



SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM  
AUDI HUNGARIA  
JÁRMŰMÉRNÖKI KAR

## **TDK DOLGOZAT**

# **Nanoméretű titán-dioxidot tartalmazó kenőolajok tribológiai hatásainak vizsgálata Design of Experiments módszer alkalmazásával**

**Szabó Kevin**

**Járműmérnöki MSc szak  
Belső égésű motorok modul**

**Belső konzulens:**

**Szabó Ádám István**

**Járműhajtás Technológia Tanszék**

**Győr, 2024**

## Nyilatkozat

Alulírott, Szabó Kevin, járműmérnöki MSc szakos hallgató kijelentem, hogy a „Nanoméretű titán-dioxidot tartalmazó kenőolajok tribológiai hatásainak vizsgálata Design of Experiments módszer alkalmazásával” című TDK dolgozat kidolgozása a saját munkám, abban csak a megjelölt forrásokat, és a megjelölt mértékben használtam fel, az idézés szabályainak megfelelően, a hivatkozások pontos megjelölésével. Eredményeim saját munkán, számításokon, kutatáson, valós méréseken alapulnak, és a legjobb tudásom szerint hitelek.

---

Dátum

---

Hallgató

## Kivonat

|                      |                                                                                                                                |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A hallgató neve:     | <b>Szabó Kevin</b>                                                                                                             |
| A diplomamunka címe: | Nanoméretű titán-dioxidot tartalmazó kenőolajok tribológiai hatásainak vizsgálata Design of Experiments módszer alkalmazásával |
| Belső konzulens:     | Szabó Ádám István, tudományos segédmunkatárs                                                                                   |

Az utóbbi évtizedekben a nanotechnológia egy új kutatási területként jelent meg, elsősorban környezetvédelem, fenntarthatóság és költségcsökkentés érdekében. Fém-kerámia nanorészecskék kenőolajjal keverve jelentősen csökkenthetik a kopást és a súrlódást, ezáltal a súrlódásból származó károsanyag-kibocsátást és alkatrészcserek gyakoriságát is. Jelen tanulmányban Design of Experiments (DOE) kísérlettervezési módszer lett alkalmazva egy tribológiai rendszer optimumpontjának meghatározásához. Mérésekben Group III 4 cSt bázisolaj volt használva, amelyhez nanoméretű titán-dioxid ( $\text{TiO}_2$ ) lett adalékolva. A tribológiai rendszerben három paraméter volt változtatva: hőmérséklet ( $80\text{--}120\text{ }^\circ\text{C}$ ), terhelés ( $10\text{--}190\text{ N}$ ) és nano-titán-dioxid tömegszázaléka a kenőolajmintában ( $0,1\text{ wt\%} - 0,7\text{ wt\%}$ ). A mérések Design of Experiments (DOE) módszerrel, Box-Benkhken dizájn segítségével lettek meghatározva. A vizsgálatok egy Optimol SRV5 tribométeren lettek elvégezve. Tanulmány során négy különböző érték került vizsgálatra: súrlódási abszolút integrál (FAI), tapadási súrlódási együttható (COF), golyó próbatest kopásátmérője (WSD) és a tárcsa próbatest kopástérfogata (WV). A kopásértékek meghatározásához egy Keyence-VHX1000 digitális mikroszkóp és egy Leica DCM3D konfokális mikroszkóp lett alkalmazva. Az eredmények Minitab statisztikai szoftverben kerültek elemzésre, ahol kontúrdiagramok és Pareto-elemzések lettek meghatározva. Az értékek azt mutatják, hogy a súrlódási értékeket tekintve a  $0,7\text{ wt\% TiO}_2$ -tartalom,  $190\text{ N}$  terhelés és  $120\text{ }^\circ\text{C}$  hőmérséklet képviseli az optimumpontot. Kopásértékek tekintetében az optimumpontot  $0,36\text{ wt\% TiO}_2$ ,  $10\text{ N}$  terhelés és  $120\text{ }^\circ\text{C}$  hőmérséklet szolgáltatja. Ezt követően validáló mérés lett elvégezve, a kopási értékekre optimalizálva. Az eredményeket tekintve elmondható, hogy a nanoméretű  $\text{TiO}_2$  képes csökkenteni a súrlódást és kopást a vizsgált tribológiai rendszerben. A tanulmány során meghatározásra kerültek a rendszerre ható szignifikáns paraméterek.

## Abstract

|                        |                                                                                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Candidate:             | <b>Kevin Szabó</b>                                                                                                                                  |
| Title of the thesis:   | Investigation of the tribological effects of lubricating oils with different concentrations of nanoadditives using the Design of Experiments method |
| Consultant (internal): | Ádám István Szabó, assistant research fellow                                                                                                        |

Over the last decades, nanotechnology has emerged as a new field of research, mainly for environmental protection, sustainability and cost reduction. Metal-ceramic nanoparticles mixed with lubricating oil can significantly reduce wear and friction, thereby reducing friction-induced emissions and the frequency of component replacements.

In the present study, a Design of Experiments (DOE) experimental design method has been applied to determine the optimum point of a tribological system. In measurements, Group III 4 cSt base oil was used, to which nano-sized titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) was added. Three parameters were varied in the tribological system: temperature (80-120 °C), load (10-190 N) and mass percentage of nano titanium dioxide in the lubricating oil sample (0.1 wt% - 0.7 wt%). Measurements were determined by Design of Experiments (DOE) method using Box-Benhken design. The tests were performed on an Optimol SRV5 tribometer. Four different values were investigated: friction absolute integral (FAI), coefficient of friction (COF), ball specimen's wear scar diameter (WSD) and disc specimen's wear volume (WV). A Keyence-VHX1000 digital microscope and a Leica DCM3D confocal microscope were used to determine the wear values. The results were analysed in Minitab statistical software, where contour plots and Pareto analyses were defined. The values show that the optimum point for friction values is represented by a  $\text{TiO}_2$  content of 0.7 wt%, a load of 190 N and a temperature of 120 °C. For wear values, the optimum point is represented by 0.36 wt%  $\text{TiO}_2$ , 10 N load and 120 °C temperature. A validation measurement was performed, optimised for the wear values. The results show that the nano-scale  $\text{TiO}_2$  is able to reduce the friction and wear in the investigated tribological system. The significant parameters affecting the system were determined during the study.

# Tartalomjegyzék

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés .....                                                             | 1  |
| 2. Irodalomkutatás .....                                                       | 2  |
| 2.1. Olajok és adalékanyagok.....                                              | 2  |
| 2.2. Nanorészecskék.....                                                       | 2  |
| 2.3. Oxidkerámiák és eredményeik.....                                          | 5  |
| 2.4. Titán-dioxid (TiO <sub>2</sub> ) .....                                    | 6  |
| 2.5. Tribométerek .....                                                        | 8  |
| 2.6. Design of Experiments módszer (DOE) .....                                 | 8  |
| 2.7. Összegzés .....                                                           | 10 |
| 3. Felhasznált anyagok és módszerek .....                                      | 11 |
| 3.1. Kenőolajminta .....                                                       | 11 |
| 3.1.1. Titán-dioxid (TiO <sub>2</sub> ) nanorészecskék felületmódosítása ..... | 11 |
| 3.1.2. Kenőolajminta összeállítása .....                                       | 12 |
| 3.2. Tribométer.....                                                           | 13 |
| 3.3. Mérési program .....                                                      | 16 |
| 3.4. Felhasznált próbatestek .....                                             | 17 |
| 3.5. Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóp.....                                | 18 |
| 3.6. Leica DCM3D konfokális mikroszkóp .....                                   | 19 |
| 4. Mérési eredmények.....                                                      | 20 |
| 4.1. Súrlódási abszolút integrál (FAI) eredmények .....                        | 20 |
| 4.2. Tapadási súrlódási együttható (COF) eredmények .....                      | 22 |
| 4.3. Golyó-kopásátmérő (WSD) eredmények.....                                   | 24 |
| 4.4. Tárcsa-kopástérfogat (WV) eredmények .....                                | 26 |
| 4.5. Mérési eredmények összegzése.....                                         | 29 |
| 5. Validálás .....                                                             | 30 |
| 6. Konklúzió.....                                                              | 33 |
| 7. Köszönetnyilvánítás.....                                                    | 34 |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| Ábrajegyzék.....                         | 35 |
| Táblázatok jegyzéke .....                | 37 |
| Rövidítések és szimbólumok jegyzéke..... | 38 |
| Irodalomjegyzék .....                    | 39 |

## 1. Bevezetés

A kenőolajok nélkülözhetetlenek a gépek megfelelő működéséhez, mivel kulcsfontosságú szerepük van két egymáson súrlódó felület között. Elsődleges funkciójuk a felületek kenése, így az alkatrészek nem szárazon érintkeznek, hanem egy vékony kenőfilmrétegen csúsznak, ami jelentősen csökkenti a kopást és a súrlódást a szárazon futáshoz képest. Ezenkívül a kenőolajok eltávolítják a felületről a kopásból származó részecskéket, valamint elvezetik a súrlódásból keletkező hőt. A megfelelő kenőolaj és kenési rendszer alkalmazásával meghosszabbítható az alkatrészek és gépek (pl. belső égésű motorok) élettartama. Annak érdekében, hogy a kenőolajok különböző körülmények között is hatékonyan működjenek, például alacsony hőmérsékleten, nagy terhelésen, korrozív közegben, savak vagy korom jelenléte esetén is, adalékanyagokkal látják el őket.

A fosszilis tüzelőanyag-források mennyiségének folyamatos csökkenése az energiaárak emelkedéséhez vezet. Ezzel párhuzamosan megjelentek a belső égésű motorok károsanyag-kibocsátását korlátozó környezetvédelmi előírások, amelyek új fenntarthatósági kutatásokat ösztönöznek. Az energiatakarékosság, a tüzelőanyag-hatékonyság és az erőforrások jobb kihasználása érdekében elengedhetetlen az olajok hatékonyságának és élettartamának növelése.

A nanotechnológia megjelenésével új, ígéretes kutatási terület nyílt meg a kutatók előtt. A kutatások eredményei alapján a kenőolajokhoz hozzáadott fémkerámia nanorészecskék (mint például a titán-dioxid) jelentős mértékben csökkenthetik a kopást és a súrlódást. A nanorészecskék alkalmazása lehetővé teszi, hogy a kenőolaj hosszabb ideig fenntartsa optimális teljesítményét, így csökkentve az olaj- és alkatrészcsere gyakoriságát környezetbarát módon. Ezek a nanoadalékok biokenőanyagokban is alkalmazhatóak.

A Design of Experiments (DOE) kísérlettervezési módszer lehetőséget nyújt mérések megtervezésére, különféle tényezők kölcsönhatásainak vizsgálatára, modellezésére és az ismeretlen tartományokban történő előrejelzésükre, mind matematikai, mind grafikus eszközökkel. Hozzájárul az erőforrások hatékony felhasználásához, és lehetővé teszi a termelékenység növelését, valamint a termékminőség javítását. DOE módszerrel a tribológiai mérési eredmények is előre jelezhetők az ismeretlen tartományokban, jelentősen csökkentve ezzel a költség- és időráfordítást.

## **2. Irodalomkutatás<sup>1</sup>**

Jelen TDK dolgozat irodalomkutatásának első részében az adalékanyagokról és tribológiai vonatkoztatásukról esik áttekintő bevezetés. Tribológia a súrlódás, kopás, kenés tudománya [1]. Ezt követően a nanoadalékok, azon belül a fémkerámia-adalékok kerülnek ismertetésre. Bemutatásra kerül a kutatásban felhasznált titán-dioxid ( $\text{TiO}_2$ ) nanokerámia és az alkalmazott Design of Experiments (DOE) kísérlettervezési módszer is.

### **2.1. Olajok és adalékanyagok**

Kenőolajok kutatása, fejlesztése és optimalizálása különböző feladatokra kulcsfontosságú kutatási terület a gép-, és autóiparban. Egy kenőolaj felválthatja a száraz súrlódási állapotot határréteg, vegyes, avagy folyadéksúrlódási állapotra, melyek jelentősen csökkenthetik a súrlódást és kopást. A súrlódáscsökkentés és kopásvédelem hozzájárul a gépek, belső égésű motorok élettartamának meghosszabbításához és karbantartási költségek mérsékléséhez [2]. A bázisolajok önmagukban nem biztosítanak kielégítő súrlódás- és kopáscsökkentést azon üzemállapotok során, ahol még nem alakult ki a megfelelő vastagságú folyadékfilmréteg. A súrlódás és kopás hatékony mérséklése érdekében adalékanyagokat alkalmaznak, amelyek lehetnek aktív vagy passzív típusúak. Az aktív adalékanyagok a polaritáskülönbség révén mozognak az olajban, és a megfelelő helyeken megtapadnak, ahol kifejtik hatásukat (például kopásgátló, nyomásálló, detergens, diszpergens adalékok). Ezzel szemben a passzív adalékanyagok oldott állapotban maradnak az olajban, és másodlagos funkciókat látnak el, mint például a folyáspont-csökkentés, habzásgátlás vagy biocid hatás biztosítása [3].

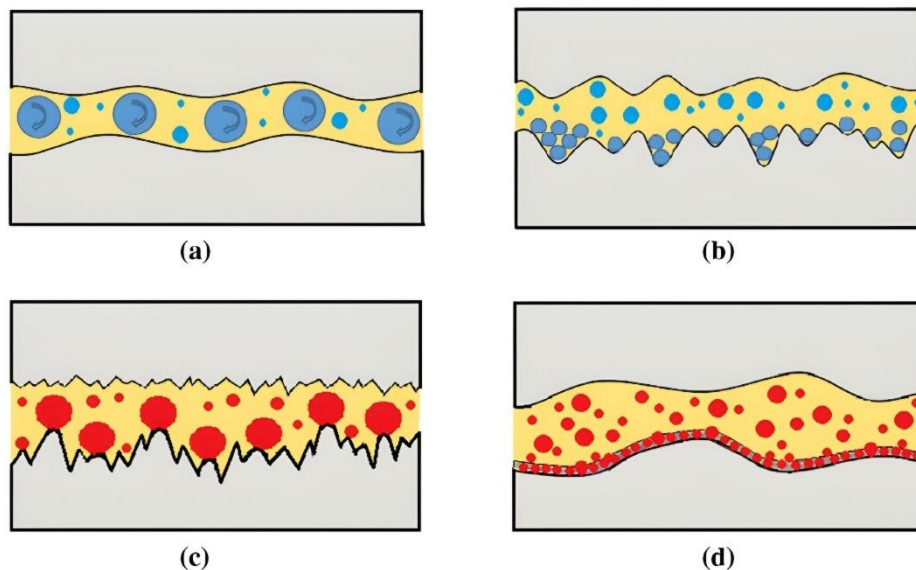
### **2.2. Nanorészecskék**

Az elmúlt évtizedekben jelentős figyelmet kapott a nanotechnológia, tribológiai területen is. Nanotechnológia fejlődésének köszönhetően kutatók figyelmébe kerültek a kenőolajokban alkalmazható nanorészecskék, amelyek tovább tudják fokozni a kenőolajok teljesítményét [4][5].

---

<sup>1</sup> A kutatások hatékony feldolgozásához, szakfordításához, kifejezések, szavak átfogalmazásához mesterséges intelligencia alapú szoftverek kerültek alkalmazásra.

