

# **DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS**

**MESTER SÁNDOR**



Pannon Egyetem

2023

**Elektroreológiai és magnetoreológiai fluidumok szerkezete és mechatronikai alkalmazásai**

DOI:10.18136/PE.2023.846

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

**Mester Sándor**

okleveles mechatronikai mérnök

Témavezető:

**Dr. Szalai István**

egyetemi tanár

Készült a Pannon Egyetem

Vegyésszmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében

2023

**Elektroreológiai és magnetoreológiai fluidumok szerkezete és mechatronikai alkalmazásai**

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a  
Pannon Egyetem  
Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében  
Anyagtudományok és technológiák tudományágban

Írta: Mester Sándor

Témavezető: Dr. Szalai István

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
Dr. Szalai István  
témavezető

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: .....igen /nem

.....  
(bíráló)

Bíráló neve: .....igen /nem

.....  
(bíráló)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Veszprém, .....

.....  
(a Bíráló Bizottság elnöke)

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

Veszprém, .....

.....  
(az EDHT elnöke)

# Tartalomjegyzék

|       |                                                                                       |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Bevezetés.....                                                                        | 1  |
| 2.    | Irodalmi áttekintés.....                                                              | 2  |
| 2.1   | Elektroreológiai folyadékok .....                                                     | 2  |
| 2.1.1 | Elektroreológiai folyadékok összetevői .....                                          | 4  |
| 2.1.2 | Elektroreológiai folyadékok alkalmazásai .....                                        | 7  |
| 2.2   | Magnetoreológiai folyadékok.....                                                      | 10 |
| 2.2.1 | Magnetoreológiai folyadékok összetevői.....                                           | 11 |
| 2.2.2 | Magnetoreológiai folyadékok alkalmazási lehetőségei .....                             | 15 |
| 2.3   | Reológiai alapfogalmak.....                                                           | 16 |
| 2.3.1 | Viszkozitás hőmérsékletfüggése .....                                                  | 19 |
| 2.4   | Tengelykapcsolók.....                                                                 | 20 |
| 2.4.1 | Mechanikus tengelykapcsolók .....                                                     | 20 |
| 2.4.2 | Különleges tengelykapcsolók.....                                                      | 25 |
| 3.    | Elektroreológiai folyadékok részecskeláncaiban fellépő erők.....                      | 34 |
| 3.1   | Monodiszperz lánc.....                                                                | 34 |
| 3.2   | Bidiszperz lánc .....                                                                 | 40 |
| 3.2.1 | Bidiszperz lánc lokális elektromos erőtere .....                                      | 41 |
| 3.2.2 | Bidiszperz láncban ható erők .....                                                    | 44 |
| 3.2.3 | Dielektromos állandó változása bidiszperz láncokban .....                             | 49 |
| 3.3   | Összefoglalás .....                                                                   | 53 |
| 4.    | Hőmérsékletváltozás számítása elektroreológiai modell tengelykapcsolóban              | 54 |
| 4.1   | Anyagok és módszerek.....                                                             | 54 |
| 4.2   | Mérési eredmények és értékelésük.....                                                 | 55 |
| 4.3   | ER tengelykapcsoló modell melegedése .....                                            | 61 |
| 4.4   | Összefoglalás .....                                                                   | 67 |
| 5.    | Magnetoreológiai tengelykapcsolók nyomatékátviteli időállandójának meghatározása..... | 68 |
| 5.1   | Egytárcsás MR tengelykapcsoló vizsgálata.....                                         | 68 |
| 5.1.1 | A mérőrendszer felépítése.....                                                        | 68 |
| 5.1.2 | Anyagok és módszerek .....                                                            | 70 |
| 5.1.3 | Eredmények és értékelésük .....                                                       | 72 |
| 5.2   | Többtárcsás magnetoreológiai tengelykapcsoló vizsgálata.....                          | 75 |
| 5.2.1 | A mérőrendszer felépítése.....                                                        | 75 |
| 5.2.2 | Anyagok és módszerek .....                                                            | 81 |

|       |                                             |     |
|-------|---------------------------------------------|-----|
| 5.2.3 | Mérés eredmények és értékelésük.....        | 83  |
| 5.3   | Összefoglalás .....                         | 87  |
| 6.    | Tézisek .....                               | 88  |
| 7.    | Az értekezéshez kapcsolódó publikációk..... | 91  |
| 8.    | Irodalomjegyzék.....                        | 92  |
|       | Köszönetnyilvánítás .....                   | 103 |

## Jelölések és rövidítések jegyzéke

|                 |                                      |
|-----------------|--------------------------------------|
| $a$             | karakterisztikus távolság            |
| $A$             | felület, rámpameredekség             |
| $C$             | hőkapacitás                          |
| $E, E$          | elektromos térerősség                |
| $E_v$           | viszkózus energia                    |
| $\epsilon_0$    | vákuum permittivitása                |
| $\epsilon_A$    | ER folyadék permittivitás            |
| $\epsilon_f$    | folyadék dielektromos permittivitás  |
| $\epsilon_p$    | részecske dielektromos permittivitás |
| $F$             | erő                                  |
| $\dot{\gamma}$  | nyírási sebesség                     |
| $H$             | mágneses térerősség                  |
| $h$             | henger magasság                      |
| $K$             | erősítés                             |
| $L$             | hosszúság                            |
| $M$             | nyomaték                             |
| $N$             | részecskeszám                        |
| $n$             | fordulatszám                         |
| $\mathbf{p}, p$ | dipólusmomentum                      |
| $r$             | sugár                                |
| $s$             | réstávolság                          |
| $T$             | hőmérséklet                          |
| $V$             | térfogat                             |
| $x$             | móltört                              |
| $\Omega$        | relatív forgási sebesség             |
| $\alpha$        | polarizálhatóság                     |
| $\eta$          | viszkozitás                          |
| $\eta$          | dinamikai viszkozitás                |
| $\theta$        | tehetetlenségi nyomaték              |
| $\rho$          | sűrűség                              |
| $\sigma$        | részecske átmérő                     |
| $\tau$          | nyírófeszültség                      |
| $\omega$        | forgási sebesség                     |
| $\phi$          | koncentráció                         |
| $\zeta_3$       | Riemann-féle $\zeta$ -függvény       |
| $*$             | redukált egység                      |
| $\wedge$        | redukált egység                      |
| $\sim$          | redukált egység                      |

## Kivonat

A dolgozat az intelligens anyagok kettő csoportjával, az elektorreológiai és magnetoreológiai folyadékokkal és azok gyakorlati felhasználásával foglalkozik. A reológiai tulajdonságaikat külső elektromos vagy mágneses térben megváltoztató folyadékok széles körben felhasználhatók. Az értekezésben három fejezetben ismertetem a kutatások eredményeit.

Az első témakör az elektorreológiai folyadékok láncokban ható erőkkel foglalkozik, ami a gyakorlati felhasználások szempontjából lényegesek. Az elméleti kutatás során megvizsgáltam a végtelen monodiszperz láncban ható erőket, majd zárt formulát adtam a monodiszperz véges láncban, valamint a bidiszperz véges és végtelen láncokban ható erőkre. Levezettem bidiszperz lánc esetén a láncban lévő helyi térerősségeket, valamint vizsgáltam a dielektromos állandó változását a bidiszperz láncokban.

A második fejezetben az elektorreológiai folyadékok hőmérséklet-emelkedésének viszkozításra gyakorolt hatását kutattam. Reométeren végzett mérések alapján az Andrade egyenlet módosításával új összefüggést adtam, mely leírja az elektorreológiai folyadékok viszkozitásának változását a hőmérséklet és az elektromos térerősség függvényében. A formulát egy elektorreológiai tengelykapcsoló melegedésének matematikai modelljén vizsgáltam.

A harmadik téma a magnetoreológiai tengelykapcsolók nyomatékátviteli időállandójának vizsgálata. Egytárcsás és többtárcsás tengelykapcsolók tervezése és építése után az egytárcsás tengelykapcsolónál egységugrás gerjesztéssel vizsgáltam az időállandót, és a matematikai modellje alapján összefüggést adtam a leírására. Többtárcsás tengelykapcsoló esetén rámpafüggvény gerjesztés hatását vizsgáltam. A kutatás célja az időállandók leírása volt a mágneses tér függvényében, hogy a gyakorlati felhasználáskor pontosabban lehessen irányítani.

## **Abstract**

The thesis focuses on two groups of intelligent materials, electrorheological and magnetorheological fluids, and their practical use. Fluids that change their rheological properties in an external electric or magnetic field can be used widely. In the dissertation, I present the results of the research in three chapters.

The first topic concentrates on the forces acting in chains of electrorheological fluids which are essential to the practical uses. During the theoretical research, I examined the forces acting in an infinite monodisperse chain, and gave a closed formula for the forces acting in a monodisperse finite chain, as well as in bidisperse finite and infinite chains. In the case of a bidisperse chain, I derived the local field strengths in the chain, as well as investigated the change of the dielectric constant in the bidisperse chains.

In the second chapter, the effect of heating electrorheological fluids on viscosity was researched. On the basis of measurements carried out on a rheometer, I gave a relation that describes the change in viscosity of electrorheological fluids as a function of temperature and electric field strength by expanding the Andrade equation. I tested the formula on a mathematical model of the heating of an electrorheological clutch.

The third topic is the examination of the torque transmission time constant of magnetorheological couplings. After the design and construction of a single-disc and a multi-disc clutch, I examined the time constant of the single-disc clutch with unit step function excitation, and based on the mathematical model of the clutch I gave a correlation for the time constant. In the case of a multi-disc clutch, I investigated the effect of ramp function excitation. The aim of the research was to describe the time constants as a function of the magnetic field, so that it can be controlled more precisely during practical use.

## **Astratto**

La tesi affronta due gruppi di materiali intelligenti, fluidi elettroreologici e magnetoreologici, e il loro uso pratico. I fluidi che cambiano le loro proprietà reologiche in un campo elettrico o magnetico esterno possono essere ampiamente utilizzati. Nella tesi presento i risultati della ricerca in tre capitoli.

Il primo argomento riguarda le forze che agiscono in catene di fluidi elettroreologici. essenziali dal punto di vista degli usi pratici. Durante la ricerca teorica, ho esaminato le forze che agiscono in una catena monodispersa infinita, quindi ho fornito una formula chiusa per le forze che agiscono in una catena finita monodispersa, nonché in catene finite e infinite bidisperse. Nel caso di una catena bidispersa, ho derivato le intensità di campo locali nella catena e ho studiato il cambiamento della costante dielettrica nelle catene bidisperse.

Nel secondo capitolo, ho studiato l'effetto del riscaldamento dei fluidi elettroreologici sulla viscosità. Sulla base di misurazioni effettuate su un reometro, espandendo l'equazione di Andrade, ho fornito una relazione che descrive la variazione della viscosità dei fluidi elettroreologici in funzione della temperatura e dell'intensità del campo elettrico. Ho testato la formula su un modello matematico del riscaldamento di una frizione elettroreologica.

Il terzo argomento è l'esame della costante di tempo di trasmissione della coppia degli accoppiamenti magnetoreologici. Dopo la progettazione e la costruzione di frizioni a disco singolo e multi-disco, ho esaminato la costante di tempo della frizione a disco singolo con eccitazione a salto unitario e, sulla base del suo modello matematico, ho fornito una relazione per la sua descrizione. Nel caso di una frizione multidisco, ho studiato l'effetto dell'eccitazione della funzione di rampa. Lo scopo della ricerca è stato quello di descrivere le costanti di tempo in funzione del campo magnetico, in modo che possa essere controllato con maggiore precisione durante l'uso pratico.

## 1. Bevezetés

Az intelligens, vagy adaptív anyagok az anyagok olyan csoportját alkotják, melyek előre meghatározható módon megváltoztatják egyes tulajdonságaikat megfelelő külső hatásra [1]. Az ilyen anyagok többek között felhasználhatók érzékelési és információátviteli feladatokra, valamint aktuátorként is. Az intelligens anyagok fejlődése az utóbbi évtizedekben drasztikusan felgyorsult, az alakjukat visszanyerő ötvözetektől a piezoelektromos tulajdonságokat mutató anyagokig sok témában zajlanak a kutatások.

A lágy intelligens anyagok közé tartoznak az elektorreológiai [ER] és magnetorreológiai [MR] folyadékok, melyek viszkozitási tulajdonságaikat változtatják meg külső hatásra. Az ER és MR folyadékok gyakorlati alkalmazásaik miatt egyre inkább elterjedtebbé váltak a tudományos világban, újabb és újabb kutatási témákat feltárva. A dolgozat témájául szolgált az ER folyadékok láncokban fellépő kölcsönhatások vizsgálata, valamint a nyírt folyadékok melegezésének leírása is. A dolgozat elsődleges célja az ER és MR folyadékok nyomtatékátviteli tulajdonságainak vizsgálata volt gyakorlati úton, vizsgálva az alkalmazhatóságot befolyásoló környezeti tényezők hatásait. A tengelykapcsolók létrehozásának motivációjul szolgált, hogy különböző folyadékok nyomtatékátvitelének tanulmányozásán kívül az ipari felhasználásban is teret nyerő hasonló eszközök tulajdonságainak vizsgálatát lehet elvégezni.

Az dolgozat először az irodalmi áttekintést taglalja, mely érinti az elektorreológiai és magnetorreológiai folyadékok, a reológia alapjainak, valamint a tengelykapcsolók témakörét. A harmadik fejezetben bemutatásra kerülnek az elméleti kutatás az elektorreológiai folyadékok részecskeláncokban ható erőkre vonatkozó formulák véges és végtelen láncok esetére is. A negyedik fejezet tartalmazza az elektorreológiai folyadékok viszkozitásának hőmérsékletfüggésére vonatkozó kutatást, és a viszkozitás leírására szolgáló kiterjesztett összefüggést. Az ötödik fejezet foglalkozik végül a saját tervezésű magnetorreológiai tengelykapcsolókkal és nyomtatékátviteli időállandóikkal vizsgálatával. Az időállandók vizsgálatát több gerjesztéstípus (egységugrás, rámpafüggvény) esetén is bemutatom. A disszertáció az eredmények tézisszerű összefoglalásával és az irodalomjegyzékkel zárul.

## 2. Irodalmi áttekintés

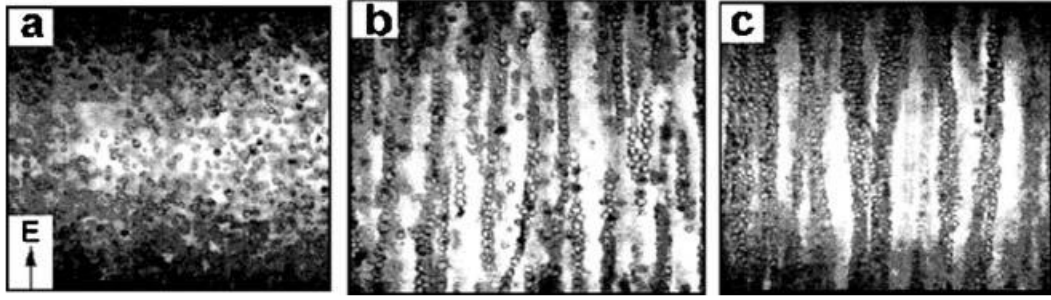
### 2.1 Elektorreológiai folyadékok

Számos anyag és kompozit esetén megfigyelhető, hogy viszkozitási tulajdonságai megváltoznak külső elektromos tér jelenlétében. Az ilyen hatásokat összefoglalóan elektroviszkózus effektusoknak nevezik [2]. Erre példa a viszkoelektromos hatás, mely esetén poláros, nem vezető folyadéknak megnövekszik a viszkozitása elektromos tér hatására.

A viszkozitás növekedése többszörös lehet szuszpenziók esetén. A kis dielektromos permittivitású folyadékban nagyobb permittivitású részecskék diszpergálásával létrehozott elektorreológiai [ER] folyadékokat Winslow írta le először 1949-ben [3]. Ezen folyadékok esetén a viszkozitás megváltozása a diszperzió szerkezeti átalakulásából következik. Megfigyelhető, hogy az elektromos tér hatására a részecskék párokba tömörülnek, majd láncokat, oszlopos szerkezetet alkotnak (2.1. ábra). A hatás reverzibilis [4]. A gyors átalakulási sebesség sokoldalú felhasználást tesz lehetővé, többek között lengéscsillapítókban, épületek rezgéscsillapításánál, tengelykapcsolóként és polírozási anyagként is voltak próbálkozások a felhasználásra.

Az elektorreológiai folyadékok elkülöníthető fajtáját alkotják az óriás hatású ER folyadékok, melyet Wen és munkatársai hoztak létre [5]. Ezeknél a részecskék felszínét poláros molekulákkal vonják be, így a hagyományos ER folyadékokhoz képest nagyobb folyáshatárral rendelkeznek.

Az elektorreológiai kutatások első tárgya a ER folyadék volt, de az elektorreológiai elasztomerek is előtérbe kerültek. Ezek olyan anyagok, melyek az ER folyadékokhoz hasonlóan elektromos tér hatására megváltoztatják viszkoelasztikus tulajdonságaikat [6]. A folyadékokhoz képest az elasztomerek esetén az olyan negatív tulajdonságok, mint például a kiüledés a halmazállapot miatt nem lépnek fel. Az ER elasztomerek diszpergálószerkezet és adalékokat is tartalmaznak, melyek nagyban befolyásolják tulajdonságaikat. Felhasználásukat a kis mértékű ER hatás, a stabilitásuk és hőmérsékletfüggésük behatárolja. [7]



2.1. ábra ER folyadék növekvő elektromos tér jelenlétében a)  $E = 0$  V/mm;  
b)  $E = 500$  V/mm; c)  $E = 900$  V/mm [8]

A hatás leírására több magyarázatot is alkottak, melyek közül a legelfogadottabb a polarizációs modell, [9] melyet az első kísérleti vizsgálat alapján állítottak fel. Feltételezi, hogy a diszpergált részecskéknél nincs töltésük, így a párok, és a további rendszer kialakulását a részecskék indukált dipólusmomentumából adódó kölcsönhatással magyarázza. Az indukált dipólusmomentum nagysága függ a diszpergált fázis és az alapfolyadék permittivitásától, a részecske méretétől, és a térerősség nagyságától. [10] A láncok az elektromos tér irányába állnak be. A viszkozitás látszólagos növekedése a kialakult rendszer deformitásából ered: az oszlopos szerkezet ellenáll a nyíró hatásoknak, így nagyobb munkát kell befektetni az deformálásukhoz vagy elszakításukhoz. A részecskék között az indukált dipólusmomentumot a

$$p = 4\pi\epsilon_0\epsilon_f r^3 E \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f} \quad (2.1)$$

egyenlet írja le, ahol  $E$  az elektromos térerősség,  $r$  a részecskék sugara,  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_f$ ,  $\epsilon_p$  pedig rendre a vákuum, a folyadék és a részecskék permittivitása.

A létrehozott többi elmélet közé sorolható az láncelméleti modell [3], az elektromos kettősréteg modell [11], a víz híd modell [12]. Ezek a korábbi elméletek egyes tulajdonságokat (pl. láncosodás) nem tudják magyarázni, a fent említett polarizációs modell, illetve a felszíni szaturáció polarizációs modellek az elfogadottabbak. Ez utóbbit az óriás hatású ER effektus leírására adták. Az elmélet szerint a poláros molekulák a részecskék felszínén véletlenszerűen helyezkednek el, dipólusaik nem rendeződnek. A külső tér hatásakor a részecskék láncokba szerveződnek, és a poláros molekulák dipólusmomentumaikkal beállnak a tér irányába. Ekkor a részecskék dipólus-dipólus kölcsönhatása mellett a molekulák és részecskék közötti kölcsönhatás is fellép, ez utóbbi felelős a nagy folyáshatárért [13,14].

### 2.1.1 Elektorreológiai folyadékok összetevői

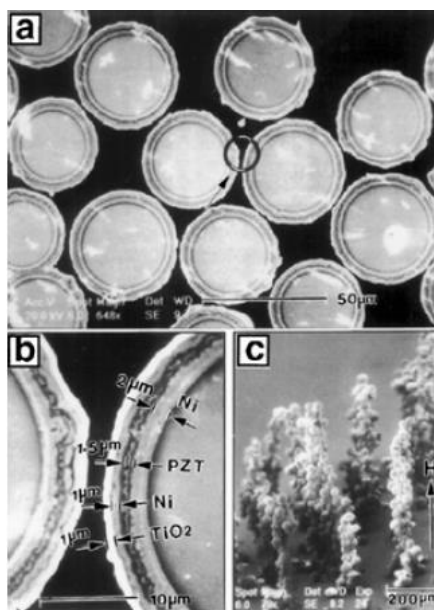
Az elektorreológiai folyadékok alapvetően egy hordozóanyagból, és egy diszpergált fázisból állnak, valamint adalékanyagokat is tartalmazhatnak. A különböző összetevőknél az alapfeltétel, hogy a két fő fázis permittivitása eltérjen egymástól, így nagyobb lesz az ER hatás.

#### 2.1.1.1 Diszpergált fázis

A diszpergált fázis mind folyadék, mind szilárd anyag lehet, de ez előbbi a kisebb ER hatás és magas költsége miatt nem annyira elterjedt. A diszpergált fázisnak magas dielektromos permittivitással kell rendelkeznie, alacsony vezetőképességgel, elfogadható sűrűséggel (a kiülepedés minél nagyobb elkerülésére), és megfelelő kémiai tulajdonságokkal (a többi fázissal ne lépjen reakcióba) ahhoz, hogy megfelelő elektorreológiai folyadékot hozzanak létre. Gyakran alkalmazott anyagtípusok a szigetelő szerves és vezetőszerű anyagok, polimerek és biopolimerek, valamint a folyékony kristályok [15]. A különböző anyagok tulajdonságait hőkezeléssel, felszínmodifikálással vagy bekapszulázással igyekeznek javítani az ER hatás növelése érdekében [16]. A részecskék átlagos átmérője 0,1 – 100  $\mu\text{m}$ .

A felsorolt anyagcsoportok közül a leggyakrabban szerves, fém-vegyületeket alkalmaznak. Ezek között lényegesek az oxidok (pl.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  stb.), a nitridek (pl.  $\text{AlN}$ ,  $\text{BN}$ ) és az Al-szilikátok [8,16], illetve . A fém-vegyületek jó ER hatást mutatnak, hátrányuk viszonylag magas sűrűségükben rejlik, valamint a keménységük okozta abrazív hatásban, melyet a berendezésekre gyakorolnak. Az újabb kutatások során dimetil-polisziloxán folyékony fázis mellett nanoszemcsés gyémántot is alkalmaztak [17]. Az vegyületek mellett kompozit anyagokat (2.2. ábra) is kutatnak részecskeként: Qiu és munkatársai  $\text{TiO}_2$  részecskéket ágyaztak szén nanoklaszterekbe [18].

A szerves anyagok és polimerek jobban diszpergálhatók az alapfolyadékban, ugyanakkor kisebb ER hatást mutatnak. Két nagy csoportjuk a  $\pi$ -kötést tartalmazó polimerek, és a polarizálható csoportokat tartalmazó anyagok (pl. hidroxilok). Ez előbbihez tartozó anyagok pl. a polianilin, a polipirrol és a politiofén [15]. A polimer anyagok előnye, hogy változtatható a vezetőségük pl. a karbonizálási hőmérséklettel. Ezek hátránya, hogy hajlamosak az agglomerációra, kezelhető a felületükre juttatott szigetelő szerves vegyületekkel, vagy szerves és szervetlen vegyületekkel való társítással.



2.2. ábra Kompozit ER részecskék keresztmetszete pásztázó elektronmikroszóp felvételen [8]

A diszpergált fázis típusán kívül annak mennyisége is döntően befolyásolja a diszperzió viselkedését és tulajdonságait. A részecskék arányának növelésével azok távolsága is csökken a folyadékban, így tér hatására nagyobb eséllyel alakul ki az oszlopos szerkezet, így nagyobb lesz a látszólagos viszkozitás-változás is [19]. A részecskék száma ugyanakkor nem növeli a folyáshatárt és viszkozitást korlátlanul, telítés figyelhető meg a diszpergált fázis koncentrációjának növelésével, és néhány esetben rosszabb ER hatás is megfigyelhető magasabb koncentrációnál. A legtöbb esetben a 10-40 m/m % a részecskék maximális aránya [20].

A részecskék alakja szintén képes befolyásolni a létrehozott ER hatást. Az alapvetően szimmetrikus geometriájú, gömb alakot közelítő részecskék mellett rúd alakú részecskéket is vizsgálnak [21,22]. A rúd alakú részecskék nagyobb relaxációs időt mutattak a vizsgálatok során. A különböző alakú részecskék keverését tanulmányozták Yoon és munkatársai, melynek során magasabb ER hatást tapasztaltak, mint az egy alakú részecskét tartalmazó folyadékok esetén [23]. A hatást Wu és munkatársai még tovább növelték hosszúkás mikrométer és szabálytalan alakú nanométer nagyságrendű részecskék alkalmazásával [24].

#### 2.1.1.2 Folytonos (folyadék) fázis

A folytonos fázis az alapfolyadék, melyben a diszpergált fázist eloszlatják. Ideális esetben a fázisnak a következő tulajdonságokkal kell rendelkeznie [25]:

- alacsony illékonyság
- nagy kémiai stabilitás
- magas forráspont
- alacsony fagyáspont
- alacsony viszkozitás
- a diszpergált fázishoz közeli sűrűség.

Amennyiben a diszpergált fázis és az alapfolyadék sűrűsége megegyezik, előbbi nem ülepedik ki, azonban idáig a kutatók nem találtak megfelelően nagy sűrűségű folyadékot [26]. A folytonos fázis lehet egykomponensű vagy többkomponensű.

Az egy fázisú folyadékok közül a legelterjedtebben a polidimetil-sziloxánt (PDMS) (szilikonolajat) használják. A magas átütési szilárdsággal rendelkező anyag jó viszkozitási tulajdonságokkal rendelkezik. A szilikonolajokon belül az ER hatást tovább befolyásolja az olaj kiálló végcsoport típusa [26]. A szilikonolajon kívül ásványi és növényi olajokat használnak még alapfolyadékként.

Az ER effektus növelhető továbbá, ha a diszpergált és a folytonos fázis közötti nedvesítés nagy. Ellenkező esetben a szilárd és folyékony fázisok szétválása figyelhető meg, ami a nagyobb tér nélküli alap viszkozitási érték miatt kisebb ER hatást mutat [27,28].

A különböző egyfázisú alapfolyadékok alkalmazása általában az ER folyadék csak egy aspektusát képes befolyásolni, pl. alacsony viszkozitású szilikonolaj használata esetén az elektreológiai folyadék alapviszkozitása is alacsony lesz, de a kiülepedés növekszik. A több komponensből álló folyékony fázis így a legújabb kutatások tárgya. Alkán és szilikonolaj keverésével létrehoztak óriás hatású ER folyadékot, melynek az alap viszkozitása nagyon alacsony, és az ER effektusa kiemelkedő [25].

#### 2.1.1.3 Adalékanyagok

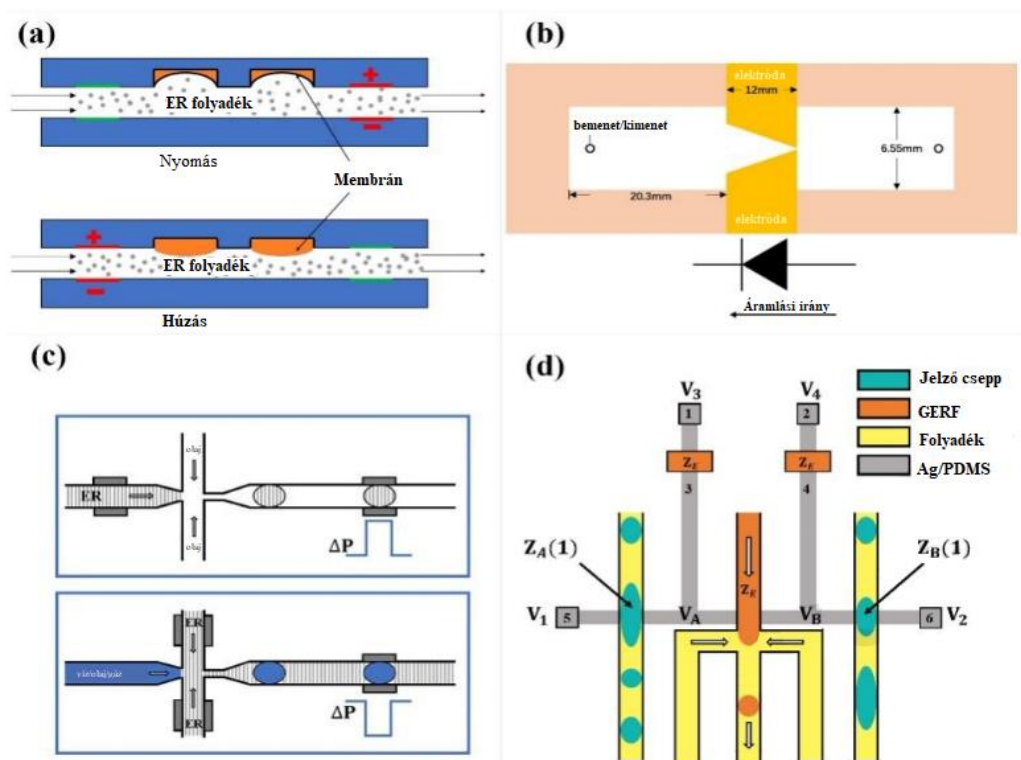
Már kis mennyiségű adalékanyagok hozzáadásával is az ER folyadékok tulajdonságai megváltoztathatók, javíthatók, pl. a folyadék stabilitása vagy a két fő fázis nedvesítése. Sok esetben alkalmaznak felületaktív (poláros vagy ionos) anyagokat. A felületaktív anyagok a diszpergált részecskék felületéhez kötődnek, így megváltoztatva annak

vezetőképességét, polarizálhatóságát. Az adalékanyagok befolyása odáig terjedhet, hogy a korábban ER effektust nem mutató folyadék esetén is nagy folyáshatár érhető el elektromos tér hatására [29].

### **2.1.2 Elektroreológiai folyadékok alkalmazásai**

Az elektroreológiai folyadékok felhasználása azon tulajdonságukon alapszik, hogy külső elektromos térrel reverzibilisen változtatható a látszólagos viszkozitásuk. Az egyik javasolt felhasználási terület a kémiai és biológiai területre vonatkozott, ahol a hatóanyagok célba juttatása és helyben tartása lehet cél. A mikrofluidika területén két mód van az ER folyadékok felhasználására: érintkezés mentes módon, ahol a kontrollált folyadékot és az ER folyadékot egy vékony membrán választja el egymástól, és az érintkezésszerű mód, ahol az irányított folyadék és az ER folyadék azonos csatornán keresztül áramlik [26]. A felhasználási módokat a 2.3. ábra mutatja: az a) ábrán érintkezésmentes mód membránnal, a b) ábrán egyenirányító működés (dióda), a c) ábrán érintkezésszerű módon felhasznált cseppek általi irányítás, a d) ábrán ER folyadék cseppekkel megvalósított logikai kapu látható. Az ilyen irányú felhasználás során a folyadék széles skálájú térfogatára irányítható, az egyes cseppektől a teljes folyadékáramig, így létrehozhatók szelepek, logikai kapuk, egyenirányítók és keverőmechanizmusok is.

Niu és munkatársai óriás hatású ER folyadékkal működő mikroszelepet hoztak létre az áramlás irányítására, mely két pár elektródával rendelkezett [30]. Az ER folyadékot és az irányított folyadékot egy membrán választotta el egymástól. Az első elektródapárra kapcsolt elektromos erőter aktiválásakor a membrán alakváltozást szenvedett el, mely elzárta a kontrollált folyadék útját, részben vagy teljesen megakadályozva az áramlását. A másik elektródapár működtetésével a membrán kitágul, így engedve szabad folyást.



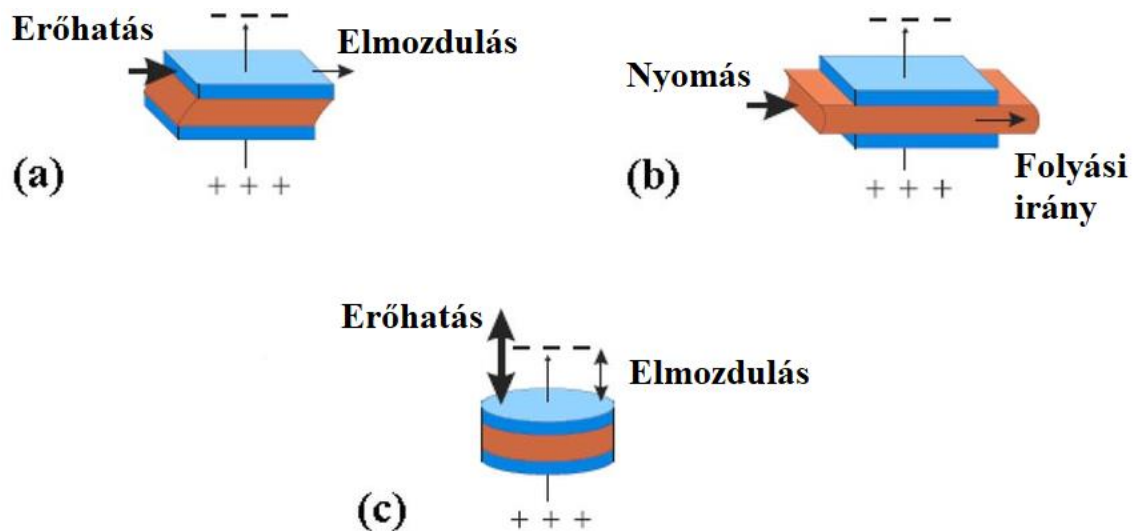
2.3. ábra Óriás hatású ER folyadék alkalmazásai a) Membrán irányítása b) Egyenirányítás

c) Intelligens folyadék irányítása d) Logikai kapu [26]

Három mikroszelep összekapcsolásával Liu és mtsai óriás hatású ER folyadékkal működő mikropumpát hoztak létre. A három szelep egyesével történő bekapcsolásakor az ahhoz tartozó membrán megfeszül, így irányítható az áramlás. [31]

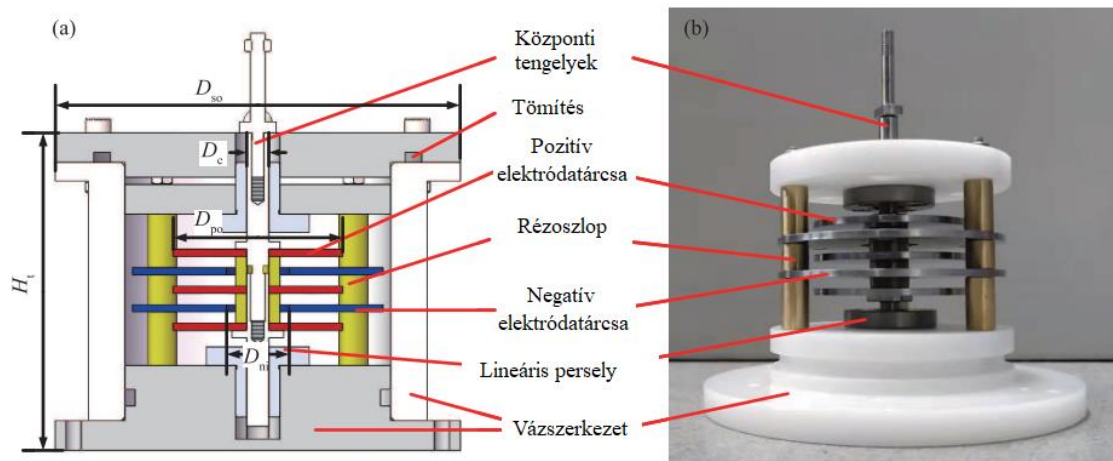
A mikrofluidika területén sok esetben gondot okoz a folyadékok lamináris áramlása, ami a keveredést akadályozza. Ennek kiküszöbölésére hoztak létre Niu és munkatársai mikrokeverőt, mely mikrofluidikai chipben képes megfelelően keverni az összetevőket. A keverő mozgását ER folyadékkal biztosítják, mely a tér be- és kikapcsolásával oszcillál. [32]

A viszkozitás változtathatóságát sok esetben nyomatékátvitelre alkalmas eszközök, fékek, lengéscsillapítók felfüggesztések működéséhez használják fel. Az ER folyadékoknak három alapvető technikai felhasználási módját állapították meg: azt, melynél a folyadék felületek közötti nyírása valósul meg; amelyiknél a folyadék szelep módján működtetve az áramlást befolyásolja, és amely esetben a folyadékot összenyomásnak teszik ki (2.4. ábra).



