

**MISKOLCI EGYETEM**  
**GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR**



**KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREK SPECIÁLIS TERVEZÉSI  
KÉRDÉSEINEK KUTATÁSA**

PHD ÉRTEKEZÉS

Készítette:

**Marada Imre**  
okleveles gépészmérnök

**SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA**  
**GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET**  
**GÉPEK ÉS ELEMEIK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT**

Doktori iskola vezető:

**Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella**  
egyetemi tanár

Témacsoport vezető:

**Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella**  
egyetemi tanár

Témavezető:

**Dr. Bihari János**  
egyetemi docens

**Miskolc**  
**2025**



**TARTALOMJEGYZÉK**

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>TARTALOMJEGYZÉK .....</b>                                                                        | <b>I</b>   |
| <b>TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS.....</b>                                                                     | <b>III</b> |
| <b>JELÖLÉSEK- ÉS RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE.....</b>                                                      | <b>IV</b>  |
| <b>1. BEVEZETÉS .....</b>                                                                           | <b>7</b>   |
| 1.1. <i>A kisméretű műanyag fogaskerekek.....</i>                                                   | <i>7</i>   |
| 1.2. <i>A fogaskerekek.....</i>                                                                     | <i>8</i>   |
| 1.3. <i>A műanyagok alkalmazása fogaskerekek anyagaként.....</i>                                    | <i>8</i>   |
| 1.4. <i>A műanyag fogaskerekek gyártása .....</i>                                                   | <i>8</i>   |
| 1.5. <i>A műanyag fogaskerekek tönkremenetelének okai .....</i>                                     | <i>9</i>   |
| <b>2. A 3D NYOMTATOTT KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK PONTOSSÁGA .....</b>                           | <b>12</b>  |
| 2.1. <i>A 3D nyomtatás .....</i>                                                                    | <i>12</i>  |
| 2.2. <i>A nyomtatáshoz használt geometria előállítása .....</i>                                     | <i>12</i>  |
| 2.3. <i>A használt nyomtatási technológiák .....</i>                                                | <i>12</i>  |
| 2.4. <i>A vizsgálatokhoz használt eszközök.....</i>                                                 | <i>15</i>  |
| 2.5. <i>A vizsgált paraméterek .....</i>                                                            | <i>16</i>  |
| 2.5.1. <i>A fog alakja .....</i>                                                                    | <i>16</i>  |
| 2.5.2. <i>A fogvastagság .....</i>                                                                  | <i>24</i>  |
| 2.5.3. <i>Az osztóköri osztás.....</i>                                                              | <i>27</i>  |
| 2.5.4. <i>A fogmagasság és a fejmagasság .....</i>                                                  | <i>29</i>  |
| <b>3. AZ ÁTFORGATÁSI NYOMATÉK MÉRÉSE .....</b>                                                      | <b>32</b>  |
| 3.1. <i>Az átforgatási nyomaték mérésének alapjai .....</i>                                         | <i>32</i>  |
| 3.2. <i>Új berendezés fejlesztése .....</i>                                                         | <i>33</i>  |
| 3.3. <i>A mérésekhez használt fogaskerekek gyártása.....</i>                                        | <i>38</i>  |
| 3.4. <i>A hibák méréseinek alapjai.....</i>                                                         | <i>45</i>  |
| 3.5. <i>A fogvastagság hibáinak vizsgálata az átforgatási nyomaték mérésével .....</i>              | <i>45</i>  |
| 3.6. <i>Az osztás hibáinak vizsgálata.....</i>                                                      | <i>52</i>  |
| 3.7. <i>A tengelytáv hibáinak vizsgálata.....</i>                                                   | <i>58</i>  |
| <b>4. A HIBÁK HATÁSA A FOGAKON ÉBREDŐ FESZÜLTSÉGEKRE.....</b>                                       | <b>62</b>  |
| 4.1. <i>A végeelemes modell felépítése.....</i>                                                     | <i>62</i>  |
| 4.2. <i>A feszültségek számítása műanyag fogaskerekek esetén .....</i>                              | <i>62</i>  |
| 4.2.1. <i>A fogtófeszültség.....</i>                                                                | <i>62</i>  |
| 4.2.2. <i>A felületi feszültség .....</i>                                                           | <i>63</i>  |
| 4.3. <i>A végeelemes modell validása .....</i>                                                      | <i>65</i>  |
| 4.4. <i>A fogvastagsághibák hatásai .....</i>                                                       | <i>69</i>  |
| 4.5. <i>A fog alakhibáinak hatása .....</i>                                                         | <i>72</i>  |
| 4.6. <i>A tengelytáv hibáinak hatásai .....</i>                                                     | <i>73</i>  |
| <b>5. A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK MELEGEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA .....</b>                           | <b>77</b>  |
| 5.1. <i>A műanyag fogaskerekek melegeedésének meghatározására szolgáló képletek bemutatása.....</i> | <i>77</i>  |