A nanorészecskék 1-100 nanométer méretű, szilárd adalékanyagok, amelyek méretüknél fogva képesek eljutni a kontaktfelületekhez és érdességi árkokhoz [6][7]. Tóth, Á. D. és munkatársai tanulmányukban kimutatták, hogy a kenőolajban alkalmazott nanorészecskék mérete és a súrlódó alkatrész felületi érdessége között szoros összefüggés van. Megállapításuk szerint kedvező tribológiai hatás érhető el, amennyiben a nanorészecskék átmérője kisebb, mint a felület átlagos felületi érdessége, mivel ekkor a részecskék beépülhetnek az érdességi árkokba. Amennyiben a részecskék átmérője meghaladja az átlagos felületi érdességet, úgy azok nem képesek beépülni az árkokba és háromtest-abráziós kopási mechanizmus lép fel [8]. Ez utóbbi egy olyan súrlódási mechanizmust takar, amely során a két súrlódó felület közé egy apró, kemény csiszolóanyag kerül (jelen esetben a nanorészecske), ami a lágyabb anyagot védi, miközben a keményebb anyag kopik. Nanorészecskék javítómechanizmusai négy külön csoportra bonthatóak, melyet az 1. ábra szemléltet. A nanoméretű részecskék kisebb súrlódási tényezőt hozhatnak létre, mivel a részecskék a csúszó elmozdulást gördülővé képesek alakítani. A méretüknek köszönhetően beépülhetnek a felületi érdességi árkokba és feltöltik azokat. Csökkenthetik a felületi érdességet polírozó mechanizmus által, ugyanis a részecskék lesimíthatják a kiálló érdességi csúcsokat. A nanorészecskék hozzátapadhatnak a súrlódó felületekhez és védőréteget formálnak, így védve a felületeket a fém a fémen való súrlódástól [8]. Ez a védőréteg-képződés polaritáskülönbség miatt valósulhat meg [9]. Hudson, L. K. és munkatársai javítómechanizmusként írták le a nanorészecskék kolloid hatását [10]. A nanoméretű kolloid részecskék nagy fajlagos felülettel rendelkeznek, azaz a felületük és térfogatuk aránya jelentős. Ezen a nagy felületen ionok képesek megtapadni és kapcsolódni egymáshoz, amely által a részecskék elektromos töltést nyernek. Ez az elektromos töltés megakadályozza a részecskék ülepedését és összetapadását, így stabilizálva a kolloid rendszert [11].



1. ábra: Tribológiai tulajdonságok javításának mechanizmusai nanorészecskék alkalmazásával, a) gördülő mechanizmus, b) feltöltő mechanizmus, c) polírozó mechanizmus, d) védőréteggépző (tribofilmképző) mechanizmus [12].

D'Amato, R. és munkatársai által írt összefoglaló cikkben a nanorészecskék további működési mechanizmusai olvashatóak. A nanorészecskék képesek elvezetni a súrlódásból származó hőt, kopásgátló porokként funkcionálnak, ezáltal csökkentve a károsanyag-kibocsátást és üzemanyag-fogyasztást [6]. Holmberg, K. becslései alapján a világ teljes energiafogyasztásának 20%-a a súrlódásnak tulajdonítható. Ha a súrlódás nem létezne, akkor jelentősen csökkennének a gyártási, üzemeltetési költségek. A megnövekedett mennyiségű súrlódás közvetlen módon kopáshoz és energiavesztésekhez vezethet, valamint közvetett módon hozzájárul az energiavesztésből következő globális környezetszennyezéshez is. Holmberg becslései szerint 2036-ra 40%-kal csökkenhetnek a súrlódásból adódó energiavesztések, amelyek évi 3140 megatonna szén-dioxid kibocsátását előzheti meg és jelentősen csökkentheti a fenntartási és utókezelési költségeket [13]. Az említett okok és a fosszilis tüzelőanyag-források csökkenése nyitott kaput az alternatív kenőolajok és adalékanyagok kutatásához, valamint így került sor a nanorészecskék alkalmazásának vizsgálatára is.

A kutatások összegzése alapján egyértelműen megállapítható, hogy a nanorészecskék alkalmazása jelentős súrlódás- és kopáscsökkentést eredményez a tanulmányok alapján, továbbá ezúton hozzájárul az energiavesztések mérsékléséhez.

## 2.3. Oxidkerámiák és eredményeik

A nanorészecskék felhasználási köreiktől függően külön csoportokba bonthatóak, ideértve a fém (pl. réz), fém-oxid (pl. titán-dioxid, cirkónium-dioxid, cink-oxid), nanoszén (pl. gyémánt nanorészecskék) és bór alapú (pl. titán-borát, cink-borát) típusokat [1]. Jelen dolgozat – és különösen ezen fejezet – a fém-oxid alapú kerámiák vizsgálatára és eredményeinek összegzésére összpontosít.

Az oxidkerámiák felhasználása rendkívül sokrétű; az elmúlt évtizedek során az anyagcsoporttal kapcsolatos ismeretek jelentősen bővültek, és ma már széles körben alkalmazzák őket többek között orvosi területeken (például ortopédia, protézisek, fogászat), valamint a repülőgép- és autógyártásban, a nanotechnológiában, az energiatárolásban, a víztisztításban, festékekben és különféle felületi bevonatok készítésében.

A mérnöki gyakorlatban kulcsfontosságú a megfelelő anyagválasztás, amely kettős szerepet tölt be: bár egyes tulajdonságok előnyösek, más szempontból hátrányok is társulhatnak hozzájuk. Tóth, Á. D. és munkatársa kutatásukban kimutatták, hogy a túl alacsony nanoadalék-tartalmú kenőanyag nem biztosít elegendő kopáscsökkentést és nem mérsékli a tapadási súrlódási együtthatót a tribológiai rendszerben. Ezzel szemben a túl magas koncentrációjú nanorészecskék túltöltik a felületi érdességi árkokat, és kemény, kiálló csúcsokat képeznek a súrlódó felületen, ami fokozza a háromtest-abráziós kopás jelenségét és annak gyakoriságát. Fontos negatív tulajdonság továbbá az oxidkerámiák magas költsége, valamint az ülepedés veszélye, ami inhomogén kenőolajmintát eredményezhet. Ez a nem egységes szerkezetű kenőolaj kiszámíthatatlan viselkedést eredményezne, azonban ez kiküszöbölhető a minta kevertetésével, valamint egyéb adalékanyagok hozzáadásával, vagy például polifenolszármazékokkal való felületmódosítással [14]. Fontos megjegyezni, hogy nanokerámiát tartalmazó motorolajokkal eddig még nem végeztek átfogó fékpadi vizsgálatot, így ezen adalékanyagok kipufogógáz-utókezelő rendszerekre gyakorolt hatásai jelenleg ismeretlenek [8].

Choi, Y. és munkatársai 25 és 60 nm méretű réz nanorészecskékkel vizsgálták azok súrlódáscsökkentő hatását. A mérési eredményeik alapján megállapították, hogy a réz nanorészecskék jelentős mértékben csökkentik a súrlódást, és atomerő mikroszkópia és energiadisziperzív spektrometria elemzések során részletes információkat nyertek a súrlódó felületekről [15]. Megfigyeléseik alapján a részecskék kitöltik a felületi érdességi árkokat a súrlódó felületek között, amely összhangban áll az 1. ábra b) részében bemutatott elméleti feltöltő mechanizmussal. Tóth, Á. D. és munkatársa hat különböző kenőolajmintát állítottak

elő, amelyek réz(II)-oxid adalékanyagot 0,1-0,6 tömegszázalékos koncentrációban tartalmaztak. Tribológiai vizsgálataik alapján megállapították, hogy a réz(II)-oxid optimális keverési koncentrációja 0,5%, amelynél a súrlódás és kopás tekintetében egyaránt 15%-os csökkenést értek el [8]. Ma, J. és munkatársai 6-7 nanométeres cirkónium-dioxid nanoport kevertek egy alacsony gyúlékonyságú, többszörösen alkilezett ciklopentán bázisolajhoz, és az így előállított kenőanyag súrlódásra és kopásra gyakorolt hatását egy Optimol SRV oszcilláló tribométerrel vizsgálták. Megállapították, hogy 2% cirkónium-dioxid tömegszázalék esetén a nanorészecskék által növelt teherbíró képesség 20 °C-on elérte a 900 N-t, szemben az adalék nélküli bázisolaj 700 N-es teherbírásával. 100 °C-on az adalékolt olaj 700 N-os, míg az adalék nélküli olaj 500 N-os teherbírást mutatott. Ezenkívül az adalékolt olajjal vizsgált felületeken a kopástérfogat jelentősen kisebbnek bizonyult azonos vizsgálati körülmények között, mint az adalék nélküli olajjal. A súrlódás során a cirkónium-dioxid tartalmú olajjal keramikus tribofilmréteg alakult ki az érintkező felületeken, amely elősegítette a felületvédelem megnövekedését [16]. Szabó, Á. I. és munkatársai a 2023-as balatonalmádi XIV. Országos Anyagtudományi Konferencián bemutatott kutatásaik során cirkónium-dioxid ( $\text{ZrO}_2$ ), réz(II)-oxid ( $\text{CuO}$ ), titán-dioxid ( $\text{TiO}_2$ ) és ittrium(III)-oxid ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) nanorészecskéket vizsgáltak a kopáscsökkentő hatás szempontjából. Eredményeik alapján, ezek a nanokerámiákkal dúsított olajminták jelentősen csökkenthetik a kopást, mivel az oxidkerámia-részecskék kopásgátló határreteget képeztek a kopott felületeken. Különösen a cirkónium-dioxid esetében mutatták ki, hogy a részecskék lerakódtak a felületi érdesség mélyebb árkaiban, ami megfelelt a 2.2. fejezetben tárgyalt javítómechanizmusoknak. A cirkónium-dioxid kopáscsökkentő hatása a fáradásos és abráziós kopás ellenére is kiemelkedőnek bizonyult. Az ittrium(III)-oxid adalékkal dúsított olajminta esetében 19%-os kopástérfogat-csökkenést értek el, és sötét, magas ittriumtartalmú, kopásálló rétegek képződtek a felületen. A titán-dioxid adalék hasonlóan kiváló kopáscsökkentő tulajdonságokat mutatott, amit a kialakult, magas oxigéntartalmú tribofilmréteg is igazolt. Ezzel szemben a réz(II)-oxid adalék háromtest-abráziós kopásjelenséget idézett elő, mivel a kemény részecskék védték a lágyabb anyagú golyót a kopástól, miközben a keményebb anyagú tárcsát karcolták [17].

Kutatók által vizsgált oxid-kerámiák alkalmazása kenőolajmintákban megfelelőnek bizonyult kopás- és súrlódáscsökkentés céljából.

## 2.4. Titán-dioxid ( $\text{TiO}_2$ )

A titán-dioxid ( $\text{TiO}_2$ ) az oxidkerámiák csoportjába tartozó vegyület. Ezen nanoanyagok 1972 óta jelentős tudományos figyelmet kaptak, és számos területen alkalmazzák őket, mint

például a fenntartható energiatermelés és a környezetszennyező anyagok eltávolítása. Jellegzetes fehér színének köszönhetően alkalmazzák festékekben is. Finom szemcséi jelentős fényelnyelési képességgel bírnak, és a 20-50 nm-es szemcseméret tartományban a fény szórásának maximuma az UV-spektrum területén figyelhető meg. Ennek következtében a titán-dioxidot UV-szűrőként is alkalmazzák [18]. Tribológiai vonatkozásban a kutatások alapján kiválóan képes csökkenteni a kopást egy kenőolajmintához adalékolva, köszönhetően a kis méretének (20-30 nm), magas olvadáspontjának, magas rugalmassági modulusának, gömb formájának és keménységének [19]. A fejezet további részében kutatások lesznek részletezve, melyek a titán-dioxid nanoadalék súrlódásra és kopásra gyakorolt hatását vizsgálták.

Szabó, Á. I. és munkatársai 2.3. fejezetben említett kutatása alapján a titán-dioxiddal ( $\text{TiO}_2$ ) adalékolt kenőanyagok kimagasló kopáscsökkentő hatást mutattak. Eredményeik alapján a titán-dioxid részecskék a felületeken magas oxigéntartalmú tribofilmréteget képeztek, amely hozzájárult a súrlódó felületek védelméhez és jelentősen csökkentette a kopást. Ez a tribofilmréteg stabil és kopásálló bevonatot biztosít, ami előnyös a mechanikai terhelések alatt álló rendszerek élettartamának meghosszabbításában [17]. Sharma, V. és munkatársai titán-dioxid nanoadalékok hatását vizsgálta ásványi olajban, határréteg súrlódási körülmények között. Méréseikben cink-dialkil-ditiofoszfáttal (ZDDP) adalékolt titán-dioxidot is vizsgáltak. Eredményeikben látszik, hogy a titán-dioxid kenőolajban csökkentette a kopás és súrlódás mértékét [20]. Hong, F. T. és munkatársai galluszsavval észterezett titán-dioxid nanorészecskék hatását vizsgálták kenőolajmintákban egy Optimol SRV5 tribométeren. A polifenolszármazékkal felületmódosított nanoadalékok az üledék kockázatát hivatottak csökkenteni, valamint fenolos tribokémiai reakciókban is szerepet játszanak. Az alkalmazott észterrel és anélkül is vizsgálatokat végeztek polialfaolefinben és kereskedelmi motorolajokban. A vizsgált észterezett titán-dioxid képes volt növelni a tribofilmréteg vastagságát [14]. Patil, H. H. és munkatársai 20 nanométer méretű titán-dioxid nanokerámiákat adalékoltak ásványi SN-500 olajhoz. Méréseiket különböző terheléseken (10 N, 30 N és 50 N) és koncentrációsázalékokon (0,1 wt%, 0,25 wt%, 0,5 wt%, 0,75% és 1 wt%) végezték egy csap-tárcsa tribométeren. Eredményeikben a 0,75 wt% titán-dioxidot tartalmazó kenőolajminta csökkentette legnagyobb mértékben a súrlódást, 50 N terhelésen 85%-kal. Kopás csökkentésében a 0,5 wt%-os kenőolaj minta bizonyult optimálisnak, 30 N terhelésen 50%-kal csökkentette a kopást. Megfigyelték, hogy a titán-dioxid nanorészecskék növelik az olaj teherbíró képességét [19].

Titán-dioxid nanoadalékkal végzett mérésekből és kutatásokból tisztán látszik, hogy a vizsgált adalékanyag képes javítani a kenőolajminta teljesítményét és csökkenteni a kopás és súrlódás mértékét.

## **2.5. Tribométerek**

A tribométerek olyan mérőeszközök, amelyek lehetővé teszik a két érintkező felület között kialakuló tribológiai jellemzők mérését. Ezek közé tartozik például a tapadási súrlódási együttható (COF). A tribométerek érzékeny szenzorai révén az adatok gyors, magas frekvenciájú rögzítése biztosított, amely lehetővé teszi olyan paraméterek precíz mérését, mint a mérési hossz, frekvencia, csúszási sebesség és súrlódási ellenállás. A mérési és felhasználási igényektől függően különböző típusú tribométerek léteznek; ezek közé tartozik például a négy golyó vizsgálat és a csap-tárcsa tribométer. A tribométerek változatos mozgásviszonnyal működhetnek, ideértve az alternáló, oszcilláló, forgó, illetve kombinált mozgásformákat. Sokoldalú alkalmazási lehetőségeik révén szinte bármilyen súrlódási és kopási mérés elvégezhető velük [21]. Az autóiparban például használatosak kenőolajok vizsgálatára, felületi bevonatok összehasonlítására, felületkezelések elemzésére, valamint a dugattyúgyűrű–hengerfal kapcsolatok és siklócsapágyak tribológiai tulajdonságainak mérésére. A tribométerek tovább bővíthetők radioaktív kopásmérő berendezésekkel is.

