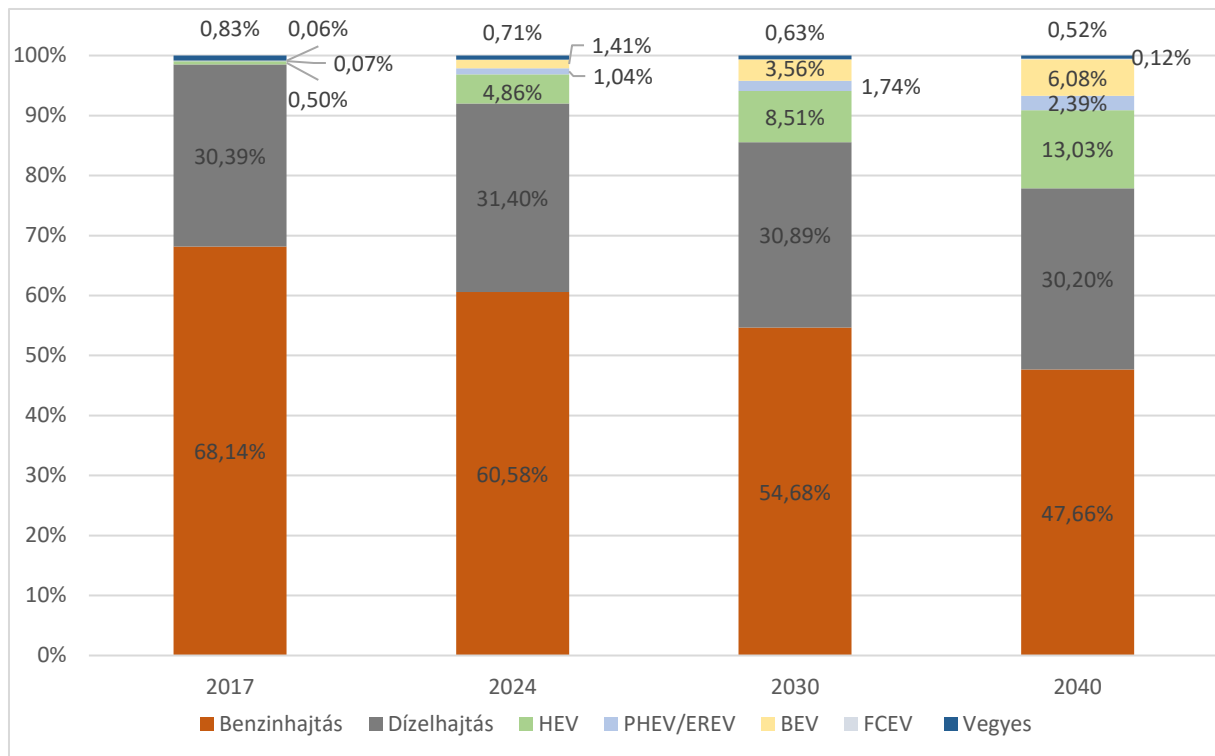
Az előrejelzési modellbe beépítettem az állami energia- és klímapolitikai intézkedéseket, köztük a Paks II. bővítését és a napenergia kapacitás bővítésének terveit. A Paks II. projekt célja, hogy az atomerőmű termelési kapacitását jelentősen növelje, tovább erősítve a nukleáris energia szerepét az áramellátásban [10]. Emellett Magyarország napenergia-szektorára vonatkozóan elérhető adatok szerint a fotovoltaiikus kapacitás gyorsan nő, és a meglévő tervek szerint 2030-ig bezárólag 12000 MW-ra lesz bővítve a szektor [11].

Az előrejelzéseket Python programozási nyelven készítettem, a Statsmodels statisztikai modellező csomag alkalmazásával. Az idősorok becsléséhez a csillapított exponenciális simítás (Damped Exponential Smoothing) módszerét használtam a Statsmodels ExponentialSmoothingosztályán keresztül. Ez a Holt-féle lineáris trendmodell továbbfejlesztett változata, amely képes kezelni az olyan folyamatokat, ahol a növekedés üteme idővel fokozatosan mérséklődik [12], [13]. Az ilyen trendek különösen jellemzőek a technológiai átmenetekre és az energiaszektor változásaira, ahol a kezdeti gyors fejlődést rendszerint egy lassabb, stabilizálódó szakasz követi. A modell paramétereit és kezdeti értékeit minden vizsgált

⁵⁹ Központi Statisztikai Hivatal, "Bruttó villamosenergia-termelés." July 29, 2025. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.ksh.hu/stadat_files/ene/hu/ene0009.html

szcenárió esetében külön optimalizáltam, a becslés alapját pedig a rendelkezésre álló nyolc évnyi historikus adat képezte, így az előrejelzések érzékenyen tükrözik a különböző gazdasági és energetikai feltételezések hatásait, biztosítva ezzel mind a statisztikai megalapozottságot, mind a scenáriók közötti konzisztenciát.

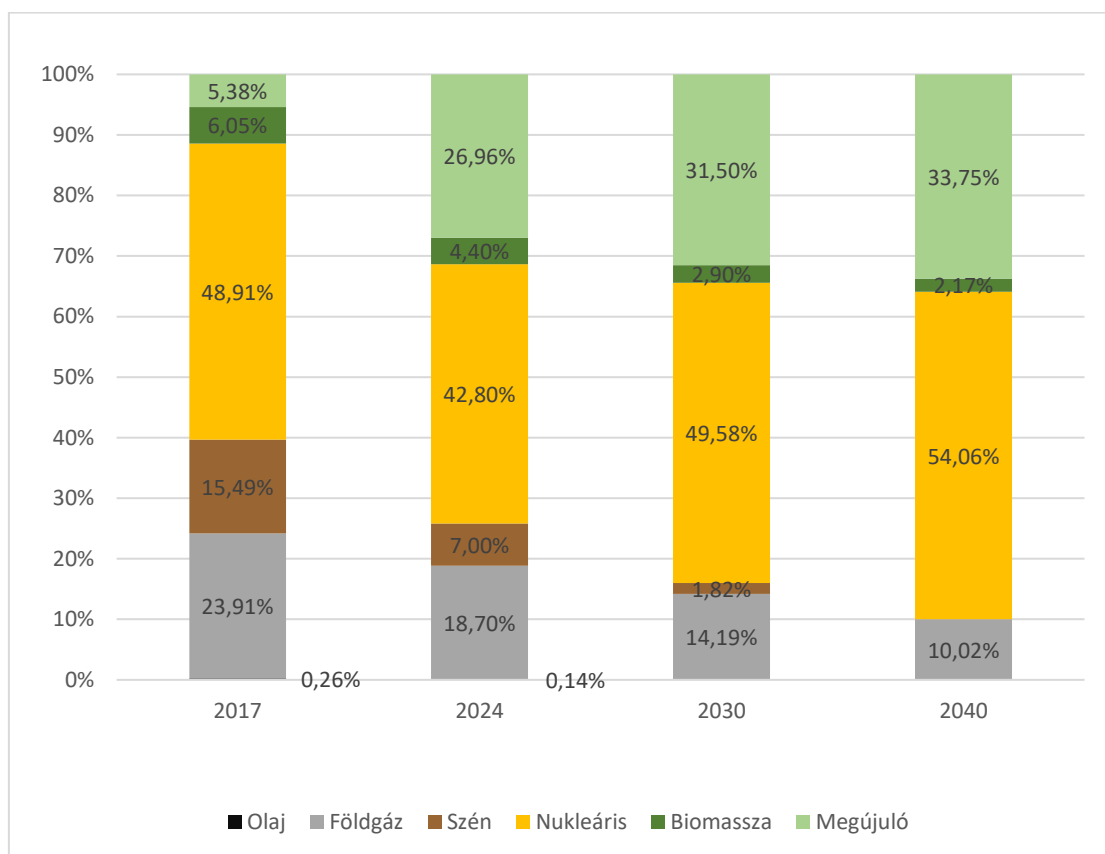
Az előrejelzések során elvégzett érzékenységvizsgálat célja az volt, hogy feltárja, kialakulhatnak-e kiugró eredmények a járműtechnológiai eloszlás vagy az energiamix változtatása esetén. Az elemzések alapján megállapítható, hogy amennyiben a változások progresszív vagy konzervatív irányban, de azonos léptékben történtek, a végeredmények és a részeredmények is arányos módon módosultak. Ez arra utal, hogy a modell megfelelően stabil és jól követi a paraméterek változásait.



3. ábra: Hajtástípusok megoszlásának várható alakulása a magyar személygépjármű-állományban 2040-ig⁶⁰

⁶⁰ saját előrejelzés statsmodel segítségével (S. Seabold and J. Perktold, “statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python,” in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 2010, pp. 57–61.)

A prognózis alapján a hazai gépjárműállomány szerkezeti átalakulása egyértelműen az elektrifikáció irányába mutat, ahogyan azt a 3. ábrán is látni lehet. A 2017-es évben a hagyományos belsőégésű motoros járművek (benzin és dízel) a gépjárműállomány több mint 98%-át reprezentálták, azonban 2040-re ez az arány a modellezés szerint mintegy 78% szintjére csökken. Ezzel szinkronban az elektromos hajtásrendszerrel ellátott járművek, különösen a hibrid (HEV) és a teljesen elektromos (BEV) kategóriák, aránya exponenciális növekedési pályára lép, jelezve a közlekedési szektor technológiai paradigmaváltását.



4. ábra: A villamosenergia-termelés energiahordozó szerinti eloszlásának előrejelzése 2040-ig⁶¹

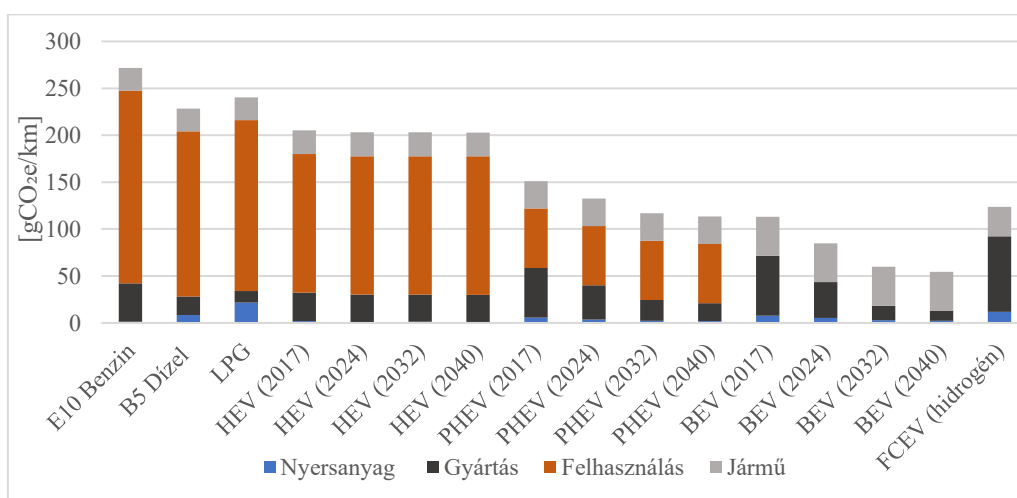
A 4. ábra jól érzékelteti a magyar villamosenergia-termelés szerkezetében végbemenő átalakulás fő irányait. Először is, a nukleáris energia továbbra is stabil alappillére maradt az ellátásnak. Eközben a szénalapú termelés drasztikusan visszaszorul, kivonásra kerül (ha nem is teljes kivonásra van szükség, minden esetre technológiai fejlesztés a fenntarthatóság érdekében javíthat a helyzeten [14]). A földgáz részesedése is fokozatosan csökken, amely nemcsak környezeti, hanem geopolitikai szempontból is kedvező: csökken az energiahordozó-függés és nő az autonóm energiaellátás esélye. A megújuló energiaforrások (bio-, víz, nap, szél) aránya jelentősen emelkedik; ugyanakkor fontos kiemelni, hogy a megújulók integrálása technológiailag kihívás: a termelés időbeni ingadozása miatt a tárolási kapacitások fokozott bővítésére van szükség.

A különböző hajtásláncok teljes életciklusos kibocsátását összegzi, ideértve az üzemanyagciklust és a járműgyártási fázist is. A hagyományos hajtásláncok esetében ezen értékek időfüggetlen konstansnak tekinthetők. A hidrogén üzemanyagcellás járművek esetében, a jelenlegi hazai körülmények között, ahol a hidrogén előállítása túlnyomórészt földgáz

⁶¹ saját előrejelzés statsmodel segítségével (S. Seabold and J. Perktold, “statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python,” in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 2010, pp. 57–61.)

reformálásból történik, a technológia környezeti lábnyoma elhanyagolható mértékű a flotta szintjén, körülbelül 0,01 százalékos részaránnyal. Ezzel szemben a teljesen elektromos járművek kibocsátása közvetlenül függ a vizsgált időszak elektromos energiamixétől, ezért ezen járműveknél négy különböző év statikus adatait mutatom be az energiaszerkezet változásainak hatásának demonstrálására.

Az elektrifikált hajtásláncok összességében kedvezőbb üvegházhatású gázkibocsátási értékekkel rendelkeznek. Egyes környezeti hatásmutatók tekintetében nem minden esetben mutatnak javulást a hagyományos hajtásokhoz képest. Különösen a részecskekibocsátás (PM10, PM2.5) és a savasodási potenciál (AP) esetében tapasztalható, hogy bizonyos években és fejlettségi szinteken a hibrid és akkumulátoros elektromos járművek értékei meghaladják a belsőégésű motorral szerelt modellekét. Ez arra utal, hogy az elektrifikáció önmagában nem garantálja minden környezeti kategória javulását, mivel a gyártási folyamatok és az anyagfelhasználás jelentős szerepet játszanak az egyes emissziós hatások alakulásában.



5. ábra: Az életciklus-szakaszok környezeti terheléseinek időbeli összehasonlítása, a járművek üzemanyag-felhasználás szerinti felosztásával⁶²

Az 5. ábra tökéletesen bemutatja az életciklus behatások különböző szakaszainak mértékét összehasonlítva időszerűen is. Az első három szakasz az energiahordozókra, a negyedik pedig a járműinfrastruktúrára vonatkozik, nagyjából az utóbbi a teljes kibocsátás tizedét adja ki a tradicionális hajtásláncok teljes környezeti nyomásnak. Látható, hogy nagyságrendileg az energiamix változás a normál hibridek kibocsátását csak elhanyagolható mértékben változtatja, viszont a plug-in és akkumulátoros járművek esetében már mutatkozik meg valós érzékenység.

	2020	2025	2030	2035	2040
Átlag költség [ft/km]	145,33	147,36	149,33	150,87	152,15

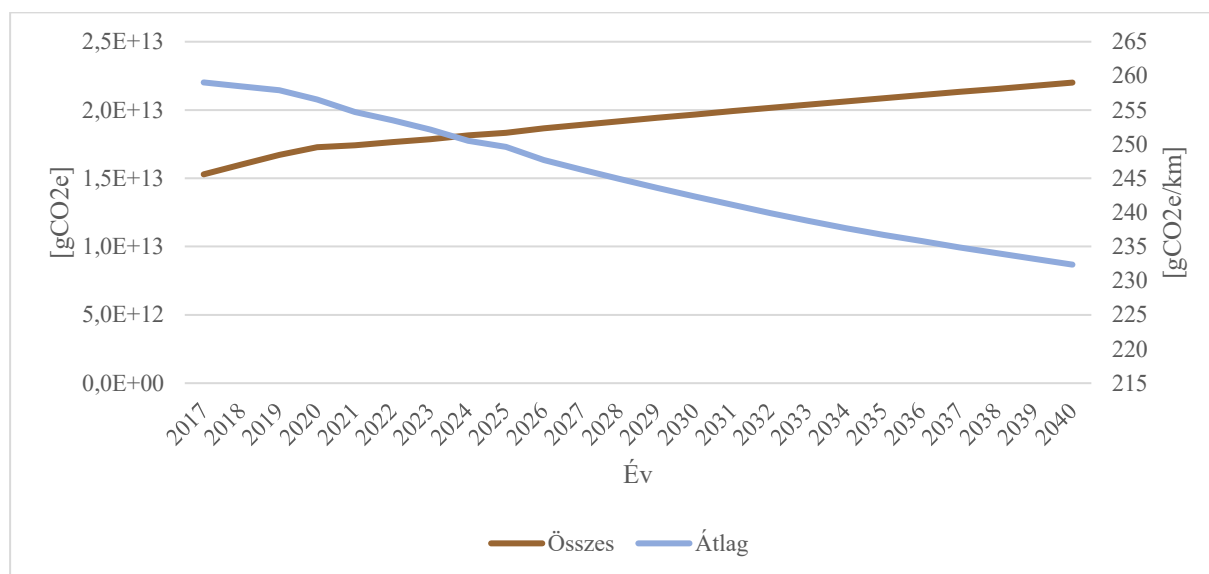
2. táblázat: A magyar személygépjármű-állomány átlagos fajlagos tulajdonlási költsége 2020–2040 között⁶³

A 2. táblázatban kigyűjtött előrejelzési adatok alapján a gépjárművek átlagos tulajdonlási költsége 2020 és 2040 között folyamatos emelkedést mutat. Ez a trend részben az átmeneti, ám elkerülhetetlen elektrifikációs többletköltségeknek tulajdonítható. A jelenlegi piaci helyzet ugyanis azt mutatja, hogy a technológiai váltás gazdasági terhei a felhasználók számára még

⁶² Argonne National Laboratory, “GREET Model 2024 Revised Version,” Argonne, IL, 2024.

⁶³ Argonne National Laboratory, “GREET Model 2024 Revised Version,” Argonne, IL, 2024. segítségével

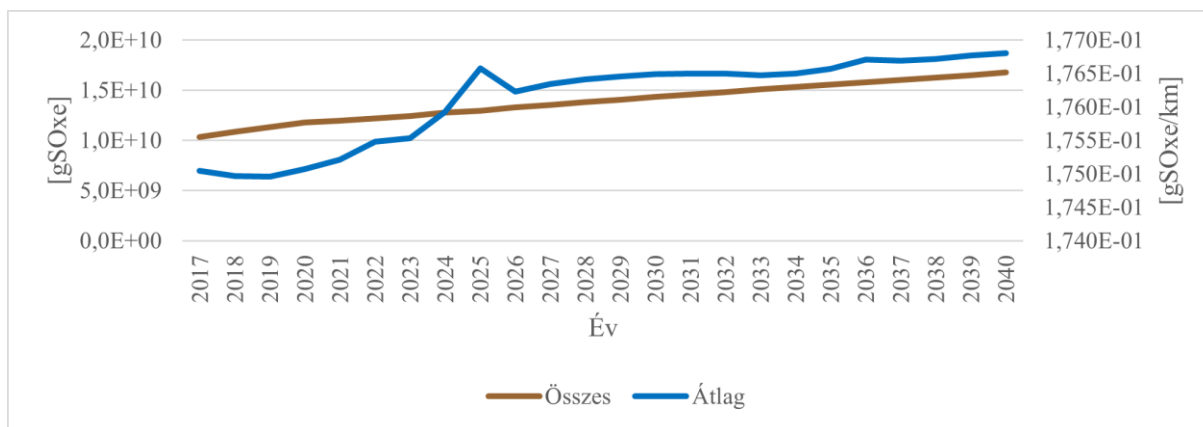
gyakran meghaladják a váltás közvetlen előnyeit, miközben az elektromos járművek használati szokásai is jelentős adaptációt igényelnek. Ennek kihívására egy szimultán, többfrontos megközelítés válik elengedhetlenné: az állam szerepe az ösztönzési mechanizmusok kiépítésében, míg az iparágé a költséghatékony technológiai fejlesztések gyors ütemű bevezetése. Ugyanakkor a társadalmi szintű elfogadás és a tudatosság növelése, a különböző hajtásláncok sajátosságainak megértésén keresztül, alapvető feltétele a fenntartható mobilitás rendszeres átalakulásának. Ez az áttörés látszólagos racionalitása alatt épp a jövő technológiai ösztönzésének kényszere lappang, egy olyan adaptív folyamat, amely magát az emberi gazdasági döntéshozatalt újradefiniálja a hatékonyság szempontjai mentén.



6. ábra: Teljes és kilométerre vetített átlagos GWP100 értékek időbeli változása⁶⁴

A 6. ábra alapján jól látható, hogy a teljes futásteljesítmény folyamatos növekedése ellenére az átlagos kibocsátási értékek lassú, de egyértelmű csökkennek. Ez arra utal, hogy a technológiai fejlődés és az elektrifikáció nemcsak az új járművek lokális kibocsátását csökkenti, hanem a teljes flotta szintjén is hatékonyabb, alacsonyabb átlagos környezeti terhelést eredményez. A tendencia tehát egy fokozatos, de stabil átmenetet jelez a fenntarthatóbb közlekedés irányába, amelyben a modern hajtásláncok és a szigorodó környezetvédelmi előírások egyaránt kulcsszerepet tudnak játszani a jövőben. A PM indexek és a VOC is hasonló görbületeket mutatnak, csak ennél kisebb mértékű átlagos értékcsökkenésse

⁶⁴ Argonne National Laboratory, "GREET Model 2024 Revised Version," Argonne, IL, 2024.



7. ábra: Teljes és kilométerre vetített átlagos AP értékek időbeli változása⁶⁵

A savasodási potenciál értékelése során azonban nem figyelhető meg hasonló mértékű kedvező trend, ahogyan azt a 7. ábra mutatja. Ennek az oka főként az elektrifikáció jelenlegi teljes életciklusán belül rejlő terhelés, melynek forrása az akkumulátorgyártás és az ezzel járó anyagellátási lánc. Az akkumulátorok előállításának savasodási hatását alapvetően két tényező együttese okozza. Egyrészt a lítium, a nikkell és a kobalt nyersanyagok bányászatából és előfeldolgozásából származik a probléma, mivel ezek a folyamatok savas bányavíz képződéséhez és a szulfidásványok oxidációjához vezetnek. Másrészt a gyártási folyamatok magas energiaigénye hozzájárul a savasodáshoz, hiszen a villamosenergia-termelés számos régióban továbbra is jelentős fosszilis komponensekre épül. Ennek eredményeképp a villamosenergia-termelésből származó kén- és nitrogén-oxid kibocsátások az akkumulátorok összességében vett környezeti lábnyomát növelik. Paradox módon a megújuló energiaforrások tárolását szolgáló akkumulátorrendszerek ezen előállítási körülmények között idő előrehaladtával nettó negatív hatással járhatnak a savasodás terhelésére, ezzel a mérleget a káros irányba billentve. Az elektromos járművek üzemeltetése ugyan helyi kibocsátásmentes működést eredményez, az életciklus-elemzés alapján azonban világossá válik, hogy a jármű előállítási fázisában, különösen az akkumulátorgyártással járó környezeti terhek jelentősen mérséklék a használati fázisban elért környezeti előnyöket. Ebből következően a hosszú távú környezeti nyereség, ideértve a savasodási hatások csökkentését is, alapvetően az akkumulátortechnológiák és az energiatárolási rendszerek fenntarthatóbbá tételétől függ.

Az elemzések külön kiértékelése után mindenképpen szükség van egy átfogó analízisre is, amellyel megállapítható, hogy a környezetkímélő megoldások ténylegesen gazdaságilag is fenntarthatók-e. Fontos szem előtt tartani, hogy az elpazarolt gazdasági tőke valójában közvetett kibocsátásnak is tekinthető, hiszen az adott forrás felhasználható lenne hatékonyabb fenntarthatósági fejlesztésekre vagy alacsonyabb emissziójú technológiák támogatására/használatára. Egy kapcsolódó elemzés [15] is hangsúlyozza, hogy a klímavédelmi beruházások sikeressége alapvetően az ökohatékonysági mutatótól függ, vagyis attól, hogy egy adott pénzügyi ráfordítás mekkora mértékű CO₂-csökkentést képes elérni. Ez alátámasztja azt, hogy a beruházások optimalizálása és a megfelelő technológiai prioritások kijelölése döntő szerepet játszanak a globális kibocsátások gyakorlati csökkentésében. 2025-ben az átlagos magyar járműállomány fajlagos üvegházhatású gázkibocsátása 249,586 gCO₂e/km, az átlagos költség pedig 141,83 Ft/km. 2040-re a becsült átlagos kibocsátás 232,359 gCO₂e/km-re csökken, miközben az átlagos költség 147,36 Ft/km-re emelkedik. A két év közötti különbség tehát 17,227 gCO₂e/km kibocsátáscsökkenést és 5,53 Ft/km költségnövekedést jelent.

⁶⁵ Argonne National Laboratory, "GREET Model 2024 Revised Version," Argonne, IL, 2024.

Ha ezt a kibocsátáscsökkenést a jelenlegi szén-dioxid-piaci áron (78 €/tCO₂ [16], ~390 Ft/€ átlag árfolyamban) értékeljük, annak pénzügyi értéke mindössze körülbelül 0,52 Ft/km. Ez azt jelenti, hogy a kibocsátáscsökkentés gazdasági értéke mintegy tízszer kisebb, mint a vele együtt járó költségnövekedés. Másképp fogalmazva: 1 Ft-nyi klímahaszon eléréséhez körülbelül 10 Ft-ot költenénk el a 15 éves előrejelzés alapján, tehát kizárólag a szénkibocsátás pénzügyi értékét figyelembe véve ez a fejlesztési pálya nagyobb ráköltés, mint amennyi egyszerre gazdasági és környezeti szempontból indokolt lenne.

Ha ehelyett a szénkötvény társadalmi értékét (social carbon cost, SCC) alkalmazzuk, például kutatási becslések szerint körülbelül 285 €/tCO₂ [17], a kibocsátáscsökkenés értéke ebben az esetben hozzávetőlegesen 1,92 Ft/km-re emelkedik. Ez azt mutatja, hogy ha a társadalmi költséget vesszük figyelembe, akkor a CO₂-haszon ugyan nő, de még így is csak a költségnövekedés mintegy harmadát fedezi. Ez akkora nagyságrendű különbség, hogy a két hatás közötti arány már önmagában egyértelműen mutatja a torzulást, ezért ilyen esetben érzékenységvizsgálat elvégzése sem indokolt, mivel a CO₂-ár realisztikus tartományán belüli változás sem lenne képes kiegyenlíteni a költségek és a kibocsátáscsökkenés értéke közti különbséget.

Az elvégzett számítások egyértelműen rávilágítanak, hogy a jelenlegi technológiai fejlődés iránya (legalábbis a magyar járműállomány vonatkozásában) gazdaságilag nem fenntartható. A kibocsátáscsökkentés elérése érdekében feláldozott források nagysága messze meghaladja az így nyert klímahaszon gazdasági értékét, akár a piaci, akár a társadalmi szénköltséget tekintjük. Ez a torzítás azt jelzi, hogy a klímavédelem hatékonysága nem csupán technológiai kérdés, hanem alapvetően gazdasági optimalizálási probléma is. A valódi fenntarthatóság elérése érdekében elengedhetetlen a költséghatékonyság szigorú betartása vagy betartatása és azoknak az intézkedéseknek a prioritizálása, amelyek egységnyi ráfordítás mellett a legnagyobb környezeti hasznot eredményezik. A gazdasági adaptáció során lehet, a teljesen zöld megoldások helyett gyakran egy átmeneti, ún. szürke zóna technológiai bizonyulhatnak a legköltséghatékonyabb és így tartósabb ideig fenntarthatóbb útnak a jelen helyzetben.

4. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az RRF-2.3.1-21-2022-00002 azonosítójú Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium projekt keretében.

Irodalomjegyzék

- [1] T. Jose, “Need for Harmonisation of Sustainability Reporting Standards,” *Journal of Finance and Economics*, vol. 5, no. 6, pp. 253–258, 2017, doi: 10.12691/jfe-5-6-1.
- [2] R. Macário and V. Reis, “Transport Systems for Sustainability: Policy, Planning and Exploitation,” *Sustainability*, vol. 14, no. 5, p. 2632, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14052632.
- [3] “National Energy and Climate Plan.” Ministry of Innovation and Technology, Jan. 2023. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/hu_final_necp_main_en.pdf

- [4] “Smart and sustainable mobility market in Hungary.” Deloitte, Mar. 2021. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2021/04/Smart-sustainable-mobility-market-Hungary.pdf>
- [5] A. Nebel, J. Cantor, S. Salim, A. Salih, and D. Patel, “The Role of Renewable Energies, Storage and Sector-Coupling Technologies in the German Energy Sector under Different CO₂ Emission Restrictions,” *Sustainability*, vol. 14, no. 16, p. 10379, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141610379.
- [6] G. Szűcs, “Sohasem adtak még ki ennyi zöld rendszámot egy hónapban.” *Villanyautósok*, 07 2025. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://villanyautosok.hu/2025/04/07/sohasem-adtak-meg-ki-ennyi-zold-rendszamot-egy-honapban/>
- [7] “A személygépkocsi-állomány gyártmány és üzemanyag-felhasználás szerint.” Központi Statisztikai Hivatal, Feb. 28, 2025. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.ksh.hu/stadat_files/sza/hu/sza0025.html
- [8] L. dr. Papp, “Így termelt áramot Magyarország 2024-ben.” *Villanyautósok*, Feb. 15, 2025. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://villanyautosok.hu/2025/02/15/igy-termelt-aramot-magyarorszag-2024-ben/>
- [9] Központi Statisztikai Hivatal, “Bruttó villamosenergia-termelés.” July 29, 2025. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.ksh.hu/stadat_files/ene/hu/ene0009.html
- [10] Paks 2., “Péter Szijjártó: Hungary’s power supply is inconceivable without nuclear energy.” Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.paks2.hu/web/paks2-en/w/peter-szijjarto-hungary-s-power-supply-is-inconceivable-without-nuclear-energy>
- [11] Budapest Business Journal, “Hungary Adds Over 1 GW to Solar Capacity in H1.” Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: <https://bbj.hu/economy/energy/green-energy/hungary-adds-over-1-gw-to-solar-capacity-in-h1/>
- [12] R. J. Hyndman, *Forecasting: Principles & Practice*. 2014. Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://robjhyndman.com/uwafiles/fpp-notes.pdf>
- [13] E. McKenzie and E. S. Gardner, “Damped trend exponential smoothing: A modelling viewpoint,” *International Journal of Forecasting*, vol. 26, no. 4, pp. 661–665, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.ijforecast.2009.07.001.
- [14] F. Yang et al., “Life cycle assessment shows that retrofitting coal-fired power plants with fuel cells will substantially reduce greenhouse gas emissions,” *One Earth*, vol. 5, no. 4, pp. 392–402, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.oneear.2022.03.009.
- [15] Koppány K. and Hanula B., “Mennyi szén-dioxid van egy euróban? A sikeres emissziócsökkentéshez globális gondolkodás, elemzés és tervezés szükséges • How Much Carbon-Dioxid Does a Euro Contains? Successful Emission Reduction Requires Global Thinking, Analysis, and Planning,” *Ma.Tud.*, Mar. 2021, doi: 10.1556/2065.182.2021.3.3.
- [16] Trading Economics, “EU Carbon Permits.” Oct. 27, 2025. Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>

- [17] J. S. Kikstra, P. Waidelich, J. Rising, D. Yumashev, C. Hope, and C. M. Brierley, “The social cost of carbon dioxide under climate-economy feedbacks and temperature variability,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 9, p. 094037, Sept. 2021, doi: 10.1088/1748-9326/ac1d0b.

FS versenyautó első szárnyának szimulációja

Simulation of the front wing of an FS race car

Mezővári Márton

Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar

mezovari.marton@gmail.com

Absztrakt: Jelen publikáció az Arrabona Racing Team Formula Student csapat ART_12-es versenyautójának első szárnyához készült kompozit rétegtrend-tervezési folyamatát mutatja be. A fejlesztés elsődleges célja a tömegcsökkentés volt az előző évi (ART_11) konstrukcióhoz képest, a szigorú szabályzati előírások és merevségi követelmények betartása mellett. A tervezés során a végelem-módszer (FEM) került alkalmazásra, melynek előkészítése a BETA CAE Systems Ansa, a szimulációs futtatások és a kiértékelés pedig a SIMULIA Abaqus szoftverben történt. A kutatás során iteratív módon vizsgálatra került a szárnytartó és a főprofil belső szerkezetének több különböző rétegtrend-kombinációja, különös tekintettel a Tsai-Wu tönkremeneteli tényezőre és a terhelés alatti deformációra. A véglegesített konstrukcióval sikerült 8,7%-os tömegcsökkentést elérni, miközben a szerkezet maximális lehajlása (5,358 mm) és tönkremeneteli tényezője (0,719) is a biztonsági határértékeken belül maradt.

Kulcsszavak: Formula Student, kompozit rétegtrend, végelem analízis

Abstract: This paper presents the design process of the composite layout for the front wing of the Arrabona Racing Team's ART_12 Formula Student race car. The primary objective of the development was to reduce the weight compared to the previous year's (ART_11) design, while maintaining compliance with strict competition rules and stiffness requirements. The design process utilized the Finite Element Method (FEM); the pre-processing was performed using BETA CAE Systems Ansa, while the simulation and post-processing were conducted in SIMULIA Abaqus software. The research involved an iterative analysis of various layout combinations for the wing support and the main profile's internal structure, focusing on the Tsai-Wu failure criterion and deformation under load. The finalized design achieved an 8.7% weight reduction, with the structure's maximum deflection (5.358 mm) and failure index (0.719) remaining well within safety limits.

Keywords: Formula Student, composite layout, finite element analysis

1. Bevezetés

A Formula Student egy nemzetközi mérnöki konstrukciós verseny, ahol egyetemi hallgatók terveznek és építenek együléses versenyautókat. Az alkatrészeknek elég erősnek és merevnek kell lenniük a terhelések elviseléséhez, ugyanakkor a jármű dinamikai teljesítményének maximalizálása érdekében a lehető legkisebb tömegre szükséges törekedni.

Jelen cikk a Széchenyi István Egyetemen működő Arrabona Racing Team (ART) 2025-ös szezonra készült, ART_12 versenyautójának első szárny fejlesztését tárgyalja. Az aerodinamikai csomag egyik legkritikusabb eleme az első szárny, mivel ez határozza meg a levegő áramlását a mögötte elhelyezkedő összes többi komponens felé. A projekt fő célkitűzése egy olyan konstrukció létrehozása volt, amely az előző évi (ART_11) modellnél könnyebb, de a szabályzati előírásoknak megfelelő merevséggel rendelkezik.

A Formula Student szabályzat (FS Rules) szigorú feltételeket támaszt az aerodinamikai elemek merevségével szemben. A szabályzat értelmében az elemek 200 N, 225 cm² felületen eloszló

terhelés hatására legfeljebb 10 mm-t, míg 50 N pontszerű terhelés esetén legfeljebb 25 mm-t deformálódhatnak. A csapat belső célkitűzése ennél szigorúbb volt: a maximális üzemi terhelés (leszorítóerő) mellett a lehajlás nem haladhatja meg a 7,5 mm-t, a Tsai-Wu tönkremeneteli tényező pedig a 0,75-ös értéket. [1]

2. Anyagválasztás és gyártástechnológiák

2.1. Kompozit gyártástechnológiák

Az Arrabona Racing Team a kompozit alkatrészek előállításához három fő technológiát alkalmaz: a kézi laminálást, a vákuuminjektálást és az előimpregnált (prepreg) szövetek laminálását. A versenyautó aerodinamikai elemeinek gyártása során a tömegoptimalizálás és a mechanikai tulajdonságok maximalizálása a legfőbb szempont. A vákuuminjektálás során a száraz szövetbe vákuum segítségével kerül bejuttatásra a gyanta, amely biztosítja az optimális gyantamennyiséget és a száraz foltok elkerülését. A legnagyobb szilárdságot és legjobb felületi minőséget igénylő alkatrészek, így az első szárny elemei is, prepreg technológiával készültek. Ennél az eljárásnál az előre gyantával átítatott szöveteket kemencében, túlnyomás alatt hőkezelik, ami kiváló homogenitást eredményez. A hőkezelés során a gyanta megolvad, egyenletesen eloszlik a rétegek között, majd kikeményedik, megszilárdítva az alkatrészt. [2,3,4,5,6]

2.2. Felhasznált anyagok

A motorsportban, így a Formula Studentben is, a tömegoptimalizálás egyik legfontosabb eszköze a megfelelő kompozit anyagok alkalmazása. Az első szárny kompozit elemei prepreg (előimpregnált) szénszálal szövetekből készültek.

A rétegrendek kialakításához két fő szövettípus került felhasználásra. Twill szövet, a twill szövet kétirányú szövés, amely általános szilárdságot biztosít. UD (Unidirectional) szövet: Egyirányú szárendezés, amely a szá irányban kiemelkedő merevséget nyújt. Az ART_12-ben alkalmazott UD és Twill szövetek azonos tömeggel rendelkeznek négyzetméterenként, így specifikus irányú megerősítésre UD szövet alkalmazással csökkenteni lehet az alkatrész tömegét.

A szendvicsszerkezetek maganyagaként MC60 típusú hab került beépítésre, amely alacsony sűrűsége ellenére jelentősen növeli az alkatrész hajlítómerevségét. A szárnyban található inzertek 3D nyomtatott PA66 műanyagból készültek, illetve a legnagyobb terhelésű csatlakozási pontokon (például a tartó fülei) alumínium került felhasználásra a költséghatékonyság és a súlycsökkentés érdekében. [3,4,7,8]

3. Végelem szimuláció (FEM) felépítése

A tervezés során a végelem szimulációk előkészítése a BETA CAE Systems Ansa v23.0.1 szoftverben történt, a megoldó (solver) pedig a SIMULIA Abaqus FEA 6.13.1 volt.

3.1. Geometria és hálózás

A CAD modell importálása után első lépésként a geometria javítása történt meg (geometriai hibák szűrése, felületek összeérésének korrigálása). A hálózás során vegyes elemtípusok kerültek alkalmazásra:

- A kompozit héjak (szárnyprofil, tartó rétegei) felületi hálózással készültek (*shell* elemek), ahol a *laminat* tulajdonságkártyán került definiálásra a rétegrend (rétegek száma, anyaga, orientációja).

- A 3D nyomtatott inzerterek és bonyolultabb geometriákon tetraéder elemekből álló térfogati háló (*tetra FEM*) lett használva.
- Az egyszerűbb szilárd testek (pl. hab mag) hexaéder hálóval lettek modellezve.

A háló sűrűsége az alkatrész funkciójához lett igazítva: a tartó kritikus részein és inzertheinél 2 mm-es, a főprofil felületén 5 mm-es, míg a merevítők végső vizsgálatánál a pontosság érdekében 1 mm-es elemméret került beállításra. [7,9,10]

3.2. Peremfeltételek és terhelések

A szimulációk során a kapcsolatok ragasztott kötésenként (*TIE contact*) lettek definiálva, amely a valóság hű gyártási technológiát (ragasztás) modellezi. A vizsgált terhelési esetek:

Üzemi terhelés: 1000 N leszorítóerő (függőleges) és 200 N oldalirányú erő (kanyarodás). Ez a szárnytartó méretezésénél volt irányadó. A szárny tartójának rétegrendje vizsgálva lett 500 N oldalirányú erőre, az első szárnyat érő váratlan terhelések ezzel a terheléssel lettek modellezve. Szabályzati tesztek: 200 N megosztott terhelés és 50 N pontszerű terhelés az előírt deformáció ellenőrzésére.

4. Végeelem szimuláció

A fejlesztési folyamat során a két legkritikusabb komponens, az első szárny tartója és a főprofil belső szerkezete került részletes vizsgálatra. Az iterációk során az elsődleges cél a minimális tömeg elérése volt a merevségi és szilárdsági határok szigorú betartása mellett. A vizsgált értékek az alkatrész elmozdulása és a kompozit rétegrend Tsai-Wu kompozit tönkremeneteli tényezője voltak. [3,4,7,11]

4.1. Az első szárny tartójának optimalizálása

A tartóelem (mount) felel a szárny karosszériához (Front Bulkhead) történő rögzítéséért. A szimulációk során a tartó 1000 N függőleges (leszorítóerő) és 200 N oldalirányú terhelésnek lett alávetve.

A vizsgálat során négy fő iterációs lépés végrehajtására került sor:

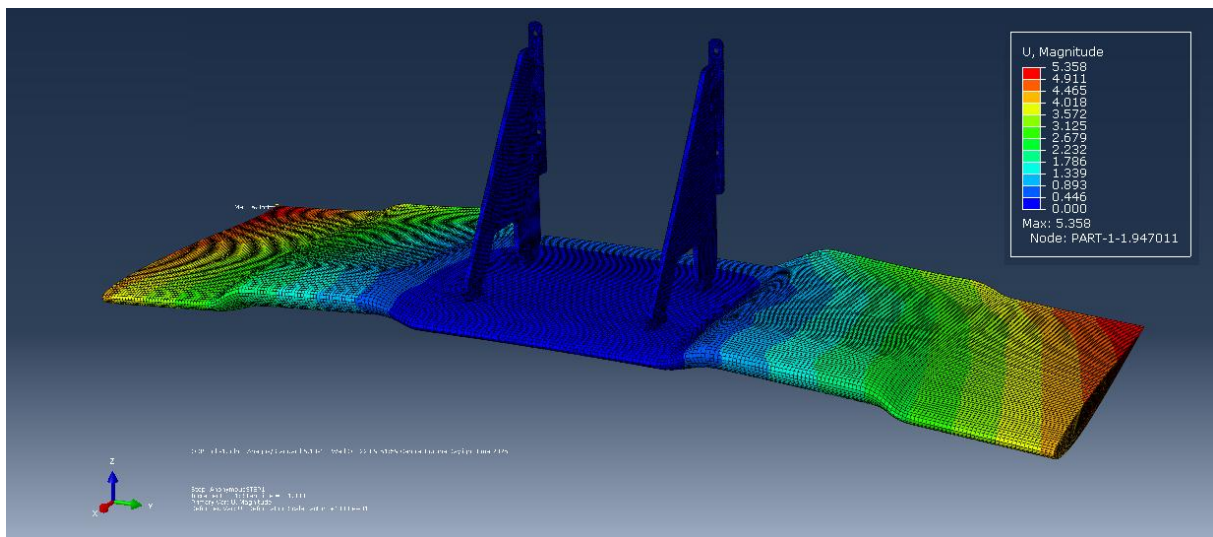
- Kezdeti koncepció: Két réteg Twill ($0^\circ/45^\circ$) és egy réteg UD (90°) alkalmazása. Bár az elmozdulás (1,35 mm) elfogadható tartományba esett, a Tsai-Wu érték (0,361) lehetőséget adott a további finomításra.
- Szálirány-optimalizálás: Az UD réteg iránya a tartó geometriájához igazítva 56° -ra módosult. Ez minimális javulást eredményezett az elmozdulás tekintetében (1,32 mm).
- Rétegszám növelése: A merevség növelése érdekében a rétegrend 3 réteg Twillre és 1 réteg UD-ra bővült. A Twill rétegek $0^\circ/30^\circ/60^\circ$ -os elosztása jelentősen csökkentette a deformációt 1,203 mm-re.
- Végleges változat: A Twill rétegek orientációjának $0^\circ/45^\circ/0^\circ$ -ra történő módosításával adódott a legkedvezőbb eredmény. A végleges konstrukció (maximális elmozdulás: 1,184 mm, Tsai-Wu: 0,332) sikeresen teljesítette a szigorúbb, 500 N-os oldalirányú terhelési tesztet is, ahol a tönkremeneteli tényező 0,719 maradt, ami a 0,75-ös biztonsági határ alatt van.

4.2 A főprofil és belső szerkezetének fejlesztése

A főprofil belső szerkezete kritikus fontosságú a teljes szárny merevsége szempontjából. A kiindulási állapot az előző évi (ART_11) két réteg Twillből álló héjjal ellátott szendvicsszerkezete jelentette, amely a szimulációk alapján elégtelennek bizonyult (Tsai-Wu > 1,5), ezzel a rétegrenddel várhatóan eltört volna az alkatrész.

A fejlesztés lépései a következők voltak:

- UD réteg használata: A rétegrend a két Twill réteg között egy 90°-os UD réteggel egészült ki. Ez 0,8-ra csökkentette a tönkremeneteli tényezőt, ami még mindig meghaladta a célkitűzést .
- Lokális megerősítések: A kritikus pontokon (a profil geometriai átmeneteinél, ún. loftoknál) további Twill rétegek kerültek elhelyezésre. A szimulációk kimutatták, hogy a 45°-os orientációjú megerősítés hatékonyabb a 0°-osnál. A lokális megerősítésekkel a Tsai-Wu tönkremeneteli tényező értéke 0.541-re csökkent.
- Főprofil héjszerkezete: A külső héj esetében a 4 rétegű (0°/0°/45°/0°) Twill és UD kombináció bizonyult optimálisnak. Bár további 45°-os elforgatásokkal minimális merevségnövekedés elérhető lett volna, ez jelentős anyagvesztéssel (szabási hulladék) járt volna, így a költséghatékonyság érdekében ez a megoldás elvetésre került. A végleges rétegrendek használatával az első szárny összeállításának maximális lehajlása 5.358 mm.



23. ábra. Az első szárny összeállításának lehajlása 1000 N leszorítóerő hatására⁶⁶

5. Eredmények

A végleges konstrukció szimulációs eredményei igazolták a tervezési célok teljesülését.

Tömegcsökkentés: Az ART_12 első szárnyának teljes tömege 3835 g lett a végleges rétegrendek használatával (1. táblázat), szemben az előző évi ART_11 4200 g-os tömegével. Ez 365 g-os, azaz 8,7%-os tömegcsökkentést jelent, ami a járműdinamika szempontjából kedvezőbb tehetetlenségi nyomatékokat eredményez.

A végelem-analízis eredményei alapján a szárny megfelel mind a csapat belső követelményeinek, mind a Formula Student szabályzatának:

- Maximális deformáció (1000 N leszorítóerő): 5,358 mm (Célérték: <7,5 mm).
- FS Szabályzati teszt (200 N megosztott): 1,795 mm (Szabályzat: <10 mm).
- FS Szabályzati teszt (50 N pontszerű): 1,598 mm (Szabályzat: <25 mm).
- Maximális Tsai-Wu tönkremeneteli tényező: 0,719 (Biztonsági határ: 0,75).

⁶⁶ saját szerkesztésű ábra

A kapott értékek azt mutatják, hogy a szerkezet kellően merev az aerodinamikai hatékonyság fenntartásához.

Réteg	Főprofil	Főprofil belső szerkezet	Első szárny tartó
1	Twill 0°	Twill 0°	Twill 45°
2	Twill 0°	UD 90°	UD 56°
3	UD 90°	Twill 45°	UD 90°
4	UD 90°	Twill 0°	Twill 0°
5	UD 90°		
6	Twill 45°		
7	Twill 0°		

1. táblázat: Az első szárny kompozit alkatrészeinek végleges rétegtrendjei⁶⁷

6. Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki Kaszab Martin belső konzulensnek és az Arrabona Racing Team tagjainak a szakmai támogatásért, valamint a kutatáshoz szükséges adatok rendelkezésre bocsátásáért. A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Formula Student Germany: „Formula Student Rules 2025”
- [2] L. Boros: Formula Student Race Car’s Aerodynamic Package Manufacturing Technology, Szakdolgozat, Széchenyi István Egyetem Audi Hungária Járműmérnöki Kar, Győr, 2024
- [3] A. Víz: Karbon kompozit monocoque váz és ütközés elnyelő zónájának optimalizációja, Szakdolgozat, Széchenyi István Egyetem Audi Hungária Járműmérnöki kar, Győr 2022
- [4] J. Mononen: Design and Manufacturing of a Formula Student Composite Chassis, Szakdolgozat, Tampere University of Applied Sciences, Tampere, 2023
- [5] D. P. Rajak, P. H. Wagh, E. Linul: Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review, Polymers, Vol. 13, No.21, 2021, p 3721
- [6] T. Yokozeki, Y. Iwahori, S. Ishiwata, K. Enomoto: Mechanical properties of CFRP laminates manufactured from unidirectional prepregs using CSCNT-dispersed epoxy, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 10, 2007, pp 2121-2130
- [7] N. Eriu: Structural Design of Rear Wing of a Formula Student Racing Car, Diplomamunka, Politecnico di Torino, Torino, 2023
- [8] X. Castro, Z. A. Rana: Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly, Fluids, Vol 5, No. 4, 2020, p 237

⁶⁷ saját szerkesztés

- [9] G. Foucault, J.-C. Cuilliere, V. Francois, J.-C. Leon, R. Maranzana: Adaptation of CAD model topology for finite element analysis, *Computer-Aided Design*, Vol. 40., No. 2, 2008, pp. 176-196
- [10] A. Nemade, A. Shikalgar: The Mesh Quality significance in Finite Element Analysis, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vol. 17., No. 2, 2020, pp 44-48.
- [11] S. Debbaghi, A. Sahli, Sara Sahli: Optimisation and failure criteria for composite materials by the boundary element method, *MECHANIKA*, Vol. 23, No. 4, 2017, pp. 506-513.

Egyrészkes karbon kompozit felni tervezése Formula Student versenyautóhoz

Designing of a one-piece carbon composite wheel for a Formula Student race car

Nagy Bálint

Széchenyi István Egyetem Győr

balintnagy02@gmail.com

Abstrakt: A cikk célja, hogy bemutassa a tervezési folyamatát egy karbon kompozit felninek a győri Arrabona Racing Team 13. Formula Student versenyautójához. A folyamat során figyelembe vettem az autóra vonatkozó szabályokat és elvárásokat. A geometriai tervezés során az Autodesk Inventor 2026 modellező programot használtam. A karbon kompozit rétegrend optimalizálásához két különböző szoftvert alkalmaztam. A végeelem modellt a Beta Cae Systems Ansa programban építettem fel, majd a szimulációt pedig a SIMULIA Abaqus FEA programban futtattam. A végeelem szimuláció során a legrosszabb esetet vizsgáltam, amikor az autó teljes kormányzással kanyarodik miközben a pilóta maximálisan fékez. Ez a valóságban soha nem történik meg, de mivel fizikailag lehetséges ezért ezt vettem alapul, mint legrosszabb forgatókönyv a terheléseket nézve. A cikk során kitérek a karbon kompozit felni gyártásának folyamatára és az ehhez szükséges szerszám megtervezésére is.

Kulcsszavak: felni, tervezés, szimuláció

Abstract: The goal of this article is to demonstrate the design process of a carbon composite rim for the Arrabona Racing Team's 13th Formula Student car. During the process, I considered all applicable rules and expectations. I used Autodesk Inventor 2026 for the geometric design and applied two different software tools to optimize the carbon composite layout. I built the finite element model in Beta CAE Systems ANSA and ran the simulation in SIMULIA Abaqus FEA. For the simulation, I examined the worst-case scenario where the car corners at full steering lock under maximum braking. While this never happens in real-life driving, it is physically possible, so I used it as the basis for the maximum load case. Finally, the article details the manufacturing process and the design of the required tooling.

Keywords: wheel, designing, simulation

1. Bevezetés

A Formula Student egy nemzetközi hallgatói verseny sorozat. Lényege, hogy a kizárólag hallgatókból álló csapatok 9-10 hónap alatt megterveznek és le is gyártanak egy szabályos versenyautót egy több mint 130 oldalas versenyszabályzat alapján. Ebben a minden évben frissített dokumentumban az autó felniére vonatkozóan nincsenek konkrét megkötések. Egyetlen szabály amire ügyelni kell a tervezéskor, hogy minden alkatrésznek, ami a felnin belül található, minimum 5 mm távolságra kell lennie a felni felületétől. Ezt statikus, tehát álló állapotban vizsgálják a gépátvételnél minden kormányzógnél, illetve minden futómű

magasságnál. (T2.6.4 The radial clearance between any non-rotating part and the inside of the rim must be at least 5 mm in static condition at any steering angle and any ride height). [1]

Mint minden versenysportban a Formula Studentben is rendkívül fontos a súly. A versenyautó felnijét tekintve ez hatványozottan igaz, ugyanis egy könnyű kerék összeállítással a rugózatlan tömeget tudjuk csökkenteni, ezzel értékes másodperceket nyerve a pályán. Az Arrabona Racing Team az ART_09-től egészen az ART_12-ig egy két részből álló, csavarokkal összefogott felnit használt. Ebben a cikkben a következő évi ART_13-as autóhoz tervezett egyrészes karbon kompozit felni tervezési folyamatát mutatom be.

