

Tribológiai vizsgálatok végeeselemes szimulációjának módszertana

Methodology of finite element simulation of tribological tests

MARADA Imre, kutató¹, Dr. KOVÁCS Sándor, vezető kutató²

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Anyagvizsgálati Osztály
H-3519 Miskolc, Iglói út 1., www.bayzoltan.hu

¹imre.marada@bayzoltan.hu, ²sandor.kovacs@bayzoltan.hu

Abstract

In this article, we describe tribological tests and related finite element simulations. During our research, we conducted two types of tribological tests. We used a tribometer to measure the coefficient of friction and the degree of wear. We then supplemented this method with finite element simulation, where we determined the change in the wear coefficient using an inverse engineering method. The methodology of this process is presented in the article.

Keywords: tribology, finite element, ball-on-disk, piston, cylinder wall

Kivonat

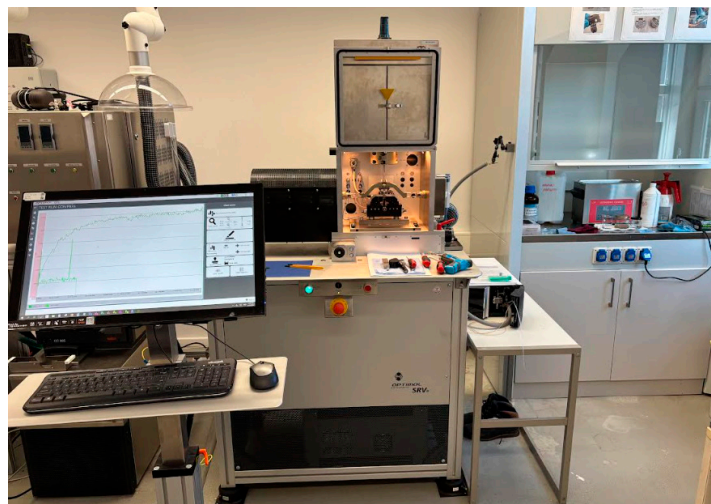
Ebben a cikkben tribológiai vizsgálatokat, illetve a hozzájuk kapcsolódó végeeselemes szimulációkat ismertetjük. A kutatás során kétféle tribológiai vizsgálattal foglalkoztunk. Ehhez egy tribométert alkalmaztunk, mellyel a súrlódási tényezőt és a kopás mértékét mértük. Ezután ezt a módszert végeeselemes szimulációval bővítettük ki, ahol egy inverz mérnöki módszer során a kopási tényező értékének változását határoztuk meg. Ennek a folyamatnak a módszertanát mutatjuk be a cikkben.

Kulcsszavak: tribológia, végeeselem, golyó-tárcsa, dugattyú, hengerfal

1. BEVEZETÉS

A tribológia az érintkező, egymáshoz viszonyítva relatív mozgást végző felületek kölcsönhatásait elemző tudományterület, amely kiemelten foglalkozik a kopás, a kenőanyagok viselkedése, valamint a súrlódási mechanizmusok leírásával.

A tribológiai vizsgálatokat egy Optimol SRV5 tribométerrel végeztük el. A szabadalmaztatott tesztelési elvvel rendelkező SRV5 tribométer lehetővé teszi a kenőanyagok, anyagok, bevonatok és alkatrészek nagy pontosságú súrlódási és kopási tesztelését. A berendezést az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A mérésekhez használt Optimol SRV5 tribométer

A berendezéssel kétféle vizsgálatot végeztünk el. Ezek az ún. golyó-tárcsa (ball-on-disk) és a belsőégésű motorok hengerfal-dugattyúgyűrű vizsgálatok voltak.

A végeselemes szimulációkat az MSC Marc szoftverben készítettünk el.

2. A TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATOK

2.1. A golyó-tárcsa vizsgálatok

A golyó-tárcsa egy szabványos vizsgálati eljárás, mely során egy szabványos átmérőjű golyó egy szabványos méretű tárcsán adott terhelés mellett alternáló mozgást végez.

A vizsgálatához használt próbatestek a 2. ábrán láthatóak.