2.4. ábra Az ER folyadék alapvető technikai felhasználási módjai [33]

A lengéscsillapítók kutatásában három terület emelkedik ki: a szerkezeti tervezés, az irányítási algoritmusok vizsgálata, és a matematikai modellek alkotása. A lengéscsillapítók felépítése és teljesítménye is nagyban növekedett az óriás hatású ER effektus felfedezésével. Pu és munkatársai óriás hatású ER folyadékkal működő, többtárcsás lengéscsillapítót terveztek és építettek, mely összenyomásos módon alkalmazza a folyadékot (2.5. ábra) [34]. Az ER lengéscsillapítók használata a gépiparban és az autópár területén merült fel.



2.5. ábra Többtárcsás GER lengéscsillapító [34]

Az elektreológiai folyadékok, felhasználva azok tulajdonságait alkalmasak felületek megmunkálására, melyet először Kuriyagawa és munkatársa javasoltak [35]. Az ER folyadékhoz abrazív részecskéket keverve nem szabályos felületek is megmunkálhatók, és a felületi minőség kiváló lehet. E két oknál fogva az eljárást főleg aszférikus lencsék

öntőformáinak végmegmunkálására (finiselés) alkalmazzák [36]. Az eljárás kombinálása szikraforgácsolással az elektronikai iparban alkalmazott öntőformák kialakítása miatt merült fel [37]. Tsai és munkatársai munkájuk során bizonyították, hogy ER folyadék alkalmazása során is létrejön a szikraforgácsolási megmunkálás, valamint az alumínium-oxid abrazív szemcsék alkalmazása miatt jobb felületi minőség érhető el, mint hagyományos szikraforgácsolásnál.

Az elektoreológiai folyadékok hátrányai, az ülepedés és a tömítés igénye javíthatók, ha gél formájában alkalmazzuk őket. Aoyama aerosztatikus csúszkához fejlesztett ER gél alapú megfogót [38]. Az ER gélben a hatást kiváltó részecskék a gél sejtjeibe zárva nem képesek az ülepedésre. Az elektromos tér bekapcsolásakor a sejtek rugalmasan alakváltoznak, így alakulhatnak ki a láncok.

## 2.2 Magnetoreológiai folyadékok

A magnetoreológiai (MR) folyadékok az elektoreológiai folyadékokhoz sok tulajdonságban és felhasználási módban hasonlítanak. A magnetoreológiai folyadékok is az intelligens anyagok közé tartoznak, melyeknek különleges tulajdonsága, hogy külső mágneses tér hatására megváltoztatják reológiai tulajdonságaikat [39]. A MR folyadékokról és első felhasználási módjukról Jacob Rabinow [40] publikált, ahol MR folyadékkal működő tengelykapcsolókat ismertetett. A magnetoreológiai folyadékok lágymágneses, mikrométeres átmérővel rendelkező részecskék folyadékba való diszpergálásával készülnek [41]. A részecskék méretükből adódóan nem monodoménus szerkezetűek, azaz több mágneses doménnel rendelkeznek, így önálló mágneses dipólusmomentummal nem rendelkeznek. Külső mágneses tér hiányában az MR folyadék newtoni folyadékként viselkedik. A külső tér bekapcsolásakor – hasonlóan az ER folyadékokhoz – a részecskékeknek mágneses dipólusmomentumuk indukálódik, és párokat, majd láncokat és oszlopszerű szerkezeteket alkotnak, ami megváltoztatja a folyadék viszkozitását [42]. A hatás itt is reverzibilis, nagysága függ az MR folyadék alkotóitól és az alkalmazott mágneses térerősségtől. Az MR folyadékok esetén a legnagyobb gondot az ülepedés jelenti. Az ülepedés a részecskék nagyságából adódóan a rájuk ható gravitációs erőből és a hordozófolyadékhoz képesti eltérő sűrűségükből ered [43]. A folyadék folyáshatára elérheti a 100 kPa-t [44], mely lehetővé teszi alkalmazását többek között lengéscsillapítókban (épületek, szerszámgépek és az autóipar területén is), tengelykapcsolókban, fékekben, orvosi területeken és felületi megmunkálásnál [45–49]. Vizsgálják továbbá alkalmazhatóságukat folyadék kenőréteggént is. A folyadék

kenőréteg vastagsága növekedésével növeli a kopást és az energiadisszipációt, ezért a vastagság csökkentése elsődlegesen kutatott téma az utóbbi években, a folyadékréteg vastagságának irányítását vizsgálták MR folyadékokat felhasználva [50].

A magnetoreológiai folyadékokhoz hasonlóak a ferrokolloidok, vagy mágneses folyadékok. A ferrokolloidok esetén, ellentétben az MR folyadékokkal, a diszpergált részecskék nanométer nagyságrendűek, ami miatt a gravitációs erőt a Brown-mozgás ellensúlyozza, így ülepedésmentes folyadék alkotható. A részecskék mérete a mágneses tulajdonságaikra is hatással van: a részecskék monodoménes szerkezetűek, állandó mágneses dipólusmomentummal rendelkeznek. [51,52] Ebből következően a látszólagos viszkozitásváltozás mértéke is jóval kisebb, mint az MR folyadékok esetében. A mágneses folyadékok is hajlamosak az aggregációra, így a részecskék felszínét általában felületaktív anyaggal vonják be, mely megakadályozza a részecskék összetapadását [52].

### **2.2.1 Magnetoreológiai folyadékok összetevői**

A magnetoreológiai folyadékok az alapfolyadékból, vagy folyékony fázisból, a benne diszpergált részecskékből, vagy diszpergált fázisból, és adalékanyagokból állnak, hasonlóan az elektromagnetoreológiai folyadékokhoz. Az adalékanyagok főleg a részecskék kiülepedését, és a részecskék agglomerációját hivatottak megakadályozni. A lágymágneses részecskék nem állhatnak össze nagyobb részeket alkotva, mivel így a gyorsulna a kiülepedés, a rendszer stabilitása megszűnne. Ebből következik, hogy az ER folyadékokkal ellentétben, ahol felületaktív, vagy más adalékanyag nélkül is lehet egyszerű folyadékot létrehozni, a legegyszerűbb, szilikonolajat és mágneses részecskét tartalmazó MR folyadékhoz is adnak felületaktív anyagot [53]. A felületaktív anyagot a mágneses részecskék hozzáadása előtt legjobb a hordozófolyadékhoz adagolni.

#### **2.2.1.1 Diszpergált fázis**

A MR folyadékokhoz mágnesesizelő anyagokat alkalmaznak diszpergált fázisként, például vas-kobalt ötvözetet, nikkel-cink ötvözetet, vas-polimer kompozitot vagy kerámia alapú kompozitokat [54]. A paramágneses anyagok, mint például a króm-dioxid és a magnetit alkalmazására is van példa [55]. A legnagyobb szaturációs mágnesesizettség a karbonil-vas és ötvözeinek alkalmazásával érhető el, melyet vas-pentakarbonil bontásával állítanak elő [56]. A karbonil-vas egyik hátránya, hogy az alapfolyadékhoz képest nagyon eltérő a sűrűsége, ami a részecskék agglomerációjához vezet. Az összetapadt részecskék szétválasztása nehézkes, ezért adalékanyagok szükségesek a stabilitás megőrzéséhez [57]. Cink-oxid bevonat alkalmazása a karbonil-vason tovább

növeli a folyadék stabilitását. Az azonos méretű részecskék mellett a polidiszperz adalékok alkalmazása is aktív kutatások tárgya [58].

A tömör részecskék mellett üreges részecskék készítésére és vizsgálatára is találhatunk példát. Pei és munkatársai üreges vas-oxid részecskék átmérőjének és falvastagságának hatását vizsgálták szimulációval, majd azt követően kísérleti munkával, megállapították az optimális értékeket a legmagasabb MR hatás érdekében [59].

Csakúgy, mint az ER folyadékoknál a részecskék alakja itt is meghatározó lehet. A gömb alakú részecskék az alkalmazott eszközöket kevésbé koptatják, de MR folyadékok esetében is bizonyították, hogy a rúd alakú részecskék esetén magasabb az elérhető folyáshatár, és alacsonyabb a zérus tér esetén mutatott alapviszkozitás [60].

#### 2.2.1.2 *Folytonos fázis*

A magnetoreológiai folyadékok folytonos fázisaként főleg szintetikus, organikus és ásványi olajokat, vizet, valamint poliésztert alkalmaznak. A különböző olajok keverése, mely a folyadék stabilitását növeli, is kutatott téma [43]. A MR folyadékok tulajdonságait legfőképpen kettő paraméter, az alapfolyadék viszkozitása és a diszpergált részecskék mennyisége határozzák meg. Következően a mágneses tér hiányában tapasztalható viszkozitás meghatározza a rendszer alpműködését – tehát az alapfolyadéknak minél kisebb viszkozitással kell rendelkeznie [61]. Az alacsony viszkozitás azonban a rendszer instabilitását okozhatja. A kritériumoknak leginkább megfelelő, így elterjedten alkalmazott alapfolyadékok a szilikonolaj és a poli-alfa olefin (PAO) olaj [62,63]. A megfelelő alapfolyadékot mindig a felhasználásnak megfelelő paraméterekkel kell megválasztani.

#### 2.2.1.3 *A magnetoreológiai folyadékok stabilizálási lehetőségei*

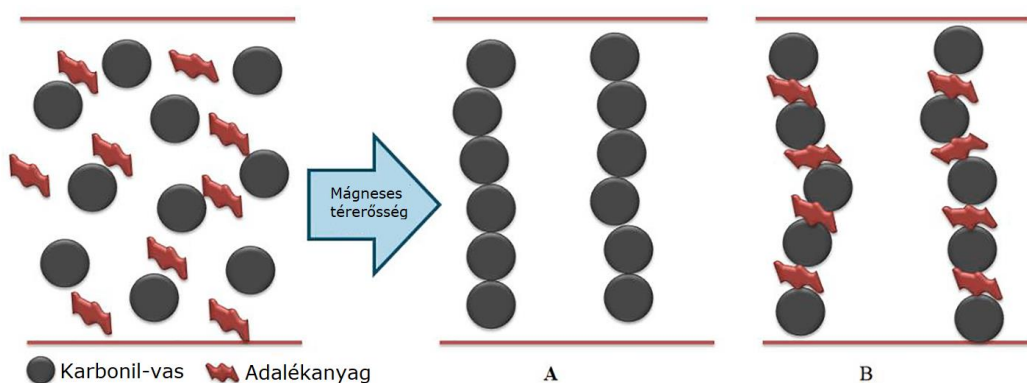
A bevezetőben említett nehézségek merülnek fel a stabil MR folyadékok létrehozásakor: a részecskék összetapadása, ülepedése nemkívánatos jelenség az alkalmazásokban. A problémák megoldására több módszer is született, a már érintett adalékanyagok csak egy típusát jelentik a MR folyadékok stabilitásának létrehozására. A továbbiakban röviden áttekintem, milyen lehetőségek állnak még rendelkezésre.

#### *Adalékanyagokkal stabilizált MR folyadék*

A legelső stabil MR folyadékokat adalékanyagok hozzáadásával hozták létre. Kezdetben felületaktív anyagokat, szén nanocsöveket, guargumit és hasonló szilárd anyagokat alkalmaztak. A leggyakrabban alkalmazott karbonil-vas részecskéket

tartalmazó folyadék esetén a részecskék agglomerációjának megakadályozására felületaktív anyagokat, vagy nanoméretű részecskéket, például króm-dioxidot használnak [63], melyek a részecskék közé ékelődve megakadályozzák az összetapadást (2.6. ábra).

Az ülepedés megakadályozásának egyik módja a rúd alakú részecskék használata, mely adalékanyag formájában is hozzáadható a folyadékokhoz. Ilyen anyagok a szén nanocsövek, melyhez Lim és munkatársai folyamodtak MR folyadékuk stabilizálásához [64]. A megfigyelések szerint ezek alkalmazása növeli a stabilitást, és csökkentik a részecskék kiválását az MR hatás befolyásolása nélkül. Más kutatások szilikon részecskéket, és zsírt is alkalmaztak sikeresen a stabilitás kialakításához [62,65].



2.6. ábra Felületaktív anyagok hatása a MR folyadékokra [66]

#### Magnetit nanorészecskékkel stabilizált MR folyadék

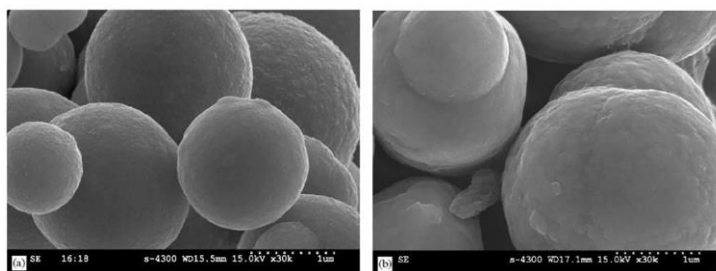
A magnetit részecskék alapösszetevői is lehetnek MR folyadékoknak, jó mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek. Adalékanyagként kompozit formájában, polimerekkel vegyítve, nanorészecskéként alkalmazzák. A polimerrel bevont magnetit nanorészecskéket oldószer elpárologtatásával hozzák létre. A nanorészecskék tulajdonságait két jellemző befolyásolja döntően: a méretük és a felszíni sajátosságaik, a nanométeres mérettartományban a felszín-térfogat arányuk jelentősen csökken. A magnetoreológiai folyadékokban a nanorészecskék a kiülepedés csökkenését eredményezik [67,68].

A nanorészecskék felhasználása lehetséges mágneses folyadékban, melyet folytonos fázisként lehet alkalmazni MR folyadékhoz. A mikrométeres és nanométeres részecskéket is tartalmazó folyadék a csak mikrométeres részecskéket tartalmazó MR folyadéknál nagyobb folyáshatárt mutat a folyadék és a részecskék közötti kölcsönhatás miatt. A kiülepedés az előző bekezdésben ismertetettek szerint itt is csökken [69].

A nanorészecskék használatának egyik fő kutatási iránya a két különböző méretű részecske koncentrációjának optimalizálása. Oka és munkatársai kutatásai szerint az MR részecskék és nanorészecskék koncentrációjának együttes növekedésével a stabilitás és a folyáshatár is növekszik [70].

#### Karbonil-vassal/kompozittal stabilizált MR folyadékok

A karbonil-vas alapú részecskét felületaktív anyaggal bevonva a kiülepedési probléma jól kezelhető. A bevonatot polimetil-metakrilátból (PMMA) készítve a részecskék sűrűségének csökkenése figyelhető meg, ami a folyáshatár kis csökkenése mellett növeli a stabilitást (2.7. ábra) [71]. Az ülepedés csökkentése mellett a bevonat részben megakadályozza a részecskék egymáshoz tapadását is. A karbonil-vas más anyagokkal is bevonatolható.



2.7. ábra Karbonil-vas (a) és PMMA bevonatos karbonil-vas (b) pásztázó elektronmikroszkópi képe [72]

#### Huzalszerű/elnyújtott részecskékkal stabilizált MR folyadék

A „hagyományos”, gömb alakú részecskék mellett kutatások tárgyai a 2 dimenziós, hálószerű szerkezetek, mint stabilizáló fázisok. A megnyújtott szerkezetek kevésbé hajlamosak a kiülepedésre. Bell és munkatársai [73] kutatásai szerint a folyáshatár is növekszik alacsony mágneses erőter esetén az ilyen rendszereknél. A gömb alakú részecskékhez képest a koncentrációjuk kisebb lehet, így főleg olyan rendszerek esetén javasolják az alkalmazást, ahol kis folyáshatár mellett fontos a kiülepedés elkerülése.

#### Kombinált folyadékkal stabilizált MR folyadék

Kutatások tárgyát képezi az alacsony viszkozitású alapfolyadékok helyettesítése magasabb viszkozitású olajokkal, gélekkel, így növelve a stabilitást. A folyadék mágneses tér nélküli viszkozitása így növekszik, ami általában nem kívánatos jelenség. A leggyakrabban alkalmazott helyettesítő polimer a polietilén-oxid, melyből vizes oldatot

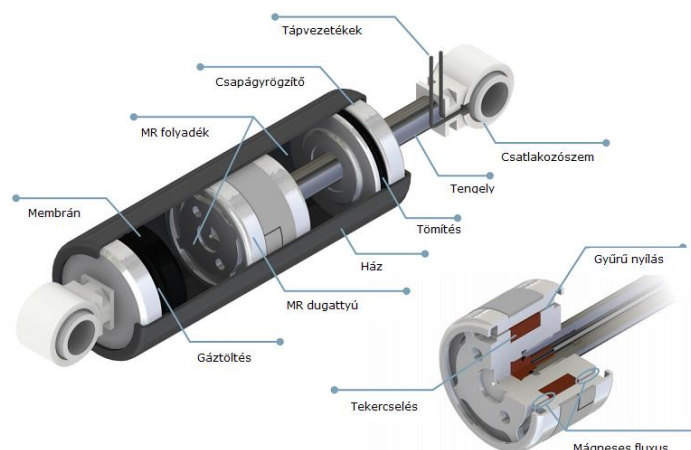
készítve használnak alapfolyadékként az MR folyadékhoz. Az így készült folyadék alapviszkozitása és mágneses tér jelenlétében mutatott viszkozitása is magasabb, mint a hagyományos MR folyadékoké, valamint alacsonyabb ülepedési rátát is mutat [74].

Más kutatási irány az ionos folyadékok alapfolyadékként való alkalmazása. Az ionos folyadékok szobahőmérsékleten folyékony ionokból állnak. Az ionok az megakadályozzák az MR részecskék agglomerációját, így növelve a folyadék stabilitását [75,76].

### **2.2.2 Magnetoreológiai folyadékok alkalmazási lehetőségei**

A magnetoreológiai folyadékok alkalmazásai sok hasonlóságot mutatnak az ER folyadékokéhoz. Az alapvető alkalmazási módok (2.4. ábra) megegyeznek. Az ipari felhasználási módok között találkozni lehet épületek, járművek, szerszámgépek és hidak lengéscsillapítóival, fékekkel, és alkalmazzák polírozási anyagként is [77]. Kevésbé elterjedt, de alkalmazott felhasználás is ismert kémiai és optoelektronikai jeladóként, hidraulikai szelepből és tömítésként is [78].

Az autópár területén a lengéscsillapításban kapnak szerepet a MR folyadékok. A MR lengéscsillapítók a félaktív berendezések közé sorolhatók, energiát használnak fel, de nem aktívan avatkoznak be a lengőrendszerbe. A lengéscsillapítókat mind nyírás, mind szelep, mind összenyomósos módon alkalmazzák, de ezek kombinációját is vizsgálják [79]. A MR lengéscsillapítók alkalmazását az olyan hétköznapi berendezésekhez is elemezték, mint a mosógépek. Ez utóbbi esetben a kutatók kombinált felhasználási módot dolgoztak ki: a MR lengéscsillapító egyben a rezgési energiát hasznosítja indukciós tekercseken keresztül, és a mechanikai rezgéseknek megfelelően állítja be a csillapítást [80]. A MR folyadék felhasználható szelepként. A mágneses tér hatására a viszkozitás növekedésével elzárja az áramló folyadék útját [43]. Az MR lengéscsillapító általános felépítését mutatja a 2.8. ábra. A Lord Co. által bemutatott konstrukciónál a dugattyú és a ház között áramló MR folyadék viszkozitását változtatva érhető el változtatható csillapítás [81].



2.8. ábra MR lengéscsillapító felépítése [81]

Hiemenz és munkatársai helikopterek pilótafülkéjében található ülések ütésszerű igénybevételnek ellenálló rezgéscsillapítót modelleztek, és a zuhanás során tapasztalt igénybevételt feltételezve vezérlési algoritmust teszteltek [82].

Az MR folyadékok egyik javasolt orvosi alkalmazása a daganatok kezeléséhez kapcsolódik. Flores és munkatársai kutatásukban a MR folyadék daganatos sejteket vérrel ellátó erekbe fecskendezését ismertették. Az erekbe juttatott folyadék mágneses térnek kitéve megakadályozza a vér áramlását, így az érintett sejtek elhalásához vezetve [49]. Egy másik felhasználási lehetőség a távgyógyászatban lehetséges. A távolról végzett vizsgálatok, műtétek során a megfelelő szenzorokkal mérhető az erő, mely a használt eszközre hat. A távbeavatkozást végző helyen haptikus visszajelzés szükséges a műveletek megfelelő elvégzéséhez. Shokrollahi és munkatársai MR folyadékkal működő berendezést terveztek, mely képes a távol érzékelt erőhatás haptikus jelzésére [83].

## 2.3 Reológiai alapfogalmak

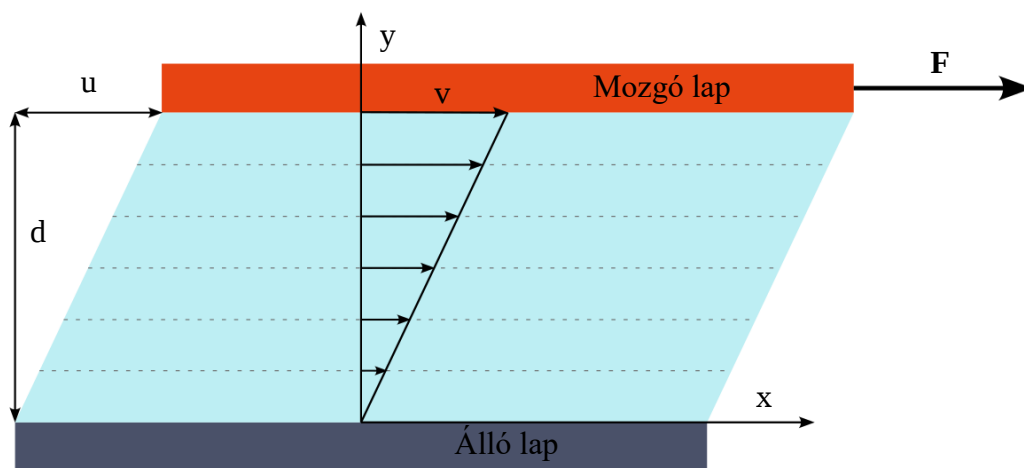
A reológia az anyagok defomációjával, folyásával foglalkozó tudományág. A dolgozat ER és MR folyadékokkal, és azokkal működő berendezésekkel foglalkozik, melyeknél előtérbe kerülnek az áramlási tulajdonságok, így rövid összefoglalót adok a reológiai alapfogalmakról, és a MR folyadékoknál használt modellekről.

Az anyagok deformációját tekintve két határeset különböztethető meg, a rugalmas alakváltozás és a folyás. A rugalmas alakváltozásnál a testre ható erő megszűnésével a test visszanyeri eredeti alakját, a hatás reverzibilis. A deformáció itt arányos az azt létrehozó feszültséggel. A kettő közötti arányossági tényező rugalmassági modulus:

$$\sigma = E \epsilon \quad (2.2)$$

ahol  $\sigma$  a mechanikai feszültség,  $E$  a rugalmassági modulus és  $\epsilon$  a relatív megnyúlás. Ha az erő megszűnésével nem nyeri vissza a test az eredeti alakját akkor irreverzibilis a deformáció, melyet folyásnak nevezünk.

Két, egymással párhuzamos, sík lap esetén, ha az egyikre  $F$  erő hat, és így  $v$  sebességgel mozog, a köztük lévő folyadékra nyíróerő hat, és állandó sebességű deformáció, folyás alakul ki, melyet a 2.9. ábra szemléltet.



2.9. ábra Párhuzamos síklapok között kialakuló folyás

Itt az  $F$  erőt nyíróerőnek nevezzük. Az egységi felületre ható erőt általánosan feszültségnek nevezzük, ebben az esetben nyírófeszültségről ( $\tau$ ) beszélhetünk. A folyadék rétegeiben a sebesség folyamatosan változik, állandó sebességgradiens alakul ki:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (2.3)$$

ahol  $\dot{\gamma}$  a sebességgradiens.

A folyadék relatív elmozdulása ( $\gamma$ ) jellemezi a deformációt:

$$\gamma = \frac{u}{d} \quad (2.4)$$

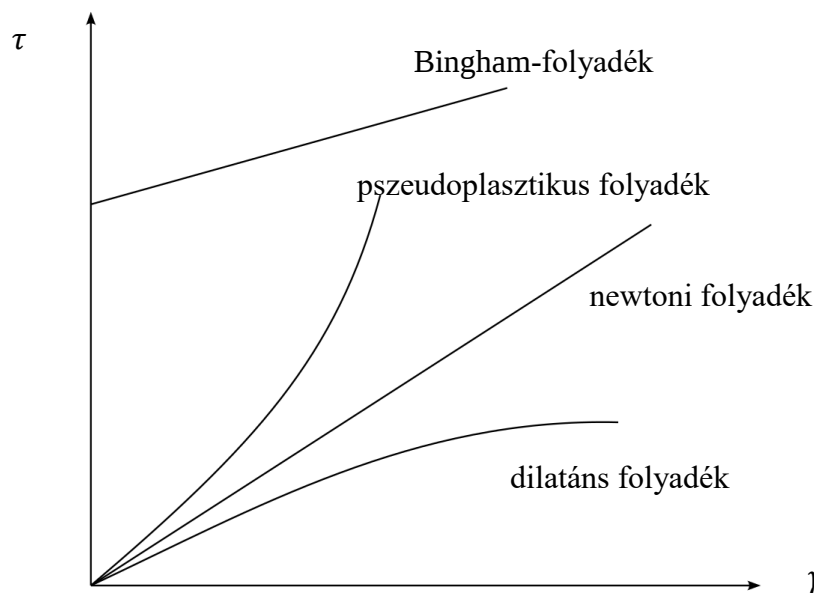
Az elmozdulás idő szerinti deriváltja szintén leírja nyírási sebességet:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dy} \quad (2.5)$$

A nyírófeszültség és a nyírási sebesség között teremt kapcsolatot arányossági tényezőként az adott folyadékra jellemző dinamikai viszkozitás ( $\eta$ ), mely folyadék belső súrlódását jellemzi:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.6)$$

A (2.6) egyenlet az ideálisan viszkózus, ún. newtoni folyadékokra áll fenn, ahol a dinamikai viszkozitás állandó, anyagi jellemző. Amennyiben nem áll fenn lineáris összefüggés a nyírási sebesség és nyírófeszültség között nemnewtoni folyadékokról beszélünk. A nemnewtoni folyadékoknál a viszkozitás változik a nyírási sebességgel. A nyírási sebesség növekedésével csökkenő viszkozitást mutató folyadékokat pszeudoplasztikus folyadékoknak, míg a nyírási sebesség növekedésével növekvő viszkozitást mutató folyadékokat dilatáns folyadékoknak nevezzük. Bingham-folyadékok esetében a folyadék létezik egy  $\tau_0$  nyírófeszültség, melyet meghaladva a folyadék newtoni folyadékként, míg ez alatt szilárd anyagként viselkedik. Az ER és MR folyadékokat sok esetben Bingham-folyadékként közelítik (2.10. ábra) [66].



2.10. ábra Nyírófeszültség és sebességgradiens közötti összefüggés különböző anyagoknál

### 2.3.1 Viskozitás hőmérsékletfüggése

A folyadékok viszkozitása meghatározza azok belső ellenállásának mértékét a csúsztató feszültséggel szemben, azonban ez az előzőekben bemutatottak szerint nem mindig állandó érték, függhet a hőmérséklettől is. A továbbiakban a folyadékok viszkozitásának hőmérsékletfüggésére létrehozott modelleket ismertetem. A témakörrel már az 1800-as években foglalkoztak, ahonnan az első, korai modellek (Poiseuille, Slotte, Graetz) származnak [84]. A ma használt modelleket az 1900-as évek első felében állították fel.

Poiseuille 1840-ben javasolta modelljét, ahol a viszkozitás a sűrűséghez hasonlóan függ a hőmérséklettől:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + AT + BT^2} \quad (2.7)$$

ahol  $A$  és  $B$  anyagi jellemzők,  $\eta_0$  a  $0^\circ\text{C}$ -on mért viszkozitás. Az anyagi jellemzők kettő konstanssal vannak megadva, és a viszkozitás a hőmérséklet négyzetétől is függ [84].

Slotte a viszkozitás hőmérsékletfüggését három anyagi jellemzőtől tette függővé az 1800-as évek végén a következő formulával:

$$\eta = \frac{C}{(A + T)^B} \quad (2.8)$$

ahol  $A$ ,  $B$  és  $C$  az anyagi jellemzők [84].

Graetz az általa javasolt modell figyelembe veszi az olvadáspont alatti hőmérsékletet is:

$$\eta = \frac{A(\theta - T)}{(T - T_1)} \quad (2.9)$$

ahol  $\theta$  a kritikus hőmérséklet, és  $T_1$  az olvadáspont alatti hőmérséklet, ahol a viszkozitás már végtelen nagy.

Arrhenius a kémiai reakciósebességre állított fel hőmérsékletfüggést leíró formulát, mely sok későbbi hőmérsékletfüggést tárgyaló egyenlet alapjául szolgált [85]:

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2.10)$$

ahol  $k$  a reakciósebességi állandó,  $k_0$  a preexponenciális faktor,  $R$  az egyetemes gázállandó, és  $E$  az aktiválási energia.

Arrhenius munkája nagy befolyással volt Andrade munkájára, aki 1930-ban javasolja formuláját a folyadékok viszkozitásának hőmérséklet-függésére [86]:

$$\mu = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (2.11)$$

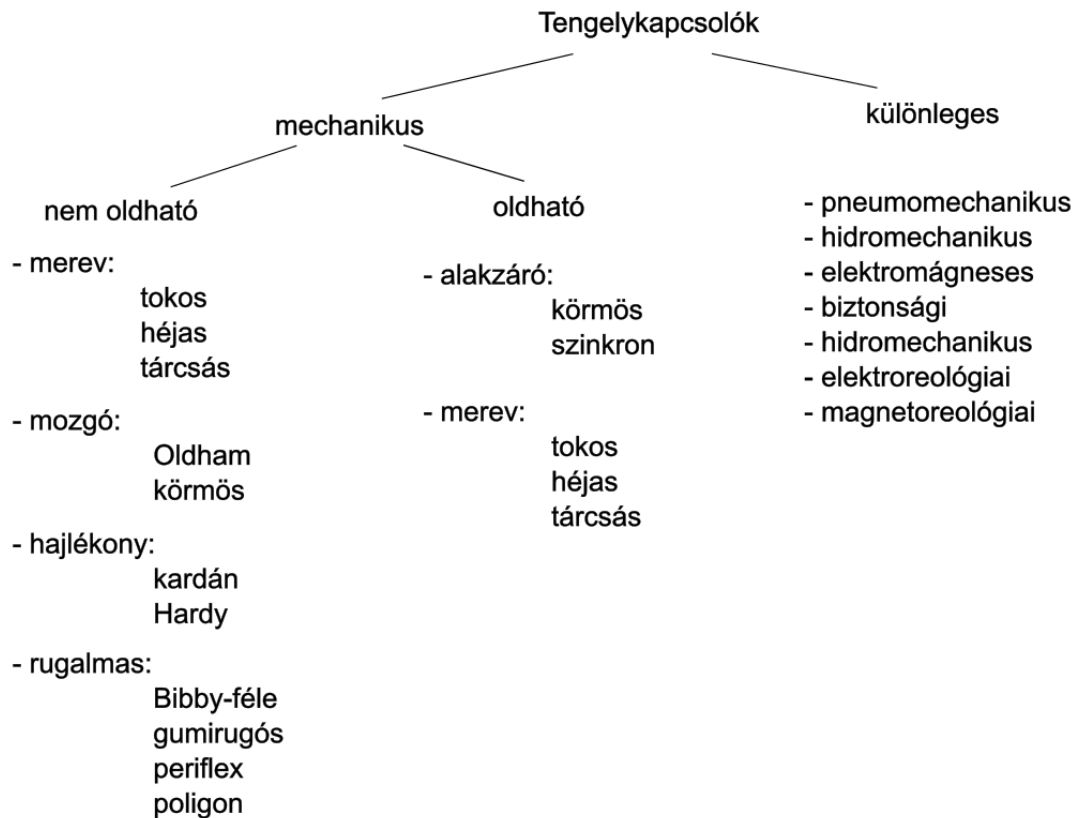
ahol  $A$  és  $B$  konstansok. Az összefüggés helytállását két példán keresztül mutatta be cikkében.

## 2.4 Tengelykapcsolók

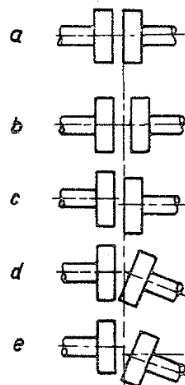
A dolgozatban felmerülő elektrotechnológiai és magnetoreológiai tengelykapcsolók témakörök tárgyalása előtt érdemes áttekinteni a tengelykapcsolók általános felépítését és funkcióit. A tengelykapcsolók elsődleges funkciója, hogy forgó tengelyek között időszakos vagy állandó összeköttetést létesítsen, és átvigye a nyomatékot. A tengelykapcsolók között különbséget tesznek másodlagos funkcióik, illetve a nyomatékátvitel módja szerint. Másodlagos funkciók többek között lehetnek az összekapcsolt tengelyek eltolódását, vagy nem egytengelyűséget való kiegyenlítés, rezgéscsillapítás, munkagépek esetén ki- és bekapcsolás, túlterhelés elleni védelem [87]. 2.11. ábra mutatja a tengelykapcsolók egy felosztását.

### 2.4.1 Mechanikus tengelykapcsolók

A mechanikus tengelykapcsolóknál kettő nagy csoportot különböztethetünk meg. A nem oldható tengelykapcsolók esetében a kapcsolat mindig fennáll, így a két tengely forgási sebessége is mindig megegyezik. Az oldható tengelykapcsolóknál a kapcsolat akár működés közben is megszakítható, így például indítás esetén kisebb nyomatékot kell kifejtenie a rendszernek. A nem oldható tengelykapcsolók között különbséget lehet tenni az között, hogy a központosítási hibákat kompenzálják-e. A mozgó, hajlékony, és rugalmas tengelykapcsolók kiegyenlítők, azaz képesek hibásan illesztett tengelyvégek esetén is az összeköttetést fenntartani. 2.12. ábra mutatja a tengelyek közötti tipikus hibákat: a) helyes pozicionálás; b) tengelyirányú eltolódás; c) sugárirányú eltolódás; d) szögeltérés; e) sugárirányú eltolódás és szögeltérés [87].