|                                                      |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| 5.2. Melegedés mérése.....                           | 80         |
| 5.2.1. Első mérés .....                              | 83         |
| 5.2.2. Második mérés.....                            | 86         |
| 5.2.3. Harmadik mérés .....                          | 89         |
| 5.2.4. Negyedik mérés.....                           | 92         |
| 5.2.5. Ötödik mérés .....                            | 94         |
| <b>6. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....</b>    | <b>98</b>  |
| <b>7. THESES – NEW SCIENTIFIC RESULTS .....</b>      | <b>100</b> |
| <b>8. ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>                         | <b>102</b> |
| <b>9. SUMMARY.....</b>                               | <b>104</b> |
| <b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....</b>                      | <b>106</b> |
| <b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>                          | <b>107</b> |
| <b>A DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK.....</b> | <b>110</b> |

**TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS**

Date

Supervisor

## JELÖLÉSEK- ÉS RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

### GÖRÖG BETŰK

- $\alpha_{wt}$  kapcsolószög
- $\beta$  a fogferdeségi tényező
- $\beta_b$  a fogferdeségi szög az alapkörön
- $\varepsilon_i$  a fogaskerek részleges kapcsolószáma
- $\varepsilon_\alpha$  a kapcsolószám
- $\varepsilon_\beta$  az átfedési kapcsolószám
- $\vartheta_{1,2}$  a fog felületi hőmérséklete
- $\vartheta_k$  a környezet hőmérséklete
- $\kappa$  a párosított fogaskerek anyagát figyelembe vevő tényező
- $\mu$  a súrlódási tényező
- $\nu$  a Poisson-tényező
- $\sigma_f$  a fogtőfeszültség
- $\sigma_{FP}$  a fogtőnél vett hajlítófeszültség
- $\sigma_{HC}$  a felületi Hertz-feszültség
- $\sigma_{lim}$  a fogaskerék anyagának megengedett hajlítófeszültsége
- $\psi$  a fogvastagság félszöge
- $\psi'$  az osztás félszöge

### LATIN BETŰK

- $A$  a hajtómű belső felülete
- $A_G$  a hajtómű belső felülete
- $b$  a fogszélesség
- $d$  az osztókörátmérő
- $d_a$  a fejkörátmérő