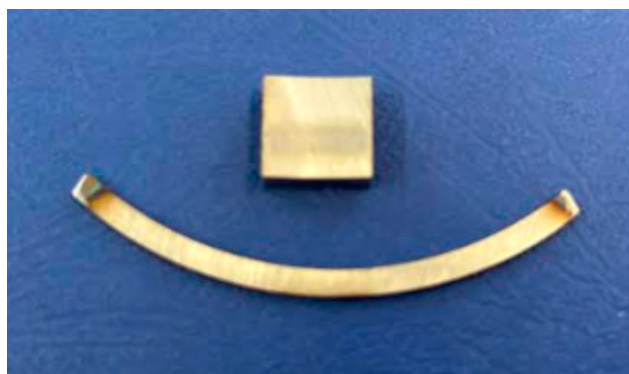
2. ábra. A vizsgálatához használt próbatestek

A vizsgálatokat az ISO 19291 szabvány alapján végeztük el. A szabványhoz képest a vizsgálati paraméterekben történt módosítás, hogy jobban tudjuk a valós működési körülményeket szimulálni.

A vizsgálatnál a súrlódási tényezőt és a golyón keletkező kopás nagyságát vizsgáltuk. Előbbinél a vizsgálat végét megelőző átlagos értékét vettük figyelembe. Az utóbbit a golyó kopási felületének átmérőivel jellemeztük, amit a mozgás irányával megegyező és arra merőleges irányban mért átmérők átlagával kaptunk meg.

2.2. A henger-gyűrű vizsgálatok

A belsőégésű motorok súrlódási veszteségének legnagyobb százalékában dugattyúgyűrű és a hengerfal érintkezése a felelős, mivel ott gyakori a magas hőmérséklet, illetve gáznyomás váltakozása és a kenési állapot változása. Ezeknek a kontrollált vizsgálata csak laboratóriumi körülmények között lehetséges. Ezért fejlesztettünk a Bay Zoltán Kutatóintézet tribológiai laborjában dugattyúgyűrű-hengerfal vizsgálatokat. A vizsgálatokhoz a hengerfal és a dugattyúgyűrű egy-egy szeletét használtuk próbatestként. A vizsgálat során a dugattyúgyűrű darabja végzett alternáló mozgást állandó terhelés mellett a hengerfal darabján. A vizsgálatához használt próbatesteket a 3. ábra mutatja.



3. ábra. A vizsgálatához használt próbatestek (felül: hengerfal darab, alul: dugattyúgyűrű darab)

A vizsgálati folyamat meghatározásához és a paramétereinek megállapításához szakirodalomkutatást végeztünk. A paraméterek kiválasztását tekintve a szakirodalom nem mutat egységes konszenzust arról, hogy a paraméterek mely választott értékei lennének egy szabványos vizsgálathoz tartozó beállítások. Végül az [1]-[9] releváns szakirodalmak alapján, illetve nagyszámú elővizsgálatot elvégezve választottuk ki a paraméterek azon kombinációját, amellyel stabil, megismételhető, jól mérhető eredményeket kaptunk, illetve amely a valós járatási körülményekhez is közel állt.

Az egyik mért adat ebben az esetben is a súrlódási tényező volt, amelynél most is a vizsgálat végét megelőző átlagos értékét vettük figyelembe. A másik mért adat pedig a hengerfal kopási mélysége volt.