2.11. ábra Tengelykapcsoló típusok felosztása



2.12. ábra Központosítási hibalehetőségek tengelyeknél [87]

#### 2.4.1.1 Merev tengelykapcsolók

Az összekapcsolt tengelyek között merev kapcsolatot létesítenek, így minden hatás átadódik a tengelyek között. A tengelyeket nagyfokú pontossággal kell gyártani és központosítani, mivel nem ezen tengelykapcsolók nem kompenzálják a hibákat.

### Tokos tengelykapcsolók

A két tengelyvéget egy közös, csőszerű tok köti össze. A nyomatékot kúpos szeg, fészkes retesz, íves retesz, vagy zsugorkötés továbbítja. Szerelésnél a tengelyeket axiális irányban el kell mozdítani.

### Héjas tengelykapcsolók

A tokos tengelykapcsolók egy típusa, ahol a csőszerű tok tengelyirányban két részre van osztva, csavarokkal összeszorítva. Előnye, hogy szereléskor nem kell a tengelyeket elmozdítani. A megfelelő központosítás itt is követelmény.

### Tárcsás tengelykapcsolók

A központosított tengelyvégeket tárcsás kialakítású, peremmel rendelkező tengelykapcsoló felek kötik össze. A peremeken illesztett, vagy hézaggal elhelyezett csavarok szorítják össze. A nyomatékot a tárcsák peremét összeszorító súrlódás és a csavarok nyírása viszi át. Lehetnek alakzáró és erőzáró kivitelűek, a nagyobb tengelyek kapcsolására elterjedten alkalmazottak.

#### 2.4.1.2 *Mozgó tengelykapcsolók*

### Oldham tengelykapcsolók

Három darabból, két kapcsolófélből (a tengelyekre szerelve) és egy közdarabból áll, az egyes darabok hornyokkal illeszkednek egymáshoz. Az Oldham kapcsoló képes kis sugárirányú excentricitás kiegyenlítésére.

### Körmös tengelykapcsolók

A tengelykapcsoló két felén körmök kerülnek kialakításra, melyek a másikon létrehozott hézagokba illeszkednek, így adva át a nyomatékot. A hosszirányú méretváltozást képesek kiegyenlíteni a körmös tengelykapcsolók. A közdarab készülhet rugalmas gumianyagból is.

#### 2.4.1.3 *Hajlékony tengelykapcsolók*

### Kardánkapcsolók

A tengelyek végeire illesztett villa alakú alkatrészeket egy kereszt alakú alkatrésszel összekapcsolva alakítható ki a kardánhajtás. Az egyik villa tengelyét a másikhoz képest bizonyos szöggel le kell billenteni. Ez az elvi megoldás több fizikai megvalósítást tesz

lehetővé a kardánkapcsolóknál: golyós kialakítás, csúszósarus kialakítás stb. A kapcsolás hátránya, hogy a tengelyek fordulatszáma csak egytengelyűség esetén lesz azonos, de ez kettős kardáncsuklóval (szinkroncsukló) kiküszöbölhető.

#### Hardy tengelykapcsolók

A hardy tengelykapcsoló két, a tengelyvégekre illesztett tárcsa alakú félből, és a közöttük elhelyezkedő rugalmas elemből (textilbetétes gumi) áll. Az egyes részeket itt is csavarok kötik össze.

##### 2.4.1.4 *Rugalmas tengelykapcsolók*

#### Bibby-féle tengelykapcsolók

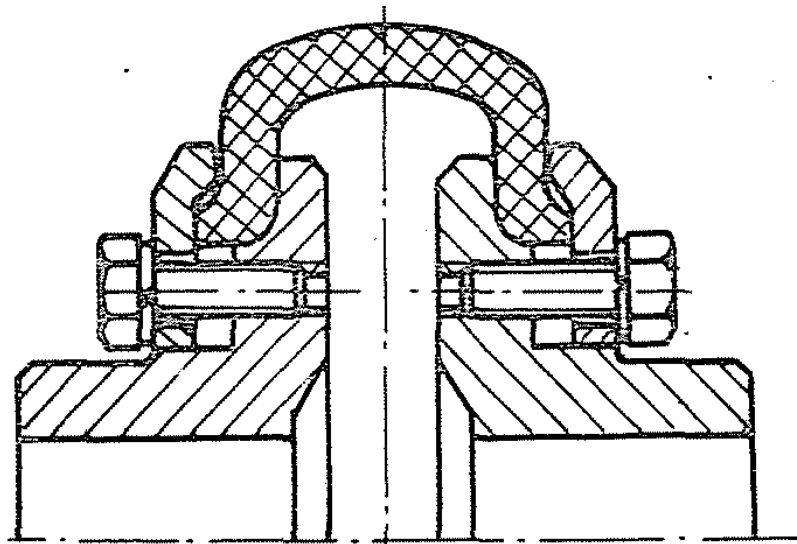
Más néven hullámosított lemezugós tengelykapcsolók, a kapcsolófelek karimaszerű részeibe munkált horonyba meanderszerűen hajlított lemezugót helyeznek. A rugó lazán, játékkal van illesztve, ami bonyolítja a rugó méretezését. Egytengelyűség biztosítása szükséges, nagy, akár ingadozó nyomatékot képes átvinni.

#### Gumidugós tengelykapcsolók

A merev, tárcsás tengelykapcsolók egy típusa, ahol a tárcsákat összekötő csavarokat gumidugókkal helyettesítik. Nagy nyomatékot tud átvinni, rezgések csillapítására alkalmas, kis szerelési hibát képes kompenzálni.

#### Periflex tengelykapcsolók

A tengelyek végén elhelyezkedő tárcsákat egy rugalmas gumitömlő köti össze, ami radiális irányban kitüremkedik a tengelyek között. Kiváló kiegyenlítő képességgel rendelkezik, mind axiális, mind radiális irányban, valamint szögkitérés kompenzálására is alkalmas (2.13. ábra).



2.13. ábra Periflex tengelykapcsoló műszaki ábrázolása [88]

#### 2.4.1.5 Alakzáró tengelykapcsolók

Az alakzáró és erőzáró tengelykapcsolók az oldható tengelykapcsolók közé tartoznak, képesek a hajtott oldalt leválasztani a hajtóról. Általános felépítésük lehetővé teszi az egyik oldal tengelyirányú eltolását.

#### Körmös, oldható tengelykapcsolók

A tengelyekre szerelt alkatrészek körmös (vagy fogazott) kialakításúak, a körmök száma kicsi, míg osztásuk nagy. Külső erővel lehetséges a kapcsolás. Csak nyugalmi állapotban lehetséges a kapcsolása.

#### Szinkronizáló szerkezetek

Egy körmös, oldható tengelykapcsolóból és egy dörzskapcsolóból álló, komplex tengelykapcsoló az előzőleg ismertetett hibáját kiküszöböli, így már üzemközbeni kapcsolás is lehetséges. A bekapcsolás során először a súrlódó dörzskapcsoló teremt kapcsolatot a két tengelyfél között, ami kiegyenlíti a fordulatszám-különbséget, majd a karmok csatlakozásával végződik a kapcsolás. Elsősorban gépjárművek sebességváltóinál alkalmazzák.

#### 2.4.1.6 Erőzáró tengelykapcsolók

Más néven dörzskapcsolók, lehetőséget nyújtanak tengelyek üzem közbeni többszöri be- és kikapcsolására, eltérő fordulatszám esetén is. A nyomatékot az összeszorított felületet közötti súrlódás adja át. Kialakítás szerint lehetnek kúpos, tárcsás vagy hengeres felületűek.

## 2.4.2 Különleges tengelykapcsolók

A különleges tengelykapcsolók témakörébe tartoznak azon tengelykapcsolók, melyek a mechanikus erőátadás mellett/helyett más fizikai jelenséget is felhasználnak. Ide tartoznak a dolgozat témájaként szolgáló ER és MR tengelykapcsolók, melyekkel kiemelten foglalkozok más különleges tengelykapcsolók rövid bemutatása után.

### 2.4.2.1 Elektromágneses tengelykapcsolók

Az elektromágneses tengelykapcsolók programvezérelhetők, így kiválóan alkalmasak automatizálásra. Az erőátvitel mechanikusan, súrlódó tárcsákkal történik, melyek zárását-nyitását, összeszorítását elektromágnes végzi. Sok kapcsolási szám esetén jó megoldást nyújtanak, azonban túlmelegedésre hajlamosak, így ügyelni kell a túlterhelésre.

### 2.4.2.2 Hidraulikus tengelykapcsolók

A hajtott és hajtó oldalak közötti kapcsolást folyadék segítségével valósítják meg. Általában lemezes szerkezetűek, ahol a dörzsfelületek összenyomását olaj biztosítja. A folyadék mozgásviszonyaitól függően lehetnek hidrosztatikus és hidrodinamikus tengelykapcsolók.

#### Hidrosztatikus tengelykapcsolók

Az egyik felén belső fogazatú koszorú, a másik felén fogaskerek helyezkednek el. Az olajjal feltöltött rendszer fogaskerék-szivattyúként funkcionál: a kapcsolófelek relatív elmozdulásakor az olaj áramlani kezd. A hidrosztatikus tengelykapcsolókat dörzskapcsolóval, vagy más kapcsolóval építik egybe jó lengéscsillapító tulajdonságai miatt. Járművek sebességváltójával is szokás összeépíteni, mely ma is kutatott téma [89].

#### Hidrodinamikus tengelykapcsolók

A hidrodinamikus tengelykapcsoló áramló folyadék segítségével létesít nyomatékátvitelt. A kapcsolófelek egyike szivattyúkerék (hajtó oldal), míg másik a turbinakerék (hajtott oldal), mindkettő radiálisan lapátos. A kettő közötti minimális résben elhelyezkedő olaj a szivattyú lapátkialakítása miatt áramlásba jön, és meghajtja a turbinakereket is. A két fél közötti fordulatszám-különbség nem tesz kárt a tengelykapcsolóban, és a fordulatszámok kiegyenlítésekor az áramlás megszűnik. Jól használható nagy tehetetlenségű rendszereknél, ahol így csökkenteni lehet az indítási nyomatékszükségletet. A hagyományos olajon kívül kutatások zajlanak MR folyadék felhasználására is [88].

## Folyamatosan változó áttételű tengelykapcsolók

A fokozatmentes sebességváltók üzem közben képesek megváltoztatni az átvitt nyomaték nagyságát a hajtott és hajtó oldalak között folyamatos átmenettel. Elterjedésük elsősorban a gépjárművek hajtásláncának fejlődésének, illetve az egyre inkább előtérbe kerülő gazdasági és környezetvédelmi szempontoknak köszönhető. A fokozatmentes tengelykapcsolók rengeteg típusát dolgozták ki, de legelterjedtebben a láncos és a szíjas típusokat használják. Ezek két változtatható átmérőjű, két félből álló tárcsából, és a közöttük lévő láncból vagy szíjból állnak. A hajtott oldalon lévő nyomatékigény alapján a vezérlés folyamatosan változtatja a tárcsák átmérőit, így hozva létre a fokozatmentes váltást. A szíj folyamatos deformációját több kutatás is vizsgálta [90,91]. A láncos típusok mellett újabb kutatások témája a golyós típus is [92].

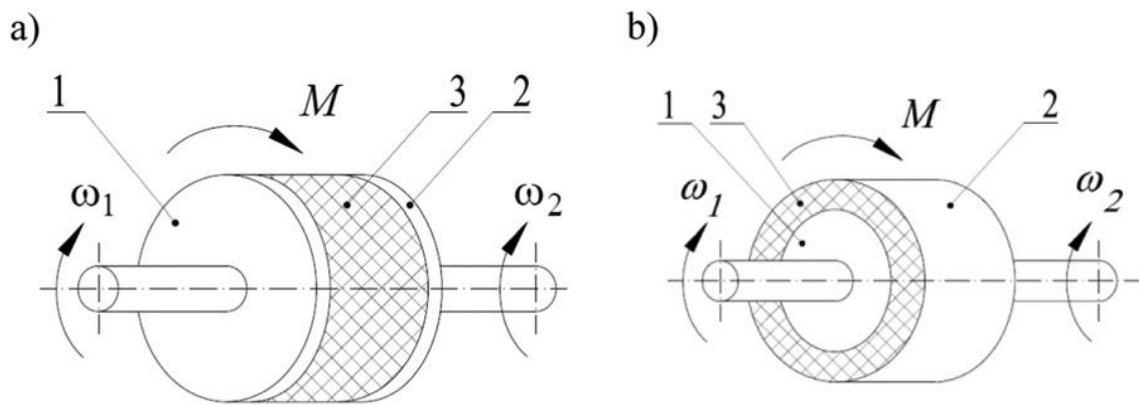
### 2.4.2.3 ER és MR tengelykapcsolók

Az elektorreológiai és magnetorreológiai tengelykapcsolók egyik előnye a folyamatosan változó áttételű tengelykapcsolókhoz hasonlóan az átvitt nyomaték fokozatmentes állíthatósága. További előnyt jelent, hogy mindkét típus egyben mechanikus nyomatékhatárolóként is működik.

## Elektorreológiai tengelykapcsolók

Az elektorreológiai folyadékok nyomatékátvitelre való használatát már az ER hatás publikálásakor felvetették [3], és egy egyszerű, két fémlemez között elhelyezkedő folyadékból álló tengelykapcsolóra Winslow szabadalmat is nyújtott be. Nyomatékátviteli célokra ennek ellenére sokáig nem alkalmaztak ER folyadékokat, mind a technológia, mind a folyadékok fejlődésére volt szükség, és az 1900-as évek végén már több tárcsából álló tengelykapcsolókat képzeltek el [93].

A 2.14. ábra mutatja az elektorreológiai folyadékkal működő tengelykapcsolók alaptípusait. A tárcsás típus esetén lehetséges a tárcsák helyes kialakításával tömítés nélküli tengelykapcsolót létrehozni, így egyszerűsítve a szerkezetet. Ennél a típusnál azonban a nyomatékátvitel a tárcsa középpontjától való távolsággal együtt változik. A hengeres típus esetén a kis sugárváltozás miatt, amit a rés jelent ez nem áll fenn, viszont mindenképpen tömítés szükséges a szerkezetben.



2.14. ábra ER tengelykapcsolók alapítpusai: a) tárcsa típus b) hengeres típus [94]

1 – hajtó oldal; 2 – hajtott oldal; 3 – ER folyadék

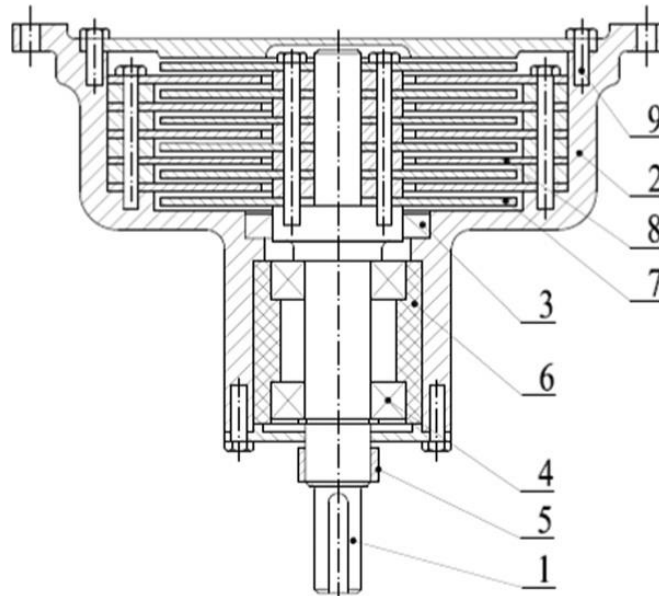
Whittle és munkatársai az ER tengelykapcsolóban fellépő áramlástan viszonyokat vizsgálva megállapították, hogy a hajtott oldal gyorsulását behatárolja a folyadék viszkozitása, melynek modellezéséhez a Bingham modellt alkalmazták. Kutatásuk során hengeres ER tengelykapcsolót modelleztek, és vizsgálták kicsi és nagy kimenő tehetetlenségi nyomaték esetén az időbeli viselkedést [95].

Bollough és munkatársai szintén hengeres ER tengelykapcsolót vizsgáltak. Eredményeik szerint a fordulatszám tág határok közötti változtatása esetén az ER nyírófeszültség is nagymértékben változik. Javasolták a Bingham modell alkalmazását a tengelykapcsoló optimalizálásához [96].

Tan és munkatársai a szervómotor hajtotta robotkarok alternatívájaként vizsgálták meg az ER tengelykapcsolót. Publikációjukban a tengelykapcsoló rendszeranalízisét végezték el az elektromos teret előállító feszültség egységugrására adott választ elemelve. Megvizsgálták a különböző jelszintekre adott választ, és figyelembe vették a hőmérséklet hatását is. A kapott válaszfüggvények (időben lecsengő rezgés) frekvencia analízis vizsgálatával megállapították a rendszer sajátfrekvenciáját. Kifejtették, hogy a különböző bemeneti paraméterek függvényében eltérnek a kapott eredmények, de azonos paraméterek esetén jól reprodukálhatók, így minden beállításnál több (10) mérést végeztek. A kutatás a nyomatékválasz-előrejelzés modelljének validációjával zárult, megállapították továbbá a nyomatékvitel hőmérséklet-függését is [97]. Munkájukat tovább folytatva kettő, egymással szemben forgó ER tengelykapcsolót vizsgáltak, validálva annak matematikai modellét [98].

A több tárcsát tartalmazó tengelykapcsolók, vagy ahhoz hasonló szerkezetek (pl. fékek) felépítése az elektromos tér szigetelése miatt jóval további szigetelő elemet

tartalmaz, mint a több hengeres rést tartalmazó tengelykapcsolók. A 2.15. ábra szerint minden tárcsapárnál elektromosan szigetelő plusz anyagot kell elhelyezni, hogy minden részben létrejöjjön a megfelelő elektromos erőtér.



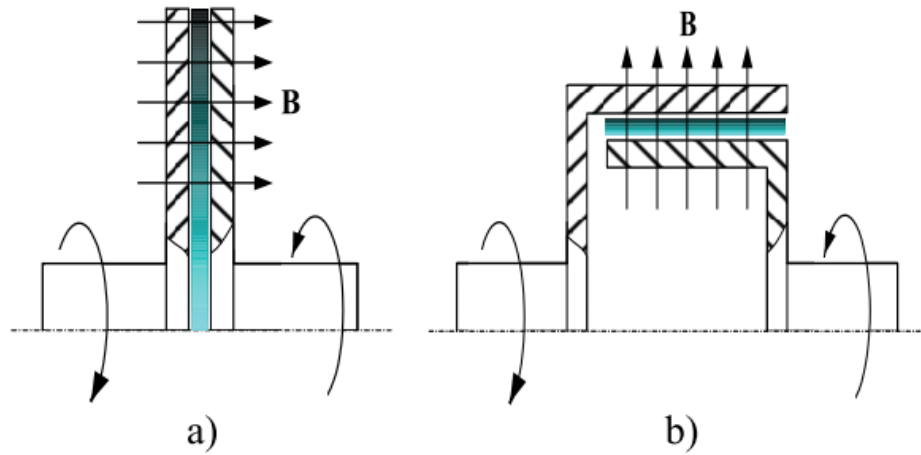
2.15. ábra Több tárcsás ER fék; 1 – hajtó tengely, 2 – ház, 3 – tömítőgyűrű, 4 – csapágy, 5 – csúszógyűrű, 6 – szigetelés, 7 – a hajtott oldal tárcsája, 8 – a hajtó oldal tárcsája, 9 – csavar; [94]

ER tengelykapcsoló alapjául szolgálhat hidraulikus tengelykapcsoló is, mint Musialek és munkatársai munkájában. A hengeres típusú tengelykapcsolóban több folyadékréteg is található, vizsgálták többek között a folyadékkal való feltöltöttség és a fordulatszám hatását az átvitt nyomatékra. Megállapították, hogy magas töltöttségi szinten a nyomaték függött a fordulatszám nagyságától, valamint hogy a hőmérséklet is nagymértékben befolyásolja az átvitt nyomatékot [99].

#### Magnetoreológiai tengelykapcsolók

A magnetoreológiai folyadékkal működő tengelykapcsoló szerkezetét Rabinow már az 1900-as évek közepén említést tett, amikor az MR folyadékokat először tesztelték és szabadalmaztatták [40]. Az MR tengelykapcsolóknak az ER társaikhoz hasonlóan kettő alaptípusa van: a tárcsás és a hengeres típus (2.16. ábra). Azonban ezeknél a mágneses teret létrehozó szerkezetnek is jelen kell lennie, ami lehet árammal átjárt tekercs, azaz elektromágnes, vagy permanens mágnes, vagy a kettő kombinációja [100]. Az MR

tengelykapcsolók kutatása két fő irányt mutat: a tényleges szerkezettervezést [101–107] és az irányítást [47,108].



2.16. ábra MR tengelykapcsolók alaptípusai a) tárcsás típus b) hengeres típus [103]

Lampe és munkatársai a MR tengelykapcsoló által átvitt nyomatékot vezették le mind tárcsa, mind hengeres típus esetén. Munkájukban Bingham modellt használták, és a figyelembe vették a szilárd folyadék fázisú nyomatékátvitelt is, megállapítva az átmenetet a két fázis között. Tárcsa típusnál a sugárral haladva változik a nyírófeszültség, melynek értéke szilárd állapotban [109]:

$$\tau(r) = Cr \quad (2.12)$$

ahol  $C$  konstans érték, és  $r$  a sugár. Ennek határértéke  $r = R$  esetben van, ahol  $R$  a tárcsa teljes sugara, és értékét, a folyáshatárt  $\tau_{y,s}$ -nak jelölték. Ebből, felhasználva 2.12-t kapták

$$\tau(r) = \tau_{y,s} \frac{r}{R} \quad (2.13)$$

Egy folyadékkal telített tárcsapár nyomatékátvitelére meghatározható a differenciálegyenletből:

$$dM = \tau(r) 2\pi r^2 dr, \quad (2.14)$$

amit elvégezve a következő alak adódik a szilárd fázis nyomatékátvitelére:

$$M_{max,s} = \pi \tau_{y,s} \frac{R^4 - R_i^4}{2R} \quad (2.15)$$

ahol  $R_i$  a tárcsának a belső átmérője gyűrű alak esetén. Folyadék fázis esetén, kis Reynolds-számokra a folyadékprofil lineáris, és kifejezhető az átvitt nyomaték:

$$M_{min,d} = \pi \tau_{y,d} 2 \frac{R^3 - R_i^3}{3} \quad (2.16)$$

ahol  $\tau_{y,d}$  a folyadék fázis folyáshatára. 2.15 és 2.16 egyenletek között a nyomaték ugrik a szilárd fázisból folyadék fázisba való átmenettel.

Hengeres tengelykapcsolónál a sugárral elhanyagolható mértékben változik az átvitt nyomaték, levezetés nélkül adták meg szilárd fázisra:

$$M_{max,s} = \frac{\pi}{2} \tau_{y,s} L (R + R_i)^2 \quad (2.17)$$

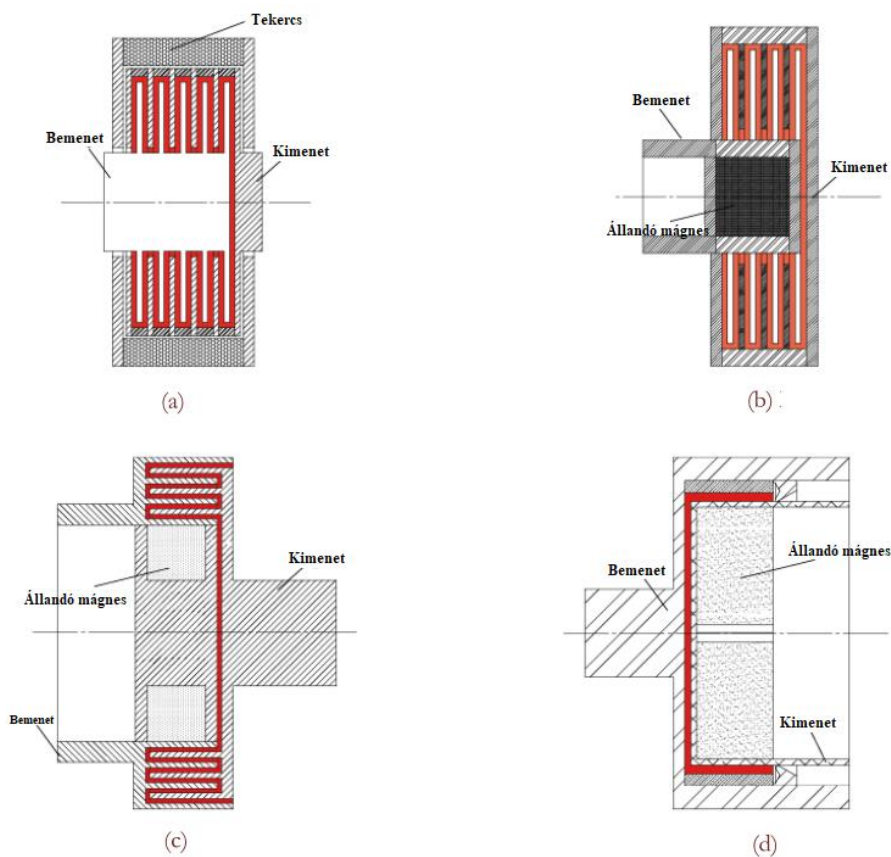
és folyadék fázisra:

$$M_{min,d} = \frac{\pi}{2} \tau_{y,d} L (R + R_i)^2 \quad (2.18)$$

ahol  $L$  a tengelykapcsoló magassága. A folyadék és szilárd fázis között az egyenletekből látható, hogy a nyomatékátvitelben ugrás jön létre.

A publikációban foglalkoztak továbbá a részecskék áramlásból adódó sodródása, mely a tárcsa típusra jellemző inkább.

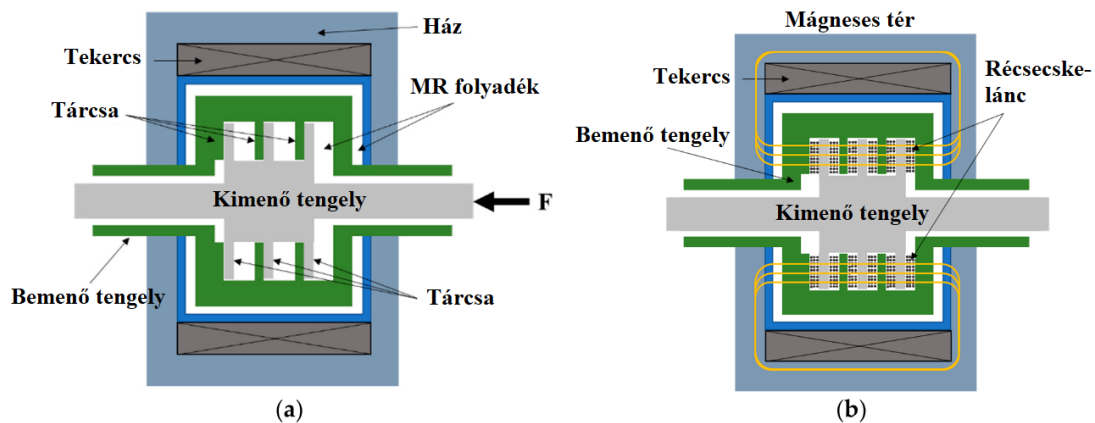
Bucchi és munkatársai számba vették a 2.17. ábra látható vázlatokat az MR tengelykapcsolókat. Az a) típus kivételével mindegyiknél állandó mágnes szolgáltatja a mágneses térerősséget, ami elektromos meghibásodás esetén is megbízhatóan működik. Analizálták a modelleket, és megállapították, hogy a nagyobb nyomaték átviteléhez növelni kell a tengelykapcsoló átmérőjét, valamint a folyadékot tartalmazó részben a mágneses térerősséget. Ezen kritériumok alapján a d) típusra esett a választásuk, amiből több prototípust is készítettek, melyekben az állandó mágnes axiális irányban elmozdítható. Megvizsgálták az átvitt nyomatékot a fordulatszám függvényében, ami kis eltérést mutatott a Bingham modellhez képest mind mágneses tér jelenlétében, mind anélkül. Az általuk mért nyomatékátvitel elérte a 4,5 Nm-t  $d = 57$  mm tárcsaátmérő esetén.



2.17. ábra Különböző felépítésű MR tengelykapcsolók [100]

- a) Többtárcsás tengelykapcsolóval tekerccsel; b) Többtárcsás tengelykapcsoló állandó mágnessel; c) Többhengeres tengelykapcsoló állandó mágnessel; d) Hibrid tengelykapcsoló állandó mágnessel

Park és munkatársai a 2.18. ábra látható, többtárcsás MR tengelykapcsolót tanulmányozták kettő irányítási módban. A magnetoreológiai tengelykapcsolóknál megszokott, mágneses térrel irányított nyomatékátvitel mellett a tengelykapcsoló képes mechanikus súrlódással is nyomatékot átadni a két tengely között, mely esetben a tárcsákat erővel szorítják össze. Megvizsgálták, mekkora átvihető nyomaték érhető el mindkét módban. Mágneses tér alkalmazása esetén a tengelykapcsoló felépítéséből adódóan befolyásolni tudják a rés méretét is, így két résméret (0,2 mm és 2 mm) esetén is megadták a nyomatékot, mely a nagyobb rés esetén volt nagyobb, de mindösszesen 0,5 Nm-el. A kisebb résméret esetén rezgés is jelentkezett. Mechanikus nyomatékátvitel esetén az átvitt nyomaték jóval nagyobb, 25 Nm-t ért el, de a nyomaték felépülése lassabb, mint mágneses tér esetén [108].



2.18. ábra Többtárcsás MR tengelykapcsoló működési koncepciója [108]

a) súrlódási mód; b) mágneses tér mód

Az átvitt nyomaték limitálása a kooperatív ember-robot kapcsolatok esetén biztonságtechnikai szempontból létfontosságú. Erre a célra kiválóan megfelel az MR tengelykapcsoló, mely meghibásodás nélkül túlterhelhető. Lämmle párhuzamos kinematikájú robotkarhoz tervezett biztonsági tengelykapcsolót, mely eredményei szerint sikeresen csökkenti az ütközési erőt.

## Kutatási rész

### 3. Elektoreológiai folyadékok részecskeláncaiban fellépő erők

Az elektoreológiai folyadékok felhasználása során a részecskéket összetartó erők határozzák meg az alkalmazás korlátait, legyen szó megmunkálásról, nyomtatékvitelről vagy lengéscsillapításról. Ahhoz, hogy megismerjük a korlátokat, így fontos ismernünk a láncokban fellépő erőket, illetve az azokat kiváltó hatásokat.

#### 3.1 Monodiszperz lánc

A monodiszperz rendszer leírását már több szerző is tárgyalta, azonban publikációikban a véges láncokra jellemző összefüggéseket nem részletezték, ezért a heterogén láncok könnyebb megértéséhez a formulákat újra származtatom. Az elektoreológiai folyadékokban létrejövő erőket a szakirodalomban monodiszperz láncokkal közelítik, ami azt jelenti, hogy a láncot kialakító részecskéknak azonos méretet tulajdonítanak. A valós rendszerek közelítésénél a dipólusláncok leírásához az ún. pontszerű-dipólus modellt alkalmazzák, ahol az indukált dipólus a részecskék közepén helyezkedik el. A részecskék között létrejövő erő a dipólusoknak tulajdonított elektromos erőteréből származtatható. Az alkalmazott modellhez tekintsünk  $N$  darab azonos nagyságú,  $\sigma$  átmérővel és  $\epsilon_p$  permittivitással rendelkező részecskét  $\epsilon_f$  permittivitású folyadékba diszpergálva, amelyre  $E_0$  elektromos külső tér hat, és a részecskék külső erőterrel párhuzamos láncba rendeződnek, melyet az azonos részecskeátmérő miatt monodiszperz láncnak hívunk. Ekkor a  $j$  helyen az indukált dipólusmomentumok egymásra hatása miatt egy  $E_{int,j}$  belső elektromos erőter jelenik meg. Ebben az esetben a helyi térerősség a  $j$  helyen a külső és belső térerősségek összege:

$$\mathbf{E}_{loc,j} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{int,j} \quad (3.1)$$

ahol

$$\mathbf{E}_{int,j} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \frac{2\mathbf{p}_i}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0|i-j|^3\sigma^3}. \quad (3.2)$$

Az egyenletben szereplő  $\mathbf{p}_i$  mennyiség az  $i$ -edik részecske indukált dipólusmomentuma, melyet a helyi térerősség hoz létre.

$$\mathbf{p}_i = \alpha\mathbf{E}_{loc,i} \quad (3.3)$$

ahol  $\alpha$  a részecskék polarizálhatósága, mely a következőképpen adható meg [110]:

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f} \epsilon_f \left(\frac{\sigma}{2}\right)^3 \quad (3.4)$$

Izotróp részecskék esetén a (3.1) – (3.2) egyenletek skalár egyenletenként tekinthetők. Véges lánc esetén a helyi elektromos térerősség eltérő lehet a lánc mentén (például a végein), azonban végtelen lánc feltételezése esetén a szimmetria miatt minden  $i$ -edik részecskénél  $E_{loc,i} = E_{loc}$  egységes elektromos erőter lesz. Ebben az esetben (3.1) – (3.3) egyenletek alapján, ha az összegzést egy kijelölt részecskétől, (3.1. ábra)  $j = 0$ -tól felírható a lokális elektromos erőter nagysága:

$$\begin{aligned} E_{loc} &= E_0 + \sum_{\substack{i=-\infty \\ i \neq 0}}^{\infty} \frac{2\alpha E_{loc}}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0|i|^3\sigma^3} = E_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\alpha E_{loc}}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 i^3\sigma^3} = \\ &= E_0 + \frac{\zeta(3)\alpha E_{loc}}{\pi\epsilon_f\epsilon_0\sigma^3} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ahol  $\zeta(3) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} = 1,202057$  a Riemann-féle  $\zeta$  függvény. (3.5) egyenletből  $E_{loc}$  kifejezhető, így

$$E_{loc} = \frac{1}{1 - \frac{\zeta(3)\alpha}{\pi\epsilon_f\epsilon_0\sigma^3}} E_0 = \frac{1}{1 - \frac{\alpha^*\zeta(3)}{\pi\epsilon_f\epsilon_0}} E_0 \quad (3.6)$$

ahol  $\alpha^* = \frac{\alpha}{\sigma^3}$  redukált polarizálhatóság. Így a végtelen hosszú láncban az indukált dipólusmomentum:

$$p = \alpha E_{loc} = \frac{\alpha}{1 - \frac{\alpha^*\zeta(3)}{\pi\epsilon_f\epsilon_0}} E_0 \quad (3.7)$$

Amennyiben csak két részecske helyezkedik el a hordozó folyadékban, az indukált dipólusokra a külső elektromos térrel párhuzamos head-to-tail konfigurációt feltételezve, a közöttük ébredő erő a következőképpen adható meg:

$$F_d = \frac{3p^2}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0\sigma^4} \quad (3.8)$$

Ahol a nevezőben lévő távolság ( $\sigma$ ) megegyezik a két részecske távolságával, ami az összeérő részecskék esetén a részecskék átmérője. Amennyiben nem csak kettő, hanem végtelen sok részecskéből áll a lánc, a fellépő erő felírható oly módon, hogy egy kijelölt részecskétől tekintjük az összes erőt, figyelembe véve a részecskék közötti távolságokat:

$$F = \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{3p^2}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0(n\sigma)^4} = \frac{3p^2\zeta(3)}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0(\sigma)^4} \quad (3.9)$$

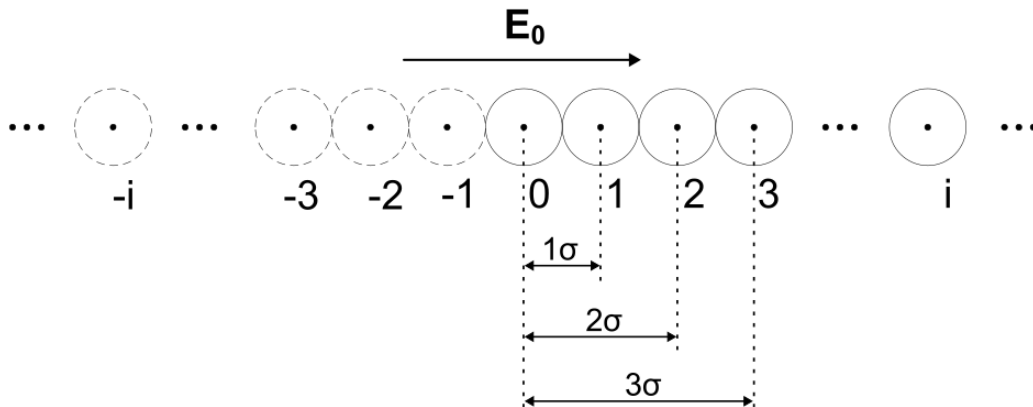
ahol a távolság egyre növekvő,  $n\sigma$  alakot vesz fel.