|                 |                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------|
| $d_b$           | alapkörátmérő                                      |
| $d_f$           | a lábkörátmérő                                     |
| $E$             | a rugalmassági modulus                             |
| $ED$            | a relatív terhelési ciklus                         |
| $f$             | a hajtómű szakaszos üzemét figyelembe vevő tényező |
| $F_t$           | a tangenciális erő a fogon                         |
| $h$             | a fogmagasság                                      |
| $h_a$           | a fejmagasság                                      |
| $h_a'$          | a foghúrméret mérési magassága                     |
| $h_f$           | a lábmagasság                                      |
| $H_v$           | a fog veszteségi foka                              |
| $i$             | az áttétel                                         |
| $k_2$           | az anyagtényező                                    |
| $k_3$           | a hajtómű tényező                                  |
| $K_F$           | a fogtő terhelési tényező                          |
| $K_H$           | a fogfelületi terhelési tényező                    |
| $k_9$           | a hőátadási tényező                                |
| $m$             | a modul                                            |
| $P$             | a hajtó motor teljesítménye                        |
| $p$             | az osztóköri osztás                                |
| $p'$            | az osztóhúrméret                                   |
| $r$             | az osztókör sugár                                  |
| $r_v$           | a normál keresztmetszet virtuális osztóköri sugara |
| $R_{\lambda,G}$ | a hajtómű tényező                                  |
| $s$             | a fogvastagság                                     |
| $s'$            | a foghúrméret                                      |
| $u$             | a fogszámviszony                                   |
| $v$             | a tangenciális sebesség                            |
| $Y_{Fa}$        | az alaktényező                                     |
| $Y_L$           | a kenési tényező                                   |

$Y_M$  a fogaskerék párjának anyagát figyelembe vevő tényező

$Y_{NT}$  az élettartam tényező

$Y_{Sa}$  a feszültségkorrekciós tényező

$Y_\beta$  a fogferdeségi tényező

$Y_{\Delta\theta}$  a hőmérséklet növekedési tényező

$Y_{\varepsilon\alpha}$  a kapcsolószám tényező

$Y_\theta$  a környezeti hőmérséklet tényezője

$z$  a fogs szám

$Z_E$  a rugalmassági tényező

$Z_H$  a felületi forma tényező

$Z_\beta$  a fogferdeségi tényező

$Z_{\varepsilon\alpha}$  a kapcsolószám tényező

## RÖVIDÍTÉSEK

CAD computer-aided design

FDM fused deposition modeling

PA poliamid

PLA politejsav

POM polioximetilén

SLA sztereolitográfia

SLS selective laser sintering

TPLA Tough PLA, a politejsav egy módosított változata



## 1. BEVEZETÉS

### 1.1. A kisméretű műanyag fogaskerekek

A kisméretű műanyag fogaskerekek alatt ebben a disszertációban az olyan evolvens profilú, egyenes fogú fogaskerekeket értek, melyeknek modulja nem nagyobb 0,5 mm-nél. Ezeknek a fogaskerekeknek az alapanyaga valamilyen műanyag, általában POM vagy PA [1].

Kisméretű műanyag fogaskerekkel szinte minden területen találkozhatunk. A járműipar például a visszapillantó tükrök állítására vagy a légkondicionáló rendszerek terelőlemezeinek mozgatására alkalmazza őket [2]. De használják őket irodai gépekben, például nyomtatókban fejmozgatásra, különböző mérőeszközökben, pozicionáló hajtóművekben, vagy olyan alkalmazásokban is, mint például a játékipar mozgásokat megvalósító játéakai [3] [4].

A műanyag fogaskerekek megbízható kialakításához szükséges számításokhoz nem áll rendelkezésre nemzetközi szabvány, hanem csak régióként elfogadott, nemzeti szintű vagy egyes cégeken belüli irányelveket használnak [5]. Így lényegében minden nagyobb műanyag fogaskerékgyártónak megvan a maga számítási módszere és segédlete. Ez a helyzet nagy akadályt jelent a műanyag fogaskerék-ipar számára, mivel akadályozza a tervezési ismeretek és információk egyszerű cseréjét [6] [7] [8].

A nyugat-európai országokban a műanyag fogaskerekek egyetlen általánosan elfogadott irányelve a német VDI 2545 irányelv volt, amelyet 1996-ban visszavontak, mivel a melegezésre vonatkozó számítások és tapasztalatok elavulttá váltak. Csaknem 20 év után a VDI 2014-ben új irányelvet tett közzé, a VDI 2736 jelűt. Másrészt 2013-ban megjelent a japán JIS B 1759 szabvány a műanyag fogaskerekek hajlító terhelhetőségének kiszámítására [6] [9].