## **2.6. Design of Experiments módszer (DOE)**

Az 1920-as években Ronald Aylmer Fisher brit statisztikus, biológus és matematikus innovatív kutatásokat végzett a mezőgazdaságban, hogy növelje a terméshozamot az Egyesült Királyságban. A mezőgazdasági kísérletek nagy kihívása az volt, hogy az adatok kinyerése hosszú időt vett igénybe: a vetés tavasszal történt, és az eredmények ősszel váltak mérhetővé. Fisher felismerte, hogy a kísérletezés során a természetes ingadozások és zavaró tényezők megfelelő kezelése kulcsfontosságú a pontos eredményekhez. Ennek érdekében fejlesztette ki a kísérlettervezés módszerét, amely lehetővé tette a különböző beavatkozások hatásainak hatékony vizsgálatát és statisztikai elemzését. 1935-ben megjelent *The Design of Experiments* című könyvében Fisher részletesen leírta, hogyan lehet a kísérletek során jelen lévő ingadozások ellenére is megbízható következtetéseket levonni. Az általa kifejlesztett módszer az 1940-es évektől kezdve számos ágazatban bizonyította hatékonyságát, többek között a hadseregben és az iparban is, mivel különösen hasznos volt olyan környezetekben, ahol több, gyakran zavaró tényező befolyásolta az eredményeket [22]. A Design of Experiments (DOE) tulajdonképpen kísérlettervezést jelent. Lehetővé teszi, hogy paraméterek hatása

megvizsgálható legyen egy rendszerre nézve, valamint optimalizálhatóak legyenek ezek a faktorok. Előnye, hogy gyorsan és hatékonyan lehet tervezni vele méréseket, valamint minden mérési ponttal egyre pontosabb modell készíthető vele. DOE elemzése során kontúrdiagramok, avagy válaszfelület-diagramok hozhatóak létre, amelyek a nem vizsgált tartományokban is szolgálnak becslő eredményekkel. Ennek segítségével meghatározható, hogy egy nem ismert pontban adott beállításokkal milyen eredmény várható. Ugyanilyen módszerrel történik az optimumpontok megkeresése is. A kísérlettervezés dokumentálható és számtalan eredménnyel, adattal szolgál minimális mérésből is. A Design of Experiments (DOE) módszer fő célja minél több információ kinyerése egy rendszerből a lehető legkevesebb idő- és költség felhasználásával [23]. A kísérlettervezés több típust, úgynevezett dizájn tartalmaz. A dizájnok segítenek egy adott módszerrel megtervezni a méréseket, mindegyik dizájn más felhasználáshoz megfelelő. Jelen tanulmányban Box-Benken dizájn (BBD) volt alkalmazva. Ennek a dizájnnak előnye, hogy nem tartalmaz olyan beállításokat, amely esetében az összes faktor maximális vagy minimális szinten helyezkednek el egyidejűleg. Emiatt a tulajdonsága miatt olyan mérésekhez ajánlott, ahol kockázatos lenne a rendszert üzemeltetni a szélsőértékeken [24].

Aliemeke, B. N. G. és munkatársai kopásmértéket kívántak optimalizálni teljes faktoriális és Box-Benken dizájnnal egy csap-tárcsa tribométeren. Box-Benken dizájn esetén a p-érték 0,046-nak adódott. (A p-érték jelenti azt az értéket, ami számszerűsíti a „véletlen-faktort”. Minél közelebb van a p-érték a nullához, annál erősebb a nullhipotézis ellen tett bizonyíték. Nullhipotézis azt mondja ki, hogy a megfigyelt jelenség a véletlen műve; a cél ezt megcáfolni). Megállapították, hogy erre a BBD dizájra jól lehet modellt illeszteni. A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a tárcsa pályaaátmérőjének és sebességének növelése a kopás csökkenéséhez vezet [25]. Sengottaiyan S. és munkatársai Design of Experiments (DOE) módszert alkalmaztak hibrid szálerősítésű kompozitok tribológiai viselkedésének vizsgálatára, nátrium-hidroxidos kezelés hatására. Tanulmányukban a gépi tanulási technikákat alkalmazták a kopási jellemzők előrejelzésének vizsgálatára. Az eredményeket pásztázó elektronmikroszkóppal rögzítették. Kutatásukban kijelentik, hogy a gépi tanulás és DOE-módszereknek köszönhetően javultak az ismereteik az általuk vizsgált rendszerről, valamint optimumpontot is találtak [26]. Sanoussi, N. S. és munkatársai nagy energiaveszteségű fogaskerék-hajtásokat vizsgáltak, hogy kiderítsék, melyik faktor hat leginkább a kopásra és súrlódásra. Egy fogaskerék-hajtás esetén több tényező is létfontosságú tribológiai szempontból: terhelés, gördülési és csúszási sebesség, olajhőmérséklet, felületi érdesség. Tanulmányukban DOE módszert alkalmaztak, hogy megvizsgálják a súrlódási együttható alakulását egyes

beállításokon. Az eredményeiket összehasonlították más tanulmányokkal, valamint készítettek saját validáló mérést is, amelyben megállapították, hogy az alkalmazott DOE egy hasznos módszer a vizsgált fogaskerékajtás jobb megismeréséhez [27]. Borgaonkar, A. V. és munkatársa titán-dioxiddal ( $\text{TiO}_2$ ) és cirkónium-dioxiddal ( $\text{ZrO}_2$ ) erősített molibdén-diszulfid bevonatok kopásállóságát vizsgálata DOE, válaszfelület módszertannal. A bevonatok tribológiai teljesítményét vizsgálták adalékanyag-tömegszázalék, kontaktnyomás és csúszási sebesség függvényében. A DOE-módszernek köszönhetően kapcsolatot fedeztek fel a főparaméterek és a tapadási súrlódási együttható érték között. Az eredmények alapján az adalékanyagokkal ötvözött kompozit bevonat képes volt csökkenteni a súrlódást, továbbá pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvételek segítségével megállapították, hogy az  $\text{MoS}_2$ - $\text{TiO}_2$ - $\text{ZrO}_2$  kompozit bevonatok tribológiailag jobb eredményt tudtak elérni, mint a tiszta  $\text{MoS}_2$  bevonatok [28].

Összegezve a kutatásokat, látható, hogy a Design of Experiments (DOE) módszer és a Box-Benhken dizájn (BBD) alkalmas tribológiai folyamatok fejlesztésére és tanulmányozására.

## 2.7. Összegzés

Titán-dioxid nanorészecskéket vizsgáló tribológiai kutatások alapján feltételezhető, hogy a vizsgált nanorészecskék optimális tömegszázalékú olajhoz adalékolása, valamint a megfelelő terhelés- és hőmérsékletbeállítások súrlódás- és kopáscsökkentő hatást eredményeznek. Ennek a várt, pozitív hatásnak köszönhetően a gépalkatrészek élettartama megnövekedik, ami csökkenti a karbantartási költségeket, valamint súrlódáscsökkentésnek hála csökken a környezetszennyezés mértéke. Jelen tanulmány fő célja feltérképezni a jellegmezőket és az optimumpontot különböző paraméterbeállításokkal, Box-Benhken dizájn segítségével. A dolgozat újdonsága a tribológiai rendszerre ható paraméterek szignifikanciavizsgálata, mely segítségével megvizsgálható, hogy melyik paraméter milyen hatással van a vizsgált rendszerre. Továbbá, a válaszfelület-diagramok használatával mélyebb betekintés kapható az egyes paraméterek közötti kapcsolatokba, valamint meghatározható egy optimumpont is.

### 3. Felhasznált anyagok és módszerek

Jelen dolgozat elkészítéséhez szükséges méréseket és anyagokat a Széchenyi István Egyetem Járműhajtás Technológia Tanszéke tette lehetővé. A kenőolajminták keverése, titán-dioxid nanokerámia felületmódosítása és tribométeres vizsgálatok a tanszék tribológialaboratóriumában kerültek elvégzésre. Az eredmények mikroszkopikus elemzését a tanszék felületanalitikai laboratóriuma tette lehetővé.

A fejezet áttekintést nyújt az alkalmazott kenőolajmintákról, azok előkészítéséről, köztük a felületmódosítással. A fejezet meghatározza az alkalmazott próbatesteket és a tribométer mérési programjait. Továbbá, a felületanalitikai kiértékelés módja és az alkalmazott statisztikai szoftver is tárgyalásra kerül.

#### 3.1. Kenőolajminta

A mérések Group III, 4 cSt kinematikai viszkozitású bázisolaj felhasználásával történtek. Az olajelőkészítés két külön fázisra bontható: titán-dioxid nanorészecskék felületmódosítása és kenőolajminta előállítása. A főfolyamatokról áttekintő folyamatábra látható a 2. ábrán.



2. ábra: Kenőolajminta előkészítésének folyamatai.

##### 3.1.1. Titán-dioxid (TiO<sub>2</sub>) nanorészecskék felületmódosítása

A vizsgálni kívánt titán-dioxid nanoadalék felülete aktiválásra került a kenőolajminta összeállítása előtt annak érdekében, hogy a részecskék homogén diszperziót érjenek el, valamint csökkenjenek az agglomerációk. Ez a felületmódosítás olajsavval történő észterezéssel lett megvalósítva. Tóth, Á. D. és munkatársai kutatása alapján ez a felületaktiválás jelentősen hozzájárul a diszpergált olajminta élettartamának meghosszabbításában és stabilitásának növelésében. Megállapították, hogy ez a módszer hatékonyan mérsékli a

nemkívánatos méretnövekedést, amely veszélyeztetni tudná a tribológiai jellemzőket. Jelen dolgozatban a felületmódosítás Tóth, Á. D. kutatása alapján történt. Aktiválás során 0,8 gramm titán-dioxid nanoporhoz 65 gramm 99,8%-os tisztaságú etil-alkohol (CAS 64-17-5) és 0,1 gramm 90%-os tisztaságú olajsav (CAS 112-80-1) került hozzáadásra. Az olajsav és az etil-alkohol kölcsönhatása révén létrejövő etil-oleát hajlamos a nanorészecskék felületéhez tapadni, így védőréteget képez rajtuk. Az elkészített keverék  $75 \pm 5$  °C hőmérsékleten került folyamatos mágneses keverésre egy DLab MS-H280-Pro berendezéssel 2 órán keresztül. Ez a hőmérséklettartomány lehetővé teszi, hogy az etil-alkohol reakcióba lépjen az olajsavval, aminek eredményeként etil-oleát zsírsavészter keletkezik az adalékanyag felületén. Az olajsav etil-oleáttá történő átalakulása után a fennmaradó etil-alkoholt szükséges elpárologtatni. A következő lépésben, a készített keverék  $75 \pm 5$  °C-on, 16 órán át került szárításra és hőntartásra egy Faithful GX-30BE hőlégmentilizálóban. A szárítás eredménye egy szilárd, száraz, észterezett titán-dioxid, amely a 3. ábrán látható. Az üvegcsében megszilárdult anyag eltávolításra, majd mozsárban való porításra került. Az így előállított titán-dioxid nanopor légmentesen lezárva tárolásra került a későbbi felhasználásig [29].



3. ábra: Felületaktivált titán-dioxid töredezett felülete.

### 3.1.2. Kenőolajminta összeállítása

A tervezett mérések véghez viteléhez szükséges egy homogén kenőolajminta létrehozása a kívánt koncentrációszázalékban. A vizsgált kenőolajminták Group III 4 cSt bázisolaj és nanoméretű, felületmódosított titán-dioxid adalékanyag homogén keverékét jelentik.

A Group III bázisolaj kenőolajhoz egy 100 ml űrtartalmú főzőpohárba 8,67 gramm (10 ml) toluol (CAS 108-88-3) lett kitöltve, majd 62,483 gramm (80,11 ml) Group III finomított, 4 cSt

viszkozitású ásványi bázisolaj került hozzáadásra. A tömeg pontos mérését egy precíziós mérleg és pipetták segítették.

Adalékolt olajoknál a szükséges nanopor tömegét a szükséges olaj tömege és a kívánt koncentrációsázalék hányadosa adja meg. Egy méréshez minimálisan 15 ml, maximálisan 20 ml olaj szükséges. Az alkalmazott Group III 4 cSt olaj sűrűsége 22 °C-on 0,78 g/cm<sup>3</sup>. A nanopor kimérése után toluol kerül hozzáadásra a keverékhez, a százalékhöz képest húszszoros arányban. Ez azt jelenti, hogy egy 0,7 wt%-os (tömegszázalékos) olajminta esetén  $0,7 \times 20 = 14$  ml toluol szükséges. A toluol a keverék homogén diszperzióját hivatott elősegíteni a kevertetés során. Ezt követően 62,483 gramm (80,11 ml) Group III finomított, 4 cSt viszkozitású ásványi bázisolaj került hozzáadásra a keverékhez. A főzőpohárba egy mágneses keverőbaba került elhelyezésre. A minták fél percre egy MIULAB SP-25 mágneses keverőre kerültek, hogy a nanopor minimálisan felkeveredjen az üvegcsék aljáról. Ezt követően 50 °C-on, 15 percen keresztül egy Bandelin Sonorex Super RK 255 H ultrahangos tisztítóba helyeződtek. Ultrahangos tisztítás során nagy frekvenciájú hanghullámok rezegtetik a tisztítóba töltött ioncserélt vizet. Nagy intenzitású rezgések hatására mikroszkopikus gázbuborékok képződnek a folyadékban, amelyek további rezgés hatására összeroppannak jelentős mennyiségű energiát felszabadítva, majd nekiütköznek a szilárd felületeknek. Ezzel a nagy nyomású energiaszabadulással felkeverednek az olajban található szilárd részecskék vagy tisztulnak a behelyezett próbatestek. A procedúrát követően a kenőolajminták visszakerültek a mágneses keverőre, hogy 16 órán keresztül keverődjenek. Tizenhat óra elteltével a toluol teljes mértékben elpárolgott. A mérések megkezdése előtt a minták 50 °C-on, 15 percig ultrahangos keverőre kerültek. Az elkészített olajminták teljes homogenitást mutattak, így készen álltak a mérésre.

### 3.2. Tribométer

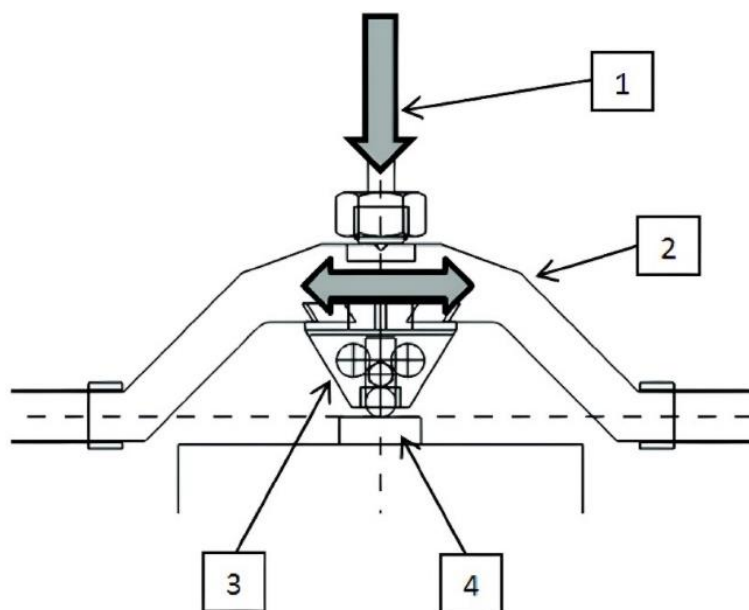
Jelen dolgozatban egy Optimol SRV5 tribométer segítségével történtek meg a mérések. Ez a tribométer képes oszcilláló, forgó vagy kombinált mozgás megvalósítására is, azonban jelen kutatásban az oszcilláló modul volt használva. A mozgás frekvenciája és lökethossza változtatható 1 és 500 Hz frekvenciatartományban és 0,01 és 5 mm lökethossz-tartományban. A tribométeren változtatható még az olajat fűtő hőmérséklet (350 °C-ig), a próbatestet fűtő hőmérséklet, valamint a terhelés (10-2000 N), előterhelés nagysága, mérési idő, csúszási sebesség (0,0001 m/s és 0,5 m/s között), olajzás térfogatárama (800 ml/h-ig, 150 °C előkondicionálással). A tribométerhez közvetlenül, adattovábbító kábeleken csatlakoztatott számítógép Optimol OCA szoftverében nyomon követhetők az aktuális értékek, mint például a

jelenlegi terhelés nagysága, a hőmérséklet vagy a tapadási súrlódási együttható aktuális értéke. A mérések olajkeringtetéssel vagy anélkül is futtathatók, például kalibráló mérés esetén.