A formulát Anderson származtatta, mely kifejtve a következő alakot veszi fel [110]:

$$F = \frac{3p^2\zeta(3)}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0(\sigma)^4} = \frac{0,375 \pi \zeta(3)\beta^2\epsilon_f\epsilon_0 E^2\sigma^2}{\left(1 - \zeta(3)\frac{\beta}{2}\right)^2} \quad (3.10)$$

ahol  $\beta = \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f}$ .

Véges hosszúságú lánc esetén (3.9) egyenlet korlátozottan használható, nagy elemszám esetén fokozatosan közelíti a végtelen összegzésből származó eredményt. A nagyon kis rést alkalmazó eszközöknél előfordulhat, hogy a formula korlátozottan alkalmazható, így levezettem a véges elemszám esetén fellépő erő egyenletét.



3.1. ábra Részecskék közötti távolság értelmezése

Véges elemszám esetén figyelembe kell venni az egyes részecskék egymásra ható erejét. (3.8) egyenletből kiindulva, figyelembe véve a szimmetria miatt kieső erőket felírható az  $N = 3$  részecskéből álló lánc esetén az erő:

$$F_{N=3} = F(1,2) + F(1,3) = \frac{3p^2}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0\sigma^4} + \frac{3p^2}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0(2\sigma)^4} =$$

$$= \frac{3p^2}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0\sigma^4} \left( \frac{1}{1} + \frac{1}{2} \right)^4 \quad (3.11)$$

ahol  $F(1,2)$  az egyes és kettes részecskék,  $F(1,3)$  az egyes és hármas részecskék között fellépő erőt jelöli. Az egyenlet átrendezésében kiemeltem minden lehetséges tagot, így végül a zárójeles részben csak a részecskeátmérő szorzótényezői maradtak, melyek a részecskeátmérővel együtt határozzák meg a részecskék távolságát (3.1. ábra). Belátható, hogy egyes részecskék között fellépő erők számításánál a fellépő erő nagyságát csak a részecskék közötti távolság befolyásolja, így ezeket fogom figyelembe venni a következőkben. (3.12 egyenlet mutatja az erők alakulását  $N = 6$  elemszám esetén:

$$F_{N=6} = F(1,2) + F(1,3) + F(1,4) + F(1,5) + F(1,6) +$$

$$+ F(2,4) + F(2,5) + F(2,6) +$$

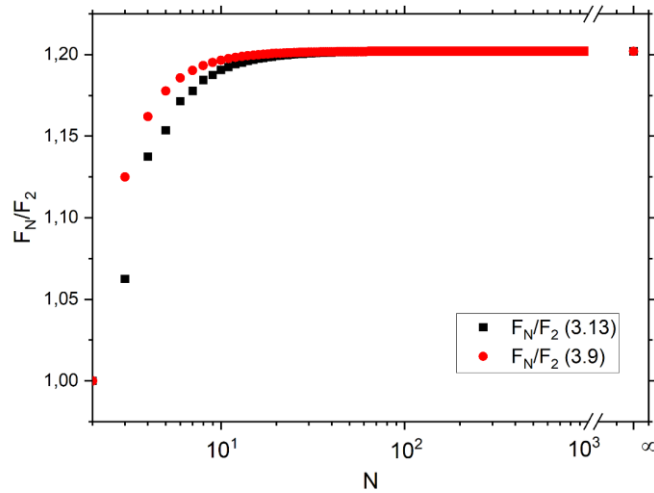
$$+ F(3,6) \quad (3.12)$$

$$1 \cdot 1\sigma \quad 2 \cdot 2\sigma \quad 3 \cdot 3\sigma \quad 2 \cdot 4\sigma \quad 1 \cdot 5\sigma$$

Az egyenlet alatt a részecskék közötti erőt meghatározó távolságok száma látható, tehát például  $3\sigma$  távolság háromszor szerepel az erők meghatározásánál. Több elemszámot megvizsgálva megfigyelhető a szimmetria, melynek alapján felírtam a véges elemszámú láncban fellépő erőt elektroteológiai folyadékban:

$$F_{véges} = \frac{3p^2}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0\sigma^4} \left( \sum_{i=1}^{\left[\frac{N}{2}\right]} i \frac{1}{i^4} + \sum_{i=\left[\frac{N}{2}\right]}^N (N-i) \frac{1}{i^4} \right) \quad (3.13)$$

Belátható, hogy az egyre távolabbi részecskék a vizsgált részecskére egyre kisebb hatással vannak, így (3.13) egyenletnek tartania kell (3.9) egyenletből származó értékekhez.



3.2. ábra A végtelen (3.9) és véges (3.13) láncokra vonatkozó formulák alkalmazása növekvő elemszám esetén, redukálva a két részecske között fellépő erővel

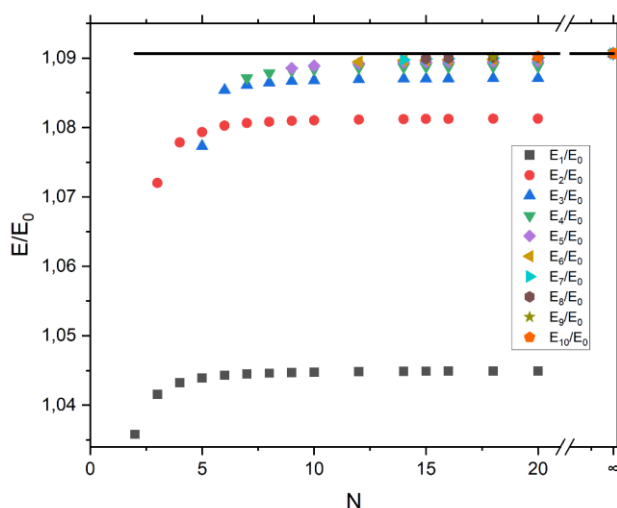
3.2. ábra mutatja hogyan alakul a láncokban ható erő, ha különböző elemszámok esetén alkalmazzuk a végtelen láncra (3.9) és a véges láncra (3.13) vonatkozó formulákat. Az ábra függőleges tengelyén a két dipólus közötti erővel van redukálva a különböző elemszámok esetén ható erő. Látható, hogy a véges láncra vonatkozó formula esetén gyorsabban tart az erő a végtelen láncban ébredő erőhöz, de körülbelül  $N \approx 15$  részecskeszámától már a (3.13) egyenlet is minimális eltérést mutat a végtelen sorhoz képest.

(3.13) egyenlet a véges láncban ható erő számítására csak abban az esetben alkalmazható, ha eltekintünk attól, hogy a véges láncban a lokális erőtér sem számítható (3.6) egyenlet alapján. Véges számú elemből álló lánc esetén a lokális erőtér (3.5) egyenlet alapján egyedi összegzés szerint számítható. Minden tagnál (eltekintve a szimmetriától) más lesz az erőtér, mely ráadásul a tagok számától függően is változik [111], és  $N$  tag esetén  $[N/2]$  egyenletből álló egyenletrendszer megoldásával lehet meghatározni. 3.1. táblázat mutatja a lokális erőterek nagyságát, normálva a külső  $E_0 = 10^5$  V/m térerőséggel  $\sigma = 10^{-6}$  m részecskeátmérő,  $\epsilon_p = 4$  és  $\epsilon_f = 2,7$  esetén. Látható, hogy a szimmetria miatt a lánc két végéből indulva ugyanazok az értékek, így az elemszám függvényében való ábrázolásnál 3.3. ábra csak a lánc egyik felében lévő értékek láthatók. Megfigyelhető, hogy a lánc szélén lévő (pl. egyes és kettes) részecskéknél a lokális tér ilyen kis elemszámok esetén nem közelít a végtelen láncban

lévő erőter (fekete vonal) nagyságához, míg a véges lánc közepén lévő részecskék esetén igen.

3.1. táblázat Lokális erőterek  $N = 2 \dots 5$  elemszámok esetén

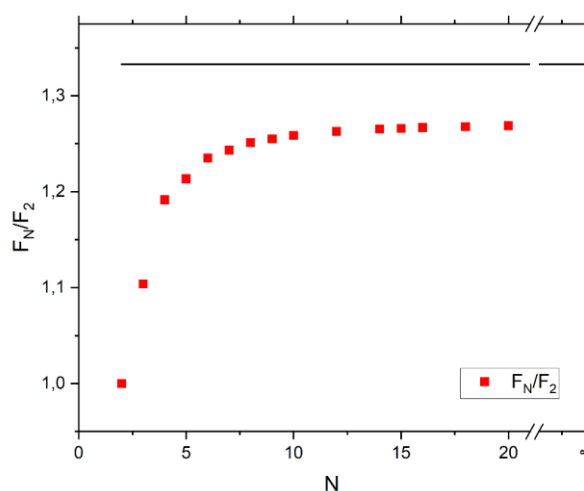
| N | $E_1$   | $E_2$   | $E_3$   | $E_4$   | $E_5$   |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2 | 1,03581 | 1,03581 |         |         |         |
| 3 | 1,04157 | 1,07202 | 1,04157 |         |         |
| 4 | 1,04326 | 1,07784 | 1,07784 | 1,04326 |         |
| 5 | 1,04392 | 1,07934 | 1,07731 | 1,07934 | 1,04392 |



3.3. ábra Lokális erőter értéke normálva a külső erőterrel az elemszám függvényében

Amennyiben a lokális erőter változását is figyelembe vesszük, úgy (3.13) egyenletben  $p^2$  dipólusmomentum nem írható ebben a formában, hanem minden részecske között ható erő számításánál eltérő  $p_1 \cdot p_2$  szorzattal kell helyettesíteni. Kis elemszámokra, normálva a két részecske között ható erővel 3.4. ábra mutatja az ER láncban ható erőket, figyelembe véve a véges láncban a lokális erőter változását is. A fekete vonal mutatja a végtelen láncban ható erőt. Látható, hogy ilyen elemszámok esetén az erő nem közelíti meg a végtelen láncban hatót, ami a (3.12) egyenletből adódik. Itt látható, hogy minden elemszám esetén az 1-es részecske, és a másik részecskék által létrehozott erőből van a legtöbb, majd azokból, ahol kettes részecske szerepel stb., így ezek nagy súllyal bírnak

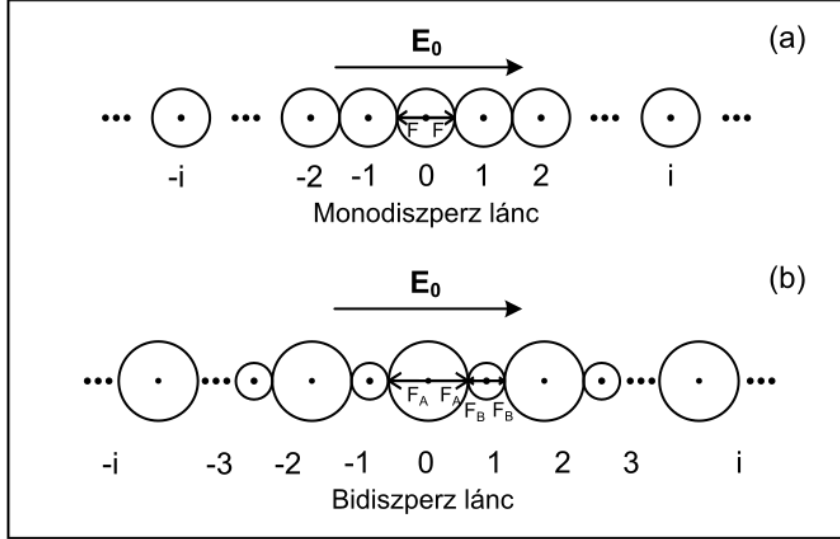
az összegben. Az egyes részecskénél a lokális erőter 3.3. ábra alapján szintén nem tartanak a végtelen láncban lévő lokális erőterhez, így az erő számításánál, ahol a lokális erőter szorzótényezőként szerepel ((3.7) – (3.10) egyenletek), azokban az esetekben, ahol az egyes részecske részt vesz az erő számításánál, kisebb értékeket kapunk, mint a végtelen láncban várnánk. Ennek eredménye a 3.4. ábra, ahol a végtelen láncban ható erőt nem nagyon lassan közelíti a véges láncban ható erő.



3.4. ábra Véges és végtelen ER láncokban ható erők a két részecske közötti erővel normálva

## 3.2 Bidiszperz lánc

A valós rendszerek esetén a részecskék mérete enyhe diszperzitást mutat, azonban a legtöbb felhasználáshoz ennek pontos figyelembevételétől eltekintenek, és a folyadék, vagy az ahhoz felhasznált összetevő gyártója által megadott átlagos szemcsenagysággal lehet számolni. Abban az esetben, ha legalább kettő fajta részecskét alkalmazunk, a méretük eltérő lehet. A superfiniselés során az ER hatást létrehozó részecskék mellett abrazív részecskéket is alkalmaznak, amik az anyagot megmunkálják. A 3.5. ábra mutatja a két különböző, egymást váltogató részecskéből álló (bidiszperz) láncot, valamint az eddig tárgyalt, egy részecskeméretet tartalmazó (monodiszperz) láncot, valamint a részecskénél ható erőket.



3.5. ábra Mono- és bidiszperz lánc

### 3.2.1 Bidiszperz lánc lokális elektromos erőtere

A bidiszperz lánc esetén ható erők számításához meg kell vizsgálni a lokális elektromos erőtereket, melyekből a szimmetria miatt kettő különböző alakul ki: egy az  $A$  részecskénél, egy a  $B$  részecskénél. A nulladik részecskétől indulva összegezhető helyi erőter, mely esetén az  $A$  részecskénél a következő levezetés alapján kaptam meg az erőteret:

$$\begin{aligned}
 E_{loc,A} &= E_0 + \sum_{\substack{i=-\infty \\ i \neq 0}}^{\infty} \frac{2\alpha E_{loc,i}}{4\pi\epsilon_f\epsilon_0|i|^3a^3} = E_0 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\alpha E_{loc,i}}{4\pi\epsilon_f\epsilon_0|i|^3a^3} = \\
 &= E_0 + (\pi\epsilon_f\epsilon_0)^{-1} \alpha_B^* E_{loc,B} \left( \frac{1}{1^3} + \frac{1}{3^3} + \frac{1}{5^3} + \dots \right) + \\
 &+ (\pi\epsilon_f\epsilon_0)^{-1} \alpha_A^* E_{loc,A} \left( \frac{1}{2^3} + \frac{1}{4^3} + \frac{1}{6^3} + \dots \right) = \\
 &= E_0 + (\pi\epsilon_f\epsilon_0)^{-1} \alpha_B^* E_{loc,B} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^3} + \\
 &+ (\pi\epsilon_f\epsilon_0)^{-1} \alpha_A^* E_{loc,A} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{(2l)^3} =
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$= E_0 + (\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \frac{7}{2} \alpha_B^* \zeta(3) E_{loc,B} + (\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \frac{1}{2} \alpha_A^* \zeta(3) E_{loc,A}$$

ahol a karakterisztikus távolság  $a = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2}$ , és  $\sigma_A$  az  $A$  részecske,  $\sigma_B$  az  $B$  részecske átmérője, a redukált polarizálhatóságok az  $A$  és  $B$  részecskékre rendre  $\alpha_A^* = \frac{\alpha_A}{a^3}$  és  $\alpha_B^* = \frac{\alpha_B}{a^3}$ .

(3.14) egyenlethez hasonló egyenlet kapható  $E_{loc,B}$  esetére, ha  $B$  részecskénél kezdődik az összegzés.

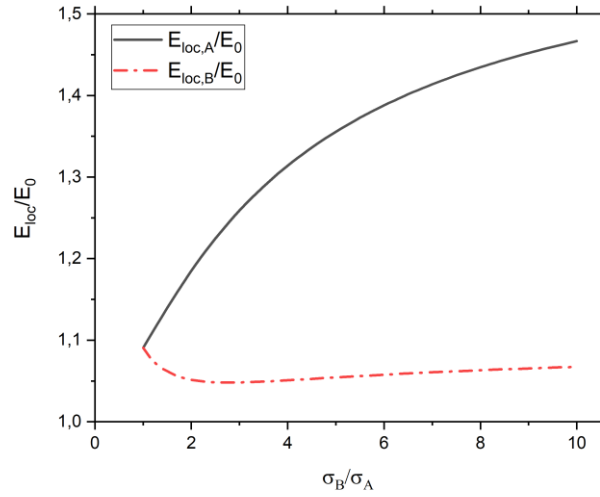
A két egyenlet egy rendszert alkot:

$$\begin{aligned} \left(2\varepsilon_f - (\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \alpha_A^* \zeta(3)\right) E_{loc,A} - (\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} 7 \alpha_B^* \zeta(3) E_{loc,B} &= 2E_0 \\ -(\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} 7 \alpha_A^* \zeta(3) E_{loc,A} + \left(2\varepsilon_f - (\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \alpha_B^* \zeta(3)\right) E_{loc,B} &= 2E_0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Az egyenletrendszer megoldásaként a helyi térerősségek:

$$\begin{aligned} E_{loc,A} &= \frac{2 + 6(\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \alpha_B^* \zeta(3)}{2 - (\alpha_A^* + \alpha_B^*)(\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \zeta(3) - 24(\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-2} \alpha_A^* \alpha_B^* \zeta^2(3)} E_0 \\ E_{loc,B} &= \frac{2 + 6(\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \alpha_A^* \zeta(3)}{2 - (\alpha_A^* + \alpha_B^*)(\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-1} \zeta(3) - 24(\pi \varepsilon_f \varepsilon_0)^{-2} \alpha_A^* \alpha_B^* \zeta^2(3)} E_0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

(3.16) egyenletrendszerben  $\sigma = \sigma_A = \sigma_B$  helyettesítve visszkapjuk a monodiszperz láncra vonatkozó (3.6) egyenletet. 3.6. ábra mutatja hogyan alakulnak a helyi erőterek a külső térerősséggel redukálva, ha a bidiszperz láncot alkotó részecskék aránya függvényében ábrázoljuk őket. A számításokhoz mindkettő részecske esetén  $\epsilon_p = 4$ , a folyadék esetén  $\epsilon_f = 2,7$  permittivitást alkalmaztam, az elektromos erőter  $E_0 = 10^5$  V/m volt, az  $A$  részecske átmérője  $\sigma_A = 10^{-6}$  m változatlan maradt, míg  $\sigma_B$  az arány szerint növekedett. Arányaiban a kisebbik,  $A$  részecskénél lévő lokális elektromos erőter növekszik jobban, ami a nagyobb,  $B$  részecske átmérőjéből következő erősebb tér hatása.



3.6. ábra A helyi erőkerek alakulása bidiszperz lánc esetén a részecskék arányának függvényében

Amennyiben  $\sigma_B/\sigma_A$  arányt növeljük, a helyi térerősségek egy határérték felé tartanak. Feltételezve, hogy  $\sigma_B/\sigma_A \rightarrow \infty$ , A és B részecskére vonatkozó polarizálhatóság:

$$\alpha_A^* = \pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{(\epsilon_p + 2\epsilon_f)2} \epsilon_f \frac{2\sigma_A}{\sigma_A + \sigma_B} = \alpha_\epsilon \frac{2\sigma_A}{\sigma_A + \sigma_B} \quad (3.17)$$

$$\alpha_B^* = \pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{(\epsilon_p + 2\epsilon_f)2} \epsilon_f \frac{2\sigma_B}{\sigma_A + \sigma_B} = \alpha_\epsilon \frac{2\sigma_B}{\sigma_A + \sigma_B}$$

ahol  $\alpha_\epsilon = \pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{(\epsilon_p + 2\epsilon_f)2} \epsilon_f$ . Ebben az esetben a redukált polarizálhatóság határértékei

$$\lim_{\sigma_A/\sigma_B \rightarrow \infty} \alpha_A^* = 0 \quad (3.18)$$

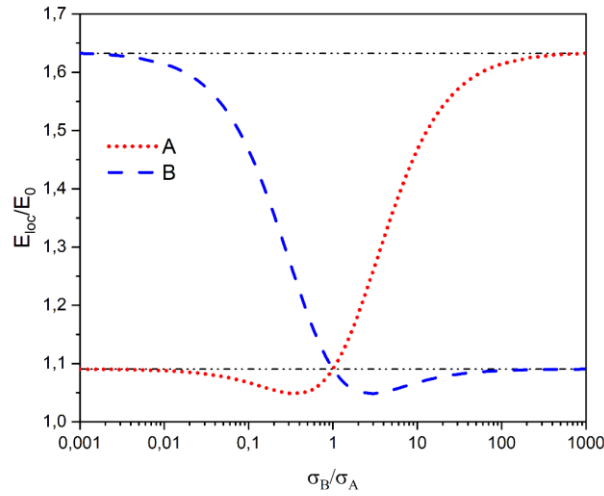
$$\lim_{\sigma_A/\sigma_B \rightarrow \infty} \alpha_B^* = 8\alpha_\epsilon$$

Ezt felhasználva kifejezhető az  $E_{loc}/E_0$  hányados határértéke:

$$\left( \frac{E_{loc,A}}{E_0} \right)^\infty = \frac{1 + 24\alpha_\epsilon \zeta(3)}{1 - \frac{\alpha_\epsilon \zeta(3)}{\pi\epsilon_0 \epsilon_f}} \quad (3.19)$$

$$\left(\frac{E_{loc}, B}{E_0}\right)^\infty = \frac{1}{1 - \frac{\alpha_\epsilon \zeta(3)}{\pi \epsilon_0 \epsilon_f}}$$

3.7. ábra mutatja az extrém nagy  $\sigma_B/\sigma_A$  arányok esetében a helyi térerősségeket az eddig is alkalmazott paramétereket alkalmazva. Látható, hogy mind  $A$  részecskénél, mind  $B$  részecskénél a helyi térerősség eléri az elméletben meghatározott határértéket (fekete vonalak).



3.7. ábra A helyi erőterek alakulása bidiszperz lánc esetén a részecskék arányának függvényében, extrém esetekben

### 3.2.2 Bidiszperz láncban ható erők

A vizsgált, periodikusan változó bidiszperz láncban ható erő ugyanúgy befolyásolja az ER folyadék alkalmazhatóságát, mint a monodiszperz lánc esetében. A bidiszperz láncban ható erőket hasonlóan az monodiszperz lánc esetéhez a részecskék egymásra hatásából lehet levezetni.

$$\begin{aligned}
 F_{bi} = & F(1,2) + F(1,3) + F(1,4) + F(1,5) + F(1,6) + F(1,7) + \dots \\
 & + F(2,4) + F(2,5) + F(2,6) + F(2,7) + F(2,8) + \dots \\
 & + F(3,6) + F(3,7) + F(3,8) + F(3,9) + \dots \\
 & + F(4,8) + F(4,9) + F(4,10) + \dots
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

$$+F(5,10) + F(5,11) + \dots$$

$$+F(6,12) + \dots$$

$$1a \quad 2a \quad 3a \quad 4a \quad 5a \quad 6a$$

(3.20) egyenlet mutatja a részecskék között párosával ható erőket, illetve az egyes erők esetén a részecskék közötti távolságot  $\left(a = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2}\right)$ . Amennyiben  $N = 1,3,5 \dots$  részecskénél az átmérő  $\sigma_A$ ,  $N = 2,4,6 \dots$  részecskénél  $\sigma_B$ , és a dipólusmomentumok rendre  $p_1$  és  $p_2$ , valamint a kék színű erők jelölik a  $p_1 p_1$ , a piros színűek a  $p_2 p_2$ , a fekete színű erők a  $p_1 p_2$  dipólusmomentum szorzatokat, a láncban ható erő levezethető:

$$F_{bi} = \frac{3}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0} \left( \frac{p_1 p_2}{a^4} + \frac{p_1 p_1}{(2a)^4} + \frac{p_2 p_2}{(2a)^4} + 3 \frac{p_1 p_2}{(3a)^4} + 2 \frac{p_1 p_1}{(4a)^4} + 2 \frac{p_2 p_2}{(4a)^4} + \dots \right) \quad (3.21)$$

Az egyenletből kiemelhető a dipólusmomentumok szorzata és  $a$  távolság, meghagyva a zárójeles kifejezésekben lévő távolságokat:

$$\begin{aligned} F_{bi} = & \frac{3p_1 p_2}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \left( 1 + \frac{1}{3^3} + \frac{1}{5^3} + \dots \right) + \\ & + \frac{3p_1 p_1}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \left( \frac{1}{2^4} + 2 \frac{1}{4^4} + 2 \frac{1}{4^4} + \dots \right) + \\ & + \frac{3p_2 p_2}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \left( \frac{1}{2^4} + 2 \frac{1}{4^4} + 2 \frac{1}{4^4} + \dots \right) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Az összegeket végtelenig összegezve, felhasználva a Riemann-féle számot kapható meg a végtelen hosszú, heterogén láncban ható erő:

$$F_{bi} = \frac{3p_1^2}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \frac{\zeta(3)}{2^4} + \frac{3p_2^2}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \frac{\zeta(3)}{2^4} + \frac{3p_1 p_2}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \left( \zeta(3) - \frac{\zeta(3)}{2^3} \right) \quad (3.23)$$

A megadott (3.23) egyenlet végtelen hosszú bidiszperz lánc esetén ad pontos eredményt. A véges hosszúságú lánc esetén (3.20) egyenlet szűkítéséből vezethető le, mely hasonló a monodiszperz lánc esetén alkalmazott véges összegzéshez. (3.24 egyenlet mutatja egy  $N = 4$  tagból álló bidiszperz láncban ébredő erőket, ahol az  $a$  távolságok száma látható az egyenlet megfelelő tagjai alatt:

$$F_{Bi,N=4} = F(1,2) + F(1,3) + F(1,4) + \\ + F(2,4) \quad (3.24)$$

$$1 \cdot 1a \quad 2 \cdot 2a \quad 1 \cdot 3a$$

Az erők összegzése ebben az esetben:

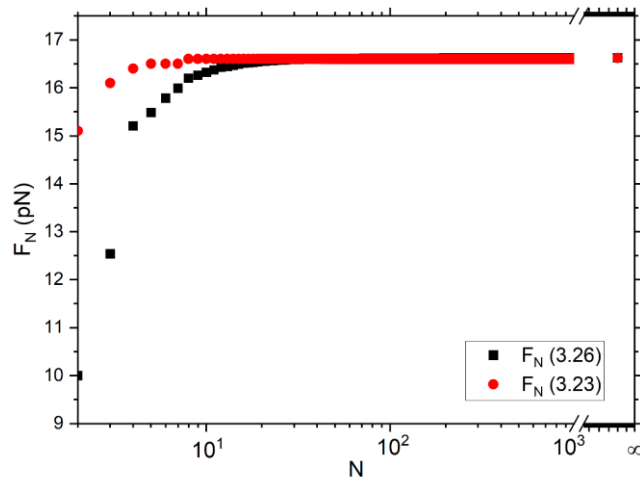
$$F_{Bi,N=4} = \frac{3}{2\pi\epsilon_f\epsilon_0} \left( \frac{p_1 p_2}{a^4} + \frac{p_1^2}{(2a)^4} + \frac{p_2^2}{(2a)^4} + \frac{p_1 p_2}{(3a)^4} \right) \quad (3.25)$$

Hasonló, nagyobb elemszámokra felírt egyenletek alapján már ki lehet fejezni a véges bidiszperz láncokban ható erőt:

$$F_{Bi,véges} = \frac{3p_1 p_2}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \left( \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} k \frac{1}{k^4} + \sum_{k=\lfloor \frac{N}{2} \rfloor + 1}^N (N-k) \frac{1}{k^4} \right) + \\ + \frac{3(p_1^2 + p_2^2)}{\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^4} \left( \sum_{l=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} l \frac{1}{l^4} + \sum_{l=\lfloor \frac{N}{2} \rfloor + 1}^N (N-l) \frac{1}{l^4} \right) \quad (3.26)$$

ahol  $k = 1, 3, 5 \dots$  és  $l = 2, 4, 6 \dots$

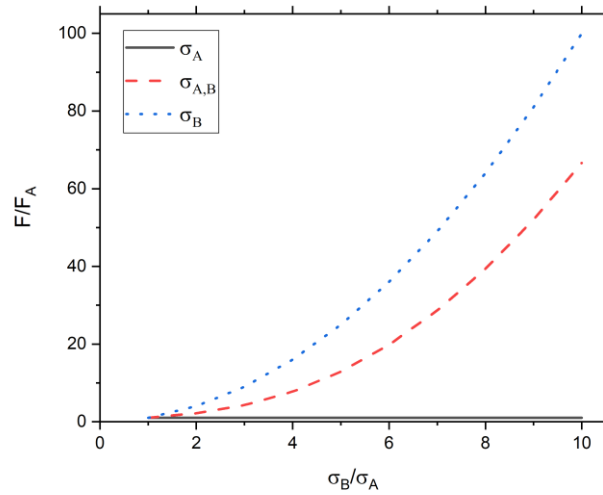
Felhasználva (3.16) egyenletet a lokális erőterekre, és behelyettesítve (3.26) egyenletbe, a bidiszperz láncokban ható erők számíthatók. A számítás során  $E = 10^5$  V/m nagyságú erőteret,  $\sigma_A = 1 \cdot 10^{-5}$  m és  $\sigma_B = 2 \cdot 10^{-5}$  m átmérőjű és  $\epsilon_p = 10$  dielektromos permittivitású részecskéket, valamint  $\epsilon_f = 2,7$  dielektromos permittivitású folyadékot feltételezve a 3.8. ábra mutatja egyre növekvő elemszámok esetén a végtelen ((3.23 egyenlet) és véges ((3.26 egyenlet) bidiszperz láncokra kapott formulák értékét. Megfigyelhető, hogy a monodiszperz láncokhoz hasonlóan, itt is a végtelen lánc esetén érvényes tart formula gyorsabban a végtelen láncban ( $N = \infty$ ) ható erőhöz, de körülbelül  $N = 35$  elemszám esetén már minimális az eltérés. Kis elemszámok esetén tehát a végtelen láncra vonatkozó összefüggés túlbecsüli a láncban ható erőt.



3.8. ábra A végtelen (3.23) és véges (3.26) láncokra vonatkozó formulák alkalmazása véges elemszámra, növekvő elemszám esetén bidiszperz láncoknál

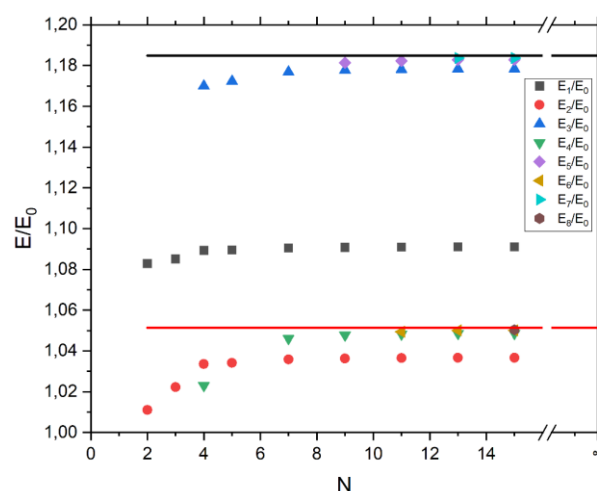
A kapott eredmények alapján összehasonlíthatók a monodiszperz és bidiszperz láncokban ható elvi erők. A részecskenagyság hatásának vizsgálatához számolást végeztem, amely során a külső elektromos térerősséget  $E_0 = 10^5$  V/m-nek, a folyadék, és a kettő különböző részecske dielektromos állandóit rendre  $\epsilon_f = 2,7$ ,  $\epsilon_{pA} = \epsilon_{pB} = 2,7$ -nek, az első részecske változatlan átmérőjét  $\sigma_A = 1 \cdot 10^{-6}$  m,  $A$  és  $B$  részecskék átmérőjének arányát 1-től 10-ig választottam.

Az eredményeket a 3.9. ábra mutatja, ahol  $\sigma_A$  és  $\sigma_B$  jelöli a csak  $A$ , illetve  $B$  részecskékből álló láncok erejét,  $\sigma_{A,B}$  a bidiszperz láncban ható erőket. Az erőket a csak  $\sigma_A$  átmérővel rendelkező részecskékből álló láncban lévő erővel redukáltam. Látható, hogy a vegyes, két különböző szemcsenagyságú részecskékből álló láncban ható erő azon erők közé esik, melyek csak egyik, vagy csak másik részecskékből állnak. Természetesen a 3.5. ábra által mutatott, és a fejezetben tárgyalt bidiszperz lánc egyszerűsített modell, mely a véletlenszerű keveredést nem veszi figyelembe.