A két irányelv meglehetősen hasonlít egymásra, mivel a VDI 2736 a DIN 3990-ra és a JIS B 1759 az ISO 6336-re épül, ez utóbbi számos téren azonos a DIN 3990 szabvánnyal. Mindazonáltal mind a DIN 3990, mind az ISO 6336 csak a fém fogaskerekekre vonatkozik, és így a VDI 2736 irányelvben, illetve a JIS B 1759 szabványban számos kiigazítás történt a műanyag fogaskerék geometriájának és az anyagok különleges jellemzőinek figyelembevételével. Ez több ponton eltérésekhez vezet. Emellett mindkét irányelvnek vannak korlátai [6] [10] [11] [12].

A VDI megközelítése nem minden anyagra alkalmazható megfelelően, illetve a tervezési és gyártási technológiák fejlődését nem minden esetben veszi teljesen figyelembe [6].

Azonban a JIS B 1759-nek is vannak korlátjai. Az egyik, hogy a megengedett hajlítófeszültségről nem nyújt megfelelő információt. A másik korlátja, hogy a fogtőhajlításon kívül a fogaskerek más károsodási formáit nem veszi figyelembe. Emellett nem foglalkozik külön a melegedés hatásaival [13].

A nemzetközi szabvány hiánya és az egyes irányelvek hiányosságai vezettek arra, hogy ezzel a témakörrel behatóbban is foglalkozzák.

## **1.2. A fogaskerek**

A fogaskerék olyan gépelem, amit már évszázadok óta használnak. A fogaskerékhajtás egymáshoz viszonylag közel lévő tengelyek között viszi át a teljesítményt a fogaskerékpár fogai közötti kényszerkapcsolattal [14] [15] [16].

## **1.3. A műanyagok alkalmazása fogaskerek anyagaként**

A polimerek olyan hosszú molekulák, amelyek kicsi kémiai egységek ismétlődéséből állnak. Eredetüket tekintve a polimerek lehetnek természetes polimerek, vagy mesterségesen előállított műanyagok [17].

Műanyagokkal manapság már az élet minden területén találkozhatunk. Rendkívül széleskörű a mérnöki célú felhasználásuk [18]. Az iparban már régóta használnak műanyag fogaskerekeket és egyre elterjedtebbek [19].

Számos előnyük közé tartozik kedvező zaj- és rezgéscsökkentés, ami a nagy belső csillapításuknak köszönhető. A műanyagoknak kicsi a sűrűsége és így a tömege is. A sűrűségükhöz és tömegükhöz viszonyítva jó a teherbírásuk. Száraz súrlódás esetén jók a siklási tulajdonságaik. Emellett jó a korrózió- és vegyi ellenálló képességük [20] [21] [22].

De természetesen vannak hátrányos tulajdonságaik is. Bár a tömegükhöz képest jó a teherbírásuk, de a fémekhez képest a teherbírásuk általánosan még mindig kisebb. A mechanikai és alakváltozási tulajdonságaik erősen függenek a hőmérséklettől, hőtágulási tényezőjük nagy, hővezetési képességük rossz [23] [24]. Emellett ezen tulajdonságaik függenek az időtől is [25]. Egyes műanyagok a nedvesség felvételére vagy leadására nagy méretváltozást szenvednek el [21] [22].

A leggyakrabban használt fogaskerék-anyagok közé tartozik a poliamid (PA) és a polioximetilén (POM) [21] [26].

## **1.4. A műanyag fogaskerek gyártása**

A műanyag fogaskerek lehetséges gyártási technológiáit a 1. táblázat foglalja össze. A táblázat megmutatja, hogy a gyártási idő és volumen ismeretében elméletben melyik technológia mennyire alkalmas kis-, közép- és nagy sorozat gyártásra.