Kutatás során négy fő paraméter volt vizsgálva: súrlódási abszolút integrál (FAI), tapadási súrlódási együttható (COF), golyó próbatest kopásátmérője (WSD) és a tárcsa próbatest kopástérfogata (WV). Ezek közül a súrlódási értékek (COF, FAI) tribométer segítségével lettek rögzítve. A tapadási súrlódási együttható (COF) érték képviseli az egy löket alatt elért legmagasabb súrlódási együttható értéket. Ez az érték szemlélteti a rendszer súrlódási tulajdonságát határréteg kenési feltétel mellett. Ezen együttható a kenőfilmréteg-vastagság és a felületi érdesség hányadosa. A másik súrlódási paraméter, a súrlódási abszolút integrál (FAI) egy reprezentatív mérőszámként szolgál a hidrodinamikus kenési rendszerekhez. Számításához szükséges rögzíteni (kb. 1 Hz-cel) a tapadási súrlódási együttható értékeket egy löket alatt. A FAI érték ezen súrlódási együttható értékek által leírt görbe alatti területét jelenti [30]. Meghatározásához a lökethossz ( $s$ ) maximumának reciprokát szükséges szorozni a tapadási súrlódási együttható ( $\mu$ ) minimális és maximális lökethosszon vett görbe alatti területével, abszolút értéken. A FAI-érték meghatározásához szükséges egyenlet a következő [29]:

$$FAI = \frac{1}{s_{max}} \int_{s_0}^{s_{max}} |\mu(s)| ds$$

Az alkalmazott oszcilláló tribométer elvi vázlata a 4. ábrán látható. A modulba behelyezésre kerül egy golyó próbatest a golyótartó-elembe, valamint egy tárcsa próbatest a tárcsa-befogóba. Amint rögzítésre kerültek ezen próbatestek, úgy a mérési program elindítása után egy terhelő rúd kezdi terhelni a golyótartó-elemet, rányomva azt a tárcsa felületére. Ezt követően az oszcilláló keret ide-oda mozgatja a rányomott golyót, így az kopásnyomot képez a tárcsa felületén.

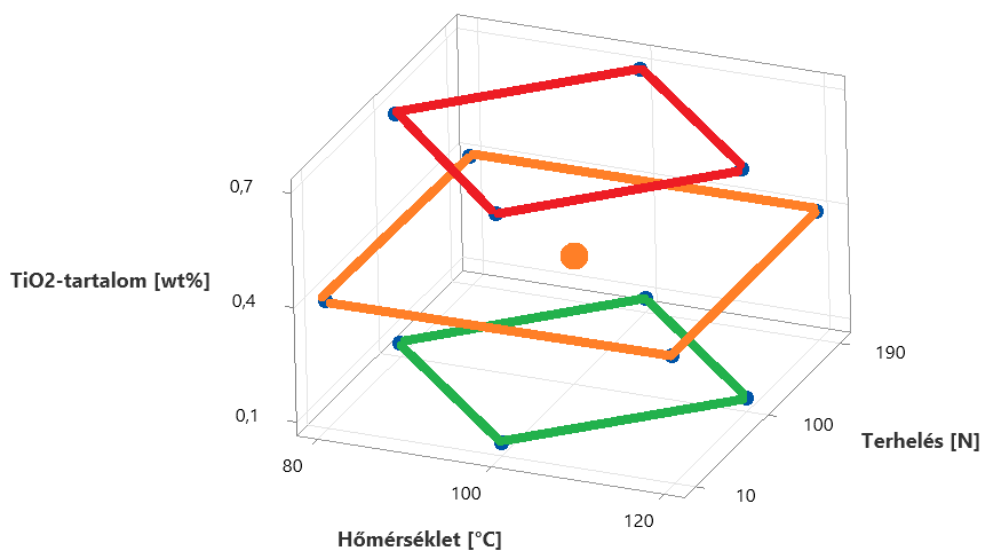


4. ábra: Oszcilláló tribométer (Optimol SRV 5) oszcillálást megvalósító moduljának elvi vázlata. 1) Terhelőrúd, amely egy felső terhelőkazettáról közvetlenül ráadja a terhelést a próbatestekre; 2) oszcilláló keret, amely megvalósítja az oszcillálómozgást; 3) golyórögzítő egy beszerelt golyó próbatesttel; 4) vizsgált tárcsa próbatest [31].

A vizsgálatok megkezdése előtt a tribométer elemei és mérőkamrája féktisztítóval letisztításra kerültek a nem kívánt szennyeződések és használt olaj eltávolítása érdekében. Az olaj mozgatását lehetővé tevő szilikoncsöveket újakra lettek cserélve. Ezt követően az ultrahangos keverővel homogenizált olajmintából kb. 8-10 ml-t (cső hosszától függően) fecskendővel a tribométer szilikoncsövébe lett töltve, amely átfuttatásra került a csőrendszeren egy perisztaltikus pumpa segítségével. A próbatestek is átestek a tisztításon, és azt követően azok a megfelelő tartóelembé helyezésre és rögzítésre kerültek. Egy pipettával a tárcsatartó alkatrész olajkádja kb. 5 mm-ig lett feltöltve további olajmintával. A szilikoncsövek végei becsatlakoztatásra kerültek a rendszerbe, és a pumpa forgatásával ellenőrizve lett az olaj áramlása, hogy biztosan ne lépjen fel rendellenesség. A mérések indítása előtt javasolt az olajkádiban esetlegesen keletkezett buborékok pipettával történő eltávolítása. A szilikoncső végéről lecsorgó olaj útja egy pipettával a golyó felé lett irányítva. A tribométerhez csatlakoztatott számítógépen az Optimol OCA szoftverben a kívánt mérési programot ki lett választva, majd elindításra került. Miután a gép ráadta a terhelést a próbatestekre, a golyót rögzítő alkatrész egy nyomatékkuccsal meghúzásra került. A mérések után a használt olaj eltávolításra került a rendszerből. A próbatesteket tartó alkatrészek kicsavarozását és eltávolítását követően a próbatestek féktisztítóval lefújásra kerültek, majd ultrahangos keverőbe helyezve 50 °C-on, 15 percig ultrahangos tisztításban részesültek.

### 3.3. Mérési program

A tribométer elindításához szükséges mérési programokat létrehozni. A mérések megtervezéséhez Design of Experiments (DOE) kísérlettervezési módszer volt alkalmazva, azon belül pedig a Box-Benkhen dizájn. A DOE-módszerre és a szoftveres kiértékelésre Minitab Statistical Software 22 nevű szoftver volt használva. Az alkalmazott válaszfelület módszertan grafikus ábrázolása látható az 5. ábrán.



5. ábra: Box-Benken dizájn grafikus ábrázolása. A színes négyzetek sarokpontjai jelölik a mérési pontokat a vizsgált rendszerben.

Az alkalmazott dizájntípus segítségével lett létrehozva a mérési terv. A megtervezéskor fő szempont volt a határértékeken való mérés elkerülése, ugyanis az a tribológiai rendszer határát feszegetné. Titán-dioxid ( $\text{TiO}_2$ ) tömegszázalékának meghatározásakor 0,1 wt% és 0,7 wt% lett meghatározva szélső pontoknak. Korábbi tapasztalatok alapján a nanoadalékok 0,1 wt% felett mutatnak kimutatható, pozitív eredményt, míg 0,7 wt% felett fellép az ülepedés veszélye, valamint az, hogy a túlzott nanoadalék-mennyiség inkább hátráltatja a kopási- és súrlódási folyamatot, előidézve a háromtest-abráziós kopást. Hőmérséklettartomány kiválasztásánál legfontosabb szempont az volt, hogy korábbi mérések 100 °C hőmérsékleten zajlottak, valamint 120 °C volt a tapasztalati határértéke a korábban vizsgált tribológiai rendszereknek. Ebből adódott a 80 °C. Terhelésértékeknél szintén a korábbi mérések alapján lett megválasztva a 100 N-os középpérték. 10 N terhelés a tapasztalati alsó határa a méréseknek pontosság tekintetében. A 190 N-os terhelésérték ennek megfelelően adódott a szimmetria miatt. A mérési

programokról áttekintő táblázat tekinthető meg az 1. táblázatban. Mindegyik beállítással 4 mérés történt.

*1. táblázat: Box-Benhken dizájnnal megtervezett mérések.*

| Tömegszázalék | Terhelés | Hőmérséklet |
|---------------|----------|-------------|
| 0,1%          | 10 N     | 100 °C      |
| 0,1%          | 100 N    | 80 °C       |
| 0,1%          | 100 N    | 120 °C      |
| 0,1%          | 190 N    | 100 °C      |
| 0,4%          | 10 N     | 80 °C       |
| 0,4%          | 10 N     | 120 °C      |
| 0,4%          | 100 N    | 100 °C      |
| 0,4%          | 190 N    | 80 °C       |
| 0,4%          | 190 N    | 120 °C      |
| 0,7%          | 10 N     | 100 °C      |
| 0,7%          | 100 N    | 80 °C       |
| 0,7%          | 100 N    | 120 °C      |
| 0,7%          | 190 N    | 100 °C      |

A mérési programok az ISO 19291:2016 szabványnak megfelelően kerültek előkészítésre [32]. Minden mérés 2 óra 30 másodpercig tartott; az első 30 másodpercben a mérések 50 N előterheléssel indultak, majd a normálerő ráadásával folytatódtak. A vizsgálatok 1 mm-es lökethosszon, 50 Hz frekvenciával, 100 °C hőmérsékleten és 225 ml/óra olajzási sebességgel zajlottak. A méréseknél 200 N maximális terhelésre képes kazetta volt alkalmazva a 2000 N-os kazetta helyett, hogy az eredmények minél pontosabbak legyenek az alkalmazott terhelésértékeken.

### **3.4. Felhasznált próbatestek**

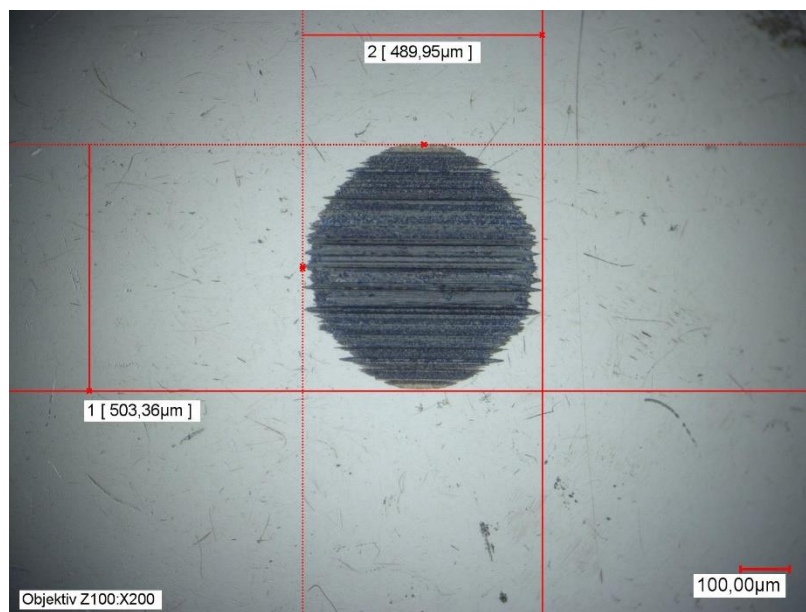
A mérésekhez egy tárcsa és egy golyó próbatest volt használva, melyek egymás párjaként funkcionálnak. A felhasznált próbatestekről áttekintést nyújt a 2. táblázat. Egy tárcsa próbatest egy oldala négy mérési helyet biztosít, míg egy golyó próbatest szintén négyet. Minden mérés előtt, a felhasználni kívánt tárcsa- és golyópróbatestek negyedórás, 50°C-os ultrahangos tisztításon esnek át, hogy azok meg legyenek tisztítva az esetleges szennyeződésektől és kopásszemcséktől.

2. táblázat: Felhasznált próbatestek méret- és anyagjellemzői.

| Próbatest:                           | Tárcsa                  | Golyó            |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Méret:                               | ø24 mm; 6,8 mm magasság | ø10 mm           |
| Anyagminőség:                        | 100Cr6 (1.3505)         | 100Cr6 (1.13505) |
| Rockwell-keménység:                  | 62 ± 1 HRC              | 60 ± 2 HRC       |
| Felületi érdesség (R <sub>a</sub> ): | 0,047 ± 0,003 µm        | 0,025 ± 0,005 µm |

### 3.5. Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóp

A felületek mikroszkópos (optikai kopásmérés) vizsgálatára és képrögzítésre a Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóp volt alkalmazva. A kopásnyomokkal rendelkező mérési próbatestek az mikroszkóp objektívja alatti tárgyasztalra kerültek. A mikroszkóp külső irányítópanelének segítségével megfelelő élességi szint került beállításra. Ezt követően, a kívánt tárgyasztal-pozíció rögzítése finombeállító csavarokkal történt. A nagyítás mértéke 100x és 1000x között szabályozható. A tárcsákról 100-szoros, a golyókról pedig 200-szoros nagyítású felvételek készültek. A vizsgált felület halogénlámpával megvilágított képe egy optikai kábelen keresztül továbbításra került a mikroszkóphoz kapcsolt számítógépre. A számítógép monitorján megjelenített képek méretezése és elmentése képfájl-formátumban történt. A digitális mikroszkóp használatával meghatározásra kerültek a WSD-értékek (golyó kopásátmérője), a kopások hossza és szélessége, továbbá információ nyerhető a kopások jellegéről. A képeken legtöbbször különböző súrlódási mechanizmusok és a nanorészecskék hatásának eredménye figyelhető meg – egy ilyen kép látható a 6. ábrán is.



6. ábra: Golyó-kopásnyomról készült felvétel Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóppal. Az ábrán látható kopásnyom a Group III 4 cSt + 0,7 wt% titán-dioxid (TiO<sub>2</sub>) kenőolajmintához tartozik, 190 N terhelés és 100 °C hőmérséklet beállításokon.