3. A VÉGESELEMES MODELLEK

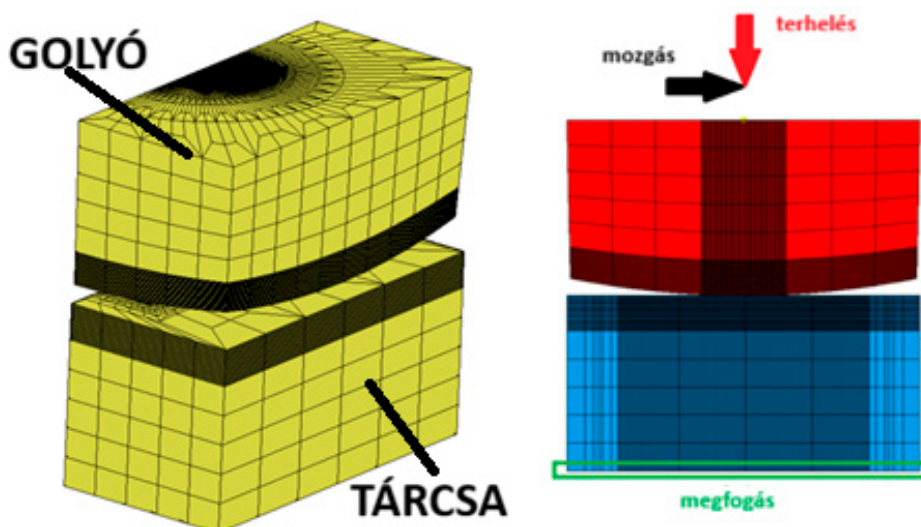
Az előző fejezetben bemutatott tribológiai vizsgálatokhoz végeselemes vizsgálatokat végeztünk el kiegészítésként. Ezzel egyrészt célunk a belső feszültségeloszlás megfigyelése volt a vizsgálat során. Másrészt inverz mérnöki módszer segítségével visszafejteni a kopási együtthatók értékét, ezzel meghatározva, hogy egy adott olaj, hogyan befolyásolja ezen tényező változását az alapesethez képest.

3.1. A golyó-tárcsa szimulációk

A golyó-tárcsa szimulációkhoz felépített végeselemes háló két testet tartalmazott: a próbatestként is alkalmazott golyót és tárcsát. Azonban, ha mindkét testet teljes nagyságában felhasználtuk volna a szimulációhoz, akkor az elem és csomópontok száma túlságosan nagy lett volna és így a szimuláció futási ideje hónapokat vett volna igénybe. Ezért csak az érintkezés közvetlen környezetét modelleztük le és használtunk egy szimmetria síkot is a mozgás irányára merőlegesen. A hálót úgy építettük fel, hogy az érintkezési helynél volt a legsűrűbb, itt $6\ \mu\text{m}$ volt az elemek nagysága. Az érintkezési helytől távolodva egyre nagyobb elemméretet vettünk fel.

A szimuláció a valós vizsgálatokat követte, azaz a golyó egyenes vonalú alternáló mozgást végzett a tárcsán miközben állandó terhelés alatt volt. A vizsgálati paraméterek is azonosak voltak a tribométerrel végzett vizsgálatok paramétereivel.

A végeselemes hálót és a terheléseket és kényszereket a 4. ábra mutatja.



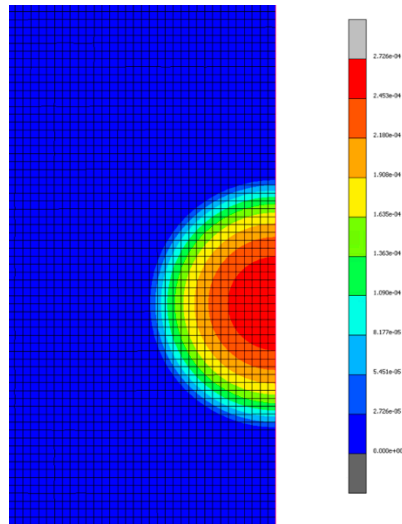
4. ábra. A végeselemes modell hálója (balra), illetve a terhelések és kényszerek (jobbra)

A szimulációhoz egy kopási szorzó faktort is bevezettünk. Erre azért volt szükség, mert a valóságban egy több órás vizsgálatot hajtottunk végre, azonban, ha a teljes időtartamot szimuláltuk volna, akkor a szimuláció hónapokig futott volna. Ezzel a kopási szorzó faktoralal szorozza fel a végeselemes szoftver a szimuláció során kapott kopási eredményeket, így kapva meg a valós eredményeket kevesebb ciklus futtatása mellett. A kopási szorzó faktor kiválasztásához több előszimulációt futtattunk kevesebb ciklussal különböző értékek használatával. Az eredmények azt mutatták, hogy a kopási szorzó faktoralal felszorozott és a faktort nem használó szimulációk között nem volt nagy különbség, ezért a továbbiakban bátran használtuk a kopási szorzó faktort.