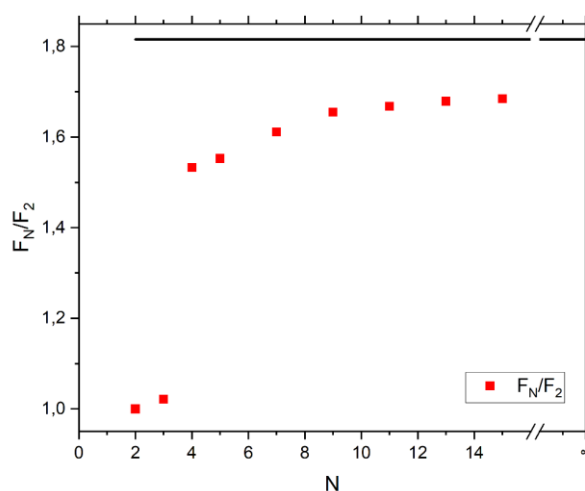


3.9. ábra Végtelen mono- és bidiszperz láncokban ható redukált erők a részecskeátmérők arányának függvényében

A monodiszperz, véges láncra vonatkozó formulához hasonlóan a bidiszperz véges láncra kapott (3.26) egyenlet sem veszi figyelembe a lokális térerősség eltérését a különböző részecskékénél. A véges bidiszperz láncban itt is minden  $N$  elemhez  $[N/2]$  darab egyenletből álló egyenletrendszer írja le a helyi térerősségeket, melyeket egyesével kell megoldani. Kis elemszámokra elvégezve lokális térerősség számítását 3.10. ábra mutatja a külső  $E_0$  térerősséggel normált értékeket. A bidiszperz lánc esetén páratlan elemszám esetén szimmetrikus lesz a rendszer a középső elem felől nézve, így a részecskék felére vonatkozó lokális térerősségek láthatók az ábrán, pl.  $N = 15$  esetén  $E_{loc,2} = E_{loc,14}$ . Megfigyelhető, hogy a helyi térerősségek a két eltérő részecskeátmérő miatt a két, végtelen lánc esetén ható helyi térerősséghez tartanak, melyeket a fekete és piros vonalak jelölnek. Itt is, mint a monodiszperz lánc esetében a véges lánc végein elhelyezkedő részecskékénél lévő helyi térerősség nem tart a végtelen láncban lévő lokális térerősségekhez. Ennek folyományaként, mivel (3.20) egyenlet alapján az első részecske dipólusmomentuma szerepel legtöbbször a véges bidiszperz láncban ható erő számításában az erő sem fog a végtelen láncban hatóhoz tartani, amit 3.11. ábra mutat. Itt fekete vonal mutatja a végtelen bidiszperz láncban ható erőt.



3.10. ábra Lokális erőtér értéke normálva a külső erőtérrel az elemszám függvényében bidiszperz lánc esetén



3.11. ábra Végés és végtelen ER láncokban ható erők a két részecske közötti erővel normálva bidiszperz láncnál

### 3.2.3 Dielektromos állandó változása bidiszperz láncokban

Az elektorreológiai folyadékokra jellemző, hogy a külső elektromos erőtér hatására bekövetkező láncosodás mellett a folyadék relatív permittivitása is megváltozik. A permittivitás változás a bidiszperz láncok esetén egy egyszerűsített modell segítségével jellemezhető, a folyadék effektív permittivitásának leírása a Clausius-Mosotti egyenlet felhasználásával lehetséges:

$$\frac{\epsilon - \epsilon_f}{\epsilon + 2\epsilon_f} = \frac{4\pi}{3}(\rho_A \alpha_A + \rho_B \alpha_B + \rho_C \alpha_C) \quad (3.27)$$

ahol  $\epsilon$  a folyadék effektív permittivitása,  $\rho_i$  és  $\alpha_i$  rendre az  $i$ -edik alkotó sűrűsége és polarizálhatósága, az alsó indexek  $A$  részecskéket,  $B$  részecskéket és a vegyes láncot jelölik.

A részecskékre a következő egyensúlyi formula áll fenn:

$$N_A + N_B + N_C = N \quad (3.28)$$

ahol  $N$  a részecskék száma,  $N_i$  a részecskék száma  $i$  összetevőből. Ezt behelyettesítve (3.27) egyenletbe:

$$\frac{\epsilon - \epsilon_f}{\epsilon + 2\epsilon_f} = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{N_A}{V} \alpha_A + \frac{N_B}{V} \alpha_B + \frac{N_C}{V} \alpha_C \right) \quad (3.29)$$

ahol  $V$  a rendszer térfogata. Amennyiben  $x_A = \frac{N_A}{N}$ ,  $x_B = \frac{N_B}{N}$ ,  $x_C = \frac{N_C}{N}$  móltörtöket alkalmazunk, az egyensúlyi egyenlet a következő alakot veszi fel:

$$x_A + x_B + x_C = 1 \quad (3.30)$$

Ezt behelyettesítve (3.29) egyenletbe kapható:

$$\frac{\epsilon - \epsilon_f}{\epsilon + 2\epsilon_f} = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{N}{V} x_A \alpha_A + \frac{N}{V} x_B \alpha_B + \frac{N}{V} x_C \alpha_C \right) \quad (3.31)$$

(3.31) egyenlet zárójeles része egyszerűsíthető a következő redukciókkal:

$$\frac{\epsilon - \epsilon_f}{\epsilon + 2\epsilon_f} = \frac{4\pi}{3} \rho^* (x_A \hat{\alpha}_A + x_B \hat{\alpha}_B + x_C \hat{\alpha}_C) \quad (3.32)$$

ahol  $\rho^* = \rho \sigma_A^3$  a redukált sűrűség és  $\hat{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\sigma_A^3}$  ( $i = A, B, C$ ) a  $\sigma_A^3$  értékkel redukált polarizálhatóságok.

Amennyiben csak  $A$  vagy  $B$  részecske található a folyadékban, (3.32) egyenlet egyszerűsödik.  $A$  részecskére levezetve:

$$\frac{\epsilon - \epsilon_f}{\epsilon + 2\epsilon_f} = \frac{4\pi}{3} \rho^* (x_A \hat{\alpha}_A + x_C \hat{\alpha}_C) \quad (3.33)$$

Mivel itt  $x_A + x_C = 1 \rightarrow x_A = 1 - x_C$ , ezért

$$\frac{\epsilon_A - \epsilon_f}{\epsilon_A + 2\epsilon_f} = \frac{4\pi}{3} \rho^* ((1 - x_C) \hat{\alpha}_A + x_C \hat{\alpha}_{CA}) \quad (3.34)$$

ahol  $\hat{\alpha}_{CA} = \frac{\alpha_A}{\frac{1-4\alpha_A^*\zeta(3)}{\sigma_A^3}}$ , és  $\alpha_A^* = \frac{\alpha_A}{\sigma_A^3}$ . Bevezetve az egyszerűsítő jelölést:

$$L = \frac{4\pi}{3} \rho^* ((1 - x_C) \hat{\alpha}_A + x_C \hat{\alpha}_{CA}) \quad (3.35)$$

már megkapható az ER folyadék effektív permittivitása  $A$  részecskére:

$$\epsilon_A = \frac{\epsilon_f(1 + 2L)}{1 - L} \quad (3.36)$$

Csak  $B$  részecskét tartalmazó folyadék esetén hasonló eredményt kapunk, ahol  $\hat{\alpha}_{CB} = \frac{\alpha_B}{\frac{1-4\alpha_B^*\zeta(3)}{\sigma_A^3}}$  is  $A$  részecske átmérőjével van redukálva.

Bidiszperz lánc esetén a szimmetriát feltételezve ugyanannyi  $A$  és  $B$  részecske van a rendszerben, így

$$x_A + x_B + x_C = 1 \text{ és } x_A = x_B \rightarrow x_A = \frac{1 - x_C}{2} \quad (3.37)$$

Ezt helyettesítve (3.32) egyenletbe megkaptam:

$$\frac{\epsilon_v - \epsilon_f}{\epsilon_v + 2\epsilon_f} = \frac{4\pi}{3} \rho^* \left( \frac{(1 - x_C)}{2} (\hat{\alpha}_A + \hat{\alpha}_B) + x_C \hat{\alpha}_{Cv} \right) \quad (3.38)$$

ahol

$$\hat{\alpha}_{Cv} = \frac{0,5(2 + 6\tilde{\alpha}_B\zeta(3))\alpha_A + 0,5(2 + 6\tilde{\alpha}_A\zeta(3))\alpha_B}{\frac{2 - (\tilde{\alpha}_A + \tilde{\alpha}_B)\zeta(3) - 24\tilde{\alpha}_A\tilde{\alpha}_B\zeta^2(3)}{\sigma_A^3}} \quad (3.39)$$

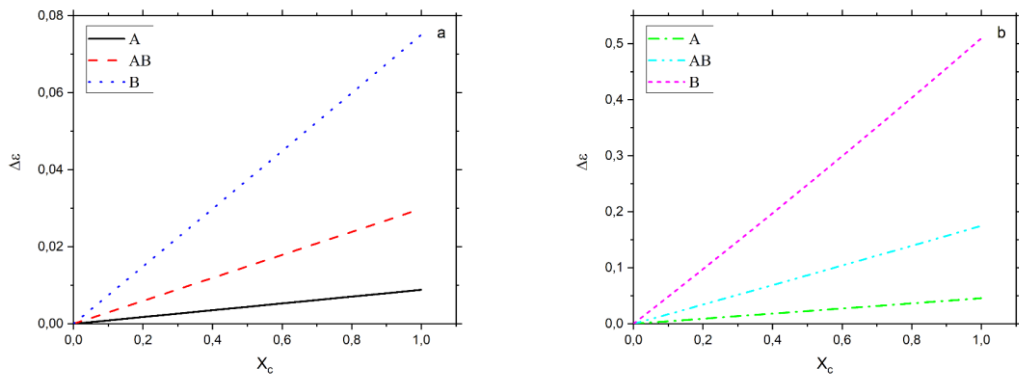
és  $\tilde{\alpha}_A = \frac{\alpha_A}{a^3}$ ,  $\tilde{\alpha}_B = \frac{\alpha_B}{a^3}$ .

Amennyiben a szokásos módon jelöljük

$$L = \frac{4\pi}{3} \rho^* \left( \frac{(1-x_c)}{2} (\hat{\alpha}_A + \hat{\alpha}_B) + x_c \hat{\alpha}_{cv} \right) \quad (3.40)$$

a bidiszperz lánc permittivitása:

$$\epsilon_{bi} = \frac{\epsilon_f \cdot (1 + 2 \cdot L)}{1 - L} \quad (3.41)$$



3.12. ábra ER folyadék permittivitásának változása mono-és bidiszperz esetben különböző részecskenagyságoknál és koncentrációknál

3.12. ábra mutatja az elméleti relatív dielektromos állandó változását különböző elektoreológiai folyadékok és a beláncosodott részecskék arányának függvényében. A számításhoz kettő különböző koncentrációjú folyadékot alkalmaztam, ahol  $A$  részecske koncentrációja a folyadékban  $\phi = 1$  (a ábra) és  $\phi = 5$  (b ábra) volt, a részecskék átmérőjét  $\sigma_A = 1 \cdot 10^{-6}$  m-nek és  $\sigma_A = 2 \cdot 10^{-6}$  m-nek, a folyadék és a részecskék permittivitását  $\epsilon_f = 2,7$ -nek és  $\epsilon_{p,A} = \epsilon_{p,B} = 4$ -nek, a térerősséget  $E_0 = 10^5$  V/m-nek választottam. Látható, hogy hasonlóan a láncban ható erők esetéhez a permittivitás változása a vegyes láncokban a csak egyik és másik részecskét tartalmazó láncoknál tapasztalt változás közé esik. A folyadék permittivitása nagyobb változást mutat a részecskék koncentrációjának növekedésével.

### 3.3 Összefoglalás

Munkámban elméleti számításokat végeztem és új formulákat vezettem be elektoreológiai folyadékoknál véges monodiszperz, illetve véges és végtelen bidiszperz láncok esetén.

A láncokban ható erők számításához a folyadékban ébredő belső térerősségekből és a részecskék indukált dipólusmomentumából indultam ki. Bemutattam hogyan számítható a klasszikus, végtelen láncban ható erő, majd bemutattam, hogy kis láncok esetén a végtelen láncokra vonatkozó formula korlátozottan alkalmazható. A véges, monodiszperz láncban ható erőre új egyenletet vezettem le, és megvizsgáltam, hogy növekvő elemszám esetén milyen értéket ad a végtelen láncban hatóhoz képest. Megállapítottam, hogy nagy elemszám esetén a két formula azonos eredményt ad, kis elemszámoknál ( $N < 15$ ) a véges láncban kisebb erők ébrednek az arra vonatkozó kifejezést használva.

Kettő különböző részecskeméretet váltakozva tartalmazó, bidiszperz láncban ható erőre is új formulát vezettem le mind a véges, mind a végtelen láncra. A két képletet összehasonlítva hasonló megfigyelést tettem, mind a monodiszperz esetben. Megvizsgáltam, hogyan hat a szemcseméret változása a bidiszperz, és az azt alkotó részecskékből álló monodiszperz láncok esetén. Megállapítottam, hogy a bidiszperz láncban ható erő a monodiszperz láncban ható erők között van.

Vizsgáltam a bidiszperz láncban a külső elektromos tér hatására bekövetkező dielektromos állandó változását a részecskeméretük függvényében. A permittivitás változását a Clausius-Mosotti egyenletből vezettem le. Az eredmények alapján arra következtettem, hogy a permittivitás változása a láncosodás mértékével, az elektoreológiai folyadék koncentrációjának növekedésével növekszik. Bidiszperz lánc esetén a permittivitás változása az azt alkotó, különböző részecskékből álló monodiszperz lánc esetén bekövetkező permittivitás-változás között helyezkedik el.

## 4. Hőmérsékletváltozás számítása elektorreológiai modell tengelykapcsolóban

Az elektorreológiai folyadékok tengelykapcsolóban való alkalmazása során a viszkozitás megváltozását használják ki, így a rendszerek irányításához (pl. tengelykapcsoló esetén az átvitt nyomaték meghatározása) szükséges ismerni a viszkozitás változását az azt befolyásoló paraméterek (pl. külső térerősség) függvényében. A viszkozitás a 2.3.1 fejezetben ismertetettek szerint a hőmérséklettel változik, ami korlátozza az irányíthatóságot, ha nincs figyelembe véve. Így szükséges ismerni az ER folyadékok viszkozitásának hőmérséklet-függését is a normál működés fenntartásához, mivel a hőmérséklettel változó viszkozitás elhangolja a rendszereket. A fejezetben így az elektorreológiai folyadékok viszkozitásának hőmérséklet-függésére kívánok matematikai összefüggést adni.

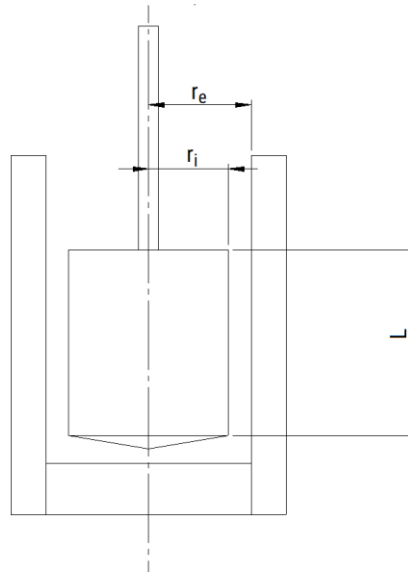
A folyadékok viszkozitásának hőmérséklet-függéséhez az Andrade egyenletet veszem alapul:

$$\eta = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (4.1)$$

ahol  $\eta$  a viszkozitás,  $T$  a hőmérséklet,  $A$  és  $B$  pedig anyagi jellemzők. Az ER folyadékoknál jellemző térerősség-függést az egyenlet nem veszi figyelembe, ezt meg kell határozni.

### 4.1 Anyagok és módszerek

Az ER folyadékok viszkozitásának hőmérsékleti függés vizsgálatához mérést végeztem egy Anton Paar Physica MCR301 rotációs viszkoziméterrel. A rotációs viszkoziméter alkalmas folyadékok viszkozitásának meghatározására két koncentrikusan elhelyezkedő, relatív elmozdulást végző felület (henger vagy tárcsa) között átadott nyomaték mérésével. Az MCR301 típus cserélhető elektorreológiai és magnetorreológiai egységgel szerelhető fel, így alkalmas ER és MR folyadékok külső (elektromos vagy mágneses) terekben történő viszkozitásának mérésére is. A különböző mérőtestek közül a méréshez egy hengeres mérőfejet alkalmaztam, melynek sematikus rajzát a fő befoglaló méretekkel a 4.1 ábra mutatja.



4.1. ábra Mérőfej sematikus ábrázolása

A mérőfej hossza  $L = 40,046$  mm, sugara  $r_i = 13,33$  mm, míg a mérőedény belső sugara  $r_e = 14,46$  mm volt.

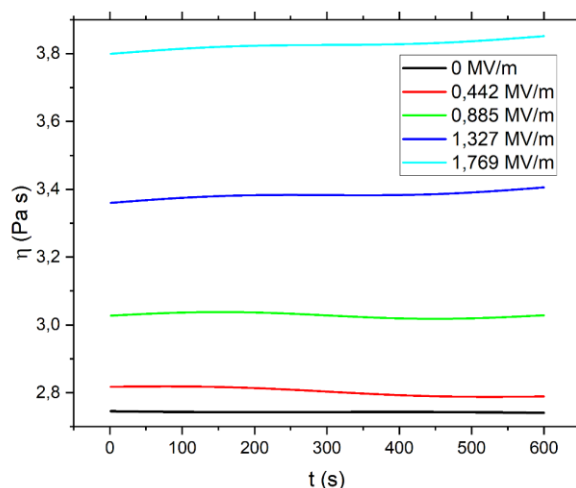
A vizsgálathoz saját készítésű ER folyadékokat használtam. Az alapfolyadék  $25^\circ\text{C}$ -on  $1000$  mPas viszkozitású szilikonolaj volt. A diszpergált fázis  $0,5 - 10$   $\mu\text{m}$  átmérőjű (a gyártói specifikáció szerint a részecskék 80%-ban  $1 - 5$   $\mu\text{m}$  közötti átmérővel rendelkeznek) szilícium-dioxid por volt. Három különböző koncentrációban készítettem el az elektreológiai folyadékot, 10, 20 és 30 (m/m) %-ban. A minták előkészítése során az első lépés a kézi keverés volt, majd a diszperzió 15 percre ultrahangos fürdőbe került, hogy az egyenletes eloszlás biztosított legyen. Ezután a minták vákuumba kerültek 10 perc időtartamra, hogy a keverésből származó esetleges légbuborékokat eltávolítsam, majd ezt követően kerültek a reométerbe.

A mintákat 10 K-enként  $293$  K -től  $343$  K -ig vizsgáltam,  $0$  V és  $2000$  V közötti  $500$  V feszültségű lépésekkel, állandó  $50 \frac{1}{\text{s}}$ -os nyírási sebesség mellett. Az alkalmazott térerősségek – figyelembe véve az  $1,13$  mm-es rést –  $0,442, 885, 1327$  és  $1769 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$  voltak.

## 4.2 Mérési eredmények és értékelésük

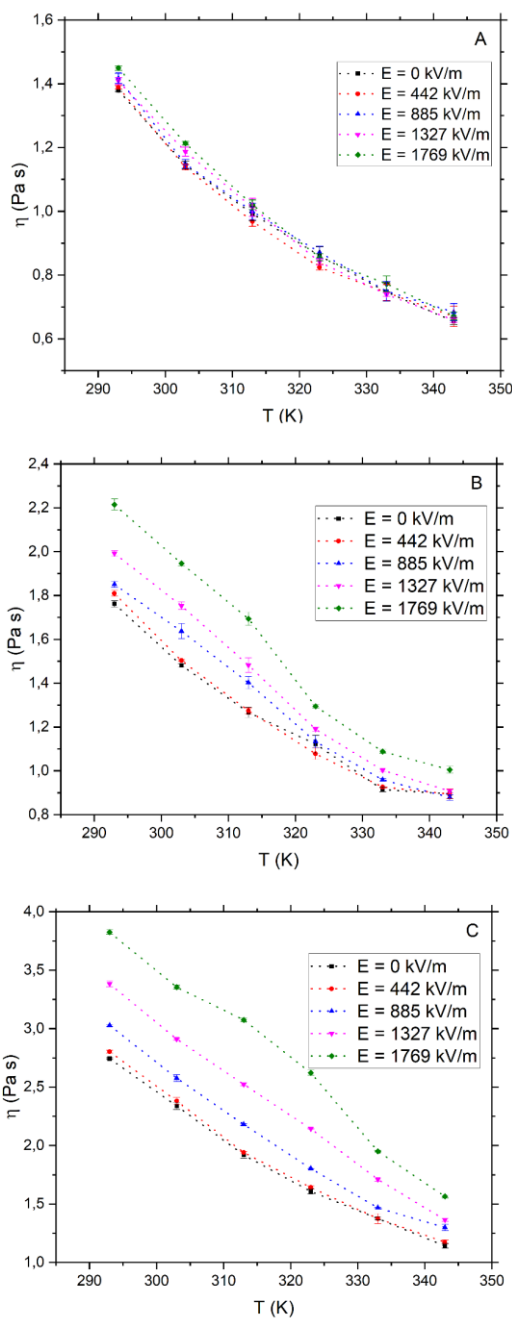
A minták a reométerbe kerülés után folyamatos keverés mellett kerültek temperálásra, majd a megfelelő hőmérséklet elérése után történtek a mérések. A mérések egy kettő perces, térerősség nélküli keverési ciklusból, egy tíz percig tartó, térerősséget alkalmazó mérési ciklusból, majd egy egyperces, térerősség nélküli keverési ciklusból álltak. A viszkozitás mérést a reométer másodpercenként végezte el. Egy-egy mérés után a

térerősség megváltoztatása után jött az újabb mérés. A mérési eredményekre egy példa a 4.2. ábra ábrán látható, mely a 30%-os diszperzió mérési eredményeit mutatja 293 K hőmérsékleten. A mérésekben csak kis változás látható az idő függvényében, azonban az egyes térerősségeken és hőmérsékleteken jól számítható átlagot adnak.



4.2. ábra Mérési eredmények különböző elektromos térerősségeknél,  $c=30\%$ -os elektorreológiai folyadék esetén  $T = 293$  K hőmérsékleten

A mérési eredmények átlagolása után minden elektorreológiai folyadék esetén minden hőmérséklet és térerősség esetén egy viszkozitási értéket tudtam rendelni. A mérési eredmények összefoglalását a 4.3 ábra mutatja. Az ábrákon megfigyelhető, hogy az elektromos térerősség és a koncentráció növekedésével növekszik, míg a hőmérséklet növekedésével csökken az ER folyadékok viszkozitása. Elmondható továbbá a mérési eredmények alapján, hogy az elektromos tér látszólagos viszkozitás növelő hatása a hőmérséklet növekedésével egyre csökken, amennyiben megfelelően nagy a koncentráció. Az ábrán megfigyelhetők a mérések szórásai is melyek mérete összevethető az ábrázolásnál használt szimbólumokkal.



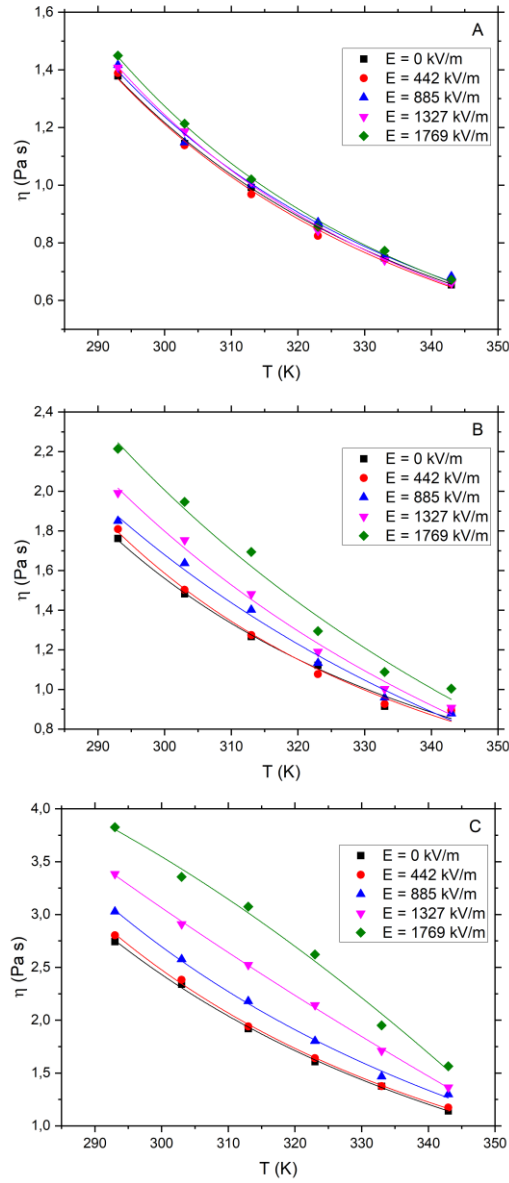
4.3. ábra Elektorreológiai folyadékok viszkozitása a hőmérséklet és térerősség függvényében (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)

A:  $c = 10$  m/m% B:  $c = 20$  m/m% C:  $c = 30$  m/m%

A már ismertettek szerint (4.1) egyenlet a viszkozitás változását nem írja le ER folyadékok esetén. A formula a hőmérséklettől való függésre is pontosabb értéket ad, ha a pre-exponenciális tagban is bevezetem a hőmérsékletfüggést:

$$\eta = (A_0 + A_1 T) e^{\frac{B}{T}} \quad (4.2)$$

ahol  $A_0, A_1$  és  $B$  anyagi jellemzők.



4.4. ábra Kiterjesztett Andrade egyenlet illesztése ER folyadékokra

A:  $c = 10$  m/m% B:  $c = 20$  m/m% C:  $c = 30$  m/m%

A mérési eredményekre (4.2) egyenlet alapján illesztett görbéket különböző térerősségek esetén a 4.4 ábra, az illesztett paramétereket 4.1. táblázat tartalmazza.

4.1. táblázat Illesztett paraméterek a kiterjesztett Andrade egyenlet esetében

| c (%) | 0 kV/m         |                |          | 442 kV/m       |                |          |
|-------|----------------|----------------|----------|----------------|----------------|----------|
|       | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | B        | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | B        |
| 10    | -1,49E-06      | 1,01E-05       | 1799,908 | -1,37E-05      | 9,13E-06       | 1829,205 |
| 20    | -6,18E-06      | 1,44E-05       | 1766,343 | -1,63E-05      | 1,12E-05       | 1848,838 |
| 30    | 0,28412        | -6,37E-04      | 978,8788 | 0,16622        | -3,53E-04      | 1114,562 |
| c (%) | 885 kV/m       |                |          | 1327 kV/m      |                |          |
|       | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | B        | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | B        |
| 10    | -1,23E-05      | 9,98E-06       | 1808,597 | 0,00101        | 7,54E-06       | 1782,574 |
| 20    | 0,46945        | -0,00108       | 732,9968 | 0,44423        | -0,00103       | 777,5878 |
| 30    | 0,51333        | -0,00119       | 855,7466 | 7,77006        | -0,02031       | 181,0192 |
| c (%) | 1769 kV/m      |                |          |                |                |          |
|       | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | B        |                |                |          |
| 10    | -3,26E-06      | 7,98E-06       | 1883,649 |                |                |          |
| 20    | 0,74671        | -0,0018        | 679,9207 |                |                |          |
| 30    | 60,6513        | -0,16462       | -346,657 |                |                |          |

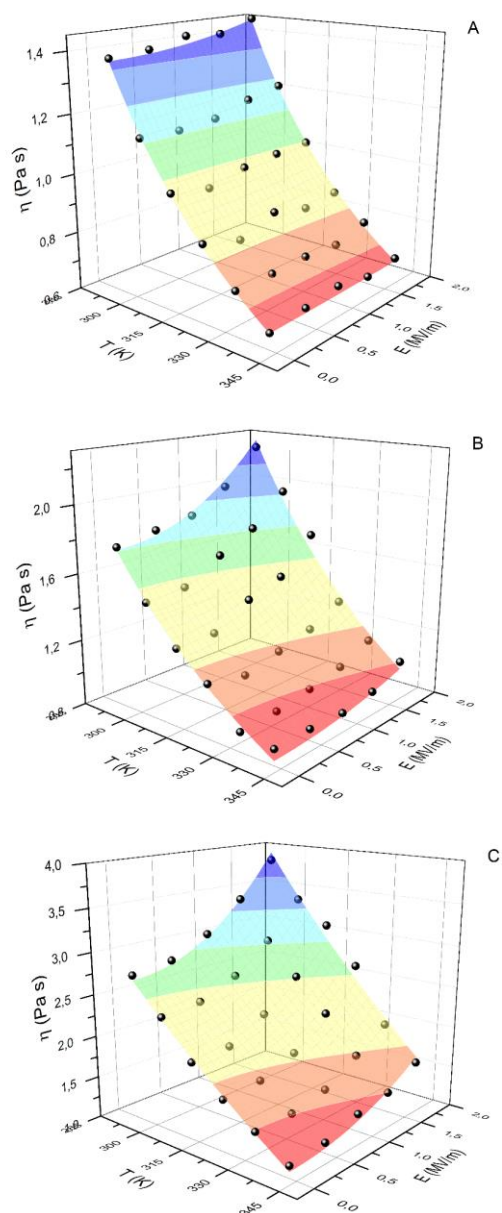
Az illesztett görbék jól korrelálnak a mérési adatokkal (a determinációs együttható legkisebb értéke 0,97), így pontosabban leírhatóvá tettem az ER folyadékok viselkedését a hőmérséklet függvényében. A modellből következik, hogy minden alkalmazandó folyadékra külön meg kell határozni a paramétereket, és utána felhasználhatók a viszkozitás leírására.

Az eddig vizsgált esetekben csak a viszkozitás hőmérséklet-függésének leírását tárgyaltam, azonban a térerősség-függés fontos szerepet játszik az alkalmazásokban. Az elektromos térerősség és a hőmérséklet hatása a viszkozításra függ a folyadék koncentrációjától, és a két hatás egymással ellentétesen változtatja a viszkozitást. Ezáltal a térerősség-függés és a hőmérséklet-függés együttes leírása is fontos a különböző felhasználásokhoz.

(4.2) egyenlet további bővítésével a viszkozitás változásának térerősség-függése is leírható. A kiterjesztést az elektromos tér négyzetével végezve szimmetria okokból a viszkozitás az elektromos tér függésében csak páros hatványkitevőjű tagok jelenhetnek meg, és a formula a tér irányától független lesz. Az módosítást mind a hőmérséklettől függő tagban, mind az attól függetlenül elvégzem, így jelezve, hogy mindkettő függhet a térerősségtől:

$$\eta = (A_0 + A_1 E^2 + (A_2 + A_3 E^2) T) e^{\frac{B}{T}} \quad (4.3)$$

ahol  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  és  $B$  anyagi jellemzők,  $E$  az elektromos térerősség.



4.5. ábra Térerősségtől függő függvény illesztése ER folyadékokra

A:  $c = 10 \text{ m/m\%}$  B:  $c = 20 \text{ m/m\%}$  C:  $c = 30 \text{ m/m\%}$

A 4.5. ábra mutatja a (4.3) egyenlet illesztését a mérési adatokra, míg 4.2. táblázat az illesztett paramétereket ismerteti. Az így nyert paramétereket felhasználva összehasonlítottam, milyen mértékben térnek el a mért, és a számított eredmények. Az eltérés átlagos értéke 10%-os diszperzióánál 1,26%, 20%-osnál 3,02%, 30%-os diszperzió esetében 2,73%. A maximális eltérések rendre 4,39%, 8,23% és 6,34%. Az illesztett felület jól korrelál a mérési adatokkal, így a térerősség és a hőmérséklet függvényében az elektroeológiai folyadék viszkozitása egyszerre írható le. A formulák felhasználhatók

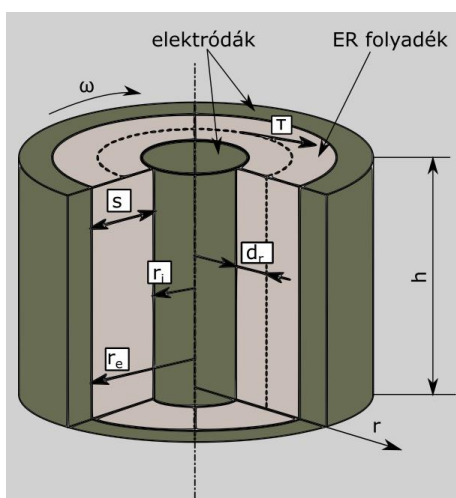
olyan melegedésre hajlamos rendszereknél, ahol a viszkozitás megváltozása befolyásolja a működést.

4.2. táblázat Illesztett paraméterek a térerősség- és hőmérsékletfüggést leíró függvény esetén

|       | Koncentráció |            |           |
|-------|--------------|------------|-----------|
|       | 10%          | 20%        | 30%       |
| $A_0$ | -2,18E-04    | 0,12252    | 3,82564   |
| $A_1$ | 2,47E-16     | 2,23E-14   | 5,10E-13  |
| $A_2$ | 9,77E-06     | -2,33E-04  | -9,89E-03 |
| $A_3$ | -6,85E-19    | -5,88E-17  | -1,27E-15 |
| B     | 1831,25188   | 1017,00608 | 3,82564   |

### 4.3 ER tengelykapcsoló modell melegedése

A viszkozitás hőmérséklet-és térerősség függésére a kidolgozott formula felhasználható valós rendszerek leírására, vagy szimulációk végzésére is. Nakamura és munkatársai egy egyszerű elektoreológiai tengelykapcsoló melegedési modelljét vizsgálták cikkükben [112]. Megállapították, hogy a tengelykapcsolókban keletkezett hő két forrásból keletkezik: egyrészt az elektoreológiai folyadék működéséből adódóan a Joule-hőből, másrészt a folyadék sűrűlódásából ered. Kifejtették, hogy a Joule-hőből származó hőmennyiség nagyon kis részben járul hozzá a hőmérséklet-változáshoz a két ok közül. A felhasznált modell sematikus ábrázolása a 4.6. ábra látható. Itt hengeres elektródák vannak koncentrikusan elhelyezve,  $r(i)$  sugártól  $r(i + 1)$  sugárig, ahol  $i$  a rések száma  $i = 1, 2 \dots n$ . A réseket tölti ki az elektoreológiai folyadék, melynek viszkozitása  $\eta$ .



4.6. ábra ER tengelykapcsoló elméleti modellje

A modell matematikai leírását használva megvizsgáltam az ER folyadék használat közbeni hőmérséklet-változását. A modellben a viszkózus energia elemi disszipációja másodpercenként az  $i$ -edik részben a következő módon írható le:

$$dE_v(i) = \frac{\partial(\tau A r \omega)}{\partial r} dr \quad (4.4)$$

ahol  $A$  a henger felülete,  $E_v$  a viszkózus energia,  $\tau$  a nyírófeszültség és  $\omega$  az abszolút szögsebesség, mely a nem mozgó részekhez képest értelmezett. A formula átalakítható a henger adatainak felhasználásával:

$$dE_v(i) = \frac{M^2}{4\pi h \eta} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r(i)^2} - \frac{1}{r^2} \right) dr \quad (4.5)$$

ahol  $M$  a kimeneti nyomaték és  $h$  a henger magassága. A (4.5) egyenletből kettő szomszédos ( $i$ -edik és  $i+1$ -edik) elektróda közötti integrálásával megkapható:

$$\int_{r(i)}^{r(i+1)} dE_v(i) = \frac{M^2}{4\pi h \eta} \left( \frac{1}{r(i)^2} - \frac{1}{r(i+1)^2} \right) \quad (4.6)$$

A nyírófeszültség megadható:

$$\tau = \eta r \frac{d\omega}{dr} = \frac{M}{rA} \quad (4.7)$$

(4.7 egyenletből a nyomaték számítható az alábbi módon:

$$M = 4\pi h \eta \omega \frac{1}{\frac{1}{r(i)^2} - \frac{1}{r(i+1)^2}} \quad (4.8)$$

Behelyettesítve (4.8 egyenletet (4.6 egyenletbe kapható:

$$\int_{r(i)}^{r(i+1)} dE_v(i) = 4\pi h \eta \Omega^2 \left( \frac{1}{r(i)^2} - \frac{1}{r(i+1)^2} \right)^{-1} dr \quad (4.9)$$

ahol  $\Omega$  a relatív forgási sebesség a két szomszédos ( $i$  és  $i+1$ ) elektróda között. Az elektródák közötti rés szélessége mind a nyomatékátadás, mind a melegedés szempontjából nagy jelentőséggel bír, amennyiben feltételezzük, hogy jóval kisebb, mint

az alkatrészek sugara  $r(i)$ , tovább vezethető a formula a disszipált hőmennyiség (energia) számítására  $n$  darab rés esetén:

$$E_v = \sum_{i=1}^n \Delta E_v(i) = \sum_{i=1}^n \frac{2\pi h \eta \Omega^2 r(i)^3}{s} \quad (4.10)$$

ahol  $s$  a hengerek közötti rés. A viszkozitásra levezetett formula behelyettesíthető az egyenletbe. Feltételezve, hogy a teljes hőmennyiség a folyadék melegedését szolgálja, egy kezdeti hőmérsékletről a következő hőmérsékletre melegszik a tengelykapcsoló:

$$T(t + \Delta t) = \frac{1}{C} \left( \sum_{i=1}^n \frac{2\pi h \eta \Omega^2 r(i)^3}{s} \Delta t \right) + T_v(t) \quad (4.11)$$

ahol  $C$  a folyadék hőkapacitása.