1. táblázat: A műanyag fogaskerekek gyártási technológiái VDI 2731 alapján, a 3D nyomtatási technológiákkal kiegészítve [27]

| Csoport                    | Technológia                       | Kis széria/prototípus gyártására alkalmas-e? | Közepes széria gyártására alkalmas-e? | Nagy széria gyártására alkalmas-e? |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Öntési technológiák        | Fröccsöntés                       | alkalmazható                                 | alkalmazható                          | jól alkalmazható                   |
|                            | Fröccspréselés                    | nem alkalmazható                             | jól alkalmazható                      | jól alkalmazható                   |
| Forgácsolási technológiák  | Ultraprecíziós többtengelyű marás | jól alkalmazható                             | nem alkalmazható                      | nem alkalmazható                   |
|                            | Lefejtőmarás                      | jól alkalmazható                             | jól alkalmazható                      | jól alkalmazható                   |
|                            | Lefejtő gyalulás                  | jól alkalmazható                             | jól alkalmazható                      | jól alkalmazható                   |
| 3D nyomtatási technológiák | FDM                               | jól alkalmazható                             | nem alkalmazható                      | nem alkalmazható                   |
|                            | SLA                               | jól alkalmazható                             | alkalmazható                          | nem alkalmazható                   |
|                            | SLS                               | jól alkalmazható                             | jól alkalmazható                      | jól alkalmazható                   |

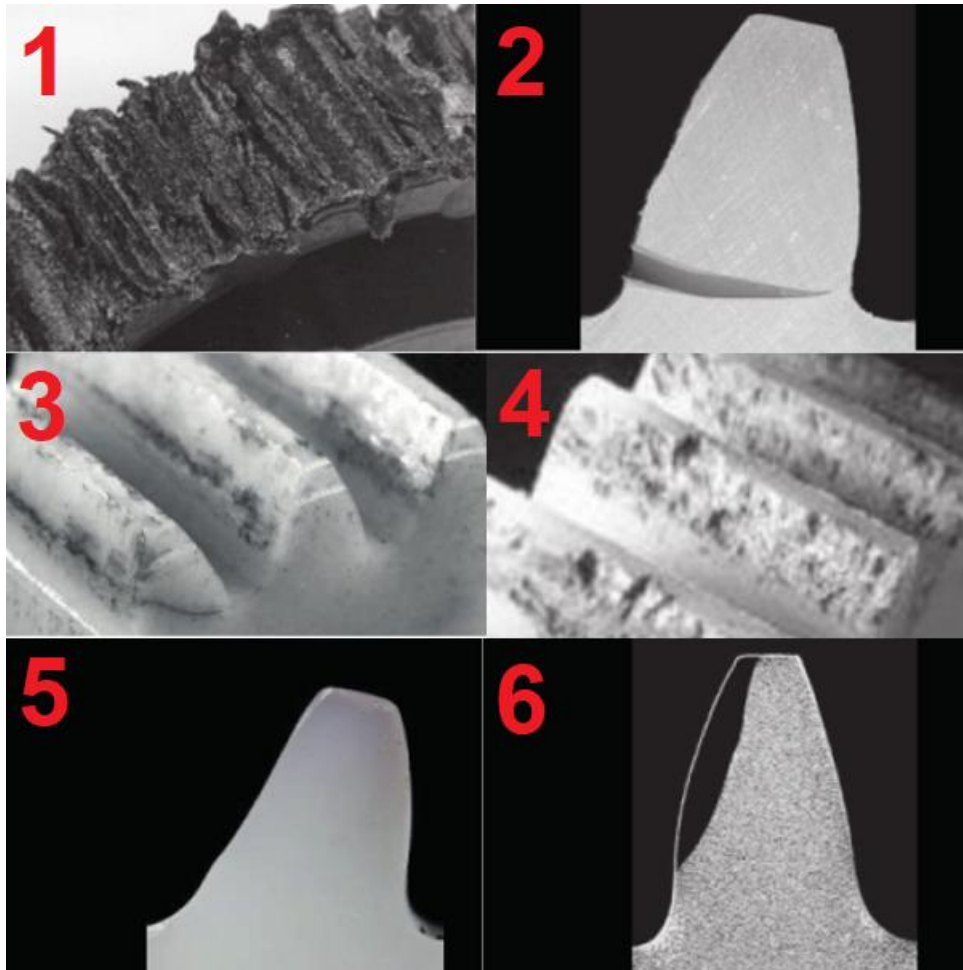
A felsorolt technológiák közül a fröccsöntés szokott a leggyakrabban használt technológia lenni, mivel gyakorlatilag hulladékmentes feldolgozást biztosít, rendkívül termelékeny és jól automatizálható [28] [29]. Bár a fröccsöntés kis- és közepes széria gyártására is alkalmas, érdemes megjegyezni, hogy költséges szerszám tervezését és gyártását igényli, amely sok esetben csak nagy széria gyártása esetén éri meg a befektetett időt és költséget [30].