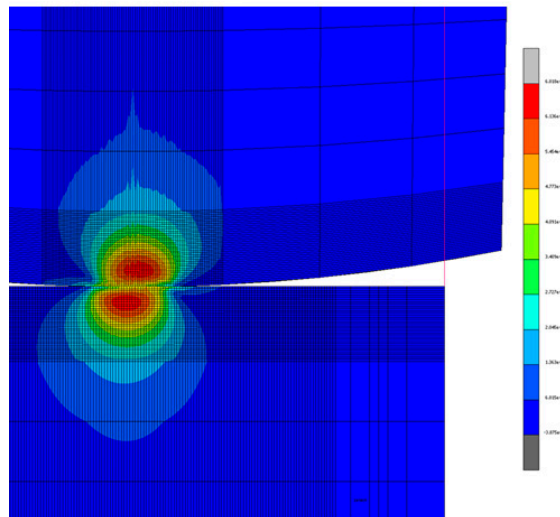
A szimuláció két lépésből állt. Az elsőben a golyó még nem mozgott, hanem a terhelést adtuk rá fokozatosan a modellre. A második lépésben kezdett el állandó terhelés mellett alternáló mozgást végezni a golyó.

A szimulációt úgy végeztük el, hogy a mérésekkel kapott súrlódási tényezőket állítottuk be és a kopási tényező változtatásával kerestük azt az esetet, amikor azt a kopási átmérőt kaptuk, amit a tribométeres vizsgálatokkal mértünk. Ezek minden esetben sikerültek is, így tudtuk megfigyelni, hogy az egyes olajok hogyan befolyásolják a kopási tényező értékét az alapállapothoz képest. Erre az 5. ábra mutat egy példát, ami a golyó kopási felületét mutatja felülnézetből. Az ábrán látható kopási átmérőt hasonlítottuk a mérésekkel kapott értékhez és azt a kopási tényező értéket kerestük, amellyel lefuttatva a szimulációt, a két átmérő értéke megegyezik egymással.

Emellett ezzel a módszerrel a teljes vizsgálat esetén meg lehet figyelni a feszültségviszonyok alakulását. Erre egy példát a 6. ábra mutat, ahol a keresztmetszetben az egyenértékű feszültség értéke látható.



5. ábra. A kopási átmérő és a kopásmélység eredménye a szimuláció végén a golyó kopó felületén egy példán bemutatva



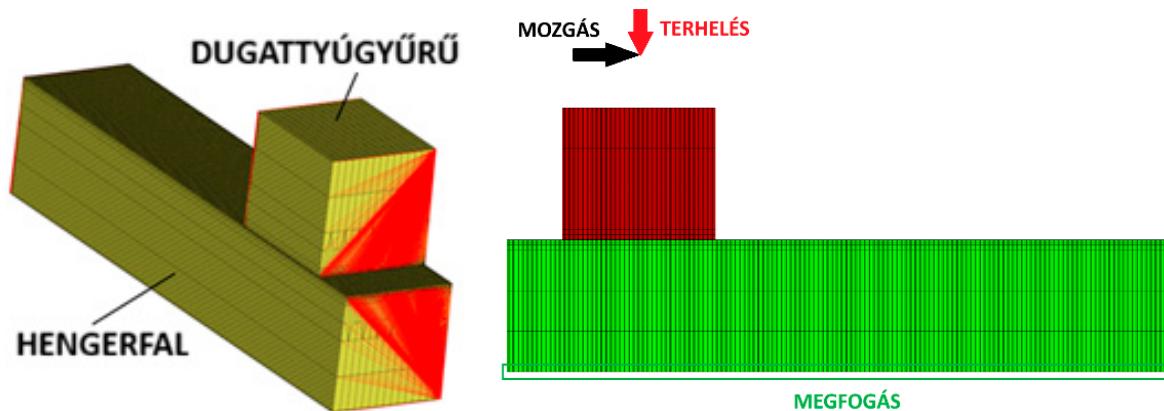
6. ábra. Az egyenértékű feszültség eredménye a keresztmetszetben a szimuláció végén egy példán bemutatva

3.2. A henger-gyűrű szimulációk

A henger-gyűrű modellt a golyó-tárcsa szimulációkhoz hasonlóan építettük fel. A felépített végesesemes háló ebben az esetben is két testet tartalmazott. Ezek a két próbatest voltak, azaz a hengerfal és a dugattyúgyűrű. Ezeknél a szimulációknál is a próbatesteknek csak egy-egy szeletét modelleztük le, szintén a futási idő hossza miatt. A hálót itt is úgy építettük fel, hogy az érintkezési helynél volt a legsűrűbb, itt $10\ \mu\text{m}$ volt az elemméret. Az érintkezési helytől távolodva pedig itt is egyre durvább lett a háló.