Ha egy Formula Student csapat felnit szeretne vásárolni a versenyautójához, több alternatíva is van a piacon. Lehet kapni alumínium, magnézium és karbon kompozit felnit is. Ezek mivel univerzálisak, úgy vannak tervezve, hogy minden FS autóra kompatibilis legyen. Itt ezt hátrányként is tekinthetjük, mivel nincs optimalizálva az adott versenyautóhoz, így sok plusz grammot cipel magával. Az új felnival a célom ennek a tömegnek a megtakarítása az ART_13-as autóban. Mivel egyrészes felniről beszélünk, így nincs szükség a két felet összefogó csavarokra és a kettő között lévő tömítőanyagra. Ez kb 400 g megtakarított tömeget jelent. Másik jelentős előnye egy egyrészes felninek a több részeshez szemben, hogy megszűnik a tömítetlenségi probléma. Ezzel gyakran talákoztunk az évek során, hogy a két fél találkozásánál sajnos eresztett a kerék. Ez plusz szerelést igényelt ami verseny helyzetben nagy hátrányt jelent. Ennek kiküszöbölésére jelent megoldást a teljesen egyrészes felni.



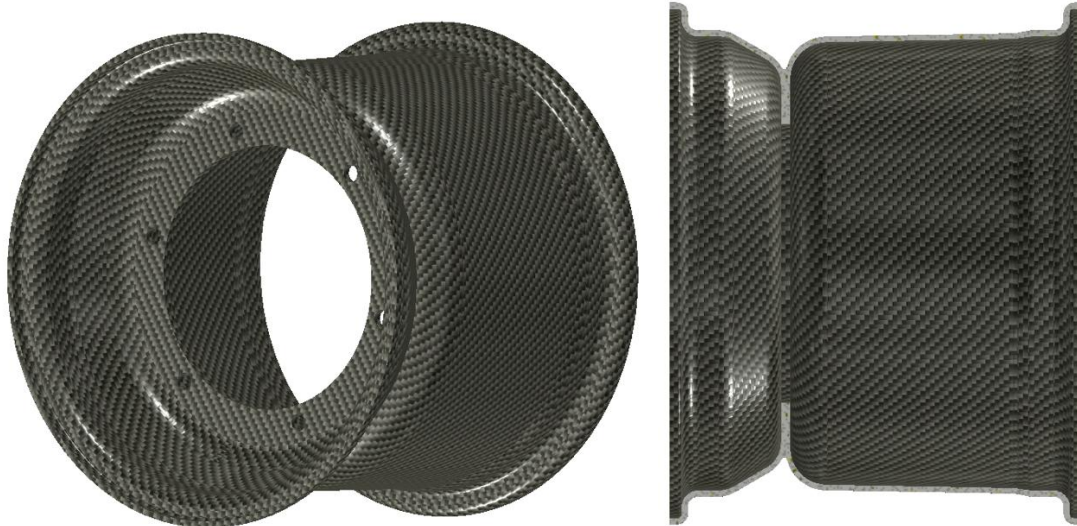
24. ábra. ART_11 kerék⁶⁸

2. Tervezés

Egy Formula Student versenyautó felnijének a tervezésénél nincs túl sok lehetőségünk a geometriát tekintve. Egyrészt a szabályzat megszabja a korábban említett 5mm-es távolságot minden belső alkatrészről, másrészt vannak további fizikai megkötések is.[2] Ilyen például a gumi felfekvő felülete ami az egyik legkritikusabb pont. Ebben a versenysorozatban a legtöbb csapat 10 col átmérőjű felnit használ, amihez a leginkább elterjedt versenygumit a Hoosier-t választják. Ennek a gyártónak van slick, száraz időre, illetve wet, nedves aszfaltra tervezett

⁶⁸ AAME Formula Student East tulajdona

gumija. Ezeknek a belső átmérője az amire a felfekvő felület tervezésekor figyelni kell. Fontos még a felni pereme, ami oldalirányban megtartja a gumit. Ezt a peremet úgy kell méretezni, hogy a verseny alatt az élesebb kanyarokban se tudjon a gumi lefordulni a felniről, de ne legyen túl nagy hogy a kerék szerelhető legyen. Ha túl nagy peremet tervezünk, a gumit nem fogjuk tudni felrakni a felnire.



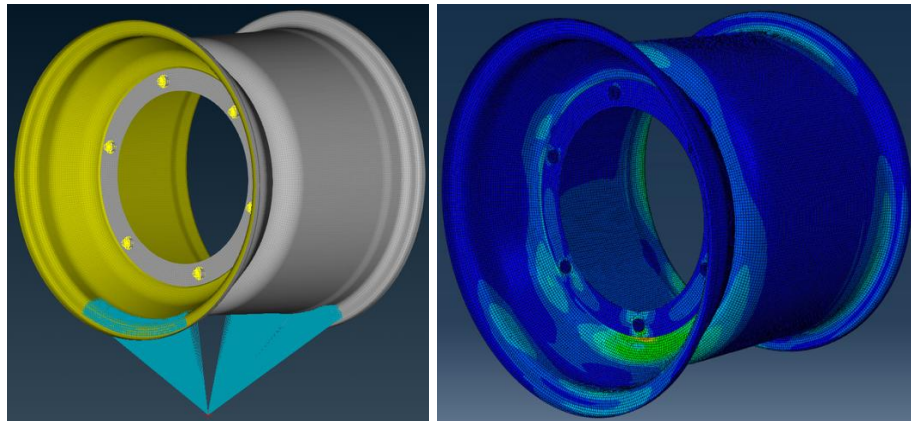
2. ábra. ART_13 felni modell⁶⁹

Tervezéskor figyelembe kell vennünk a felni szélességét is. Ezt nagyrészt behatárolja, hogy milyen széles gumit használ a csapat az autón, de van benne némi rugalmasság. Az Arrabona Racing Team által használt gumit kényelmesen fel lehet rakni a 7-8 col tartományba eső szélességű felnikre. A csapat korábbi felnije 7,25 col széles volt. Ezt a tavalyi évben 8 colra szélesítettük. A szélesítés miatt változott a felni ET száma is. Az ET szám azt mutatja meg, hogy a felni középvonalától hány mm-re van a felni felfekvő felülete, ahol a kerékgagyra csavarozzuk. [3] Ugyan csak pár mm-t kellett módosítani, de így a kerék pozíciója ugyan ott maradt, mint korábban.

3. Szimuláció és anyagválasztás

A geometria véglegesítése után szimulációt futtattam. A kész modellt először a Beta Cae Systems Ansa nevű programban készítettem elő. Itt apró módosításokat hajtottam végre a modellen amivel leegyszerűsíthetem a szimulációt. Szintén ebben a programban állítottam be a szükséges hálóméretet és az ehhez kapcsolódó más beállításokat is. A háló a szimuláció talán legfontosabb eleme, ami ha nem megfelelő, a szimuláció hibára fut ki.[4] A különböző kapcsolatokat, a terhelések irányát és a felni megfogását is.[5] Ha minden ilyen modell szintű előkészítés kész, akkor határozom meg a karbon kompozit rétegrendet. Ez nem egységes minden felületen. A felnit több területre osztottam fel, mivel így minden egyes helyen a lehető legjobban optimalizált eredményt kapom. Például ahol a felni a gumival érintkezik, ott több réteg került a modellbe.

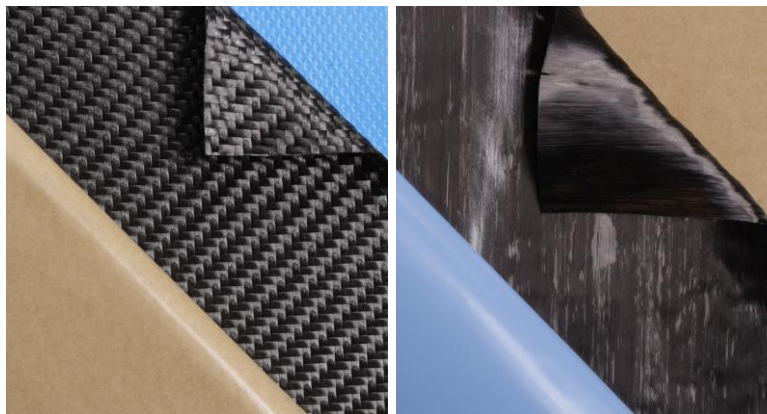
⁶⁹ Saját készítés



3. ábra. ART_13 szimulációs modell⁷⁰

A csapat a karosszéria, az aerodinamikai elemek és a felni gyártásához is szénszálás szövetet használ. Ennek legfőbb előnye mindamellet, hogy könnyű, hogy adott irányba nagyon strapabíró. A felni esetében kétféle szövetet alkalmazunk. Twill és egyirányú (UD) szövetet. A twill szövet esetében a szálak merőlegesek egymásra így 0 és 90 fokban erősek, míg az egyirányú szövet, ahogy a nevéből is adódik csak abba az irányba képes nagy terhelést elviselni amerre a szálak állnak. Mivel a felni folyamatosan forog, és minden egyes állapotában más irányú és nagyságú terhelést kap ezért nem tudunk megállapítani egy konkrét terhelési irányt. Éppen ezért nagyrészt twill szövetet használtam a szimuláció során, mivel ezzel több irányú terhelést is le lehet fedni.

Egy karbon kompozit alkatrész szimulálásánál nagyon fontos az úgynevezett Tsai-Wu polinomiális törési kritérium [6], ami a kompozit tönkremeneteli tényező. Ez az érték mutatja meg nekünk, hogy az alkatrész várhatóan mikor fog eltörni, vagyis tönkre menni. Szintén elengedhetetlen egy végeelem szimulációnál a biztonsági tényező használata.



4. ábra. TWILL és UD szövet⁷¹

⁷⁰ Saját készítés

⁷¹ <https://www.easycomposites.eu/xc110-416g-22-twill-6k-prepreg-carbon-fibre>
<https://www.easycomposites.eu/xc130-150g-unidirectional-prepreg-carbon-fibre>

4. Szerszám tervezés, gyártás

A karbon kompozit alkatrészek gyártásánál rendkívül kritikus pont a szerszám. Ez adja meg a végleges alkatrész geometriáját és felületi minőségét is. Anyagválasztáskor figyelembe kell venni azt is, hogy milyen módszerrel szeretnénk legyártani az adott alkatrészünket. A felni esetében előimpregnált, úgynevezett szövetet használunk. Ennek a szövetnek a lényege, hogy már tartalmazza a gyantát, így pontosan annyit fog tartalmazni a kész alkatrész amennyi szükséges hozzá. Így elkerülhető az, hogy nem megfelelő mennyiségű gyanta kerül a szövetekre. Ha túl sok, akkor feleslegesen nagy lesz az alkatrész tömege, ha pedig túl kevés akkor száraz részek, gyantahiány alakul ki. Ezek a gyantahiányos pontok az adott alkatrésznek a gyengepontjai lehetnek. Miután minden réteget leraktunk az előimpregnált szövetből, bekerül az alkatrész az kemencébe magas hőmérsékletű hőkezelésre ahol a gyanta megolvad majd kristályosodik, megköt.[7] Ebben a kemencében túlnyomás van, ami a szerszám falára préseli a szövetet, ezáltal egy szép egységes felületet létrehozva. A túlnyomásnak köszönhetően a rétegek között, az alkatrészünk felületén egységesen oszlik el a gyanta, így merevségét tekintve is egy homogén felület keletkezik.

Mivel felniből az autóra minimum 8 db-ot kell gyártani ezért mindenképp egy olyan szerszámra van szükség, ami kibírja az egymás utáni többszöri hőkezelést mindenféle deformáció vagy anyagfáradás nélkül. Az eddig használt anyag az AL6063-s alumínium volt, ezért én is ebből az anyagból terveztem a szerszámot.

Miután levesszük a kisült felnit a szerszámról, utómunkára van szükség. A peremet, a belső rádiuszt, illetve a furatokat is véglegesíteni kell. Ezeket a szerszámon lévő kifuttatásokon direkt nagyobbra hagyjuk, így a végén pontosan addig tudjuk visszamunkálni, ahogy az modellterben megszületett.



5. ábra. ART_12 felni szerszámok⁷²

5. Összegzés

Az ART_13-ra tervezett felni tömege a szimulációk alapján kb 1000g-ra várható. Ez nagyjából 200g-os tömegcsökkentés az előző évi ART_12-es autó felnijéhez képest. Ezzel a koncepcióval célokom egy tartós konstrukció megalkotása amit a csapat a következő pár évben módosítás nélkül tud használni a jövőbeli versenyautókon.

⁷² Saját készítés

ART_11	1600g
ART_12	1200g
ART_13	1000g

6. ábra. felni tömegek

6. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Formula Student Germany „Formula Student Rules” 2026
- [2] Tamás Illés – Carbon fiber racing wheel assembly design with 3D printed wheel center for Formula Student racecar, 2021, 89
- [3] Instituto Superior Técnico (Rodrigo Monteiro) Design and Optimization of Two Integral Carbon Fiber Wheels for a Formula Student Car (2016) 22
- [4] A. Nemade, A. Shikalgar The Mesh Quality significance in Finite Element Analysis
- [5] Aaron Ressa – Development of a carbon fiber wheel rim, 2013, 7-8
- [6] Aalborg University Design and Analysis of a Formula Student Carbon Fibre Rim, 4
- [7] Levente Boros: Formula Student Race Car’s Aerodynamic Package Manufacturing Technology, Széchenyi István Egyetem Audi Hungária Járóműmérnöki Kar, 2025

Fékkrendszer tervezése elektromos Formula Student versenyautóhoz

Brake system design for an electric Formula Student racecar

Nagy Kristóf

Széchenyi István Egyetem
kristof.nagy@arrabonaracing.hu

Absztrakt: Dolgozatom célja egy komplett fékkrendszer tervezésének bemutatása, amit az Arrabona Racing Team Formula Student csapatának versenyautójához készítek. Többek közt részletesen kitérve a gyártási technológia ismertetésére és alkalmazására. Nagy hangsúlyt fektetek a féknyereg tervezésére és végeelem szimulációjára. Az első részben bemutatom a csapatunkat és a verseny felépítését. Illetve irodalomkutatást és versenytárselmezést is végeztem, ezekről is szót ejtek a továbbiakban. Felsorolok néhány érdekes megoldást, amit az iparban és más versenytársaknál láttam, ezekből is ötletet merítve az általam tervezett alkatrészekhez. Sorra veszem a fékkrendszer elemeit, illetve a csapat korábbi autóinak felépítéséről is írok, amik előnyeiből és hátrányaiból tanulva változtatok az idei évi modellen. A versenyszabályzat fékekre vonatkozó részét is kiemelem, ugyanis ezek ismerete a tervezés során nélkülözhetetlen. Majd tárgyalok az additív gyártás tulajdonságairól és módszereiről. Ezt a modern technológiát már nem először alkalmazzuk a csapat történetében, viszont most lehetőség nyílt a fékkrendszer komponensein is kipróbálni. Végeelem szimulációkat is futtatok, hogy még pontosabb képet kapjak az alkatrészben ébredő feszültségekről a terhelés hatására. Ezeket kiértékelve módosítom a geometriát, hogy az számunkra a legoptimálisabb legyen. A 3D nyomtatással nagy mértékű tömegcsökkenést érhetünk el, közben az elmozdulás mértéke azonos vagy akár még kedvezőbb is.

Kulcsszavak: Formula Student, fékkrendszer, additív technológia

Abstract: The aim of my thesis is to present the design of a complete braking system for the Formula Student racecar of the Arrabona Racing Team. The work includes a detailed description and application of the manufacturing technologies, with a particular emphasis on the design and finite element simulation of the brake caliper. In the first part, I introduce our team and the structure of the competition. I also conducted a literature review and competitor analysis, which are discussed in detail. I highlight several interesting solutions observed in the industry and among other teams, drawing inspiration from these for my own component designs. I go through each element of the braking system and describe the setup of previous team cars, analyzing their advantages and disadvantages to make improvements in this year's model. The competition rules related to braking are also discussed, as understanding these is essential during the design process. Furthermore, I examine the properties and methods of additive manufacturing. This modern technology has already been used in our team's history, but this time we had the opportunity to apply it to brake system components as well. I run finite element simulations to gain a more accurate understanding of the stresses developing within the parts under load. Based on the results, I modify the geometry to achieve the most optimal design possible. With 3D printing, we can achieve significant weight reduction while maintaining or even improving stiffness. Finally, I discuss the experiences gained during the design process and outline future development potentials. By building on these insights, the team will be able to design and construct increasingly better and faster cars, which is crucial for achieving further success.

Keywords: Formula Student, brake system, additive technology

1. Bevezetés

Jelen cikk témája egy Formula Student autó komplett fékrendszerének tervezése, melyre azért került sor, mivel a győri Széchenyi István Egyetem hallgatói versenycsapata, az Arrabona Racing Team [1] tagjaként ez az elsődleges feladat⁷³. A járműdinamika részleget erősítve a fékrendszer már az első évtől kezdve a figyelmembe került, azonban ténylegesen csak a második évben vált a fő feladatommá annak tervezése, illetve karbantartása. A feladat kidolgozása az ART_13-as versenyautó fékrendszer elemeinek méretezésével, végeselem szimulációjával foglalkozik. Ezt megelőzte az irodalomkutatás, valamint a napjainkban is használt technológiák felkutatása. Továbbá szem előtt kell tartani a csapat anyagi és kapcsolati tőkájének helyzetét is, mivel csak ezen keretek között valósítható meg a projekt. A Formula Student versenysorozatot az Egyesült Államokban hozták létre FSAE néven, célja legfőképpen a hallgatók tudásának fejlesztése és megmértetése. A mérnöki verseny során a csapatoknak nemcsak egy gyors autót kell építeniük, hanem statikus versenyszámokban (üzleti terv, költségterv, mérnöki tervezés) is bizonyítaniuk kell rátermettségüket. Az ART_13-as modell a csapat második elektromos hajtású autója, így a tervezés során új kihívásokkal és lehetőségekkel, például a regeneratív fékezés potenciáljával is számolnunk kellett. [2]



1. ábra FS East 2024⁷⁴

2. A Formula Student szabályrendszere és a fékrendszer követelményei

2.1 A verseny története és célja

A Formula Student (eredetileg FSAE) az USA-ból indult több mint négy évtizede, mára pedig világszerte elterjedt mérnökversennyé nőtte ki magát. A verseny célja a hallgatók gyakorlati tudásának fejlesztése egy együlékes versenyautó megtervezésén és megépítésén keresztül. A kezdeti szabályozatlan versenyzést mára egy több mint 130 oldalas, szigorú szabálykönyv váltotta fel, amely elsősorban a biztonságot garantálja. A csapatoknak nemcsak mérnöki, hanem gazdasági és menedzsment feladatokat is el kell látniuk (szponzorkeresés, költségtervezés).

⁷³ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

⁷⁴ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

2.2 Versenyszabályzat (FS Rules 2026)

A szabályzat a mérnöki munka kereteit adja meg. A versenyre való kijutás feltétele egy regisztrációs kvíz sikeres teljesítése, amely a csapat mérnöki kompetenciáját méri. A gépátvétel (Scrutineering) során az autókat szigorúan ellenőrzik. [3]

- **Technikai követelmények:** A vázszerkezet (csőváz vagy karbon monocoque) és az ütközésselnyelő zónák kialakítása a pilóta védelmét szolgálja.
- **Hajtáslánc megoldások:** Külön fejezetek foglalkoznak a belsőégésű és az elektromos hajtás szabályaival (pl. nagyfeszültségű rendszer biztonsága).
- **Gépátvételi tesztek:**
 - *Tilt Test:* Az autót 60 fokban megdöntik, hogy ellenőrizzék a folyadékszivárgást és a borulási stabilitást.
 - *Eső/Zaj teszt:* Elektromos autóknál esőztetés, belsőégésűeknél zajmérés.
 - *Brake Test:* Állóhelyzetből indulva mind a négy keréknek blokkolnia kell fékezéskor, miközben az autó nem törhet ki az irányából.

A fékrendszerre vonatkozó specifikus szabályok:

1. **Hidraulikus rendszer:** A járművet egyetlen pedállal működtethető, négy kerékre ható hidraulikus fékkel kell ellátni.
2. **Kétkörös kialakítás:** Két, egymástól független hidraulikus kör (első/hátsó) kötelező. Hiba esetén a fékerőnek legalább két keréken meg kell maradnia. Saját folyadéktartályok szükségesek.
3. **Pedálerő:** A fékpedálnak és konzoljának deformáció nélkül ki kell bírnia 2 kN erőt.
4. **Anyaghasználat:** A pedál anyaga acél, alumínium vagy titán lehet. Műanyag fékcsövek védőburkolat nélkül tilosak.
5. **Biztonsági elektronika:** Kötelező a fékpedál-beesést érzékelő kapcsoló (BOTS), amely hiba esetén leállítja a hajtást.
6. **Regeneratív fékezés:** A pedálút első 90%-a használható regeneratív fékezésre (hidraulikus hatás nélkül), de az utolsó 10%-ban a hidraulikus rendszernek működni kell.
7. **Féklámpa:** Piros színű, hátulról jól látható féklámpa kötelező, amely mind hidraulikus, mind regeneratív fékezéskor világít.

2.3 Versenyszámok

A verseny statikus és dinamikus számokból épül fel.

Statikus versenyszámok:

- **Business Plan Presentation (75 pont):** Üzleti terv prezentálása, ahol a csapatnak el kell adnia az autót vagy egy szolgáltatást befektetőknek.
- **Cost and Manufacturing (100 pont):** Az autó gyártási költségeinek, anyaghasználatának és a gyártási folyamatok karbonlábnyomának részletes dokumentálása.

- **Engineering Design (150 pont):** A legfontosabb statikus szám. A hallgatóknak meg kell védeniük a tervezési döntéseiket a bírók előtt, bizonyítva a mérnöki gondolkodásmódot.

Dinamikus versenyszámok:

- **Acceleration (50 pont):** Gyorsulás 75 méteres egyenes szakaszon állóhelyzetből.
- **Skidpad (50 pont):** Nyolcas alakú pálya, ahol az oldalgyorsulást mérik (két kör jobbra, két kör balra).
- **Autocross (100 pont):** Kb. 1 km hosszú, kanyargós pálya. Ez tekinthető az időmérőnek, egyetlen gyors kör a cél.
- **Endurance (250 pont):** A legfontosabb versenyszám. 22 km-es versenytáv, pilótacserével a felénél. Itt vizsgázzik az autó megbízhatósága.
- **Efficiency (75 pont):** Energiahatékonysági mérés az Endurance alatt (üzemanyag vagy energiafogyasztás alapján).

3. Irodalomkutatás és Helyzetelemzés

3.1 Az Arrabona Racing Team (ART)

A csapatot 2014-ben alapították a győri Széchenyi István Egyetemen. 2024-ben az ART_11-es belsőégésű motoros autóval eddigi legjobb eredményünket értük el. Az ART_12 már elektromos hajtású volt, de versenyen dinamikus számban nem indult, így az ART_13 lesz az első élesben versenyző elektromos autó.

3.2 A fékrendszer felépítése és korábbi megoldások

A fékrendszerek felépítése és komponensei az évek során rengeteget változtak. Az első tömeggyártott személygépjárművekben még többségében dobféket alkalmaztak az egyszerű felépítése miatt, illetve, hogy mivel egy zárt rendszerről van szó, ezért a szennyeződésektől védve van. Ugyanakkor a hűtése ezáltal rosszabb is, mint a tárcsaféknek. Emiatt a versenysportban sem alkalmazzák. A tárcsaféknek továbbá a teljesítménye is jobb, rövidebb fékutat lehet vele elérni. [4]

A féknyergek típusait két csoportba soroljuk, fix rögzítésű és úszó kialakítású. Az úszó nyergeket általában az alacsonyabb teljesítményű autókban használják csak, míg a fix rögzítés a nagy teljesítményű és versenyjárművek terén népszerű a nagy merevség miatt. Az úszónyeregben csak egy oldalon található dugattyú, a fix nyeregben viszont általában mindkét oldalon. Ez alól a Formula Studentben már található kivétel, ahol csak egyik oldalon helyezkednek el a dugattyúk. [5]

Az autók fékköre biztonsági okokból több részre van osztva. Ezen belül többféle megoldás található, van, ahol az első és a hátsó tengelyen lévő féknyergek vannak külön körön, ugyanakkor létezik olyan, ahol a jobb első kerék és a bal hátsó van egy körön. Versenysportban az első és hátsó tengely felosztása a kedvezőbb a fékerő elosztás szabályozása miatt. A fékkörök szétválasztására azért van szükség, ha az egyik meghibásodik, akkor a másikkal még le lehessen lassítani az autót.

A féktárcsákat tekintve megtalálható fix és úszó rögzítés is. Itt pont az ellentétjét kell alkalmazni, mint amilyen féknyerget használunk, mivel az úszó kialakítás arra való, hogy az

esetleges rezgéseket, egyenetlen terheléseket kiküszöbölje. Enélkül a tárcsa akár fel is robbanhat a nagy feszültség hatására. A tárcsa lehet sima vagy hűtött, amit általában furatok alkalmazásával szoktak megoldani. [6][7][8]

A Formula Student autókban jellemzően tárcsaféket használnak, a dob fék nem alkalmazott. A rendszer két fő részre oszlik (első és hátsó kör), melyek fékerő-eloszlását a "balance bar" szabályozza. [9]

- **Féknyergek:** Általában motorkerékpár nyergek, vagy egyedi tervezésű darabok. Elöl jellemzően 4, hátul 2 dugattyús kivitel.
- **Féktárcsák:** Úszó kialakítású acél tárcsák.
- **Fékcsövek:** Acélfonatos teflon csövek vagy merev fékcsövek.

Az ART csapat korábbi konstrukcióinak fejlődése:

- **ART_01 - ART_02:** Elöl 4, hátul 2 dugattyús, kétrészes, axiális rögzítésű nyergek. Eltérő munkahenger méretek az egyenletes fékerő eloszláshoz.
- **ART_03 - ART_05:** Radiális rögzítésű nyergek. Azonos méretű munkahengerek, de DOT 5.1-es fékfolyadék használata a magas hőmérséklet miatt.
- **ART_06 - ART_07:** Monobloc, azaz egyetlen tömbből álló 4 dugattyús nyereg elöl, kétrészes hátul. Visszatérés a DOT 4 folyadékhoz.
- **ART_08 - ART_12:** Jelentős fejlesztés: saját tervezésű, mart alumínium monobloc féknyergek (elöl 4, hátul 2 dugattyú). Egyedi tervezésű fékbetét és tárcsa. A hátsó tárcsa átmérője kisebb a súlycsökkentés érdekében.

3.3 A korábbi konstrukciók hibái és problémái

A fejlesztés során azonosított főbb problémák, melyeket az ART_13 tervezésénél javítani kellett:

1. **Balance bar állíthatósága:** A fékerő-elosztót állító forgókapcsoló a kormány mögött kapott helyet, és egy bowdennel csatlakozott a pedálhoz. Ez a megoldás gyakran megszorult, a bowden elvezetése problémás volt, így a pilóta nem tudta pontosan beállítani az eloszlást. Emellett a balance bar mozgás közben beleütközött a pedál taposófelületébe.
2. **Szivárgás:** A féknyereg légtelenítő csavarja nem tömített rendesen a hibás kúpszög-kialakítás miatt, ami lassú fékfolyadék-szivárgást eredményezett.

A 2026-os Formula Student szabálykönyv szigorú követelményeket támaszt a fékrendszerrel szemben, elsősorban a biztonságot helyezve előtérbe. A legfontosabb műszaki előírások, amelyek meghatározták a tervezési folyamatot, a következők:

- **Kétkörös rendszer:** A járművet hidraulikus fékrendszerrel kell felszerelni, amely két, egymástól független fékkörből áll (általában első és hátsó tengelyre osztva). Egyik kör meghibásodása esetén a másiknak továbbra is biztosítania kell a fékerőt legalább két keréken.
- **Mechanikus kapcsolat:** Tilos a „brake-by-wire” (fizikai összeköttetés nélküli) fékrendszer használata manuális módban.

- Pedálerő: A fékpedálnak, a konzolnak és a taposónak deformáció nélkül el kell viselnie 2 kN nagyságú erőt.
- Féklámpa és biztonsági kapcsolók: A rendszert el kell látni fékpedál-beesést érzékelő kapcsolóval (BOTS), amely hiba esetén leállítja a hajtást.
- Regeneratív fékezés: A pedálút első 90%-a használható regeneratív fékezésre a hidraulikus rendszer aktiválása nélkül, de az utolsó 10%-ban a mechanikus féknek mindenképpen működnie kell.

Ezen szabályok betartása kritikus a gépátvétel (Scrutineering) során, ahol egy sikeres fékteszten (mind a négy kerék blokkolása) kell átesnie az autónak a dinamikus versenyszámok előtt.

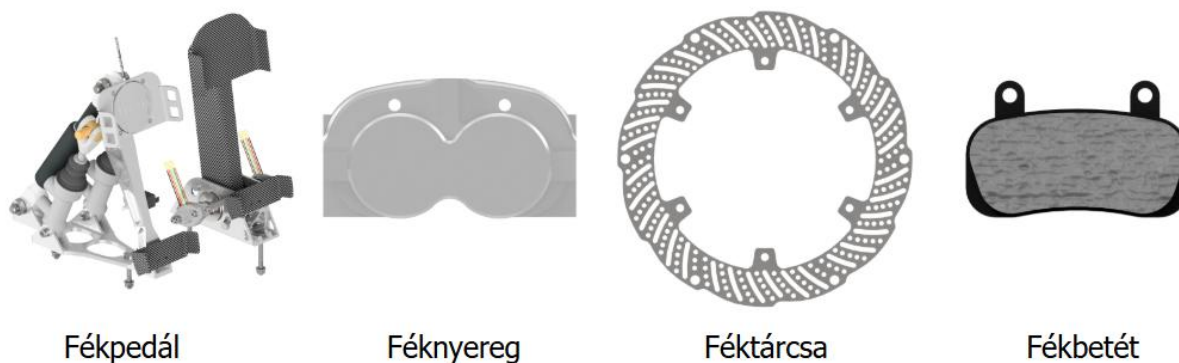
4. Tervezési folyamat és Méretezés

4.1 Célkitűzések

A fő cél egy elektromos hajtáslánchoz illeszkedő, könnyű, de merev fékrendszer tervezése.

- **Regeneratív fék:** Bár a technológia rendelkezésre áll, a tervezés során a biztonság érdekében nem számoltam a regeneratív fék lassító hatásával, így a hidraulikus rendszernek önállóan is képesnek kell lennie a kerekek blokkolására.
- **Gyártástechnológia:** Az additív gyártás (3D fémnyomtatás) vizsgálata a tömegcsökkentés érdekében. [10][11]
- **Szabályos megfelelés:** Különös figyelem a 2 kN pedálerő elviselésére és a szivárgásmentességre.

4.2 Komponensek méretezése és kiválasztása



A fékrendszer komponensei⁷⁵

⁷⁶Kiindulási adatok:

- Jármű tömege (pilótával): 260 kg

⁷⁵ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

⁷⁶ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

- Tengelytáv: 1,53 m
- Súlyeloszlás (első/hátsó): 50-50%
- Súlypont magasság: 0,223 m

4.2.1 Féknyomás és Pedálrendszer

A féknyomás létrehozásának folyamata: Pedálerő -> Pedáláttétel -> Munkahenger -> Hidraulikus nyomás -> Féknyereg dugattyúk -> Fékbetét -> Tárcsa.

- **Pedálerő:** A korábbi mérések és tapasztalatok alapján a tervezési érték **800 N**. A rendszernek azonban ki kell bírnia a szabály szerinti 2000 N terhelést is.
- **Pedáláttétel:** Az előző autóknál alacsony volt az áttétel, így a pilótának túl nagy erőt kellett kifejtenie. Az új pedálgeometriánál a cél a nagyobb áttétel volt. A választott érték **4,5**, ami harmadára csökkenti a szükséges láberőt a kívánt nyomás eléréséhez, ezáltal javítva a pilóta koncentrációját.

Számítás:

$$F_{munkahenger} = F_{pedál} * i$$

$$F_{munkahenger} = F_{pedál} * i = 800 * 4,5 = 3600 \text{ N}$$

, ahol $F_{munkahenger}$ – erő a munkahengeren [N], $F_{pedál}$ – pedálerő [N], i – pedáláttétel [-].

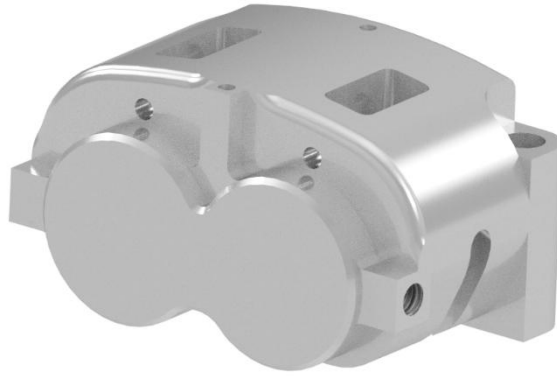
- **Fékfolyadék:** A választás a **DOT 4**-re esett. Indoklás: A DOT 5.1 bár magasabb forráspontú, erősen higroszkópos (vizet szív magába), ami miatt hamarabb csökken a forráspontja és "puhább" lesz a fékérzet, gyakoribb karbantartást igényelve. [12]
- **Munkahengerek:** Mivel elől 4, hátul 2 dugattyú található a nyergekben, a megfelelő nyomásfelépítéshez és pedálúthoz eltérő méretű főhengerek kellenek. [13]
 - *Első kör:* AP Racing, 19,1 mm dugattyúátmérő.
 - *Hátsó kör:* AP Racing, 14,0 mm dugattyúátmérő.
- **Fékcsővek:** Goodridge fémhálós, külső gumibevonatos csövek. Ezek merevebbek a hagyományos fémfonatos csöveknél, így kisebb a tágulásuk, jobb a nyomáspont. [14]

4.2.2 Féknyereg tervezése

A tervezés során két irányt vizsgáltam meg:

1. **Additív gyártás (3D nyomtatás):** Fém filament alapú nyomtatás. A cél a bonyolult, optimalizált geometria és a súlycsökkentés volt. [15][16]
 - *Eredmény:* A generatív tervezés és a végelem szimulációk (FEM) során kiderült, hogy a nyomtatott anyag mechanikai jellemzői nem elegendőek a terhelések biztonságos elviselésére ennél a technológiánál.
2. ⁷⁷**Forgácsolt (mart) gyártás:** A kockázatok miatt a csapat visszatért a bevált, mart alumínium monobloc kialakításhoz. [17]

⁷⁷ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

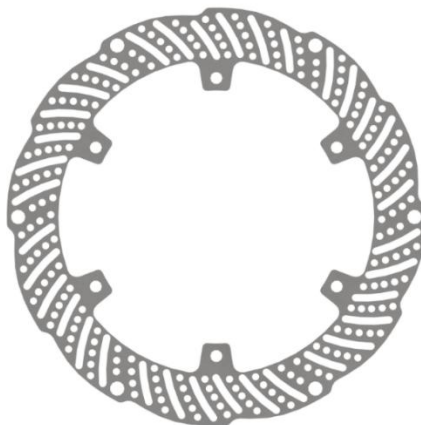


Egyedi mart első féknyereg⁷⁸

- *Konstrukció:* Elöl 4 dugattyús, hátul 2 dugattyús, radiális rögzítés.
- *Javítás:* A korábbi szivárgási problémát a légtelenítő csavar fészkének geometriai korrigálásával (megfelelő kúpszög) oldottam meg.

4.2.3 Féktárcsa méretezése

A féktárcsa méretét a 10 colos felni belső átmérője korlátozza. A szabályzat szerint minimum 5 mm hézagnak kell maradnia a felni és a fékalkatrészek között.



A tervezett féktárcsa⁷⁹

- **Maximális tárcsaátmérő:** 181 mm.
- **Anyag:** Szerkezeti acél. Karbon tárcsát a sorozatban nem alkalmaznak, mert a Formula Student pályák rövidege (max 80m egyenes) miatt nem melegedne fel üzemi hőmérsékletre, különösen az Autocross (egy körös) versenyszámban lenne hatástalan (hideg fékhatás).
- ⁸⁰**Konstrukció:** Egyedi tervezésű úszó tárcsák. Elöl nagyobb átmérő a nagyobb fékerőigény miatt, hátul kisebb a súlycsökkentés végett.

⁷⁸ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

⁷⁹ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

⁸⁰ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

Számítás (súrlódási erő):

A kerék fékezési nyomatékából számítva, ahol a tárcsa középsugara $r = 0,08$ m.

$$F_S = \frac{M_W}{r * 2}$$
$$F_{Sf} = \frac{M_{Wf}}{r_f * 2} = \frac{563,6}{0,08 * 2} = 3518,75 \text{ N}$$
$$F_{Sr} = \frac{M_{Wr}}{r_r * 2} = \frac{220,7}{0,08 * 2} = 1379,38 \text{ N}$$

, ahol F_S – súrlódási erő [N], M_W – féknyomaték [Nm], r – féktárcsa középsugara [m].

5. Összefoglalás és Jövőkép

A dolgozatomban bemutattam az ART_13 elektromos versenyautó fékrendszerének teljes tervezési folyamatát. A kitűzött célok közül többet sikeresen megvalósítottam:

- **Fékpédál:** A megnövelt áttétellel (4,5) sikerült csökkenteni a pilóta által kifejtendő erőt, ami javítja a vezethetőséget.
- **Féknyerreg:** A szivárgási problémákat sikerült orvosolni a tervezés során. Bár az additív gyártás nem bizonyult megfelelőnek a jelenlegi technológiai korlátok mellett, a mart alumínium nyergek megbízható megoldást nyújtanak.
- **Féktárcsa:** Az optimalizált, úszó ágyazású tárcsák hozzájárulnak a rugózatlan tömeg csökkentéséhez.

A jövőbeli fejlesztési irányok között szerepel az additív gyártáshoz alkalmasabb anyagok felkutatása, valamint a fékbetét és féktárcsa anyagpárosításának további vizsgálata a fékhatás növelése érdekében. A rendszer validálása a következő versenyszezonban történik meg.

6. Köszönetnyilvánítás

Ezúton fejezem ki köszönetemet a Széchenyi István Egyetemnek, amiért biztosította a projekt megvalósításához szükséges erőforrásokat és azt a támogató szakmai háttérrel, amely elengedhetetlen volt a fejlesztés sikeréhez. Kiemelt köszönet illeti az Arrabona Racing Teamet. A csapat által nyújtott inspiráló közösség és szakmai műhelymunka nélkül a fékrendszer koncepciójának kidolgozása és megvalósítása nem jöhetett volna létre. A csapattagok szakértelme és konstruktív hozzáállása kulcsfontosságú volt a tervezés során felmerülő mérnöki kihívások megoldásában. Végezetül köszönöm mindazok munkáját - legyenek ők csapattársak, mentorok, oktatók-, akik a fékrendszer tervezési és kivitelezési fázisaiban iránymutatásukkal, kritikáikkal vagy tevéleges segítségükkel hozzájárultak a végeredményhez. A projekt sikere a közös elhivatottság és együttműködés eredménye. A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025
- [2] <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [3] F.S.Germany „Formula Student Rules” 2026
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2026/rules/FS-Rules_2026_v1.1.pdf
- [4] Dr. -Ing Manfred B, Kőfalusi P, Dr. Varga F, Hesz M, Kokrehel Cs, Gépjármű futóművek: Fékrendszerek, 153-193, 2014. Budapest
- [5] Horváth Á, Oldal I, Kalácska G, Andó M, Féknyereghez használt ötvözt alumínium (7075T6) rugalmassági modulusa VEM vizsgálatokhoz, ANYAGOK VILÁGA 13 : 2 pp. 1-8. , 8 p. (2015)
- [6] Frank J, Különböző technológiával készült féktárcsák összehasonlító vizsgálata (1991), MicroCAD konferencia. Miskolc, 1991
- [7] Dózsa T, Őri P, Szabari M, Simonyi E, Soumelidis A, Lakatos I, Brake Disc Deformation Detection Using Intuitive Feature Extraction and Machine Learning, MACHINES 12 : 4 Paper: 214 , 21 p. (2024)
- [8] Zobory I, Irregular Brake Disc Wear Caused by Dynamically Unstable Running, Budapest, Magyarország : Budapest University of Technology and Economics (2017) 364 p. pp. 55-64. , 10 p.
- [9] Solymosi L, Fékrendszer és egyedi féknyereg tervezése Formula Student versenyautóba, Győr 2021
- [10] Mathias L, Design of Topology Optimized Titanium Brake calipers, Trondheim 2020
- [11] Horváth L, Design of a 3D-printed upright for a Formula Student car, Győr 2024
- [12] Douglas M. Yost, Nigil Jeyashekar, Edwin A. Frame, BRAKE FLUID COMPATIBILITY STUDIES WITH ADVANCED BRAKE SYSTEMS, San Antonio 2016
- [13] Andreas A & Petter F, The Design of a Brake Master Cylinder Assembly for a Formula Student Race Car, Trondheim 2025
- [14] <https://goodridge.com/pages/parts-catalogue-eu>
- [15] Pusztay B, Generative upright design for Formula Student race car, Győr 2021
- [16] Sztankovics, István (szerk.), Additive Manufacturing of Brake Systems: A Review, "Fiatalok a Tudományért" tudomány napi rendezvény : Válogatott publikációk, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország : Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet (2023) 132 p. pp. 47-54. , 8 p.
- [17] Kunal Dalal, Ajit Karnik, MONOBLOCK BRAKE CALIPER DESIGN AND ANALYSIS, Mumbai 2020

Járművek utasterének komfort légtechnikai vizsgálata

Investigation of Airflow and Thermal Comfort in Vehicle Cabins

Németh József Zsolt

Széchenyi István Egyetem

nemeth.jozsef.zsolt@hallgato.sze.hu

Absztrakt: A járművek utasterében kialakuló hőkomfort nem csupán kényelmi szempont, hanem a közlekedésbiztonság egyik alapvető feltétele is, mivel a nem megfelelő hőmérsékleti viszonyok bizonyítottan rontják a sofőr reakcióidejét és koncentrációs képességét. Jelen dolgozat célja a gépjárművek belső légtechnikai viszonyainak komplex vizsgálata, amely ötvözi az elméleti modellezést és a gyakorlati méréseket. A kutatás első felében a szakirodalom áttekintése során bemutatásra kerülnek a hőérzetet leíró legfontosabb mérőszámok, különös tekintettel a Fanger-féle PMV (Predicted Mean Vote) és PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) indexekre, valamint az adaptív komfortmodellek jelentőségére. A dolgozat módszertani része két fő pillérre épül. Elsőként egy általános szedán karosszéria CFD (számítógépes áramlásdinamikai) szimulációja segítségével vizsgálom a belső légáramlások természetét, a sebességmezők eloszlását és a lehetséges huzatos zónák kialakulását. A kutatás második felében egy összehasonlító esettanulmányt ismertetek, amely során két, technológiai színvonalában jelentősen eltérő gépjármű, egy 1993-as Suzuki Swift és egy 2015-ös Audi A6 utasterének komfortparamétereit mértem meg azonos meteorológiai körülmények között. A vizsgálat során a vezetőülés környezetében három magassági szinten rögzítettem a légsebességet, a léghőmérsékletet és a sugárzási hőmérsékletet. Az eredmények összevetése rávilágít arra, hogy a több mint két évtizedes járműipari fejlesztés hogyan befolyásolja a befűvés karakterisztikáját és az utasok objektív komfortérzetét.

Kulcsszavak: hőkomfort, huzatérzet, CFD szimuláció

Abstract: Thermal comfort inside vehicle cabins is not merely a matter of luxury but a fundamental condition for traffic safety, as inadequate thermal conditions have been proven to impair driver reaction times and concentration. The aim of this paper is to provide a comprehensive analysis of the air technical conditions within vehicle interiors, combining theoretical modeling with practical measurements. The first part of the research reviews the literature to present the key metrics describing thermal sensation, with particular emphasis on Fanger's PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) indices, as well as the significance of adaptive comfort models. The methodological section of the paper rests on two main pillars. First, the nature of internal airflows, the distribution of velocity fields, and the potential formation of draft zones are examined using CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation on a generic sedan body. In the second part of the research, a comparative case study is presented, where the comfort parameters of two vehicles with significantly different technological standards, a 1993 Suzuki Swift and a 2015 Audi A6, were measured under identical meteorological conditions. During the investigation, air velocity, air temperature, and radiant temperature were recorded at three height levels around the driver's seat. The comparison of the results

highlights how more than two decades of automotive development have influenced the characteristics of air distribution and the objective thermal comfort of passengers.

Keywords: thermal comfort, draft rate, CFD simulation

1. Bevezetés

A gépjárművek utasterének megfelelő hőmérsékleti viszonyai nem csupán kényelmi szempontot jelentenek, hanem a közlekedésbiztonság alapvető feltételei is, mivel a hőmérsékleti diszkomfort bizonyítottan rontja a reakcióidőt és a koncentrációs képességet. A járműkabinok kis légtérfogata, a változó külső hatások és a nagy üvegfelületek miatt e terek vizsgálata komplex feladat, amelyre a mérnöki gyakorlatban a Fanger-féle PMV és PPD modelleket alkalmazzák.

Jelen dolgozat célja a járművek légtechnikai viszonyainak elemzése elméleti és gyakorlati megközelítéssel. A kutatás első részében CFD (számítógépes áramlásdinamikai) szimuláció segítségével vizsgálom egy általános szedán utastér áramlási jelenségeit és a huzat kialakulásának kockázatát. Ezt kiegészítve, egy összehasonlító méréssorozat keretében elemzem egy 1993-as Suzuki Swift és egy 2015-ös Audi A6 komfortparamétereit azonos környezeti feltételek mellett. A vizsgálat célja számszerűsíteni, hogy a több mint két évtizedes járműipari technológiai fejlődés milyen hatással van a befűvés karakterisztikájára és az utasok objektív hőérzetére.

2. Komfort fogalma és fő tényezői

A komfort fogalmát általánosságban úgy határozzuk meg, mint az emberi szervezet és a környezet közötti olyan állapotot, amelyben a tartózkodó személy sem hőmérsékleti, sem légtechnikai, sem más környezeti szempontból nem érez diszkomfortot. Ez az állapot szubjektív élmény, ugyanakkor jól leírható objektív paraméterekkel, amelyek mérhetőek és szabványosíthatóak. A komfort tehát egyszerre biológiai és mérnöki kategória, amely a fizikai környezet és az emberi érzékelés összhangjából származik.

A fogalom meghatározására a műszaki gyakorlatban számos meghatározás született. Zárt terek esetében a szubjektív közérzet fogalma az alábbi definícióban terjedt el: [1]
„a közérzet komplex hatások alapján az egyéneken kialakuló szubjektív érzés” [1]

Azonban ez számos tényezőtől függ. E tényezőket az alábbi csoportba tudjuk sorolni:

- akusztikai tényezők
- szaglás, légzés
- tapintás, érintés
- színhatás, látás
- hőmérséklet, nedvesség, légáramlás
- épület rezgése, mozgása
- úgynevezett különleges tényezők, mint napsütés, ionizáció
- biztonsági tényezők
- előre nem várt veszélyek hatása

- gazdasági tényezők

A felsorolásból látszik, hogy nemcsak műszaki szempontok, hanem gazdasági és környezeti hatások is befolyásolják az ember komfortérzetét egy adott helyiségben, így együttesen nem, vagy csak nagyon nehezen vizsgálható, szervezetünk azonban az együttes hatásra reagál. [1]

A műszaki gyakorlatban azonban fontos, hogy a komfortérzet számszerűen kifejezhető legyen, ezért az azt befolyásoló, közvetlenül mérhető tényezőket vizsgáljuk. Ilyen tényezők a hőmérséklet, a páratartalom, a légmozgás, a zaj és a megvilágítás. Illetve mérsékeltebb befolyásoló, de fontos szempont még a napsugárzás, ionizáció és a rezgések. [1]

A komfortérzet meghatározásába kulturális, közéleti szokások is szerepet játszhatnak. Az emberek eltérő klímához, öltözködési szokásokhoz és életmódhoz alkalmazkodnak, így ami egy dán irodában komfortosnak számít, az például egy dél-európai vagy ázsiai környezetben kellemetlen érzetet kelt. [2]

Ez az adaptív szemlélet egyre hangsúlyosabb az újabb szabványokban, például az EN 16798-1:2019-ben, amely már nemcsak laboratóriumi kísérletekre, hanem terepkutatásokra is alapozza a komfort zónák meghatározását. [3]

3. PMV és PPD modell

Predicted Mean Vote (PMV)

Fanger által bevezetett Predicted Mean Vote (PMV) fogalom egy hétfokú hőérzet-skálán (-3: nagyon hideg, 0: semleges, +3: nagyon meleg) fejezi ki az emberek átlagos hőérzetét. A PMV nem egyéni érték, hanem statisztikai átlag, amely előre jelzi, hogy egy nagyobb csoport hogyan értékeli majd a hőkomfortot adott körülmények között. [1]

A PMV számításának alapja az emberi szervezet hőháztartásának modellezése. A modell hat kulcstényezőt vesz figyelembe: a levegő hőmérséklete, a sugárzási hőmérséklet, a relatív páratartalom, a légsebesség, a ruházati szigetelés (clo) és az anyagcsere-intenzitás (met). Ha a szervezet hőtermelése és a környezet felé történő hőleadása egyensúlyban van, akkor a PMV értéke 0 körül alakul, ami a semleges hőérzetet jelzi. A modell külön erőssége, hogy a fizikai környezeti változókat az emberi tényezőkkel együtt vizsgálja [1]

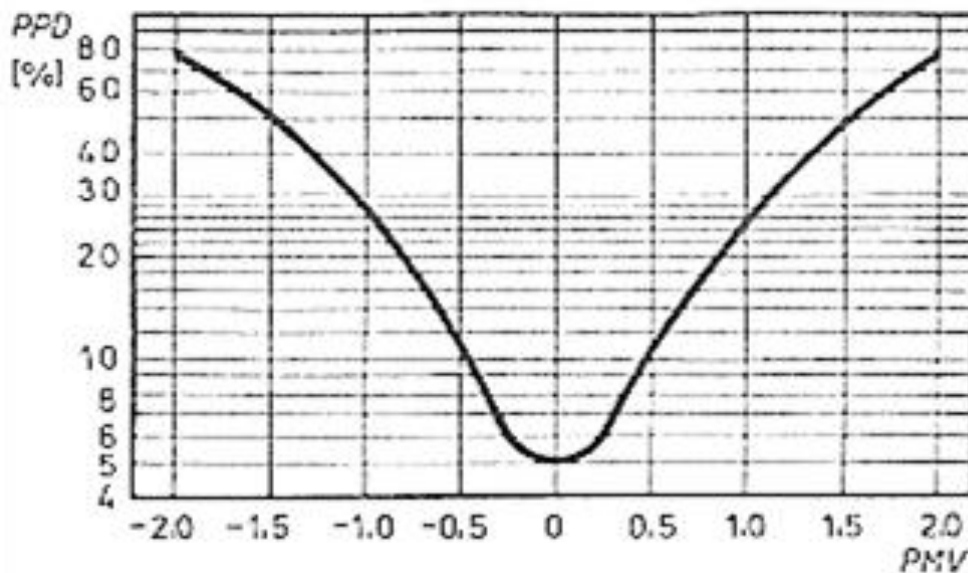
A PMV modell mérnöki gyakorlatba illesztése során fontos szerepet játszik a ruházat hőellenállása és az aktivitási szint, hiszen ugyanaz a környezet másként hat egy ülő irodai dolgozóra, mint egy fizikai munkát végző emberre. PMV tehát olyan komplex mutató, amely az emberi hőérzet sokféleségét egyszerűsíti mérhető paraméterekké, megkönnyítve a komfortfeltételek szabványosítását. [3]

A PMV modell különösen a klimatizált, stabil környezetekben használható megbízhatóan, ahol a paraméterek tartósan állandóak. Természetes szellőzésű épületekben vagy változó környezeti feltételek mellett a modell kevésbé pontos. PMV által semlegesnek jelzett környezetben a felhasználók mégis gyakran választanak kiegészítő hűtési vagy fűtési megoldásokat, ami az adaptív tényezők fontosságára utal. Ez a kritika vezetett ahhoz, hogy a PMV mellett egyre inkább teret nyerjen az adaptív komfortmodell [3].

Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) modell

A PPD modell a PMV érték kiegészítéseként szolgál. Míg a PMV az átlagos hőérzetet mutatja, addig a PPD azt fejezi ki, hogy egy adott környezeti feltétel mellett a felhasználók mekkora

hányada lesz elégedetlen. A modell statisztikai alapokra épül, és azt mutatja meg, hogy még a legideálisabb hőkomfort környezetben is mindig lesz egy kisebb csoport, amely nem érzi jól magát. Fanger kísérletei alapján ez az elégedetlenségi arány minimálisan is körülbelül 5%. [1] A PPD képlet matematikailag a PMV-ből vezethető le. A kapcsolat nem lineáris, hanem görbe jellegű: a PMV nullától való eltéréseinek növekedésével a PPD gyorsan emelkedik. Ez azt jelenti, hogy már kisebb hőmérsékleti vagy környezeti eltérés is jelentős arányban okozhat elégedetlenséget. A mérnöki gyakorlatban is nagy hangsúlyt kap, hogy a 0 PMV-hez tartozó minimum PPD érték 5%, tehát teljes elégedettség sosem érhető el. [2]



1. ábra. termikus környezetekkel várhatóan elégedetlenek százalékos aránya (PPD) a PMV érték függvényében⁸¹ [1]

4. Adaptív komfortmodell

A klasszikus PMV–PPD modell a beltéri hőkomfortot egy fix pont köré szerveződő, szűk tartományban értékeli, feltételezve, hogy az optimális hőérzet statikus fizikai paraméterek alapján határozható meg. Terepvizsgálatok során azonban azt tapasztalták, hogy a felhasználók komfortérzete dinamikusan változik, és jelentős mértékben függ a kültéri hőmérséklet alakulásától. Több kontinensen végzett felmérések során az épülethasználókat a preferált beltéri hőmérsékletükről kérdezték, miközben objektív méréseket is végeztek a környezeti paramétereikről. Az eredmények azt mutatták, hogy a komforttartomány eltolódik a kültéri napi átlaghőmérséklet függvényében: melegebb klímában a felhasználók magasabb, míg hűvösebb környezetben alacsonyabb beltéri hőmérsékletet fogadnak el. Ez a megfigyelés vezette be a komfortelméletbe a „szoktatás” és az „adaptív alkalmazkodás” fogalmát, amelyek azt írják le, hogy a felhasználók fiziológiai, viselkedésbeli és ruházati módosítások révén képesek befolyásolni komfortérzetüket. Az adaptív modell lényege, hogy az emberek aktív szereplői saját komfortjuk alakításának: ruházatuk megválasztásával, természetes szellőztetéssel vagy

[1] ⁸¹ L. Bánhidi és L. Kajtár, Komfortelmélet. Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2000. 436 p.

árnyékolás alkalmazásával módosíthatják a mikroklímát. Ennek következtében az elvárt komforttartomány szélesebb lehet, mint amit a hagyományos, statikus modellek engednek. A váltás jelentős szemléletbeli különbséget képvisel, hiszen a komfort megítélése kevésbé mérnöki számítás, sokkal inkább az emberi reakciók és adaptív szokások összegzése. [4]

Az adaptív komfortmodell a beltéri környezetben való alkalmazkodás széles spektrumát vizsgálja, hangsúlyozva a felhasználók aktív szerepét a mikroklíma alakításában. A komfortszint befolyásolásának módjai magukban foglalják a természetes szellőztetést, árnyékolást és a tevékenységi szint változtatását. Ezek a tényezők lehetővé teszik, hogy a felhasználók gyorsan reagáljanak a beltéri hőmérséklet változásaira, miközben a komfortérzet fenntartható marad hosszabb időtávon. [5]

A modell nem csak a felhasználói alkalmazkodást, hanem a mérnöki gyakorlatban való integrációt is előtérbe helyezi. Az adaptív szemlélet a nemzetközi szabványokban is megjelent, például az EN 16798-1:2019 és az ASHRAE 55 dokumentumaiban, ahol a komfortzónák gyakorlati határértékei kerültek meghatározásra. A szabványok célja, hogy az elméleti alapelvek mérnöki környezetben is alkalmazhatók legyenek, miközben a kutatási eredmények és a felhasználói viselkedés továbbra is a háttérben biztosítja a helyes értelmezést. [6]

Az adaptív komfortmodell előnyei kiterjednek az energiahatékonyság és fenntartható építészet területére is. Ha a felhasználók bizonyos mértékben elfogadják a beltéri hőmérséklet szezonális változásait, csökkenthető a gépészeti rendszerek terhelése, ami primerenergia-megtakarítást eredményez. Ez a megközelítés különösen releváns alacsony energiaigényű vagy természetes szellőzésre épülő épületek esetén, ahol a komfort és az energiafelhasználás egyidejű optimalizálása kiemelten fontos. [7]

Gyakorlati alkalmazásban az adaptív modell lehetővé teszi a tértípusokhoz szabott komforttervezést. Irodai környezetben a léghelosztó rendszerek, diffúzorok és szellőzőnyílások optimális elhelyezése, valamint a felhasználói tevékenység és ruházat figyelembevétele növeli a komfortérzetet. Lakóépületekben a természetes szellőztetés, ablaknyitás és árnyékolás kombinációja biztosítja a kellemes belső klímát. Kulturális terekben, például múzeumokban és koncerttermekben a zaj- és hőhatások minimalizálása mellett a felhasználói alkalmazkodás támogatása kritikus tényező a komfort biztosításában. [7]

Összességében az adaptív komfortmodell forradalmi változást hozott a hőkomfort értelmezésében, hiszen a statikus, egyetemes érvényű modellek helyett dinamikus, emberközpontú szemléletet képvisel. A felhasználók aktív szerepe, a környezeti feltételek ingadozása, valamint a viselkedésbeli és ruházati alkalmazkodás lehetővé teszi a szélesebb komforttartomány kialakítását. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy a tervezők ne csupán technikai paraméterek alapján, hanem a valós használói tapasztalatokat figyelembe véve alakítsák ki az épületek belső környezetét, miközben a szabványok iránymutató eszközként szolgálnak, és egyidejűleg elősegítik az energiatakarékos üzemeltetést, maximalizálva a felhasználói elégedettséget.

5. Áramlási jelenségek szerepe a komfortban

Az emberi hőkomfort egyik alapvető meghatározó tényezője a levegő áramlása, amely közvetlenül befolyásolja a hőérzetet és a komfortérzetet. Míg a hőmérséklet és a páratartalom a globális hőérzetet alakítják, addig a légmozgás lokális hatásokat idéz elő: képes felfrissíteni a helyiség levegőjét, de ugyanakkor kellemetlen huzatérzetet is kiválthat. Az áramlási viszonyok tervezése tehát nem csupán műszaki, hanem pszichológiai kérdés is, mivel a felhasználók érzékenysége és toleranciája jelentős egyéni különbségeket mutat.

A légsebesség hatásai összetett módon érvényesülnek. Alacsony sebességek mellett gyakran állott, „pangó” levegő érzése alakul ki, amely a felhasználók elégedetlenségét okozza,

különösen nagyobb létszámú terekben. Ezzel szemben a magas légsebesség dinamikus hűtőhatást fejt ki, ami kedvező lehet meleg környezetben, ugyanakkor hideg térben kellemetlen huzatként érzékelhető. A turbulencia intenzitása külön figyelmet érdemel, mivel a fluktuáló áramlások fokozzák a bőrfelület hőveszteségét, és az emberi szervezet sokkal érzékenyebben reagál az ingadozó légmozgásokra, mint az állandó áramlásra. Ez magyarázza, hogy a huzathatás gyakran alakul ki olyan terekben, ahol a műszaki mérések szerint a légsebesség még elfogadható tartományban van. [8]

A gyakorlati alkalmazás során az áramlási viszonyok optimalizálása elsősorban a befúvó- és elszívóelemek helyes kialakításán múlik. Az anemosztátok, rácsok és befúvók elhelyezése közvetlenül befolyásolja, hogy a levegőáram miként oszlik el a térben, és eléri-e a tartózkodási zónát kellemetlen huzat nélkül. A különböző légelosztási stratégiák – például a keverő szellőzés, az eltoló szellőzés vagy a hibrid megoldások – eltérő áramlásképeket hoznak létre, amelyek más-más komfortélményt eredményeznek. A tervezési irányelvek hangsúlyozzák, hogy a helyiség funkcióját és használói terhelését mindig figyelembe kell venni: egy nyitott irodaterben például a huzat elkerülése prioritás, míg egy sportlétesítményben a magasabb légsebesség akár kedvező is lehet. [8]

Az áramlási jelenségek szerepe a komfortban nem korlátozódik a huzat elkerülésére, hanem magában foglalja a frisslevegő-ellátás hatékonyságát, a helyiség levegőminőségének szubjektív érzékelését, valamint a különböző funkciójú terek használói elégedettségének biztosítását is. A jól megtervezett áramlási rendszer egyszerre járul hozzá a komfort növeléséhez és az energiahatékonyság javításához, míg a nem megfelelő kialakítás mindkét célt veszélyezteti. [9]

6. Járműutastér légáramlásának numerikus áramlástan (CFD) vizsgálata

A járművek utasterében kialakuló hőkomfort és légtechnikai viszonyok elemzésének egyik legkorszerűbb eszköze a számítógépes áramlásdinamika, azaz a CFD (Computational Fluid Dynamics). Jelen dolgozat keretében egy egyszerűsített, általános szedán felépítésű gépjármű utasterének légáramlási viszonyai kerülnek vizsgálatra numerikus szimuláció segítségével. A generikus modell használatának célja az alapvető áramlási jelenségek és a hűtési mechanizmusok tisztázása a specifikus márkafüggő geometriai sajátosságok zavaró hatása nélkül.

6.1. A geometriai modell és a diszkretizáció

A vizsgálat első lépése az utastér 3D geometriai modelljének létrehozása. A modellalkotás során a légtechnikai szempontból releváns belső határoló felületek, úgymint a műszerfal síkja, az első és hátsó ülőssor, az ajtók belső borítása és az üvegfelületek, kerülnek definiálásra. A modellben elhelyezett légbefúvó nyílások (anemosztátok) pozíciója egy átlagos személyautó elrendezését követi: a műszerfalon elhelyezett középkonzoli és oldalsó befúvók, κ - ϵ valamint a lábtérbe irányuló nyílások. A modell tartalmazza az emberi hőleadást szimuláló egyszerűsített testmodelleket (bábuk) elhelyezését is a vezető és az utas pozíciójában.

A folyadékter (a kabin levegője) véges térfogatokra bontása, azaz a hálógenerálás (meshing) során hibrid hálózati struktúra alkalmazása indokolt. A befúvók környezetében, ahol nagy sebességgradiensek várhatók, sűrűbb felbontást, míg a kabin központi, nyugalmasabb zónáiban ritkább hálót alkalmaz a modell. A szimuláció futtatása a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenletek megoldásán alapul, a turbulencia modellezésére pedig a standard modell szolgál, amely ipari környezetben széles körben elfogadott a beltéri légáramlások vizsgálatára, mivel megfelelő pontossággal közelíti a turbulens örvények hatását a hőtranszportra.

6.2. Határfeltételek és a szimuláció kiértékelése

A szimuláció fizikai valósághűségét a peremfeltételek pontos megadása biztosítja. A vizsgálat egy tipikus nyári hűtési esetet modellez:

- Belépési profil (Inlet): A befűvőkon keresztül érkező hűtött levegő hőmérséklete (T_{in}) és belépési sebessége (v_{in}) kerül rögzítésre. A sebességprofil a befűvő keresztmetszetére normálva, egyenletes eloszlásúnak tekintjük.
- Falhatárok (Wall): Az üvegfelületeken és a karosszéria határoló elemein konvektív hőátadási tényező kerül beállításra, amely a külső környezeti hőterhelést és a napsugárzás hatását reprezentálja.
- Hőforrások: Az utasokat reprezentáló felületeken állandó hőáramsűrűség kerül meghatározásra, amely megfelel egy ülő munkát végző ember (kb. 1,0-1,2 met) metabolikus hőtermelésének.

A szimuláció eredményeinek poszt-processzálása során a kapott sebesség- és hőmérsékletmezők vizualizációja történik. A komfort szempontjából kritikus paraméter a huzatérzet kockázata (Draft Rate - DR). Az általános modell segítségével elemezhető a légsebesség eloszlása a vezető nyaki és boka tartományában. A szimuláció célja annak kimutatása, hogy egy tipikus utastér elrendezés esetén hogyan alakulnak a fő áramlási vektorok, és hol alakulhatnak ki a komfortszabványok (pl. ISO 7730) által ajánlott határértékeket ($v < 0,25$ m/s) meghaladó lokális sebességek, illetve hol jönnek létre pangó, nem megfelelően szellőztetett zónák.

7. Összehasonlító komfortmérés eltérő technológiai szintű gépjárművekben

A szimulációs eredmények általános tanulságainak kiegészítésére a kutatás gyakorlati része egy valós, helyszíni mérésorozatot tartalmaz. A vizsgálat célja két, nemcsak kategóriájában, hanem technológiai korszakában is jelentősen eltérő gépjármű, egy 1993-as évjáratú Suzuki Swift Sedan és egy 2015-ös évjáratú Audi A6, utasterében kialakuló hőkomfort összehasonlító elemzése. A több mint két évtizedes különbség kiváló lehetőséget ad arra, hogy megvizsgáljuk a járműipari légtechnikai fejlesztések hatását az utasok szubjektív és objektív hőérzetére.

7.1. A mérési elrendezés és a vizsgált paraméterek

A mérések metodikája az MSZ EN ISO 7730 szabvány ajánlásait követi. A vizsgálat során a hőérzetet befolyásoló négy alapvető fizikai paraméter kerül rögzítésre: a levegő hőmérséklete (t_a), a közepes sugárzási hőmérséklet (t_r), a légsebesség (v_a) és a relatív páratartalom (RH).

A méréshez használt műszeregyüttes kulcseleme egy alacsony tartományban is pontos légsebesség-mérő (anemométer), amely képes a 0,05–1,0 m/s közötti légmozgások és azok fluktuációjának detektálására. A sugárzási hőmérséklet mérése egy feketére festett, Vernon-gömbbel (pontosabban egy annak korrekciójával számított kisebb gömbbel) történik, amely integrálja a környező felületek hősugárzását. Ez különösen fontos a két autó összevetésében, hiszen a 2015-ös Audi vélhetően jobb hőszigeteléssel és hővédő üvegezéssel rendelkezik, mint az 1993-as Suzuki.

A szenzorok elhelyezése a vezetőülés pozíciójában történik, három magassági szinten:

- boka magassága (0,1 m): lábtérbe irányított légáramlás vizsgálata,
- derékmagasság (0,6 m): test törzsét érő hőhatások,
- fej magassága (1,1 m): huzatra legérzékenyebb nyaki terület zónája.

7.2. A mérési protokoll és az eredmények összehasonlítása

A mérésekre azonos meteorológiai körülmények között kerül sor. A protokoll szerint mindkét jármű motorjának üzemi hőmérsékletre melegítése után a hűtési rendszert aktiváljuk. A 2015-ös Audi A6 esetében a digitális klímavezérlőt automata üzemmódban, 22°C-ra állítjuk. Az 1993-as Suzuki Swift esetében, amely vélhetően manuális klímával vagy egyszerű szellőzőrendszerrel rendelkezik, a ventilátort közepes fokozatra, a hőmérséklet szabályzót a leghidegebb állásba, a légtérrelést pedig a műszerfal irányába állítjuk, törekedve a szubjektív komfort elérésére.

A két jármű összehasonlítása során a PMV és a PPD indexek számítása történik. A hipotézis szerint a 2015-ös Audi A6 fejlett légelosztó rendszere és többzónás klímája diffúzabb légáramlást tesz lehetővé, így a kívánt hőmérséklet alacsonyabb légsebesség-csúcsokkal érhető el, minimalizálva a huzatérzetet. Ezzel szemben az 1993-as Suzuki Swift esetében várhatóan nagyobb lokális légsebességeket és egyenetlenebb hőmérséklet-eloszlást fogunk mérni, mivel a régebbi technológia a hűtést gyakran közvetlen, nagy sebességű légárammal (direkt befúvás) oldja meg. A mérés célja számszerűsíteni, hogy ez a technológiai fejlődés hogyan csökkenti a PPD értéket (az elégedetlenség arányát) azonos külső hőterhelés mellett.

Irodalomjegyzék

- [1] L. Bánhidi és L. Kajtár, *Komfortelmélet*. Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2000. 436 p.
- [2] B. W. Olesen, „International standards for the indoor environment,” *Indoor Air*, vol. 14, no. s7, pp. 18–26, 2004.
- [3] EN 16798-1: Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters, Brussels: CEN, 2019.
- [4] F. Nicol, H. B. Rijal, és S. Roaf, Eds., *Routledge Handbook of Resilient Thermal Comfort*. Abingdon: Routledge, 2022.
- [5] R. Yao et al., „Evolution and performance analysis of adaptive thermal comfort models – a comprehensive literature review,” *Building and Environment*, vol. 217, Art. no. 109020, 2022.
- [6] 2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2017.
- [7] N. Forcada, M. Gangolells, M. Casals, A. Tejedor, M. Macarulla, és K. Gaspar, „Field study on adaptive thermal comfort models for nursing homes,” *Indoor and Built Environment*, vol. 30, no. 3, pp. 330–343, 2021.
- [8] CIBSE, *Guide A: Environmental Design*. London: CIBSE, 2015.
- [9] H. B. Awbi, „Ventilation for good indoor air quality and energy efficiency,” *Energy Procedia*, vol. 112, pp. 277–286, 2017.

Elektromos energia, mint alternatíva a légiközlekedésben

Electric energy as an alternative in aviation

Németh Tamás

Széchenyi István Egyetem

Absztrakt: Kutatásomban az R26S Góbé vitorlázórepülőgéphez terveztem egy tisztán elektromos segédhajtást mellyel céлом volt, hogy a repülőgép önerőből fel tudjon szállni és el tudja érni a 2000 méteres magasságot. Ehhez a FES (Front Electric Sustainer) rendszert vettem alapul, ami egy tisztán elektromos segédhajtás melyet különböző vitorlázórepülőgép típusokban alkalmaznak. A számításaim alapján a repülőgép ezzel a hajtáslánc konfigurációval képes önerőből felszállni és elérni a 2000 méteres magasságot egy személlyel 90-100 kg-os testsúllyal.

Kulcsszavak: energiahatékony, elektromos, segédhajtás

Abstract: In my research, I designed a purely electric auxiliary propulsion system for the R-26S *Góbé* sailplane, with the aim of enabling the aircraft to take off independently and reach an altitude of 2000 meters. For this purpose, I adopted the Front Electric Sustainer (FES) system as a basis, which is a fully electric auxiliary drive applied in various sailplane types. Based on my calculations, the aircraft with this propulsion chain configuration is capable of self-launch and of reaching 2000 meters altitude with one pilot weighing between 90 and 100 kilograms.

Keywords: energy efficient, electric, auxiliary propulsion

1. Problémakör

A kutatásomban egy R26-S Góbé típusú vitorlázórepülőgéphez tervezek egy tisztán elektromos segédhajtást. A vitorlázórepülésben mára egyre nagyobb számban terjednek el a valamilyen erőforrással ellátott segédmotoros vitorlázórepülőgépek. Ezek régebben hagyományos belsőégésű erőforrások voltak azonban a technológia fejlődésével megjelentek kevésbé karbantartásigényes, jobb hatásfokú, környezetbarátabb és egyszerűbb megoldások, mint például a tisztán elektromos hajtáslánc. Egy ilyen erőforrással a repülőgép sokkal kisebb mértékben van kitéve az időjárásnak és a felszállást is sokkal könnyebb megoldani hisz sok esetben a pilóta önerőből fel tud szállni a repülőgéppel külső segítség nélkül, míg egy hagyományos vitorlázórepülőgépet vagy csörlő vagy egy másik repülőgép vontatása segítségével lehet csak a levegőbe emelni.

2. R26-S Góbé

Az R26-S Góbé egy felsőszárnyas kétülékes teljes mértékben alumíniumötvözetből készült sárkányszerkezetű vitorlázórepülőgép. Melyet idősebb Rubik Ernő tervezett az Esztergomi Gépgyárban a 60-as években. Rendkívül kedvező repülési tulajdonságai miatt hamar kedvelt típusná vált és mind a mai napig a legnagyobb számban lajstromban tartott típus Magyarországon. A repülésoktatástól kezdve a hobbi vitorlázáson át széles körben használják. A repülőgép borítása is nagyrészt hullámosított alumínium lemez kivétel a kormányfelületek és a vezérsíkok. A repülőgép nem rendelkezik erőforrással, indítását vontatással vagy csörlő segítségével kell megoldani. A repülőgép tömege üresen 220 kg maximális felszállótömege pedig 440 kg. (lásd 1. ábra) [1]



82

25. ábra: R26-S Góbé

3. Erőforrás

Erőforrásnak egy BLDC kefe nélküli háromfázisú egyenáramú szinkronmotort választottam mely 25 kW-os teljesítményével képes a repülőgép önerőből történő felszállását megoldani. A motor mindössze 8 kg, és befoglaló méretei sem nagyok, így repülés közben sem növeli nagy mértékben a légellenállást. A motor egy tartókonzolon kap helyet melyet a repülőgép hosszanti középvonalaiba helyezek el a szárny felett, és a szárnyfőtartóhoz rögzítem mivel az elég szilárd ahhoz hogy a fellépő erőhatásoknak ellenálljon. A motor egy 1020 mm átmérőjű kéttollú kompozit légsavart hajt meg maximum terhelésen 4500-as fordulaton, ami így tengerszinten 916 N vonóerőt képes leadni. Természetesen ez az érték a magasság növekedésével csökken. (lásd 2. ábra) [2]

⁸² ábra: R26-S Góbé: [Rubik R-26SU Gobe '82 - | Aviation Photo #4174495 | Airliners.net](#)



83

26. ábra: BLDC kefe nélküli háromfázisú egyenáramú szinkronmotor

4. Akkumulátorcsomag

Az akkumulátorcsomag egy 84 Ah kapacitású NMC (LiMnNiCoO_2) akkumulátor melyben 480 db 118650 típusú Lítium-ion cella helyezkedik el. Elrendezésük 30 cella párhuzamosan kötve és 16 ilyen cellablokk sorba kötve. A repülőgépbe 2 darab ilyen akkumulátorcsomag kerül „A” és „B” jelzéssel. Az akkumulátorsaruk felcserélésének elkerülése érdekében a csatlakozókat úgy alakították ki, hogy a - oldali csatlakozó átmérője 8 mm a + oldalé pedig 10,3 mm. Egy akkumulátor tömege 28 kg a két akkumulátor együtt pedig 56 kg súlyú. (lásd 3. ábra). Az akkumulátorcsomagok BMS rendszerrel vannak ellátva Biztonságuk és hosszú élettartamuk biztosításához. Az olyan alapvető funkciók mellett, mint a cellakiegyenlítés és -védelem, egy fejlett BMS-nek pontosan meg kell becsülnie az akkumulátor töltöttségi állapotát (SOC), hogy megjósolja a fennmaradó üzemidőt és fenntartsa a biztonságos hatótávolságot. [3] [5]

⁸³ ábra: BLDC kefe nélküli háromfázisú egyenáramú szinkronmotor
<https://front-electric-sustainer.com/downloads/>



84

27. ábra: 84 Ah NMC akkumulátorcsomag

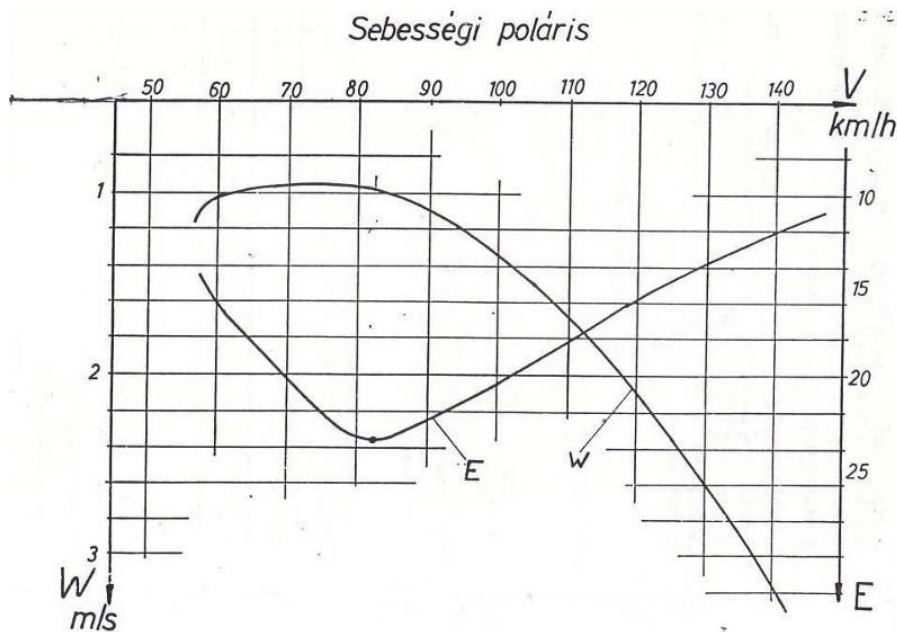
5. Számítások

A repüléssel kapcsolatos számításokat 80 km/h sebességnél végeztem, mivel a repülőgépnek ezen a sebességen a legjobb a siklószáma (lásd 4. ábra). A repülőgép súlyát 400 kg-nak vettem fel mivel amit úgy határoztam meg hogy a repülőgép üres súlya 220 kg egy átlagos felnőtt pilóta súlyát 90 kg-nak vettem fel a segédhajtás súlyát pedig szintén 90 kg-nak. Azért csak 1 pilótával számoltam mivel a súlypont helyének megőrzése végett az akkumulátorcsomagokat a szárny alatt a törzsben helyeztem el így viszont elfoglalják a második pilóta helyét a hátsó ülésen. Három terhelési szinten végeztem el a számításokat 100 %-on, 75 %-on, és 50 %-on. Mindhárom esetben a repülőgép emelkedési sebességét, a 2000 méteres magasság eléréséhez szükséges időt, illetve a felhasznált és az akkumulátorokban maradó energiát vizsgáltam.

A hármas ábrán látható az R26 Góbé sebességi polárisa. A diagramm azt mutatja meg hogy milyen sebesség mellett milyen siklószámot tud elérni a repülőgép, illetve milyen merülési sebességet. Az ábrán jól látható, hogy 80 km/h sebességnél a repülőgép siklószáma 23,2 ami a maximális érték. Ez azt jelenti, hogy ezen a sebességen 1 méter magasságvesztés közben 23,2 métert tesz meg vízszintesen. [1] [4]

⁸⁴ ábra: 84 Ah NMC akkumulátorcsomag
<https://front-electric-sustainer.com/downloads/>

V km/h	58	60	70	80	90	100	120	140
Wo m/s	1,31	1,02	0,97	0,96	1,10	1,34	2,11	3,22
E	11,8	16,4	20,1	23,2	22,8	20,8	15,8	12,1



85

28. ábra. R26-S Góbé sebességpolárisa

A számítási eredményeket táblázatban foglaltam össze (lásd 5. ábra). A kapott eredményekből jól látható, hogy 100 %-os terhelésen a legtakarékosabb az emelkedés mivel így az emelkedési sebességünk 3,22 m/s. Ez lehetővé teszi, hogy a 2000 méteres magasságot mindösszesen 10 perc 21 másodperc alatt érjük el. Kisebb, 50 %-os terhelésen az emelkedési sebességünk csökkenésével fordítottan arányosan drasztikusan megnő az emelkedéshez szükséges idő, mely nagymértékben rontja a hatásfokot. A 100 %-os terhelés 53 % megmaradó energiájához képest, ebben az esetben már mindössze csak 33 % kapacitás marad az akkumulátorcsomagokban.

Terhelés: [%]	Emelkedési sebesség: [m/s]	Felhasznált energia: [kWh]	Fennmaradó kapacitás: [%]
100 %	3,22	5,26	52,91
75 %	1,97	6,02	46,12
50 %	1,13	7,50	32,87

5. ábra. Számított adatok táblázata (Saját készítésű ábra) ⁸⁶

⁸⁵ ábra: R26-S Góbé sebességpolárisa

https://soaringhungary.com/wp-content/uploads/2024/10/ntsi_R26_UZ_01_2024.pdf

⁸⁶ ábra: Számított adatok táblázata (Saját készítésű ábra)

6. Összefoglalás

A polgári és sportrepülésben egyre nagyobb teret kapó alternatív hajtásrendszerek mint a tisztán elektromos segédhajtás sok új lehetőséget biztosít a hagyományos belső égésű erőforrásokhoz képest kedvező tulajdonságaival. Jelenlegi munkámban bemutattam az R26S Góbé típusú vitorlázórepülőgép tisztán elektromos segédhajtással történő felszerelését melynek része az elektromos segédhajtás elemeinek kiválasztása teljesítmény, hely és súly alapján. Azok elhelyezése a repülőgépben. Továbbá a célul kitűzött önerőből történő felszállás és 2000 méteres magasság elérésének igazolása számítások alapján. Az számítások eredményei azt mutatják, hogy ezzel a hajtáslánc konfigurációval a repülőgép képes önerőből felszállni és elérni a 2000 méteres magasságot továbbá a terhelés mértékétől függően marad is az akkumulátorban kapacitás melynek felhasználásáról a pilóta szabadon dönthet. A számításaim során figyelembe vettem egy 20 %-os tartalék kapacitást melyet vészhelyzet esetére mindig az akkumulátorokban meg kell hagyni. A repülőgépet ebben a segédhajtással ellátott verziójában 1 db pilóta akár 90-100 kg-os testsúlyig repülheti, a pilóta testsúlyánál figyelembe kell venni a ballaszt használatát melyet a repülőgép üzemeltetési dokumentációja foglal magába.

7. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Ábrák hivatkozásai:

1. ábra: R26-S Góbé
[Rubik R-26SU Gobe '82 - | Aviation Photo #4174495 | Airliners.net](https://www.airliners.net/photo/Rubik-R-26SU-Gobe-82-Aviation-Photo-4174495)
2. ábra: BLDC kefe nélküli háromfázisú egyenáramú szinkronmotor
<https://front-electric-sustainer.com/downloads/>
3. ábra: 84 Ah NMC akkumulátorcsomag
<https://front-electric-sustainer.com/downloads/>
4. ábra: R26-S Góbé sebességpolarisa
https://soaringhungary.com/wp-content/uploads/2024/10/ntsi_R26_UZ_01_2024.pdf
5. ábra: Számított adatok táblázata (Saját készítésű ábra)

Irodalomjegyzék

- [1] Magyar Vitorlázó Szövetség R26S R26SU Légi és földi üzemeltetési utasítás (2024)
https://soaringhungary.com/wp-content/uploads/2024/10/ntsi_R26_UZ_01_2024.pdf

- [2] FES (Front Electric Sustainer) FES-VEN-M100 BLDC villanymotor felhasználói kézikönyve <https://front-electric-sustainer.com/downloads/>
- [3] FES (Front Electric Sustainer) GEN 4 16S 84 Ah akkumulátorcsomagjának felhasználói kézikönyve <https://front-electric-sustainer.com/downloads/>
- [4] Elektromos energia, mint alternatíva a légiközlekedésben. TDK dolgozat Németh Tamás (2025)
- [5] Tamás Horváth, Dénes Fodor: Performance Comparison of the General, the Dual, and the Joint Sigma Point Kalman Filters on State Estimation of Li-Ion Battery Cells for BMSs 1-2. (2024)

Kormánymű tervezése elektromos Formula Student versenyautóhoz

Designing a steering system for an electric Formula Student race car

Oláh Domonkos

Széchenyi István Egyetem / Arrabona Racing Team hallgatói versenycsapat
domonkos.olah@arrabonaracing.hu

Abstrakt: A Formula Student egy nemzetközi mérnökverseny, melynek célja, hogy az egyetemi hallgatók a tanulmányaik során értékes tapasztalatot és gyakorlatot szerezzenek azáltal, hogy egy versenyautót fejlesztenek, építenek. Az egyetemen szerzett nagyrészt elméleti tudást a hallgatók átültethetik a valóságba és az ipari környezethez nagyon hasonló megoldásokat alkalmazhatnak. Az ART_11 versenyautónk kormányrendszerének fejlesztése során több tervezési hiba is elkerülte a figyelmemet, melyek a későbbiekben valós problémaként jelentkeztek autónk kormányzásában. Cikkemben ezen problémák feltárását és megoldását szeretném röviden bemutatni. A hibák megoldásaként ismertetem az új konstrukciót, illetve tervezési folyamatát, mellyel kiküszöbölhetőek a korábban említett problémák. A tervezési folyamat bemutatása során kitérek a szénszál erősítésű kompozit alkatrészek integrálására. Eredményként egy olyan kormánymű konstrukciót szeretnék felmutatni, mely a korábban használt rendszer hibáit teljes mértékben kijavítja és beépítésre kerülhet az ART_12 nevű versenyautónkba.

Kulcsszavak: kormánymű, Formula Student, versenyautó

Abstract: Here Formula Student is an international engineering competition that aims to give university students valuable experience and practical skills during their studies by developing and building a race car. Students can apply the mostly theoretical knowledge they have acquired at university to real-life situations and use solutions that are very similar to those used in an industrial environment. During the development of the steering system for our ART_11 race car, several design errors escaped my attention, which later manifested themselves as real problems in the steering of our car. In my article, I would like to briefly present these problems and their solutions. As a solution to these errors, I will describe the new design and the design process that can eliminate the aforementioned problems. In presenting the design process, I will discuss the integration of carbon fiber reinforced composite components. As a result, I would like to present a steering system design that completely corrects the faults of the previously used system and can be installed in our ART_12 race car

Keywords: steering system, Formula Student, racecar

1. Bevezetés

Az egyetemi tanulmányaim során, az első évemet követően, 2023-ban csatlakoztam az Arrabona Racing Team hallgatói versenycsaphoz, ahol Formula Student versenyautók fejlesztésében, építésében és nemzetközi versenyeken vettem részt. A csapatban eltöltött éveim során feladataim közé tartozott többek közt a kormányzás tervezése, fékpedál tervezése, illetve a 2024 ősztől kezdve gyártásvezetőként segítettam a csapat munkáját. Az én felelősségem volt az autóhoz szükséges fém alkatrészek gyárthatóságának biztosítása, gyártásszervezés, műszaki

rajzok ellenőrzése, és a csapat partnereivel való kapcsolattartás, egyeztetés a gyártandó alkatrészek konstrukcióját illetően. Részletesebben bemutatom a csapat eddigi legsikeresebb és egyben utolsó belső kategóriában versenyző autójának a kormányrendszerét és annak hibáit. Jelen cikkben a kormányzás terén elért fejlesztéseimet, tervezéseimet szeretném bemutatni, amelynek célja egy megbízhatóbb, könnyebb és jobb konstrukció kialakítása volt.

2. Gépjárművek kormányrendszere

Egy gépjármű esetén a kormányrendszer azt a szerkezeti egységet jelenti, amely lehetővé teszi a sofőr számára a jármű mozgási irányának megváltoztatását. A kormányrendszer áttételeket és esetenként szervórásegítést is tartalmaz, hogy a kormánykerék elfordításához szükséges erőt csökkentse, ezáltal könnyebbé és biztonságosabbá téve a vezető számára az irányítást. A járművek kormányzását az alábbi típusokba lehet kategorizálni a különböző geometriák alapján: forgózsámolyos kormányzás, derékcsuklós kormányzás, tengelycsonk kormányzás. Az egyes típusok különböző jellegű felhasználásra lettek kialakítva és más-más jellegű.

Tengelykormányzásként is ismert a legrégebbi kormányzási típus, melyet szekereknél, illetve lovaskocsiknál alkalmaztak. A rendszer lényege, hogy a kormányzott kerekek egy közös, merev tengelyen helyezkednek el. Kormányzáskor az egész tengely elfordul egy központi csap körül. A szerkezet alacsony sebességnél nagy fordulékonytságot biztosít, azonban nagyobb sebességnél csökkenhet a stabilitása. Ezért manapság már nem szokták járművekben alkalmazni. Azért, hogy meg lehessen akadályozni a kerekek alváz alá fordulását, úgynevezett ütköző bakokat kellett beszerezni, amelyek megakadályozták, hogy egy bizonyos szög tartományánál nagyobb mértékben elforduljon a forgózsámoly. [1]

Derékcsuklós kormányzás olyan rendszer, mely során a járművet nem a kerekek elfordításával, hanem az alváz középső részén található csukló elem segítségével irányíthatjuk. A jármű alváza két merev félből tevődik össze, az egyik a hajtott, a másik a vontatott rész. A két alvázfelet egy függőleges tengelyű derékcsuklóval kötik össze, mely lehetővé teszi a két alvázrész szabad mozgását. A kormányzást a két felet összekötő hidraulikus munkahengerek működtetésével biztosítják, melyek a két félvázat egymáshoz képest elmozdítják. A rendszer előnyei közé lehet sorolni a kisméretű fordulókört és a jó manőverezhetőségi képességet, illetve különösen előnyös a nehéz terepen való közlekedés során. Hátrányai közé tartozik, hogy bonyolultabb karbantartást igényel és nagy sebességnél csökken a stabilitás. Emiatt leginkább lassú, munkavégzésre tervezett és speciális járműveknél terjedt el, ahol fontos a kiemelkedő irányíthatósági képesség, mint például mezőgazdasági gépekben, homlokrakodókban, erdészeti és bányászati gépekben és földmunkagépekben található meg. [2]

A tengelycsonk kormányzás a leggyakrabban alkalmazott típus a személy- és tehergépjárművek esetében. Másnéven Ackermann-féle kormányzásnak is nevezik. Ez a fajta kormányrendszer oly módon került kialakításra, hogy kiküszöbölje a járművek kanyarodásakor fellépő menetstabilitási problémákat. Mivel kanyarodáskor az ívbelső kerék kisebb sugarú íven halad, ezért a külső íven haladó keréknél nagyobb szögben szükséges elfordítani. Azzal, hogy a kerekeket a tengelycsonk függőleges tengelye körül szabadon el lehet fordítani, egy kormánygép beépítésével megoldható a kerekek különböző szögben való elfordítása. Ezzel nagy mértékben növelhető a jármű menetstabilitása, hiszen kanyarban nem lép fel akkora tapadásvesztés mint a korábbi geometriák esetén. Továbbá a kormányrendszer alkalmazásával csökkent a gumibroncsok elhasználódása és javult a gépjárművek irányíthatósága. [3]

Ackermann típusú kormányzásból több fajta típust is meg lehet különböztetni a más jellegű geometriákat és futómű beállításokat tekintve. Az Ackermann kormányzás kialakításának alapja a megfelelő kormánytrapéz geometria. A különböző geometriák alkalmazásával más-más karakterisztikájú kormányzás hozható létre, melyeknek felhasználási területe is különböző [4]:

- Hagyományos Ackermann kormányzásról beszélünk abban az esetben, amikor kanyarodáskor a jármű ívbelső kereke nagyobb szögben fordul, mint az ívkülső.
- Anti-Ackermann kormányzáskor az ívkülső kerekek fordulnak nagyobb szögben, ezáltal nagy stabilitást adnak a rendszernek a gyors kanyarokban. Emiatt leginkább motorsportban terjedt el a felhasználása.
- A harmadik eset amikor neutrális a geometria, vagyis kormányzáskor a két kerék ugyanakkora szögben fordul el, párhuzamosan egymással. [4]

Közúti járműveknél a leggyakoribb kormányzási fajta az Ackermann kormányzás, melyet az első tengelyen valósítanak meg. Targoncáknál és rakodó gépeknél a könnyű manőverezhetőség érdekében elterjedt megoldás, hogy a hátsó tengely a kormányzott, ezzel növelve a manőverezhetőségi képességet, illetve az első tengelyeken levő nagyobb terhelés miatt a stabilabb irányváltást is biztosítva. Az ilyen jellegű járműveknél általában a hajtás az első tengelyen van, fontos azonban megjegyezni, hogy a hátsó tengely kormányzás csak alacsony sebességnél alkalmazható, mert nagy sebességnél hirtelen irányváltásnál instabillá válhat a jármű. Emiatt szükséges egy speciális képzés elvégzése a rakodó járművek irányításához, hogy a vezető megfelelően kormányozza azt. Vannak azonban olyan speciális kialakítású kormányrendszerek is melyek egyidőben több tengelyen is képesek elfordítani a kerekeket.

Összkerék kormányzásról akkor beszélhetünk, amikor az adott gépjármű több tengelyén egyidőben lehet irányítani a kerekeket. Összkerék kormányzás alkalmazásával alapvetően javulnak a menetdinamikai tulajdonságok és stabilabbá válik a jármű, ehhez azonban szükséges, hogy a tengelyeken megfelelően legyen összehangolva a kormányzás. A legoptimálisabb kihasználáshoz a rendszert úgy kell megtervezni, hogy alacsony sebességnél ellentétes irányba kormányozzon, ezzel lecsökkentve a jármű fordulókörét. Nagy sebességnél viszont jobb, ha azonos irányban fordítja a kerekeket, hiszen ezzel nagyban növekedik a jármű kanyarodási stabilitása. Ezt oly módon lehet elérni, hogy az összkerék kormányzást sebességfüggővé tesszük, vagyis mérjük a jármű sebességét és annak megfelelően állítjuk az elkormányzási szöget. [5]

Összkerék kormányzású rendszerek esetén megkülönböztetünk passzív és aktív rendszereket. A passzív rendszereket értünk melyek mechanikusan, elektronikus vezérlés nélkül változtatják meg a kormányzás hatására a hátsó kerekek szögét. Ezt speciális futómű felfüggesztési megoldásokkal érik el, melyek a kanyarokban deformálódnak. Ezzel szemben az aktív kormányzásnál elektronikus úton vezérlik az elektromechanikus vagy hidraulikus rendszereket, melyek megfelelő mértékben elfordítják a hátsó kerekeket. Az elfordulási szöget a jármű sebességéből és kormánymű szögéből állapítja meg a vezérlő elektronika. Ezzel megvalósítva a korábban említett sebességfüggő összkerék kormányzást. A kormányrendszerek legfontosabb eleme a kormánymű, mely átalakítja a kormányoszlop forgó mozgását és továbbítja azt a kerekek felé a nyomtávrudakon keresztül. Kialakítást tekintve többféle kormányművet is meg lehet különböztetni. [6]

A csigás kormányműveket Gemmer-féle kormányműveknek is nevezik. A csigás kialakításokról jellemző, hogy könnyen járnak, nagy kerékfordulást tesznek lehetővé, és mindemelett kompakt felépítéssel rendelkeznek. A szerkezet gyakorlatilag kettő egymásra

merőleges tengelyből épül fel, melyek között a nyomatékátvitel egy úgynevezett globoid csigával van biztosítva.

A globoid csiga kialakítását tekintve nem hengeres, hanem a tengely közepe felé csökken az átmérője. Ez azért szükséges, hogy a szélső helyzetekben is megfelelően működjön a szerkezet. A megfeszítést követően elérhető, hogy egyenes haladási helyzetben szinte ne legyen hézag, tehát nincs holtjátéka a rendszernek a középső működési tartományban. Első sorban merev tengellyel szerelt járművekben alkalmazzák. [7]

A golyósoros kormányművek működési elve megegyezik a legtöbb golyósoros lineáris mozgató mechanizmussal. A kormánytengely végén egy golyós orsó lett kialakítva, mely nem áll közvetlen kapcsolatban a golyós anyával. A két gépelem közti kapcsolatot acélgolyók alkalmazásával biztosítják, melyeknek kör alakú menetszerű horony van kialakítva az orsón és az anya belső felületén is. [8]

A golyók egy végtelenített pályán futnak és biztonsági okokból kettő darab vezető sínrel kapcsolódik az anyához. A golyós orsó forgatásával a golyók a körbefutó pálya emelkedésével tengelyirányban mozgatják a golyós anyát. Az anya külső geometriáján egy fogasléc került kialakításra, mely a fel-le mozgást egy fogasíven keresztül továbbítja az irányítókarrá. [9]

A fogasléces kormánymű mondható a legelterjedtebb kormánymű típusnak. Egyszerű felépítésének köszönhetően könnyű a karbantartása és az alkatrészek cseréje. A működés lényege, hogy a csapágyazott kormánytengelyen egy egyenes vagy ferde fogazás kerül kialakításra és egy fogaslécen keresztül továbbítja a nyomatékot közvetlenül a kormánymű tengelyére (12. ábra). Annak érdekében, hogy minél kisebb legyen a hézag a fogak között egy előfeszítő kerül beépítésre, mely rugók segítségével nyomja a fogaslécet a fogaskerekre. Ezzel nagy mértékben kiküszöbölhető a rendszer holtjátéka. A fogaskereket forgatva a fogasléces tengely tengelyirányban elmozdul, és a nyomtávrudakon és karokon keresztül továbbítja az a kerek felé. A közvetlen áttételnek köszönhetően a rendszer könnyen visszaáll alaphelyzetbe és a lapos elrendezésnek köszönhetően kicsi a helyszükséglete. A fogasléces kormányműveket kezdetben egyenes fogazással készítették, később pedig már ferde fogazást alkalmaztak a nagyobb nyomatékátvitel miatt. [10]

A fogaskerék és fogasléc kapcsolatából adódóan a középállás közeli tartományban kisebb az áttétel, míg a véghelyzet tartományában nagyobb. Ezt úgy lehet kiküszöbölni, hogy a fogasléc fogosztása változó, vagyis a középső részén nagyobb, a szélein pedig sűrűbb a fogazat. Ennek köszönhetően kisebb szögeknél közvetlenebbé válik a kormányzás, nagyobb kormányzógeknél pedig kevesebb erőt szükséges kifejteni a kerek elfordításához. [11]

A fogaskerek olyan gépelemek, melyek fő célja a forgó mozgás átvitele, átalakítása és a nyomatékátvitel megvalósítása. A mozgásátvitel közben áttétel alkalmazásával a kimenő fordulatszám is változtatható. Egyik legfontosabb geometriai méret a modul, mellyel meghatározható a fogak osztókörre eső mérete. Továbbá két fogaskereket csak akkor lehet egymással összekapcsolni, ha megegyezik a modulszámuk. Osztókörnek azt a geometriai középvonalat nevezzük, ahol a hajtás átvitele súrlódásmentesnek tekinthető, illetve ezen a vonalon a fogvastagság és a fogárok azonos méretű. A fejkör a legnagyobb, a lábkör pedig a legkisebb átmérő méretét jelenti. A fogárok a fogak közötti területet jelöli, melybe a másik fogaskerék fogazata csatlakozik. A fogprofil a fogak alakját határozza meg, melyek legtöbbször egy evolvens görbe szerint készülnek. [12]

A fogaskereket sokféle módon lehet csoportosítani, de a legegyszerűbb a kapcsolódó tengelyek helyzete szerinti kategorizálás. Ez alapján három kategóriába sorolhatók a fogaskerék kialakítások: párhuzamos, metsződő és kitérő helyzetű tengelyek.

Párhuzamos tengelyek esetén hagyományos hengeres kerekeket lehet alkalmazni. Ha a fogaskerék külső palástfelületén van fogazat akkor külső fogazatról van szó, ha pedig a kerék belső felületén van a fogazat akkor az belső fogazatnak nevezhető.

A hengeres kerekek egyenes, ferde és nyíl fogazattal alakíthatók ki.

Egyenes fogazat esetén a fogak párhuzamosak a tengellyel. Egyszerű kialakításuknak köszönhetően egyszerű és olcsó a gyártásuk, ezért ez a legelterjedtebb és leggyakrabban alkalmazott fogaskerék típus. Az egyenes fogazás miatt a fogkapcsolatok csillapítás nélkül, hirtelen alakulnak ki, ezért magas fordulatszámnál nagyobb zaj jöhet létre a hajtásban.

Ferde fogazású fogaskeréknél a fogak egy adott szögben helyezkednek el a tengelyhez képest. Ennek köszönhetően a fogkapcsolatok fokozatosan épülnek fel, tehát egyenletesebben és csendesebben járnak. A nagyobb terhelhetőség miatt elsősorban hajtóművekben és sebességváltókban alkalmazzák. [13]

A nyíl fogazású fogaskerekeknél két darab ellentétes irányú ferde fogazat került kialakításra. A geometria ötvözi a ferde és az egyenes fogazás előnyeit, vagyis a csendes járást és nagy terhelhetőséget, azonban az ellentétes irányú fogazatok miatt nem ébred a tengelyeken axiális erő. Azonban a kerekek gyártása rendkívül bonyolult és költséges, emiatt olyan helyeken alkalmazzák, ahol rendkívül fontos a megbízhatóság vagy a nagy terhelhetőség. Ilyenek például a repülőgép hajtóművek vagy a teherhajók hajtáslánc.

A belső fogazásnál a fogak a fogaskerék belső felületén helyezkednek el. Kialakításuknak köszönhetően kompaktabb helyen elférnek, mint a külső fogazású társaik, ugyanakkora áttétel megvalósítása esetén. Fontos különbség még, hogy belső fogazás esetén a hajtó és hajtott tengely megegyező irányban forognak, míg a külső fogazás esetén ellentétesen. Emiatt leggyakrabban tengelykapcsolókban és bolygóművekben alkalmazzák. [13]

A fogasléc is a hengeres fogaskerekek csoportjába tartoznak, mivel a fogasléc fogazata egy végtelen hosszúságú fogaskeréknek tekinthető. A kapcsolódó fogaskerék forgatásával egyenes vonalú egyenletes mozgás valósítható meg. Általában ferde vagy egyenes fogazattal készülnek. Gyakran alkalmazzák emelőknél, megmunkálógépekben, és elterjedt a gépjárművek kormányműveiben is. [13]

Metsződő tengelyeken az erőátvitelt kúp fogaskerekekkel lehet biztosítani. A fogazást csak a külső palást felületén lehet kialakítani. Léteznek egyenes, ferde, ívelt és hipoid fogazású kúpkerék. Az esetek többségében 90° -os a tengelyek által bezárt szög, de vannak eltérő esetek is. [15]

Egyenes fogazású kúp fogaskerék rendelkeznek a legegyszerűbben kialakítható geometriával. A fogak radiálisan, a kúp palástján helyezkednek el hasonlóan a hengeres kerekekhez az egyenes fogazat miatt zajos lehet működés közben a fogkapcsolat. Közepes terhelhetőségük és megbízhatóságuk miatt

elsősorban gyengébb teljesítményű hajtásokban, kézi szerszámokban, differenciálművekben alkalmazzák. [15]

A ferde fogazással kialakított kúpkerék fogazata olyan egyenesek mentén került kialakításra melyek egy adott szöget zárnak be a kúpalkotóval. Ennek köszönhetően a fogak közti kapcsolódás és nyomatékátvitel sokkal simább lesz. A gyártástechnológiai adottságok miatt nem elég termelékeny a gyártásuk, ezért csak nagyon ritkán alkalmazzák. [15]

Ívelt fogazású kúpfogaskerekek sokkal elterjedtebbek, mint a ferde fogazásúak. A fogak ellentétében a ferde fogazással nem egyenesek, hanem görbék mentén helyezkednek el, mely lehet evolvens, ciklois vagy kör alapú. A többi kúpkerékhez képest az ívelt fogazat sima, zajszegény járást biztosít és nagy igénybevételeknek is ellenáll. A ferde hatásvonalú fogazat miatt axiális irányú erők ébrednek a tengelyen, amely miatt fontos a megfelelő csapágyak használata. Gyakran használják nagyteljesítményű hajtóművekben, illetve az autóiipari differenciálművek többségében is megtalálhatók. [15]

A kitérő tengelyek hajtásátvitelét csigahajtással lehet megvalósítani. A hajtásátvitel egy csiga és egy csigakerék között történik oly módon, hogy a hajtótengelyre szerelt csiga továbbítja a mozgást a csigakerékre. Fontos megjegyezni, hogy csigahajtást csak 90° -os tengelyszög esetén lehet alkalmazni. Elsősorban olyan helyeken alkalmazzák, ahol szükséges a nagy áttétel. A legtöbb esetben a csigahajtás önzáró tulajdonsággal rendelkezik, ami azt jelenti, hogy a hajtott tengely terhelés alatt sem tud visszafelé hajtani. Ennek köszönhetően biztonságkritikus hajtásoknál is alkalmazható, például felvonókban vagy emelőgépeknél. A fogazatok kialakítása alapján megkülönböztetünk hengeres, globoidos és kúpos csigahajtást. [14]

Hengeres csigahajtás esetén a csiga geometriája hengeres, nagyban hasonlít a menetprofilokra, míg a csigakerék ferde, ívelt fogazattal rendelkezik. A hajtás terhelhetőségét limitálja, hogy a csiga és csigakerék közötti kapcsolat szinte pontszerű, ezért viszonylag kisebb igénybevételeknek áll ellen. A csiga geometriájának köszönhetően egyszerűen és költséghatékonyan gyártható.