### 3.6. Leica DCM3D konfokális mikroszkóp

A tárcsa kopástérfogatának optikai meghatározása a Leica DCM3D konfokális mikroszkóp alkalmazásával történt, ami egy lézersugár segítségével készít optikai „szeleteket”, rétegeket a fókuszpontban lévő felület pontjairól. A mérések megkezdése előtt a tárgyasztalt kisíkolni, vízszintes helyzetbe szükséges hozni, amit az X- és Y-tengelyen, két-két távol eső pont egy magasságba (Z-tengely) illesztésével lehet elérni. A mérések során egy 4x5-ös régió került kiválasztásra, 20-szoros nagyítású objektívvel. Az alkalmazott Leica DCM3D konfokális mikroszkóphoz tartozik egy Leica Map nevű szoftver, amelyben a felületről készített felvétel elemezhető. Ebben a szoftverben határozható meg a kopástérfogat a legkisebb négyzetek módszere alapján. Ezzel a szoftverrel a kopástérfogaton (WV) kívül meghatározhatók az ISO 25178 szabványban meghatározott 3D felületi textúra értékek, valamint az ISO 21920-3:2021 szabványban szereplő felületi érdességi értékek is.

## 4. Mérési eredmények

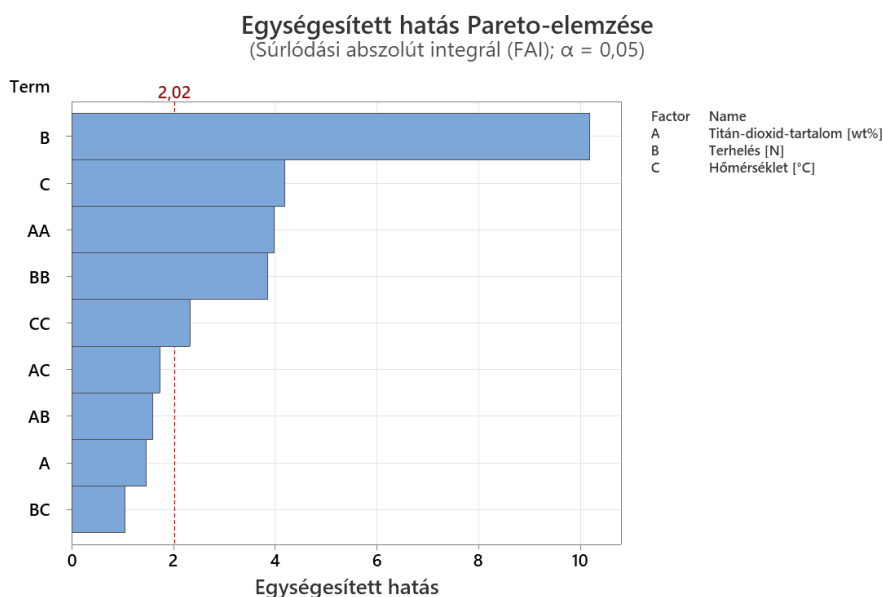
Jelen kutatás összesen 13 különböző mérési beállítást használt fel, ami összesen 52 különböző mérést jelent. A tribométeren végzett mérések összesen 104 óra és 26 perc időt vettek igénybe előkészületek, utómunka és eredmények kiértékelése nélkül. A felhasznált 13 mérési program adja meg a vázát a választott Box-Benkhen dizájnnak. A fix mérési pontokban az eredmények pontosak, azonban a válaszfelület-diagramokon a pontok közötti területek mind becslő értékűek (másodfokú regresszióegyenlet segítségével).

A mérési eredményeket taglaló fejezet négy különböző főrésze oszlik: először a súrlódási abszolút integrál elemzése következik, majd a tapadási súrlódási együtthatóé, ezt követően a kopásátmérő (WSD) értékről lesz szó, végül pedig a kopástérfogati eredmények lesznek ismertetve. Az egyes alfejezetek kitérnek a vizsgált rendszer és faktorok Pareto-elemzésére, szignifikanciaszint-vizsgálat révén. Az ábrák függőleges tengelyén láthatóak a faktorok „Term” jelzéssel. Ez a különböző faktorok különböző beállításait és interakcióit jelöli. A hatásvizsgálatához 5%-os szignifikanciaszint lett alkalmazva. Az vízszintes, egységesített hatás kifejezéssel jelölt tengely mutatja meg az egyes faktorok hatásának mértékét a vizsgált rendszerben. A Pareto-elemzésekkel párhuzamosan kontúrdiagramok is láthatóak, melyek szemléltetik azt, hogy a vizsgált rendszerben adott paraméterbeállításokkal megközelítőleg milyen eredményt adhat az adott tribológiai érték. A kontúrdiagramokon a vörös szín jelzi a tribológiai szempontból nem ideális, kedvezőtlen értékeket, míg a zöld az ideális, kedvező értékeket. Az utóbbi két diagram szemléltetése után áttekinthetők az egyes optimumpontok az adott vizsgált értékre vonatkozóan. Az optimumkeresés során szerepel egy *d*-érték az ábrákon, ami a kívánatossági (desirability) értéket jelenti, és azt hivatott szemléltetni, hogy az érték elméleti optimumpontja mennyire felel meg a meghatározott célnak. Ezzel annak mértéke fejezhető ki, hogy milyen hűen érhető el a kívánt (jelen esetben minimális) érték. Az ideális esetet az 1-es érték jelenti, míg a 0-hoz közelítő értékek azt mutatják, hogy az eredmények eltérnek a céltól, így nem feltétlenül sikerül az abszolút minimális értéket elérni a beállításokkal. Az ábrán látható grafikonok közül külön-külön látható a tömegszázalékhoz, a hőmérséklethez és a terheléshez tartozó görbe, ami megmutatja, hogy csak az egyik paraméter változtatása milyen görbét írna le a választott tribológiai értéket vizsgálva.

### 4.1. Súrlódási abszolút integrál (FAI) eredmények

A hatások nagyságát vizsgálva, súrlódási abszolút integrál (FAI) értékeket tekintve, látható a 7. ábra Pareto-elemzésén az, hogy a B tényező, azaz a terhelés rendelkezik a legjelentősebb

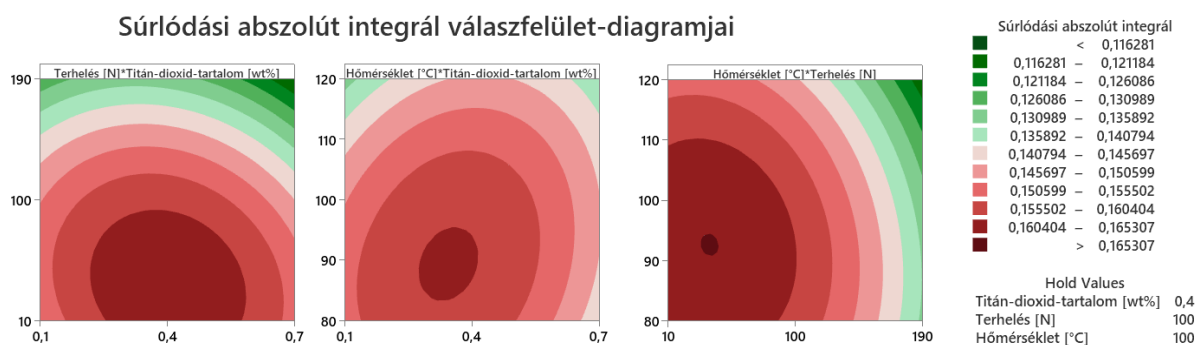
hatással, ami jelentősen túllépi a kalkulált szignifikanciaszint küszöbértékét. Ez azt jelenti, hogy a terhelés közvetlen módosítása van legnagyobb hatással a FAI-értékre. Hőmérséklet változtatása szintén szignifikáns hatással van a rendszerre, bár kisebb mértékben befolyásolja azt, mint a terhelés. A titán-dioxid-tartalom, terhelés és hőmérséklet négyzetes hatásai jelentős szerepet játszanak még a rendszerben. Kijelenthető, hogy a terhelés, mint interakciós tényező rendelkezik a legnagyobb hatással a FAI-értékre. A szignifikanciaszint (vörös szaggatott vonal) alatt lévő tényezők nem bírnak jelentős hatással a rendszer viselkedésére.



7. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

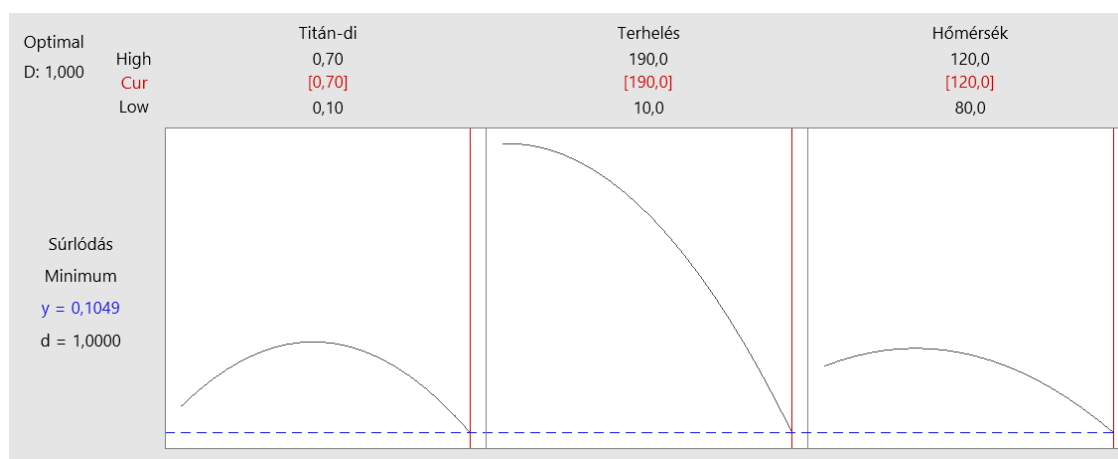
Az 8. ábrán láthatóak a FAI-értékek válaszfelület-diagramjai. Az első, bal oldali képen látható a terhelés és titán-dioxid-tartalom közös interakciójának kontúrdiagramja. A diagram alapján a legalacsonyabb FAI-érték magas terhelés és magas koncentrációsázalék beállításokkal érhető el. Tribológiai értelemben vett legrosszabb értékek alacsony terhelésértéken (10 N - 90 N) és a vizsgált rendszerben köztes tömegszázalék-tartományon (0,2 wt% és 0,6 wt% között) valósítható meg. Az ábra középső diagramján látható a hőmérséklet és titán-dioxid-tartalom közös interakciójának kontúrdiagramja. A diagramon egyértelműen látszik, hogy a legmagasabb FAI-érték 0,34 wt% és 90 °C környékén adódik. A FAI-érték csökkenést mutat a hőmérséklet növelésével, 90 °C-tól. A jobb oldali diagramon a hőmérsékleti és terhelési paraméterek interakciója figyelhető meg. A diagram arról tanúskodik, hogy magas hőmérsékleti érték (120 °C) és magas terhelésérték (190 N) beállításával érhető el a vizsgált

rendszer legalacsonyabb FAI-értéke. A diagramon jól kivehető egy abszolút magas értékű pont 40 N és 93 °C esetén.



8. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

Elemmezve a kontúrdiagramot, kijelenthető, hogy minden vizsgált paraméter legmagasabb beállításával érhető el a legalacsonyabb súrlódási abszolút integrál érték. Ezt támasztják alá az 9. ábrán látható választoptimalizációs diagramok is. A diagramok görbéin megfigyelhető, hogy rendelkeznek egy abszolút magas FAI-értékű csúcsponttal, valamint egy legalacsonyabb értékű ponttal is. A Minitab szoftver becslése alapján az optimális paraméterbeállítással, 0,7 wt% titán-dioxid-tartalom, 190 N terhelés és 120 °C hőmérséklet esetén  $FAI = 0,1049$  érték érhető el.

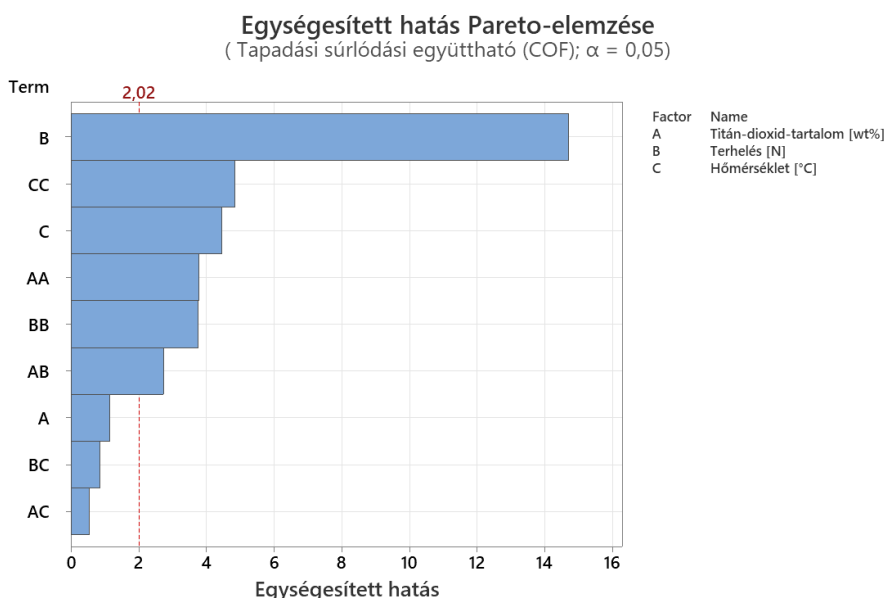


9. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) értékek választoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

## 4.2. Tapadási súrlódási együttható (COF) eredmények

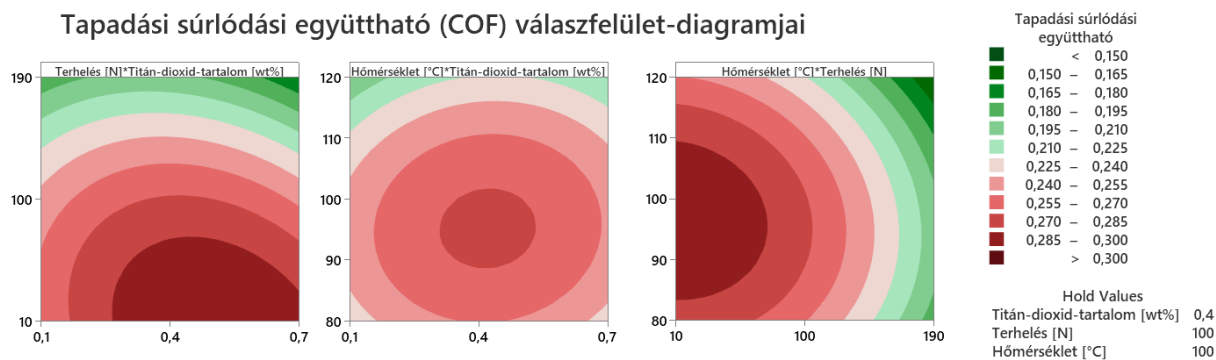
Jelen alfejezetben a tapadási súrlódási együttható (COF) értékek eredményei kerülnek ismertetésre. Az 10. ábrán látható Pareto-elemzésen megfigyelhetők a vizsgált paraméterek hatásai a COF-értékre. A diagram alapján legjelentősebb hatással a terhelés bír. Ez azt jelenti,

hogy a terhelés változtatása befolyásolja leginkább a COF-értéket, és alapvető szerepet játszik a súrlódási folyamat alakulásában. A hőmérséklet elsőfokú és másodfokú hatása is szignifikánsnak mondható a rendszerben. Ezen felül szignifikáns hatással bír a titán-dioxid-tartalom és a terhelés négyzetes hatása, valamint a titán-dioxid-tartalom és a terhelés együttes változtatásának hatása is.