A szimuláció ebben az esetben is a valós vizsgálatokat követte, azaz a dugattyúgyűrű szelete egyenes vonalú alternáló mozgást végzett a hengerfal darabján, miközben állandó terhelés alatt volt. A vizsgálati paraméterek is azonosak voltak a tribométerrel végzett vizsgálatok paramétereivel.

A végeleemes hálót és a terheléseket és kényszereket a 7. ábra mutatja.



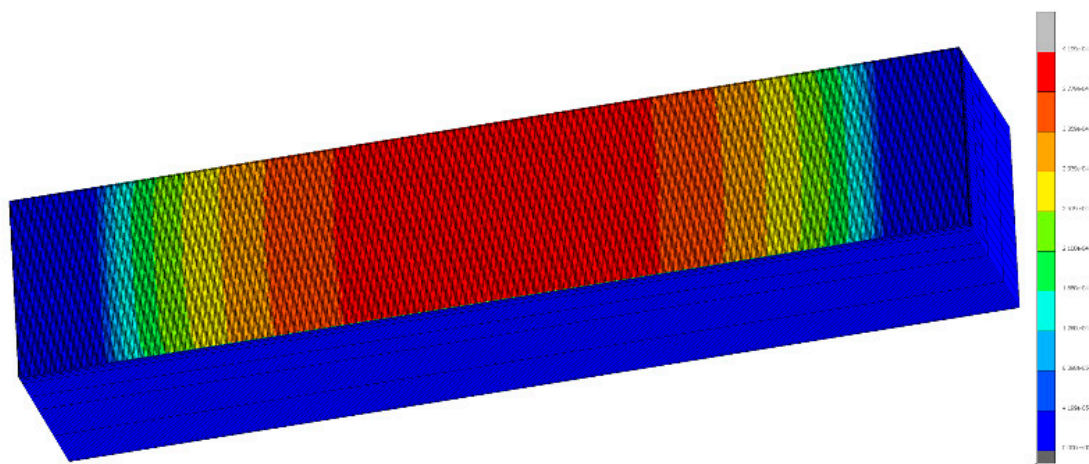
7. ábra. A végeleemes modell hálója (balra), illetve a terhelések és kényszerek (jobbra)

A szimulációhoz ebben az esetben is bevezettük a kopási szorzó faktort, mivel ebben az esetben is több órás vizsgálatokról készítettük a végeleemes modellt. A henger-gyűrű szimulációkra is végeztünk előszimulációkat kevesebb ciklus esetére és az eredmények itt is azt mutatták, hogy a kopási szorzó faktorról felszorozott és a faktort nem használó szimulációk között nem volt lényegi különbség.

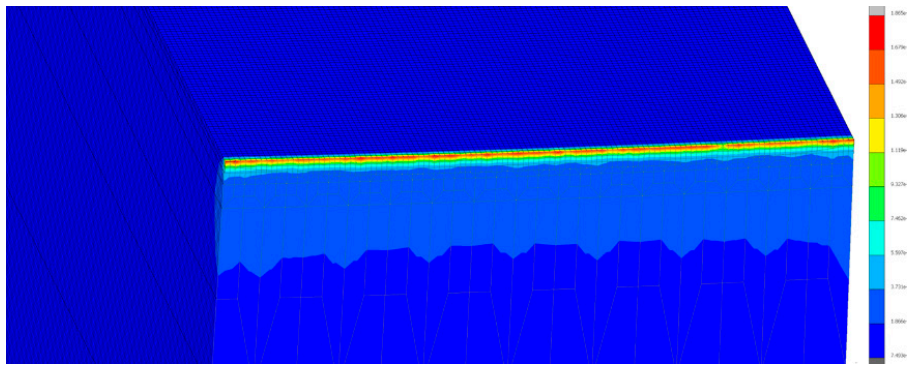
A szimuláció itt is két lépésből állt. Az elsőben a gyűrű még nem mozgott, hanem a terhelést adtuk rá fokozatosan. A második lépésben kezdett el állandó terhelés mellett alternáló mozgást végezni a dugattyúgyűrű a hengerfalon.