Globoidos csigahajtásnál a csiga geometriája nem hengeres, hanem homorú, vagyis a középső részén kisebb átmérőjű, mint a szélső részeken. Ez azért szükséges, hogy a fogkapcsolatok a fogak teljes szélességében megmaradjanak, ezáltal jobban elosztva az adott terhelést. Tehát a csökkentett felületi terhelés miatt nagyobb igénybevételek során is ellenálló tud maradni a hajtás. Természetesen a rendkívül speciális gyártástechnológiát igénylő geometria kialakítása nehéz, és költséges eljárás, ezért csak olyan helyeken alkalmazzák, ahol a sima hengeres csigahajtás nem elegendő. [14]

A kúpos csigahajtás, másnéven a hipoid fogaskerekeket az ívelt fogazású fogaskerekek egy speciális változata. A fogaskerékpár két ívelt fogazatú kúpkerékből áll, azonban azok tengelyei nem metszik egymást, hanem kitérnek egymás elől. A tengelyek helyzetéből adódóan a fogakon nem csak gördülés, hanem jelentős csúszás is fellép. Ennek következtében a nagyobb súrlódás miatt nagyobb a hőképződés. Elterjedt megoldás autóiiparban hátsó- és összkerék meghajtású járművek differenciálműveiben. [14]

3. Formula Studentben alkalmazott kormányrendszerek

A kategóriában a csapatoknak mérlegelést követően két választás közül kell dönteni a kormányzást illetően. Egy megvásárolható, biztosan működő rendszert alkalmaznak vagy egy egyedileg fejlesztett verziót hoznak létre. Ha egy csapat a vásárolt alkatrészek mellett dönt, az nem azt jelenti, hogy egy teljes mértékben kész rendszert kapnak, hiszen az autók méretéből adódóan sok alkatrészt kell módosítani. Ugyanakkor elérhetőek kifejezetten Formula Student kategóriához fejlesztett kormánystruktúrák, habár az esetek többségében ez csak magát a kormányművet tartalmazza. Tehát a megvásárolt alkatrész használatához ugyan úgy tervezni

kell alkatrészeket, akár egy egész kormányoszlopot is. Az alábbiakban bemutatom a jelenleg is megvásárolható kormányművek kínálatát, és azok fő paramétereit, tulajdonságait:

Az egyik legelterjedtebb Formula Student alkatrészeket kínáló vállalkozás az amerikai FSAEparts, melyet néhány helyi csapat alumín tagja alapított. Weboldalukon gyári, illetve általuk tervezett alkatrészeket értékesítenek kimondottan Formula Student csapatok számára. Néhány évvel ezelőtt közösen egy észak amerikai startup céggel, a NARRco-val közösen létrehoztak egy kormányművet. A cél egy könnyű, ám rendkívül strapabíró konstrukció létrehozás volt. A kormányművek méretmegadásánál általában az „eye to eye” távolságra szoktak hivatkozni a gyártók, mely a kormányművek két végén lévő bekötési pont geometriai távolsága. A weboldalon jelenleg három különböző változat érhető el: 289,56 mm, 365,76mm és 411,96mm-es csatlakozási távolsággal. A kormánygép áttételét illetően mindegyik verzió kérhető 87,9mm vagy 101,6 mm/fordulatra képes acél fogaskerékkel és fogaslécet. A kormánymű többi része mart alumínium alkatrészekből épül fel, melynek köszönhetően 499-680 gramm közt változik az egyes verziók tömege. [11]



29. ábra. NARRco kormánymű változatok⁸⁷

Az olasz Formula Seven vállalatot 2011-ben alapították, azzal a céllal, hogy kizárólag Formula Student-hez tervezett alkatrészeket forgalmazzanak. Nagy figyelmet fordítanak arra, hogy megbízható és minőségi termékeket áruljanak versenyképes árázással. Kormányművük hasonló kialakítású mint az általunk fejlesztett, vagyis egy ferde fogazású acél fogaskereket és fogaslécet alkalmaztak. A kormánymű háza pedig mart alumínium alkatrészekből és kompozit csövekből épül fel. Három különböző kivitelű változat érhető el, melyek: 400mm, 450mm és

⁸⁷ Arrabona Racing Team

500mm hosszúságúak. Az egyes változatok tömege 780, 870 és 940 gramm. A fogaskerék és fogasléc közti áttétel 80mm/fordulat. [12]



2. ábra. Formula Seven kormánymű⁸⁸

A Kaz Technologies egy amerikai mérnökiroda, mely adatelemzéssel és tervezéssel foglalkozik a motorsportban. Leginkább járműdinamikához kapcsolódó alkatrészekben végeznek méréseket és különféle tesztekkel, mellyel meg tudják állapítani az adott komponens legjobb működési tartományát. Emellett a megszerzett adatokat felhasználva tervezéssel is foglalkoznak. Formula Student kategóriához elsősorban rugós tagokat és kormányművet forgalmaznak. Az általuk kínált megoldás univerzálisan lett kialakítva, tehát akár meglévő futóművekhez is alkalmazható. Azáltal, hogy a kormánymű tengelye 3 részből van felépítve változtatható a tengely hossza, így könnyen hozzá lehet igazítani szinte bármelyik futómű kinematikához. A fogasléc és fogaskerék acélból készül és 120,65mm/fordulatú az áttétele. Kívül mart alumínium alkatrészekből épül fel a ház, melynek köszönhetően összesen 1360 gramm a szerkezet tömege. A gyártó forgalmaz még kiegészítő termékeket is, például gömbcsuklókat és mart villákat a kormányösszekötők csatlakoztatásához, illetve egyedi kérésre forgó jeladót is beszerelnek a kormányműbe. [13]



3. ábra. Kaz Technologies kormánymű⁸⁹

⁸⁸ Arrabona Racing Team

⁸⁹ Arrabona Racing Team

4. ART_11 kormányrendszerének bemutatása

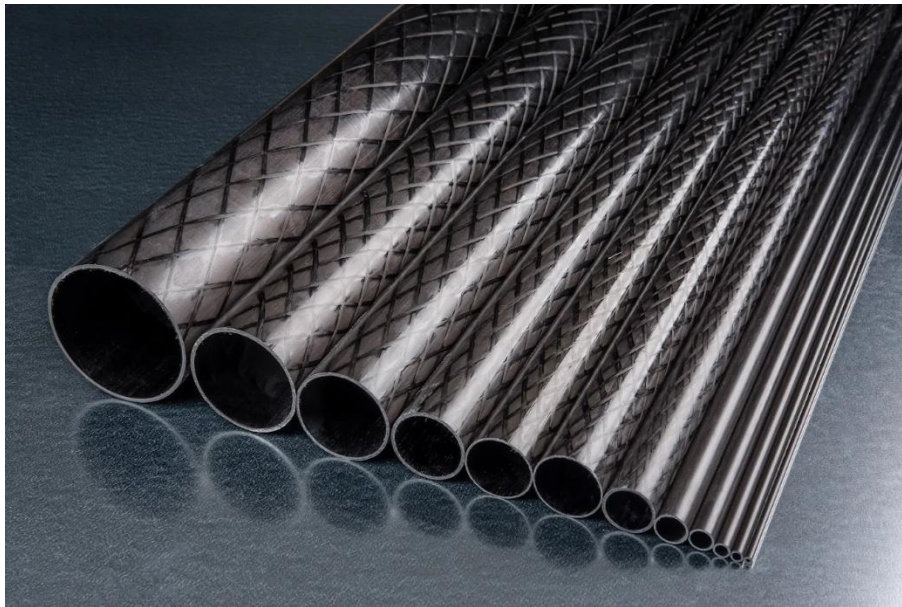
A csapat utolsó belsőégésű kategóriában versenyző és egyben a legsikeresebb autója az ART_11, amellyel 2024-ben versenyeztünk. Habár rendkívül sikeres és megbízható konstrukciónak bizonyult, az autóban így is volt néhány gyermekbetegség, melybe a kormányzás is bele tartozott. A kormányrendszert alapvetően 3 fő részegységre lehet bontani: a kormányműre, kormányoszlopra és magára a kormánykerékre. A személygépjárművekben ritkán előforduló, bár a motorsportban igen elterjedt megoldást alkalmaztuk mi is a kormányművünk megtervezésekor, hiszen egy fogasléces megoldást használtunk. A kormánymű közepén elhelyezett ferde fogazású fogaskerék összeköttetésben áll egy ferde fogazású fogasléccel, mely rögzítve van a kormánymű tengelyhez. A fogaskerék felső része úgy lett kialakítva, hogy egy bordás végződéssel csatlakozzon a kormányoszlophoz, ezáltal biztosítva a nyomatékátadást. A kormánymű tengely két végén elhelyezésre került egy-egy alumínium csapágyház, melyekben csúszócsapágyak biztosítják a tengely hosszirányú mozgását. A súlycsökkentés érdekében a mart fogaskerékház és a csapágyházak, szénszál erősítésű kompozit csövekkel lettek összekötve. A csöveket egy speciális ragasztási módszerrel kell rögzíteni, melyet a későbbiekben részletesen bemutatok. A tengely két végén elhelyezésre került két darab U-alakú csatlakozó elem, melyekhez a kormányösszekötő rudazatok csatlakoznak egy szférikus csapágy segítségével. A kormányoszlop feladata, hogy mechanikailag biztosítsa a nyomatékátadást a kormánymű és a kormánykerék között. Az autó tervezése során fontos szempont a pilóták ergonómiája. Ezt szem előtt tartva a kormány pozíciója úgy lett meghatározva, hogy az egy szinte függőleges pozícióban legyen. Ennek biztosítása érdekében a kormányoszlop 3 részegységre lett bontva és két kardáncsukló került beépítésre a szöghiba korrigálásának céljából. A kormányműhöz hasonlóan, a kormányoszlopnál is kompozit csöveket alkalmaztunk, az alkatrészek összekötésére. Emellett az egész kormányzás egyik legbonyolultabb alkatrésze is a kormányoszlophoz kapcsolódik, ez az úgynevezett “generatív” tervezésű kormányoszlop tartó konzol is nagymértékben hozzájárult a súlycsökkentéshez. Az új kormány tervezése szintén feladataim közé tartozott a csapatban. Alapvetően az előző geometriát használtam fel az új geometria tervezéséhez, mely leginkább abban módosult, hogy a kormány középső része szélesebb lett. Ez azért volt szükséges, hogy az új kormányelektronika elférjen a kormány belsejében. Tervezett fejlesztés volt még az ART_11-es autónknál egy elektromosan vezérelhető kuplungszerkezet, melyet egy a kormányra rögzített kar segítségével lehetett volna működésbe hozni. A kuplungszerkezet többi hardveres része azonban nem került beépítésre, ezért a kuplungkar tesztelésére nem került sor valós körülmények között.



4. ábra. ART_11 versenyautó⁹⁰

⁹⁰ Arrabona Racing Team

Csapatunkban már több éve bevált módszer a szénzál erősítésű kompozit csövek használata strukturális elemként. Leginkább a járműdinamikához köthető alkatrészeknél szoktuk alkalmazni (pl.: lengőkarok, kormányzás), illetve az aerodinamikai elemek rögzítésére is gyakran használjuk. Fontos megjegyezni, hogy ezek a kompozit csövek elsősorban rúdirányú és csavaró igénybevételnek állnak ellen, vagyis nyomó, hajlító és egyéb erőknek abszolút nem képesek ellenállni. Ezért használatuk során rendkívül óvatosnak kell lenni, hiszen egy kisebb, szemmel nem látható sérülés is okozhat a későbbiekben a repedéseket, töréseket. A csövek előkészítése úgy történik, hogy a nagyoló darabolást követően, egy hagyományos egyetemes esztergagépen puha tokmánypofák közé fogjuk a csöveket, és a kívánt méretre oldalazzuk. Ezt követően csiszolóvászonnal érdesítjük a csövek belső felületét annak érdekében, hogy a két komponensű ragasztóval megfelelő szilárdságú kötést hozzunk létre. Ragasztás előtt még az adott inzernek megfelelően, elhelyezzük a ragasztáshoz szükséges furatokat a kompozit csövek palástfelületein. Ez azért szükséges, mert a ragasztás során az inzeret behelyezzük a kompozit csőbe és a korábban elkészített furatokon juttatjuk be a ragasztót az inzer és a cső közé. Miután a ragasztás elkészült 120 °C fokon kell hőkezelní, mely a ragasztó térhálósodása miatt szükséges.



5. ábra. Szénzál erősítésű kompozit csövek⁹¹

5. Kormány szerkezet hibái

Mivel a kormány műben lévő ferde fogazású fogaskerék egy bordás végződéssel lett megtervezve, ezért nagymértékben nehezedett a gyártása. A csapat egyik támogatója sem vállalta az alkatrész egy darabból történő megmunkálását, ezért a korábbi években és az ART_11-es versenyautónál is két darabból lett elkészítve a fogaskerék. A bordázatot egy tengelyre elkészítették, majd fogazógépen készült hozzá egy ferde fogazású gyűrű. A két alkatrészt egymáshoz hegesztve pedig el is készült maga a fogaskerék. Azonban a gyűrű és a tengely között sajnos nem volt semmilyen alakzáró kötés, mely megakadályozhatta volna a két gépelem radiális elmozdulását. Ennek következtében a hegesztés során kialakuló nagy hőmérséklet hatására a két alkatrész egymáshoz viszonyított pozíciója elmozdult. Vagyis a

⁹¹ Arrabona Racing Team

fogaztatban és a bordázatban kialakult egy szögeltérés. Emiatt a kormány szerkezet mozgását tekintve nem volt szimmetrikus, mivel az egyik irányban néhány fokkal többet fordult a kormány. Illetve a kormánymű középállásában nem volt középen a kormány, de szerencsére ezt a kormányoszlop ragasztásakor ki lehetett küszöbölni az inzeretek elforgatásával.



6. ábra. Fogaskerék a hegesztést követően⁹²

A kormányműben használt siklócsapágyak rögzítésére egyszerű rögzítő gyűrűk kerültek beépítésre, melyek megfelelően rögzítették a csapágyakat a csapágyházakban. Azonban hamar bebizonyosodott, hogy a gyűrűk használata nagy mértékben befolyásolta a rendszer szerelhetőségét. Amikor javítás vagy karbantartás miatt szét kellett szedni az alkatrészeket, akkor a gyűrűk eltávolítása vette igénybe a legtöbb időt, hiszen semmilyen hagyományos szerszámmal nem lehetett megfelelően hozzáférni az alkatrészekhez.

A csúszó csapágyak megfelelő működéséhez szükséges kenőanyagot alkalmazni, melynek következtében a csapágyak környezete gyakran zsírossá és csúszóssá válik a kenőzsírtól. Természetesen ez sem könnyítette meg a gyűrűk eltávolításának folyamatát, mert a felesleges kenőanyag a gyűrűknek kialakított horonyban gyűlt össze.



7. ábra. Csapágyház rögzítőgyűrűvel⁹³

⁹² Arrabona Racing Team

⁹³ Arrabona Racing Team

6. ART_12 Kormányrendszere

A csapat első elektromos autója az ART_12 tervezésénél a komplett hajtáslánc csere miatt, nagyobb tervezési szabadságot kapott a járműdinamika részleg is. A fő irányelvek a tervezés során a minél alacsonyabb súlypont és a lehető legelőnyösebb futóműkinematika kialakítása volt. Az új koncepciónak köszönhető tervezési szabadságot kihasználva, a csapat úgy döntött, hogy a futómű kinematika mindenképp meg lesz változtatva egy új tervezési irányelv alapján. Az előző, jól működő kettős keresztlengőkaros futómű további alkalmazása mellett szólt, hogy ez a rendszer a legideálisabb pályaversenyzésre. Ez annak köszönhető, hogy a geometriai kialakítás nagy teret biztosít az aerodinamikai elemek előtti szabad légáramlásnak, ezzel elérve, hogy megfelelő nagyságú leszorító erő jöjjön létre. Továbbá versenyautóknál nagy figyelmet kell fordítani a tömegközéppont minél alacsonyabban tartására is, melyet szintén ezzel a futómű kialakítással lehet a legjobban optimalizálni. A kettős keresztlengőkaros futómű kialakítását tekintve két konstrukciót lehet megkülönböztetni: a nyomó és a vonórudas elrendezést. Elnevezések a rugóstagok aktuálásából származnak, működési elvek pedig mindkét esetben azonosak. A kerék függőleges mozgását a nyomó és vonórudas továbbítják a rugóstagra, ahol megtörténik az erő csillapítása. A rudak általában nem közvetlenül továbbítják a felvett erőt, hanem gyakran egy himbán keresztül vannak összekötve a rugóstaggal. Ez elősegíti a komponensek kompaktabb elhelyezését, az autó súlypontjának csökkentését, illetve a már említett aerodinamikai előnyök szempontjából is fontos. Az ART_11 versenyautónál elől és hátul is egy nyomórudas rendszer volt alkalmazva. Az utód esetében a tervezési irányelvek és optimális geometria érdekében elől egy vonórudas konstrukció került kialakításra, hátul pedig megmaradt a nyomórudas verzió. A vonórudas szerkezetnek köszönhetően az első rugóstagokat be lehetett építeni az önhordó karosszéria aljára, közvetlenül a pilóta lába alá. Ezzel nagymértékben csökkent a tömegközéppont magassága, amely pozitívan befolyásolja az autó futóművének működését. Természetesen a futómű kinematikai változásai kihatással voltak a kormányzásra is. A kormánymű korábbi pozíciójában, a pilótáknak nagy erőt kellett kifejtenie a kormányzáshoz, amely hozzájárult a kimerültségükhöz. Ezért az új kormányrendszerrel mindenképp azt szerettem volna elérni, hogy könnyebben lehessen irányítani az autó mozgását. Illetve a korábban említett vonórudas futómű elhelyezés következtében a kormánymű nem fért volna el korábbi helyzetében. Megoldásként a kormánymű pozícióját úgy módosítottam, hogy az az első tengelyek előtt helyezkedjen el. Ezzel kinematikából adódóan csökkentve a kanyarodáshoz kifejtendő forgatónyomaték nagyságát, és teret biztosítva a karosszéria alján elhelyezett többi futómű komponens számára.



8. ábra. ART_12 kormányrendszere modelltérben⁹⁴

⁹⁴ Arrabona Racing Team

7. Korábbi problémák megoldása

A korábban említett gyártástechnológiai probléma miatt a fogaskerékben egy szögtorzulás lépett fel, amely következtében nem volt szimmetrikus a kormánymű mozgása. Annak érdekében, hogy a fogaskereket egy darabból le lehessen gyártani a következő módosításokat végeztem el. Meghosszabbítottam a bordás végződést, melynek következtében egy szabványos bordás végződést tudtam kialakítani a felületen, egy megfelelő kifuttatással. A bordázatot a MSZ14480 szabvány alapján készítettem.



9. ábra. Módosított ferde fogazású fogaskerék⁹⁵

Ezen probléma megoldására egy igen egyszerű megoldás született: a jelenlegi rögzítő gyűrűket lecseréltem szabványos seeger gyűrűkre. Természetesen ehhez újra kellett terveznem a korábban használt csapágházakat.



300. ábra. Seeger gyűrű a csapágházban⁹⁶

⁹⁵ Arrabona Racing Team

⁹⁶ Arrabona Racing Team

8. Validáció

A versenyen való részvételhez bizonyítanunk kellett, hogy a kormányoszlop valóban kibírja az ott fellépő terheléseket. Ehhez elvégeztük a szükséges méréseket, és kiszámoltam mekkora erő ébred a komponensekben. A legnagyobb erőhatások álló helyzetben történő kormányzás esetén lépnek fel. Itt két esetet is megvizsgáltam: hagyományos aljzatbetonon 12,5 Nm, gumipadlón pedig 16,9 Nm forgatónyomaték volt szükséges a kormány elfordításához. Ezt egy digitális kijelzővel rendelkező nyomatókulccsal mértem, melyet egy egyedi adapterrel hozzá csatlakoztattam a kormányoszlopon található gyorscsatlakozóhoz.

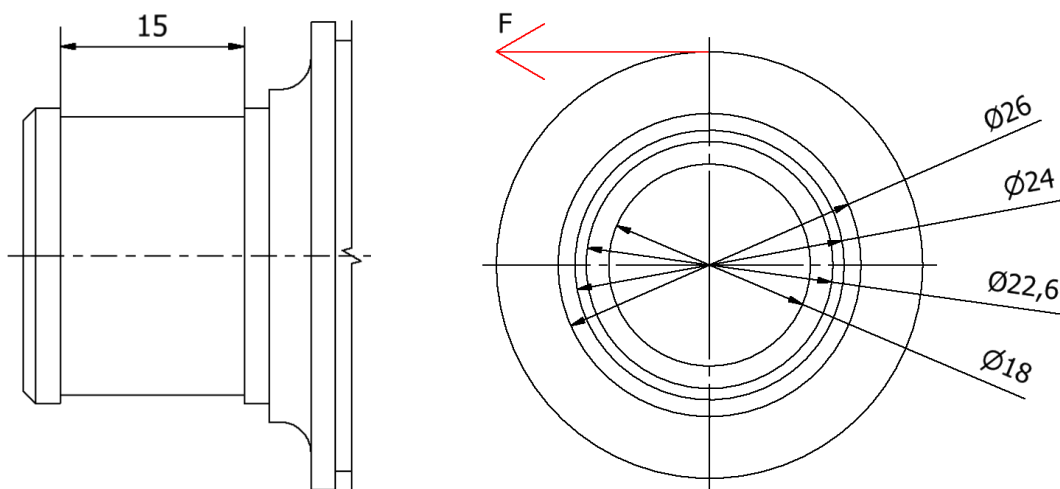
Legnagyobb nyíróerő a legkisebb átmérőn fog ébredni, hiszen annak a legkisebb a ragasztási felülete. A legrosszabb esetet figyelembe véve a legnagyobb mérési értékkel számoltam az alábbiakban:

$$M_{cs} = 16,9 \text{ Nm} \leftarrow \text{mérésből}$$

$$M_{cs} = F * \frac{d}{2} \rightarrow F = \frac{2 * M_{cs}}{d} = \frac{2 * 16,9 \text{ Nm}}{0,024 \text{ m}} = 1408,33 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{1408,33 \text{ N}}{1097,99 \text{ mm}^2} = 1,28 \text{ MPa}$$

$$A = d * \pi * h = \frac{(24 + 22,6)}{2} \text{ mm} * 3,1416 * 15 \text{ mm} = 1097,99 \text{ mm}^2$$



311. ábra. Geometriai méretek a számoláshoz⁹⁷

A számolásokat követően már csak össze kellett hasonlítani a rendszerben ébredő maximális nyírófeszültség értékét az általunk használt ragasztó nyírófeszültségével szemben. A ragasztót 120°-on hőkezelve érhető el a maximális kötés, mely esetünkben a 60 perces ciklusnak köszönhetően 24 MPa. Az általunk kiszámolt érték ennél jóval kisebb, csupán 1,28 MPa, tehát a ragasztó alkalmazható a rendszerben.

⁹⁷ Arrabona Racing Team

9. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] K. Kim, H. Guan, B. Wang, R. Guo, F. Liang: Active steering control strategy for articulated vehicles, *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 17(6), 2016, pp. 576-586
- [2] Kádár Lehel, Dr. Varga Ferenc, Kőfalusi Pál: *Közúti Járműrendszerek szerkezetana*, BME MOGI, 2014
- [3] Manfred Harrer, Peter Pfeffer: *Steering Handbook*, Springer International Publishing Switzerland, 2017, 565
- [4] M. Veneri & M. Massaro: *The effect of Ackermann steering on the performance of race cars*, Padova, 2020
- [5] Reza N. Jazar: *Vehicle Dynamics: Theory and Application*, Springer Cham, Springer International Publishing AG, New York, 2017
- [6] Michael Trzesniowski: *Rennwagentchnik*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014
- [7] Giancarlo Genta, Lorenzo Morello: *The Automotive Chassis*, Springer Cham, Springer Nature, Switzerland, Second Edition, 2020, 633
- [8] Macher Zoltán: *3500 kilogramm feletti összgördülő súlyú gépjárművek kormányberendezései*, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest, 2008, 35
- [9] Sipos Bence: *Fogasléc és kúpfogaskerék kapcsolódásának lehetőségei*, *Műszaki Szemle*, 2022
- [10] Bodzás Sándor: *Hengeres fogaskerékajtások tervezése és elemzése egyenes fogiránnyal*, *Debreceni Szemle*, 27 (4), 2019, pp. 391-404.
- [11] Simon Vilmos: *Hajtástechnika*, Akadémiai kiadó, Budapest, 2019
- [12] Adatgyűjtés a piacon kapható kormányművekről: FSAE Parts, FSAE Parts hivatalos honlapja, 2025.11.11., <https://fsaeparts.com/products/narrco-racks?variant=15279234220075>
- [13] Adatgyűjtés a piacon kapható kormányművekről: Kaz Technologies, Kaz Technologies hivatalos honlapja, 2025.11.11., <https://www.kaztechnologies.com/steering-rack>

- [14] Adatgyűjtés a piacon kapható kormányművekről: Formula Seven, Formula Seven hivatalos honlapja, 2025.11.12., <https://www.formula-seven.com/shop-products/formula-sae-pro-steering-rack/>
- [15] PrinceFibre, PrinceFibre hivatalos honlapja, 2025.11.14., <https://princefibre.com/en/>

Formula Student versenyautó gázpedáljának tervezése és gyártása

Design and manufacturing of a Formula Student race car accelerator pedal

Ovajka Gergely László

Szécheny István Egyetem
gergely.ovajka@arrabonaracing.hu

Absztrakt: A dolgozat a Széchenyi István Egyetem Formula Student versenycsapatának, az Arrabona Racing Team legújabb versenyautójához fejlesztett gázpedál-összeállítás tervezési és gyártási folyamatát mutatja be. A bevezető rész áttekintést nyújt a Formula Student versenysorozatról, annak célkitűzéseiről, versenyszámairól és értékelési rendszeréről. Ezt követően az Arrabona Racing Team történetének, szervezeti felépítésének és fejlesztési folyamatainak bemutatása szolgál a projekt szakmai háttéréül. A gázpedál-fejlesztés során különös hangsúlyt kapott a korábbi generációk konstrukcióinak elemzése, a választott tervezési szempontok és szabályozási megkötések vizsgálata. Az elemzés rávilágít az előző megoldások előnyeire és hiányosságaira, valamint arra, hogy a Formula Student szabályzat milyen követelményeket támaszt a gázpedál szerkezeti kialakításával kapcsolatban. Az új, már elektromos hajtásrendszerhez fejlesztett gyorsítópédál koncepciója alapjaiban különbözik a korábbi konstrukcióktól. A mechanikai rendszer átdolgozásával cél volt a pedál visszatérítő mechanizmusának pontosítása, az összeállítás merevítése és stabilizálása, valamint a kezelhetőség és megbízhatóság javítása. Míg egyes, egyedi tervezésű alumínium alkatrészek megmunkáló cégeknél készültek, addig a karbon alkatrészek gyártása teljes mértékben házon belül valósult meg, kompozit gyártástechnológiák alkalmazásával. A kutatás eredményeként elkészült prototípus működési tapasztalatai, az észlelt hibák és a továbbfejlesztési javaslatok szintén bemutatásra kerülnek, amelyek hozzájárulnak a Formula Student járműfejlesztés folyamatának optimalizálásához és a versenyautó kezelhetőségének további javításához.

Kulcsszavak: Gázpedál, Arrabona Racing Team, Formula Student

Abstract: The thesis presents the design and manufacturing process of the accelerator pedal assembly developed for the latest race car of the Arrabona Racing Team, the Formula Student team of Széchenyi István University. The introductory section provides an overview of the Formula Student competition series, its objectives, event structure, and scoring system. This is followed by a presentation of the history, organisational structure, and development processes of the Arrabona Racing Team, serving as the professional background for the project. During the accelerator pedal development, special emphasis was placed on analysing the designs of previous generations, as well as evaluating the selected design considerations and regulatory constraints. The analysis highlights the advantages and shortcomings of earlier solutions, and examines the requirements imposed by the Formula Student rulebook regarding the structural design of the accelerator pedal. The concept of the new accelerator pedal, developed for an electric powertrain, fundamentally differs from previous constructions. By redesigning the mechanical system, the aim was to refine the pedal return mechanism, increase the assembly's rigidity and stability, and improve operability and reliability. While certain custom-designed aluminium components were manufactured by machining companies, the carbon components were produced entirely in-house using composite manufacturing technologies. The results of the research include the operational experience gained with the completed prototype, the observed issues, and the proposed improvements, all of which contribute to optimising the Formula Student vehicle development process and further enhancing the drivability of the race car.

Keywords: Accelerator pedal, Arrabona Racing Team, Formula Student

1. Bevezetés

A Formula Student az egész világon elterjedt, egyetemek között zajló, forma autó tervezéséről és építéséről szóló, hallgatói versenysorozat. Itt a hallgatók az eddig megszerzett tudásuk és hosszas kitartó kutatásaik alapján megterveznek és megépítenek egy versenyautót, amelynek tervezési folyamatát egy szakmai zsűri előtt ismertetik. Ezt követően a csapatok fizikailag is összemérik autóikat saját kategóriájukban, különböző versenyszámokban, legyen az adott autó belső égésű vagy villamos hajtáslánccal szerelt.

A győri egyetemen működő Arrabona Racing Team Magyarország egyik legismertebb Formula Student csapata, amelynek én is tagja vagyok 2022 szeptembere óta. Részlegem, a Járműdinamika részleg a versenyautó fékrendszerével, futómű- és kormányrendszerével, a villamos hajtás bevezetésével pedig már a bolygóműves hajtásrendszerrel is foglalkozik. Emellett a pedálszerkezetek fejlesztése is a feladataink közé tartozik.

A 2024/25-ös szezonban a csapaton belül az én feladatom volt a gyorsítópédál (a továbbiakban: gázpedál) újratervezése és optimalizálása. Ennek eredményeként a dolgozat az ART_12 versenyautó gázpedáljának tervezési és gyártási folyamatát mutatja be.

2. Formula Student bemutatása

A Formula Student (FS) egy nemzetközi versenysorozat, amelyben egyetemek és főiskolák hallgatói egy formaautó-stílusú prototípus versenyautót terveznek és építenek. A csapatok ezt követően különböző statikus és dinamikus versenyszámokban mérhetik össze tudásukat és munkájukat.

A Formula Student célja, hogy a hallgatók már egyetemi vagy főiskolai éveik alatt is valós autóiipari tapasztalatot szerezzenek, és fejlesszék komplex, mérnöki gondolkodásmódjukat. A versenysorozat lehetőséget ad arra, hogy kipróbálják magukat az autót alkotó elemek tervezésében, fejlesztésében, valamint az elkészült jármű szakmai bemutatásában is.

A fejlesztések egész évben folyamatosan zajlanak, azonban a fő tervezési időszak szeptembertől decemberig tart. Ezt követően, a gyártói partnerek bevonásával megkezdődik az alkatrészek gyártása. A versenyautó általában május végére készül el, majd júniusban kezdődik a tesztelési időszak. A versenyszezon júliusban és augusztusban zajlik.

3. Formula Student történelme

⁹⁸Az első Formula Student-hez köthető esemény 1979-ben zajlott „Mini-Indy” néven, majd a sorozat első versenyszezonja 1981-ben került megrendezésre Amerikában, a „Society of Automotive” szervezésében, Formula SAE néven. Az első európai változat 1998-ban jelent meg Nagy-Britanniában, ekkor már Formula Student néven. [1]



32. ábra. A Birmingham University autója 1998-ban [1]

Ezt követően számos európai országban, például Németországban, Olaszországban és 2010 óta Magyarországon is megrendezésre kerül, és mára a világ egyik legnagyobb egyetemi mérnöki versenysorozatává nőtte ki magát.

4. Versenyek felépítése

A versenyek 5–6 napos rendezvények, ahol a csapatok statikus és dinamikus versenyszámokban vesznek részt. Legfeljebb hat pilóta indulhat, de ehhez mindenkinek teljesítenie kell az Egress Testet, amely során teljes rögzítésből 5 másodpercen belül el kell hagyni az autót, mindkét lábbal a földön megállva.

A dinamikus számok előtt az autóknak át kell menniük a gépátvételen. Itt a bírálók a több mint 130 oldalas szabálykönyv alapján részletesen ellenőrzik a jármű biztonsági, méretbeli és technikai követelményeinek teljesülését, valamint az erőátvitelre, futóműre, aerodinamikai elemekre és a versenyszámokra vonatkozó előírásokat. Ha hibát találnak, a csapatnak javítania kell, és csak sikeres ellenőrzés után folytathatja a vizsgálati folyamatot.

4.1 Statikus versenyszámok

Ezek a versenyszámok főként az egész éves belefektetett munka és a mérnöki gondolkodásmód bemutatásáról szólnak. Minden versenyen három statikus versenyszámban kell részt venni és ezeken angol nyelven prezentálni.

- Business Plan Presentation: A csapat két tagja egy elképzelt üzleti tervet mutat be az autóhoz vagy annak koncepciójához kapcsolódva.
- Cost and Manufacturing Event: Be kell mutatni az autó összes gyártási és költségdokumentációját, valamint néhány kiemelt alkatrész részletes elemzését. Ismertetni kell a gyártási és összeszerelési folyamatokat, az ezekhez szükséges erőforrásokat és a költségvonzatokat. Itt jelennek meg a gyártási rajzok, valamint a

⁹⁸ <https://www.racecar-engineering.com/news/formula-student-1998-the-first-ever-competition/>

költséghatékonyságot vagy környezeti szempontokat támogató konstrukciós megoldások.

- ⁹⁹Engineering Design Event: Az autó körül állva be kell mutatni a bíráló csoportnak annak minden részletét, meg kell indokolni minden konstrukciós döntést, valamint a kapott kérdésekre a lehető legjobb válaszokat adni.

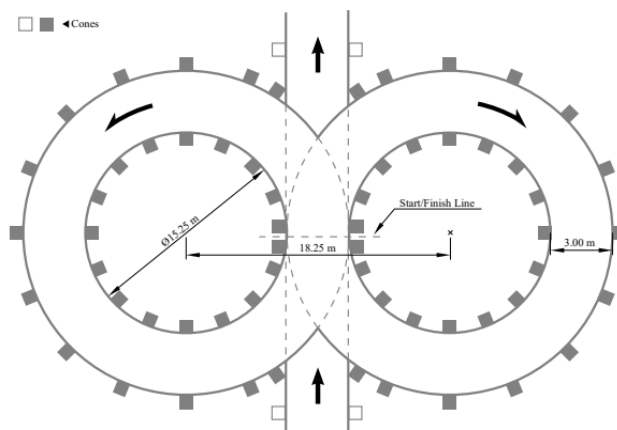


33. ábra. Engineering Design Event, 2024 FS Alpe Adria [2]

4.2 Dinamikus versenyszámok

A dinamikus versenyszámokhoz minimum négy pilóta szükséges, ahol minden pilóta két versenyszámban mérheti össze vezetési tudását. Egy versenyszámban két pilóta vehet részt, és minden pilóta két lehetőséget kap arra, hogy megfussa a legjobb idejét.

- Acceleration: Ebben a versenyszámban az autóval egy legalább 3 méter széles és 75 méter hosszú egyenes szakaszon kell a lehető legrövidebb idő alatt végig haladni.
- ¹⁰⁰Skid pad: A versenyszám során az autónak két koncentrikus körpárból kialakított, nyolcas alakú pályát kell teljesítenie. A körpárok középpontjának távolsága 18,25 méter, a pálya szélessége 3 méter, így az ívek részben egymásba nyílnak. A körök találkozásánál a pálya nyitott, ezeken a pontokon hajt be és hajt ki az autó.



34. ábra: Formula Student skidpad pályarajz [3]

⁹⁹ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

¹⁰⁰ F.S.Germany „Formula Student Rules” 2026

https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2026/rules/FS-Rules_2026_v1.0.pdf

- Autocross: Ennél a versenyszámnál az autónak egy legalább 3 méter széles és közel 1 kilométer hosszú pályát kell a lehető legrövidebb idő alatt teljesítenie. A versenyszám alatt a pályán egyszerre csak egy versenyautó tartózkodhat.
- Endurance: A legfontosabb és legtöbb pontot érő dinamikus versenyszám, ahol az autó 22 km-t teljesít két pilótával, kötelező félidei pilótacserével. A pálya nagyrészt megegyezik az Autocross vonalvezetésével, és az Endurance rajtsorrendje is az Autocross eredménye alapján alakul. A futam a rendezvény utolsó napján zajlik, amelynek végén a kategóriák (CV/EV) legjobb három csapata vesz részt a döntőben.
- Efficiency: Az Endurance-t teljesítő autók energiahatékonyságát értékelik: azt vizsgálják, milyen energiafelhasználással teljesítették a távot, így nemcsak a gyorsaság, hanem a hatékonyság is fontos.

5. Arrabona Racing Team bemutatása

Az Arrabona Racing Team (ART) 2014-ben alakult a Széchenyi István Egyetemen, mintegy tízfős hallgatói csapatként. Már az első évben jelentős sikert értek el: megnyerték a Formula Student Russia versenyt, amellyel gyorsan ismertté váltak a nemzetközi mezőnyben. A kezdetekben főként gépész- és járműmérnök hallgatók alkották a csapatot.

A későbbi években az ART több kiemelkedő eredményt is elért. A 2022-es szezon versenyautója, az ART_09, három rangos versenyen is dobogóra állt:

- Formula Student Austria – 2. hely
- Formula Student East – 3. hely
- Formula Student Germany – 2. hely

Hasonlóan sikeres volt a 2024-es szezonban versenyző ART_11, amely az alábbi eredményeket érte el:

- Formula Student Austria – 3. hely
- Formula Student East – 1. hely
- Formula Student Alpe Adria – 7. hely

A csapat 2024 óta az Electric Vehicle (EV) kategóriában indul, és jelenleg az ART_13, a csapat második elektromos hajtású autójának fejlesztése zajlik.

6. Irodalomkutatás

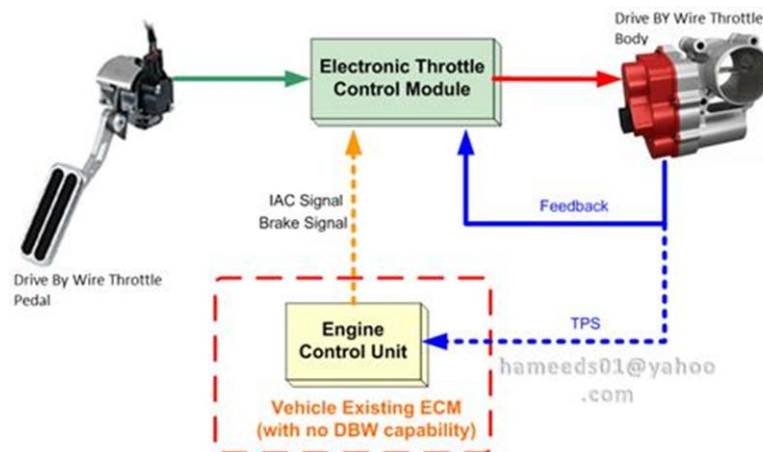
A járművek hajtásrendszerének egyik alapvető kezelőszerve a gázpedál, amely a belső égésű motor teljesítményét szabályozza, az üzemanyag–levegő keverék mennyiségének módosításával. A gázadás módja az autóipar története során több jelentős technikai fejlesztésen ment keresztül, a közvetlen mechanikus rudazattól egészen az elektronikus vezérlésig. Az alábbiakban a legfontosabb megoldások kerülnek bemutatásra.

6.1 Hétköznapi gázpedáltípusok

Az 1900-as évek elején a kézi gáz használata volt elterjedve, viszont az 1930-as években elterjedt a lábbal működtethető gázpedál, amely rudazatokon és karokon keresztül mozgatta a fojtószelepet. A lábbal adagolható gáz finomabb és pontosabb teljesítményszabályozást tett lehetővé, így a jármű irányítása biztonságosabbá és kényelmesebbé vált.

Az 1960-as évektől elterjedt a bowdenes gázpedál, ahol a pedál és a fojtószelep kapcsolatát egy acél huzal és bowden tok biztosította. Ez a megoldás egyszerűbb, olcsóbb és megbízhatóbb volt a korábbi rudazatos rendszereknél, ezért a 20. század végéig szinte minden járműben alkalmazták – karburátoros és befecskendezéses motoroknál egyaránt. [10]

¹⁰¹Az 1990-es évek végétől az autóiipar áttért az elektronikus, „drive-by-wire” gázpedálokra, amelyeket elsősorban a vezetéstámogató rendszerek megjelenése és a szigorodó emissziós előírások tettek szükségessé [5]. Ezeknél a rendszereknél megszűnik a mechanikus kapcsolat: a pedál elmozdulását érzékelők mérik, a jelet pedig a vezérlőegység dolgozza fel, amely elektromos motoron keresztül állítja a fojtószelepet. A biztonság érdekében a megoldás kettős jeladókat és redundáns védelemi rendszereket igényel.



35. ábra. Elektromos gázpedál működési diagram [4]

A versenysportban a gázpedál-megoldások mindig az adott kor technikai színvonalát követték, így ma már szinte kizárólag elektronikus, „drive-by-wire” rendszereket alkalmaznak. Kivételt a költséghatékony alapversenyezés, például a gokart képez, ahol továbbra is karburátoros, bowdenes megoldások a jellemzők. A szimulátoros pedálok esetében szintén elektronikus jeladók működnek, amelyekhez a gyártók állítható paramétereket (pl. nonlinearitás, deadzone) biztosítanak; a mechanikai ellenállás pedig rugók vagy alkatrészek cseréjével változtatható. Ezek a megoldások inspirálták a jelen fejlesztés tervezési folyamatát is.

6.2 ART versenyautó gázpedál evolúció

Az ART versenyautói hét éven keresztül bowden-kábeles gázpedál-megoldást alkalmaztak, amely ebben az időszakban egyszerűsége, megbízhatósága és alacsony karbantartásigénye miatt megfelelő választásnak bizonyult. Az ART_08 volt az első olyan jármű, amelynél a csapat elektronikus vezérlésű gázpedált és elektromos pillangószelepet integrált. Az átállás jelentős előrelépést eredményezett: javult a motorvezérlés pontossága, a gázreakció és a kezelhetőség, valamint lehetővé vált különböző vezetéstámogató funkciók alkalmazása. A pedál jelátvitelét kezdetben lineáris potenciométer biztosította, majd a csapat fokozatosan áttért a forgó potenciométer alkalmazására, amely stabilabb, nagyobb pontosságú és zajmentesebb jeladást tett lehetővé.

6.3 Gázpedállal kapcsolatos szabályok

- Csak lábpedál lehet
- Legalább két szenzort kell használni, a házuk lehet közös

¹⁰¹ <https://premierautotrade.com.au/news/electronic-throttle-bodies-tbo.php>

- Százalékos értékkel kell meghatározni a gázpedál állás, ahol 0% a teljesen elengedett, 100% pedig a teljesen lenyomott pozíció
- 0% ban 0 Nm kell legyen a keréknyomaték
- A pedál visszatérítését 2 rugó kell biztosítsa, de egyesével is kell működjenek

6.4 Gázpedál összeállításának tervezése

Az ART_12 gázpedáljának fejlesztése az előző évek során tapasztalt szerkezeti hiányosságok és vezethetőségi problémák megoldására irányult. A korábbi konstrukciók több ponton kompromisszumot igényeltek: a pedál csavarodásra és kihajlásra hajlamos volt, a rugómechanika bonyolult és tartóssági szempontból megbízhatatlan volt, a pedálút pedig túl hosszú, ami rontotta a vezetési komfortot és a jelátvitel pontosságát.

A gázpedál-rendszer első nagyobb konstrukciós változtatása az ART_08 járműnél jelent meg, amikor a csapat a mechanikus fojtószelep helyett elektromos pillangószelepre váltott. Ezzel együtt bevezetésre került az elektronikus gázpedál, amely mart 7075-T6 alumínium konzollal, generatív tervezésű és 3D-nyomtatással készült pedáltesttel, illetve spirálrugós rugóházzal működött. Bár a megoldás alacsony tömeget eredményezett, számos problémát mutatott: a generatív design kis keresztmetszetű elemei terhelés alatt csavarodtak, a spirálrugós rugóház fáradásos igénybevétel miatt törékenynek bizonyult, a hosszú pedálút (~86 mm) pedig vezethetőségi szempontból nem volt ideális. [6]

Ezek a tapasztalatok egyértelműen kijelölték az ART_12 fejlesztési irányait. A cél egy strapabíróbb, merevebb, pontosabb és ergonomikusabb konstrukció létrehozása volt, amely stabil jelátvitelt és jól szabályozható pedálérzetet biztosít. A fejlesztés részeként a korábbi, dupla házas jeladót két különálló szenzor váltotta fel, mivel a dupla egység csak egyedi gyártással lett volna elérhető. A két külön jeladó alkalmazása miatt a pedál elfordulása 18°-ra, a pedálút pedig ~60 mm-re lett korlátozva, ami a pilóták visszajelzése alapján kényelmes és jól adagolható működést biztosít.[7]

Az új konstrukció fő céljai a következők voltak:

- a pedál merevségének növelése, a csavarodás és deformáció minimalizálása;
- a pedálgeometria finomítása a jobb vezethetőség érdekében;
- egyszerűbb, megbízhatóbb és állítható rugómechanika kialakítása;
- stabilabb jelátvitel, a szenzorok zavartalan működésének biztosításával;
- költségkímélőbb szenzorkialakítás, két külön RFD-4000 jeladó alkalmazásával;
- optimális pedálút és elfordulás meghatározása (18° / ~60 mm);
- a teljes rendszer vezethetőségének javítása a pilóták visszajelzéseire támaszkodva.

Összességében az ART_12 pedálfejlesztése egy olyan konstrukciót eredményezett, amely a korábbi évek mechanikai, ergonómiai és megbízhatósági problémáit egy új, modern, versenyképes megoldással váltotta fel.

6.5 Különböző verziók

A rugómechanika meghatározása alapvető tervezési lépés volt, mert ez határozta meg a pedál teljes konstrukcióját. A korábban használt rugók erőadatai nem voltak ismertek, ezért mérleggel mérést végeztünk: 15 mm összenyomásnál ~45 N erő adódott, így a rugóállandó 3 N/mm, két rugó esetén pedig 6 N/mm volt. A spirálrugók mérete csak korlátozottan növelhető, és a keresett alternatívák nem kínáltak érdemi javulást, ezért a teljes egység áttervezése nélkül nem lett volna elérhető megfelelő pedálerő. [9]

A megoldást a torziós rugóra való áttérés jelentette, amely egyszerűbb, kompaktabb és megbízhatóbb kialakítást tett lehetővé. Ehhez a pedál teljes geometriáját újra kellett tervezni, módosítani kellett a konzolt, a pedáltengelyt és a siklócsapágyazást, valamint új végütköző-megoldást kellett kialakítani. Az új konstrukció gyakorlatilag teljesen „tisztá lapról” indulva készült el, a megfelelő rugóerő és szerkezeti merevség biztosítását szem előtt tartva.

A kutatás során sikerült egy olyan torziós rugót találni, amely a pedálhoz szükséges rugóerőt biztosította. Főbb paraméterei: 3 mm huzalátmérő, 14 mm belső átmérő, 12 mm szélesség, 4,25 menet, 90°-os lábpozíció, 58° működési tartomány és 57 Nmm/° rugóállandó.[11]

A fejlesztés első változatában (V1) a rugók elrendezése aszimmetrikus volt, azonban ebben a fázisban még nem létezett működő pedál–tengely kapcsolat, így a koncepció nem volt használható. Kezdetben mart alumínium pedálestet terveztem, amelyhez külső rugóakasztó kart vagy csavart kapcsoltam volna, de ez gyártási, rögzítési és biztonsági szempontból sem bizonyult megfelelő megoldásnak. A rugók stabil és biztonságos elhelyezését végül a pedálest belsejében lehetett a legjobban megoldani.

A fém pedálest ötletét tömeg- és gyárthatósági okok miatt végül elvetettük. Ehelyett egy karbon kompozitból laminált „U” profil bizonyult ideálisnak: merev, könnyű, kis kihajlást mutat, és két törzslapja között a rugók biztonságosan elhelyezhetők. Bár pontos tömegadat nem készült, a karbonválasztás jelentős tömegelőnyt eredményezett.

A fejlesztési folyamat rámutatott, hogy a megfelelő rugó kiválasztása csak az egyik tervezési feladat: ugyanolyan fontos volt a rugók elrendezése, a biztonságos rögzítés, a gyárthatóság és az egész összeállítás tömegoptimalizálása is.

A második verzióban (V2) már a karbon pedálest került alkalmazásra, amelyre a fejlesztés további lépései épültek. A pedálnyomaték átvitelét egy négyszög keresztmetszetű tengely biztosítja, amely alakzáró illeszkedéssel csatlakozik a pedálhoz. A tartósság növelésére a pedálest belsejébe mart alumínium betét került, amely nagyobb felületen fekszik fel a tengelyen, csökkentve a feszültségcsúcsokat és stabilabb oldalirányú pozicionálást biztosít.

A pedál végütközőjét ezúttal nem a pedálestre, hanem a tengely elfordulási tartományára alapoztam. A konzol oldalfalán kialakított köríves pálya határozza meg a tengely maximális elfordulását, amely egyszerű, megbízható és a siklócsapággal jól együttműködő megoldást eredményezett.

A második pedálverzióban (V2) már a karbon pedálest szolgált alapként. A nyomatékátvitel egy négyszög keresztmetszetű tengellyel valósult meg, amely alakzáró kapcsolattal illeszkedik a pedálhoz. A tartósság növelésére a pedálestbe egy mart alumínium betét került, amely nagyobb felületen támaszkodik a tengelyre, csökkentve a feszültségcsúcsokat és stabilabb oldalirányú vezetést biztosít.

A pedál ütközését nem a pedálesten, hanem a tengely elfordulási tartományán keresztül határoztam meg. A konzol oldalfalára tervezett köríves ütközőpálya egyszerű és megbízható megoldást adott, a siklócsapággal együtt pedig pontos és sima pedálmozgást biztosított.

A forgó potenciométer legpontosabb működése érdekében a mágneses jeladókat közvetlenül a pedáltengelyre kellett rögzíteni. Ehhez két darab mart alumínium tartóelemet terveztem,

amelyeket átmenő csavar rögzít a tengely két oldalán. A jeladó mindössze ~3 mm oldalirányú túréssal működik, ezért a pozicionálás és a gyártási pontosság kiemelten fontos volt.

A pedálkonzol végleges geometriája ekkor még nem volt meghatározva, különösen a rugó előfeszítésének módja miatt. Felmerült a konzolba mart lépcső alkalmazása, azonban ez bonyolította volna a gyártást és az összeszerelést, mivel a rugót csak előfeszített állapotban lehetett volna beépíteni. A cél egy merev, gyártható és könnyen szerelhető előfeszítési megoldás kialakítása volt — ezek a szempontok vezettek a következő fejlesztési fázishoz, a V3-as verzióhoz.

A harmadik verzióban (V3) a fő módosítás a tartókonzol áttervezése volt. A korábbi rugó-előfeszítő lépcsőt eltávolítottam a könnyebb összeszerelhetőség érdekében, és a konzol geometriáját úgy módosítottam, hogy a saroktámasz rögzítése is egyszerűbbé váljon. A süllyesztett csavaros rögzítést végül elvettem, mert növelte volna a tömeget és bonyolította volna a szerelést, ezért a ragasztásos megoldás bizonyult megfelelőnek. A konzol oldalfalát a rögzítő furatig meghosszabbítottam, hogy csökkentsem a furatkörnyéki kihajlást terhelés alatt.

A V3 összeállítás teljes szélessége 154 mm volt, ami a versenyautó szűk lábterében már túlzott méretnek bizonyult. Mivel az egész konstrukció a rugók köré épült, újra elkezdtem alternatív torziós rugókat keresni, hogy hasonló merevség mellett kompaktabb méreteket érhessek el. Mivel ebben a verzióban is maradtak fejlesztési lehetőségek, a következő lépést a V4-es verzió kidolgozása jelentette.

A negyedik verzió (V4) már a véglegesnek szánt, új torziós rugóval készült. Az új rugó (3 mm huzalátmérő, 34 mm belső átmérő, 2,25 menet, 49 Nmm/° rugóállandó) alkalmazásával 12 mm-rel sikerült csökkenteni az összeállítás szélességét, ami számottevő tömegcsökkentést eredményezett. Ennek köszönhetően a pedálest, a négyszög tengely és a konzol is kompaktabbá vált.[11]

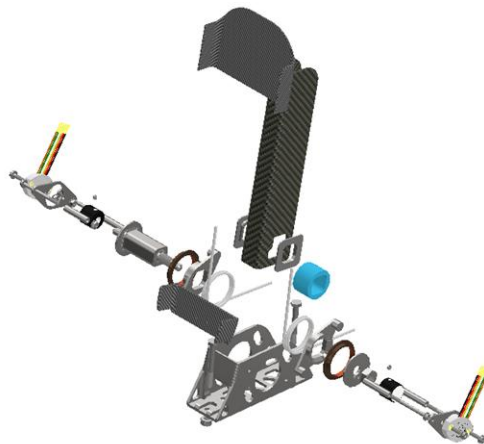
A nagyobb középfurat miatt a rugók pontos pozicionálásához egy 3D-nyomtatott hézagoló készült, amely minimalizálja a rugó játékát és biztosítja az egyenletes működést. A tengelyütköző geometriája is módosult: az eredeti egy pont helyett két szimmetrikus ütközőfelület került kialakításra, ami nagyobb terhelésnél is biztonságosabb megtámasztást ad.