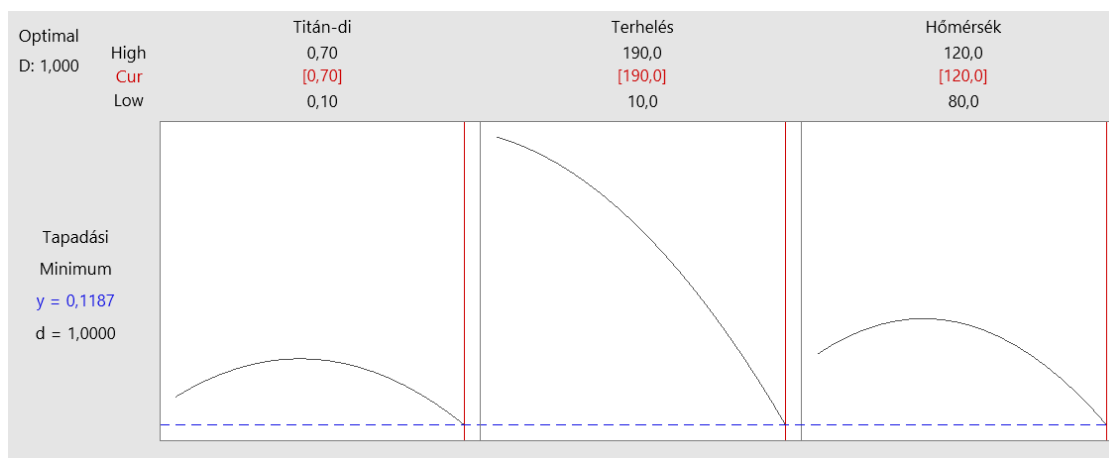
10. ábra: Tapadási súrlódási együttható (COF) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

Tapadási súrlódási együttható (COF) érték kontúrgramjai vizsgálhatóak meg az 11. ábrán. Az ábra bal oldali diagramján látható a terhelés és titán-dioxid-tartalom együttes interakciójának hatása. Megállapítható, hogy alacsony terhelésértéken a koncentrációsázalék növelése emeli a tapadási súrlódási együttható értékét. A diagramról leolvasható a Pareto-elemzésben tett megállapítás: a terhelés jelentős hatással van a COF-értékre, a titán-dioxid tartalom kevésbé befolyásolja azt. A középső diagramon megtekinthető a hőmérséklet és a titán-dioxid-tartalom közös hatása. Becslés alapján, a legrosszabb elérhető érték 92 °C és 0,42 wt% esetén valósulna meg. A harmadik, jobb oldali diagramon tisztán leolvasható a terhelés szignifikáns hatása. Ezen a diagramon látható, hogy a terhelés a hőmérséklet ellenére is szignifikáns hatással bír. Legmagasabb COF-érték ezen a diagramon 95 °C környékén jön létre.



11. ábra: Tapadási súrlódási együttható (COF) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

COF-értékre vonatkoztatott optimumpont keresés látható az 12. ábrán. Tapadási súrlódási együttható érték minimalizálására a Minitab szoftver a 0,7 wt% titán-dioxid-tartalom, 190 N terhelés és 120 °C hőmérséklet beállítását javasolja. Számítások alapján, ezekkel a beállításokkal a rendszerszinten elérhető 0,1187 COF-érték valósítható meg. Az ábrán egyértelműen látszik, hogy terhelés görbéjének meredeksége, ami alátámasztja azt, hogy a terhelés változtatása szignifikáns hatással van a vizsgált értékre.

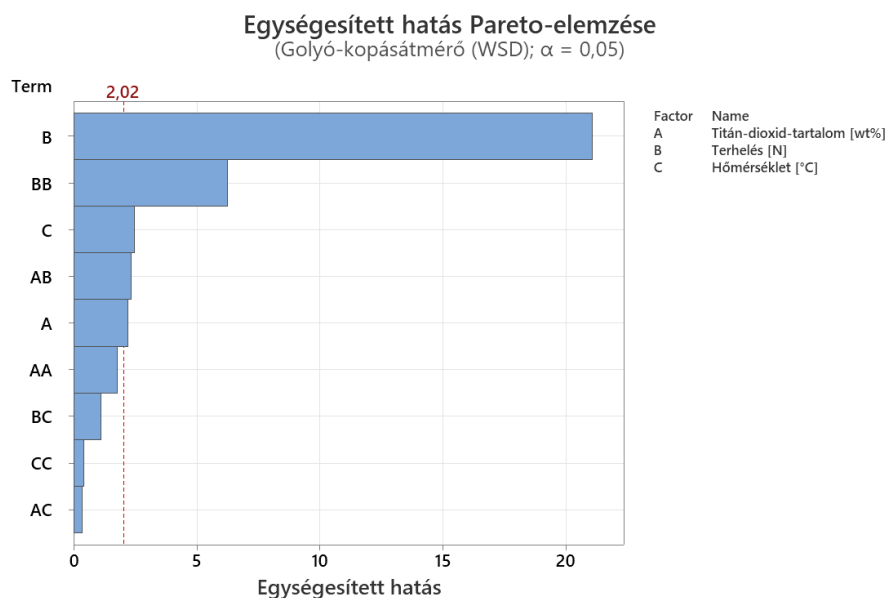


12. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) értékek válaszoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

### 4.3. Golyó-kopásátmérő (WSD) eredmények

Ebben az alfejezetben a golyó próbatesten létrejött kopásnyom átmérőjének az értékei kerülnek ismertetésre, válaszfelület-diagramok és Pareto-elemzés segítségével. A WSD-értékek digitális mikroszkóppal lettek megmérve. Az 13. ábrán látható a WSD-értékek Pareto-elemzése. A többi vizsgált értékhez hasonlóan, a B-faktor, tehát a terhelés jelentősen nagy befolyással van a rendszerre. Az eredmények alapján a terhelés változtatása közvetlenül tudja

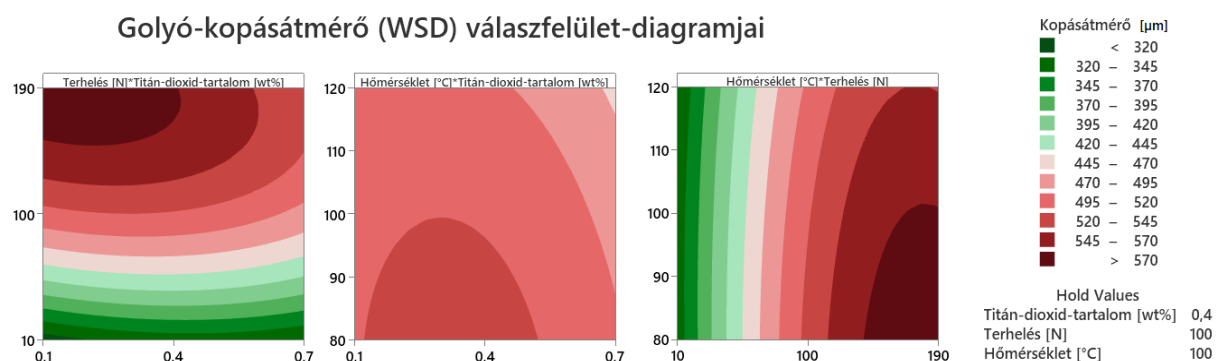
növelni vagy csökkenteni egy kopásátmérő szélességét. A terhelés másodfokú hatása szintén nem elhanyagolható tényező WSD-érték vizsgálata során. Szignifikanciaszintet átlépi még a hőmérséklet, a titán-dioxid-tartalom és a terhelés együttes hatása és maga a titán-dioxid-tartalom is. A Pareto-elemzésen tisztán látszik, hogy a vizsgált rendszert leginkább a terhelés befolyásolja.



13. ábra: Golyó-kopásátmérő (WSD) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

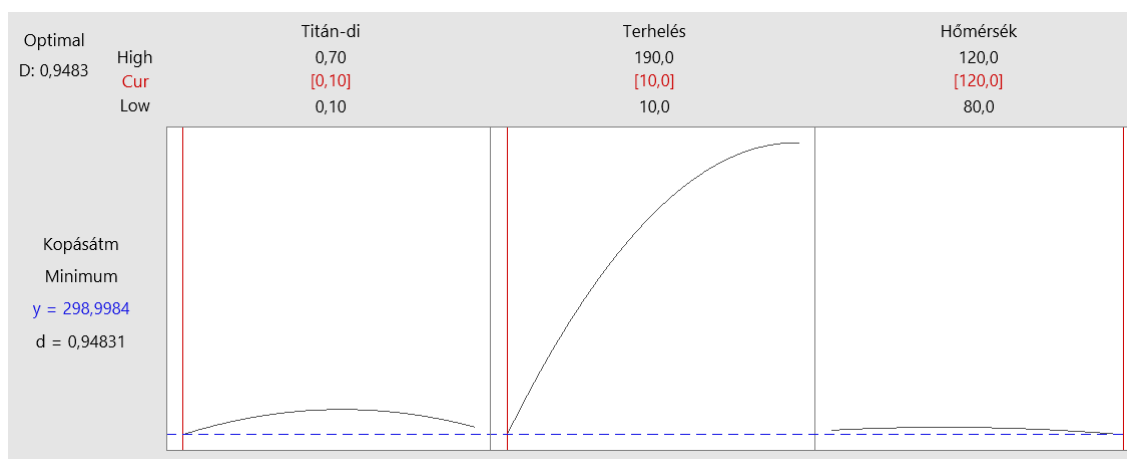
Golyó-kopásátmérő (WSD) értékekről készült kontúrdiagramok megfigyelhetők az 14. ábrán. Az ábra bal oldalán látható első diagramon a terhelés és a titán-dioxid-tartalom közös interakciójának ábrázolása látszik. A diagramról leolvasható, hogy a csökkenő terhelés szignifikánsan csökkenti a kopásátmérőt. A titán-dioxid-tartalom csak csekély mértékben tudja csökkenteni a WSD-t magas terhelésen. Alacsony terhelésen nem megfigyelhető az adalék javítóhatása. Megállapítható, hogy az alkalmazott titán-dioxid adalékanyag (0,5 wt%-tól) magas terhelésérték esetén (70 N felett) képes csökkenteni a kopás mértékét, így hasznos lehet teherviselő olajfilm létrejöttékor. Az ábra középső diagramján látható, hogy a hőmérséklet és a titán-dioxid tartalom egy rendszerben vizsgált változtatása nem okoz szignifikáns értékváltozást. Ebben a diagramban a WSD-érték nem változik sokat, a vizsgált rendszer teljes egészét tekintve. Ezt alátámasztja az 13. ábrán látható Pareto-elemzésben az AC-faktor, tehát a hőmérséklet és a titán-dioxid-tartalom együttes hatása, ahol ugyanis ez rendelkezik a legalacsonyabb szignifikanciával. A jobb oldali diagramon megfigyelhető a hőmérséklet és terhelés közös kontúrdiagramja. A terhelés csökkentésével járó kopásátmérő-csökkenés

egyértelműen észrevehető. Alacsony terhelés esetén a hőmérséklet hatása elhanyagolható. Magas terheléérték esetén (110 N felett) a magas hőmérséklet (100 °C felett) képes csökkenteni a golyó próbatesten létrejövő kopásátmérőt.



14. ábra: Golyó-kopásátmérő (WSD) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

Minitab szoftverben optimalizációs vizsgálat futtatása történt minimalizált kopásátmérőre. Az 15. ábrán látható optimalizációs görbéken látszik a hőmérsékleti görbe elenyésző hatása a rendszerre. Ezzel ellenben a terhelés szignifikanciája korrelál a terhelési görbe meredekségével. A szoftver becslése alapján, 0,1 wt% titán-dioxid-tartalom, 10 N terhelés és 120 °C hőmérséklet beállításakor elérhető el a rendszer legalacsonyabb WSD-értéke, a 299 μm-es kopásátmérő.

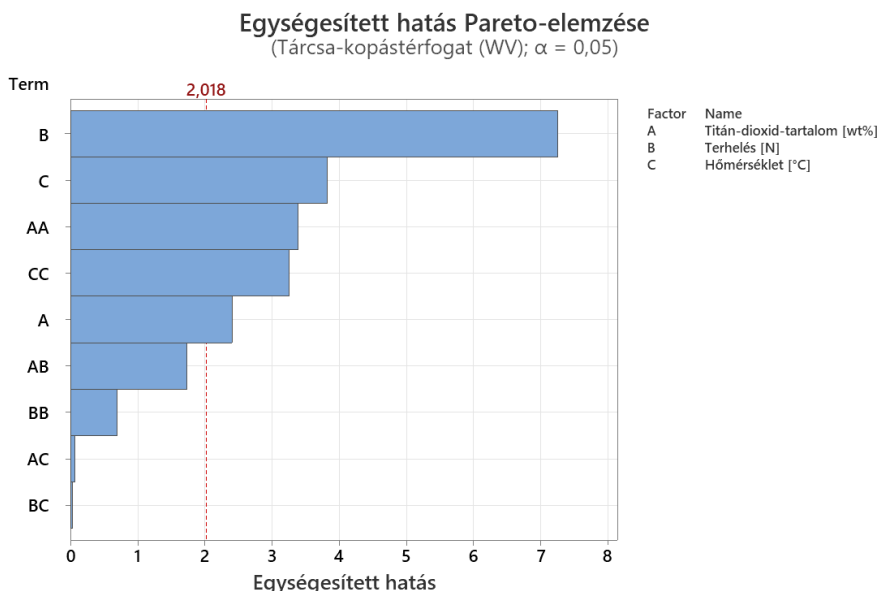


15. ábra: Golyó-kopásátmérő (WSD) értékek válaszoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

#### 4.4. Tárcsa-kopástérfogat (WV) eredmények

Jelen alfejezetben a tárcsa próbatest kopástérfogati értékeinek (WV) és eredményeinek áttekintése olvasható. A kopástérfogati értékek konfokális mikroszkóp segítségével lettek meghatározva. Az 16. ábrán látható Pareto-elemzésből kiolvasható, hogy a B-faktor, azaz a

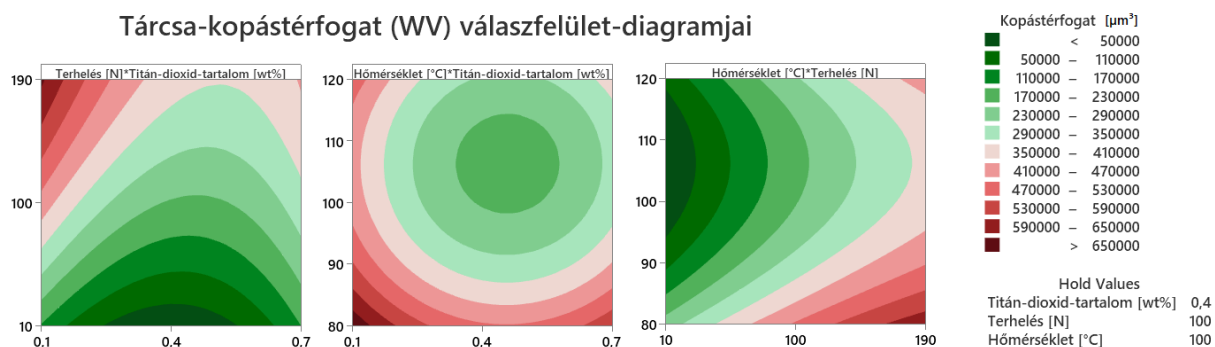
terhelés rendelkezik a legmagasabb szignifikanciával, jelentősen túllépi a szoftveresen meghatározott szignifikanciaszintet. WV-érték tekintetében a C-faktor, a hőmérséklet is szignifikáns hatással rendelkezik. Jelentős hatással van még a rendszerre a titán-dioxid tartalom első- és másodfokú hatása, valamint a hőmérséklet másodfokú hatása is. A többi vizsgált faktor statisztikailag nem mondható jelentősnek a vizsgált rendszerben.