A viszkozitást leíró formula felhasználásához csak egy réssel rendelkező tengelykapcsolót vizsgáltam. Egy rést vizsgálva (4.11) egyenlet tovább egyszerűsödik, differenciálisan kifejezve:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\pi h \omega^2 r^3}{sC} \eta(T) \quad (4.12)$$

ahol már jelölve van a viszkozitás hőmérséklet-függése. Ezt átrendezve, és (4.3) formulát behelyettesítve az alábbi differenciálegyenletet kapjuk:

$$\frac{1}{[A_0 + A_1 E^2 + (A_2 + A_3 E^2)T] e^{\frac{B}{T}}} dT = \frac{2\pi h \omega^2 r^3}{sC} dt \quad (4.13)$$

Az integrálás előtt (4.13) egyenletet érdemes egyszerűbb alakra írni:

$$\frac{1}{[a_0 + a_1 T] e^{\frac{B}{T}}} dT = \delta dt \quad (4.14)$$

ahol  $a_0 = A_0 + A_1 E^2$ ,  $a_1 = A_2 + A_3 E^2$  és  $\delta = \frac{2\pi h \omega^2 r^3}{sC}$ .

Az egyenlet integrálható numerikus módon, melyet Maple szoftverben végeztem el, és az analitikus formula integrálját a numerikus integrállal hasonlítottam össze. Az analitikus megoldáshoz az egyenlet bal oldalán található integrálás exponenciális szorzótényezőjét Taylor-sorba kell fejteni, melyet a  $B/T = 0$  helyen végeztem el:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{e^{-\frac{B}{T}}}{a_0 + a_1 T} dT = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1 - \frac{B}{T} + \frac{1}{2!} \frac{B^2}{T^2} - \frac{1}{3!} \frac{B^3}{T^3} + \dots}{a_0 + a_1 T} dT =$$
(4.15)

$$= \int_{T_1}^{T_2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i B^i}{i! T^i (a_0 + a_1 T)} dT = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i B^i}{i!} \frac{1}{a_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T^i (1 + cT)} dT$$

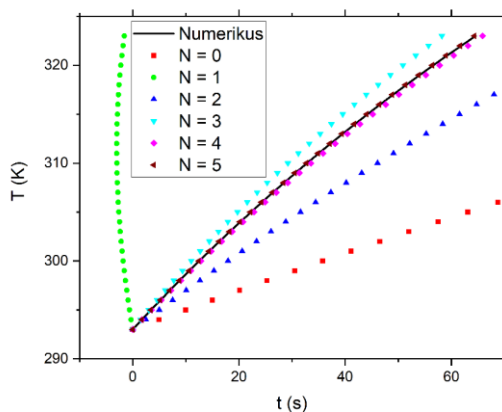
$$\text{ahol } c = \frac{a_1}{a_0}.$$

(4.15) egyenlet az összeget kifejtve  $i = 0$ -tól elemenként vizsgálható. A vizsgálat során megállapítható, hogy a képlet kifejtésénél  $i = 0$ -nál és 1-nél egyedi, míg  $i = 2$  után már egységes formát felvevő egyenletet kapható. A végső formula így:

$$\begin{aligned} \int_{T_1}^{T_2} \frac{e^{-\frac{B}{T}}}{a_0 + a_1 T} dT &= \frac{(-1)^0 B^0}{0!} \frac{1}{a_0} \left[ \frac{1}{c} \ln(1 + cT) \right]_{T_1}^{T_2} + \\ &+ \frac{(-1)^1 B^1}{1!} \frac{1}{a_0} \left[ c^{1-1} (-1)^1 \ln \frac{1 + cT}{T} \right]_{T_1}^{T_2} + \\ &+ \sum_{i=2}^{\infty} \frac{(-1)^i B^i}{i!} \frac{1}{a_0} \left[ c^{i-1} (-1)^i \ln \frac{1 + cT}{T} + \sum_{j=2}^i \frac{(-1)^{i-j+1} c^{i-j}}{(j-1) T^{j-1}} \right]_{T_1}^{T_2} \end{aligned}$$
(4.16)

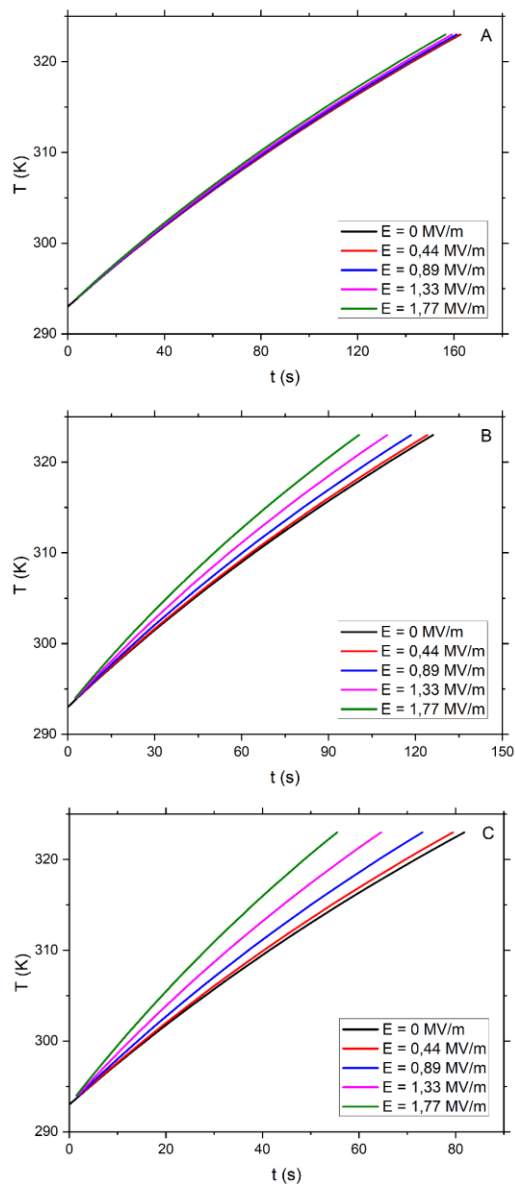
A kidolgozott formula már behelyettesíthető (3.11) egyenletbe, hogy az idő és az elektromos térerősség függvényében meghatározzuk egy elektoreológiai folyadék melegedését. Attól függően, hogy az analitikus integrálás eredményeként kapott végtelen összegből hány tagot veszünk figyelembe eltérő végeredményt kapunk. A modellhez a  $h = 0,04$  m,  $r = 0,0133$  m,  $s = 0,0113$  m,  $\omega = 4,057$  rad/s és  $C = 0,05$  J/K adatokat rendelve számításokat végeztem különböző térerősségek és ER folyadékok esetén, vizsgálva (4.16) egyenlet végtelen összegéből figyelembe vett tagok számát is. A számoláshoz a 4.2. táblázatban látható, a valós mérések során meghatározott paramétereket alkalmaztam, és vizsgáltam, mennyi idő alatt növekszik a hőmérséklet 30 K-nel.

A végtelen összegből egyre több tagot figyelembe véve mutatja a hőmérséklet-emelkedést a 4.7. ábra. Látható, hogy  $N = 5$  tag figyelembe vételével már az analitikus formula is megegyező eredményt ad a numerikus számítással.



4.7. ábra A hőmérséklet-változást leíró formula alkalmazása a végtelen összegű formula egyre több tagjának figyelembe vételével

A számolási eredményeket mutatja az alkalmazott paraméterek esetén a 4.8. ábra. Megfigyelhető, hogy a kapott formula alapján is a hőmérséklet-emelkedése gyorsabb a nagyobb koncentráció és elektromos térerősség esetén.



4.8. ábra ER tengelykapcsoló modelljének melegedése különböző térerősségeknél és koncentrációknál

A:  $c = 10$  m/m% B:  $c = 20$  m/m% C:  $c = 30$  m/m%

## 4.4 Összefoglalás

Munkám során méréseket végeztem az elektorreológiai folyadékok viszkozitásának hőmérséklet- és térerősségfüggésének megállapítására. A méréseket egy Anton Paar Physica MCR301 viszkoziméteren végeztem, amely képes a viszkozitást elektromos tér vizsgálni a mintákat temperálása mellett. A méréseket saját készítésű, három különböző koncentrációjú ER folyadékkal végeztem, melyek szilikonolajban diszpergált szilícium-dioxid részecskékből álltak.

Bővítettem a folyadékok viszkozitásának hőmérséklet-függését leíró Andrade egyenletet, mely az ER folyadékokra jellemző térerősség-függést nem írja le. A módosítást a pre-exponenciális tagban végrehajtva a formula jól leírja a vizsgált ER folyadékok hőmérséklet-függését.

Az egyenlet további módosítását szintén a pre-exponenciális tagban végeztem, hogy leírja a viszkozitás térerősség függését is, majd a formulát a térerősség és a hőmérséklet függvényében illesztettem a mérési eredményekre. Az illesztett paraméterek jó korrelációt mutattak a mért eredményekkel, az átlagos eltérés 3,02% volt.

A formulát felhasználva megvizsgáltam egy ER tengelykapcsoló modelljében a folyadék hőmérséklet növekedését, ahol a teljes létrejövő hőmennyiség a hőmérséklet-emelésére fordítódik. A modell leírásába az új formula beillesztése után kifejeztem a viszkozitást. Az integrálszámítást numerikusan számítógépes szoftverrel, és analitikusan Taylor-sorfejtéssel oldottam meg. Az analitikus megoldás esetén megállapítottam, hogy az ötödik tagtól való összegzésre már ugyanazt az eredményt adja, mint a numerikus megoldás. A képletet felhasználva megállapítottam, hogy a mért ER folyadékok mennyi idő alatt melegednek fel 30 K hőmérséklettel, megállapítottam, hogy a térerősség és a koncentráció növekedésével gyorsabb a hőmérséklet emelkedése.

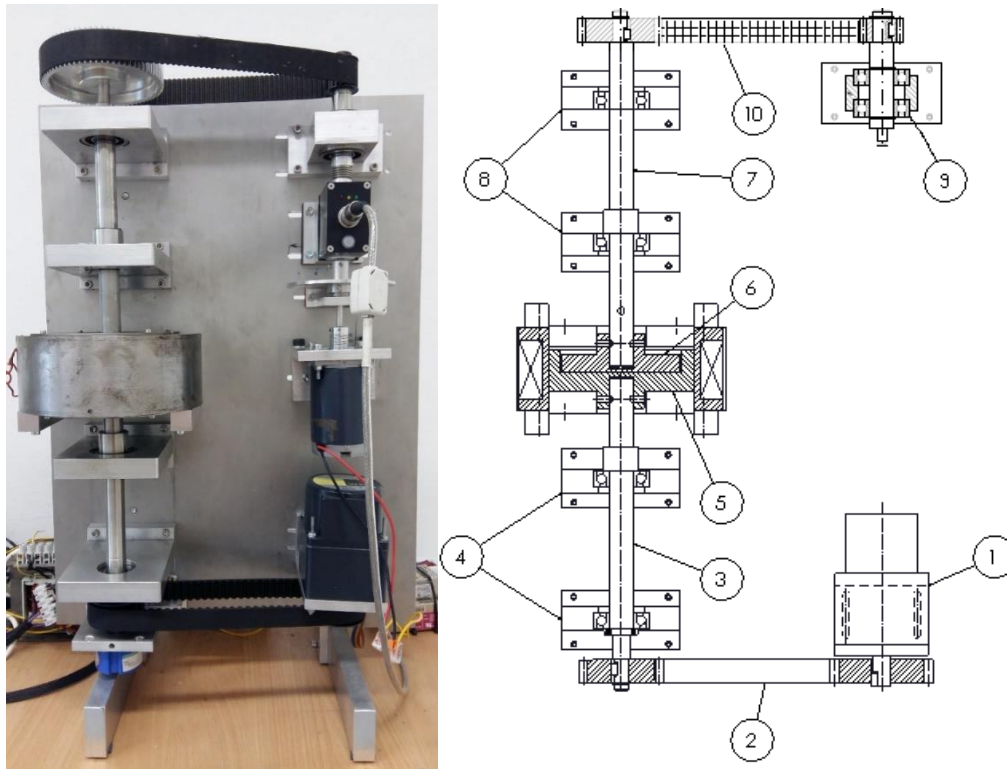
## 5. Magnetoreológiai tengelykapcsolók nyomatékátviteli időállandójának meghatározása

Látszólagos viszkozitásuk megváltoztatása miatt mind az elektromágneses, mind a magnetoreológiai folyadék alkalmasak a nyomatékkapcsolókban való alkalmazásra. Az átvitt nyomaték mértékének irányítása MR tengelykapcsolónál a mágneses tér nagyságának állításával lehetséges. A nyomatékátvitel és nyomatékátviteli időállandó vizsgálatát egy egytárcsás tengelykapcsolón, majd egy saját tervezésű többtárcsás tengelykapcsolón végeztem el. Az időállandó meghatározását egyrészt egységugrás gerjesztés, másrészt rámpagerjesztés esetén határoztam meg a különböző tengelykapcsolóknál. A mérési módszerek alapján az ipari környezetben használt tengelykapcsolók irányítása is lehetségessé válhat.

### 5.1 Egytárcsás MR tengelykapcsoló vizsgálata

#### 5.1.1 A mérőrendszer felépítése

A mérésekhez tervezett és épített egytárcsás magnetoreológiai tengelykapcsolót és sematikus ábráját az 5.1. ábra mutatja.



5.1. ábra Egytárcsás MR tengelykapcsoló és sematikus felépítése

A bemenő, két helyen csapágyazott (4) tengelyt (3) egy fogasszíjon (2) keresztül hajtja meg egy, a nagyobb kimenő nyomatékot biztosító hatjóművel rendelkező Vexta BL430 GD-AF típusú DC motor (1). A motort egy Vexta BLD30A-F típusú DC motor meghajtó irányítja, melyen keresztül a motor fordulatszámát egy 0 – 5 V egyenfeszültségű jellel lehet vezérelni. A fordulatszám  $11,5 \text{ min}^{-1}$  és  $46,5 \text{ min}^{-1}$  között változtatható. A fordulatszámot a (3)-as tengely szabad végén elhelyezett, IHU4808H típusú optikai enkóder segítségével lehet mérni. A hajtott tengelyen lévő tárcsa (5) peremmel van ellátva: polimer oldalfallal rendelkezik, ebbe ül bele a hajtott tengelyen (7) lévő tárcsa (6). A kettő közötti rést tölti ki a nyomaték átviteléért felelős MR fluidum. A tárcsák hasznos átmérője 116 mm, a közöttük lévő rés mérete állítható, a mérések során 1 mm rést alkalmaztam. A hajtott tengely szintén két helyen csapágyazott (8), egy lassító áttételű fogasszíjas hajtás gondoskodik a nyomatékmérővel való összeköttetésről. A nyomatékmérő Burster 8661-5002 típusú, mellyel a kimenő tengelyen lévő nyomatékon kívül a tengely fordulatszámának mérésére is van lehetőség. A maximális mérhető nyomaték 2 Nm, melyet a 4-szeres kimenő áttétel 8 Nm-re növel. A nyomatékmérőt az egységugrás, mint bemeneti gerjesztés alkalmazása miatt statikus üzemben működtetve alkalmaztam.

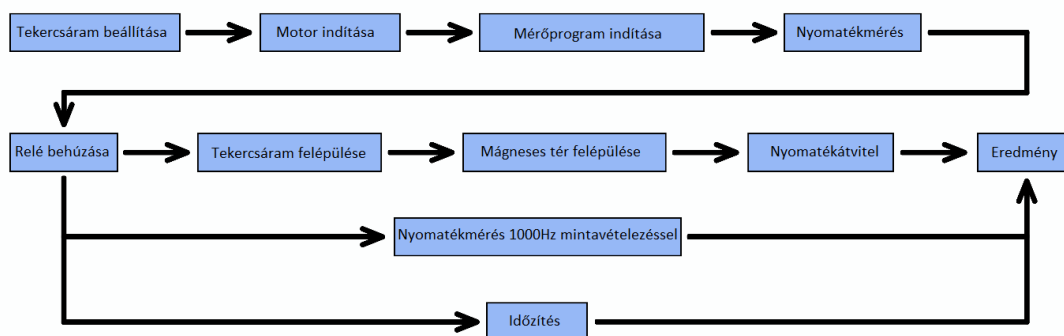
A magnetoreológiai folyadék irányításához szükséges mágneses teret a tárcsákat körülvevő házban elhelyezett elektromágnes biztosítja. A tekercselés házának tárcsák felőli oldala alumíniumból készült, hogy a mágneses erővonalakat ne vezesse el a tárcsáktól. A tekercs körülbelül 1000 menet  $1 \text{ mm}^2$  átmérőjű rézhuzalból áll, melynek átmérője 123 mm és 173 mm között változik. A mágneses erővonalakat a tárcsák, és így az MR folyadék, valamint a tekercselés között fluxusbevezetők irányítják. A tárcsák alatt és felett helyezkednek el, kettéosztva a szerelhetőség miatt. Az egyik felső fluxusbevezetőben van elhelyezve egy Hall-szenzor, mellyel lehetséges a mágneses térerősség mérése. Mind a fluxusbevezetők, mind a tárcsák S355JRG2 acélból készültek, melyet  $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérsékleten hőkezelték a nagyobb mágneses permeabilitás elérésének érdekében. A tekercs egy maximum 4 A áramerősség leadására képes tápegységről van meghajtva, így az elérhető maximális mágneses térerősség  $155 \text{ kA/m}$ . A mágneses tér bekapcsolása a tápegység beállított paraméterei mellett szilárdtest relén keresztül lehetséges.

A szenzorok jeleinek kiolvasása és a motorvezérlő irányítása egy NI USB-6221 mérőkártyán keresztül saját fejlesztésű LabVIEW programmal történik. A szoftverben lehetőség van egyedi és sorozatmérés elvégzésére is.

### 5.1.2 Anyagok és módszerek

A magnetoreológiai tengelykapcsolóban négy MR folyadékot vizsgáltam az átvitt nyomaték és a nyomatékátviteli időálló aspektusából. A négy folyadék közül három kereskedelmi forgalomban kapható: a Lord Corp. által gyártott MRF-122EG, MRF-132DG és MRF-140CG magnetoreológiai folyadékok. A gyártó által nincs megadva a pontos összetétel, de visszamért eredmények alapján [113] észter alapú folyadékokról van szó, melyekben a számozással összhangban növekszik a diszpergált részecskék aránya. A negyedik folyadék a Román Akadémia temesvári munkatársai által készített 190521-1+20Fe jelzésű folyadék, melyben a ferrofluidokra jellemző nanométer méretű, és az MR folyadékokra jellemző mikrométer méretű részecskék is megtalálhatóak szilikonolajba diszpergálva. Ebben a diszpergált mikrométer méretű részecskék koncentrációja 20 tömegszázalék.

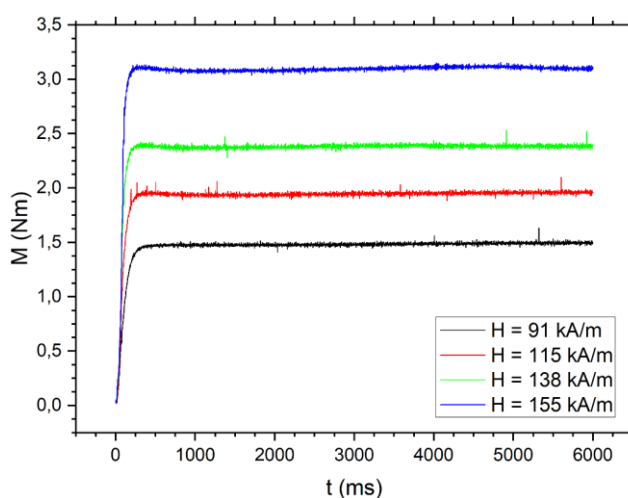
A tengelykapcsolón a maximális nyomatékot, illetve az egységugrás bemeneti gerjesztésre adott választ, a nyomatékátviteli időállandót kívántam vizsgálni, ezért a tengelykapcsoló kimenő oldala rögzítésre került a nyomatékmérő szenzoron keresztül, így a tengelykapcsoló rendszert féküzemben használtam. A nyomaték mérése egyszeri leolvasással a különböző mágneses térerőségeken, míg a nyomatékátviteli időállandó mérési ciklusban történt. A mérés előtt a tápegységen előre beállításra kerül az alkalmazott áramerősség, majd a motor sebességének beállítása következik. A mérési ciklus ezután egy három másodperces, mágneses tér nélküli keveréssel indul. Ezt követi az áram relén keresztüli bekapcsolása a tekercsre, melyet hat másodpercig tartunk fenn. A relé kikapcsolása után ismét három másodperces, tér nélküli keverés következik. Ezután a mérési ciklus újraindul. A mérési ciklus folyamatábráját mutatja a 5.2. ábra.



5.2. ábra Nyomatékátviteli időállandó mérésének folyamatábrája

A maximális fordulatszám és mágneses térerősség között több lépésre osztva történtek a mérések. A fordulatszámok 11,5; 17,5; 23,5; 29,5; 35,5; 40,5 és 46,5 1/perc voltak, míg a mágneses térerősségek 91; 115; 138 és 155 kA/m. Minden beállításnál 12 mérés készült, melyek átlagából egy időállandó lesz jellemző.

A mérésekre mutat példát különböző térerősségeknél a Lord MRF-140CG folyadékra és  $n = 11,5 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámnál. A maximális nyomaték a térerősség növekedésével növekszik.



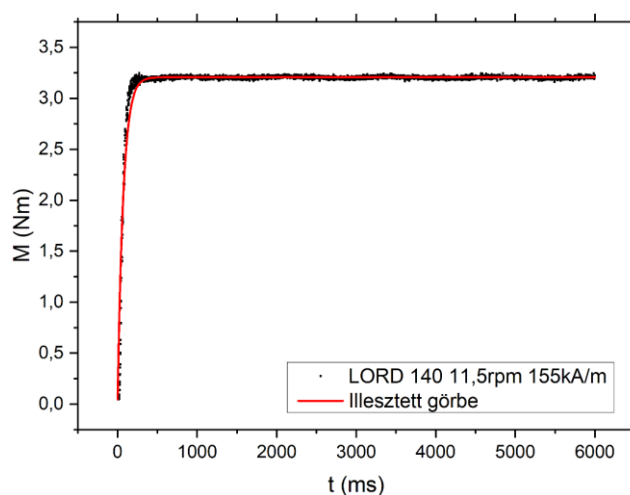
5.3. ábra Nyomatékátviteli időállandó mérése Lord MRF-140CG folyadék esetén

$$n = 11,5 \text{ min}^{-1}$$

A nyomatékátviteli időállandó meghatározása a mérési eredményekre történő függvényillesztéssel történt a következő formulát felhasználva:

$$M(t) = A \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5.1)$$

ahol  $M$  az átvitt nyomaték,  $t$  az idő és  $\tau$  az időállandó. Az illesztésre mutat példát az 5.4. ábra.

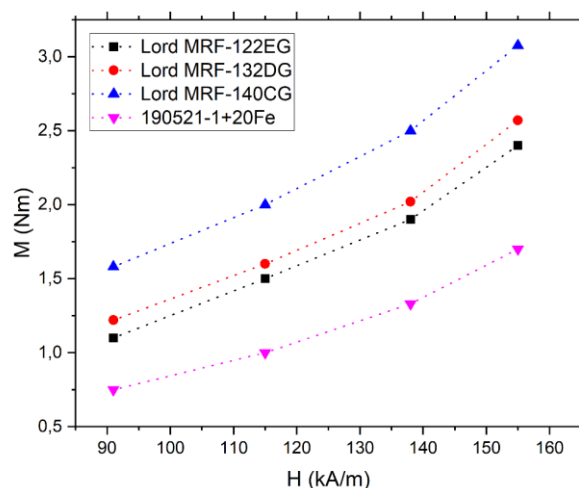


5.4. ábra Mérési eredményekre történő függvényillesztés

Lord MRF-140CG,  $n = 46,5 \text{ min}^{-1}$ ,  $B = 155 \text{ kA/m}$

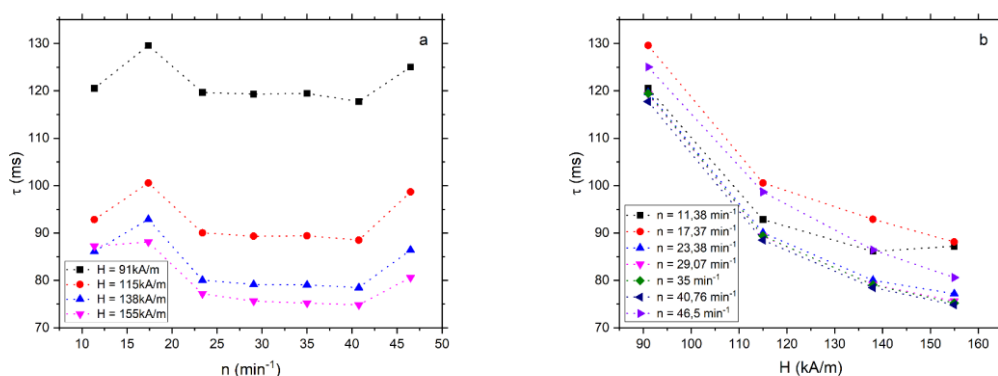
### 5.1.3 Eredmények és értékelésük

A maximálisan átvitt nyomatékot a különböző MR folyadékoknál,  $n = 46,5 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámnál, a mágneses térerősség függvényében az 5.5. ábra mutatja.

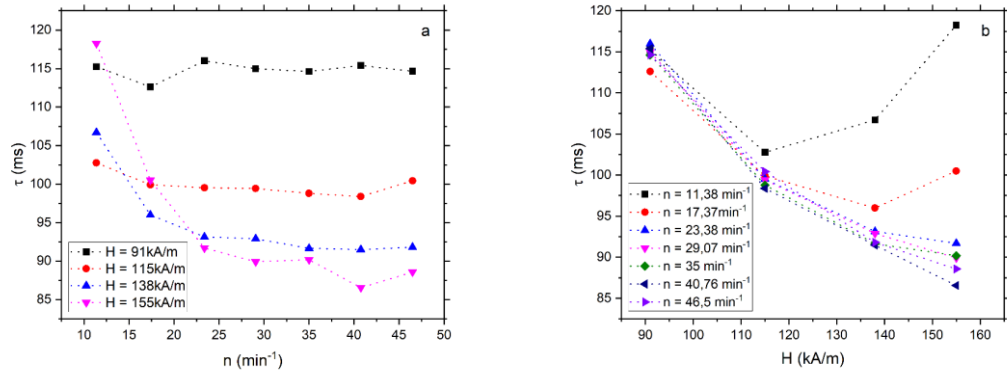


5.5. ábra Maximális átvitt nyomatékok különböző folyadékok esetén, a mágneses térerősségek függvényében,  $n = 46,5 \text{ min}^{-1}$  (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)

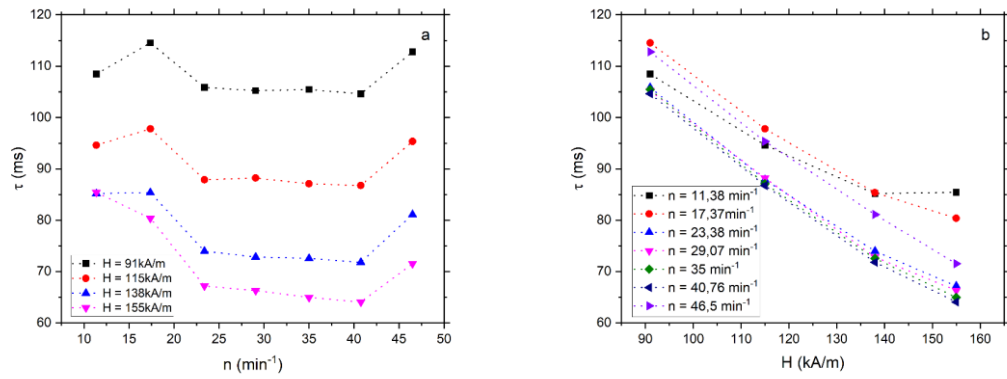
Minden folyadék esetében a mágneses térrel az átvitt nyomaték is növekszik. A kereskedelmi Lord folyadékoknál a nagyobb diszpergált részecskearány nagyobb nyomatékot eredményez, megfigyelhető, hogy a 132DG és 140CG jelzésűek között nagyobb az ugrás. A legnagyobb átvitt nyomaték a Lord MRF-140CG esetén 3,075 Nm volt. A nanofluidummal stabilizált folyadék nyomatékátviteli képessége elmarad a többi folyadéktól, de hasonló tendenciát mutat a térerősség függvényében.



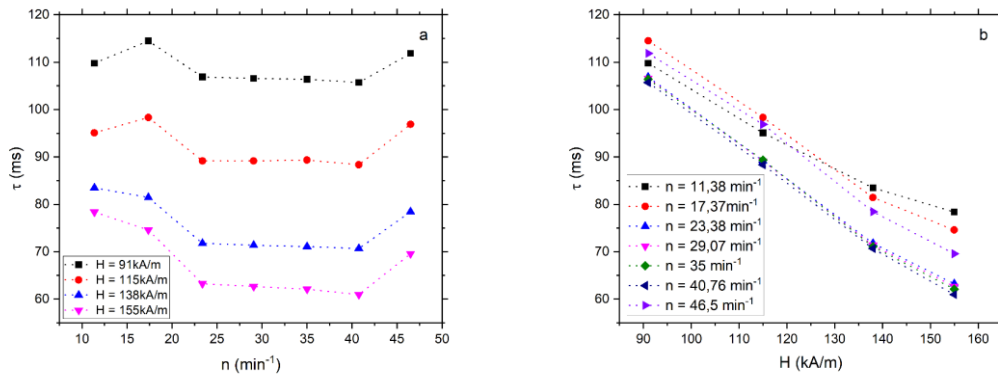
5.6. ábra Nyomatékátviteli időállandók a fordulatszám (a) és mágneses térerősség (b) függvényében 190521-1+20Fe folyadék esetén (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)



5.7. ábra Nyomatékátviteli időállandók a fordulatszám (a) és mágneses térerősség (b) függvényében Lord MRF-122EG folyadék esetén (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)



5.8. ábra Nyomatékátviteli időállandók a fordulatszám (a) és mágneses térerősség (b) függvényében Lord MRF-132DG folyadék esetén (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)



5.9. ábra Nyomatékátviteli időállandók a fordulatszám (a) és mágneses térerősség (b) függvényében Lord MRF-140CG folyadék esetén (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)

5.6. ábra – 5.9. ábra a nyomatékátviteli időállandókat mutatják a fordulatszám és térerősség függvényében. A fordulatszámától való függés esetében minden folyadékánál megfigyelhető, hogy az időállandó a sebességtől kis mértékben függ, és a Lord MRF-122EG folyadék esetében látható egy eltérés. Minden folyadékánál a  $17,5 \text{ min}^{-1}$  sebességnél figyelhető meg egy kiugrás az időállandóknál, ami a tengelykapcsoló felépítéséből eredhet. Az időállandó eltérése itt a többi sebességnél tapasztaltakhoz képest 5 – 10 ms. Magas térerősség és alacsony sebesség esetén szintén kiugró értékek láthatók, melyek a nagyobb diszpergált részecskeszámot tartalmazó folyadékoknál kevésbé szignifikánsak.

A mágneses térerősségtől való függésnél általános megfigyelhető, hogy a külső tér növekedésével csökkennek az időállandók. A MRF-122EG folyadékánál az alacsony sebességek esetén látható, hogy az időállandó a tér növekedésével először csökkenni, majd ismét növekedni kezd. A jelenség – kisebb mértékben – megfigyelhető a 190521-1+20Fe és a Lord MRF-132DG folyadékoknál is. A mérési eredményekből alapján következtethető, hogy bár a fordulatszám kevésbé befolyásolja az időállandót, a mágneses térrel együttes hatása bizonyos paraméterpárosítás esetén már jelentős.

## 5.2 Többitárcsás magnetoreológiai tengelykapcsoló vizsgálata

### 5.2.1 A mérőrendszer felépítése

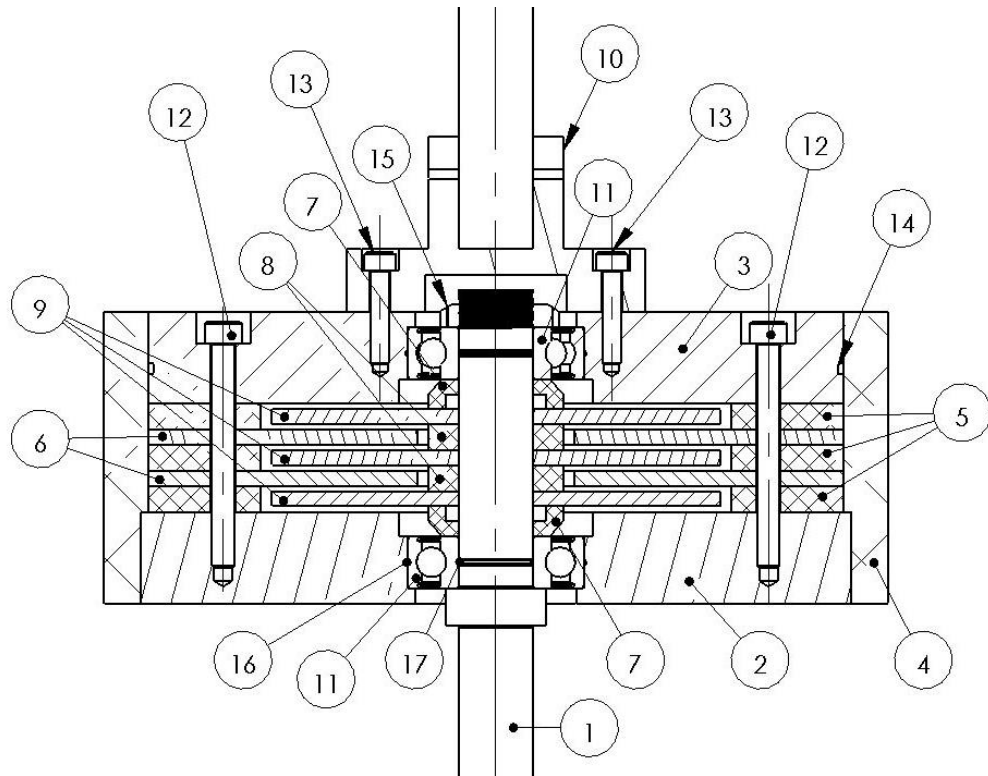
Az egytárcsás magnetoreológiai tengelykapcsoló vizsgálata után a nyomatékátvitel növelése érdekében megterveztem és építettem egy többitárcsás tengelykapcsolót. A

tengelykapcsoló szerkezetiileg három nagy részre osztható fel: a tengelykapcsolóra, az azt körülvevő házra, és a mérőrendszer többi részére.