A szimulációt ebben az esetben úgy végeztük el, hogy a mérésekkel kapott súrlódási tényezőket állítottuk be és a kopási tényező változtatásával kerestük azt az esetet, amikor azt a kopásmélységet kaptuk, amit a tribométeres vizsgálatokkal is mértünk. Ezek ennél a szimulációnál is minden esetben sikerültek, így tudtuk megfigyelni, hogy az egyes olajok hogyan befolyásolják a kopási tényező értéket az alapállapothoz képest. Erre a 8. ábra mutat egy példát, ami a hengerfal kopási felületét mutatja. Az ábrán látható kopásmélységet hasonlítottuk a mérésekkel kapott értékhez és azt a kopási tényező értéket kerestük, amellyel lefutattva a szimulációt, a két kopásmélység értéke azonos.

Emellett ezzel a módszerrel is meg lehet figyelni a teljes vizsgálat esetén a feszültségviszonyok alakulását. Erre egy példát a 9. ábra mutat, ahol a keresztmetszetben az egyenértékű feszültség értéke látható a hengerfalon.



8. ábra. A kopásmélység eredménye a hengerfal kopó felületén a szimuláció végén egy példán bemutatva



9. ábra. Az egyenértékű feszültség eredménye a hengerfal keresztmetszetén a szimuláció végén egy példán bemutatva

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben két tribológiai vizsgálat végeeselemes szimulációval való kibővítésének módszertanát mutattuk be. A kutatáshoz először egy Optimol SRV5 tribométerrel golyó-tárcsa és hengerfal-dugattyúgyűrű vizsgálatokat végeztünk, ahol a súrlódási tényező értékét és a kopás mértékét mértük, majd ezeket az értékeket felhasználva végeeselemes szimulációkat végeztünk. A szimulációk során inverz mérnöki módszerrel iteratív lépésekkel kerestük a mért olajokhoz tartozó kopási tényező értékeket úgy, hogy adott súrlódási tényező mellett addig változtattuk a kopási tényező értékét, amíg a mérésekkel kapott kopási mennyiség értékeket nem kaptuk meg. Ezzel a módszerrel nem csak a kopási tényező változása, hanem a vizsgálatok során fellépő feszültségviszonyok is vizsgálhatóak.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Lenauer, C., Tomastik, C., Wolpeka, T., Jech, M.: Piston ring wear and cylinder tribofilm in tribotests with lubricants artificially altered with ethanol combustion products. *Tribology International*, Vol. 82, pp. 415-422, 2015
- [2] Obert, P., Müller, T., Fűßer, H.-J., Bartel, D.: The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test. *Tribology International*, Vol. 94, pp. 306-314, 2016
- [3] Wolpeka, T., Cihak-Bayr, U., Lenauer, C., Ditrói, F., Takács, S., Sequard-Base, J., Jech, M.: *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 70, Nr. 4, pp. 687-699, 2018
- [4] ASTM G181 -11: Standard Test Method for Conducting Friction Tests of Piston Ring and Cylinder Liner Materials Under Lubricated Conditions, 2016
- [5] ISO 19291: Lubricants – determination of tribological quantities for oils and greases – Tribological test in the translatory oscillation apparatus, 2016
- [6] Marton, Gy.: Friction and wear experiments on the piston ring – cylinder liner subsystem of a passenger car internal combustion engine. Diplomamunka. Győr: Széchenyi István Egyetem, Járműhajtástechnológiai Tanszék, 2023
- [7] Nagy, B.: Mintabeállító szerszám tervezése hengerfal-dugattyúgyűrű modellen folytatott tribológiai kísérletekhez. Diplomamunka. Győr: Széchenyi István Egyetem, Járműhajtástechnológiai Tanszék, 2021
- [8] Lee, P. M., Chittenden, R. J.: Consideration of Test Parameters in Reciprocating Tribometers Used to Replicate Ring-On-Liner Contact. *Tribology Letters*, Vol. 39, pp. 81-89, 2010
- [9] Nagy, A. L.: Oil degradation and engine wear due to alternative fuels. PHD disszertáció. Győr: Széchenyi István Egyetem, Járműhajtástechnológiai Tanszék, 2022