16. ábra: Tárcsa-kopástérfogat (WV) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén

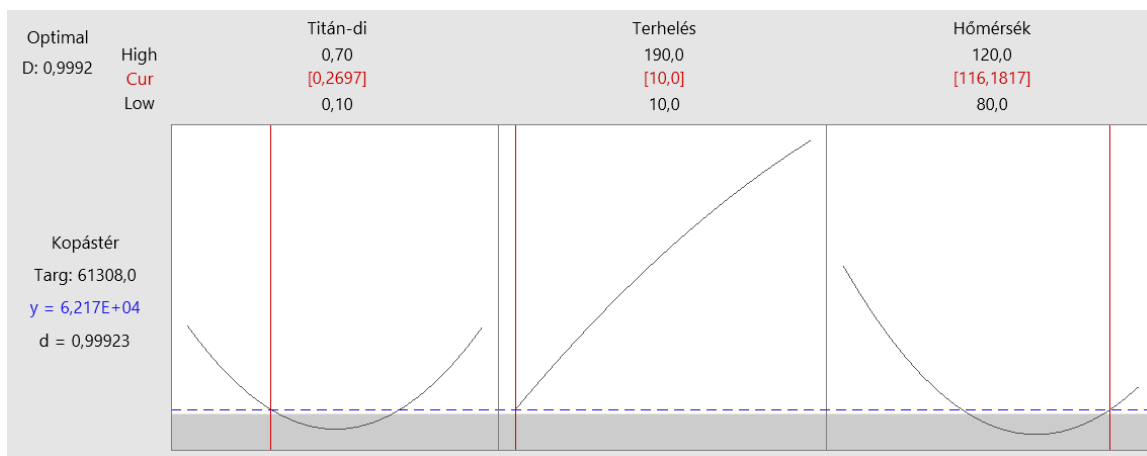
Tárcsa próbatest kopástérfogati értékeiről (WV) készített kontúrdiagramok figyelhetőek meg az 17. ábrán. Az ábra bal oldali diagramjában látható a terhelés és a titán-dioxid-tartalom közös hatásának válaszfelülete. A diagramon látható egy egyértelmű minimumpont, ahol a kopástérfogat  $100\,000\ \mu\text{m}^3$  alatti – ez 0,4 wt% titán-dioxid-tartalom és 10 N terhelés esetén mutatkozik meg. Megfigyelhető, hogy a terhelés növelésével a WV-érték fokozatosan növekszik. Az említett 0,4 wt%-os titán-dioxid tartalmat tartva megfigyelhető, hogy a kenőolajminta ezen a százalékon produkálja a legalacsonyabb kopástérfogatot adott, állandó terhelés mellett. Magasabb terhelésérték beállításával ez a 0,4 wt%-os optimumpont kissé eltolódik magasabb százalék irányába, 190 N-on 0,5 wt%-ig. Az ábra középső diagramjában a hőmérséklet és a titán-dioxid-tartalom közös interakciója figyelhető meg egy válaszfelületen. A diagramon látható, hogy a legalacsonyabb kopástérfogat itt 0,45 wt% titán-dioxid-tartalom és 105 N terhelés esetén érhető el. A diagramon megfigyelhető a hőmérséklet és a titán-dioxid-tartalom szignifikáns hatása, akár együttesen is. Látható, hogy mindkettő rendelkezik egy optimumponttal a vizsgált rendszeren belül. Legmagasabb kopástérfogati érték  $80\ ^\circ\text{C}$

hőmérséklet és 0,1 wt% titán-dioxid-tartalom beállításával érhető el. A jobb oldali kontúrdiagramon a hőmérséklet és a terhelés interakciója figyelhető meg. A diagramon egyértelműen látszik, hogy a legalacsonyabb kopástérfogat alacsony terhelés esetén mutatkozik meg, 105 °C hőmérsékletnél. Általánosságban elmondható, hogy alacsony terhelés értéken érhetőek el a legalacsonyabb kopástérfogati értékek, hőmérséklettől függetlenül. Ugyanakkor a hőmérséklet 105°C-on képes legnagyobb mértékben csökkenteni a kopást adott terhelésérték mellett, még magas terhelésen (190 N) is.



17. ábra: Tárcsa-kopástérfogat (WV) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

A WV-érték optimalizációs folyamata során ügyelni kell arra, hogy a becsült érték ne mutasson negatív értéket, ugyanis a valóságban nem létezhet negatív kopástérfogat. Ennek tudatában az optimalizáció során a legalacsonyabb pozitív szám keresése lett a cél. Így eredményképpen 62 170  $\mu\text{m}^3$  kopástérfogat adódott, ami az 18. ábrán látható ábrán is megfigyelhető a kék színnel jelölt y-értéknél. Az ábrán látható sötétszürke, alsó sáv mutatja azt a részt, ami esetén már negatív lenne a kopástérfogat. Kopástérfogat minimalizálása során 0,27 wt% titán-dioxid-tartalom, 10 N terhelés és 116,2 °C hőmérséklet beállítása adja az elérhető legalacsonyabb értéket a vizsgált rendszerben.



18. ábra: Tárcsa-kopástérfogat (WV) értékek válaszoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

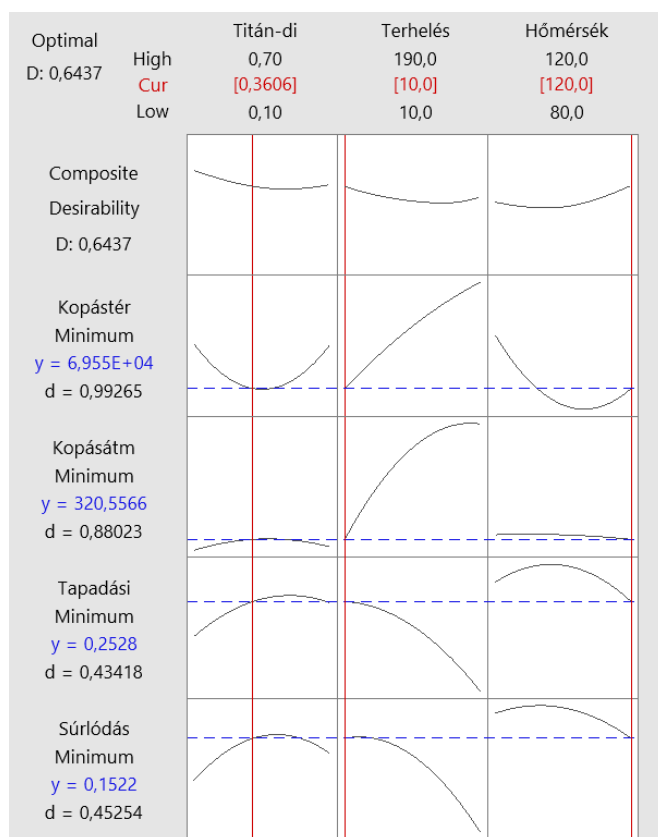
#### 4.5. Mérési eredmények összegzése

Összegezve a mérési eredményeket, elmondható, hogy a terhelés központi szerepet játszik a kopási folyamatokban. Jelentősen hozzájárul a kopás és a súrlódás változásához, kopási folyamatok befolyásolásához. Súrlódási értékeknél 190 N terhelés jelenti azt az értéket, ami a legalacsonyabb súrlódási, FAI és COF értéket adná. Kopásértékek esetén minél alacsonyabb terhelés szolgáltatja az alacsony kopást, jelen esetben a 10 N. Titán-dioxid-tartalom optimális pontja a súrlódási értékek esetén megegyezik: 0,7 wt% tömegszázalék adja a legalacsonyabb FAI és COF értéket. Kopási értékekkel nem teljesen fordított arányos ez, mint a terhelés, ugyanis 0,1 wt% titán-dioxidnál jelenik meg a legalacsonyabb kopásátmérő, míg kopástérfogat esetén 0,27 wt% titán-dioxid-tartalom adja meg a legalacsonyabb kopástérfogatot. Hőmérséklet szinte minden esetben a felső maximum értéken szolgáltatta a legalacsonyabb súrlódási és kopási értékeket, 120 °C-on. A hőmérséklet növelése csökkentette a viszkozitást. Ez alól kivétel a kopástérfogatnál szoftver által javasolt 116,2 °C.

Összességében elmondható, hogy súrlódási paramétereknél, mint a súrlódási abszolút integrál (FAI) és tapadási súrlódási együttható (COF), a magas terhelés (190 N), a magas titán-dioxid-tartalom (0,7 wt%) és a magas terhelés (120 °C) adja a legalacsonyabb súrlódást. Kopási paramétereknél, mint a golyó próbatest kopásátmérője (WSD) és a tárcsa próbatest kopástérfogata (WV), az alacsony terhelés (10 N), a magas hőmérséklet (120 °C) szolgáltatja a legalacsonyabb kopást, változó, alacsony titán-dioxid tartalom mellett. Kopásátmérő (WSD) esetén 0,1 wt% titán-dioxid az optimális, míg kopástérfogat (WV) esetén 0,27 wt%.

## 5. Validálás

Jelen fejezet áttekintést nyújt a Box-Benhnken dizájnnal elkészített válaszfelület-diagram megbízhatóságáról és annak validáló eredményeiről. A validáló mérések kopás optimalizálására lettek tervezve. Szakirodalmak alapján a titán-dioxid adalékanyagtól kopáscsökkentés várható elsősorban, valamint ismert a vastag tribofilmképző tulajdonságáról is [17]. Optimalizációs vizsgálat esetén a súrlódás figyelembevétele erősen hátráltatja a kopási értékeket, ugyanis a Minitab szoftver abban az esetben, ha mind a négy vizsgált értéket kívánja minimalizálni, akkor túlságosan a határértékre esne az optimumpont (0,7 wt% titán-dioxid-tartalom, 190 N terhelés és 120 °C hőmérséklet). Ez a határértékre tett pont a kopási értékeket nagy mértékben növelné, emiatt az optimalizáció a kopási értékekre lett méretezve. Ennek eredményeképpen az optimumpont a következő pontra adódott: 0,3606 wt% titán-dioxid-tartalom, 10 N terhelés és 120 °C hőmérséklet, ami az 19. ábrán is látható.



19. ábra: Szoftveresen meghatározott optimumpont, kopási értékek minimalizálásának céljából, a vizsgált faktorokkal, egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.

A kívánatossági érték 64,4%-ra adódott. Ez a kívánatossági érték (d, desirability) jelenti azt az értéket, ami megmutatja, hogy a becslt érték mennyire felel meg a meghatározott célnak.

Ez azt jelenti, hogy mennyire hűen sikerült elérni a kívánt célt, jelen esetben az értékek minimalizálását. 100% jelenti az ideális esetet, 0% pedig azt, amikor semmilyen mértékben nem sikerül elérni a minimális értéket. Abban az esetben, amikor több tényező és több faktor optimalizálása a cél, akkor a tényezők hátráltathatják egymást, így kompromisszumot kell kötni az értékek között. Erről tanúskodik a súrlódási abszolút integrál (FAI) érték 45%-os és a tapadási súrlódási együttható (COF) érték 43%-os kívánatossági értéke. Golyó próbatest kopásátmérője esetén 88%-ban sikerül elérni a minimumpontot, míg a tárcsa próbatest kopástérfogata esetén 99%-ban. A kopási értékek minimalizálására tervezett optimalizációs beállításokkal négy darab tribométeres mérés történt. A mérési eredmények átlagolva lettek, valamint abszolút és relatív eltérés lett számolva belőlük, amit a 3. táblázat is tartalmaz.

3. táblázat: Szoftveresen becsült és valós, validált eredmények összehasonlítása felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolajminták esetén.

| Paraméter | Becsült eredmény       | Validált eredmény       | Abszolút eltérés       | Relatív eltérés |
|-----------|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|
| FAI       | 0,152                  | 0,157                   | 0,005                  | 3,2%            |
| COF       | 0,253                  | 0,289                   | 0,036                  | 12,5%           |
| WSD       | 321 $\mu\text{m}$      | 331 $\mu\text{m}$       | 10 $\mu\text{m}$       | 3%              |
| WV        | 69 550 $\mu\text{m}^3$ | 133 650 $\mu\text{m}^3$ | 64 100 $\mu\text{m}^3$ | 48%             |

Az eredményeket tartalmazó 3. táblázatot tekintve látható, hogy a FAI-értékre tett közelítő becslés 3,2%-kal tért el a valós, validált eredménytől. Abszolút eltérésben 0,005 FAI-érték adódott. COF-érték becslések szerint 0,253-nak volt várható, a valós eredmény 0,289-nek adódott. Ez relatív eltérésben 12,5% különbséget jelent. A golyó kopásátmérője 10  $\mu\text{m}$  hosszúsággal tért el a becsült eredményhez képest, ami 3% relatív különbségnek feleltethető meg. Végül, a kopástérfogati eredményeket tekintve 48% relatív eltérés adódott. A szoftveresen becsült eredmény és validált eredmény közötti abszolút különbség 64 100  $\mu\text{m}^3$ , ami tapasztalatok alapján egy abszolút kicsi térfogatkülönbségnek számít. Két test egymáson való relatív elmozdulása során a kopott felület folyamatos átalakuláson esik át. A kopásnyom változik, anyagok épülnek be a felületbe és anyagok kopnak ki onnan, komplex folyamatoknak köszönhetőek. Ezek a folyamatok egyelőre nem ismertek és további kutatások szükségesek a vizsgálatukhoz.

## 6. Diszkusszió

A végzett kutatás eredményei megegyeznek korábbi kutatások eredményeivel: kenőolajhoz nanoadalékolt titán-dioxid felhasználásával csökkenthető a súrlódás és kopás mértéke [17] [19] [20]. A tanulmány eredményei összhangban vannak Patil, H. H. és munkatársai által elért optimalizációs eredményekkel. Súrlódáscsökkentésre optimalizált rendszerben, egy titán-dioxiddal adalékolt kenőolajminta esetén az optimumpont 0,7 wt%-ra adódott 190 N terhelésen és 120 °C-on. Kopás csökkentésére optimalizált rendszer esetén az optimumpont 0,3606 wt% titán-dioxid-tartalomra adódott, 10 N terhelésen és 120 °C-on. Patil, H. H. eredményeiben hasonlót tapasztalt: súrlódásban az általa vizsgált legmagasabb tömegszázalék (0,75 wt%) nyújtotta az optimumpontot, legmagasabb vizsgált terhelésen. Kopás szempontjából az optimális koncentrációt 0,5 wt%-nak határozták meg, ami összefüggésbe hozható a jelen dolgozatban meghatározott 0,3606 wt%-kal, ugyanis Patil, H. H. és munkatársai 0,25 wt%-on és 0,5 wt%-on végeztek méréseket közeli tartományon [19]. Titán-dioxid adalékolása során a súrlódás csökkenthető, azonban minimális mértékben. Az eredmények azt igazolják, hogy az alkalmazott, felületmódosított titán-dioxid kopáscsökkentő hatása jelentősebb, mint a súrlódáscsökkentő tulajdonsága. Ezt a hatékony kopáscsökkentést úgy éri el, hogy a súrlódási értékeket nem növeli.