A konzol rögzítésénél alakzáró csavarfogást alkalmaztam: a furatok körül kialakított bemarások megfogják a csavar lapolását, így összeszereléskor nincs szükség ellentartásra. A konzolon emellett további kisebb geometriai finomításokat és tömegcsökkentést is elvégeztem.

Az ötödik verzió (V5) legfontosabb fejlesztése a tengelykialakítás áttervezése volt. A korábbi, több darabból álló mágnesstartó egység gyárthatósági problémákat okozott, ezért a mágnesek rögzítési pontjait közvetlenül a tengely két végén alakítottam ki. Ezzel a korábbi hét elemből álló összeállítást egyetlen alumínium tengely váltotta ki, jelentősen egyszerűsítve a gyártást és a szerelést.

A tengelyre egy siklócsapágyra felfekvő perem került, amely összefogja a pedálegységet és csökkenti a terhelés alatti kihajlást. Mivel mindkét oldalon nem volt kialakítható perem, a másik oldalra egy egyedi alátét készült, amely a csavarral együtt biztosítja a tengely kétoldali megtámasztását.

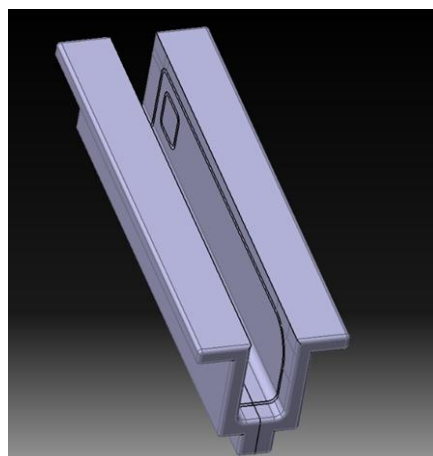
¹⁰²A konzolon további gyárthatósági módosításokat és tömegcsökkentő könnyítéseket alkalmaztam. Ezek eredményeként a teljes összeállítás tömegét sikerült 130 grammra csökkenteni.



36. ábra: ART_12 gyorsító pedáljának robbantott megjelenítésben [2]

6.6 Gyártás folyamata

¹⁰³A végleges modell elkészülése után a következő lépés a gyártás előkészítése volt. Felmértem, mely alkatrészeket tudja a csapat saját műhelyben legyártani, és melyeket szükséges külső partnerrel elkészíttetni. A karbonalkatrészek – a pedáltest, a taposófelület és a saroktámasz – házon belül készültek, mivel a csapat nagy tapasztalattal rendelkezik kompozitgyártásban. Ezekhez az injektációs technológiát alkalmaztuk, SR8100 gyantával és SD4773 katalizátorral. A gyártáshoz első lépésként a szükséges negatív geometriájú szerszámot kellett elkészíteni, amelyre a száraz karbonszövet került.[12] [13]



37. ábra: ART_12 gyorsítópédál, pedáltest szerszám [2]

A gyártási folyamat első lépéseként a kompozit alkatrészek – a pedáltest, a taposófelület és a saroktámasz – elkészítése történt meg, mivel ezek gyártását a csapat házon belül is magas minőségben tudta elvégezni. A karbon elemeket injektációs technológiával gyártottuk, amelyhez először a kívánt negatív geometriájú szerszámot kellett elkészíteni és simára csiszolni. A száraz karbonszövetet vákuumszákba helyeztük, majd vákuumszivattyú segítségével a gyanta átítatta a szövetet. A darabokat 24 órás szobahőmérsékletű kötés követte,

¹⁰² Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

¹⁰³ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

majd az utómunkák során a felesleges anyagot eltávolítottuk, a széleket és a furatokat megmunkáltuk.[8]

A pedáltest négyszög furatát marással alakítottuk ki, több lépésben, oszlopos fűrőgép és gépsatu segítségével. A furat kétoldali megmunkálása miatt kisebb eltérés adódott, amelyet a tengely köré beragasztott alumínium betét korrigált. A ragasztási pontokhoz kétkomponensű 3M DP490 ragasztót használtunk, a felületeket érdesítés után, megfelelő védőfelszerelés mellett ragasztottuk össze.

A fém alkatrészekhez gyártási rajzokat készítettem, méretekkel, geometriai jellemzőkkel és tűrésekkel. A kevésbé bonyolult darabokat – például a siklócsapágyakat és egyes tartóelemeket – saját műhelyben esztergával és vízvágóval gyártottuk le. A komplexebb, többtengelyes megmunkálást igénylő alkatrészeket szponzorcégek készítették el, köztük a pedálkonzolt, a tengelyt, az alumínium betétet és az ütközőelemeket.

A torziós rugókat szintén támogatóink gyártották le több huzalátmérővel, így lehetőség nyílt különböző pedálerők tesztelésére. A végleges rugóerőt a pilóták visszajelzései alapján határoztuk meg.

104A pedál első mozgásakor érezhető volt némi akadályozottság, ezért az összeállítást szétszereltem és az érintkező felületekről mintegy 0,2 mm anyagot eltávolítottam. A csapágyak illesztését is lazábbra vettem a simább mozgás érdekében. A nagyobb felületeket gépi csiszolóval, a kisebbeket kézi csiszolással munkáltam meg, fokozatosan finomodó szemcseméretű papírokkal (P80 → P120 → P500, majd P800 → P1500 → P2000). A felületminőség javítása csökkentette a súrlódást, és az újra összeszerelt pedál érezhetően könnyebben és egyenletesebben mozgott. [14]



38. ábra. ART_12 gyorsítópedál, összeszerelt állapotban [2]

7. Összegzés és kitekintés

Az újonnan tervezett gázpedál több korábban tapasztalt problémát sikeresen megszüntetett vagy jelentősen mérsékelte. A pedáltest csavarodása megszűnt, így a pedálút stabilabbá és pontosabban kontrollálhatóvá vált. A jelátvitel is javult, ami közvetlenül növeli a jármű reakciókészségét és vezethetőségét.

¹⁰⁴ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

¹⁰⁵A csökkentett mozgási tartomány – a pilóták visszajelzéseinek megfelelően – ergonomiailag kedvezőbb működést eredményezett, a masszívabb szerkezet pedig kiszámíthatóbb, megbízhatóbb pedálérzetet biztosít. Az új visszatérítő mechanika egyszerűbb előfeszítést tesz lehetővé, és különböző rugóerőségek alkalmazásával személyre szabható beállítást kínál a pilóták számára.



39. ábra. ART_12 gyorsító pedál teljes összeállítás [2]

8. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani a Széchenyi István Egyetemnek, amiért támogatást és lehetőséget biztosított a projekt megvalósításához, valamint olyan szakmai környezetet teremtett, amelyben a fejlesztési folyamat minden lépése létrejöhett. Külön szeretném megköszönni az Arrabona Racing Team támogatását, azt a szakmai közösséget és csapatmunkát, amely nélkül a gázpedál-összeállítás fejlesztése nem valósulhatott volna meg. A csapat tagjainak tapasztalata, hozzáértése és folyamatos segítsége meghatározó szerepet játszott a projekt sikerében. Hálás vagyok továbbá azoknak a partneregeknek és támogató vállalatoknak, amelyek szakmai tudásukkal, gyártási lehetőségeikkel és eszközeikkel hozzájárultak a tervezéshez és a prototípusok elkészítéséhez. Köszönet illeti mindazokat is, akik a pedál tervezésében, fejlesztésében és kivitelezésében bármilyen módon közreműködtek: csapattársak, mentorokat, oktatókat és kollégákat, akik tanácsaikkal, visszajelzéseikkel vagy gyakorlati segítségükkel támogatták a munkámat. A közös erőfeszítés, együttműködés és szakmai elhivatottság tette lehetővé a projekt létrejöttét, amelyért ezúton is szeretnék őszinte köszönetet mondani. A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

¹⁰⁵ Az Arrabona Járműfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025

- [1] <https://www.racecar-engineering.com/news/formula-student-1998-the-first-ever-competition/>
- [2] Az Arrabona Jár műfejlesztési Egyesület tulajdona, 2025
- [3] F.S.Germany „Formula Student Rules” 2026
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2026/rules/FS-Rules_2026_v1.0.pdf
- [4] <https://premierautotrade.com.au/news/electronic-throttle-bodies-tbo.php>
- [5] Palkovics, L. „Elektronikus Jármű és Járműirányítási Rendszerek” Regionális Egyetemi Tudásközpont pályázati koncepció, 2004. Budapest
- [6] Palkovics L.: Járműirányítás és menetstabilizálás, Magyar Tudomány, 5:561, 2005.
- [7] Solymosi László: Fékrendszer és egyedi féknyereg tervezése Formula Student versenyautóba, Szakdolgozat, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2021
- [8] Boros Levente: Formula Student Race Cars’ Aerodynamic Package Manufacturing Technology, Szakdolgozat, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2024
- [9] Evaluationa of Accelerator Pedal Strenght under Critical Loads Using the Finite Element Method, Kostyantyn Holenko, 2023
<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/11/6684?utm>
- [10] Karnopp Dean C., Vehicle Dynamics, Stability, and Control, CRC Press, 2013, 301
<https://www.scribd.com/document/586116687/BOOK-Karnopp-Dean-C-Vehicle-Dynamics-Stability-And-Control-Second-Edition>
- [11] Richard G. Budynass, J. Keith Nisbett: Shigley’s Mechanical Engineering Design, 10th edition., McGraw-Hill Education, 2015, 542-549
https://www.mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_1731443577xeDvd.pdf
- [12] Henrys Handbook, Defense Technical Information Center., Composite Materials Handbook. Volume 1: Polymer Matrix Composites — Guidelines for Characterization of Structural Materials., 2002., 64-194 <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA426516.pdf>
- [13] A. R. Agrawal, I. O. Pandelidis, M. Pecht: Injection-molding process control, vol. 27, 1987, 1345-1357
- [14] Lipka, István (1966) Körhengerfelületek esztergályozásánál fellépő köralak-hibáról. MŰSZAKI TUDOMÁNY : A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK KÖZLEMÉNYEI, 37 (3-4). pp. 369-384. ISSN 0027-5085

Ütközési Energiaelnyelő zóna szimulációjának validációja

Validation of the Crash Simulation for the Impact Attenuator

Pilz Olivér

Széchenyi István Egyetem

pilz.po.oliver@gmail.com

Absztrakt: Minden jármű, így a Formula Student versenyautók esetében is, kiemelkedő fontossággal bír a biztonság. Cikkem témája egy Formula Student versenyautóhoz tervezett ütközési energiaelnyelő zóna szimulációjának validációja. A Formula Studentben szigorú szabályok vonatkoznak az autó minden egyes részére, így a biztonságért felelős alkatrészeknek is rengeteg szabálynak és tesztnek kell megfelelniük. A versenyautók esetében fontos kérdést jelent még a tömegcsökkentés, ez az autó legapróbb elemére is igaz beleértve az energiaelnyelő zónát is. A Formula Student Rules-ban előírt alumínium behatolás gátló lemez helyett kompozit szendvicsszerkezettel készült alkatrészt szeretnénk használni. Az alkatrész legyártása előtt ezért végesek szimulációban (FEM) létrehozuk az autó elejére szerelt biztonsági berendezést, valamint mivel a szabály azt kívánja meg, így az autó első traktusát is. A szimuláció célja, hogy a megfelelő biztonságot elérve a lehető legkönnyebb alkatrész hozzuk létre. A szimulációs időszak alatt a rétegrend optimalizálás mellett, az alkatrészek legyártásához szükséges szerszámok megtervezése és létrehozása is fontos feladat. Rétegrend optimalizáláskor a közel azonos eredményekkel rendelkező szimulációk tömegét összehasonlítva kiválasztjuk a legkönnyebb és legjobb eredményekkel rendelkezőt. Hálózaskor hexaédes elemek használata kulcsfontosságú ezeknél a szimulációknál, mert kevesebb elemmel sokkal pontosabb eredményeket érhetünk el, mint a tetraédes módszerrel. A Formula Student Rules alapján megadott teszt feltételek alapján, biztonsági tényezővel meghatározunk egy erőt, melynél a valóságban kevesebb hatna az ütközési energiaelnyelő zónánkra. Validációs folyamat egy akkreditált laboratóriumban történt Szlovákiában, a szabályzatban megadott paramétereket a labor előkészítette. Nagysebességű kamerával készített felvételeknek köszönhetően kiszámolható az ütközés sebessége.

Kulcsszavak: FEM szimuláció, validáció, ütközési energiaelnyelő zóna

Abstract: In all vehicles, including Formula Student race cars, safety is of outstanding importance. The topic of my article is the validation of the simulation of the energy-absorbing zone designed for a Formula Student car. Strict rules apply to every part of the car in Formula Student, so all components responsible for safety must meet numerous regulations and undergo extensive testing. In racing cars, weight reduction is also a crucial issue, which is true for even the smallest parts, including the energy-absorbing zone. Instead of the aluminum anti-intrusion plate prescribed in the Formula Student Rules, we would like to use a composite sandwich-structured part. Before manufacturing the part, we create its simulation (FEM) in which we include the front safety device and the car's front structure, as required by the regulations. The aim of the simulation is to design the lightest possible part that meets safety requirements. During the simulation, in addition to optimizing the number of layers, it is also important to design and create the required tool for manufacturing. Layer optimization and simulations with nearly identical results are compared by mass, selecting the lightest that meets safety requirements. Using hexahedral elements is important as they give much more accurate results in simulations, but they require much more computational resources than tetrahedral methods. According to the Formula Student Rules, a force of a given value must be exerted on the specified component, actually less than the force expected to impact the energy-absorbing zone in real collision. The validation process took place in Slovakia, using parameters specified in the regulations and approved by an accredited institute. Thanks to recordings made with a high-speed camera, the collision speed can be calculated, and the deceleration of the test body can be determined quickly using sensors.

Keywords: FEM simulation, validation, crash energy absorption zone

1. Bevezetés

Tanulmányaim első félévében lettem tagja a Széchenyi István Egyetemen működő Arrabona Racing Teamnek. 2022. őszén jelentkeztem a csapathoz, ahol először az aerodinamika részlegén tevékenykedtem. Ekkori feladataim egyike volt a csapat akkori autójának (ART_X) hátsószárny végeelem szimulációjához szükséges modell felépítése. A következő évtől, a karosszéria részleg tagjaként a fő feladatomban az ART_11 versenyautó önhordó karosszériájának (monocoque) fejlesztése volt. Itt szimulációs feladataim közé tartozott a monocoque hátuljának rétegrend optimalizálása a megváltozott futómű bekötési pontok miatt. Ebben az évben az ütközési energiaelnyelő zóna szimulációja, legyártása, valamint törésten történő vizsgálata állt a tevékenységem középpontjában. A zóna geometriai változásai miatt a végeelem szimulációval történő rétegrend optimalizációja elengedhetetlen része az alkatrész fejlesztésének.

A validációs teszt a TEN Slovakia s.r.o. akkreditált laborjában történt, ahol a cég munkatársai készítették elő a tesztet a méréshez. [3]

2. Formula Student verseny

A Formula Student egy évente megrendezett hallgatói mérnökverseny. A verseny nemzetközi szinten zajlik, fontos kritérium, hogy a formula típusú versenyautót hallgatók tervezik, építik, illetve tesztelik. A versenysorozat elődje először 1979-ben került megrendezésre, ekkor 11 csapat szállt versenybe. Az első Formula Student néven futó versenyt 1981-ben rendezték, ekkor már egy részletesen kidolgozott szabálykönyv alapján kellett megtervezni a versenyautókat. Az első európai versenyt 1998-ban rendezték meg a Motor Industry Research Association kísérleti pályáján, az Egyesült Királyságban. A Formula Student versenysorozatban világszerte több száz csapat vesz részt napjainkban. A legkedveltebbek a németországi, a magyarországi, illetve az ausztriai versenyek, de rendeznek még versenyeket például Spanyolországban, Olaszországban vagy Hollandiában is. A magyarországi Formula Student versenyt, a Formula Student East-et, 2010 óta rendezik meg a Hungaroringen, vagy különleges esetekben a ZalaZone tesztpályán.

A versenyszámok, két fő csoportra sorolhatók: a statikus és a dinamikus versenyszámokra. A versenyszámokért kapható pontokat, a következő táblázat szemlélteti:

	CV & EV	DC
Static Events:		
Business Plan Presentation	75 points	-
Cost and Manufacturing	100 points	-
Engineering Design	150 points	150 points
Dynamic Events:		
Skidpad	50 points	-
Driverless (DV) Skidpad	75 points	75 points
Acceleration	50 points	-
Driverless (DV) Acceleration	75 points	75 points
Autocross	100 points	-
Driverless (DV) Autocross	-	100 points
Endurance	250 points	-
Efficiency	75 points	-
Trackdrive	-	200 points
Overall	1000 points	600 points

40. ábra. A Formula Student Rules pontozási táblázata¹⁰⁶

¹⁰⁶ F.S. Germany „Formula Student Rules” 2025

Az Arrabona Racing Team 2014-ben alakult a győri Széchenyi István Egyetem hallgatói versenycsapataként. A csapat a nemzetközi Formula Student versenysorozatban méretteti meg magát, az idei évben már a 12. autójával. Jelenleg az ART_12 építési munkálatai folynak. A csapat alakulásakor mindösszesen 10 fő alkotta a tagságot, és az alakulástól számítva féléven belül már versenyen indultak. Annak ellenére, hogy kevesen voltak és rövid idejük volt a versenyekig, rögtön az első versenyen a Formula Student Russia-n összesített első helyezést értek el.

A 2024-es szezont a csapat történelmi sikerrel zárta: első magyar csapatként összesített első helyezést értek el a Formula Student East versenyen. A Formula Student Austria versenyről összesített 3. helyezéssel tértek haza. A csapat egyik legsikeresebb szezonya egyben a legutolsó szezont volt, melyben belsőégésű kategóriában indultak, ugyanis az idei szezomban már az elektromos kategóriában fejleszt versenyaútót a csapat.



2. ábra. A 2024-es szezont eredményei¹⁰⁷

3. Végeelem szimulációs módszertan szakirodalmi áttekintése

Az irodalomkutatás fő célja a végeelem szimulációk mélyebben történő megismerése, illetve ezen irodalmakból történő tanulási lehetőségek. A végeelem módszer (röviden FEM, angolul Finite Element Method) alapötlete a 20. században jött létre, szilárdsági, illetve járműgyártási problémák megoldásának apropóján. Az első kutató Alexander Hrennikoff volt, aki rácsrudakból és lemezekből álló szerkezetek analízisével próbálkozott. Az 1950-es években Ray W. Clough döntő szerepet játszott a végeelem módszer gyakorlati alkalmazásában, ő vezette be a „finite element” kifejezést, majd ezt repülőgépek szárnyelemeinek elemzésére használta. [6], [7], [8], [9],

A számítógépek fejlődése az 1960-as évektől kezdődően lehetővé tette, hogy a FEM széles körben alkalmazhatóvá váljon. A következő 20 évben megjelentek a kereskedelmi szoftverek többek között a NASTRAN, ezeket az autó- és repülőgép ipar mellett folyamatosan más iparágak is alkalmazni kezdték. A FEM-et a tervezőmérnökök körében, a számítási teljesítmény

¹⁰⁷ Arrabona Járműfejlesztő Egyesület

ugrásszerű növekedése, valamint a CAD szoftverekbe történő integrációja tette elérhetővé a 2000-es évek elejétől.

A végeelem módszer egy numerikus számítási eljárás, amellyel bonyolult mérnöki problémák oldhatók meg. A módszer lényege, hogy bonyolult geometriájú szerkezeteket sok kis és egyszerű elemre oszt fel. Minden egyes ilyen elemre sokkal egyszerűbb felírni az egyenleteket (pl. Hooke-törvény, Fourier-törvény stb.). Ezekből az elemekből épül fel a teljes szerkezet viselkedése, összeadva az eredményeket.

A módszer során a geometria hálóra (mesh-re) való felosztása az első lépés, majd a megoldás számítása csomópontokon (node-ok) keresztül történik. A fizikai törvények minden egyes elemre történő alkalmazását követően globálisan mátrix-egyenletrendszerre állíthatóak össze. Ezt számítógép oldja meg, ezzel meghatározva az elmozdulásokat, feszültségeket stb. a szerkezet minden pontjában. A FEM nagy előnye, hogy tetszőleges alakú és összetett anyagú testeket is pontosan lehet vele vizsgálni. Hátránya viszont, hogy nagy számítási kapacitás és megfelelő modellalkotás szükséges az eredmények lehető legjobb közelítéséhez, ugyanis a számítási módszer jellegéből adódóan sosem biztosít tökéletesen pontos eredményt.

Az analízis folyamatának 3 fő lépése van: az előkészítés (preprocess), megoldás (process) és a kiértékelés (postprocess). Ezeket a részeket több kisebb részre oszthatjuk fel. [12,15].

3.1 Előkészítés

Az előkészítés során a geometria és a végeelem háló létrehozása, a peremfeltételek beállítása, valamint az anyagtulajdonságok megadása a cél.

A vizsgált alkatrész vagy szerkezet geometriai modelljének elkészítését követően, a geometriai modellt felosztjuk végeelemekre. Ezek az elemek a legtöbb esetben, háromszögek, négyszögek, tetraéderek, valamint hexaéderek lehetnek, az első két eset 2D-s háló esetében, míg az utóbbi kettő 3D-s modell esetében. A hálózás megkezdése előtt nagyon fontos végig gondolnunk és eldöntenünk, hogy az adott szimulációhoz milyen fajta hálóra van szükségünk. A számítási pontosságot nagyban befolyásolja a háló minősége, azaz, hogy az elemek mekkora százaléka hibás, valamint a háló finomsága is, vagyis az elemek mérete is.

A szimuláció működéséhez elengedhetetlen a peremfeltételek meghatározása, a peremfeltételek a modellen belüli rögzítéseket, megfogásokat, támaszokat jelentik, és ezeken a pontokon az elmozdulás 0 kell, hogy legyen. Ez csak statikai esetek vizsgálatára igaz, ugyanis dinamikus terhelési esetben nem kellene megfogások. Az előkészítés ezen lépésekor adjuk meg a testre ható erőket, nyomásokat stb. Definiálnunk kell a szerkezetek esetében az alkatrészek közötti rögzítéseket például ragasztások, hegesztéseket, valamint a kontaktokat leíró kényszereket is. Elengedhetetlen feladat a végeelem modell felépítésekor az anyagtulajdonságok meghatározása, azaz a rugalmassági modulus (E), nyírási modulus (G), a Poisson-tényező (ν), sűrűség (ρ), valamint ezeken kívül lehetnek még más speciális viselkedések is.

3.2 Kiértékelés

Ahhoz, hogy a szimulációs eredmények értelmezhetőek legyenek a számítás előtt fontos meghatározunk olyan változókat melyek ezeket az eredményeket reprezentálják számunkra. Ezeket a változókat a modellünkön megtudjuk jeleníteni a szimulációt követően egy skálán, aminek a segítségével, animációk formájában is értelmezni tudjuk például a modellen belüli elmozdulásokat és feszültség értékeket. [13,16]

3.3 A végeelem módszerhez használt szoftverek és eszközök

A végeelem módszer alkalmazása a mai világban elképzelhetetlen számítógépes szimulációs megoldók nélkül. A különböző iparágak igényei miatt az elmúlt pár évtizedben számos kereskedelmi és kutatási céllal létrehozott végeelem szoftver jelent meg. A legtöbb ilyen

szoftver nem csak a számítások megoldására képes, beépített geometriai modellező, hálógeneráló modulokkal rendelkezik, valamint képesek a peremfeltételek és anyagmodellek beállítására is. A programok képesek az eredményeket vizuálisan is megjeleníteni.

A legismertebb és a legszélesebb körben elterjedt szimulációs szoftverek a következők:

Ansys: Az egyik legismertebb és leguniverzálisabb program, képes szerkezeti, hőtechnikai, áramlási és elektromágneses szimulációkra is.

Abaqus: Ez a program a nemlineáris mechanikai problémák, komplex kontaktfelületek és a töréssel kapcsolatos modellek megoldására alkalmazható. Ugyanakkor a töréssel kapcsolatos szimulációk elvégzésére a PamCrash vagy az LS-Dyna programok sokkal kiemelkedőbbek. Ezt a programot használják a leggyakrabban az autópárhuzamosban, valamint a repülőgépiparban.

MSC Nastran: A legelső szimulációs program melyet az 1960-as években fejlesztettek ki, a szoftver a mai napig tökéletesen megfelel az ipari standardnak, ennek köszönhetően tökéletesen működik szerkezeti dinamikai szimulációk és rezgésanalízisek végzésére.

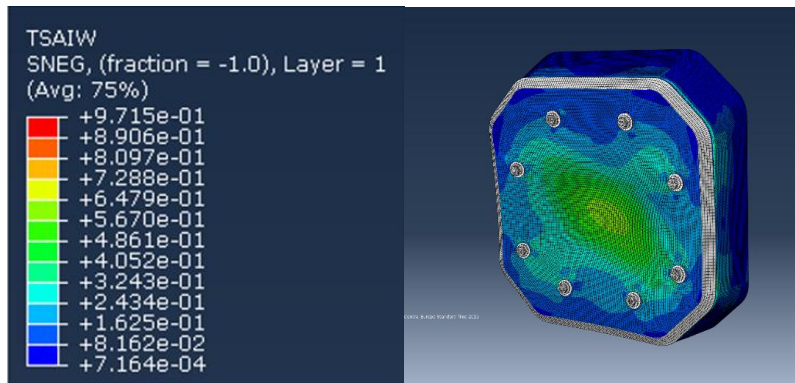
Ezek a szoftverek gyakran nyújtanak grafikus felhasználói felületet, valamint automatizálási lehetőséget (pl: Python vagy Matlab integrációs lehetőséget). Az utóbbi pár évben a gyorsabb futtatást a nagyobb számítási kapacitással rendelkező modellek esetében hivatott elősegíteni a felhőalapú számítás és a párhuzamos feldolgozás. [10], [11], [14]

4. A szimulációhoz szükséges kritériumok

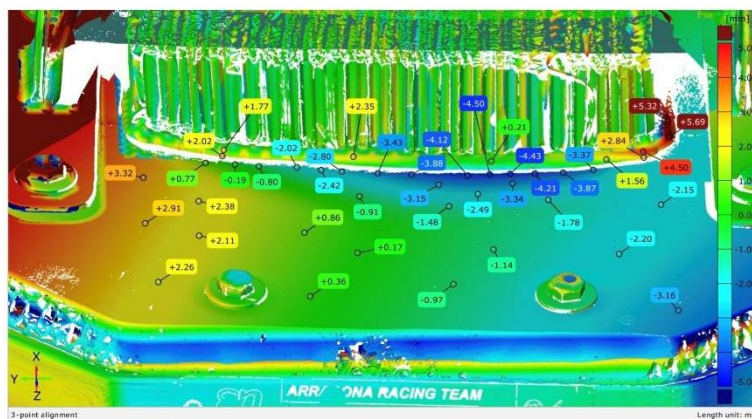
A szabványos behatolásgátló lemez használata helyett az idei évben újra célként tűztük ki a karbon kompozit szendvicsszerkezet használatát. A cél az, hogy a megfelelő biztonságot nyújtva, a lehető legkönnyebb alkatrészt hozzuk létre. Azért célszerű a karbon kompozit szerkezet használata, mert kis sűrűség mellett nagy szakítószilárdsággal rendelkeznek, ez a tulajdonság a versenyautók esetében nagyon kedvező.

Az energiaelnyelő szimulációjakor a legfontosabb kérdés az, hogy az alkatrészünk a teszt során beszakad-e vagy sem. Ennek köszönhetően figyelembe kell vennünk az alkatrész felépítéséhez szükséges anyagok tönkremeneteli tényezőit. Ezeknél az anyagoknál plasztikus alakváltozás nem következik be, a lineáris szakaszt közvetlenül a törés váltja fel. [4][5]

A szabálypontok között fellelhető az a kikötés, hogy az AIP maximális deformációja 25 mm lehet. Ennek a szabálypontnak való megfelelést szintén figyelni kell a szimulációk során, ugyanis a teszteredményeket bemutató dokumentumban ennek a szabálypontnak történő megfelelést is bizonyítani kell. Ezt általában 3D scanneléssel lehet bizonyítani, ahogy azt az alábbi kép is mutatja.



3. ábra. Az ART_12 V0-ás szimulációs eredménye¹⁰⁸



4. ábra. Az ART_12 AIP-jének teszt utáni 3D scanje¹⁰⁹

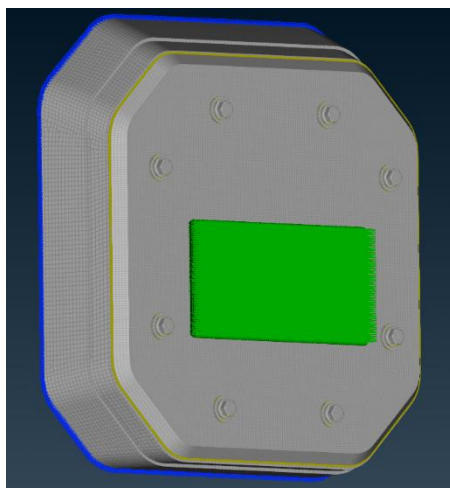
5. A szimuláció

A szimuláció leglényegesebb része az erő definiálása. Az AIP-n az erő helyét pontosan arra a felületre fogjuk megadni, ahol a valóságban az energiaelnyelő elem rögzítve lenne. A szimulációban egy felületen megoszló erőt használtam. Ahhoz, hogy a modell egymáshoz érintkező részei a szimuláció közben ne penetráljanak át egymáson, definiálnunk kell a részek közötti kontaktokat.

Az előzőekben említett feltételek mellett biztosítanunk kell azt, hogy az alkatrészünk ne mozduljon el a térben. A megfogásunk az FBH végénél fog elhelyezkedni ugyanúgy, ahogy a valóságban is az FBH egy síkfelületen fekszik fel.

¹⁰⁸ saját készítés

¹⁰⁹ saját készítés

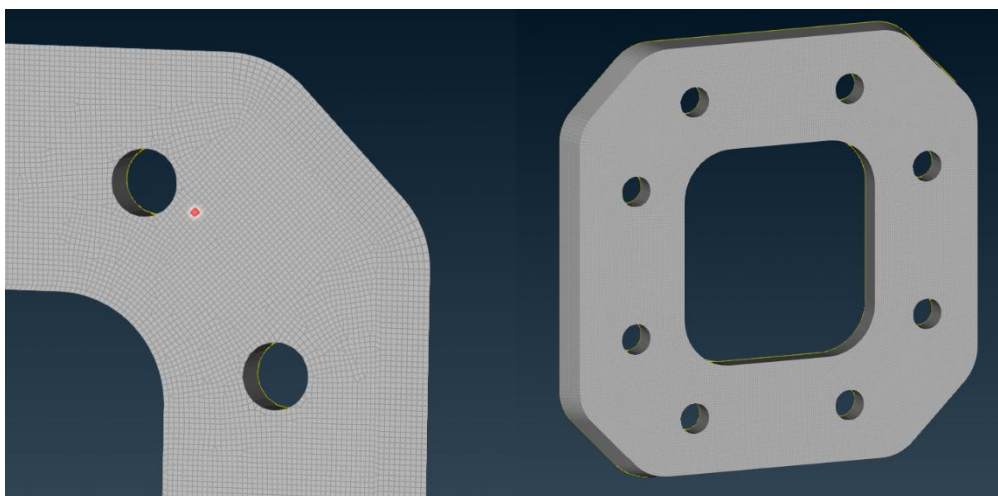


5. ábra. A modellen zöld az erő, késsel pedig a megfogás látható¹¹⁰

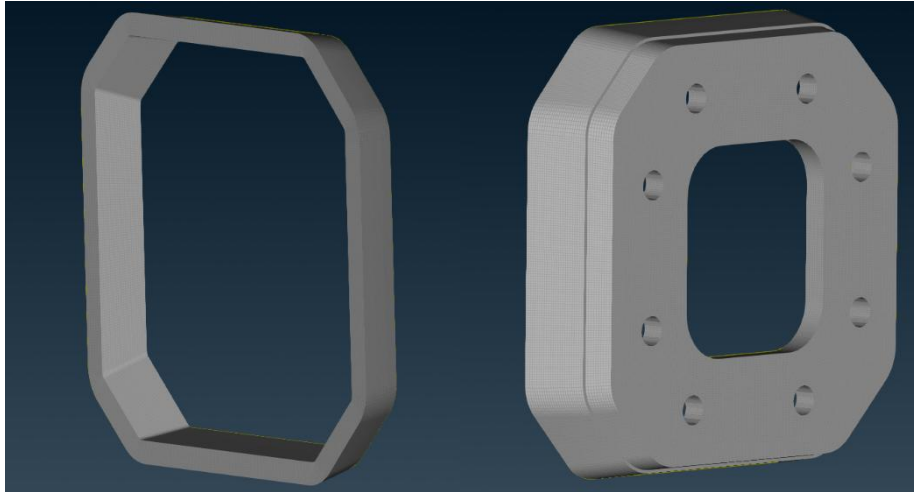
Ahogy az a korábbiakban már említettem, a behatolásgátló lemez egy kompozit szendvicsszerkezet. A modellben emiatt a külső és a belső karbonréteg 2D-s héjelemkből áll, a belső alumínium méhsejt pedig térfogati elemkből. Az alumínium méhsejt esetében annyi a különbség, hogy az AIP-nél 10 mm, míg az FBH esetében 20 mm vastag. A héjelemek esetében strukturálatlan hálót használunk, melyben fellelhetőek négyszög- és háromszögelemek egyaránt.

Az FBH-ban bekövetkezett geometriai változtatás megnehezítette a méhsejthez tartozó térfogati elemek generálását. A hexahedron háló generálás bonyolultabb geometriájú alkatrészek esetén sokkal nehezebb, mint a tetrahedron hálóé. A hexaéderes háló nem csak téglatest alakú elemkből áll, van benne prizmatikus elem is. de ezek száma a teljes modellben kevesebb mint 5%-a az összes elemnek. A pontosság miatt nekünk mégis a hexaéderes változat a kézenfekvőbb, ugyanis ezen háló esetében kisebb az elemek torzulása, ezáltal jobb a feszültségeloszlás, illetve kisebb elemszám mellett jobb pontosságra számíthatunk.

Az elemzési lépés egy statikus elemzési forma, amelynek során többféle kritériumot figyel a rendszer. Ezek név szerint a „Cfailure”, ez figyel a kompozit anyagok törési kritériumát, a Tsai-Wu törési kritérium segítségével számolja a tönkremenetel lehetőségét. Ezen kívül a nyúlás, feszültség, elmozdulás, illetve tengely körüli elfordulás mértékét. A szimulációhoz Abaqus-CAE megoldó szoftvert használtam.



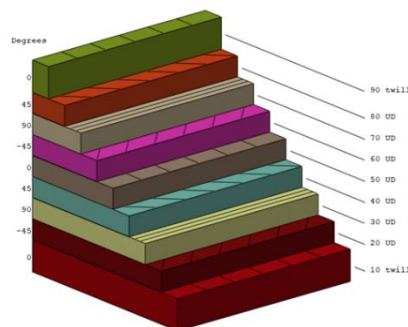
¹¹⁰ saját készítés



6. ábra. Az FBH térfogati elemeinek felépítése¹¹¹

A szimulációim kezdeti fázisában pár szimuláció tönkremeneteli tényezője meghaladta a várt értéket, így ezeket a rétegrendeket meg kellett változtatni annak érdekében, hogy az AIP és az FBH együttesen kibírják a rájuk nehezedő terhelést.

A szimulációk alapján az AIP külső rétegrendje a következő képen látható, a belső réteghez tartozó rétegrend a tükörképe a külsőnek.

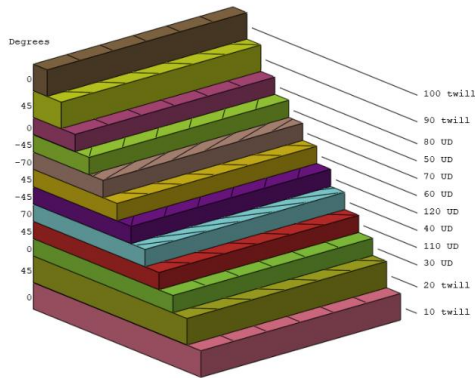


7. ábra. Az AIP külső rétegrendje¹¹²

Az FBH végleges rétegrendje a következő lett (itt is érvényes az, hogy a rétegrend szimmetrikus, azaz a külső és a belső rétegek tükörképei egymásnak):

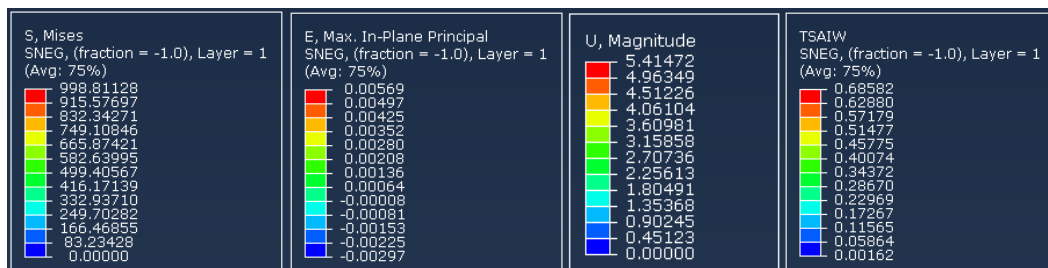
¹¹¹ saját készítés

¹¹² saját készítés



8. ábra. Az FBH végleges rétegtrendje¹¹³

A szimulációs eredmények a következőképpen alakultak; a képek az Abaqus megoldó szoftverben készültek és az általa számolt eredményeket mutatják:



9. ábra. A szimulációs eredmények, az Abaqus megoldó szoftver által számítva¹¹⁴

Ahogy az eredményekből kiderül, a maximum elmozdulás 5,4 mm, amely bőven a 25 mm-es szabályossági határ alatt van. A tönkremeneteli tényező pedig 0.68, mely a törési érték, azaz 1 alatt van, ezáltal a tesztnek meg kell, hogy feleljen.

¹¹³ saját készítés

¹¹⁴ saját készítés

6. Az AIP teszt

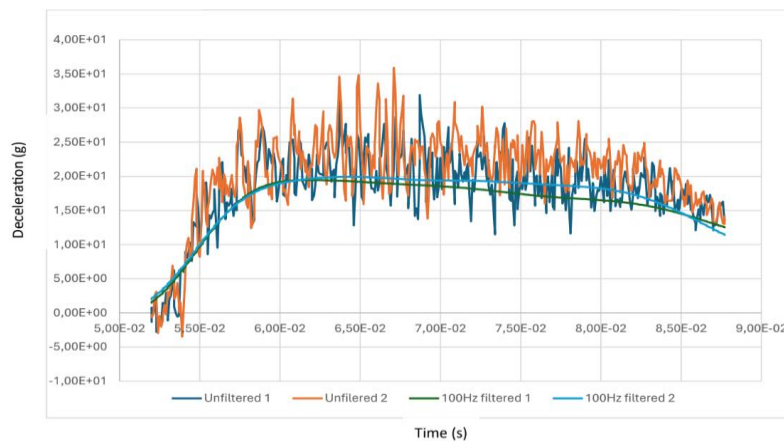
A szabályzat kimondja, hogy minimum 7 m/s sebességgel kell, hogy becsapódjon a súly az ütközés során.

Az ütközés előtti utolsó 10 képkocka 0,0066 másodperc alatt készült, ezalatt az idő alatt a megtett út 50,6 mm volt. A $v=s/t$ formulából kiszámítható, hogy a tömeg átlagsebessége az ütközés előtt: $0,0506 \text{ m}/0,0066 \text{ s}=7,667 \text{ m/s}$.



10. ábra. Összetett kép a becsapódás előtti utolsó 10 képkockáról¹¹⁵

A teszthez gyorsulásmérő berendezést is használtunk, ennek kezelésében Dr. Vehovszky Balázs tanár úr segített minket. A gyorsulásmérő adataiból kiderül, hogy a nyers lassulás csúcs 35,9g volt; a szűrt adatok, melyeket az FS Rules 2025 v1.1-es verziójának T 3.18.6 szabálpontjának szűrési eljárásával történő szűrést követően kaphatunk 19,92g volt. Ezek az értékek a 40g-s határérték alatt vannak, így a maximális lassulás megfelel a szabályzatnak.



11. ábra. Diagram a lassulásról¹¹⁶

Az átlagos lassulás 19,658g volt. Ezt az adatot az energiaelnyelő felső síkjának ütközés előtti és az ütközés során elért legmélyebb pontja közötti magasság különbsége segítségével

¹¹⁵ saját készítés

¹¹⁶ saját készítés

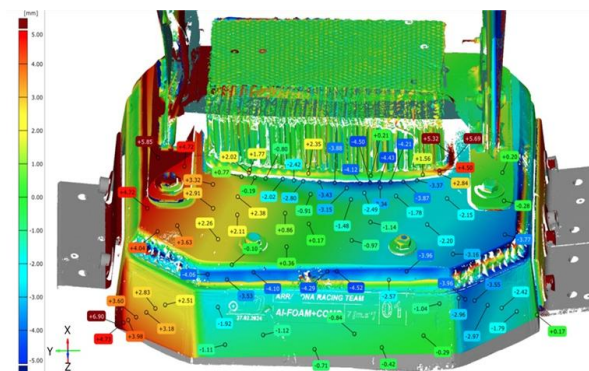
számíthatjuk ki. Ennek értéke, ahogyan az az ábrán is látható, 171,75 mm. Az ütközés és az energiaelnyelő teljes összenyomódása között eltelt idő 0,042 másodperc volt, amelyet a nagysebességű kamera képkockáinak számából számolhatunk ki (64 képkocka volt a két esemény között).

$$a = \frac{2s}{t^2} = \frac{2 \times 0,17}{0,042^2} = 192,74 \frac{m}{s^2} \approx 19,647g$$



12. ábra. A számolást bizonyító képkockák összevetése¹¹⁷

A szimuláció adataiból kiderül, hogy az elmozdulás 5,4147 mm. A tesztet követően a 3D-scannelt modellt összevetjük az FBH és az AIP modelljével, melyből kiderül, hogy a maximális elmozdulás 5,85 mm.



13. ábra. A 3D scannelt modell a törésteszt után¹¹⁸

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik segítettek cikkemet, ezzel támogatva tudásom, valamint az Arrabona Racing Team autóinak fejlődését. Köszönettel tartozom a Járműfejlesztési Tanszék minden munkatársának segítségéért, különösen Schweighardt Attilának a folyamatos szakmai segítségéért. Külön köszönetet szeretnék mondani az Arrabona Racing Teamnek, valamint a TEN Slovakia s.r.o.-nak a mérésben történő segítségéért.

¹¹⁷ saját készítés

¹¹⁸ saját készítés

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002)

Irodalomjegyzék

- [1] F.S. Germany „Formula Student Rules” 2025
- [2] Az Arrabona Járműfejlesztő Egyesület tulajdona, 2025.
- [3] TEN Slovakia s.r.o.
- [4] Czigány Tibor: Kompozit anyagok tönkremenetele, avagy az anyag hal(l)hatatlan hangja
- [5] Csallány Enikő Krisztina, Dr. Czél Gergely: Rendezett nem folytonos szálakkal erősített, nagy teljesítményű polimer kompozitok mechanikai tulajdonságai nyomó terhelés esetén, 2019. 388-392 oldal
- [6] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and I. J. Topp: Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures vol:23, no: 9, 1956, 805-823 oldal
- [7] Wing Kam Liu, Shaofan Li, Harold S. Park: Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future 2022, 4431-4452 oldal
- [8] Forberger Árpád, Vörös Gábor: A végeselem-módszer alapjai 2012., 12-34 oldal
- [9] Páczelt István, Szabó Tamás, Baksa Attila: Végeselem módszer alapjai 2007., 127-137 oldal
- [10] Dr. Beleznai Róbert: Jármű vázszerkezetek elemzése végeselem módszerrel
- [11] Karátson János, Horváth Róbert, Izsák Ferenc: Parciális differenciálegyenletek numerikus módszerei számítógépes alkalmazásokkal 2013. február 5.
- [12] BME, Moharos István, Oldal István, Szekrényes András: FINITE ELEMENT METHODE 2012., 35-42 oldal
- [13] Dr. Mankovits Tamás, Huri Dávid: Modellezés és Szimuláció 2015. január, 11-15 oldal
- [14] Hichem Belaid, Hassina Ziou, Mohammed Himeur: A simple triangular finite element model for analysing the linear static behaviour of thick sandwich plates vol: 16, no: 30., 2024., 263-286 oldal
- [15] Yijun Liu: Finite Element Method 2015., 101-120 oldal
- [16] Mats G. Larson, Frederik Bengzon: The Finite Element Method: Theory, Implementation, and Applications 2010., 23-26 oldal

Hirdogénmeghajtású hydrofoil hajó koncepcionális tervezése

Conceptual design of a hydrogen powered hydrofoil boat

Schubert Ambrus

Széchenyi István Egyetem
ambrus.schubert@gmail.com

Absztrakt: A dolgozat egy hidrogén-üzemanyagcellás, nagysebességű hydrofoil jármű koncepcióját vizsgálja, mint városi közlekedési torlódásokat tehermentesítő, fenntartható megoldást. Bemutatja a hydrofoil technológia és a hidrogénrendszerek működését, előnyeit és korlátait. A piackutatás és a számítások alapján egy 12 főt szállító, 100 km/h utazósebességű jármű megvalósítható, amely a hidrogén biztosította nagy hatótávot ötvözi az elektromos meghajtás csendességével. A CFD eredmények szerint a kialakítás ígéretes, de további optimalizálást igényel. A koncepció életképes, de több kulcsterület – például a foilk méretezése, stabilitás és vezérlés – további fejlesztést kíván.

Kulcsszavak: hidrogén, hydrofoil, koncepció, üzemanyagcella, koncepcionális tervezés

Abstract: The thesis investigates the concept of a hydrogen fuel cell-powered, high-speed hydrofoil vehicle as a sustainable solution to urban traffic congestion. It outlines the operation, advantages, and limitations of hydrofoil technology and hydrogen energy systems. Market analysis and calculations indicate that a 12-passenger vehicle capable of cruising at 100 km/h is feasible, combining the range provided by hydrogen fuel cells with the quiet operation of electric propulsion. CFD simulations show promising aerodynamic performance, though further optimization is needed. The concept is viable, but key areas—such as foil sizing, stability, and control—require additional development.

Keywords: hydrogen, hydrofoil, concept, fuel cell, conceptual design, concept art

1. Bevezetés

A világszintű trend, hogy az emberek egyre nagyobb része él nagyvárosokban. Az ezáltal teremtett problémák közül is kiemelkedik azonban a közlekedési rendszer túlterheltsége, ugyanis a városokban a közlekedési igény jelentősen gyorsabban nő, mint ahogy azzal az infrastrukturális fejlesztések lépést tudnának tartani, valamint a fejlesztések kivitelezésére rendelkezésre álló hely is véges. Időgazdálkodás, balesetelkerülés és légszennyezés oldaláról is megközelíthető a kérdés, de az egyértelmű, hogy a globális közlekedési rendszer strukturális újragondolásra szorul.

Az alábbi tanulmány szerint egy átlagos londoni autós évente 227 órát veszít el a forgalmi torlódások miatt. A San Francisco-Oakland Bay híd a reggeli csúcsforgalomban az egész Bay Area leghosszabb torlódásait képes produkálni. A személyautók robbanásszerű elterjedése pedig magával hozta azon üres ülések százait, amik egy ilyen torlódásban csak tovább rontják az összképet. A hídon áthaladó járművek üléseinek túlnyomó többsége kihasználatlan. A sűrű forgalom okozta torlódások az egész régió lakóinak életét jelentősen megnehezítik.[1]

1.1. Konceptcionális tervezés fontossága

A konceptcionális tervezés a termékfejlesztés azon szakasza, ahol összegzik az alapötleteket, és kialakítják azt a keretrendszert, amelyben a későbbi fejlesztési folyamat zökkenőmentesen haladhat. Itt dől el, miért létezik a termék, mi a célja, milyen funkciókat kell ellátnia, és kiknek szól — szemben a prototípus- vagy gyártástervezés „hogyan?” -központú megközelítésével. Ebben a fázisban még nem az alkatrészek részleteinek kidolgozása a feladat, hanem a stratégiai irányok meghatározása, a kreatív alap megteremtése és a későbbi fejlesztést végig meghatározó követelmények tisztázása.[2]

Bár ez a szakasz a teljes költségvetéshez képest csekély ráfordítást igényel, kulcsfontosságú: ha hiányzik vagy felületes, akkor a fejlesztés később jóval drágábbá válik, vagy akár teljesen megbukhat. Ez különösen igaz a járműiparban, ahol a hosszú modellciklusok és a rendkívül költséges folyamatok miatt egy rosszul megalapozott koncepció éveket és hatalmas összegeket égethet el egy eleve kudarcra ítélt termékért.

A megfelelően végrehajtott konceptcionális tervezés csökkenti a későbbi visszakanyarodásokat, amikor komplett egységeket kell újratervezni. Ez kevesebb prototípust, kevesebb módosítást és kevesebb elvesztegetett mérnöki munkaórát jelent, ami jelentősen mérsékli a költségeket, miközben időbeli előnyt biztosít a versenytársakkal szemben. Sok esetben már a fejlesztés közben megtérülhet a konceptcionális tervezés befektetése pusztán azzal, hogy elkerüli a szükségtelen újratervezési hurkokat.

További előny, hogy a folyamat lehetővé teszi a felhasználói csoportok korai bevonását. A piackutatások, koncepciórajzok és versenytárs elemzések feltérképezik az iparági helyzetet és a vásárlói igényeket, így a tervezők már a fejlesztés kezdetén tesztelhetik ötleteiket. Ennek eredményeként hamarabb kirajzolódnak a valódi felhasználói elvárások, és egy jól meghatározott koncepció tiszta, célirányos keretet ad a teljes későbbi fejlesztés számára.[3]

3. Technológiai alapok

De hogyan is működik egy ilyen hydrofoil? Az ötlet a maga egyszerűségében zseniális. Mivel a vízi járművek sebességét korlátozó fő erő a felületek mentén jelentkező áramlási ellenállás, az úgynevezett nedvesített felület csökkentésével ezen erő is drasztikusan csökkenthető. Az ötlet lényege, hogy a víz levegőhöz képesti ezerszeres sűrűségét kihasználva egy, a vízfelszín alá helyezett szárnyprofil egy hagyományos, levegőben használt szárnyhoz méretének

töredékével is képes lehet a hajótest súlyának vízből való kiemelésére. Ha ez sikerül, a nedvesített felület területe nagyságrendekkel csökkenthető.

Annak ellenére, hogy a közérdeklődés az elmúlt években fordult a hydrofoilok felé, a különböző vízfelszín alatti szárnyakat használó hajók és kompok története sok-sok évvel ezelőttre nyúlik vissza. A hydrofoil feltalálása az milánói származású repüléstechnikai mérnökhöz, Enrico Forlanini-hez köthető, aki 1906-ban, a Maggiore-tavon 68.4 km/h sebességet ért el az általa épített hajóval, amire egy létra szerű felépítménnyel szárnyprofilokat erősített.