A tengelykapcsoló tervezésének feltétele volt, hogy az az egytárcsás verziónál nagyobb nyomatékot vigyen át, és az ott alkalmazott tárcsaméret az új tengelykapcsolóban ne csökkenjen. A tengelykapcsoló belső kialakítását az 5.10. ábra mutatja. Itt az egyes számmal jelölt tengelycsonk vállára ül fel az egyik oldali csapágy (11), amit egy vég-távtartó (7) követ. Ezután következnek egymás után felváltva a belső tárcsák és a belső távtartók. Mind a belső, mind a külső tárcsák közé távtartókat kell elhelyeznem, amik biztosítják a megfelelő távolságokat, illetve a folyadék útját a rétegek között. A belső elemsort egy végtávtartó, egy újabb csapágy, és egy, a csapágy belső megtámasztására szolgáló csapágyanya (15) zárja. A csapágyak külső megtámasztása a jobboldali (3) és baloldali (2) végtárcsák, melyek összefogják a külső részt. Rögzítőcsavarok (12) biztosítják, hogy a külső tárcsák (5) és a külső távtartók (6) nem mozdulhassanak el egymáshoz képest, így biztosítva a nyomatékátvitelt. A belső tárcsáknál 16-os fészkes retesz biztosítja a nyomatékot. A belső távtartóknál így reteszhorony van kialakítva, míg a végtávtartóknál a kialakításból adódóan a retesz lekerekítésének van hely. 4-es külső tárcsaelem fogja körbe a belső kialakítást, és a másik tengelyhez a jobboldali végtárcsához csavarral rögzíthető 10-es számú 3. végtárcsa. A megfelelő mágneses tér kialakítása miatt a tárcsák (külső, belső, végtárcsák) S355 szerkezeti acélból készültek. A távtartók és a külső elem anyaga POM, így a mágneses erővonalakat nem befolyásolják.

Az összeszerelés során először 11-es csapágy kerül 2-es végtárcsára, melyre 4-es külső tárcsaelem rögzítve van. Ezt követően felkerül a tengelyre a végtávtartó, majd az első belső tárcsa, amivel párhuzamosan az első külső távtartó is beillesztésre kerül. Ezután a külső és belső távtartók, valamint tárcsák felváltva kerülnek beszerelésre. A szerelés idejére ideiglenesen 12-es csavarok helyett menetes szálak kerülnek beszerelésre. A tárcsák és távtartók után felkerül a második csapágy, a csapágyanya, valamint 3-as végtárcsa. Ezután helyükre illeszthetők a 12-es rögzítő csavarok, valamint 3-as végtárcsát a 4-es külső elemhez rögzítő csavarok is. A belső rész tömítése kihívást jelentett a tervezés során. A mozgó alkatrészek tömítésére szolgáló szimeringek általában a csapággal együtt álló csapágyházba ülnek be. Jelen esetben azonban mind a kimeneti, mind a bemeneti oldal forgásra képes, sőt, a későbbiekben akár terhelés esetén egymással szemben is foroghatnak. Így a tömítést statikus tömítések sorozatával oldottam meg, melyek biztosítják minden részen a folyadék szerkezetben maradását. Meghatároztam a

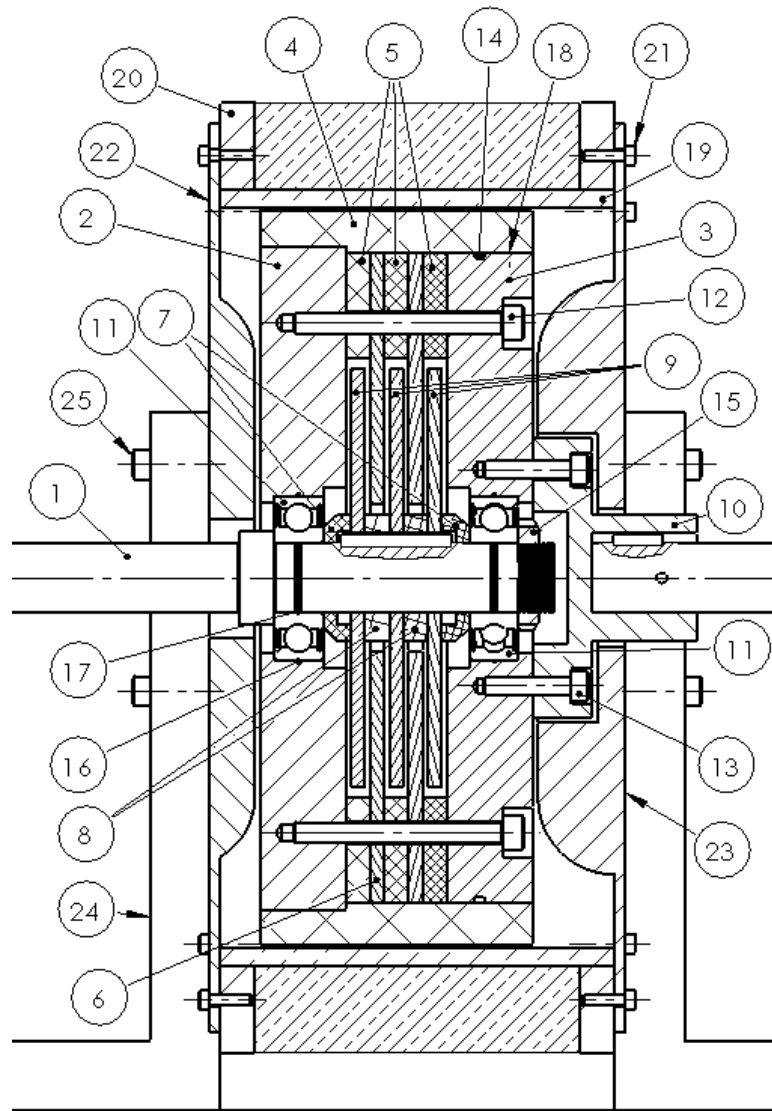
lehetséges szivárgási pontokat: a külső tárcsaelem és a végtárcsák között; a 12-es rögzítőcsavaroknál; a csapágyak körül; a csapágyakban és a feltöltőnyílásoknál. 2-es végtárcsa és 4-es külső tárcsaelem fix kapcsolódási pontot jelent, szoros illesztés mellett egymáshoz lettek ragasztva kétkomponensű ragasztó felhasználásával.



5.10. ábra Többtárcsás tengelykapcsoló belső felépítése

Bár a rögzítőcsavarok (12) egymáshoz szorítják a külső tárcsákat és távtartókat, ezzel bizonyos szintű tömítést biztosítva, nem biztos a teljes szivárgás-mentesség 4-es és 3-as elemek, valamint a csavarok környékén. A szivárgás megakadályozására a csavarok feje alatt rézgyűrűket alkalmaztam. A 3-as végtárcsa és a 4-es külső tárcsaelem, valamint a mindkét végtárcsa és a csapágy között O-gyűrű vannak elhelyezve. Ugyancsak O-gyűrűket alkalmaztam a csapágyak és 1-es tengely között is a tömítésre. A csapágy belsejébe, és azon keresztül a tengelykapcsolóból való szivárgást tömített csapágy választásával akadályoztam meg.

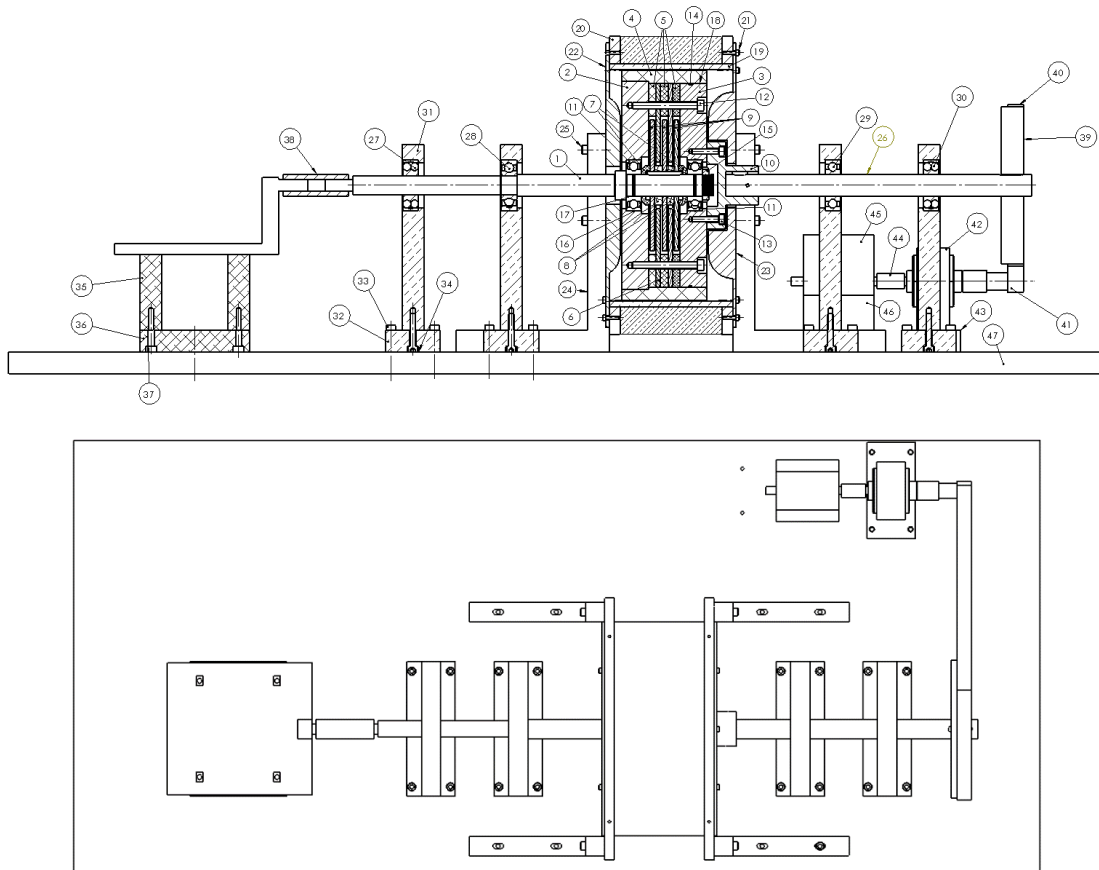
A tengelykapcsoló feltöltése a 3-as végtárcsán kialakított feltöltőnyílásokon keresztül lehetséges. A nyílásokat belsőkulcsnyílású csavarok zárják le, a tömítést itt is rézgyűrű biztosítja.



5.11. ábra A tekercstest és fluxusbevezető kialakítása a tengelykapcsolónál

Az eddig ismertetett, nyomatékátvitelre szolgáló belső részt veszi körül a mágneses teret előállító tekercs. 5.11. ábra mutatja a kialakítás ezen részét. A 19-es csévetestre csavarozással van rögzítve 20-as csévetest perem. Ezek fogják össze a szaggatott sraffozással jelölt rézhuzalt. A csévetest alumínium, míg a peremek szintén S355 acél anyagúak, a perem így nem befolyásolja a mágneses teret. A tapasztalatok alapján a mágneses erővonalak irányítására jól beváltak a fluxusbevezetők, így 22-es és 23-as fluxusbevezetők a cséve-test peremekhez rögzítettek 21-es csavarokkal. A két fluxusbevezető a szerelhetőség miatt ketté vannak vágva. A két oldal a 10-es számú végtárcsa alkalmazása miatt tér el egymástól. A tekercset a peremeknél megfogva négy darab alumínium tartóbak támasztja alá (24), minden baknál 2 darab csavarral (25).

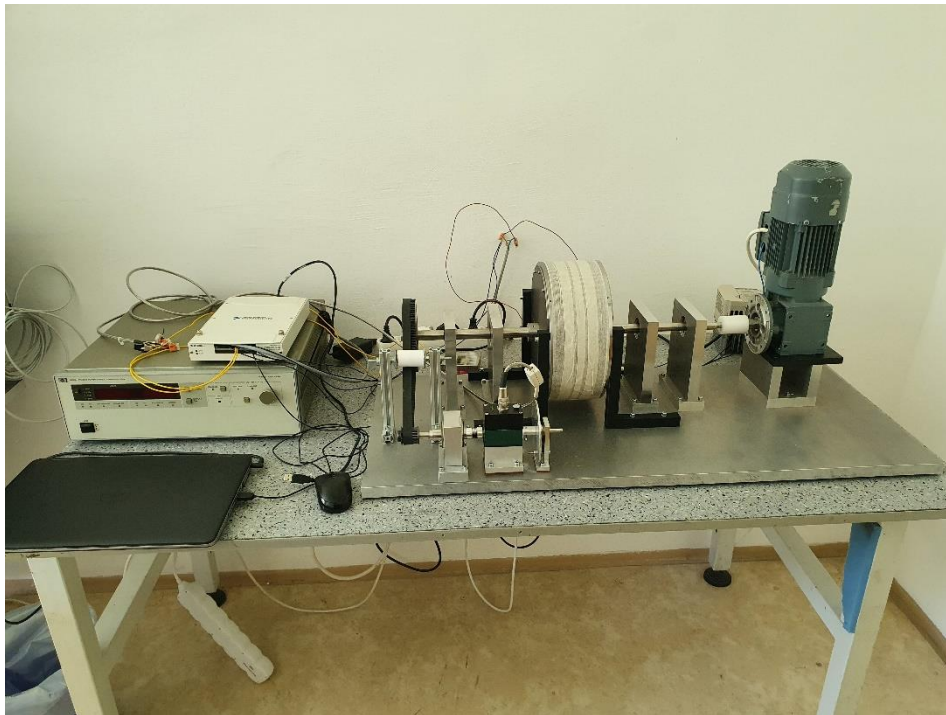
A MR rendszerekben a folyadékot tároló rés mérete meghatározza az alkalmazott folyadék mennyiségét és a MR hatás erejét, így az átvitt nyomatékot is. Míg a kisebb rés kevesebb folyadékot, és erősebb hatást jelent, a nagyobb rés könnyebb feltölthetőséget eredményez. A kettő közötti kompromisszum eredményezte a választott 1,5mm-es réstávolságot. A rések és az alkatrészek tűréseinek megadását négy, szétosztott tűréssorozatban adtam meg.



5.12. ábra A teljes mérőrendszer vázlata

A teljes mérőrendszert az 5.12. ábra mutatja. A hajtó és a hajtott tengelyek a tengelykapcsoló belső részén kívül kettő helyen vannak csapágyazva, melyek közül a tengelykapcsolótól távolabb eső csapágy beálló csapágynak (27, 30) van választva. A csapágyházak (31) és alapjaik (32) alumíniumból készültek. A hajtó oldalon egy tengelykapcsoló (38) köti össze a motort a tengellyel, míg a hajtott oldalon a tengelyre egy fogasszíj tárcsa (39) van rögzítve, ami fogasszíj hajtáson keresztül viszi át a nyomatékot a nyomatékmérő szenzorra. A nyomatékmérő szenzor egy konzolra erősítve, egy tengelykapcsolón keresztül kapja a nyomatékot a mérőtengelyről, ami a fogasszíj hajtás másik oldala. A mérőrendszer ezen része az egytárcsás MR tengelykapcsolóról lett

átépítve Az áttételt ebben az esetben 5:1-re választottam, így maximálisan 10Nm nyomatékot tud mérni a rendszer.



5.13. ábra Többtárcsás tengelykapcsoló

A tengelykapcsoló fő adatait az 5.1. táblázat mutatja.

5.1. táblázat Többtárcsás tengelykapcsoló adatai

| Paraméter megnevezése           | Paraméter értéke |
|---------------------------------|------------------|
| Külső átmérő                    | 272 mm           |
| Belső tárcsa belső/külső átmérő | 20/120 mm        |
| Külső tárcsa belső/külső átmérő | 42/186 mm        |
| Hasznos belső/külső átmérő      | 42/120 mm        |
| Tárcsák vastagsága              | 4 mm             |
| Rések vastagsága                | 1,5 mm           |
| Tekercs menetszáma              | ~1200 menet      |

A mérőrendszer meghajtására egy SEW Eurodrive háromfázisú motort alkalmaztam, mely derékszögű hajtóművel felszerelve 71 1/perc sebesség mellett 20Nm nyomaték leadására képes. A motort egy Jaskawa J1000 típusú frekvenciaváltóval hajtom meg. A mérőrendszer irányítása LabVIEW program segítségével egy NI USB-6281-es adatgyűjtő kártyán keresztül történik. A tekercs számára az áramot egy analóg feszültséggel irányítható Voltcraft VSP 2043 típusú labortápegység szolgáltatja. A külső tárcsa és a fluxusbevezető között mérve  $H = 110 \text{ kA/m}$  maximális mágneses

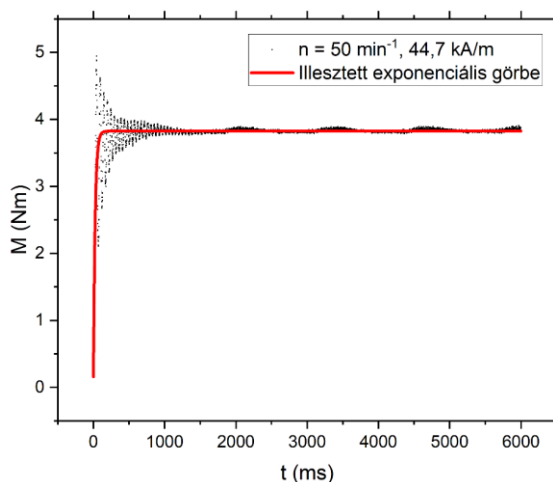
térerősség érhető el abban az esetben, ha az átvitt nyomaték  $M = 10 \text{ Nm}$ , ami jóval nagyobb, mint az egytárcsás tengelykapcsolón átvitt maximális nyomaték.

Az egyedileg létrehozott mérőprogram alprogramokból áll: egy folytonos mérésre, illetve az ofszet feszültség nullázására szolgáló programból, és a fő mérőprogramból, mely egyedi és sorozatmérés megvalósítására is képes.

### 5.2.2 Anyagok és módszerek

A tengelykapcsolóba a több folyadékréteg miatt  $\sim 150 \text{ ml}$  magnetoreológiai folyadék kerül. A nyomatékátviteli időállandók vizsgálatát a Lord MRF-122EG folyadékkal végeztem. A sebességet  $n = 30 \text{ min}^{-1}$ -től  $n = 70 \text{ min}^{-1}$ -ig változtattam  $10 \text{ min}^{-1}$ -enként.

Az eddigi vizsgálatokkal összhangban az egységugrás gerjesztéssel kívántam mérni az időállandót, azonban a rendszer mechanikai bizonytalanságai miatt a kimenő nyomatékban egy csillapodó rezgés látható, melyre az eddig alkalmazott elsőrendű görbe nem illeszthető kielégítő eredménnyel. Erre mutat példát a 5.14. ábra.



5.14. ábra Ugrásfüggvényre adott válasz és illesztés

$$n = 50 \text{ min}^{-1}, H = 44,7 \text{ kA/m}$$

Az időállandót másik gerjesztési módszerrel, rámpafüggvény gerjesztéssel határoztam meg. A rendszer időbeli válaszából adódóan nem tekintem egy energiatárolót tartalmazónak, és a rámpafüggvény gerjesztés alkalmazásával a rendszer időállandója helyett annak késleltetési idejét határozom meg. A gerjesztés a

$$H(t) = At \quad (5.2)$$

alakú függvénnyel írható le, ahol  $A$  a rámpa meredeksége. Erre a nyomatékot leíró válaszfüggvény alakja:

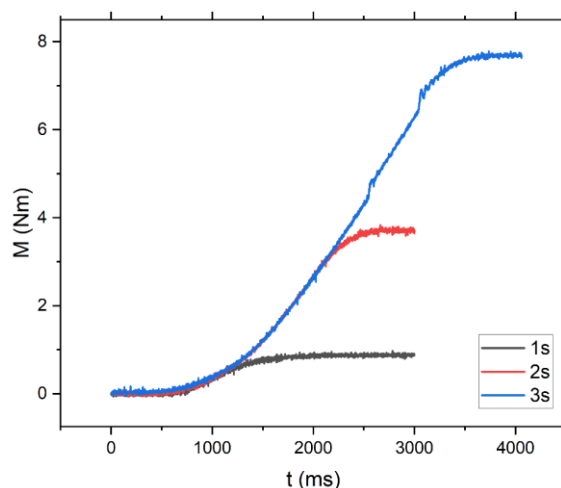
$$M(t) = KA \left( t - T \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right). \quad (5.3)$$

ahol  $T$  a késleltetési idő,  $A = \frac{\Delta H}{\Delta t}$  a rámpa meredeksége, és  $K$  az erősítés. A válaszfüggvény exponenciális része a gerjesztés során rövid idő alatt lecseng ( $t \gg T$ ), így vizsgálható a lineáris rész:

$$M(t) \approx KA(t - T). \quad (5.4)$$

Az exponenciális, tranziens rész figyelmen kívül hagyása mellett a gerjesztés és a válaszfüggvény normalizálható, így rendre  $\frac{H(t)}{A}$  és  $\frac{M(t)}{KA}$  alakot vesznek fel. Az alkalmazott mágneses tér esetében a rendszer mágneses viselkedése lineáris. A késleltetési az egyensúlyi állapot elérése után értelmezhető a gerjesztés és a válaszfüggvény időbeli eltéréseként. A különböző meredekségű gerjesztéseket elő lehet állítani mind az alkalmazott mágneses térerősség, mind a felfutási idő állításával.

Méréseim során a rámpa meredekségét, mint leírást találtam a legmegfelelőbbnek a gerjesztés leírására az egytengelyű tárcsa esetében alkalmazott egyszerű mágneses térerősség használata helyett. Az alkalmazott meredekségek  $20 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ;  $27 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ;  $34 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ;  $38 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ;  $43 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$  és  $47 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$  voltak. Azonos,  $34 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$  meredekségre, de eltérő maximális térerősségre és gerjesztési időtartamra adott válaszokra mutat példát az 5.15. ábra. Látható, hogy a válaszok első szakasza egybe esik, így a mérések során beállítandó paraméterpárosítások száma jelentősen csökken. Az exponenciális tag lecsengéséhez a minél hosszabb mérések a megfelelőek, mivel a lineáris szakaszon értelmezhető a késleltetési idő.



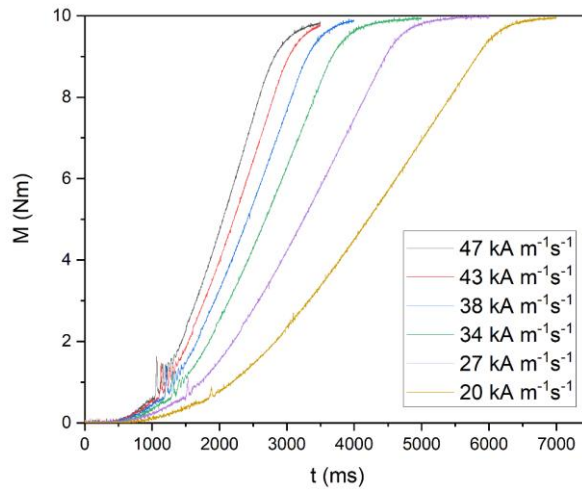
5.15. ábra Azonos meredekségű gerjesztőjelre ( $34 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) adott nyomatékválaszok  $n = 30 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámnál

A többtárcsás tengelykapcsoló esetében a leírtak szerint minden paraméter számítógépes irányítással állítható. A sorozatmérési ciklusban először beállításra került a megfelelő fordulatszám, majd az áramerősség folyamatos növelésével mérésre került a rámpagerjesztés és az arra adott válasz. Ezután egy hat másodperces keverési szakasz következett, majd a rámpafüggvény ismételt mérése. A mérések 12-szeres ismétlése után az új fordulatszám beállításával indult újra a mérési ciklus.

A mérési módszerhez szükséges a bemenő jel ismerete. A rámpagerjesztés mérése egy, a tekercsel párhuzamosan kapcsolt ellenálláshálózaton keresztül történik, mely az alkalmazott árammal arányos feszültségértéket ad.

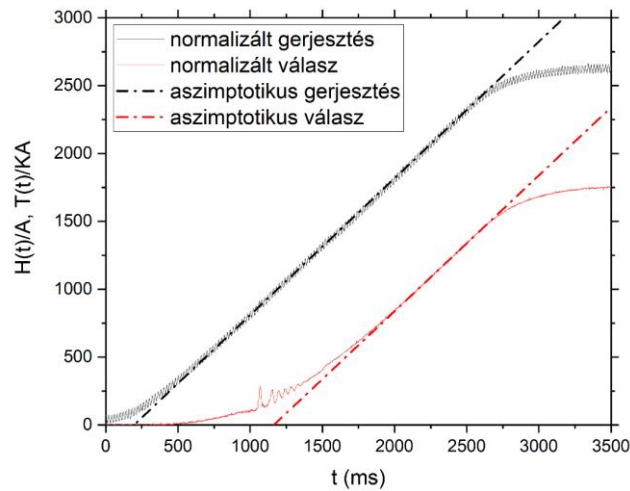
### 5.2.3 Mérés eredmények és értékelésük

Egy mérési sorozatra mutat példát az 5.16. ábra  $n = 70 \text{ min}^{-1}$  esetén. Minden mérésnél megfigyelhető ezen a fordulatszámon az exponenciális szakaszban egy belengés, mely az elektronikai rendszerből (tápegység és tekercs) ered. A mérés kiértékelését nem befolyásolja, a válasz lineáris, kiértékelhető szakaszára lecseng. A nagyobb meredekségű gerjesztések esetén a berezgés is jelentősebb.



5.16. ábra Mért nyomatékválaszok  $n = 70 \text{ min}^{-1}$  fordulatszám esetén

Az illesztésre mutat példát a 5.17. ábra. A normalizálás után a gerjesztés és a válasz azonos meredeksége mellett a közöttük lévő különbség adja meg az késleltetési [115]. A gerjesztési függvényre illesztett lineáris metszéspontja nagy eltérést mutat a zérus értéktől, amely szintén az elektronikus rendszer (tápegység és tekercs) hibája.



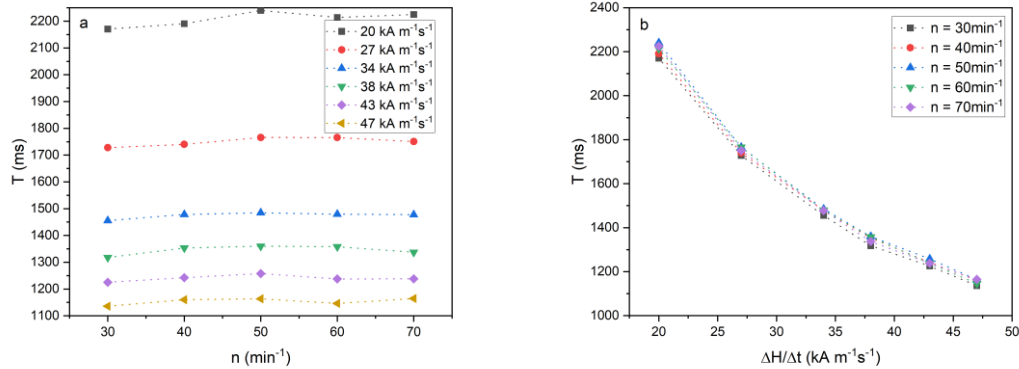
5.17. ábra Rámpafüggvény gerjesztésre illesztett görbe  $47 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$  meredekségnél

$$n = 70 \text{ min}^{-1}$$

A rendszer teljes késleltetési ideje így a nyomatékgörbére illesztett aszimptota és a mérési idő zérus időpontja között eltelt idő. Ez tartalmazza mind a rendszer mechanikai időállandóját ( $\tau_m$ ), mind a magnetoreológiai folyadék időállandóját ( $\tau_f$ ), mind a

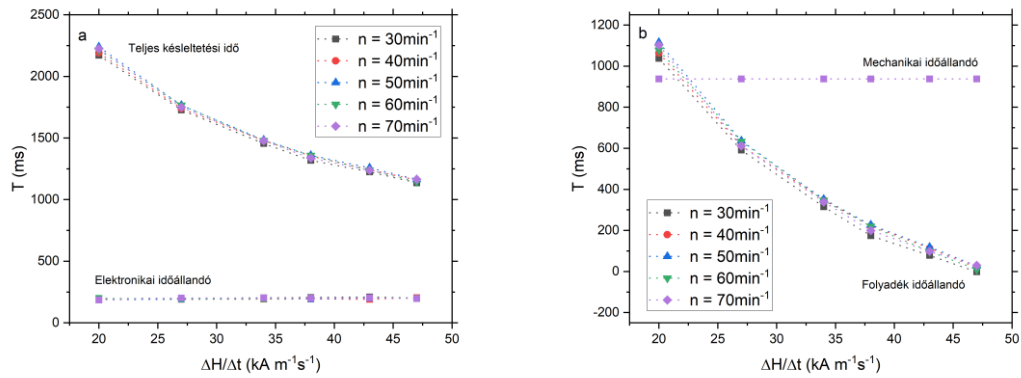
rendszer elektronikai időállandóját ( $\tau_e$ ) [115,116]. Ez utóbbit jelöli a gerjesztési adatokra illesztett görbe időtengelyi metszéspontja és a zérus időpont közötti idő. A késleltetési időket az 5.18. ábra mutatja.

$$T = \tau_e + \tau_f + \tau_m \quad (5.5)$$



5.18. ábra Nyomatékátviteli késleltetési idők a fordulatszám (a) és a gerjesztési meredekség (b) függvényében többletárcsás tengelykapcsolónál (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)

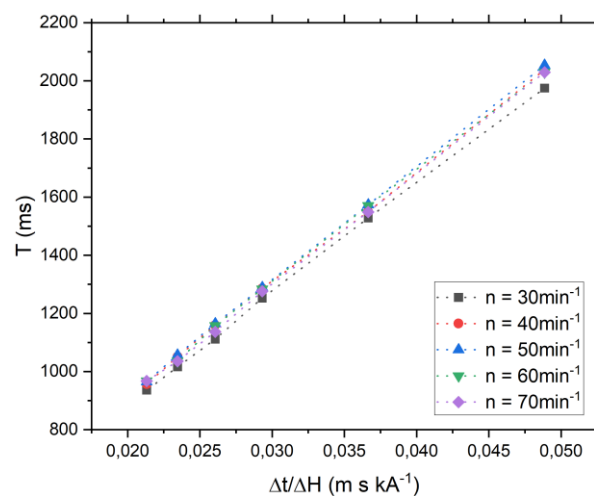
Az eredmények alapján a nyomatékátviteli késleltetési idők az egytárcsás tengelykapcsolónál látottakhoz hasonlóan kevésbé függenek a fordulatszámtól. Az elektronikai időállandók a feljebb említett módon illesztéssel meghatározhatók. Az elektronikai időállandó a 47 kAm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> meredekség esetén meghatározásra került, értéke  $\tau_{f,47} = 29,8$  ms. Ezzel az értékkel már számítható a mechanikai időállandó, melyre  $\tau_m = 937,7$  ms értéket kaptam. Mivel a mechanikai időállandó nem változik a gerjesztési meredekség változtatásával, ezért a teljes késleltetési idő és az elektronikai időállandók függvényében meghatározhatók a folyadékra vonatkozó időállandók.



5.19. ábra Késleltetési idők és elektronikai időállandók (a), valamint a folyadék és a mechanikai időállandók (b) (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)

Látható, hogy a gerjesztési meredekség változásával az elektronikai időállandó változása elhanyagolható, így a folyadék láncosodási mechanizmusa változik nagy mértékben. A késleltetési időt a gerjesztési meredekség nagy mértékben befolyásolja, míg a mechanikai és elektronikai időállandók ettől függetlenül hatnak rá. Optimális tengelykapcsoló tervezésekor tehát e kettő paramétert ajánlom figyelembe venni.

A rámpameredekség függvényében minden fordulatszám esetén a meredekség növekedésével csökkenő tendenciát mutat a késleltetési idő. A késleltetési időket ábrázolva a rámpa meredekség reciprokanak függvényében lineáris összefüggést mutatnak, melyet az 5.20. ábra szemléltet. Ebből következően a rámpa meredekségétől hiperbolikusan függ a késleltetési idő.



5.20. ábra A késleltetési idők a rámpameredekség reciprokanak függvényében (a pontozott vonal a jobb szemléltetést szolgálja)

### 5.3 Összefoglalás

Munkám során egytárcsás és többtárcsás magnetoreológiai tengelykapcsolók tervezése és kivitelezése után mértem azoknak nyomatékviteli időállandóit és késleltetési időit a fordulatszám és a mágneses térerősség függvényében.

Az egytárcsás tengelykapcsoló vízszintes, nyitott elrendezésű. A vizsgálatok során három Lord Co. által gyártott, valamint egy nanofluidummal stabilizált folyadékot vizsgáltam. A vizsgálatok során  $n = 11,5 - 46,5 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámok között, valamint  $H = 91 - 155 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$  mágneses térerősségek között mértem. A nyomatékviteli időállandó megállapításához egységugrás gerjesztést alkalmaztam, az erre válaszként kapott nyomatékgörbékre a rendszer matematikai leírásaként kapott exponenciális függvényt illesztve határoztam meg az időállandókat. Megállapítottam, hogy az exponenciális függvény jól illeszkedik a mérési eredményekre. Az időállandók értéke a fordulatszámtól kis mértékben függ, míg a mágneses térerősség növekedésével változik, alacsony fordulatszámon csökkenés után növekedést mutat, míg magasabb fordulatszámon csökkenés tapasztalható. A mért időállandók 60 és 130 ms között voltak.

A többtárcsás tengelykapcsoló öt tárcsával és hat folyadékréteggel rendelkezik, melyeket a MR folyadék köt össze. A nyomatékmérő szenzort a kimenő tengellyel itt is fogasszija köti össze. A mérések során  $n = 30 - 70 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámot, valamint  $20 - 47 \text{ kAm}^{-1}\text{s}^{-1}$  gerjesztést alkalmaztam, Lord MRF 122EG folyadékot használva. Az késleltetési idők méréseire ennél a készüléknél rámpafüggvény gerjesztést alkalmaztam. Mind a gerjesztést, mind az arra adott nyomatékválaszt mérve, a görbék normalizálása után a mérési nullponthoz viszonyított tengelymetszetek adták a késleltetési időt. Megállapítottam, hogy az késleltetési idő jó közelítéssel független a fordulatszámtól, míg a gerjesztési meredekség növekedésével csökkenő tendenciát mutat. Megállapítottam, hogy az késleltetési idők a mechanikai, elektronikai és MR folyadék időállandó összetevőkből állnak, melyek közül az elektronikai és mechanikai a különböző beállításoknál állandók. A teljes késleltetési idő 2200 és 1100 ms között változik, mely változást a folyadék időállandójának változása váltja ki.