## 7. Konklúzió

A kutatás során meghatározásra került a Group III 4 cSt bázisolajhoz adalékolt titán-dioxid nanokerámia tömegszázaléka, hőmérséklet és terhelés hatása egy tribológiai rendszerben. Az eredményekből látszik, hogy titán-dioxid adalékolása a kenőolajmintához képes csökkenteni a kopást és a súrlódást a vizsgált rendszerben. Az alkalmazott Box-Benhken dizájn és válaszfelület-diagramok validálásához kopás minimalizálására optimalizált mérések lettek tervezve. Ez az optimumpont 0,3606 wt% titán-dioxid-tartalom, 10 N terhelés és 120 °C hőmérséklet pontra esett. Eredmények alapján a súrlódási abszolút integrál (FAI) 3,2%-ban tért el a becsült eredménytől, a tapadási súrlódási együttható (COF) 12,5%-ban, a golyó próbatesten létrejött kopásnyom átmérője (WSD) 3%-ban, míg a tárcsa próbatest kopástérfogata relatív eltérésben 48%-nak adódott. A kopástérfogat abszolút eltérésben  $64\ 100\ \mu\text{m}^3$ , ami tapasztalatok alapján rendkívül kis kopáskülönbséget jelent. A tanulmányban meghatározásra kerültek a szignifikáns paraméterek: egyértelműen megállapítható, hogy a terhelés hatása mind a négy vizsgált értéknél erősen befolyásoló hatású. Második legnagyobb szignifikanciával a hőmérséklet rendelkezik, valamint a titán-dioxid-tartalom sem elhanyagolható a rendszerben. Az alkalmazott Design of Experiments módszer segítségével átfogó, elemezhető, információdús eredmények születtek a vizsgált tribológiai rendszerről minimalizált mérési pont és időráfordítás felhasználásával.

Összegezve a dolgozatot, elmondható, hogy a titán-dioxid nanorészecskék képesek a súrlódás- és kopáscsökkentésre egy bázisolajban, valamint a terhelés és hőmérséklet szignifikanciája is meg lett határozva. Az alkalmazott Box-Benhken dizájn alkalmasnak bizonyult a vizsgált tribológiai rendszer elemzésére. A jövőbeli tervek közé tartozik további tényezők részletes vizsgálata, valamint a környezeti és valós körülmények hatásainak alapos elemzése.

## **8. Köszönetnyilvánítás**

Szeretném kifejezni hálámat Szabó Ádám István konzulensemnek, aki a dolgozatom készítése során értékes gondolatokkal, iránymutató tanácsokkal segítette munkámat. A támogatása és szakmai hozzáértése nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a kutatásomat sikeresen megvalósíthassam. Hálával tartozom továbbá Pápai Péter és Marsicki Márk kollégáimnak, akik elkötelezett munkájukkal, valamint a mérések pontos kivitelezésében és az eredmények kiértékelésében nyújtott segítségükkel nagymértékben hozzájárultak a dolgozatom elkészüléséhez. Köszönöm mindannyiuk áldozatos támogatását és együttműködését.

## Ábrajegyzék

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra: Tribológiai tulajdonságok javításának mechanizmusai nanorészecskék alkalmazásával, a) gördülő mechanizmus, b) feltöltő mechanizmus, c) polírozó mechanizmus, d) védőrétegképző (tribofilmképző) mechanizmus [12].                                                                                                                           | 4  |
| 2. ábra: Kenőolajminta előkészítésének folyamatai.                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 11 |
| 3. ábra: Felületaktivált titán-dioxid töredezett felülete.                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 12 |
| 4. ábra: Oszcilláló tribométer (Optimol SRV 5) oszcillálást megvalósító moduljának elvi vázlata. 1) Terhelőrúd, amely egy felső terhelőkazettáról közvetlenül ráadja a terhelést a próbatestekre; 2) oszcilláló keret, amely megvalósítja az oszcillálómozgást; 3) golyórögzítő egy beszerelt golyó próbatesttel; 4) vizsgált tárcsa próbatest [31]. | 15 |
| 5. ábra: Box-Benhken dizájn grafikus ábrázolása. A színes négyzetek sarokpontjai jelölik a mérési pontokat a vizsgált rendszerben.                                                                                                                                                                                                                   | 16 |
| 6. ábra: Golyó-kopásnyomról készült felvétel Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóppal. Az ábrán látható kopásnyom a Group III 4 cSt + 0,7 wt% titán-dioxid (TiO <sub>2</sub> ) kenőolajmintához tartozik, 190 N terhelés és 100 °C hőmérséklet beállításokon.                                                                                        | 19 |
| 7. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                      | 21 |
| 8. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                                                              | 22 |
| 9. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) értékek válaszoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                                                               | 22 |
| 10. ábra: Tapadási súrlódási együttható (COF) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                   | 23 |
| 11. ábra: Tapadási súrlódási együttható (COF) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                                                           | 24 |
| 12. ábra: Súrlódási abszolút integrál (FAI) értékek válaszoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                                                              | 24 |
| 13. ábra: Golyó-kopásátmérő (WSD) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                               | 25 |
| 14. ábra: Golyó-kopásátmérő (WSD) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                                                                       | 26 |
| 15. ábra: Golyó-kopásátmérő (WSD) értékek válaszoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén.                                                                                                                                                                                        | 26 |

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 16. ábra: Tárcsa-kopástérfogat (WV) értékre ható vizsgált faktorok egységesített hatásának Pareto-elemzése egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén .....          | 27 |
| 17. ábra: Tárcsa-kopástérfogat (WV) érték válaszfelület-diagramjai egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén. ....                                                  | 28 |
| 18. ábra: Tárcsa-kopástérfogat (WV) értékek válaszoptimalizációja egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén. ....                                                   | 29 |
| 19. ábra: Szoftveresen meghatározott optimumpont, kopási értékek minimalizálásának céljából, a vizsgált faktorokkal, egy felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolaj esetén..... | 30 |

## Táblázatok jegyzéke

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. táblázat: Box-Benhken dizájnnal megtervezett mérések.....                                                                                                                                 | 17 |
| 2. táblázat: Felhasznált próbatestek méret- és anyagjellemzői.....                                                                                                                           | 18 |
| 3. táblázat: Szoftveresen becsült és valós, validált eredmények összehasonlítása<br>felületmódosított, nanoméretű titán-dioxiddal adalékolt Group III 4 cSt bázisolajminták esetén.<br>..... | 31 |

## Rövidítések és szimbólumok jegyzéke

|                               |   |                                 |
|-------------------------------|---|---------------------------------|
| BBD                           | – | Box-Benhken dizájn              |
| COF                           | – | tapadási súrlódási együttható   |
| CuO                           | – | réz(II)-oxid                    |
| d                             | – | kívánatossági érték             |
| DOE                           | – | Design of Experiments           |
| FAI                           | – | súrlódási abszolút integrál     |
| R <sub>a</sub>                | – | átlagos felületi érdesség       |
| s                             | – | lökethossz                      |
| TiO <sub>2</sub>              | – | titán-dioxid                    |
| WSD                           | – | golyó próbatest kopásátmérője   |
| WV                            | – | tárcsa próbatest kopástérfogata |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | – | ittrium(III)-oxid               |
| ZrO <sub>2</sub>              | – | cirkónium-dioxid                |
| μ                             | – | súrlódási együttható            |

## Irodalomjegyzék

- [1] S. Shahnazar, S. Bagheri, és S. B. Abd Hamid, „Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives”, *Int J Hydrogen Energy*, köt. 41, sz. 4, o. 3153–3170, jan. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.
- [2] G. Deng, H. Zhu, és A. K. Tieu, „Advances in Friction, Lubrication, Wear and Oxidation in Metals Manufacturing”, *Metals (Basel)*, köt. 13, sz. 3, o. 505, márc. 2023, doi: 10.3390/met13030505.
- [3] I. Dr. Valasek és M. Törös, *Tribológia*. Budapest: Képzőművészeti Kiadó, 2007.
- [4] Y. Z. N. Htwe, Aws. S. Al-Janabi, Y. Wadzer, és H. Mamat, „Review of tribological properties of nanoparticle-based lubricants and their hybrids and composites”, *Friction*, köt. 12, sz. 4, o. 569–590, ápr. 2024, doi: 10.1007/s40544-023-0774-2.
- [5] V. N. Bakunin, A. Yu. Suslov, G. N. Kuzmina, O. P. Parenago, és A. V. Topchiev, „Synthesis and Application of Inorganic Nanoparticles as Lubricant Components – a Review”, *Journal of Nanoparticle Research*, köt. 6, sz. 2/3, o. 273–284, jún. 2004, doi: 10.1023/B:NANO.0000034720.79452.e3.
- [6] R. D’Amato, A. Ruggiero, P. Valašek, és N. Ungureanu, „Nano Particles as Lubricant Additive: A Concise Review”, 2021, o. 392–403. doi: 10.1007/978-3-030-71956-2\_33.
- [7] W. Dai, B. Kheireddin, H. Gao, és H. Liang, „Roles of nanoparticles in oil lubrication”, *Tribol Int*, köt. 102, o. 88–98, okt. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
- [8] Á. D. Tóth és T. Fodor, „Nanoméretű réz(II)-oxid kerámiareszecskékkel erősített kenőolaj tribológiai vizsgálata”, *Hadmérnök*, köt. 15, sz. 3, o. 75–92, 2020, doi: 10.32567/hm.2020.3.4.
- [9] A. Hernández Battez és mtsai., „CuO, ZrO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants”, *Wear*, köt. 265, sz. 3–4, o. 422–428, júl. 2008, doi: 10.1016/j.wear.2007.11.013.
- [10] L. K. Hudson, J. Eastoe, és P. J. Dowding, „Nanotechnology in action: Overbased nanodetergents as lubricant oil additives”, *Adv Colloid Interface Sci*, köt. 123–126, o. 425–431, nov. 2006, doi: 10.1016/j.cis.2006.05.003.
- [11] T. Veszprémi, *Általános kémia*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2008.
- [12] W. K. Shafí, A. Raina, és M. I. Ul Haq, „Friction and wear characteristics of vegetable oils using nanoparticles for sustainable lubrication”, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, köt. 12, sz. 1, o. 27–43, jan. 2018, doi: 10.1080/17515831.2018.1435343.
- [13] K. Holmberg és A. Erdemir, „Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions”, *Friction*, köt. 5, sz. 3, o. 263–284, szept. 2017, doi: 10.1007/s40544-017-0183-5.
- [14] F. T. Hong, A. Schneider, és S. M. Sarathy, „Enhanced lubrication by core-shell TiO<sub>2</sub> nanoparticles modified with gallic acid ester”, *Tribol Int*, köt. 146, o. 106263, jún. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106263.

- [15] Y. Choi és mtsai., „Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil”, *Current Applied Physics*, köt. 9, sz. 2, o. e124–e127, márc. 2009, doi: 10.1016/j.cap.2008.12.050.
- [16] J. Ma és M. Bai, „Effect of ZrO<sub>2</sub> Nanoparticles Additive on the Tribological Behavior of Multialkylated Cyclopentanes”, *Tribol Lett*, köt. 36, sz. 3, o. 191–198, dec. 2009, doi: 10.1007/s11249-009-9459-x.
- [17] Á. I. Szabó, M. Marsicki, és H. Hargitai, „Különböző oxid nanorészecskék hatásának vizsgálata olajozott alkatrészpár kopására és tribofilm összetételére”, in *XIV. Országos Anyagtudományi Konferencia*, Balatonalmádi, 2023.
- [18] X. Kang, S. Liu, Z. Dai, Y. He, X. Song, és Z. Tan, „Titanium Dioxide: From Engineering to Applications”, *Catalysts*, köt. 9, sz. 2, o. 191, febr. 2019, doi: 10.3390/catal9020191.
- [19] H. H. Patil, G. B. Pawar, P. V. Mali, Y. P. Ballal, és V. S. Gondkar, „Enhancement of tribological properties by adding titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles in mineral based SN-500 oil”, *Mater Today Proc*, köt. 59, o. 128–133, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.270.
- [20] V. Sharma, R. B. Timmons, A. Erdemir, és P. B. Aswath, „Interaction of plasma functionalized TiO<sub>2</sub> nanoparticles and ZDDP on friction and wear under boundary lubrication”, *Appl Surf Sci*, köt. 489, o. 372–383, szept. 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.05.359.
- [21] S. Singhal, R. Agarwal, R. Kumar, és R. K. Dwivedi, „Critical Review on Tribometers and Their Contact Mechanism”, in *Optimization of Industrial Systems*, Wiley, 2022, o. 217–225. doi: 10.1002/9781119755074.ch18.
- [22] J. K. Telford, „A Brief Introduction to Design of Experiments”, *Johns Hopkins APL Tech Dig*, köt. 27, sz. 3, o. 224–232, 2007.
- [23] B. Durakovic, „Design of experiments application, concepts, examples: State of the art”, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, köt. 5, sz. 3, dec. 2017, doi: 10.21533/pen.v5i3.145.
- [24] S. L. C. Ferreira és mtsai., „Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods”, *Anal Chim Acta*, köt. 597, sz. 2, o. 179–186, aug. 2007, doi: 10.1016/j.aca.2007.07.011.
- [25] B. N. G. Aliemeke, H. A. Okwudibe, A. I. Omoakhalen, és P. Major, „Box-Behnken optimization of pin-on-disc wear test process parameters”, *Nigerian Journal of Technology*, köt. 42, sz. 4, o. 464–471, febr. 2024, doi: 10.4314/njt.v42i4.6.
- [26] S. Sengottaiyan, S. Subbarayan, V. Viswanathan, és P. Pugazhendi, „Optimized machine learning with hyperparameter tuning and response surface methodology for predicting tribological performance in bio-composite materials”, *Polym Compos*, köt. 45, sz. 10, o. 9421–9439, júl. 2024, doi: 10.1002/pc.28418.
- [27] N. S. Sanoussi, M. Hammami, N. Feki, T. Belgasam, M. S. Abbes, és M. Haddar, „Utilizing design of experiments techniques to determine the optimal coefficient of

- friction in spur gears”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, köt. 238, sz. 5, o. 500–520, máj. 2024, doi: 10.1177/13506501231223073.
- [28] A. Borgaonkar és I. Syed, „Tribological Investigation of Composite MoS<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> Coating Material by Response Surface Methodology Approach”, *J Tribol*, köt. 144, sz. 3, márc. 2022, doi: 10.1115/1.4051225.
- [29] Á. D. Tóth, N. Mike-Kaszás, G. Bartus, H. Hargitai, és Á. I. Szabó, „Surface Modification of Silica Nanoparticles with Ethyl Oleate for the Purpose of Stabilizing Nanolubricants Used for Tribological Tests”, *Ceramics*, köt. 6, sz. 2, o. 980–993, ápr. 2023, doi: 10.3390/ceramics6020058.
- [30] Á. D. Tóth, Á. I. Szabó, és R. Kuti, „Tribological properties of nano-sized ZrO<sub>2</sub> ceramic particles in automotive lubricants”, *FME Transactions*, köt. 49, sz. 1, o. 36–43, 2021, doi: 10.5937/fme2101036T.
- [31] A. Lenart, P. Pawlus, S. Wos, és A. Dzierwa, „The Effect of Surface Texturing on Dry Gross Fretting”, *Lubricants*, köt. 6, sz. 4, o. 92, okt. 2018, doi: 10.3390/lubricants6040092.
- [32] International Organization for Standardization, „Lubricants — Determination of tribological quantities for oils and greases — Tribological test in the translatory oscillation apparatus (ISO 19291:2016)”, 2016.