Az elmúlt években az elektromos hajtás előretörése háttérbe szorította a hidrogéntechológiát, pedig a két megoldás valójában nem egymás riválisa, hanem egymás hiányzó párja lehetne egy tudatosan felépített rendszerben. Az akkumulátorok hatékonysága ugyan sokat javult, de energiasűrűségük még mindig messze elmarad a kémiai energiahordozókéétól. Emiatt kiválóak kisebb eszközökben, de a nagy teljesítményű járművek, munkagépek és repülőgépek leváltásához még nem elég erősek. A hidrogén gazdaságos felhasználáshoz 400–700 bar közötti nyomáson tartott tartályokra van szükség, amelyek ideális formája a gömb, bár fejlettebb anyagtechnológiával ma már részben eltérhetünk ettől. A tartályméret növelésével a hidrogéntárolás hatékonysága javul, mert a térfogat növekedése gyorsabban nő, mint a falvastagság miatti tömeg.[4]

Miután a tárolás megoldott, két erőforrás-lehetőség marad. Az egyik a hidrogénnel működő belsőégésű motor, amely a jelenlegi technológiákkal viszonylag kis módosítással átállítható hidrogén- vagy hidrogén–dízelt üzemre, így olcsóbb fejlesztést tesz lehetővé. A másik az üzemanyagcella, amely felépítésében hasonlít ugyan egy akkumulátorra, de nem képes energiát tárolni: kémiai energiát alakít át villamos energiává, és tiszta működése miatt a hidrogénhajtás egyik legígéretesebb iránya.[5]

4. Piackutatás

A projekt kiindulópontja egy Győr és Ingolstadt között közlekedő, hidrogénmeghajtású hydrofoil hajó koncepciója volt, amely gyors, kényelmes és környezetkímélő alternatívát kínál. A fejlesztés során kiderült, hogy a koncepció ennél jóval szélesebb körben is működhet: zsúfolt, vízparti nagyvárosok között valódi hiánypótló megoldást jelenthet, mivel torlódásmentesen kötné össze a külső régiókat a belvárossal — gyakorlatilag azt nyújtva, amit évtizedek óta a „repülő autóktól” vártak.

A piacon már megjelentek hasonló próbálkozások, főleg akkumulátoros elektromos hajtással. Ezek között található nagyobb kompok és kisebb, motorcsónakszerű személyhajók. A legközelebb álló példa az Emirates Team New Zealand „Chase Zero” hajója, amely Toyota üzemanyagcellákkal 50 csomót (92,6 km/h) is elér, 8 főt szállít, 330 km hatótávval. A másik irány a svéd Candela cégé, amely teljesen elektromos hydrofoil kompokot fejleszt. P12-es modelljük 12–30 főt visz, 37 km/h sebességgel, 75 km hatótávval, és már közösségi közlekedésben is használják. (41. ábra) [6][7]

Jól látható tehát, hogy létezik hidrogén üzemanyagcellával üzemelő, nagy sebességre képes kis utasterű-, csak úgy, mint akkumulátorokkal felszerelt, nagy kapacitású, de lassabb hydrofoil jármű. Az, hogy ennek a kettőnek az ötvözése lehetséges-e és ha igen hogyan, ezen szakdolgozat témája. A cél, egy nagy sebességű, hatótávú és személykapacitású jármű megalkotása, amely működése közben a lehető legkisebb mértékben terheli a környezetet.

	<i>Candela P12</i>	<i>Chase Zero</i>
<i>Hossz (m)</i>	11.99	13
<i>Tömeg (kg)</i>	8500	5600
<i>Befogadóképesség (fő)</i>	12	8
<i>Cirkálósebesség (km/h)</i>	46.3	55.56
<i>Végsebesség (km/h)</i>	55.56	92.6

41. ábra Versenytársak főbb adatai¹¹⁹

4.1. Irodalomkutatás

Egy ilyen tervezési folyamat megkezdéséhez elsődlegesen meg kellett tudnom, létezik e már hasonló jármű tervezését jól dokumentáló publikáció. Sajnos azonban ilyen munkát nem találtam. Ez azonban felvetette a problémát, hogy a megkapott adatok hogyan lesznek visszaellenőrizhetőek, ha nincsen semmilyen viszonyítási alap. Ennek orvosolására az általam megvizsgált, és a témához leginkább köthető publikációkat két táblázatba gyűjtöttem. Az elsőben (42. ábra) a visszaellenőrzéshez elegendő, minimum 4, releváns, adattal rendelkező publikációkat gyűjtöttem. A másodikba (43. ábra) pedig azokat, amelyeket bár átvizsgáltam, túl sok adat hiányzott belőlük, hogy iránymutatónak lehessen őket tekinteni.

<i>Publikáció címe</i>	<i>Hivatkozás</i>	<i>Tömeg (kg)</i>	<i>Hossz (m)</i>	<i>Kiemelkedési sebesség (km/h)</i>	<i>Teljesítmény-szükséglet (hp)</i>	<i>Végsebesség (km/h)</i>
<i>Design and Build of a Hydrofoil Boat</i>	[8]	257	4.39	9.3	4.3	-
<i>Design and Construction of a Hydrofoil Watercraft</i>	[9]	250	4.42	15.6	10	19.6
<i>Development of Small-Scale Unmanned Hydrofoil Boats</i>	[10]	4.5	0.61	16.2	-	43.2
<i>Hydrodynamic Design of Fixed Hydrofoils for Planing Craft</i>	[11]	8025	11	37	-	55.6
<i>The Design of a Hydrofoil System for Sailing Catamarans</i>	[12]	2600	11.2	16.2	-	46
<i>Design of Hydrofoil for the resistance improvement of</i>	[13]	125.4	2.75	37	-	74

¹¹⁹ Versenytársak főbb adatait összefoglaló táblázat, saját készítésű ábra

<i>planing boat based on CFD technology</i>						
<i>Design and Fabrication of a Remote-Controlled Hydrofoil Prototype</i>	[14]	22.7	2.44	20.52	0.16	34.2
<i>Design and Assessment of a Super High Speed, Hybrid Hydrofoil/SWATH Crew Boat</i>	[15]	142170	20	33.3	-	157
<i>Hydrofoil deployment mechanism for rescue boat</i>	[16]	2600	8	32.4	-	65

42. ábra Elegendő releváns adatot szolgáltatni képes publikációk listája¹²⁰

¹²⁰ Elegendő releváns adatot szolgáltatni képes publikációk listája, saját készítésű ábra

<i>Publikáció címe</i>	<i>Hivatkozások</i>	<i>Tömeg (kg)</i>	<i>Hossz (m)</i>	<i>Kiemelkedési sebesség (km/h)</i>	<i>Teljesítmény-szükséglet (hp)</i>	<i>Végsebesség (km/h)</i>
<i>On the design, construction, and testing of a fully-submerged canard hydrofoil system for a low-speed solar boat</i>	[17]	294.7	6	13.7	-	-
<i>Dynamic Stability Analysis of a Hydrofoiling Sailing Boat using CFD</i>	[18]	140	5	36	-	-
<i>Conceptual Design of multifunctional Hydrofoil Vessel 'Afalina'</i>	[19]	-	44.3	-	-	100
<i>Analysis and Optimization of Hydrofoil for Laser Sailboat</i>	[20]	83	-	14.8	-	-
<i>Investigation of front hydrofoil position influence on the hydrofoil-assisted craft</i>	[21]	1987	9	-	-	55.6
<i>Design and Construction of a Fully Submerged Hydrofoil Drone Boat</i>	[22]	14.1	1.53	4	-	-

<i>Design-Driven Innovation: Sustainable Luxury High-Speed Rigid Wing Hydrofoil</i>	[23]	-	-	-	-	92.6
<i>Flexible Hydrofoil Optimization for America's Cup</i>	[24]	-	15.2 4	-	-	64.8
<i>Human Powered Hydrofoil Design & Analytic Wing Optimalization</i>	[25]	-	-	12.6	0.4	18

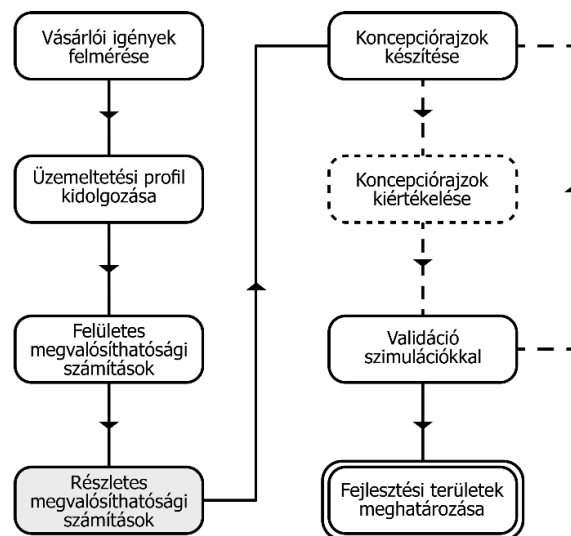
43. ábra Elégtelen releváns adatot szolgáltatni képes publikációk listája¹²¹

¹²¹ Elégtelen releváns adatot szolgáltatni képes publikációk listája, saját készítésű ábra

5. Tervezési követelmények és üzemeltetési profil

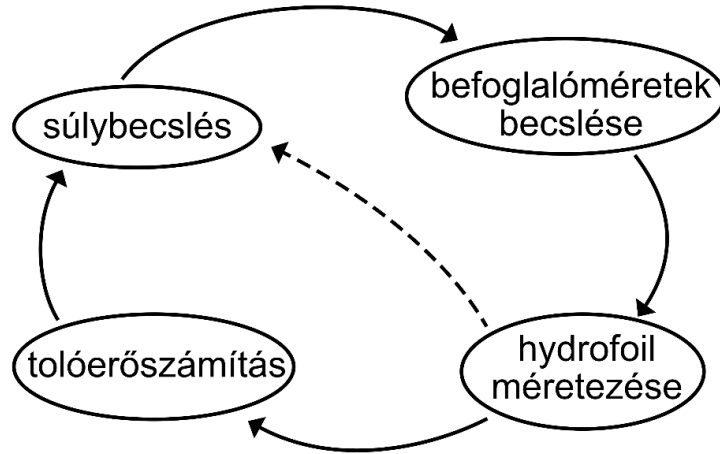
Az piackutatás eredményeinek megvizsgálása után kerültek lefektetésre a tervezési feladat sarokkövek. Az alábbi négy követelmény került kitűzésre:

- Utazósebesség: 100 km/h
- Kapacitás: 10 fő utas + 2 fő személyzet
- Maghajtás: hidrogén üzemanyagcella
- Fel-és leszállások száma: 20



5.1 Teljesítményigények

A tervezési folyamat megkezdésében a legfőbb kihívás, hogy a meghatározni kívánt adatok nagyban függenek egymástól. A kívánt 100 km/h feletti sebesség tartásához szükséges teljesítmény nagyban függ a leküzdendő ellenállásoktól. Az függ a jármű nedvesített felületétől, mivel egy hydrofoil hajó a legnagyobb áramlási ellenállással a hajótest kiemelkedése előtt találkozik. Az áramlási veszteség egyrészt a hajótest nedvesített felülete által generált ellenállás, másrészt a szárnyprofilok által kifejtett ellenállás összege. Ezek meghatározásához szükség van a hajó méreteire, illetve a tömegére, amihez aztán konstruálhatók maguk a szárnyak, hiszen ezeknek képesnek kell lenniük kiemelni a járművet. A tömeg nagyban függ a hordozni kívánt tehertől, valamint a hajtásrendszertől. A hajtásrendszer tömege pedig a szállítani kívánt teher függvénye, amivel a kör bezárul.



44. ábra. Számítási körfolyamat¹²²

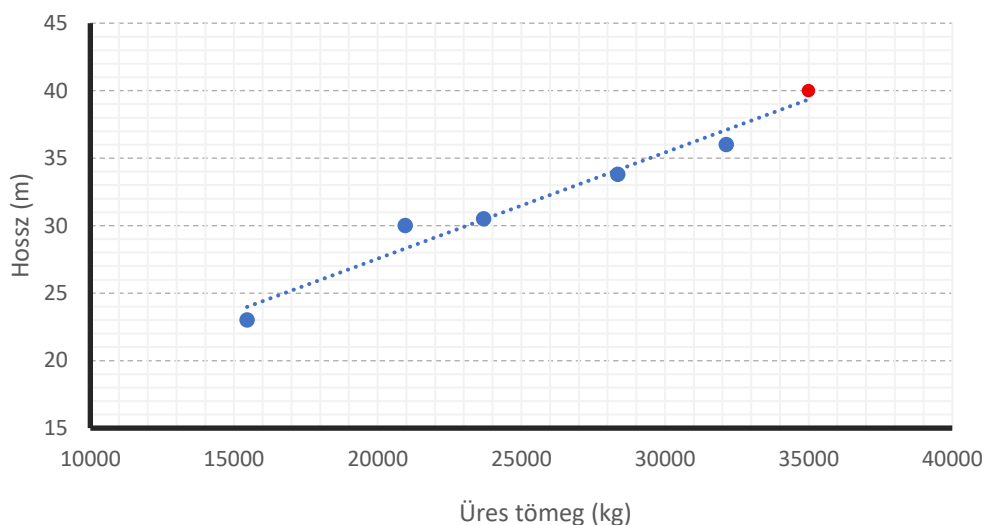
Jól látszik, hogy ez egy olyan iteratív folyamat, ahol szükségképpen valamilyen kezdő feltételezés felállítása szükséges, majd ez alapján a számítások elvégzése után, ha a választott értékek a számítások körbeéréseivel visszaigazolják saját magukat, vissza kell térni a folyamat elejére, hogy a kapott értékek újbóli behelyettesítésével finomítók legyenek a végeredményünkön. Kutatásaim során azonban sajnos ilyen típusú számítási módszertant nem találtam, pontos lépésekkel és jól definiált ciklus tervvel, amit támpontként használva elindulhatnék. Azonban van egy ehhez nagyon hasonló tervezési folyamatot igénylő jármű típus, a repülőgépek.

A tömeg és a hossz kezdeti becsléséhez épp ezért magángépeket vettem alapul. Az alábbi 5 gépből álló táblázatban (45. ábra) és diagrammon (46. ábra) látható felsorolt gépek hossza és üres tömege. Az ezen adatok alkotta trendvonal meghosszabbításába pozicionáltam a saját értékeimet. Mint említettem, igyekeztem minden területen túlbiztosítani a számításokat, így itt is a lista többi eleménél nagyobb értéket adtam meg.

¹²² Számítási körfolyamat, saját készítésű ábra

	Üres tömeg (kg)	Hossz (m)
<i>Dassault Falcon 7x</i>	15454.8	23
<i>Gulfstream V</i>	20956	30
<i>Bombardier Global 5999</i>	23691	30.5
<i>Bombardier Global 7499</i>	28349	33.8
<i>Embraer Lineage 999</i>	32132	36
Saját koncepció	35000	40

45. ábra. Szállítani kíván személyszám befogadására képes magánrepülőgépek tömege és hossza saját becsült értékkel¹²³

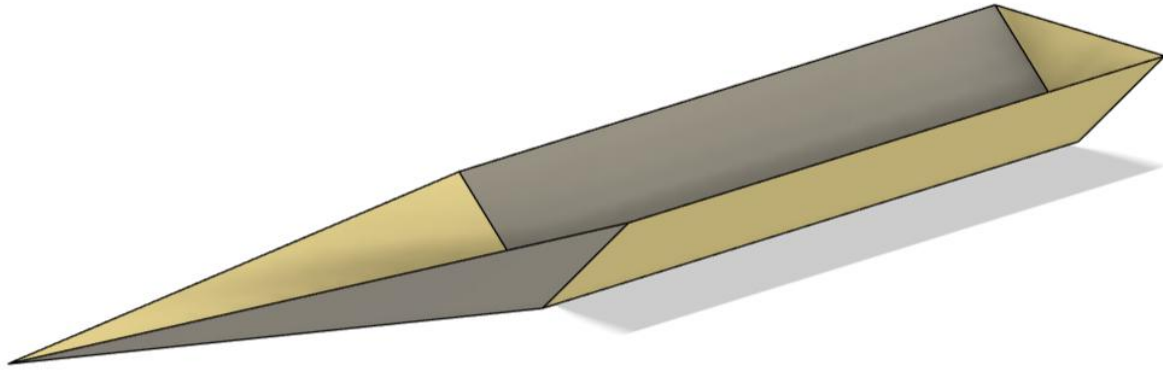


46. ábra. Magánfelhasználású repülőgépek tömegének és hosszának trenddiagramja, pirossal a saját becsült érték¹²⁴

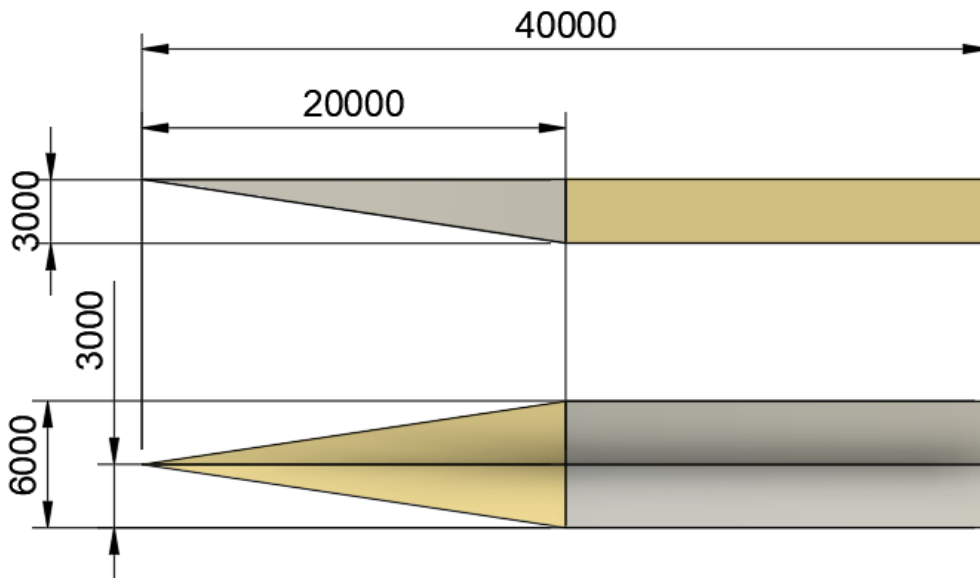
A hajótest nedvesített felületének kiszámításához egy közelítő modellt készítettem (47. ábra), (48. ábra). Az alábbi ábrákon modell méretei láthatók. 40 méter hosszú, maximum szélessége 6 méter, mélysége 3 méter. Az orr rész 20 méternél éri a teljes szélességet. Ennek a teljes felületét használtam későbbi számításaim során nedvesített felületként, ami 264.02 m²-re adódott.

¹²³ Szállítani kíván személyszám befogadására képes magánrepülőgépek tömege és hossza saját becsült értékkel, saját készítésű ábra. Az adatok a Globalair weboldaláról származnak [28]

¹²⁴ Magánfelhasználású repülőgépek tömegének és hosszának trenddiagramja, pirossal a saját becsült érték, saját készítésű ábra



47. ábra. Nedvesített felület meghatározásához tervezett modell, axonometrikus nézet¹²⁵



48. ábra. Nedvesített felület meghatározásához tervezett modell, izometrikus nézet¹²⁶

A számításokhoz D.J. Ower és S.D. Probert [26] tanulmányában szereplő képleteket használtam. Ezek alapján az alábbi módon számítottam ki a hajótest által generált ellenállást, a hydrofoilok profilellenállását és a hydrofoilok indukált ellenállását. Ehhez szükséges a G [N] a jármű súlya, amit az alábbi (1) összefüggéssel meghatároztam [26]:

$$G = m \cdot g \quad (1)$$

Ahol m [kg] a jármű feltételezett tömege, g [m/s²] pedig a nehézségi gyorsulás. Az $m = 35000$ kg, a nehézségi gyorsulás értéke pedig $g = 9.81$ m/s². Behelyettesítve (2):

$$G = 35000 \cdot 9.81 = 343350 \text{ N} \quad (2)$$

A $V_{feszálló}$ [m/s] a vízből való kiemelkedéshez szükséges sebesség meghatározása az alábbi (3) egyenlet alapján történt [26]:

$$V_{feszálló} = \frac{2 \cdot G}{\frac{1}{2} \rho \cdot C_L \cdot s \cdot c \cdot N} \quad (3)$$

Ahol G [N] a jármű súlya, C_L [-] a hydrofoilok profiljaira jellemző felhajtóerő tényező, N [db] pedig a hydrofoilok száma, ρ [kg/m³] a víz sűrűsége, s [m] a hydrofoilok szélessége, c [m] pedig a hydrofoilok húr hossza. G -t már fentebb (2) meghatároztuk, a $C_L = 0.76$. Ennek

¹²⁵ Nedvesített felület meghatározásához tervezett modell, axonometrikus nézet, saját készítésű ábra

¹²⁶ Nedvesített felület meghatározásához tervezett modell, izometrikus nézet, saját készítésű ábra

értékét a fent említett [26] tanulmányban meghatározott értéken hagytam. A hydrofoilok száma 4, a víz sűrűsége 997 kg/m^3 . Az $s = 4 \text{ m}$, a $c = 2 \text{ m}$. Ezeket a későbbi számítások során finomítottam, de kiindulásnak megfeleltek. Behelyettesítve (4):

$$V_{\text{felszálló}} = \frac{2 \cdot 343350}{\frac{1}{2} \cdot 997 \cdot 0.76 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4} = 5.3217 \text{ m/s}^2 \quad (4)$$

$D_{\text{hajótest}}$ [N] a hajótest által termelt ellenállást két kritikus időpillanatban vizsgáltam, az első a vízből való kiemelkedés, a második pedig a tervezett maximum sebesség elérése. Mindkét érték kiszámítása az alábbi (5) képlet szerint történt [26]:

$$D_{\text{hajótest}} = 1.27 \cdot A_{ws} \cdot V^{3.5} \quad (5)$$

Ahol A_{ws} [m^2] a nedvesített felület és V [m/s] a jármű vízhez viszonyított sebessége. A_{ws} a fenti modell alapján 264.02 m^2 -re adódott. A hajótest ellenállását két kritikus időpillanatban vizsgáltam, az első a vízből való kiemelkedés, a második pedig a tervezett maximum sebesség elérése. A felszállás pillanatában a hajótesten fellépő ellenállás a fenti képletbe (5) a $V_{\text{felszálló}}$ érték behelyettesítésével kapható meg (6):

$$D_{\text{hajótest,felszálló}} = 1.27 \cdot 264.02 \cdot 5.3217^{3.5} = 116581.6 \text{ N} \quad (6)$$

A másik kritikus pillanat a végsebesség, azaz $V = 27.78 \text{ m/s}$ elérése, mivel azonban fentebb (4) kiadódott, hogy a hajótest már $V = 5.3217 \text{ m/s}$ sebességnél kiemelkedik, így $A_{ws} = 0$. Behelyettesítve (7):

$$D_{\text{hajótest,végsebesség}} = 1.27 \cdot 0 \cdot 27.78^{3.5} = 0 \text{ N} \quad (7)$$

Ezáltal minden $V_{\text{felszálló}}$ sebességnél gyorsabb haladás esetén csak a hydrofoilok által termelt ellenállás számításba vétele szükséges.

A D_{hf} [N] az egy hydrofoil által generált ellenállás az alábbi (8) összefüggéssel határozható meg [26]:

$$D_{hf} = C_D \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot s \cdot c \quad (8)$$

Amely képletben C_D [-] a hydrofoilok profiljainak áramlástanai ellenállási együtthatója. Csakúgy, mint a hajótest által generált ellenállás esetében, ez is a két fő időpillanatban, a felszállás és a végsebesség elérésének pillanatában szükséges meghatározni. Ezek kiszámítása közötti fő különbséget itt is a sebességkomponens változása jelenti. Mindezek alapján $D_{hf, \text{felszálló}}$ az alábbi módon adódik határozható meg (9) [26]:

$$D_{hf, \text{felszálló}} = C_D \cdot \frac{\rho \cdot V_{\text{felszálló}}^2}{2} \cdot s \cdot c \quad (9)$$

Behelyettesítve (10):

$$D_{hf, \text{felszálló}} = 0.102 \cdot \frac{997 \cdot 5.3217^2}{2} \cdot 4 \cdot 2 = 1152.3 \text{ N} \quad (10)$$

Ugyanígy a fenti (8) összefüggésbe a $V_{\text{végsebesség}} = 27.78 \text{ m/s}$ komponenssel behelyettesítve kapható meg a $D_{hf, \text{végsebesség}}$ [N] az alábbi módon (11) [26]:

$$D_{hf, \text{végsebesség}} = C_D \cdot \frac{\rho \cdot V_{\text{végsebesség}}^2}{2} \cdot s \cdot c \quad (11)$$

Behelyettesítve tehát (12):

$$D_{hf, \text{végsebesség}} = 0.102 \cdot \frac{997 \cdot 27.78^2}{2} \cdot 4 \cdot 2 = 313870.4 \text{ N} \quad (12)$$

6. A repülőgéptervezési módszerek adaptálása

A hydrofoil járművek pontos méretezése egy rendkívül komplex és szerteágazó folyamat. Bár a hajók méretezésének kérdésével több szakirodalom is foglalkozik, egy hydrofoil jármű hajóteste mozgásban töltött idejének csupán pár százalékát tölti a vízben. Ebből következően áramlástanilag és energiafelhasználás tekintetében is kifizetőbb, ha a méretezés a levegőre történik.

A dolgozatom ezen szakaszában szeretném Pizarro Arduino Juan Pablo „Conceptual design of a hydrogenpowered hydrofoil watercraft for urban shared mobility” [27] című szakdolgozatának eredményeit ismertetni. Mivel a részletes számításokat az általa elkészített munka mélyrehatóbban tárgyalja, így következzen az ő eredményeinek rövid összefoglalása, amikkel aztán a saját, kezdeti számításaim eredményeit frissítve folytatom a fejlesztést.

A számítások szerint a tervezett követelmények teljesíthetők, és a koncepció paraméterei az elvárásoknak megfelelően alakíthatók. Az ezekhez tartozó végleges számítási értékek a következők (49. ábra):

Maximum felszállótömeg [kg]	6662
Üzemanyag tömege [kg]	128.32
Hajtáslánc tömege [kg]	796
Hajótest szabad tömege [kg]	4039
Szükséges szárnyfelület [kg]	1.063
Tolóerőszükséglet [hp]	517
Hajótest minimális hossza [m]	14.74

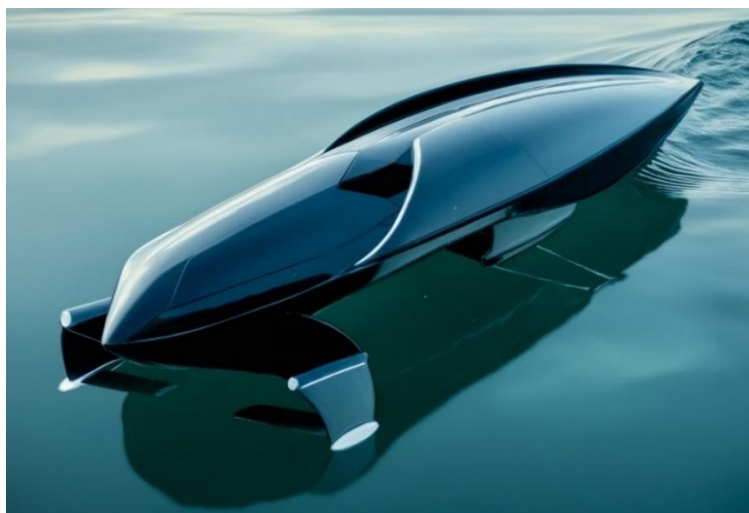
49. ábra. Részletes számítások által szolgáltatott adatok¹²⁷

7. Saját koncepciórajz bemutatása

A koncepció vizualizálásánál szándékosan eltávolodtam a hagyományos hajóformától, mert a hydrofoil járművek többsége még mindig felnagyított modellhajó benyomását kelti. Bár a megszokott testforma praktikus a vízből való kiemelkedésnél és a gyakori indulás–megállás során, valamint költséghatékonyabb a meglévő platformok módosítása, ezek a megoldások gátolják a valódi formai újítást. A vízből vékony lábakon kiemelkedő, a felszín felett sikló test olyan tervezési szabadságot ad, amely túlmutat a hajó- és repülőgéptervezés megszokott keretein. A cél egy olyan megjelenés volt, amely nem „szárnyas hajóra” emlékeztet, hanem egy teljesen új, sci-fi hangulatú járműre.

A részletes számításokból látszik, hogy a minimum hossz az előzetesen feltételezett 40 méter helyett csak 14.74 méter. Ám ez a becslés inkább kocka formával kalkulált, mintsem egy elnyújtottabb áramvonalas kialakítással. Hogy a belső tér mérete nagyrészt változatlan maradjon, a koncepciórajzok és a későbbi modell teljes hosszát 20 méterben határoztam meg. Mindezek alapján több elkészült koncepció közül az alábbi (50. ábra) választottam végleges tervnek:

¹²⁷ Részletes számítások által szolgáltatott adatok, saját készítésű ábra

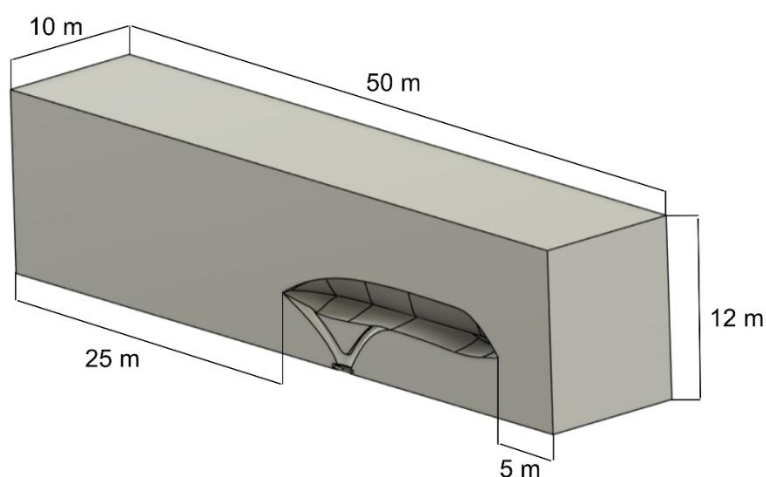


50. ábra. Saját tervezésű hydrofoil jármű koncepciórajza¹²⁸

8. A koncepció CFD szimulációs vizsgálata

A fejlesztési folyamat folytatásához elengedhetetlen az erre rászoruló területek meghatározása. Ennek egyik fő területe a forma. A választott koncepció vizsgálatához egy vízfelszíni hidrodifrakciós és egy, a víz fölé emelkedő járműtestet vizsgáló szimulációt készítettem.

A szimulációk Ansys Fluent szoftverrel készültek. Mivel a hydrofoilok nem kerültek méretezésre, így a szimulációkban használt modellen is nélkülöztem őket. Az őket tartó lábakat megtartottam, mert vizsgálni szerettem volna, milyen mértékben verik fel haladásuk során a vizet, esetlegesen szorulnak-e még jövőbeli fejlesztésre. A szimulációs tér a jármű előtt 5 méter, mögötte 25 méter, magassága 12 méter, szélessége 10 méter, legalsó pontja a feltételezett vízfelszín alatt 1 méterrel helyezkedik el (51. ábra). A szükséges számítási teljesítménnyel való spórolás érdekében, a szimulációs tér határait a megszokottnál szorosabbra húztam a modell körül. A feltételezés az volt, hogy mivel nem számítottam jelentős mértékű turbulenciára, a kisebb méretű szimulációs tér nem befolyásolja jelentős mértékben a végeredményeket.

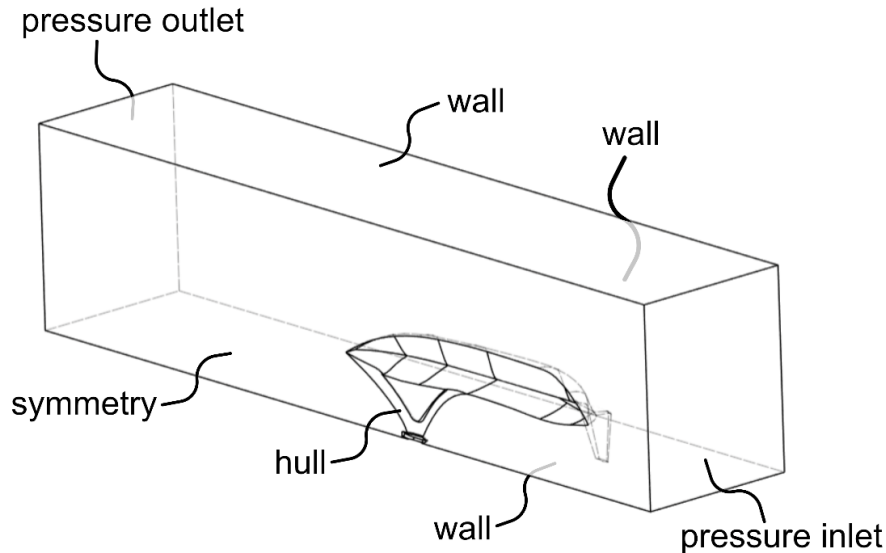


51. ábra. Szimulációs tér méretei¹²⁹

¹²⁸ Saját tervezésű hydrofoil jármű koncepciórajza, saját készítésű ábra

¹²⁹ Szimulációs tér méretei, saját készítésű ábra

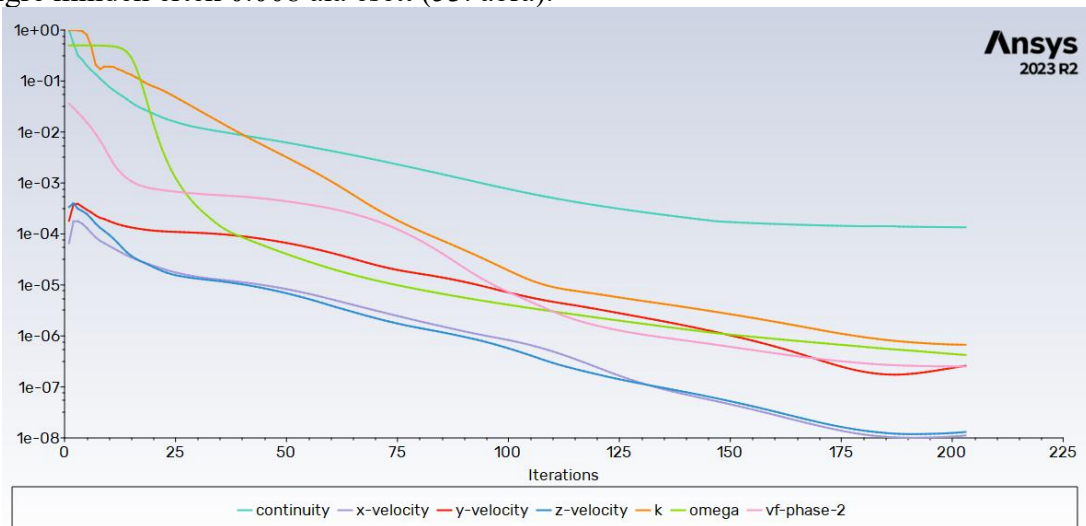
A szimulációs tér felépítése az alábbi ábrán (52. ábra) látható. Ugyancsak a szükséges számítási idő és teljesítmény csökkentésének céljából, a szimulációkat az YZ síkkal elmetstett, fél-járműre futtattam, majd az eredmények feldolgozása során az eredmények tükrözésével értem el, hogy a teljes jármű vizsgálhatóvá váljon.



52. ábra. Szimulációs tér felépítése¹³⁰

A háló 1 594 987 cellát tartalmaz, az alap cellamérete 0.2 m, „body of influence” parancssal készült, 1.2-es növekedési rátával.

A két fázishoz az Ansys beépített „air” és „water liquid” adatait használtam. A vízfelszín a szimulációs tér alsó síkjától pozitív Z irányban 3 méterre helyezkedik el. A kontinuum sebessége 27.88 m/s. A maximum iterációs számot 1000-re állítottam, a reziduálok alsó határát pedig 0.0001-re. Ezen határok elérése esetén a szimuláció automatikusan megállítja magát. A szimuláció SST k-omega turbulenciamodellel futott 0.5-ös time scale factor-ral. Erőforráshiány és a reziduálok viszonylagos stagnálása miatt 200 iteráció után a szimulációt megállítottam. Eddigre minden érték 0.008 alá esett (53. ábra).

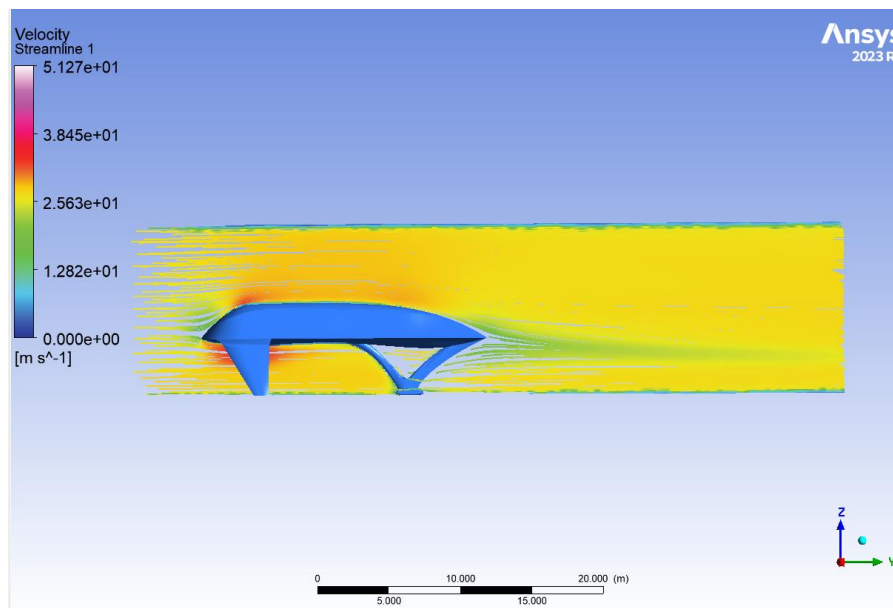


53. ábra. Szimulációs állandók¹³¹

¹³⁰ Szimulációs tér felépítése, saját készítésű ábra

¹³¹ Szimulációs állandók, saját készítésű ábra

Az YZ felületre megjelenített áramlási vonalakon látható (54. ábra), hogy két kiugróan magas áramlási sebességű terület van. Az egyik a szárnyak vonalában, a jármű tetején, ami vélhetően a jármű előtt megrekedt levegőn való átbukás pontján jelentkezik. Ez a feltorló levegő, ami magyarázat lehet a jármű orránál jelentkező alacsony sebességű zónára. A másik ilyen nagysebességű zóna a jármű alján, a szárnyak bekötései között található. Ez önmagában problémát nem jelent, viszont, ha extra felhajtóerő generálása a cél, a „gorund effekt” kihasználásával, akkor ez az a terület, ahol a szárnyak bekötésével a levegő némileg lassítható, ezzel extra felhajtóerőt termelve. Ez egyben növeli a légellenállást is, így a jövőben érdemes lehet megvizsgálni, megéri-e a víznél majdnem ezerszer kisebb sűrűségű levegőben felhajtóerőt termelni az extra légellenállás ellenére is. A jármű mögött az áramlás sebessége bár lecsökken, a formát követve rendezetten válik le a felületről, látványosabb méretű leválás vagy turbulencia nélkül.



54. ábra. Áramlási vonalak az YZ síkon¹³²

Egy teljesértékű CFD szimulációs vizsgálati folyamatban a fentiek után megszokott még a hálófolytonossági- és validációs vizsgálatok elvégzése. Ezek egy CFD szimulációs eredmény folyóiratban való publikálásának elengedhetetlen lépései. Ezen lépésektől a szakdolgozatom folyamán tudatosan eltekintettem. Ennek egyik oka, hogy nincs lehetőségem valós adatokat produkáló, reprezentatív validációt végezni. Másik érv ezen lépések kihagyása mellett, hogy a fentebb elvégzett szimuláció egy fejlesztési folyamatnak nem a végterméke, csupán egy folyamatközi önellenőrzési eljárás. Ennélfogva pedig hasznosabb, több, alacsonyabb részletességű, de még értékelhető minőségű szimuláció használata, mint kevés és magas erőforrásigényű szimuláció, amelyek hosszú futásidejük miatt sokszor nem képesek érdemben hozzátenni a fejlesztési folyamathoz.

9. Konklúzió

A számítások alapján a jármű megvalósíthatónak tűnik, még ha számos kérdés nyitva is maradt. Az eredeti méret- és tömegbecslés erősen túlzó volt, így a 20 méteres verzió már reálisan kezelhető. A jelenlegi eredmények azt mutatják, hogy a 100 km/h-s utazósebesség hidrogénnel és üzemanyagcellás villanymotorokkal is tartható, zero helyi emisszió mellett. Ez a

¹³² Áramlási vonalak az YZ síkon, saját készítésű ábra

megközelítés új irányt nyithat a vízi járművek tervezésében, és hosszabb távon akár városi környezetben is általánossá válhat.

A munka fő fókuszja a kivitelezhetőség igazolása volt, de a megoldatlan feladatok listája még hosszú: a hydrofoilok pontos méretezése, a generált nyomatékok kezelése, a pattogás kiküszöbölése, a hidrogénrendszer kidolgozása, a vezérlés, a kormányzás és a tartószerkezet megtervezése mind további munkát igényel. A szimulációk azt sugallják, hogy optimalizálásokkal a modell teljesítménye tovább javítható. Bár önmagában nem forradalom, az ilyen járművek fontos szerepet kaphatnak a jövő gyorsabb, hatékonyabb és fenntarthatóbb közlekedésében.

10. Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani konzulensemnek, Dr. Feszty Dánielnek a projektbe fektetett hitéért, a szakami iránymutatásért és a közös munkára áldozott megannyi időért. Visszajelzései és támogatása nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre. Hálával tartozom továbbá Lepsényi Imrének és Tárnok Zsoltnak a projekt ötletelési és dizájn fázisában nyújtott segítségükért és tanácsaikért. Köszönettel tartozom családomnak és barátaimnak biztatásért és támogatásért. Végül köszönöm mindazoknak, akik bármilyen formában hozzájárultak a munkám elkészültéhez. A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] Y. Gao and J. Zhu, “Characteristics, Impacts and Trends of Urban Transportation,” *Encyclopedia*, vol. 2, no. 2, pp. 1168–1182, Jun. 2022, doi: 10.3390/encyclopedia2020078.
- [2] L. Wang, W. Shen, H. Xie, J. Neelamkavil, and A. Pardasani, “Collaborative conceptual design-state of the art and future trends,” 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/cad
- [3] W. Hsu and I. M. Y. Woon, “Current research in the conceptual design of mechanical products,” 1998.
- [4] F. M. N. U. Khan, M. G. Rasul, A. S. M. Sayem, and N. Mandal, “Maximizing energy density of lithium-ion batteries for electric vehicles: A critical review,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 11–21, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.08.069.
- [5] Ryan O’Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, and Fritz B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals*. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc., 2016.
- [6] Gustav Hasselskog, “Candela P12 .”
- [7] “McConaghy Boats.”
- [8] N. L. Basinger, “Design and Build of a Hydrofoil Boat,” 2022.
- [9] R. Nall, “Design and Construction of a Hydrofoil Watercraft,” 2022.

- [10] N. T. Thompson, P. R. Whitworth, and K. I. Matveev, "Development of small-scale unmanned hydrofoil boats," *J Unmanned Veh Syst*, vol. 9, no. 1, pp. 21–32, 2021, doi: 10.1139/juvs-2019-0019.
- [11] E. D'Amato, I. Notaro, V. Piscopo, and A. Scamardella, "Hydrodynamic Design of Fixed Hydrofoils for Planing Craft," *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/jmse11020246.
- [12] H. N. Loveday, G. Migeotteo, and T. W. Von Backström, "The Design of a Hydrofoil System for Sailing Catamarans," 2008.
- [13] H. Shen, Q. Xiao, J. Zhou, Y. Su, and X. Bi, "Design of hydrofoil for the resistance improvement of planing boat based on CFD technology," *Ocean Engineering*, vol. 255, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111413.
- [14] J. Close et al., "Design and Fabrication of a Remote-Controlled Hydrofoil Prototype," 2019.
- [15] B. Vasileios Georgiadis, S. Br olara, A. Director, and D. E. Hardt, "Design and Assessment of a Super High Speed, Hybrid Hydrofoil/SWATH Crew Boat," 2014.
- [16] F. Byström, "Hydrofoil deployment mechanism for rescue boat," Gothenburg, 2023.
- [17] N. Putnam, C. Wagner, and E. W. Engstrom, "On the design, construction, and testing of a fully-submerged canard hydrofoil system for a low-speed solar boat," Cedarville, 2014.
- [18] A. Bagué, "Dynamic Stability Analysis of a Hydrofoiling Sailing Boat using CFD," 2019.
- [19] I. B. Abbasov and V. V. Orekhov, "Conceptual design of multifunctional hydrofoil vessel 'afalina,'" in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1399/4/044020.
- [20] R. Barie, "Analysis and Optimization of a Hydrofoil for a Laser Sailboat," 2019.
- [21] K. Akbari Wakilabadi, H. R. Ghafari, and H. Ghassemi, "Investigation of front hydrofoil position influence on the hydrofoil-assisted craft," *Ocean Engineering*, vol. 304, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117901.
- [22] J. Poss, "Design and Construction of a Fully Submerged Hydrofoil Drone Boat," 2023.
- [23] S. McCartan, E. Stubbs, N. Crea, and M. Hopper, "Design-Driven Innovation: Sustainable Luxury High Speed Rigid Wing Hydrofoil," in *Marine Design 2015*, RINA, Sep. 2015, pp. 85–104. doi: 10.3940/rina.md.2015.16.
- [24] M. Sacher et al., "Flexible hydrofoil optimization for the 35th America's Cup with constrained EGO method," *Ocean Engineering*, vol. 157, pp. 62–72, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.047.
- [25] A. Gunkler and C. M. Archibald, "Human Powered Hydrofoil Design & Analytic Wing Optimization," American Society for Engineering Education, 2011.

- [26] D. J. Owers and S. D. Probert, "A Human-Powered Hydrofoil Racing-Boat: Design and Development," 1985.
- [27] Pizarro Arduino Juan Pablo, "Conceptual design of a hydrogen-powered hydrofoil watercraft for urban shared mobility," Széchenyi István Egyetem, Győr, 2025.
- [28] "GlobalAir Aviation."

Szilárdtest akkumulátorok és integrációjuk elektromos hajtásláncú járművekhez

Solid-State Battery and their integration in electric powertrain vehicles

Szabó Csaba Keve

Széchenyi István Egyetem
keve.csaba.szabo@gmail.com

Absztrakt: Dolgozatomban a BMW I3 tisztán elektromos gépjármű akkumulátor csomagjába integráltam bele egy új technológiának számító szilárdtest akkumulátort. Célom ezzel az volt, hogy a két akkumulátor csomag eredményeit egymással összevetve megmutassam mire képes jelenleg, és mire lenne képes az elképzelések szerint az új akkumulátor technológia a jelenlegiekhez képest. Számításokkal alátámasztva a jármű ezzel az új akkumulátor csomaggal jobb távolságokat lesz képes megtenni hasonló fogyasztások mellett. Az általam vizsgált szilárdtest akkumulátor csak prototípusként létezik egyelőre, azonban már így is jobbnak és biztonságosabbnak bizonyult mint a jármű eredeti cellái. Az új akkumulátor csomagot a cellák méretéből adódó sokasága, és az alacsony kapacitása miatt más cellakötéssel terveztem meg, így az általam beépített prototípus cellái 40-45 %-kal nagyobb hatótávot biztosítanak a jármű számára.

Kulcsszavak: biztonságos, új technológia, jobb hatásfok

Abstract: In my thesis, I integrated a new, solid-state battery technology into the battery pack of the purely electric BMW i3. My aim was to compare the results of the two battery packs and demonstrate what current technology is capable of, as well as what the new battery technology could achieve in comparison. Supported by calculations, the vehicle equipped with this new battery pack would be able to cover greater distances with similar energy consumption. The solid-state battery I examined currently exists only as a prototype, yet it has already proven to be better and safer than the vehicle's original cells. Due to the large number of cells resulting from their size and their low capacity, I designed the new battery pack with a different cell configuration. As a result, the prototype cells I integrated provide 40–45% more range for the vehicle.

Keywords: safe, new technology, improved efficiency

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb teret nyernek az elektromos járművek, ugyanis a környezetre gyakorolt hatásuk kisebb, mint a belső égésű társaiké. Az elektromos járművek egyik legnagyobb előnye, hogy csökkenthetik a közlekedés okozta üvegházhatású gázok kibocsátását. A belső égésű motoros járművekhez képest az elektromos járművek működése kevesebb emisszióval jár, így nagyban hozzá tudnak járulni a levegőminőség javításához, különösen a nagyvárosokban. Az elektromos járművek egyik legfontosabb komponense az akkumulátor,

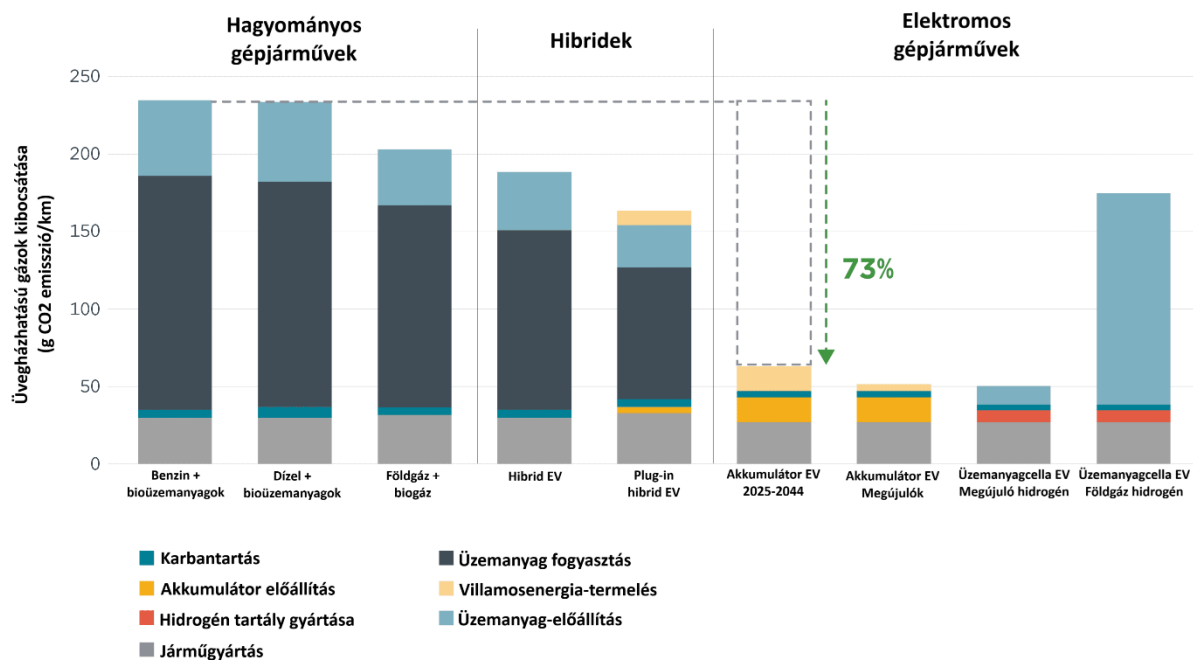
amely meghatározza a jármű hatótávját, teljesítményét és élettartamát. A jelenleg alkalmazott Li-ion (Lithium-ion Battery) akkumulátorok jó energiasűrűséggel rendelkeznek, azonban korlátozottabb a kapacitásuk és biztonsági tényezőjük. Az akkumulátorok fejlődésével egyre nagyobb energiát tudunk kinyerni a cellákból, ezzel együtt növelve a biztonságot. A szilárdtest akkumulátor technológia ígéretes alternatívát kínál, mivel folyékony helyett szilárd elektrolitot tartalmaz, amely növeli a cellák biztonságát, és növelheti az energiasűrűségét.

2. Irodalomkutatás

A fenntarthatóság érdekében egyre nagyobb hangsúlyt helyez az iparág az akkumulátorok újrahasznosítására és a környezetbarátabb gyártási módszerek kidolgozására. Ez részben annak is köszönhető, hogy a Földünk fosszilis tüzelőanyag készletei végesek, így alternatív megoldást kell keresnünk a problémára. [1,9,10]

A 1. ábrán látható az előrevetített éves károsanyag kibocsátás különböző jármű típusoknál.