## 6. Tézisek

1. Elméleti számítással vizsgáltam a monodiszperz és bidiszperz elektoreológiai folyadékok véges és végtelen láncokban fellépő erőket, valamint a bidiszperz láncokat tartalmazó ER folyadék dielektromos állandó változását. (Vonatkozó publikációk: [C2], [K1])
  - 1.1. Bidiszperz lánc belső, elektromos térerősségére új összefüggést vezettem le. A két különböző méretű részecske arányában ( $\sigma_B/\sigma_A = 1 \dots 10$ ) vizsgálva a helyi elektromos térerősséget megállapítottam, hogy a kisebb részecskénél növekszik jobban a helyi térerősség.
  - 1.2. A helyi térerősséget felhasználva vizsgáltam a bidiszperz láncban ható erőket. A helyi térerősségekre új formulákat vezettem le bidiszperz lánc esetén, megmutatva azok aszimptotikus viselkedését. Megmutattam, hogy a monodiszperz láncához hasonlóan a véges láncra levezetett összefüggés alacsony részecskeszámok esetén alacsonyabb értéket számít az erőre, mint a végtelen bidiszperz láncra vonatkozó egyenlet. Megállapítottam, hogy a bidiszperz láncban ható erő értéke az azt alkotó részecskékből álló, monodiszperz láncokban ható erők között helyezkedik el.
  - 1.3. Aszimptotikus egyenleteket vezettem le a  $\sigma_B/\sigma_A \rightarrow \infty$  határesetben a helyi térerősségekre. Megmutattam, hogy a bidiszperz lánc helyi térerősségeire bevezetett formulák alapján számolt érték megegyezik a határértékszámítás eredményeivel.
  - 1.4. Bidiszperz ER folyadék esetén a Clausius-Mosotti egyenletből kiindulva megvizsgáltam a dielektromos permittivitás változását két különböző koncentrációt alkalmazva. Megállapítottam, hogy a vegyes, bidiszperz láncokat tartalmazó ER folyadék esetén a dielektromos állandó változása az alkotó részecskékből álló monodiszperz láncokat tartalmazó ER fluidum esetén tapasztalható változások közé esik.

2. Anton Paar Physica MCR301 rotációs viszkoziméteren végzett mérések alapján az Andrade egyenlet bővítésével új összefüggést vezettem be az elektorreológiai folyadékok viszkozitásának hőmérséklet- és térerősségfüggésére. (Vonatkozó publikációk: [C3], [K2])

2.1. Három különböző koncentrációjú (10, 20 és 30 m/m%), szilícium-dioxid részecskékből ( $\sigma \approx 5 \mu\text{m}$ ) és polidimetil-sziloxánból álló ER folyadék esetén mértem temperált környezetben a viszkozitást,  $T = 293 \text{ K}$  hőmérséklettől  $T = 343 \text{ K}$  hőmérsékletig. Az alkalmazott elektromos térerősséget 0 és  $1769 \text{ kV/m}$  között változtattam. A mérési eredményeket az általam bevezetett összefüggéssel számolt eredményekkel összehasonlítva megállapítottam, hogy az új formula jól írja le a viszkozitás hőmérséklet- és térerősség függését, az eltérések átlagos értéke 10%-os diszperzióánál 1,26%, 20%-osnál 3,02%, 30%-os diszperzió esetében 2,73%.

2.2. A bevezetett összefüggést egy elméleti ER tengelykapcsoló modell hőmérséklet-emelkedésének vizsgálatához alkalmaztam. A modellhez a  $h = 0,04 \text{ m}$ ,  $r = 0,0133 \text{ m}$ ,  $s = 0,0113 \text{ m}$ ,  $\omega = 4,057 \text{ rad/s}$  és  $C = 0,05 \text{ J/K}$  adatokat használtam. A hőmérséklet-változás leírására felírt differenciálegyenletet numerikus módon és sorfejtés alkalmazásával analitikus módon is megoldottam. Megállapítottam, hogy a sorfejtésből az első 5 tag figyelembe vételével már a numerikus számításnál kapott érték érhető el. Megmutattam, hogy ugyanarra a hőmérsékletre gyorsabban következik be a melegedés a koncentráció és a térerősség növekedésével.

3. Saját fejlesztésű egytárcsás és többtárcsás MR tengelykapcsolók nyomatékvitelét és nyomatékviteli időállandóit vizsgáltam különböző MR folyadékok és gerjesztések esetén. (Vonatkozó publikációk: [C1], [K3])

3.1. Egytárcsás tengelykapcsolónál Lord MRF-122EG, MRF-132DG, MRF-140CG és 190521-1+20Fe folyadékokat vizsgáltam 11,5 és 46,5 l/perc fordulatszámok, valamint 91 és 155 kA/m mágneses térerősségek mellett. Egységugrás gerjesztést alkalmazva számítottam a nyomatékviteli időállandót a vizsgált paraméterek és folyadékok esetén.

Megállapítottam, hogy a nyomatékviteli időállandó az egytárcsás tengelykapcsoló esetében kis mértékben függ csak a fordulatszámtól. Az

időálló értéke a mágneses térerősség növekedésével a fordulatszám függvényében csökkenő tendenciát mutat.

3.2. Többtárcsás tengelykapcsolónál megállapítottam, hogy a több folyadékréteg miatt az átvihető nyomaték nagyobb ugyanazt a térerősséget alkalmazva, mint az egytárcsás tengelykapcsoló esetén. Megmutattam, hogy a rámpafüggvény módszer alkalmas MR tengelykapcsolók nyomatékátviteli késleltetési idejének meghatározására.

Bemutattam, hogy rámpafüggvény alkalmazása esetén a késleltetési idők csökkennek a rámpa meredekségének növelésével, míg a fordulatszámtól kevésbé függenek. A teljes késleltetési időt mechanikai, elektronikai és folyadék időállóakra bontva megállapítottam, hogy a mechanikai és elektronikai időálló független az alkalmazott rámpafüggvény meredekségétől, de befolyásolják a teljes késleltetési időt.

## 7. Az értekezéshez kapcsolódó publikációk

- [C1] **Mester, S.**; Horváth, B., Lukács, A. and Szalai, I.: Investigation of the torque transmission time constant of a multi-disc magnetorheological clutch in the case of ramp function excitation, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (1757-8981 1757-899X): 1246 1 p. 012005. (2022)  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012005>
- [C2] **Mester, S.**; Horváth, B. and Szalai, I.: Polarizabilities and electric field-induced forces in periodic two-component linear dielectric sphere chains, Journal of Molecular Liquids, 370 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120939>
- [C3] **Mester, S.** and Szalai, I.: Temperature and Electric Field Dependence of the Viscosity of Electrorheological (ER) Fluids: Warming up of an Electrorheological Clutch, Hungarian Journal of Industry and Chemistry (0133-0276 2450-5102): 48 2 pp 59-64 (2020)  
<https://doi.org/10.33927/hjic-2020-29>
- [K1] **Mester, S.** és Szalai, I.: Az elektoreológiai folyadékok alkalmazása felületi megmunkálásra: a láncképződés vizsgálata, In: Biró, K Á; Sebestyén, P Gy (szerk.) ENELKO 2016 - XVII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2016 - XXVI. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2016) pp. 94-98., 5 p., ENELKO, Kolozsvár, Románia, 2016. október 6-9.
- [K2] **Mester, S.** és Szalai, I.: Elektoreológiai folyadékok viszkozitásának hőmérséklet- és térerősség függése, In: Biró Károly-Ágoston ; Sebestyén-Pál György (szerk.) ENELKO 2017: XVIII. Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2017: XVII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2017) pp. 77-82., 6p., ENELKO, Nagyvárad, Románia, 2017. október 12-15.
- [K3] **Mester, S.** és Szalai I.: Magnetoreológiai tengelykapcsoló nyomatékviteli időállandójának vizsgálata, In: Barabás, István (szerk.) XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, Erdélyi Magyar Tudományos Társaság (EMT), (2019) pp. 348-351., 4 p. Nagyvárad, Románia, 2019. április 25-28.

## 8. Irodalomjegyzék

- [1] N. Shehata, M.A. Abdelkareem, E.T. Sayed, D.E. Egirani, A.W. Opukumo, Smart Materials: The Next Generation, *Encycl. Smart Mater.* (2022) 288–299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00062-0>.
- [2] a. D. Mc Naught, a Wilkinson, *Compendium of Chemical Terminology-Gold Book*, Iupac. (2012) 1670. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
- [3] W.M. Winslow, Induced fibrillation of suspensions, *J. Appl. Phys.* 20 (1949) 1137–1140. <https://doi.org/10.1063/1.1698285>.
- [4] Y.F. Deinega, G. V. Vinogradov, Electric fields in the rheology of disperse systems, *Rheol. Acta.* 23 (1984) 636–651. <https://doi.org/10.1007/BF01438804>.
- [5] W. Wen, X. Huang, S. Yang, K. Lu, P. Sheng, The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles, *Nat. Mater.* 2 (2003) 727–730. <https://doi.org/10.1038/nmat993>.
- [6] X. Dong, C. Niu, M. Qi, *Electrorheological Elastomers*, *Elastomers*. (2017). <https://doi.org/10.5772/intechopen.68396>.
- [7] T. Shiga, A. Okada, T. Kurauchi, Electroviscoelastic Effect of Polymer Blends Consisting of Silicone Elastomer and Semiconducting Polymer Particles, *Macromolecules*. 26 (1993) 6958–6963. <https://doi.org/10.1021/ma00077a038>.
- [8] W. Wen, X. Huang, P. Sheng, Electrorheological fluids: Structures and mechanisms, *Soft Matter*. 4 (2008) 200. <https://doi.org/10.1039/b710948m>.
- [9] M. Parthasarathy, D.J. Klingenberg, Electrorheology: Mechanisms and models, *Mater. Sci. Eng. R Reports*. 17 (1996) 57–103. [https://doi.org/10.1016/0927-796X\(96\)00191-X](https://doi.org/10.1016/0927-796X(96)00191-X).
- [10] B. Horváth, I. Szalai, Structure of electrorheological fluids: A dielectric study of chain formation, *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* 86 (2012) 1–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.061403>.
- [11] D.L. Klass, T.W. Martinek, Electroviscous fluids. I. rheological properties, *J. Appl. Phys.* 38 (1967) 67–74. <https://doi.org/10.1063/1.1709013>.
- [12] J.E. Stangroom, Electrorheological fluids, *Phys. Technol.* 14 (1983) 290–296. <https://doi.org/10.1088/0305-4624/14/6/305>.
- [13] X. Huang, W. Wen, S. Yang, P. Sheng, Mechanisms of the giant electrorheological effect, *Solid State Commun.* 139 (2006) 581–588. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2006.04.042>.

- [14] R. Shen, X. Wang, Y. Lu, D. Wang, G. Sun, Z. Cao, K. Lu, Polar-Molecule-Dominated Electrorheological Fluids Featuring High Yield Stresses, *Adv. Mater.* 21 (2009) 4631–4635. <https://doi.org/10.1002/adma.200901062>.
- [15] Y.D. Liu, H.J. Choi, Electrorheological fluids: Smart soft matter and characteristics, *Soft Matter*. 8 (2012) 11961–11978. <https://doi.org/10.1039/c2sm26179k>.
- [16] T. Do, Y.G. Ko, Y. Chun, Y. Jung, U.S. Choi, Y.S. Park, J.W. Woo, Switchable electrorheological activity of polyacrylonitrile microspheres by thermal treatment: from negative to positive, *Soft Matter*. 14 (2018) 8912–8923. <https://doi.org/10.1039/c8sm01691g>.
- [17] N.M. Kuznetsov, S.I. Belousov, R.A. Kamyshinsky, A.L. Vasiliev, S.N. Chvalun, E.B. Yudina, A. Ya. Vul, Detonation nanodiamonds dispersed in polydimethylsiloxane as a novel electrorheological fluid: Effect of nanodiamonds surface, *Carbon N. Y.* 174 (2021) 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.12.014>.
- [18] Z. Qiu, R. Shen, J. Huang, K. Lu, X. Xiong, A giant electrorheological fluid with a long lifetime and good thermal stability based on TiO<sub>2</sub> inlaid with nanocarbons, *J. Mater. Chem. C*. 7 (2019) 5816–5820. <https://doi.org/10.1039/c9tc00364a>.
- [19] A. Lengálová, V. Pavlínek, P. Sába, O. Quadrat, T. Kitano, J. Stejskal, Influence of particle concentration on the electrorheological efficiency of polyaniline suspensions, *Eur. Polym. J.* 39 (2003) 641–645. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(02\)00281-1](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00281-1).
- [20] Z. Song, Y. Cheng, J. Wu, J. Guo, G. Xu, Influence of volume fraction on the yield behavior of giant electrorheological fluid, *Appl. Phys. Lett.* 101 (2012) 101908. <https://doi.org/10.1063/1.4751264>.
- [21] S. Lee, C.M. Yoon, J.Y. Hong, J. Jang, Enhanced electrorheological performance of a graphene oxide-wrapped silica rod with a high aspect ratio, *J. Mater. Chem. C*. 2 (2014) 6010–6016. <https://doi.org/10.1039/c4tc00635f>.
- [22] J.Y. Hong, M. Choi, C. Kim, J. Jang, Geometrical study of electrorheological activity with shape-controlled titania-coated silica nanomaterials, *J. Colloid Interface Sci.* 347 (2010) 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.03.054>.
- [23] C.M. Yoon, Y. Jang, J. Noh, J. Kim, K. Lee, J. Jang, Enhanced Electrorheological Performance of Mixed Silica Nanomaterial Geometry, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 9 (2017) 36358–36367. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b08298>.

- [24] J. Wu, Z. Song, F. Liu, J. Guo, Y. Cheng, S. Ma, G. Xu, Giant electrorheological fluids with ultrahigh electrorheological efficiency based on a micro/nano hybrid calcium titanyl oxalate composite, *NPG Asia Mater.* 8 (2016) e322–e322. <https://doi.org/10.1038/am.2016.158>.
- [25] Y. Liang, X. Yuan, L. Wang, X. Zhou, X. Ren, Y. Huang, M. Zhang, J. Wu, W. Wen, Highly stable and efficient electrorheological suspensions with hydrophobic interaction, *J. Colloid Interface Sci.* 564 (2020) 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.129>.
- [26] Y. Liang, D. Huang, X. Zhou, Z. Wang, Q. Shi, Y. Hong, H. Pu, M. Zhang, J. Wu, W. Wen, Efficient Electrorheological Technology for Materials, Energy, and Mechanical Engineering: From Mechanisms to Applications, *Engineering*. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.01.014>.
- [27] C. Shen, W. Wen, S. Yang, P. Sheng, Wetting-induced electrorheological effect, *J. Appl. Phys.* 99 (2006) 106104. <https://doi.org/10.1063/1.2199749>.
- [28] Y. Hong, W. Wen, Influence of carrier liquid on nanoparticle-based giant electrorheological fluid, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 27 (2016) 866–871. <https://doi.org/10.1177/1045389X15596623>.
- [29] B.X. Wang, Y. Zhao, X.P. Zhao, The wettability, size effect and electrorheological activity of modified titanium oxide nanoparticles, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 295 (2007) 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.08.025>.
- [30] X. Niu, W. Wen, Y.K. Lee, Electrorheological-fluid-based microvalves, *Appl. Phys. Lett.* 87 (2005) 1–3. <https://doi.org/10.1063/1.2140070>.
- [31] L. Liu, X. Chen, X. Niu, W. Wen, P. Sheng, Electrorheological fluid-actuated microfluidic pump, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 083505. <https://doi.org/10.1063/1.2337877>.
- [32] X. Niu, L. Liu, W. Wen, P. Sheng, Hybrid approach to high-frequency microfluidic mixing, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 044501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.044501>.
- [33] A. Khanicheh, D. Mintzopoulos, B. Weinberg, A.A. Tzika, C. Mavroidis, Evaluation of electrorheological fluid dampers for applications at 3-T MRI environment, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.* 13 (2008) 286–294. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2008.924043>.
- [34] H. Pu, Y. Huang, Y. Sun, M. Wang, S. Yuan, Z. Kong, P. Yang, L. Chu, J. Wu, Y.

- Peng, S. Xie, J. Luo, Design and experiment of bio-inspired GER fluid damper, *Sci. China Inf. Sci.* 63 (2020) 1–3. <https://doi.org/10.1007/s11432-019-2752-3>.
- [35] T. Kuriyagawa, M. Saeki, K. Syoji, Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts, *Precis. Eng.* 26 (2002) 370–380. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00112-5).
- [36] L. Zhang, T. Kuriyagawa, T. Kaku, J. Zhao, Investigation into electrorheological fluid-assisted polishing, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 45 (2005) 1461–1467. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.021>.
- [37] Y.Y. Tsai, C.H. Tseng, C.K. Chang, Development of a combined machining method using electrorheological fluids for EDM, *J. Mater. Process. Technol.* 201 (2008) 565–569. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.150>.
- [38] T. Aoyama, Development of gel structured electrorheological fluids and their application for the precision clamping mechanism of aerostatic sliders, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 53 (2004) 325–328. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60708-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60708-2).
- [39] P.J. Rankin, J.M. Ginder, D.J. Klingenberg, Electro- and magneto-rheology, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 3 (1998) 373–381. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(98\)80052-6](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(98)80052-6).
- [40] J. Rabinow, The Magnetic Fluid Clutch, *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 67 (1948) 1308–1315. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1948.5059821>.
- [41] C. Rinaldi, A. Chaves, S. Elborai, X. He, M. Zahn, Magnetic fluid rheology and flows, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 10 (2005) 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2005.07.004>.
- [42] L. Rodríguez-Arco, M.T. López-López, P. Kuzhir, G. Bossis, J.D.G. Durán, Optimizing the magnetic response of suspensions by tailoring the spatial distribution of the particle magnetic material, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 5 (2013) 12143–12147. <https://doi.org/10.1021/am404035w>.
- [43] M. Ashtiani, S.H. Hashemabadi, A. Ghaffari, A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization, *J. Magn. Mater.* 374 (2015) 711–715. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.020>.
- [44] J.M. Ginder, L.C. Davis, Shear stresses in magnetorheological fluids: Role of magnetic saturation, *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 3410–3412. <https://doi.org/10.1063/1.112408>.
- [45] G. Yang, B.F. Spencer, J.D. Carlson, M.K. Sain, Large-scale MR fluid dampers:

- Modeling and dynamic performance considerations, *Eng. Struct.* 24 (2002) 309–323. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00097-9).
- [46] A. Giorgetti, N. Baldanzini, M. Biasiotto, P. Citti, Design and testing of a MRF rotational damper for vehicle applications, *Smart Mater. Struct.* 19 (2010). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/6/065006>.
- [47] A.S. Shafer, M.R. Kermani, Design and validation of a Magneto-Rheological clutch for practical control applications in human-friendly manipulation, in: 2011 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., IEEE, 2011: pp. 4266–4271. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980258>.
- [48] W.H. Li, H. Du, Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 21 (2003) 508–515. <https://doi.org/10.1007/s001700300060>.
- [49] G.A. Flores, R. Sheng, J. Liu, Medical Applications of Magnetorheological Fluids a Possible New Cancer Therapy, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 10 (1999) 708–713. <https://doi.org/10.1106/djx7-r39a-xkob-2xan>.
- [50] A. Chiolerio, M.B. Quadrelli, Smart Fluid Systems: The Advent of Autonomous Liquid Robotics, *Adv. Sci.* 4 (2017) 1700036. <https://doi.org/10.1002/advs.201700036>.
- [51] O. Ashour, C.A. Rogers, W. Kordonsky, Magnetorheological Fluids: Materials, Characterization, and Devices, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 7 (1996) 123–130. <https://doi.org/10.1177/1045389X9600700201>.
- [52] J. Leng, Magnetorheology: advances and applications , edited by Norman M. Wereley , *Int. J. Smart Nano Mater.* 5 (2014) 33–33. <https://doi.org/10.1080/19475411.2014.900909>.
- [53] G. Bossis, O. Volkova, S. Lacis, A. Meunier, Magnetorheology: Fluids, Structures and Rheology, in: Springer, Berlin, Heidelberg, 2002: pp. 202–230. [https://doi.org/10.1007/3-540-45646-5\\_11](https://doi.org/10.1007/3-540-45646-5_11).
- [54] J.B. Jun, S.Y. Uhm, J.H. Ryu, K. Do Suh, Synthesis and characterization of monodisperse magnetic composite particles for magnetorheological fluid materials, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 260 (2005) 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.03.020>.
- [55] M.K. Hong, B.J. Park, H.J. Choi, Preparation and physical characterization of polyacrylamide coated magnetite particles, *Phys. Status Solidi.* 204 (2007) 4182–4185. <https://doi.org/10.1002/pssa.200777350>.

- [56] A. Muhammad, X. Yao, Z. Deng, Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control, *J. Mar. Sci. Appl.* 5 (2006) 17–29. <https://doi.org/10.1007/s11804-006-0010-2>.
- [57] H.T. Pu, F.J. Jiang, Z. Yang, B. Yan, X. Liao, Effects of polyvinylpyrrolidone and carbon nanotubes on magnetorheological properties of iron-based magnetorheological fluids, *J. Appl. Polym. Sci.* 102 (2006) 1653–1657. <https://doi.org/10.1002/app.24049>.
- [58] C. Sarkar, H. Hirani, Effect of Particle Size on Shear Stress of Magnetorheological Fluids, *Smart Sci.* 3 (2015) 65–73. <https://doi.org/10.1080/23080477.2015.11665638>.
- [59] L. Pei, H. Pang, K. Chen, S. Xuan, X. Gong, Simulation of the optimal diameter and wall thickness of hollow Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> microspheres in magnetorheological fluids, *Soft Matter*. 14 (2018) 5080–5091. <https://doi.org/10.1039/c8sm00704g>.
- [60] J.R. Morillas, J. De Vicente, Magnetorheology: a review, *Soft Matter*. 16 (2020) 9614–9642. <https://doi.org/10.1039/d0sm01082k>.
- [61] A.G. Olabi, A. Grunwald, Design and application of magneto-rheological fluid, *Mater. Des.* 28 (2007) 2658–2664. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.009>.
- [62] S. Elizabeth Premalatha, R. Chokkalingam, M. Mahendran, Magneto Mechanical Properties of Iron Based MR Fluids, *Am. J. Polym. Sci.* 2 (2012) 50–55. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20120204.01>.
- [63] W. Jiang, Y. Zhang, S. Xuan, C. Guo, X. Gong, Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties, *J. Magn. Mater.* 323 (2011) 3246–3250. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.07.024>.
- [64] S.T. Lim, M.S. Cho, I.B. Jang, H.J. Choi, M.S. Jhon, Magnetorheology of carbonyl-iron suspensions with submicron-sized filler, *IEEE Trans. Magn.* 40 (2004) 3033–3035. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.830400>.
- [65] S.T. Lim, M.S. Cho, I.B. Jang, H.J. Choi, Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension stabilized by fumed silica, in: *J. Magn. Mater.*, North-Holland, 2004: pp. 170–173. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.04.040>.
- [66] S. Kumar, R. Sehgal, M.F. Wani, M.D. Sharma, Stabilization and tribological properties of magnetorheological (MR) fluids: A review, *J. Magn. Mater.* 538 (2021) 168295. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168295>.
- [67] B.J. Park, J.L. You, H.J. Choi, S.Y. Park, B.Y. Lee, Synthesis and

- magnetorheological characterization of magnetite nanoparticle and poly(vinyl butyral) composite, *IEEE Trans. Magn.* 45 (2009) 2460–2463. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2018612>.
- [68] F.F. Fang, H.J. Choi, W.S. Choi, Two-layer coating with polymer and carbon nanotube on magnetic carbonyl iron particle and its magnetorheology, *Colloid Polym. Sci.* 288 (2010) 359–363. <https://doi.org/10.1007/s00396-009-2164-3>.
- [69] X. Wang, F. Gordaninejad, Study of magnetorheological fluids at high shear rates, *Rheol. Acta.* 45 (2006) 899–908. <https://doi.org/10.1007/s00397-005-0058-y>.
- [70] K. Shimada, H. Oka, Magnetic characteristics of magnetic compound fluid (MCF) under DC and AC magnetic fields, *J. Magn. Magn. Mater.* 290-291 PART 2 (2005) 804–807. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.369>.
- [71] M.S. Cho, S.T. Lim, I.B. Jang, H.J. Choi, M.S. Jhon, Encapsulation of spherical iron-particle with PMMA and its magnetorheological particles, *IEEE Trans. Magn.* 40 (2004) 3036–3038. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.830413>.
- [72] J.S. Choi, B.J. Park, M.S. Cho, H.J. Choi, Preparation and magnetorheological characteristics of polymer coated carbonyl iron suspensions, *J. Magn. Magn. Mater.* 304 (2006) e374–e376. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.02.055>.
- [73] R.C. Bell, J.O. Karli, A.N. Vavreck, D.T. Zimmerman, G.T. Ngatu, N.M. Wereley, Magnetorheology of submicron diameter iron microwires dispersed in silicone oil, *Smart Mater. Struct.* 17 (2008) 015028. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/01/015028>.
- [74] M.S. Kim, Y.D. Liu, B.J. Park, C.Y. You, H.J. Choi, Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field, *J. Ind. Eng. Chem.* 18 (2012) 664–667. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.062>.
- [75] C. Guerrero-Sanchez, T. Lara-Ceniceros, E. Jimenez-Regalado, M. Raşa, U.S. Schubert, Magnetorheological fluids based on ionic liquids, *Adv. Mater.* 19 (2007) 1740–1747. <https://doi.org/10.1002/adma.200700302>.
- [76] L. Rodriguez-Arco, A. Gomez-Ramirez, J. D.G., M. T., New Perspectives for Magnetic Fluid-Based Devices Using Novel Ionic Liquids as Carriers, in: *Smart Actuation Sens. Syst. - Recent Adv. Futur. Challenges*, InTech, 2012. <https://doi.org/10.5772/51398>.
- [77] A. Spaggiari, Properties and applications of magnetorheological fluids, *Frat. Ed Integrita Strutt.* 23 (2012) 57–61. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.23.06>.

- [78] D.H. Read, J.E. Martin, Field-structured chemiresistors, *Adv. Funct. Mater.* 20 (2010) 1577–1584. <https://doi.org/10.1002/adfm.200902286>.
- [79] I.I.M. Yazid, S.A. Mazlan, T. Kikuchi, H. Zamzuri, F. Imaduddin, Design of magnetorheological damper with a combination of shear and squeeze modes, *Mater. Des.* 54 (2014) 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.090>.
- [80] D. Hua, X. Liu, Z. Li, P. Fracz, A. Hnydiuk-Stefan, Z. Li, A Review on Structural Configurations of Magnetorheological Fluid Based Devices Reported in 2018–2020, *Front. Mater.* 8 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.640102>.
- [81] How Does an MR Damper Work? | LORD Corp, (n.d.). <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work> (accessed May 16, 2022).
- [82] G.J. Hiemenz, Y.T. Choi, N.M. Wereley, Semi-active control of vertical stroking helicopter crew seat for enhanced crashworthiness, *J. Aircr.* 44 (2007) 1031–1034. <https://doi.org/10.2514/1.26492>.
- [83] E. Shokrollahi, A. Goldenberg, J. Drake, K. Eastwood, M. Kang, Application of a Nonlinear Hammerstein-Wiener Estimator in the Development and Control of a Magnetorheological Fluid Haptic Device for Robotic Bone Biopsy, *Actuators*. 7 (2018) 83. <https://doi.org/10.3390/act7040083>.
- [84] A.E. Dunstan, F.B. Thole, *The Viscosity Of Liquids*, Longmans, Green, London, 1914. <https://www.worldcat.org/title/viscosity-of-liquids/oclc/14567756> (accessed July 23, 2022).
- [85] Arrhenius equation - Oxford Reference, (n.d.). <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095425787> (accessed August 23, 2022).
- [86] E.N.D.C. Andrade, The Viscosity of Liquids, *Nat.* 1930 1253148. 125 (1930) 309–310. <https://doi.org/10.1038/125309b0>.
- [87] G. Nagy, *Tengelykapcsolók bibilográfia*, Budapest Műszaki Egyetem Központi Könyvtára, Budapest, 1966.
- [88] A. Olszak, K. Osowski, Z. Kesy, A. Kesy, Investigation of hydrodynamic clutch with a magnetorheological fluid, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 30 (2019) 155–168. <https://doi.org/10.1177/1045389X18803463>.
- [89] Y. Xiang, R. Li, C. Brach, X. Liu, M. Geimer, A Novel Algorithm for Hydrostatic-Mechanical Mobile Machines with a Dual-Clutch Transmission, *Energies*. 15 (2022) 2095. <https://doi.org/10.3390/en15062095>.

- [90] N. Srivastava, I. Haque, A review on belt and chain continuously variable transmissions (CVT): Dynamics and control, *Mech. Mach. Theory.* 44 (2009) 19–41. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2008.06.007>.
- [91] B. Fu, Y. Zhou, C. Cao, Q. Li, F. Zhang, Research on Power Loss of Continuously Variable Transmission Based on Driving Cycles, in: *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, Institute of Physics Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/5/052054>.
- [92] Y. Yu, J. Suh, Y. Ahn, Performance evaluation of ball CVTs and comparison between conformal and non-conformal type, *Mech. Mach. Theory.* 156 (2021) 104139. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104139>.
- [93] The electrorheological friction clutch, *Ind. Lubr. Tribol.* 43 (1991) 3–4. <https://doi.org/10.1108/EB053412/FULL/XML>.
- [94] Z. Kesy, G. Medrek, A. Olszak, K. Osowski, A. Kesy, Electrorheological Fluid Based Clutches and Brakes, *Encycl. Smart Mater.* (2021) 171–186. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11722-9>.
- [95] M. Whittle, R.J. Atkin, W.A. Bullough, Fluid dynamic limitations on the performance of an electrorheological clutch, *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 57 (1995) 61–81. [https://doi.org/10.1016/0377-0257\(94\)01296-T](https://doi.org/10.1016/0377-0257(94)01296-T).
- [96] W.A. Bullough, A.R. Johnson, A. Hosseini-Sianaki, J. Makin, R. Firoozian, The Electro-Rheological Clutch: Design, Performance Characteristics and Operation, *Http://Dx.Doi.Org/10.1243/PIME\_PROC\_1993\_207\_322\_02*. 207 (1993) 87–95. [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1993\\_207\\_322\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_322_02).
- [97] K.P. Tan, R. Stanway, W.A. Bullough, Validation of dynamic torque response of an electrorheological (ER) clutch, *Mech. Syst. Signal Process.* 20 (2006) 463–492. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2004.10.007>.
- [98] K.P. Tan, A.R. Johnson, R. Stanway, W.A. Bullough, Model validation of the output reciprocating dynamic responses of a twin electro-rheological (ER) clutch mechanism, *Mech. Mach. Theory.* 42 (2007) 1547–1562. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2006.12.005>.
- [99] I. Musiałek, M. Migus, A. Olszak, K. Osowski, Z. Kęsy, A. Kęsy, G.W. Kim, S.B. Choi, Analysis of a combined clutch with an electrorheological fluid, *Smart Mater. Struct.* 29 (2020) 087006. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/AB9FD7>.
- [100] F. Bucchini, P. Forte, F. Frendo, R. Squarcini, A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation, *Frat. Ed Integrita Strutt.* 23 (2012)

- 62–74. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.23.07>.
- [101] F. Gordaninejad, B.M. Kavlicoglu, X. Wang, Study of a magneto-rheological grease (MRG) clutch, (2007) 65250C. <https://doi.org/10.1117/12.717708>.
- [102] Y.-J. Nam, Y.-J. Moon, M.-K. Park, Performance Improvement of a Rotary MR Fluid Actuator Based on Electromagnetic Design, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 19 (2008) 695–705. <https://doi.org/10.1177/1045389X07079463>.
- [103] D. Töröcsik, Some Design Issues of Multi-Plate Magnetorheological Clutches, *Hungarian J. Ind. Chem.* 39 (2011) 41–44. <https://doi.org/10.1515/380>.
- [104] H. Böse, T. Gerlach, J. Ehrlich, Magnetorheological torque transmission devices with permanent magnets, *J. Phys. Conf. Ser.* 412 (2013). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/412/1/012050>.
- [105] D.M. Chen, Q.G. Cai, H. Zhang, Simulation and test study of multidisc magneto-rheological fluid clutch, in: *Appl. Mech. Mater.*, Trans Tech Publications Ltd, 2014: pp. 464–467. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.464>.
- [106] F. Bucchi, P. Forte, F. Frendo, Geometry optimization of a magnetorheological clutch operated by coils, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 231 (2017) 100–112. <https://doi.org/10.1177/1464420716665650>.
- [107] K. Hema Latha, P. Usha Sri, N. Seetharamaiah, Design and Manufacturing Aspects of Magneto-rheological Fluid (MRF) Clutch, *Mater. Today Proc.* 4 (2017) 1525–1534. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.175>.
- [108] J.Y. Park, J.S. Oh, Y.C. Kim, Design and Control of Multi-Plate MR Clutch Featuring Friction and Magnetic Field Control Modes, *Sensors (Basel)*. 22 (2022) 1757. <https://doi.org/10.3390/S22051757>.
- [109] B. Dyke, SJ and Spencer Jr, MRF- Clutch - Design Considerations and Performance, 2nd Int. Work. Struct. Control. (1996) 163--173.
- [110] R.A. Anderson, Electrostatic Forces in an Ideal Spherical-Particle Electrorheological Fluid, *Langmuir*. 10 (1994) 2917–2928. <https://doi.org/10.1021/la00021a013>.
- [111] T.B. Jones, R.D. Miller, K.S. Robinson, W.Y. Fowlkes, Multipolar interactions of dielectric spheres, *J. Electrostat.* 22 (1989) 231–244. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(89\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0304-3886(89)90011-9).
- [112] T. Nakamura, N. Saga, M. Nakazawa, Thermal effects of a homogeneous ER fluid device, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 14 (2003) 87–91.

<https://doi.org/10.1177/1045389X03014002003>.

- [113] M.H. Unuh, P. Muhamad, N.F. Waziralilah, M.H. Amran, Characterization of vehicle smart fluid using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GCMS), *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.* 55 (2019) 240–248.
- [114] P. Decsi, S. Mester, I. Szalai, Tárcsás magnetoreológiai tengelykapcsoló modellezése, a rendszer időbeli viselkedésének vizsgálata, (2018) 4.
- [115] B. Horváth, P. Decsi, I. Szalai, Measurement of the response time of magnetorheological fluids and ferrofluids based on the magnetic susceptibility response, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 33 (2022) 918–927. <https://doi.org/10.1177/1045389X211038697>.
- [116] H.M. Hashemian, *Scholarship @ Western Measurement of Dynamic Temperatures and Pressures in Nuclear Power Plants*, The University of Western Ontario, 2011.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, dr. Szalai Istvánnak, valamint Horváth Barnabásnak, Guba Sándornak és Balogh Diánának a szakmai támogatásért és a disszertáció elkészítésében nyújtott segítségéért.

Köszönettel tartozom továbbá a Mechatronikai Képzési és Kutatási Intézet munkatársainak a tengelykapcsolók tervezésében és mechanikai kivitelezésében nyújtott segítségükért.