Az Európai Unióban 2025-ben értékesített személygépjárművek teljes életciklusra vetített üvegházhatású gáz kibocsátása



3. ábra: Károsanyag – kibocsátás¹³³

Az elektromos járművek hajtásláncának legfontosabb és legmeghatározóbb eleme az akkumulátor, amely közvetlenül befolyásolja a jármű teljesítményét, hatótávját, biztonságát és élettartamát. Legelterjedtebb technológiája a Li-ion akkumulátorok, amelynek több fajtáját is használják az iparban. Ezek magas energiaszinttel rendelkeznek, gyors töltést, nagy teljesítményt, hosszú élettartamot, és tartósságot biztosítanak, ugyanakkor kihívásokkal is szembesülünk, hiszen használat és töltés során felmelegsznek, így tűzveszélyessé válhat, degradálódnak és anyagi költségük is van. Ilyenek például az LFP, az NMC/NCA, és az új SSB akkumulátorok. [2,5,8]

¹³³ Marta Negri and Georg Bieker (2025). *Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: A 2025 update and key factors to consider*

2.1 NCA

Az NCA (Nikkel-Kobalt-Alumínium-oxid) akkumulátor a legelterjedtebb az elektromos járművek körében. Jelenleg mind a 18650, 2170, és 4680-as cellaformátumban is alkalmazzák. Összetétele: 80 % nikkel, 15 % kobalt és 5 % alumínium. Az NCA akkumulátorok a Li-ion akkumulátorok egy típusa, amelynél az anód grafitból, a katód nikkelből, kobaltból és alumíniumból áll, ellentétben az NMC (Nikkel-Mangán-Kobalt-oxid) akkumulátorral, ahol az alumínium katód helyett mangánt alkalmaznak. Az alumíniumot a stabilitás növelésére, a magas energiasűrűség, és a hosszabb élettartam növelésére alkalmazzák. Alacsony hőmérsékleten is jól működnek, ami előnyös téli használat esetén, és támogatják a gyors töltési rendszereket, ami javítja az időhatékonyságot. Hosszú élettartamú töltési ciklussal rendelkeznek, és képesek 1000-2000 töltési és kisütési ciklusnak ellenállni. Ezek az akkumulátorok ilyen hosszú élettartamú ciklusok során jelentős kapacitáscsökkenés nélkül működnek. Megfelelő karbantartás és hűtőrendszerek alkalmazása mellett hosszú távon is stabilak és hatékonyak maradnak. [3,5,8]

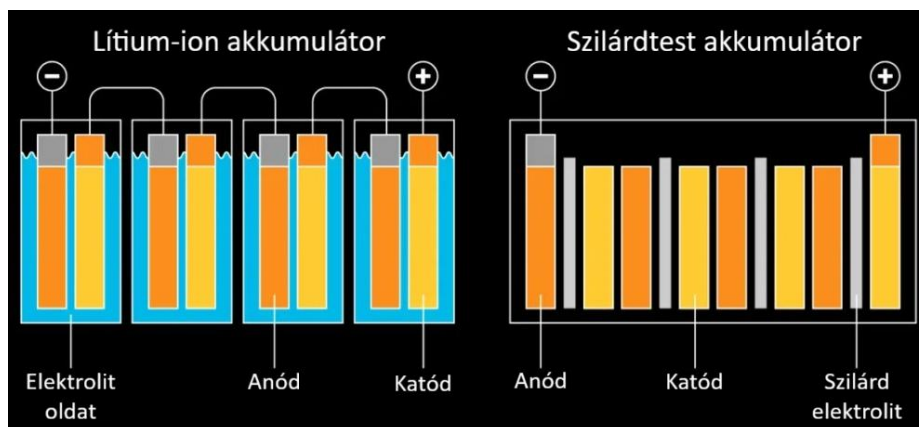
2.2 LFP

Az LFP (Lítium-vas-foszfát) akkumulátor egy olyan lítium-ion típus, amelynek katódja lítium-vas-foszfát alapú, anódja grafit. Ez az akkumulátor ellentétben a hengeres cellaformátumokkal, prizmatikus (téglatest) kialakítású. Összetétele: 4 % lítium, 35 % vas, és 61 % foszfát. Nagyobb hőstabilitással rendelkezik a kobalt alapú kémiai anyagokhoz képest, ezáltal hosszabb távon jobb teljesítményt nyújt, és magasabb hőmérsékleten kevésbé melegszik fel az NCA-hoz képest. Ezért az LFP akkumulátorok olyan alkalmazásokban kedveltek, ahol a biztonság és a hosszú élettartam elsődleges szempont. Ezeket a prizmatikus akkumulátorokat például olyan típusú járművekhez használják, ahol az elsődleges cél az olcsóbb és kisebb méretű akkumulátor csomag, és a hosszabb életciklus a lényeg. Azonban ezzel együtt a megtehető távolság is lecsökken a harmadára. Ezzel szemben az NCA akkumulátorral szerelt járművek több km-t is képesek megtenni. Hosszú 3000-5000 töltési/kisütési ciklussal rendelkeznek. Az LFP akkumulátor cellái prizmatikus kialakításuk miatt helytakarékosak, így nem szükséges cellánként külön-külön modulokba építeni őket. [4,5,8]

2.3 SSB

Az SSB (Szilárdtest) akkumulátor egy olyan új technológia az elektromos járművek számára, mellyel az eddigi akkumulátorokkal elért eredményeket idővel felül tudja múlni. Maga a technológia attól válik érdekessé, hogy az eddig megszokott folyékony vagy gél elektrolitot szilárd elektrolitra cserélik le, így a cella minden fő komponense szilárdfázisú (anód, katód, szeparátor) válik, ezzel növelve a cella merevségét és tartósságát. Biztonság szempontjából tekintve azért előnyösebb a szilárd elektrolit, mert az eltávolított gyúlékony, folyékony komponenseknek a helyére kerámia alapú szeparátort építenek be, amely növeli a hőstabilitást és ad egy nem gyúlékony elválasztóréteget. A magasabb energiasűrűségnek és a gyorsabb töltésnek köszönhetően 50-80 %-kal nagyobb hatótávot (~1200km), kevesebb töltési időt (10-15 perc), és akár 20 éves élettartamot képes biztosítani. A szélsőségesebb hőmérsékleti változásoknak is jobban tud ellenállni (+45°C- -30°C). Jelenleg a technológia még nem teljesen kiforrott, és vannak gyártási nehézségek, mint például a pontos rétegzési és préselési folyamatok, vagy az anyagkutatókat tekintve, mivel a szilárd elektrolit ionvezetési képessége alacsonyabb, mint a folyékony elektrolité. [5,6,7]

A 2. ábrán látható az SSB akkumulátor komponensei.



2. ábra: SSB akkumulátor ²

3. Célok megfogalmazása

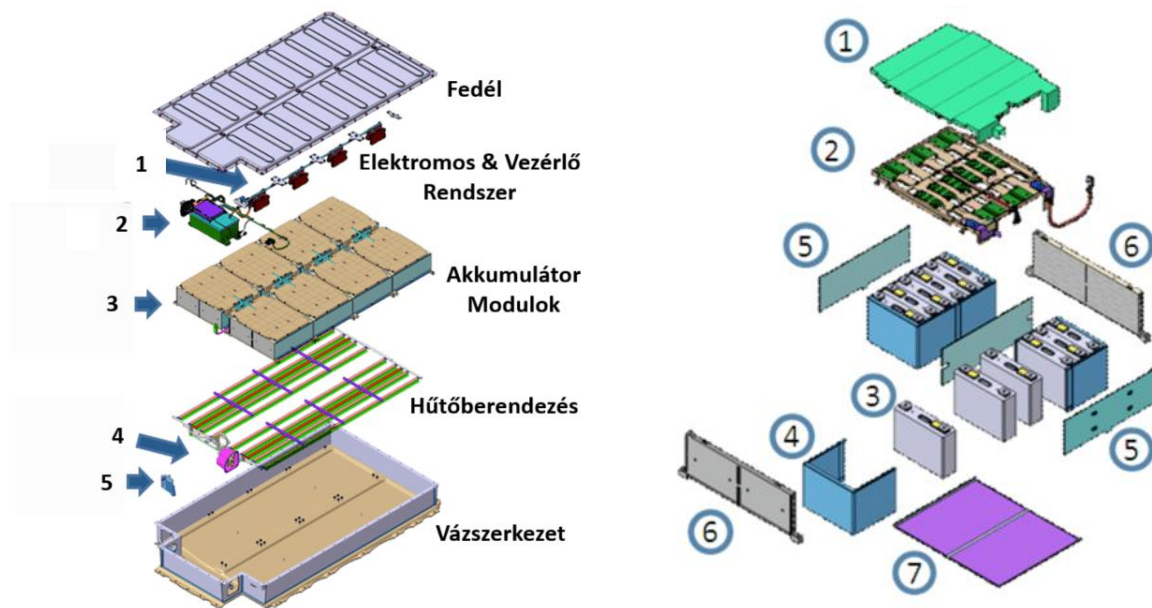
A dolgozatom fő célja, hogy összehasonlítsam egy elektromos jármű eredeti akkumulátor csomagjának specifikációit az új akkumulátorral beszerelt csomag eredményeivel. Cél volt továbbá az is, hogy próbáljam ezt megtenni egy olyan elektromos járműhöz, amelynek gyártását már leállították. Ezzel elősegítve a jövőben azt, hogy egy régebbi járművet is fel lehessen ruházni az új technológiával, így akinek régebbi típusú elektromos járműve van, ezzel elkerülve, hogy a már újabb akkumulátorral szerelt modellt kelljen megvásárolnia. Az projekt megvalósításhoz először szükségem volt egy elektromos járműnek az akkumulátor csomagjára. ¹³⁴Ehhez egy BMW I3 típusú elektromos járművet választottam ki. Azért erre esett a választásom, mivel ennek a típusnak 2022 júniusában leállították véglegesen a gyártását, és az akkumulátor csomagja szerelhetőség szempontjából megfelelő a célok elérésére. Következő lépésben kiválasztásra került a dolgozat fő eleme, az SSB akkumulátor. Itt a QuantumScape által „QSE-5 B Sample” néven, ám csupán prototípusként gyártott SSB akkumulátorra esett a választás, amelyhez minden szükséges adatot megadtak.

4. Kezdeti lépések

Az elektromos jármű típusának kiválasztása után részletesebben utána kellett néznie a hozzá tartozó akkumulátor csomagjának és annak adatainak, amelyben helyet fog kapni az SSB. A BMW I3-ból gyártottak több félért is, és ezek közül a 94 Ah változatot választottam, amelynek egyszerű kialakítású akkumulátor csomagja van.

A 3. ábrán látható a BMW I3 akkumulátor csomag és modul részei.

¹³⁴ Aharon Etengoff (2024). *How much could solid-state batteries improve EV range?*



3. ábra: BMW I3 akkumulátor csomag és modul ¹³⁵

Az akkumulátor csomag részegységei:

1. 8 darab CSC (Cell Supervisory Controller)
2. SME (Smart Module Electronics) és S-Box (Safety/Service-Box)
3. 8 darab modul, egyenként 12 cellával ellátva
4. Hűtőberendezés, és a hozzá tartozó hűtőfolyadék bemenet
5. Kondenzátum eltávolító

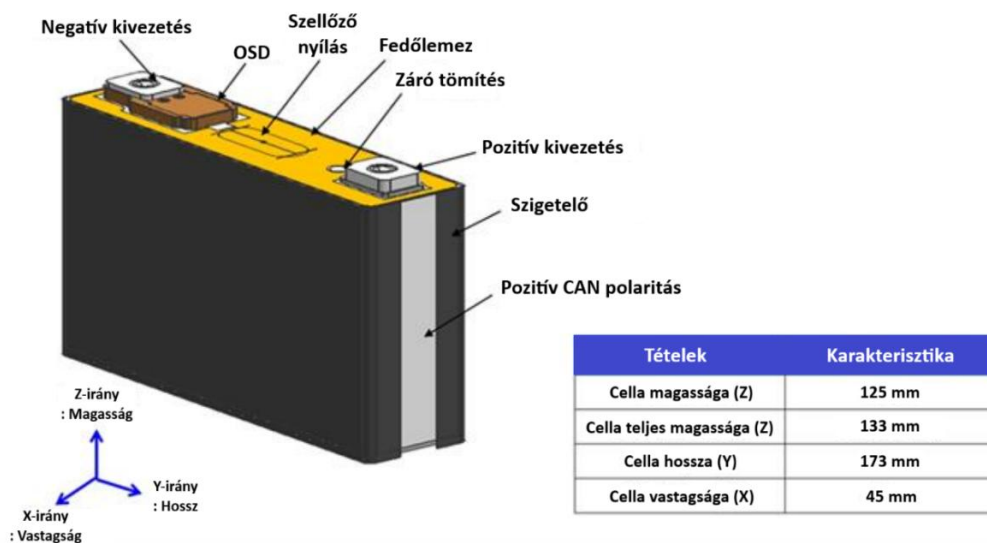
A modul részegységei:

1. Fedél
2. Cella kapcsolatfelvételi rendszer
3. Cellák (12x)
4. Nagyfeszültségű szigetelés
5. Fém oldallemezek
6. Fém véglemezek
7. Hőelvonó lemez

¹³⁵ Nigel (2023). BMW I3 Battery Desing

Az ebben a csomagban helyet foglaló modulokban 94 Ah Samsung SDI NMC Lítium-ion prizmatikus kialakítású akkumulátorok találhatóak, egyenként 12 cellával ellátva. Ezekben a modulokban a cellák 12s1p, azaz 12 (series) sorosan és 1 (parallel) párhuzamosan kötött, tehát a 8 modulban található összes cellával együtt ez 96s1p vannak összekötve egymással. Vagyis minden cellának a modulokban, és így a jármű teljes akkumulátor csomagjában is a kapacitása 94 Ah lesz. A dolgozat során az összevetni kívánt értékeket először a jármű eredeti akkumulátor csomagjával néztem meg, így mire képesek a Samsung SDI cellákkal, és ehhez mérten fogom összehasonlítani a két akkumulátor teljesítményét. Számításaim során átlag értékekhez fogok viszonyítani. A BMW I3 94 Ah hivatalosan 120-250 km-t képes megtenni. Ezt a számításaim során 200 km-nek veszem fel, és mint referenciához, ehhez fogom viszonyítani a kapott végeredményeimet. Szükség van az eredeti Samsung SDI 94 Ah akkumulátor adataira, és ugyancsak így a beépítendő SSB akkumulátor adataira is.

A 4. ábrán látható az eredeti akkumulátor.



4. ábra: Samsung SDI 94 Ah akkumulátor ¹³⁶

Az 5. ábrán látható az új akkumulátor.

¹³⁶ SamSung 3.7V 94Ah NMC high power Li-ion prismatic battery cell



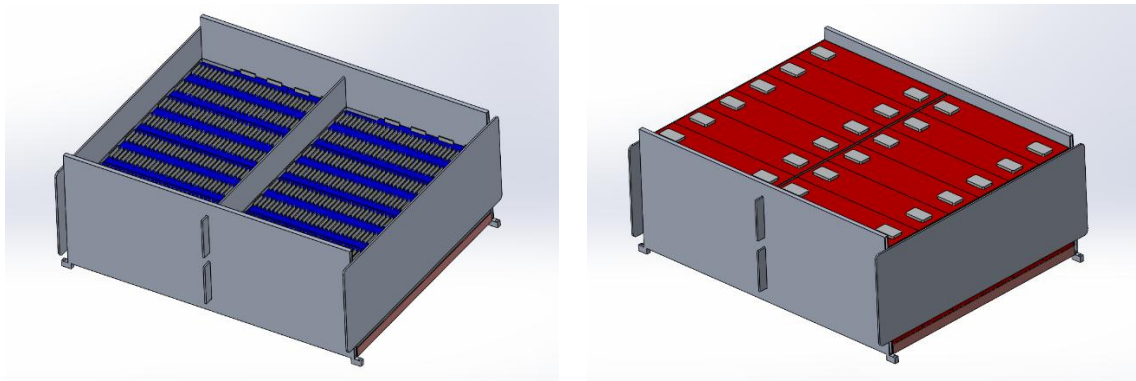
5. ábra: SSB QSE-5 B Sample ¹³⁷

5. A cellák beszerelése és elrendezése

Az új SSB akkumulátor kisebb méretéből adódóan több cella kerül bele a jármű akkumulátor csomagjának moduljaiba. Mivel összesen 8 darab modult tartalmaz a jármű, elég egyetlen különálló modulba beleilleszteni a cellákat. A cellák méretét kerekítve vettem fel az eredetihez képest, így egy modul cellatartalma 276 darabra jön ki. A modulban van egy fém elválasztó lap a 2 cellapár között, tehát egy cellatartóban 138 cella, amelyet egymáshoz lapjával, póluspontokkal felfelé, és az eredeti Samsung SDI cellákhoz képest 90°-kal elforgatva helyezek el a modulban. Az eredeti cellapár szélességéből adódóan egymás mellé 4 egész cella fér be, ebből a sorból 34 egész cella kap helyet, ami $4 \times 34 = 136$ cella. A maradék 2 darab cellát a fennmaradó helyből kiadódóan a 4×34 cellasor mellé lapjával, pólusponttal felfelé egymás mellé helyeztem el. Ezzel sikeresen elhelyezésre került a 138 darab cella a cellatartóban. Így a jármű akkumulátor csomagjában véglegesen $138 \text{ cella} \times 2 \text{ cellasor} \times 8 \text{ modul} = 2208$ SSB cella található.

A 6. ábrán látható a modulba beépített SSB cellák (*balra*) és az eredeti modul

¹³⁷ 2025 QuantumScape Battery, Inc. Delivering on the promise of solid-state technology



6. ábra: BMW I3 modul SSB és a Samsung cellával szerelt 3D modellje ¹³⁸

A cellák elrendezéséből és a modul méreteiből adódóan lesz egy kisebb hézag a szigetelés és a cellák között, mely fennmaradó helyet ki kell pótolnunk. Erre a (85 cm³) fennmaradó helyre kellett keressek egy olyan tömítő anyagot, amely egyszerre felel meg rezgéscsillapításra, hőelvezetésre, és szigetelésre, valamint kitölti a maradék helyet a modulban a cellák mellett. Erre tökéletes választásnak bizonyul a hővezető szilikon párna (Thermally Conductive Silicone Pad), amelyből 2 darabra lesz szükség. Ez az anyag típus azon kívül, hogy ezeknek mind megfelel, még jó elektromos szigetelést is biztosít a cellák részére. A kissé túlméretes vastagság (15-20 %) biztosítja, hogy a szilikon párna enyhén összenyomódva tökéletesen kitöltse a hézagot, és jó hőkontaktust adjon a cellák és a hűtőlemez között. A cellák feletti 54 mm-es helyet a BMS rendszer, valamint a cellák egymással való összekötése, a kábelezés, és annak elrendezése fogja kitölteni.

6. Összehasonlítás

A 7. ábrán látható a három vizsgált akkumulátor csomaggal történő különböző fogyasztási körülményekben megtehető hatótávolságok.

Fogyasztás [Wh/km]	Samsung SDI	1. SSB (elméleti)	2. SSB (valós)
120	238 km	435 km	342 km
145	197 km	360 km	283 km
180	159 km	290 km	228 km

7. ábra: A vizsgált akkumulátor csomagok megtehető hatótávjai ¹³⁹

A 8. ábrán látható a vizsgált akkumulátor csomagok eltérő sebességre vetített energiaigényei.

Samsung SDI akkumulátor			
Sebesség [km/h]	Teljesítmény [kW]	Áram [A]	C-ráta
50	6	17	0,18
90	13,1	37,1	0,39

¹³⁸ BMW I3 modul az SSB (balra) és a Samsung (jobbra) cellával szerelt SW 3D modellje (saját ábra)

¹³⁹ A vizsgált akkumulátor csomagok megtehető hatótávjai (saját ábra)

130	23,4	66,3	0,7
1. SSB akkumulátor (elméleti)			
Sebesség [km/h]	Teljesítmény [kW]	Áram [A]	C-ráta
50	6	16,3	0,1
90	13	35,4	0,21
130	23,4	63,5	0,39
2. SSB akkumulátor (valós)			
Sebesség [km/h]	Teljesítmény [kW]	Áram [A]	C-ráta
50	6	16,4	0,12
90	13,2	35,9	0,27
130	23,4	63,6	0,49

8. ábra: A vizsgált akkumulátor csomagok szükséges energiaigényei ¹⁴⁰

7. Összefoglalás

Az elektromos gépjárművek sok új lehetőséget biztosítanak, mint a hagyományos belső égésű motorral szerelt társaik. Az új akkumulátor technológiák fejlődésével már hosszabb távra, biztonságosabban és hatékonyabban tudunk eljutni. A dolgozatomban bemutattam a BMW I3 eredeti akkumulátor csomagját és részegységeit, valamint megtervezésre, elrendezésre, és beépítésre került az új SSB technológia. A három összevetett akkumulátor csomagból jól látható, hogy az első esetben vizsgált (*elméleti*) SSB akkumulátor csomagból, ahol a cellák térfogatát és tömegét meghagytuk az eredeti Samsung SDI cellákhoz képest, közel 80 %-kal nagyobb hatótávot tudunk kinyerni, míg a második esetben vizsgált (*valós*) SSB akkumulátorral szerelt csomagból is már egy közel 44 %-kal nagyobb hatótávot tudunk kihozni a járműből az eredeti Samsung SDI akkumulátor csomaghoz képest. Bár az első esetben vizsgált elméleti SSB akkumulátor bizonyítja a leginkább várt eredményeket ettől a technológától a jármű hatótávját illetően, ekkora méretű és tömegű SSB akkumulátor, mint a már létező Samsung SDI akkumulátor, még további fejlesztés és technológiai fejlődés előtt áll, de az elektromos gépjárművek, így az autóiipar számára egy fontos mérföldkő lesz hamarosan. Dolgozatomban sikerült megtervezni, elrendezni, és beépíteni az új SSB cellákat az akkumulátor csomagba, melynek része a fennmaradó hely/hézag megfelelő tulajdonságú anyaggal történő kitöltése, továbbá a célul kitűzött 200 km-es hatótávot meghaladó értékek számításal alátámasztva. Reményeim szerint jövőre már kiforrottabb és elérhető lesz újabb, esetlegesen jobb specifikációkkal rendelkező SSB akkumulátor, amely jobban beleillik az általam felvázolt akkumulátor csomagba, így a dolgozatomat azzal a résszel kiegészítve, a kötés megtervezésével (ami folytán felmerülhet a cellák elrendezésének újra tervezése), valamint egy becsült költségvetéssel együtt sikerül megterveznem és kiegészítenem.

8. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

¹⁴⁰ A vizsgált akkumulátor csomagok szükséges energiaigényei (saját ábra)

Irodalomjegyzék

- [1] <https://theicct.org/pr-electric-cars-getting-cleaner-faster/>
- [2] <https://www.wonderfulpcb.com/blog/electric-vehicle-battery-types-features-and-comparisons/>
- [3] <https://www.grepow.com/blog/nmc-vs-nca-battery-cell-what-is-the-difference.html>
- [4] <https://www.grepow.com/blog/lfp-vs-nmc-battery-exploring-the-differences.html>
- [5] Boris Velev, Bozhidar Djudzhev, Vladimir Dimitrov, Nikolay Hinov (2024) Comparative Analysis of Lithium-Ion Batteries for Urban Electric/Hybrid Electric Vehicles <https://docs.google.com/document/d/1ljxSjksgFASmPaCmJRca6yLSH0mvkmMg/edit>
- [6] Ruoxu Shang, Talyah Nelson, Thanh Vy Nguyen, Charlotte Nelson, Harsha Antony, Brian Abaoag, Mihrimah Ozkan, Cengiz S. Ozkan (2025) A comprehensive review of solid-state lithium batteries: Fast Charging characteristics and in-operando diagnostics <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285525005919>
- [7] Abniel Machín, ORCID, Carmen Morant, Francisco Márquez (2024) Advancements and Challenges in Solid-State Battery Technology: An In-Depth Review of Solid Electrolytes and Anode Innovations <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/1/29>
- [8] Mohsen Heydarzadeh, Teemu Toivola, Victor Vega-Garita, Eero Immonen (2025) Dataset of lithium-ion cell degradation under randomized current profiles for NMC, NCA, and LFP chemistries <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235234092500263X>
- [9] Jia Ke, Han Jiang, Xinpeng Yang, Mingliang Fu, Zhihui Huang, Yunjing Wang, Yan Ding (2025) Evaluation of real-world CO₂ and NO_x emissions of various in-use heavy-duty vehicles <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389425021594>
- [10] Sai Sudharshan Ravi, Sergey Osipov, James W. G. Turner (2023) Impact of Modern Vehicular Technologies and Emission Regulations on Improving Global Air Quality <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/7/1164>

Alternatív tüzelőanyagok napjainkban

Today's alternative fuels

Szegedi Gergő

Széchenyi István Egyetem – Győr

gregszegedi@gmail.com

Absztrakt: Ez a cikk kifejezetten az ismertebb alternatív tüzelőanyagokkal kapcsolatos tudnivalókat, előnyöket és nehézségeket fogja taglalni, szemben a hagyományos fosszilis tüzelőanyagokkal. Az „elektromos hajtású járművek” és a „környezet barát” szavakat egyre gyakrabban hallani ugyanabban a mondatban, előnyeik közé tartozik például a lokális zéró emisszió vagy a jó összhatérfok, viszont mint sok más dolog az életben ezek is kompromisszummal járnak. Kompromisszum, ezek alól az alternatív üzemanyagaink sem kivételek, számos probléma lapul meg az olyan vonzó tulajdonságaik mögött, mint az alacsony karosanyag es CO2 emisszió, esetleg alacsony ár vagy meglévő belsőégésű motor konstrukciók használata kellő módosításokkal. Ilyen alternatív energia hordozó lehet, a teljesség igényé nélkül a hidrogén, LPG (cseppfolyósított propán-bután gáz), bioüzemanyagok (bioetanol, biodízel), CNG/LNG (nagy nyomású/cseppfolyósított földgáz).

Kulcsszavak: fosszilis tüzelőanyagok, kompromisszum, környezet barát

Abstract: This article will primarily focus on the knowledge, benefits, and difficulties of the more widely known alternative fuels as opposed to conventional fossil fuels. The words "electric vehicles" and "environmentally friendly" tend to appear in the same sentence increasingly, while their advantages include, for example, zero local emissions or high overall efficiency, but like many other things in life, they also come with a compromise. Compromise, from which our alternative fuels are no exception, there are several problems behind their attractive benefits, such as low harmful gas and CO2 emissions, low price or the use of existing internal combustion engine designs with the necessary modifications. Some of the more known alternative energy carriers are the following: hydrogen, LPG (liquefied Propane-Butane gas), biofuels (bioethanol, biodiesel), CNG/LNG (compressed/liquefied natural gas)

Keywords: fossil fuels, compromise, environmentally friendly

1. Bevezetés

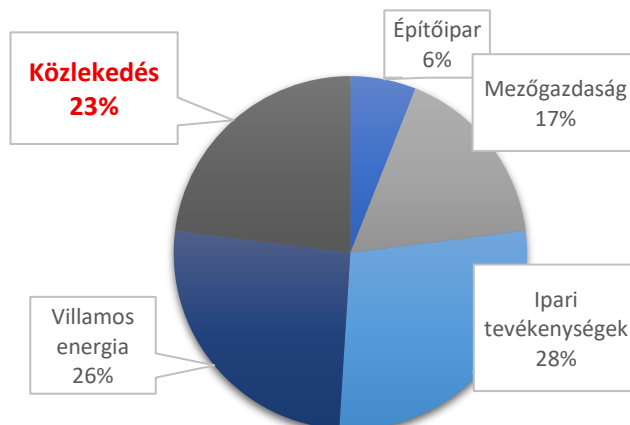
¹⁴¹Napjaink egyik legfontosabb energia hordozói közé tartoznak a fosszilis, szénhidrogén alapú tüzelőanyagok. Számos iparág épül ezek használatára, jelenleg a közlekedés és szállítás elsődleges energiaforrásait jelentik, melyek a globálisan kibocsátott CO2 durván egy negyedét teszik ki. A probléma eredete egész egyszerűen az, hogy a szén-hidrogén alapú üzemanyagok égésekor azok szén molekulái a levegőben lévő oxigén segítségével szén-dioxidot képeznek, mint égéstermék, de persze egyéb mérgező és üvegház hatású gázok is képződhetnek, legyen az szén-monoxid, nitrogén-oxidok vagy metán stb. [2]

Ezt a problémát az elektromos járművek sem tudják megkerülni, -viszont többek között lokális nulla kibocsátással és magas, akár 90% hatásfokkal szolgálhatnak (BÉM személyautó esetén jó ha 40%)- hiszen a jármű előállításánál egy hagyományos autóhoz hasonló mennyiségű CO2 keletkezik, illetve az a villamos energia amit előállítanak, sok helyen kőolaj, szén esetleg

¹⁴¹ Saját készítés

földgáz elégetésével kerül előállításra, hisz más energiaforrás nem mindig jöhet szóba egyes országokban gazdasági és politikai okokból kifolyólag. [12]

A nem fosszilis alapú anyagoknál elkerülhető lehet az olyan szén tartalmú égéstermékek



55. ábra. Globális CO₂ kibocsátás szektoronként¹

létrejött, ami mindennapjainkban rendszerint visszatérő napirendi téma, mérgező hatásúak és persze az üvegház hatású gázokat is érinti. Belsőégésű motorokra vetítve az emissziós szabályzatok már a 90-es években megjelentek az EU-ban, melyek előírják a különféle ártalmas égéstermékek korlátozását a jármű gyártók számára, kiknek aránytalanul nagy büntetésekkel kellene szembesülniük az esetben, ha nem tudnak a teljes flotta átlag kibocsátását az előírt szint alatt tartani. Az EU szabványok a következő anyagokra vonatkoznak elsősorban: [9]

-szén-monoxid, ami elsősorban a belső égésű motorok tökéletlen égése során keletkezik. A járművek kipufogógázának egyik fő összetevője és jelentős szerepe van a városi levegőszennyezésben. Mivel a szén-monoxid a vér hemoglobinjához kötődve gátolja az oxigén szállítását a szervezetben, már alacsony koncentrációban is egészségkárosító hatású. Az EU szigorú kibocsátási normákat vezetett be a CO-emissziójának csökkentésére. Az egyes szabványok fokozatosan egyre alacsonyabb határértékeket írnak elő az otto- és dízelmotoros járművek számára. Például a benzinmotoros személyautók esetében az Euro 1 norma (1992) még 2,72 g/km szén-monoxid-kibocsátást engedélyezett, míg az Euro 6 (2014-től) már csak maximum 1,0 g/km-t.

-szén-hidrogének: (HC) részben el nem égett üzemanyagból származó vegyületek. Ezek a gázhalmazállapotú anyagok a járművek kipufogógázával kerülnek a levegőbe. A szénhidrogének nemcsak egészségkárosító hatásúak (rákkeltőek lehetnek), hanem a nitrogén-oxidokkal (NO_x) együtt szmog kialakulásának is fő okozói, különösen városi környezetben. A benzinesek esetében például az Euro 1 még 0,97 g/km HC-kibocsátást engedett meg, míg az Euro 6 már csak 0,10 g/km-t. A dízelmotoros járművek esetében a határértékeket gyakran összesített HC+NO_x formában adják meg.

-nitrogén-oxidok: (NO_x) főként a nitrogén-monoxid (NO) és a nitrogén-dioxid (NO₂) melyek a motorok magas égési hőmérsékletén keletkeznek a levegő nitrogénjéből és oxigénjéből. Ezek a gázok jelentős környezeti és egészségügyi problémákat okoznak hisz hozzájárulnak a szmog és a savasó kialakulásához, valamint irritálhatják a légutakat, hosszú távon pedig légúti megbetegedéseket idézhetnek elő. A korai előírásokhoz képest az engedélyezett határértékek drasztikusan csökkentek, különösen a dízelüzemű járművek esetében, amelyek hagyományosan magasabb NO_x-kibocsátásúak. Míg az Euro 3 norma (2000) dízelautóknál még 0,50 g/km NO_x-kibocsátást engedett meg, az Euro 6 már csak 0,08 g/km-t.

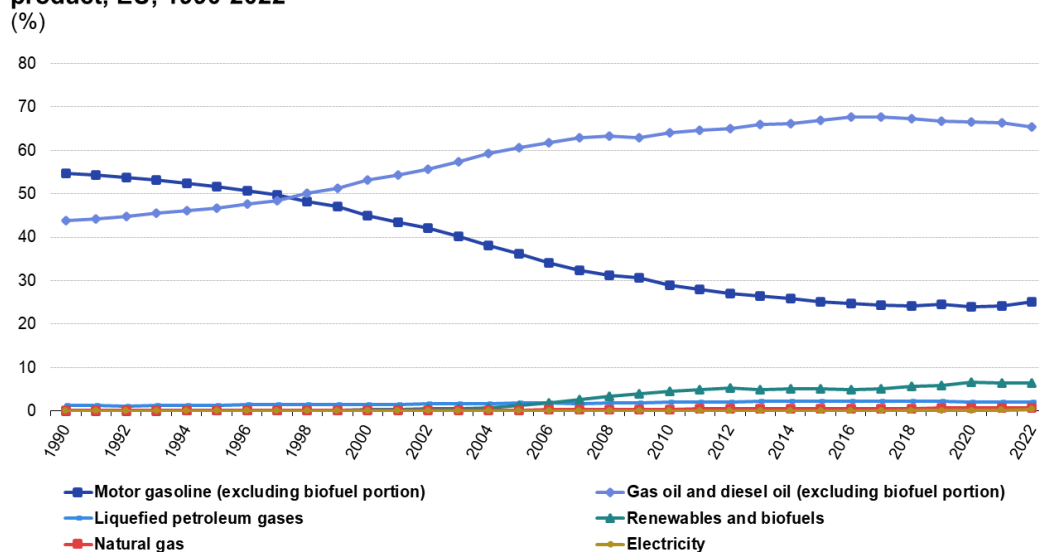
-koromrészecskék: (PM – particulate matter) apró részecskék, amelyek főként a dízelmotorok égése során keletkeznek, de kisebb mértékben a benzinmotorokból is (közvetlen befecskendezésűek). A dízelmotoros járműveknél az Euro 1–3 szabványok még nem tartalmaztak konkrét részecske határértékeket, de az Euro 4 (2005-től) már 0,025 g/km koromkibocsátási limitet vezetett be. Az Euro 5 (2009-től) tovább szigorította ezt 0,005 g/km-re, és ezzel általánossá vált a részecskeszűrők (DPF) alkalmazása. [2] [9] [12]

2. Technológiai nehézségek

Napjainkban elforduló alternatív tüzelőanyagokkal a korábban említett károsanyag kibocsátásokat tudjuk mérsékelni, illetve egy alternatívát jelenthetnek a hagyományos előállítási módokhoz képest, nézzük ezt részletesebben is meg:

Az alternatív tüzelőanyagok így a bioüzemanyagok, a hidrogén, a szintetikus e-üzemanyagok és a különböző gázalapú energiahordozók alkalmazása kulcsfontosságú a közlekedési szektor dekarbonizációjában. Ugyanakkor ezen energiahordozók széles körű elterjedését számos technológiai és gazdasági nehézség korlátozza, amelyek az előállítás, az energiatartalom, a járműtechnológiai kompatibilitás és az infrastruktúra szintjén egyaránt jelentkeznek. [2,10] ¹⁴²

Evolution of final energy consumption in road transport by energy product, EU, 1990-2022



56. ábra. Közlekedés szektor energiahordozói az EU-ban²

Az előállítási folyamatok többsége jelenleg magas energiaigénnyel és összetett technológiákkal jár. A bioüzemanyagok esetében például a fermentációs, transzészterezési eljárások hatékonysága nagyban függ a kiinduló alapanyag minőségétől és elérhetőségétől. Az e-üzemanyagok előállításához szükséges elektrolízis és szintézis technológiák pedig még nem érik el a fosszilis alapú rendszerek költséghatékonyságát, részben a megújuló villamos energia magas beruházási költségei, részben a jelenlegi alacsony volumenű termelés miatt. [1,4]

A hidrogén előállításánál hasonló problémák merülnek fel: a folyamat energiaigénye és technológiai összetettsége jelentős akadályt jelent. Az alternatív tüzelőanyagok fizikai és

¹⁴² Eurostat: (2023) Final energy consumption in transport - detailed statistics

kémiai tulajdonságai is kihívásokat hordoznak. A fűtőérték, az energiasűrűség és a tárolhatóság sok esetben jelentősen eltér a hagyományos benzin és dízel jellemzőitől. A hidrogén tömegarányos energiasűrűsége ugyan kiemelkedően magas, de térfogatarányosan viszont alacsony, így nagynyomású vagy kriogén(cseppfolyósított) tárolórendszerek szükségesek. Ezek nemcsak bonyolultabb műszaki megoldásokat igényelnek, hanem fokozott biztonsági követelményeket is. A biometán és más gázalapú tüzelőanyagok esetében a tisztítás és tömörítés jelent többletköltséget és technológiai többletkomplexitást. Az e-üzemanyagok esetén gyakran merül fel az alacsonyabb energetikai hatásfok a többlépcsős átalakítási folyamat miatt. [6,11]

A meglévő járműpark adaptálása szintén komoly műszaki kihívást jelent. Bár egyes alternatív üzemanyagok közvetlenül is keverhetők a hagyományos tüzelőanyagokkal, sok esetben jelentős átalakításokra van szükség. A motorvezérlő rendszerek újra kalibrálása, a nagynyomású hidrogénrendszerekhez szükséges speciális tárolók és csővezetékek, vagy a gázüzemű átépítésekhez szükséges alkatrészek (pl. reduktorok, injektorok, tartályok) mind növelik a költségeket. Emellett a járműgyártók számára a többféle hajtásrendszer párhuzamos fejlesztése jelentős kutatás és fejlesztési kapacitást köt meg, ami lassítja a piaci átállást. A teljes átállás egyik legkritikusabb tényezője azonban az infrastruktúra hiánya és költsége. A hidrogéntöltő állomások, a nagy tisztaságú biogáz-hálózatok vagy az e-üzemanyag gyártó létesítmények kiépítése komoly beruházásokat igényel mind a magán, mind a közberuházási oldalról. A töltő és elosztórendszerek szabványosítása, a biztonsági előírások kidolgozása, valamint a logisztikai lánc átalakítása további idő- és költségigényes komoly feladat. [3,10]

Összességében az alternatív tüzelőanyagok jelentős potenciállal rendelkeznek a fenntartható közlekedés megvalósításában, azonban a technológiai nehézségek egy komplex rendszert alkotnak. A gyártási hatékonyság javítása, az energiasűrűségi problémák kezelése, a járművek és infrastruktúrák átalakításának megkönnyítése, valamint a költségek hosszú távú csökkentése egyaránt szükséges ahhoz, hogy ezek a megoldások versenyképessé váljanak a fosszilis tüzelőanyagokkal szemben. [1-4,6,10,11]

3. Alternatív tüzelőanyagok napjainkban

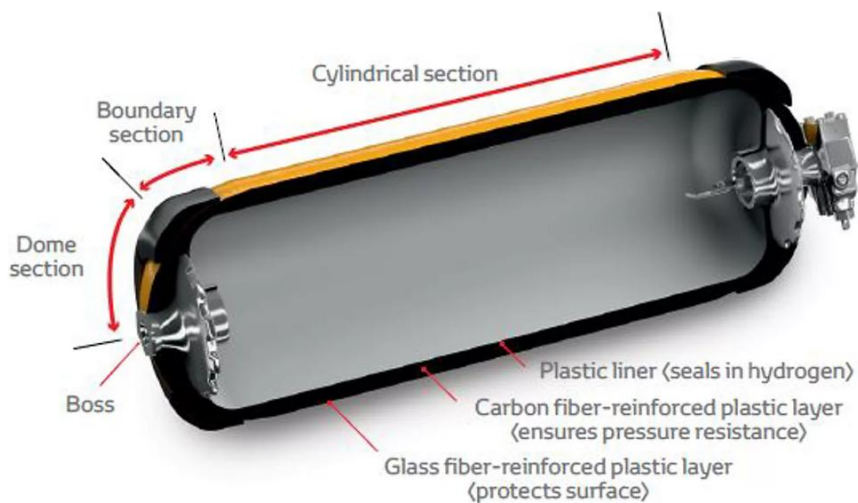
Az alábbiakban bemutatom a legelterjedtebb, és legígéretesebb alternatív tüzelőanyagokat, különös tekintettel működési elveikre, előnyeikre és korlátjaikra.

A bioüzemanyagok növényi, állati vagy biológiai eredetű hulladékokból előállított energiahordozók, amelyek elsődleges célja a fosszilis üzemanyagok kiváltása. A legelterjedtebb formájuk a bioetanol és a biodízel. A bioetanol többnyire cukortartalmú növények (pl. kukorica, cukornád) fermentációjával készül, és benzinnel akár 85%-os arányban is keverhető (E85). A biodízel ezzel szemben növényi olajok transzészterezésével állítható elő, és a hagyományos dízelmotorokban korlátozott mértékben közvetlenül helyettesítheti a fosszilis dízelt. (B7, azaz max 7% biodízel tartalom az EU-ban a megengedett) Az úgynevezett második generációs bioüzemanyagok jelentős előrelépést jelentenek, mivel kevésbé versenyeznek az élelmiszer termeléssel, és kedvezőbb életciklustávú emisszióval rendelkeznek. A bioüzemanyagok hátránya ugyanakkor az ingadozó alapanyagellátás, a viszonylag alacsony energiasűrűség és a nagy területigényű mezőgazdasági háttér. [7] [8]

143A hidrogén az egyik legtisztábban felhasználható alternatív tüzelőanyag, amely égésekor, vagy üzemanyagcellás konverziója során szén-dioxid mentes energiatermelést tesz lehetővé.

¹⁴³ Toyota Europe, (2015) Hydrogen? Is that safe?

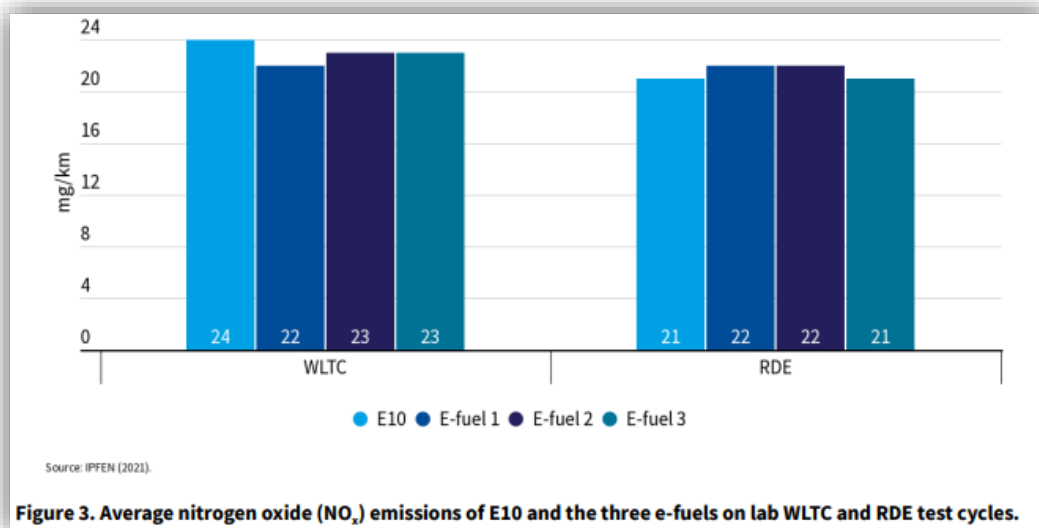
Energiatartalma tömegarányosan rendkívül magas, azonban alacsony térfogatsűrűsége miatt nagynyomású (700 bar) vagy cseppfolyósítósó tárolórendszerekre van szükség. [3]



57. ábra. Toyota Hidrogén tartály felépítése³

A hidrogén előállítás alapján három fő kategóriát különböztetünk meg: a fosszilis alapú „szürke” hidrogént, a részben karbonsemleges „kék” hidrogént, valamint a teljesen megújuló villamos energiával előállított „zöld” hidrogént. Míg az utóbbi a fenntartható közlekedés kulcsa lehet, magas előállítási és infrastrukturális költségei jelenleg korlátozzák a széles körű elterjedést. A hidrogén legnagyobb előnye a gyors tankolási idő és a nagy hatótáv potenciálja, hátránya viszont a bonyolult kezelési és biztonsági követelményrendszer. Léteznek hidrogén üzemanyagcellás járművek, melyek a hidrogén kémiai energiáját elektrokémiai úton alakítják át villamos energiává, amely közvetlenül az elektromos hajtást táplálja. Az üzemanyagcella működése a hidrogén anódon történő oxidációján és az oxigén katódon való redukcióján alapul, miközben melléktermékként csupán vízgőz keletkezik. A technológia legnagyobb előnye a lokálisan zéró emisszió, a rövid tankolási idő és a nagy hatótávolság, amely személy és haszongépjárművek esetében is versenyképes alternatívát jelenthet. Ugyanakkor az üzemanyagcellák platina alapú katalizátorai, a nagynyomású hidrogéntároló tartályok és a még korlátozott töltőinfrastruktúra jelentős költségekkel járnak, melyek jelenleg nagyban lassítják a technológia széles körű elterjedését. [6]¹⁴⁴

¹⁴⁴ Anna KRAJINSKA, (2021) Magic green fuels Why synthetic fuels in cars will not solve Europe's pollution problems



58. ábra. E-üzemanyagok lokális NO_x kibocsátása, nem több a fosszilis társaikénál⁴

Az e-üzemanyagok megújuló villamos energiával előállított hidrogénből és légköri vagy ipari CO₂-ből szintetizált folyékony tüzelőanyagok. Kémiai tulajdonságaik szinte teljes mértékben megegyezhetnek a hagyományos benzin vagy dízel paramétereivel, így a meglévő motor és infrastruktúra rendszerekben közvetlenül alkalmazhatók. Legfőbb előnyük a karbonsemleges életciklus lehetősége és a nagy energiasűrűség, amely különösen a nehézgépjárművek, a repülésben és a tengeri szállítmányozás területén jelent komoly alternatívát. Ugyanakkor jelenlegi technológiák határfoka alacsony, a költségek pedig jóval meghaladják a fosszilis üzemanyagokét, ami piaci bevezetésüket jelentősen lassítja. [4]

Az LPG (Liquified Petroleum Gas), amely propán-bután keverékből áll, már évtizedek óta széles körben használt alternatív tüzelőanyag. Előnye a viszonylag magas fűtőérték, az alacsonyabb károsanyag-kibocsátás és a kedvező üzemeltetési költség. A rendszerek tömege és bonyolultsága mérsékelt, átalakítása a legtöbb benzinmotor esetében technikailag megoldható. A CNG (Compressed Natural Gas) és a biometán szintén fontos szereplők: magas metántartalmuk miatt tisztábban égnek, és akár 20–25%-os CO₂ kibocsátás-csökkenést is eredményezhetnek. A CNG tömörítése, tárolása és infrastruktúrája azonban költséges, és a hatótávolság gyakran kisebb, mint a folyékony üzemanyagok esetében. [8]

Kutatási szakaszban vagy korlátozott gyakorlati alkalmazásban található az olyan alternatívák, mint az ammónia, a dimetil-éter (DME) üzemanyagok. Ezek közös jellemzője, hogy megfelelő technológiai fejlesztések mellett potenciálisan karbonsemlegesek lehetnek, de tárolási, égési vagy előállítási korlátjaik miatt még nem érettek széles körű ipari felhasználásra. [3-8]

4. Konklúzió

Az alternatív tüzelőanyagok fejlődése és alkalmazása kulcsszerepet játszik a globális közlekedési rendszer alacsony szén-dioxid kibocsátású átalakulásában. Bár napjaink megoldásai különböző technológiai érettségi szinten állnak, közös jellemzőjük, hogy képesek jelentősen mérsékelni a fosszilis tüzelőanyagokkal járó környezeti terhelést. A következő évtizedekben azonban várhatóan nem egyetlen, hanem több, egymást kiegészítő tüzelőanyag-típus adhat választ a fenntartható mobilitás kihívásaira. [1] [10]

A jövőben a fejlesztések alapvető iránya a hatékonyság javítása és a költségek csökkentése lesz. A bioüzemanyagok esetében a második generációs technológiák további térnyerése

várható, ezeket nem az élelmiszerként szolgáló növényekből állítják elő, hanem különféle organikus hulladékokból, a mezőgazdasági és erdészeti szektorból, illetve a harmadik generáció, mely olajtartalmú mikroorganizmusokra, algákra épül. [7]

A hidrogéntechnológia előrehaladása elengedhetetlen ahhoz, hogy a zöld hidrogén versenyképes alternatívává váljon. Az üzemanyagcellás járművek piacát a költséges komponensek (pl. platinaalapú katalizátorok) kiváltása és a töltőinfrastruktúra bővítése fogja majd meghatározni. Az e-üzemanyagok a várhatóan a nehezen elektrifikálható szektorok (repülés, a hajózás és a nehézgépjárművek) egyik stratégiai energiahordozóivá válhatnak, különösen akkor, ha az elektrolízis és a CO₂ megkötési folyamatok gazdaságosabbá és nagyobb kapacitásúvá fejlődnek. Eközben a gázalapú tüzelőanyagok, például az LPG, a CNG és a biometán rövid és középtávon stabil, viszonylag költséghatékony átmeneti megoldást biztosítanak, különösen azokban a régiókban, ahol a villamosítás vagy a hidrogéninfrastruktúra kiépítése lassabban tud haladni. [11]

Összességében az alternatív tüzelőanyagok jövője ígéretes, de nem lesz mentes a technológiai, gazdasági és infrastrukturális kihívásoktól. A fenntartható közlekedés eléréséhez szükség lesz a különböző technológiák összehangolt alkalmazására, valamint arra, hogy a fejlesztések valóban hosszú távúak legyenek és környezetileg kedvező megoldásokat hozzanak létre. A következő évtized tehát döntő jelentőségű lesz abban, mely alternatív tüzelőanyagok válhatnak meghatározóvá a globális mobilitási rendszerben. [1] [7] [10] [11]

5. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] N Enoma, I Inikori, Collins Chike Kwasi-Effah, A Charles, P D Ovuru, B K Aduwenye: A Comprehensive Review of Alternative Fuels for Automobiles: Benefits, Challenges and Future Direction, 2022
https://www.researchgate.net/publication/371635970_A_Comprehensive_Review_of_Alternative_Fuels_for_Automobiles_Benefits_Challenges_and_Future_Direction
- [2] Eurostat: Final energy consumption in transport -detailed statistics, 2023
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_transport_-_detailed_statistics
- [3] Toyota Europe: Hydrogen? Is that Safe? 2015 <https://www.toyota-europe.com/news/2015/hydrogen-is-that-safe>
- [4] Anna KRAJINSKA: Magic green fuels. Why synthetic fuels in cars will not solve Europe's pollution problems, 2021 https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2021_12_TE_e-fuels_cars_pollution.pdf
- [5] Frontier Economics: SCENARIOS FOR THE MARKET RAMP-UP OF E-FUELS IN ROAD TRANSPORT SCENARIOS FOR THE MARKET RAMP-UP OF E-FUELS IN ROAD TRANSPORT, 2025 <https://www.efuel->

alliance.eu/fileadmin/Downloads/Scenarios_for_the_market_ramp-up_of_e-fuels_in_road_transport_-_Update_January_2025.pdf

- [6] A. Hoskin, K.W. Harrison, R. Remick, and G.D. Martin: Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries, 2010 https://www.researchgate.net/publication/48693338_Hydrogen_Production_Fundamentals_and_Case_Study_Summaries
- [7] Dhurba Neupane: Biofuels from Renewable Sources, a Potential Option for Biodiesel Production, 2022 <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9855116/#abstract1>
- [8] Thomas Puls: Alternative Antriebe und Kraftstoffe, 2006 https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/IW-Analysen/PDF/Bd._15_Alternative_Antriebe.pdf
- [9] Michalina KAMIŃSKA, Natalia SZYMLET, Paweł FUĆ, Łukasz RYMANIAK, Piotr LIJEWSKI, Rafał GRZESZCZYK: Analysis of harmful compounds concentrations in the exhaust behind a vehicle with compression ignition engine, 2024 <https://www.combustion-engines.eu/pdf-183184-110078?filename=Analysis%20of%20harmful.pdf>
- [10] Jan Emblemsvåg: A Study on the Limitations of Green Alternative Fuels in Global Shipping in the Foreseeable Future, 2025 <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/79>
- [11] Lixin Fan, Zhengkai Tu, Siew Hwa Chan: Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review, 2021 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721006053>
- [12] Johannes Buberger, Anton Kersten, Manuel Kuder, Richard Eckerle, Thomas Weyh, Torbjörn Thiringer: Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars, 2022 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000867>

3D nyomtatás alkalmazhatósága járműalkatrész utángyártásban

Applicability of 3D Printing for Aftermarket Vehicle Part Production

Theiler Bence

Széchenyi István Egyetem, Győr

bence.th74@gmail.com

Absztrakt: A cikk az FDM 3D nyomtatás alkalmazhatóságát vizsgálja járműalkatrészek újragyártására. Rövid technológiai áttekintés után 3 konkrét esettanulmány bemutatásával vizsgálja, hogy az FDM 3D nyomtatáshoz alkalmazott különböző anyagok – PETG, ASA, TPU és TPE – milyen mértékben alkalmasak járműalkatrészek pótlására, eltérő igénybevételi környezetekben. Az első esettanulmány egy PETG-ből készült belső tárolódobozt, ami autó belterében került beépítésre, majd 1,5 évet üzemelt. A második egy ASA anyagból nyomtatott Yamaha Bt1100 hátsó lámpatest, ahol az 1100 cm³-es motor rezgése és az UV terhelés jelentették a legnagyobb kihívásokat. A harmadik teszt pedig a Honda NTV 650 karburátor szívócsonkjának pótlása speciális TPU anyagból, ahol benzin és olaj jelenlétét, illetve 60 °C üzemi hőmérsékletet kellett tartósan kibírnia az alkatrésznek. Az utolsó fejezet pedig egy, a gyakorlati tapasztalatokra épülő összefoglaló ajánlással zárul, amiben a tapasztalatok összegzésre kerülnek. Ennek célja, hogy segítséget nyújtson a későbbiekben FDM technológiával való gyártáshoz. Kiemeli a lényegesebb szempontokat az anyagválasztás, orientáció és egyéb fontos 3D nyomtatási paraméterek optimális beállításával kapcsolatban. A kutatás hozzájárul az FDM technológia járműipari alkalmazhatóságának gyakorlati megértéséhez, és ajánlásokat fogalmaz meg a megbízható és biztonságos alkatrészgyártás feltételeiről.

Kulcsszavak: FDM, 3D nyomtatás, esettanulmány, üzemi teszt, TPU, PETG, ASA, validációs teszt, tartóssági teszt

Abstract: The article investigates the applicability of FDM 3D printing for the remanufacturing of vehicle components. It uses three specific case studies to assess how suitable various materials used in FDM 3D printing – PETG, ASA, TPU, and TPE – are for replacing vehicle parts under different service conditions. The first case study examines an interior storage box made from PETG, installed in a car interior and operated for 1.5 years. The second focuses on a rear light housing for a Yamaha BT1100, printed from ASA, where the main challenges were the vibration of the 1100 cm³ engine and UV exposure. The third test concerns the replacement of the carburetor intake manifold of a Honda NTV 650 using a special TPU material, where the component had to withstand the presence of gasoline and oil as well as a continuous operating temperature of 60 °C. The final chapter closes with a summary recommendation based on practical experience, in which the findings are synthesized. Its aim is to provide guidance for future manufacturing using FDM technology, highlighting the key aspects of material selection, part orientation, and the optimal setting of other important 3D printing parameters. The research contributes to the practical understanding of the applicability of FDM technology in the automotive field and formulates recommendations regarding the conditions for reliable and safe component production.

Keywords: FDM, 3D printing, case study, operational test, TPU, PETG, ASA, validation test, durability test

1. Bevezetés

Az autóipar napjaink egyik legdinamikusabban fejlődő iparága, ahol a folyamatos innováció, a gyors fejlesztési ciklusok és a költséghatékonyság iránti igény kiemelt szerepet játszik az erős piaci verseny, a gyorsan változó fogyasztói igények és a szigorodó környezetvédelmi előírások miatt. Így a gyártóknak folyamatosan új technológiákat kell bevezetniük annak érdekében, hogy csökkentsék a fejlesztési ciklusok idejét, optimalizálják a költségeket, és olyan termékeket állítsanak elő, amelyek megfelelnek az energiahatékonysági és fenntarthatósági követelményeknek. [1]

Az additív gyártás, közismertebb nevén 3D nyomtatás, az utóbbi években jelentős fejlődésen ment keresztül. Mára már bevett technológia a járműiparban, mivel lehetővé teszi az alkatrészek gyors, kis darabszámban költséghatékony előállítását, ezáltal ideális eszköze a prototípusgyártásnak, a gyártási segédeszközök készítésének. A technológia alkalmazása különösen előnyös a tervezés és fejlesztés korai fázisaiban, ahol az alkatrészek valós méretű vizsgálata révén a tervezési hibák, illesztési problémák egyszerűen feltárhatóak. [2] [3]

Az elmúlt évek anyagfejlesztései révén az FDM (Fused Deposition Modeling) technológiával gyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságai jelentősen javultak, így egyre inkább alkalmasak kisebb igénybevételű, funkcionális járműalkatrészek gyártására is. [2]

Ezzel párhuzamosan a régebbi, akár 15-20 éves járművek esetében egyre gyakrabban jelent problémát az utángyártott vagy eredeti pótalkatrészek elérhetősége. A gyártók sok esetben már nem kínálnak alkatrészeket ezekhez a típusokhoz, az utángyártott piacon pedig a minőség vagy a kompatibilitás gyakran kifogásolható. A 3D nyomtatás e probléma megoldására is lehetőséget kínál: a hiányzó alkatrészek digitális úton újratervezhetők, majd kis szériában vagy akár egyedi gyártásban előállíthatók. [3]

A Fused Deposition Modeling technológia különösen előnyös az ilyen jellegű alkalmazásokhoz, mivel viszonylag alacsony költséggel, rövid átfutási idővel lehet pontos, mérethű alkatrészeket készíteni. A CAD modellezés és a rétegről rétegre épülő gyártási folyamat lehetővé teszi, hogy a gyártás teljesen digitális legyen, ezáltal a reprodukálhatóság is biztosított. Bár az FDM technológiával készült alkatrészek szilárdsága általában elmarad a fröccsöntött műanyagoktól, megfelelő anyagválasztással, optimális nyomtatási paraméterekkel és modelloptimalizálással jelentős mechanikai tartósság érhető el. [4] [5]

A publikáció célja annak vizsgálata, hogy a Fused Deposition Modeling technológia mennyiben alkalmas különböző járműalkatrészek utángyártására. A kutatás során több különböző típusú és funkciójú alkatrész kerül vizsgálatra, melyek különböző hő- és mechanikai igénybevételnek vannak kitéve. Az egyes alkatrészek anyagválasztása az adott funkció és környezet alapján történt: beltéri elemhez PETG, kültéri lámpatesthez ASA, valamint rugalmas, hőálló csatlakozóelemhez TPE/TPU anyag kerül felhasználásra. [5]

A cikk felépítése az alábbiak szerint alakul: az első rész bemutatja az FDM technológia elméleti alapjait és az autóipari alkalmazási lehetőségeket. Ezt követi az irodalomkutatás, amely összefoglalja az anyagválasztás és a nyomtatási paraméterek hatásait az alkatrészek mechanikai tulajdonságaira. A gyakorlati részben három esettanulmány kerül bemutatásra, különböző anyagokkal és funkciókkal. Végül a cikk az eredmények értékelésével, gyakorlati ajánlásokat tartalmazó összegzéssel és egy anyaghasználati ajánlással zárul, amely iránymutatást ad arra, hogy az FDM technológia miként alkalmazható biztonságosan és tartósan járműalkatrészek előállítására.

2. Az FDM technológia áttekintése

Az additív gyártás lényege, hogy az alkatrész rétegről rétegre épül fel digitális modell alapján. Az eljárás során nem anyagot távolítanak el, mint a forgácsolós technológiáknál, hanem éppen ellenkezőleg: az anyagot fokozatosan adagolják, amíg a teljes térbeli forma ki nem alakul. A különböző 3D nyomtatási technológiák közül a Fused Deposition Modeling (FDM) – magyarul olvasztott huzalos rétegfelépítés – a legelterjedtebb, elsősorban alacsony költsége és széles anyagválasztéka miatt. [2] [4]

Egy alkatrész kinyomtatása a 3D CAD modell elkészítésével kezdődik, ez 3D szkennelvel, illetve manuálisan, az alkatrész megtervezésével készülhet. Ezután a CAD modellt egy szeletelő szoftver (slicer) rétegekre bontja, beállítástól függően általában 0,1-0,3 mm vastag szeletekre. A szoftver G-code parancsokat generál, amely meghatározza, hogy hol és hogyan mozogjon az extruder, milyen sebességgel nyomtasson, és milyen hőmérsékleteket tartson. [4] Az FDM technológia során egy termoplasztikus műanyag huzalt (filamentet) egy meghatározott hőmérsékleten megolvasztanak, majd egy fűvókán (nozzle) keresztül kiextrudálják a modell keresztmetszetének megfelelően. A legáltalánosabb Core XY elrendezés, amikor az extruder fej a tárgyasztal felett mozog az X-Y tengely mentén, és minden réteg befejezése után a tárgyasztal a Z irányban lejjebb mozdul, így a következő réteg is rákerül az előzőre. Az így felépülő alkatrész rétegről rétegre épül fel, miközben a rétegek közötti tapadás biztosítja a szerkezeti szilárdságot. [2]

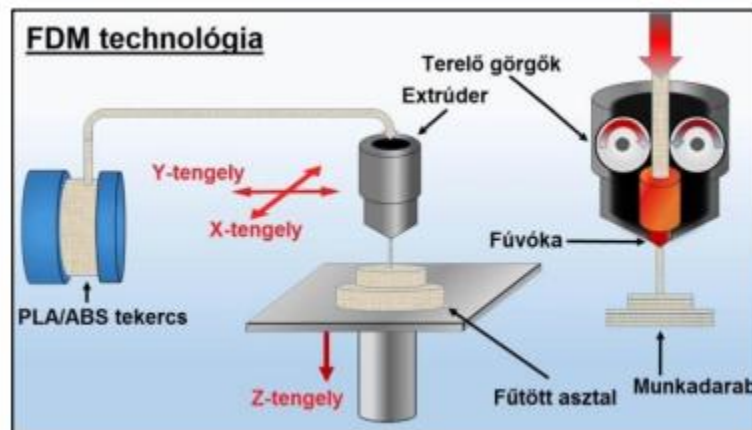
Az FDM technológia részletgazdagsága és méretpontossága általában elmarad a nagyobb felbontású additív eljárásoktól, például SLA (Stereolithography), azaz sztereolitográfia, vagy SLS (Selective Laser Sintering), lefordítva szelektív lézeres szinterezés. Ugyanakkor egy közepkategóriás zárt kamrás nyomtató, mint például a Qidi Q1 Pro, $\pm 0,1$ mm méretpontosságot is képes elérni megfelelő beállítások mellett. [6]

Ha az alkatrésznek túlnyúló részei, vagy bonyolult geometriája miatt támaszték (support) kerül felhasználásra, ezek a nyomtatás után könnyedén letörhetőek. Az eljárás egyszerűsége miatt az FDM nyomtatás az egyik legszélesebb körben alkalmazott additív technológia. A folyamat ugyanakkor több paramétertől is függ, melyek jelentősen befolyásolják a nyomtatott alkatrész minőségét, pontosságát és mechanikai tulajdonságait. [7]

Egy tipikus FDM nyomtató négy fő egységből áll:

- Extruder és hotend: a filament adagolását és melegítését végzik. Az extruder léptetőmotor a huzalt a fűtött hotendbe tolja, ahol az anyag képlékeny állapotúvá melegszik ($\sim 200-300$ °C), majd a fűvókán keresztül kinyomódik.
- Fűtött tárgyasztal: biztosítja az első réteg megfelelő tapadását, valamint csökkenti a hirtelen hűlés miatti vetemedést.
- Mozgatórendszer: az X, Y, tengelyek mentén mozgatja az extrudert vagy Z irányba asztalt, a nyomtatási rétegek pontos pozicionálása érdekében. Léptetőmotorokból, szíjakból és lineáris vezetőkől áll.
- Irányító elektronika és szoftver: a G-code parancsok alapján vezérli az extruder mozgását, hőmérsékletét és a rétegek kialakítását (anyagáramlást és nyomtatási sebességet).

Egy FDM 3D nyomtató felépítésének vázlatát az 1. ábra szemlélteti. A nyomtatás minőségét ezek összehangolt működése határozza meg. [4] [7]



59. ábra. Az FDM folyamat vázlata¹⁴⁵

3. Nyomtatott alkatrész tulajdonságait befolyásoló tényezők

Az FDM technológia sikeres alkalmazása szoros összefüggésben áll az anyagválasztással és a nyomtatási paraméterek helyes beállításával. A szakirodalom számos tanulmánya rámutat arra, hogy a 3D nyomtatással készült alkatrészek mechanikai, hőtechnikai és kémiai tulajdonságai nagymértékben függenek az alkalmazott anyagtól és a beállításoktól.

A jelen fejezet célja az FDM technológiában leggyakrabban használt alapvető anyagok tulajdonságainak és a nyomtatási paraméterek hatásainak áttekintése, különös tekintettel az autóiipari alkalmazásokra.

4. Az anyagválasztás szerepe az FDM technológiában

Az FDM eljárás során használt termoplasztikus (hőre lágyuló) polimerek melegítés hatására képlékeny szerkezetűvé válnak, majd lehűlés után megszilárdulnak, így alkalmasak rétegről rétegre történő felépítésre. A különböző anyagok eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek, ezért a megfelelő alapanyag kiválasztása kulcsfontosságú az adott funkció szempontjából. Az anyagválasztásnál figyelembe kell venni a működési hőmérsékletet, a mechanikai igénybevételt, az UV-, vegyszer- és kopásállóságot, valamint a felhasználási környezetet (beltér, kültér, motortér). [2]

A járműalkatrészek között számos olyan komponens található, amelyek nem teherhordók, de funkcionális szempontból fontosak (például rögzítőelemek, burkolatok, tömítések). Ezeknél az alkatrészeknél a 3D nyomtatás megfelelő alternatívát jelenthet, amennyiben az anyag tulajdonságai megfelelnek a környezeti feltételeknek.

A legelterjedtebb alapanyag FDM 3D nyomtatáshoz a PLA (Politejsav), amely könnyen feldolgozható és minimális termikus zsugorodása miatt a PLA-ból nyomtatott alkatrészek kis méretbeli eltérést mutatnak a CAD modellhez képest. Alacsony hődeformációs hőmérséklete (50–60 °C) azonban kizárja gyakorlati műszaki és járműipari alkalmazásokról. [8]

[8] M. I. F. A. Kun Krisztián, „3D NYOMTATÓ ÉPÍTÉSE ÉS FEJLESZTÉSE,” 2015.

A merev, nagy szilárdságú alkatrészekhez jellemzően PETG (Glikol-módosított polietiléntereftalát), ABS (Akrilnitril-butadién-sztirol) vagy ASA (Akrilnitril-sztirol-akrilát) típusú anyagok kerülnek előtérbe. A PETG jó kompromisszumot képez a mechanikai szilárdság (húzószilárdság: 40-50 MPa), a feldolgozhatóság és a vegyszerállóság között, azonban hődeformációs hőmérséklete (70-80°C) beltéri alkalmazásokra korlátozza használatát. Az ASA különösen alkalmas kültéri felhasználásra UV- és hőállósága miatt. A rugalmas, hajlékony alkatrészek gyártásához TPU (termoplasztikus poliuretán) és TPE (termoplasztikus elasztomer) típusú filamentek alkalmazhatók, amelyek rezgéselnyelő és tömítő funkciók esetén jelentenek ideális választást. [9] [10]

A nagyobb teljesítményű FDM-anyagok, mint a PA (poliamid), PC (polikarbonát) és egyéb kompozit, például szén- és üvegszál erősített filamentek kiemelkedő mechanikai szilárdsággal és hőállósággal rendelkeznek, azonban nyomtatásuk speciális körülményeket igényel és magas költséggel jár a standard filamentekhez képest (pl. kötelező filament-száritás, kopásálló fűvóka, magas anyagár). [11]

Az anyagválasztás mindig a felhasználási környezethez és az alkatrész funkciójához igazodik: a beltéri elemeknél a méretpontosság és esztétikai megjelenés a fontosabb, míg a motortérben vagy kültéren alkalmazott alkatrészek esetében a hőállóság, az UV- és vegyszerállóság elsődleges szempont.

Az autóiipari környezetben az anyagválasztást tehát nem kizárólag a szilárdság, hanem a hő- és vegyszerállóság, valamint az UV-tűrés határozza meg.

4.1 Nyomtatási paraméterek hatása az alkatrész tulajdonságaira

Az FDM technológiával gyártott alkatrészek mechanikai, geometriai és felületi tulajdonságait alapvetően az alkalmazott nyomtatási paraméterek határozzák meg. A nyomtatási sebesség, extrúziós hőmérséklet, rétegvastagság, nyomtatási orientáció, kitöltési sűrűség és kitöltési mintázat közötti komplex összefüggések szignifikánsan befolyásolják a végső alkatrészek teljesítményét és megbízhatóságát. Az alábbiak a legfontosabb nyomtatási paraméterek szakirodalmi alapokon nyugvó részletes leírása.

Nyomtatási orientáció és anizotrópia

Az FDM alkatrészek legfontosabb jellemzője az anizotróp mechanikai viselkedés, ami azt jelenti, hogy a szilárdság irányfüggő. Ez az anizotrópia a rétegenkénti építési eljárásból fakad, ahol a rétegek közötti kötés minősége lényegesen gyengébb, mint a rétegen belüli kötés. A szakirodalom alapján az alkatrészek az X-Y síkban (rétegekkel párhuzamosan) jelentősen erősebbek, mint a Z irányban (rétegekre merőlegesen). Ez a jelenség a molekuláris szintű kötődés gyengeségéből és a rétegek közötti mikropórusok jelenlétéből fakad. [12]

Tehát ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az alkatrészeket úgy kell orientálni, hogy a legnagyobb terhelés a rétegek síkjában hasson, nem pedig merőlegesen azokra. Ezt a szempont járműalkatrészek tervezésénél különösen fontosnak kell figyelembe venni: egy támasztókar nagyobb terhelésének összehangolása a nyomtatási orientációval akár 30-50%-os szilárdságnövekedést eredményezhet. A 0° orientáció (vízszintes nyomtatás) általában a legjobb mechanikai tulajdonságokat biztosítja, míg a 90° orientáció (függőleges) a leggyengébb. [13]

Kitöltés (infill) sűrűsége és mintázata

A kitöltés (infill) az alkatrész belső szerkezetét határozza meg és jelentős hatással van a mechanikai tulajdonságokra, az anyagfelhasználásra, valamint a nyomtatási időre.

Pandžić és munkatársai (2022) tanulmánya szerint a kitöltési sűrűség közvetlen korrelációban van a húzószilárdsággal. A vizsgálatok során PETG anyagot használva azt találták, hogy a

kitöltési sűrűség növelése 20%-ról 100%-ra akár 39%-os húzószilárdság-növekedést eredményezhet (35,88 MPa-ról 49,84 MPa-ra). Szintén jelentős az a megállapítás, hogy 75-100% kitöltési sűrűségnél a kitöltési mintázat hatása minimális lesz, mivel az alkatrész gyakorlatilag tömör. Ezzel szemben alacsonyabb kitöltési sűrűségeknél (50% alatt) a mintázat választása kritikus fontosságú lehet. [14] [15]

A Mohammadreza Lalegani Dezaki és Mohd Khairol Anuar Mohd Ariffin 2020-as kutatása több kitöltési mintázatot hasonlít össze, mindegyik eltérő előnyökkel és hátrányokkal:

Honeycomb (Méhsejt): Számos tanulmány szerint az egyik legerősebb kitöltési mintázat. Az ANOVA analízis azt mutatta, hogy a méhsejt-mintázat 50% sűrűségnél ~13%-kal magasabb hajlítósilárdságot biztosít a lineáris (grid) mintázathoz képest. Az előny: kiváló nyomószilárdság és terheléelosztás, valamint esztétikus megjelenés. A hátrány: lassabb nyomtatás az irányváltások miatt. [14]

Gyroid: A legegyszerűsebb szilárdság minden irányban, beleértve a Z-tengelyt is, jellemzi ezt a mintázatot. Az organikus, folytonos 3D szerkezet egyenletes stresszeloszlást biztosít, ami különösen előnyös az ütésállósághoz és rugalmas alkatrészekhez. Hátrány: gyakran a leglassabb nyomtatás. [14]

Grid (Háló) és Rectilinear (Egyenes): A leggyorsabb nyomtatási sebességgel rendelkeznek. Jó X-Y síkbeli szilárdságot biztosítanak, de Z irányban gyengébbek. Az ANOVA analízis szerint az infill minta az ütésállóság varianciájának 70%-áért felelős. [14]

Triangular (Háromszög): Középső kategória az erősség és nyomtatási idő között. Egyes tanulmányok szerint túlteljesít a honeycomb-hoz képest bizonyos terhelési típusoknál. [14]

Koncentric: Egyes tanulmányokban a legmagasabb Young modulus és húzószilárdság értékeket mutatja. Rideg törési mód: sík törésfelület merőlegesen a húzóterhelésre. Hátrány: Alacsony felületi érintkezés a külső héjjal, gyenge Z-tengely menti szilárdság. [14]

Falak száma és peremvastagság (Wall Count and Perimeter Shell Thickness)

A peremvastagság (shell/wall thickness) az FDM alkatrészek mechanikai szilárdságának egyik legfontosabb paramétere, amely közvetlenül befolyásolja a mechanikai szilárdságot, az ütésállóságot és a tömítettséget. A falak száma azt jelöli, hogy hány egymás után nyomtatott vonalból áll az alkatrész külső borítása, ami közvetlen kapcsolatban van az alkatrész peremvastagságával. [7]

A kevés fal (1–2) gyorsabb nyomtatást és kisebb anyagfelhasználást eredményez, azonban csökkenti az ütésállóságot és a rétegek közötti kohéziót. Ezzel szemben a több fal (3–5) jelentősen növeli a hajlító- és húzószilárdságot, valamint az izotróp viselkedést, különösen az olyan irányokban, ahol az FDM anizotrópia miatt az alkatrész gyengébb. [16]

Mazlan és munkatársai (2023) szisztematikus vizsgálatában azt találták, hogy a falak száma szignifikáns hatással van az alkatrészek szilárdságára. Az eredmények azt mutatják, hogy egy 0,4 mm-es fűvókához egy falat (~0,4 mm) nyomtatva az alkatrész 396,63 MPa max. feszültséget ért el, míg három falat (~1,2 mm) nyomtatva az érték 834,37 MPa-ra nőtt – ez körülbelül 110%-os szilárdsági növekedés. Ez azt jelenti, hogy az extra falak (perimeters) sokkal hatékonyabbak a szilárdság növelésében, mint az infill sűrűség további emelése. [16]

A MakerVerse tanulmánya szerint a peremvastagság nagyobb hatást gyakorol a szilárdságra, mint az infill: azaz két-három extra perimeter (fal) gyakran több szilárdságot ad, mint az infill 20%-ról 30%-ra emelése. Az ajánlott minimum peremvastagság 1,2-1,5 mm (körülbelül 3 falat 0,4 mm fűvóka mellett) a legtöbb alkalmazáshoz, míg szerkezeti, nagy igénybevételű alkatrészekhez 2-3 mm vagy több javasolt. [17]

A falak számának növelése azonban csak egy pontig hatékony: 4–5 fal fölött a tömeg növekedése és az kitöltés szerepének csökkenése miatt a mechanikai előny már mérséklődik, ezért célszerű az alkatrész funkciójához igazítani. [16] [17]

Rétegvastagság (Layer Height)

A rétegvastagság az egyik legkritikusabb nyomtatási paraméter, amely befolyásolja a mechanikai szilárdságot, felületi minőséget, nyomtatási időt és a dimenzionális pontosságot. Az általános irányelvek szerint a rétegvastagság a fűvóka átmérő 25-80%-a között optimális. Standard 0,4 mm fűvókához 0,1-0,3 mm az ajánlott rétegvastagság. [18]

CNC Kitchen tanulmánya (Stefan, 2019) PLA minták szisztematikus vizsgálatát végezte el különböző rétegvastagságoknál (0,1-0,3 mm). Az eredmények azt mutatták, hogy 0,1 mm rétegvastagság esetén érhető el a legmagasabb Z irányú szilárdság a jobb rétegtapadás miatt. 0,3 mm rétegvastagság esetén alacsonyabb a Z-irányú szilárdság, de X-Y síkban hasonló értékek születtek. A tényleges eltérés ~5-10% a különböző rétegvastagságok között, ami nem hatalmas eltérés, de konzisztens. [18]

Extrúziós hőmérséklet és réteghézió

Az extrúziós hőmérséklet az FDM technológiában az egyik legkritikusabb paraméter a rétegek közötti tapadás (interlayer bonding) szempontjából, amely közvetlenül befolyásolja a végső mechanikai szilárdságot és szerkezeti integritást [18]

Panico és munkatársai (2025) ABS-sel végzett DoE (Design of Experiments) tanulmánya kimutatta, hogy az extrúziós hőmérséklet a mechanikai viselkedés egyik legfontosabb faktora. Az optimális ABS nyomtatáshoz 260-280°C közötti hőmérséklet szükséges az optimális tapadás biztosításához. A szakirodalom azt mutatja, hogy az extrúziós hőmérséklet 5-10°C-os eltérése is 10-20%-os szilárdság-különbséget okozhat. [19] [18] [7]

Ferretti és munkatársai (2021) modellje szerint az extrúziós hőmérséklet és a kamra hőmérséklete közötti összefüggés a sűrűségeen keresztül befolyásolja az adhéziót: nagyobb sűrűség jobban elősegíti a molekuláris kötődést. Ez az oka annak, hogy zárt, fűtött kamrás nyomtatók (amelyek fent említett anyagok, mint PA, PC) rendkívüli adhéziós teljesítményt tudnak biztosítani. [18]

A szakirodalom egyetért abban, hogy a rétegtapadás minősége döntően befolyásolja a szakitószilárdságot és az ütésállóságot. A nem megfelelő hőmérséklet gyenge rétegek közötti kötések eredményezhet, amelyek repedések elindulásához, töréséhez vezethetnek. [18] [7]

Összességében elmondható, hogy az extrúziós hőmérséklet kritikus paraméter a réteghézió szempontjából. Az optimális értéke anyag-specifikus, és már 5-10°C-os eltérés mérhető szilárdság-változást okozhat. A zárt kamrás nyomtatók alkalmazása és a kamra–extrúzió hőmérsékletkülönbségének csökkentése jelentősen javítja az adhéziót és a végső mechanikai teljesítményt. [18] [7]

A nyomtatási paraméterek és hatásuk összefoglalása

A nyomtatási paraméterek optimalizálása az anyag típusának, nyomtató specifikus jellemzőinek és az alkalmazási követelményeknek az egyensúlyára épül. Az optimális nyomtatási paraméterek meghatározása minden anyagtípus esetében kísérleti úton történik, mivel az egyes gyártók filamentjei között is jelentős eltérés mutatkozhat az olvadási és tapadási jellemzőkben. A 3D nyomtatás során az egyes paraméterek jelentősen befolyásolják a kész alkatrész mechanikai tulajdonságait. Az **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** a feldolgozott szakirodalmak alapján röviden összefoglalja a nyomtatási paraméterek hatását az FDM 3D nyomtatott alkatrészek különböző tulajdonságaira.

Paraméter	Hatás a tulajdonságokra
Orientáció	Erősen hat az anizotrópiára. Rétegsíkban nagyobb szilárdság, rétegirányban gyengébb tapadás. Az optimális orientáció csökkenti a rétegelválás lehetőségét.
Rétegvastagság (Layer Height)	Meghatározza a rétegek közötti tapadást. Kisebb rétegvastagság → jobb felületi minőség, de hosszabb nyomtatási idő. Nagyobb rétegvastagság → gyorsabb gyártás, gyengébb réteghézió.
Falak száma és peremvastagság (Wall Count / Shell Thickness)	Jelentősen növeli a hajlító- és húzószilárdságot, csökkenti a porozitást, javítja a tömítettséget. Túl sok fal esetén nő a tömeg és a merevség.
Kitöltés (Infill)	Befolyásolja a belső szerkezeti merevséget, ütéselnyelő képességet és tömeget. Nagyobb infill sűrűség → nagyobb merevség és szilárdság, de hosszabb gyártási idő és magasabb anyagfelhasználás.
Extrúziós hőmérséklet	Meghatározza a réteghéziót és az anyag kristályosodási fokát. Alacsony hőmérsékleten gyenge rétegtapadás, magas hőmérsékleten jobb kohézió, de nő a vetemedés kockázata.

2. táblázat. A nyomtatási paraméterek hatásának összefoglalása [7] [18] [19]

5. Lefolytatott validációs tesztek

Ez a fejezet három különböző járműalkatrészre vonatkozó hosszú távú terhelési- és üzemeltetési tesztek eredményeit mutatja be, melyek során az alkatrészek valós, gyakorlati körülmények között kerültek felhasználásra.

5.1 Belső tárolórekesz

Az első esettanulmány tárgya egy belső tárolórekesz, amely személyautó középkonzoljaiba illeszkedik. A cél az volt, hogy a nyomtatott alkatrész tartósan helyettesítse az eredeti, sérült gyári elemet, valamint a funkcionális követelmények megtartása mellett kibővített tárolóhelyet biztosítson.

A tároló PETG anyagból készült. Az anyag leírása alapján a PETG 70-80 °C-os hődeformációs hőmérséklete autó belterében elsöre elegendőnek bizonyult és jelentős UV – kitettséggel sem kalkuláltam az anyagválasztás során, mivel a doboz az autó középkonzoljaiba volt beépítve, a rádió alá.

A tároló 1,5 évig hibátlanul helyt állt, azonban egy meleg nyári napon, mikor a parkolóban hagyott autó belső hőmérséklete 60–70 °C-ra volt becsülhető, közvetlen besugárzás hatására az alkatrész felületi hőmérséklete elérhette, sőt meghaladhatta a hődeformációs hőmérsékletet.

Továbbá a másfél éves használat és a minimális, de ismétlődő UV-kitettség (mivel az autó többnyire mélygarázsban parkolt) csökkenthette az anyag termikus ellenállását. Ennek következtében az alkatrész meglágyult, és a felső rész lokálisan besüppedt. Szellőztetés után az anyag hamar visszahűlt a hődeformációs hőmérséklet alá, visszanyerte eredeti szilárdságát, de maradó alakváltozást szenvedett. A tesztelt alkatrész a 2. ábrán látható.



2. ábra: Belső tárolórekesz 1,5 év használat után¹⁴⁶

5.2 Yamaha Bt 1100 hátsó lámpatest

A második esettanulmány tárgya egy Yamaha BT1100 Bulldog típusú motorkerékpár hátsó lámpatest újra gyártása. A vizsgálat célja egy olyan járműalkatrész előállítása volt, amely kültéri, rezgésnek, nedvességnek és UV-sugárzásnak kitett környezetben is funkcionálisan helyettesíteni képes a gyári darabot.

Az alkatrész a jármű hátsó részén helyezkedik el, így folyamatosan ki van téve a napfénynek, hőmérséklet ingadozásoknak, nedvességnek és a motor által keltett vibrációnak. A Yamaha BT1100-es típus hibája a farokidom és lámpatest repedése, eltörése. Gyári, vagy utángyártott alkatrész nem elérhető, így a tervezett és legyártott lámpatest valós piaci hiányt pótol. Az 1000 km-es teszt után a következő megállapítások tehetők:

A lámpatest jobb szélén kisebb rétegszétválás (delamináció) volt észlelhető. A jelenség lokális volt, 3–5 réteg vastagságban, körülbelül 5–8 mm hosszúságú szakaszon jelentkezett, ami a 3. ábrán is látható. A hiba valószínűleg a hideg időben tapasztalt ASA ridegebb viselkedésével és a motor által keltett rezgéses terheléssel magyarázható. Bár szerkezeti szempontból nem jelentett meghibásodást, fontos megfigyelésként értékelhető, mivel rámutat az anyag hőmérsékletfüggő rétegekohéziós tulajdonságaira. A delamináció, azaz a rétegszétválás megelőzhető lenne a nyomtatási paraméterek finomhangolásával, az extrúziós hőmérséklet növelésével. További befolyásoló tényező lehetett, hogy a lámpatest – bár nem közvetlenül ezen a ponton, de érintkezett a lámpabúrával, ami a rezgések továbbításán keresztül lokális

¹⁴⁶ Saját készítés

feszültséget okozhatott. Ez rávilágít arra, hogy reverse engineering módszerrel nehéz elsőre tökéletes eredményt elérni, az első iterációk a legtöbbször igényelnek finomhangolást.



3. ábra. 1000 km-es teszten átesett hátsó lámpatest¹⁴⁷

Az alkatrész farokidomhoz csatlakozó csavarjainak egyike minimálisan lötyög a fészkében. Ezt egy kis konstrukciós változtatással sokkal megbízhatóbbá lehet tenni, mégpedig úgy, hogy pillanatragasztó helyett két komponensű epoxy ragasztóval történik a beragasztás, esetleg egy ellendarab ráragasztása még inkább megakadályozza a csavar mozgását.

Az alkatrészen nem jelentkeztek repedések, egyéb rétegszétválások vagy deformációk sem a hőmérséklet-ingadozás, sem a rezgések hatására.

Az anyag színe és felületi megjelenése stabil maradt az egész teszt során: nem volt elsárgulás vagy pigmentváltozás, ami az ASA UV-állóságát bizonyítja.

5.3 Honda NTV 650 légszűrőcsonk

A harmadik esettanulmány tárgya egy Honda NTV650 típusú motorkerékpár légszűrőház és karburátor közötti szívócsonkjának újra gyártása. A vizsgálat célja egy olyan alkatrész létrehozása volt, amely rugalmas, vegyszer- és hőálló anyagból készül, és hosszú távon képes benzines környezetben, vibrációs és hőterhelés mellett is megtartani tömítettségét és méretstabilitását.

Az eredeti gumielem az évek során előregedett és berepedezett, emiatt a motor fals levegőt szívhatott, ami rontotta az égés hatásfokát és a motor működését. Gyári alkatrész már nem elérhető, így a cél egy 3D nyomtatott, rugalmas utángyártott elem létrehozása volt.

Ebben az esetben az anyagválasztás kiemelt kutatómunkát igényelt, mivel a szívócsonk a motortérben összetett igénybevételnek van kitéve. A mérések alapján maximálisan 60 °C hőmérséklet fordul elő, a környezetben pedig folyamatosan jelen van a benzinpára és az olajfilm. A választás az Extrudr Medium Flex Line TPU-re esett, ami egy speciális, ipari alkalmazásokhoz kifejlesztett, olajnak és benzinnek jól ellenálló, gyártói adatok alapján 120°C-os hőmérsékletig stabil TPU.

A 400 km teszt alatt az alkatrész hibamentesen működött.

A motor stabil alapjáratot és egyenletes teljesítményt mutatott, fals levegő beszívása nem volt tapasztalható.

Az alkalmazott TPU anyag megtartotta rugalmasságát, nem keményedett el, és nem mutatott repedést, szakadásra vagy öregedésre utaló jelet. A legyártott és tesztelt alkatrész a 4. ábrán látható

4. ábra: 400 km-es teszten átesett légszűrőcsonk¹⁴⁸

¹⁴⁷ Saját készítés

¹⁴⁸ Saját készítés

6. Átfogó anyaghasználati ajánlás FDM 3D nyomtatott járműalkatrészekhez

A gyakorlati vizsgálatok és az irodalmi háttér alapján egyértelműen megállapítható, hogy az FDM technológia megfelelő anyagválasztással és gyártási paraméterezéssel alkalmas funkcionális, nem teherhordó járműalkatrészek előállítására. Azonban az alkalmazási környezet, a hő- és vegyi terhelés, valamint az alkatrész funkciója alapvetően meghatározza, hogy mely alapanyag használata javasolt.

Az alábbi ajánlás az elvégzett három esettanulmány (PETG, ASA, TPU) és a kapcsolódó szakirodalmi adatok alapján készült, kifejezetten a járműipari alkalmazások szemszögéből.

6.1 PETG – beltéri, mérsékelt hőmérsékletű környezetekhez

A PETG jó mechanikai szilárdsággal és mérettartással rendelkezik, nyomtatása egyszerű, vetemedése minimális. A vegyszerállósága (olaj, zsír, tisztítószer ellen) megfelelő, ezért belső térben, ahol tisztítószerrel, olajjal vagy zsírral való érintkezés előfordulhat nem teherhordó elemekhez használható, ahol a hőmérséklet nem haladhatja meg a 60-65 °C-ot .

A hődeformáció ugyanakkor a hőmérséklet emelkedésével gyorsan jelentkezik, ezért napfénynek kitett helyeken, vagy motortéri hőhatásnak kitett helyeken nem megfelelő.

Javasolt alkalmazási területek:

- Belső tárolórekeszek, takaróelemek, konzolok
- Műszerfalon belüli, zárt térben lévő alkatrészek
- Kis terhelésű rögzítők, burkolatok
- Üzemi hőmérséklet: max 60 °C

6.2 ASA – Kültéri, UV- és hőterhelt elemek

Az ASA a Yamaha BT1100 lámpatestének példáján alkalmas anyagnak bizonyult kültéri alkalmazásra. A több mint 1000 km-es teszt során az anyag nem mutatott sem repedést, sem színváltozást. Ez megerősíti, hogy az ASA hő- és UV-stabilitása autóiipari szempontból kiemelkedő. Mechanikailag is stabil maradt a motor rezgése és az időjárás hatására ellenére, így külső idomok, burkolatok, tartók és szerelvények esetében elsődlegesen ajánlott, de a megfelelő beállítások alkalmazása kulcsfontosságú.

Ajánlott felhasználás: karosszériaelemek, idomok, lámpaházak

Nem ajánlott: rugalmas vagy tömítő funkciójú alkatrészek

6.3 Motortéri és ipari alkalmazások

A Honda NTV650 szívócsonk tesztje alapján a speciális, hő- és benzinálló TPU (Extrudr Medium Flex Line) bizonyította, hogy a rugalmas filamentek is alkalmasak lehetnek valós, funkcionális alkatrészek gyártására, ha a vegyi és hőterhelési viszonyokhoz igazodnak.

A különböző TPU filamentek alkalmas alternatívát jelentenek előregeredett gumielemek, tömítések kiváltására is.

A motortérben és az egyéb magas hő- vagy vegyi terhelésű környezetben az általános FDM-filamentek már csak korlátozottan alkalmazhatók. Itt mérnöki vagy kompozit alapanyagok, például PA (Nylon), PC, PEEK, PPS, vagy üvegszállal erősített ASA/PETG jelenthetnek tartós megoldást. Ezek az anyagok magasabb hődeformációs hőmérséklettel (120–250 °C), valamint kiváló szilárdság-súly aránnyal rendelkeznek, így tartós szerkezeti vagy rögzítőelemek gyártására is alkalmasak.

6.4 Filamentek közti különbségek

A filamentek fontos tulajdonsága, hogy felszívják a levegőből a nedvességet. Bár a filamentek nedvesség felvevő hajlandósága anyagonként eltér, egy régóta tárolt, kibontott filament, ami felvette a levegőből a nedvességet, okozhat szerkezeti problémákat a gyártott alkatrészben. Ezért érdemes a filamentek szárítása. A 3. táblázat: FDM nyomtatáshoz használható filamentek szárítási adatai a különböző filamentek nedvességfelvételi hajlandóságát és szárítási paramétereit tartalmazza. [20]

Kompozitok esetén az üvegszál semleges ilyen szempontból, de a szénszállal erősített anyagok több nedvességet tarthatnak magukban, magasabb szárítási hőmérséklet lehet szükséges.

Az FDM nyomtatáshoz elérhető filamentek széles választéka egyben előny és hátrány is. Legtöbb esetben azonos nevű anyagok különböző gyártóktól eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek. Például PETG-ből is több változatban elérhető, adott tulajdonságokra, alkalmazásokra optimalizálva. Többek között külső megjelenés, gyors nyomtathatóság, nagy merevség stb., de egy gyártó adott típusában is lehetnek évjárat függő különbségek, mivel az adalékanyagok összetétele változhat.

Anyag	Hőmérséklet (°C)	Szárítási idő	Nedvességfelvételi hajlandóság
PLA	40-50°C	4-6 óra	Alacsony
PETG	55-70°C	4-8 óra	Közepes
ABS	60-70°C	4-8 óra	Magas
ASA	80-90°C	4-8 óra	Magas
TPU	50-60°C	4-6 óra	Közepes - magas
PP	40-50°C	4-6 óra	Alacsony
PA6/PA12	70-85°C	8-12 óra	Nagyon magas (hidrofil)
PA CF	80-100°C	6-8 óra	Nagyon magas
PA6/PA12 GF	75-85°C	6-8 óra	Nagyon magas
PC	80-100°C	5-8 óra	Magas

3. táblázat: FDM nyomtatáshoz használható filamentek szárítási adatai [20] [21]

Fontos az egyes anyagok, adott gyártóinak, konkrét típusának ismerete a megbízható gyártáshoz. A filamentek minőségének egységességének hiánya folytonos kockázat, amit csak folyamatos teszteléssel lehet kezelni.

6.5 Általános javaslatok az FDM technológiával nyomtatott járműalkatrészekhez

A gyakorlati vizsgálatok eredményei alapján az FDM technológiával gyártott járműalkatrészek tartóssága nem kizárólag az anyagválasztáson múlik, hanem jelentős részben a modelloptimalizálás és nyomtatási paraméterezés minőségén is. A megfelelő geometriai kialakítás és technológiai beállítás alapvetően meghatározza az alkatrész mechanikai viselkedését, felületi minőségét, valamint az élettartamot. Az alábbiakban összefoglalva szerepelnek azok az általános tervezési irányelvek, amelyek járműalkatrészek FDM-nyomtatásánál különösen fontosnak bizonyultak:

Geometriai tervezés és modelloptimalizálás

Az alkatrész funkcionális felületeit (illesztések, csatlakozási pontok, rögzítési peremek) célszerű a gyári méretek alapján pontosan reprodukálni, míg a belső, nem illeszkedő részek optimalizálhatók (pl. súlycsökkentés, merevítések).

Az éles sarkokat és átmeneteket kerülni kell, mivel ezek a feszültséggyűjtő helyek repedésindulást okozhatnak. A lekerekített élek ($R = 0,5-1,5$ mm) javítják a feszültségeloszlást és a nyomtatás folytonosságát.

Furatok, menetes rögzítések esetén célszerű a menetet nem közvetlenül nyomtatni, hanem fémbetéttel (anyacsavar, menetes hüvely) kialakítani, ahogy a hátsó lámpatestnél is alkalmazásra került.

Nyomtatási orientáció

Az alkatrészt mindig úgy kell tájolni, hogy a fő igénybevételi irány párhuzamos legyen a rétegek síkjával – így csökkenthető a delamináció és a rétegleválás esélye.

Ha az alkatrész nagyobb felületi pontosságot igényel, a látható vagy illesztési felület legyen a nyomtató Z-tengelyével párhuzamos, így simább felület érhető el.

Az orientációt érdemes úgy megválasztani, hogy minimalizálja a szükséges támaszstruktúrákat, ezzel csökken a felületi utómunka és a nyomtatási idő.

Falak száma és peremvastagság

A legtöbb merev járműalkatrész esetén legalább 3–4 fal (1,2–1,6 mm) javasolt a megfelelő peremszilárdság és tömörség biztosításához.

A peremvastagság növelése sokkal hatékonyabban javítja a szilárdságot, mint az kitöltés sűrűségének növelése.

Rugalmas anyagoknál 2 fal is elegendő, mert a túlzott peremvastagság merevítene az alkatrészt.

Kitöltés

Funkcionális, de nem teherhordó alkatrészekhez 40–60% sűrűség a legjobb kompromisszum. A Gyroid és Honeycomb mintázatok bizonyultak a legjobb energiaelnyelő és egyenletes terheléselosztó szerkezeteknek. Nagyobb infill sűrűség helyett célszerűbb a falvastagság növelése vagy a tájolás optimalizálása.

Rétegvastagság és nyomtatási sebesség

A 0,2 mm rétegvastagság általános beállításként jól bevált, mivel egyensúlyt teremt a részletgazdagság és a nyomtatási idő között.

Nagyobb mechanikai igénybevételnél (tartók, konzolok) a vastagabb réteg (0,25–0,3 mm) javíthatja a rétegtapadást, míg esztétikai alkatrészeknél a vékonyabb réteg (0,1–0,15 mm) ajánlott.

7. Összefoglalás

Jelen publikációban áttekintésre kerültek a 3D nyomtatás alkalmazhatóságának lehetőségei járműalkatrész gyártási szempontból, majd az FDM technológia részletes elemzése után gyakorlati tesztek során történt az elmélet igazolása. A cikk célja az volt, hogy gyakorlati példákon keresztül bemutassa az FDM (Fused Deposition Modeling) technológia alkalmazhatóságát járműalkatrészek funkcionális újra gyártására. A kutatás központi kérdése az volt, hogy a különböző hő- és mechanikai igénybevételű környezetekben milyen mértékben képesek az eltérő alapanyagok – PETG, ASA és TPU – tartósan helyettesíteni a gyári alkatrészeket, valamint, hogy a nyomtatási paraméterek és a geometriai optimalizálás miként befolyásolják a végeredmény használhatóságát.

A cikk első részében az FDM technológia működési elve és főbb paraméterei kerültek bemutatásra, különös tekintettel azokra a tényezőkre, amelyek közvetlenül hatnak az alkatrészek mechanikai és hőállósági tulajdonságaira. Külön fejezet foglalkozott az anyagválasztás és a nyomtatási paraméterek (rétegvastagság, infill mintázat, peremvastagság, orientáció, hőmérséklet stb.) hatásával, ezek elméleti hátterét szakirodalmi kutatás és mért eredmények támasztották alá.

A gyakorlati részben három különböző környezeti és funkcionális igénybevételt képviselő alkatrész esettanulmányon keresztül került vizsgálatra:

PETG – Mercedes 1 DIN-es tárolórekesz:

Az alkatrész beltéri, mérsékelt hőterhelésű környezetben működött. Az eredmények szerint a PETG jó mérettartással és vegyszerállósággal rendelkezik, azonban magas hőmérséklet és direkt napsugárzás hatására hődeformációt szenved. Ez alapján beltéri, árnyékolt járműelemekhez ajánlott.

ASA – Yamaha BT1100 hátsó lámpatest:

Kültéri, rezgésnek és UV-terhelésnek kitett elem esetében az ASA jól teljesített. A 1000 km-es tartós teszt során nem mutatott deformációt vagy repedést, a színtabilitás is megmaradt. Az ASA anyag tehát ideális választás kültéri burkolatokhoz és idomokhoz, ahol időjárásállóság és hőstabilitás szükséges.

TPU – Honda NTV650 légszűrőcsonk:

A rugalmas és vegyszerálló TPU anyagból nyomtatott alkatrész a motortér közelében, üzemanyag- és hőterhelésű környezetben került tesztelésre. A speciális, ipari minőségű TPU megfelelő tömítettséget, rugalmasságot és benzinnel szembeni ellenállást mutatott, bizonyítva, hogy az FDM technológia már komplex, elasztomer jellegű alkatrészekre is alkalmazható.

A három vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy a megfelelő anyagválasztás és paraméterezés mellett az FDM technológia képes tartós és funkcionális járműalkatrészek előállítására. A nyomtatási orientáció, a peremvastagság és a rétegkohézió optimalizálása döntő szerepet játszik a mechanikai szilárdságban, míg a geometriai módosításokkal (falvastagságnövelés, lekerekítések, menetes betétek) az élettartam jelentősen növelhető.

Az anyagok összehasonlítása alapján:

PETG – beltéri, alacsony hőmérsékletű környezetre javasolt,

ASA – kültéri, UV-sugárzásnak kitett alkalmazásokhoz ideális,

TPU – rugalmas, vegyszeres közegben működő alkatrészekhez alkalmas,

míg a motortéri vagy szerkezeti elemekhez mérnöki vagy kompozit alapanyagok (PA, PC, CF-ASA) használata szükséges.

A cikkben végzett vizsgálatok rávilágítottak, hogy az FDM additív gyártás nem csupán prototípusok, hanem funkcionális, tartós járműalkatrészek gyártására is alkalmas. Az anyag- és technológiai fejlesztések (kompozit filamentek, hőálló polimerek) várhatóan tovább bővítik a technológia ipari felhasználási körét, különösen az alkatrész-utángyártás és egyedi gyártás területén.

8. Köszönetnyilvánítás

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Irodalomjegyzék

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen és D. Hui: Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, 2018, pp. 172–196.
- [2] S. Wickramasinghe, T. Do és P. Tran: FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments, *Polymers*, vol. 12, no. 7, 2020, art. no. 1529.
- [3] R. Augustsson és D. Becevic: Implementing additive manufacturing for spare parts in the automotive industry - A case study, Chalmers University of Technology (Master's Thesis), 2015.
- [4] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah és Z. Arifin: A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters, *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, 2021, pp. 639–649.
- [5] J. Sedlak, D. Hrusecka, E. Jurickova, L. Hrbackova, L. Spisak és Z. Joska: Analysis of the Mechanical Properties of 3D-Printed Plastic Samples Subjected to Selected Degradation Effects, *Materials*, vol. 16, no. 6, 2023, art. no. 2287.
- [6] M. Kempler: QIDI Q1 Pro 3D Printer Review: A Heated Value, *Tom's Hardware*, 2024. [Online]
- [7] D. Syrlybayev, B. Zharylkassyn, A. Seisekulova, M. Akhmetov, A. Perveen és D. Talamona: Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review, *Polymers*, vol. 13, no. 10, 2021, art. no. 1587.
- [8] C.-W. Chang, C.-C. Huang, Y.-J. Jiang, P.-H. Wang és F.-S. Chuang: Effects of Grapevine Fiber and Additives on the Properties of Polylactic Acid Green Bio-Composites, *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 10, 2024, art. no. 422.
- [9] A. Z. Hameed, S. A. Raj, J. Kandasamy, M. A. Shahzad és M. A. Baghdadi: 3D Printing Parameter Optimization Using Taguchi Approach to Examine Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Mechanical Properties, *Polymers*, vol. 14, no. 16, 2022, art. no. 3256.

- [10] S. Guessasma, S. Belhabib és H. Nouri: Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling, *Polymers*, vol. 11, no. 7, 2019, art. no. 1220.
- [11] D. Vieweger, S. Diel, H.-G. Schweiger és U. Tetzlaff: Mechanical Properties of Raw Filaments and Printed Specimens: Effects of Fiber Reinforcements and Process Parameters, *Polymers*, vol. 16, no. 6, 2024, art. no. 762.
- [12] M. N. Ahmad, M. R. Ishak és M. Z. Zulkafle: The Effect of Fused Deposition Modeling Parameters (FDM) on the Mechanical Properties of Polylactic Acid (PLA) Printed Parts, *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 116, no. 1, 2024, pp. 158–169.
- [13] G. Gao, F. Xu, J. Xu, G. Tang és Z. Liu: A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts, *Micromachines*, vol. 13, no. 7, 2022, art. no. 999.
- [14] M. Lalegani Dezaki és M. K. A. M. Ariffin: The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process, *Polymers*, vol. 12, no. 12, 2020, art. no. 2792.
- [15] A. Pandžić és D. Hodžić: Tensile mechanical properties comparison of PETG, ASA and PLA-strongman FDM printed materials with and without infill structure, 33rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2022, pp. 223–231.
- [16] M. A. Mazlan, M. A. Anas, N. A. N. Izmin és A. H. Abdullah: Effects of Infill Density, Wall Perimeter and Layer Height in Fabricating 3D Printing Products, *Materials*, vol. 16, no. 2, 2023, art. no. 695.
- [17] Makerverse: Stronger Prints: Best Practices for FDM 3D Printing, Makerverse Knowledge Hub, 2025. [Online]
- [18] P. Ferretti, C. Leon-Cardenas, G. M. Santi, M. Sali, E. Ciotti, L. Frizziero, G. Donnici és A. Liverani: Relationship between FDM 3D Printing Parameters Study: Parameter Optimization for Lower Defects, *Polymers*, vol. 13, no. 13, 2021, art. no. 2190.
- [19] A. Panico, A. C. L. Capozzoli és C. S. Santoro: Multi-objective optimization of FDM 3D printing parameters set via design of experiments and machine learning algorithms, *Scientific Reports*, vol. 14, 2024, art. no. 10834.
- [20] Bambu Lab: Filament Drying Recommendations, Bambu Lab Wiki. [Online]
- [21] A. Kaptan: Investigation of the Effect of Exposure to Liquid Chemicals on the Strength Performance of 3D-Printed Parts from Different Filament Types, *Polymers*, vol. 17, no. 1, 2025, art. no. 114.
- [22] Kun Krisztián: 3D nyomtató építése és fejlesztése, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (Diplomaterv), 2015.

- [23] Angreen: Comprehensive Analysis of TPU Melting Point and Glass Transition Temperature, Angreen Blog, 2024. [Online]
- [24] Extrudr: Technisches Datenblatt – TPU Flex Medium, Extrudr GmbH, 2025. [Adatlap]
- [25] Extrudr: Chemische Beständigkeit – Datenblatt, Extrudr GmbH, 2025. [Adatlap]
- [26] D. A. Patterson, A. Patti és S. Acierno: Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Properties, Materials, vol. 14, no. 9, 2021, art. no. 2228.