Erre jelenthetnek megoldást a 3D nyomtatási technológiák, amik pont a fröccsöntéssel ellenkezően főként prototípus és kis széria gyártásra alkalmasak. Fontos azonban megjegyezni a 3D nyomtatási technológiák esetén, hogy azok pontosságára nem történtek a múltban vizsgálatok ilyen kis méretek esetén, így nem tudhatjuk, hogy valóban képesek-e ilyen kis modulok esetén megfelelő pontosságú fogaskerekek előállítására. Ezért úgy döntöttem, hogy ezen kutatás részeként részletesebben is megvizsgálom ezt a kérdést.

### 1.5. A műanyag fogaskerekek tönkremenetelének okai

A polimerek tönkremeneteli karakterisztikája eltér a fémekétől, mivel az anyagtulajdonságaik is teljesen eltérőek [31].

A VDI 2736 hatféle tönkremeneteli okot nevez meg a műanyag fogaskerekek esetén. Ezek a fog megolvadása, a fogtő törése, a fog oldalának törése, a pitting, a fog kopása és a fog deformációja. Ezeket a tönkremeneteli formákat az 1. ábra mutatja [27].



1. ábra: A műanyag fogaskerekek tönkremenetelének okai VDI 2736 szerint (1: a fog megolvadása, 2: a fogtő törése, 3: a fog oldalának törése, 4: a pitting, 5: a fog deformációja, 6: a fog kopása) [27]

A fog megolvadását a fogfelület túlmelegedése okozza [27][32]. Mivel a műanyagok szilárdsági és alakváltozási tulajdonágai a fémeknél nagyobb mértékben változnak a hőmérséklet hatására, ez egy elég gyakori tönkremeneteli ok [33]. Antal Miklósék ehhez még hozzáteszik, hogy hőre lágyuló fogaskerekek esetén nagy sebességű ismétlődő igénybevétel hatására fellévő belső súrlódás belső hőfejlődést is okoz. Ennek hatására a fogak teljes keresztmetszetükben felmelegedhetnek, és ez is a fogak meglágyulásához és tönkremeneteléhez vezethet [21].

A fogtő törését a fogtőnél előforduló túl nagy hajlító terhelés okozza. A fogoldal törését és a pittinget is a túlzott Hertz-feszültség okozza a fog oldalán. Gyakorlatilag ez a kettő össze is függ bizonyos esetekben, mivel a pittingből kialakulhatnak repedések, amik a fog töréséhez vezetnek [27].

A kopást a nem megfelelő kopási ellenállás és a rosszul megválasztott, túlzottan abrazív ellenkerék okozza. A megengedettnél nagyobb deformációt pedig az olyan a megengedettnél nagyobb feszültség okozza, ami deformáció kialakulásához szükséges határ átlépéséhez vezet [27].

Ezek közül a károsodási formák közül a szakirodalom a fog melegeedéséből származó tönkremenetelt, a fogtő tönkremenetelét és a fogfelület túlzott Hertz-feszültség hatására bekövetkező tönkremenetelét tartja a leggyakoribbnak [21][27].

Mivel a túlzott melegeedésből származó tönkremenetel az egyik legfontosabb, ezért úgy döntöttem, hogy ebben a kutatásban a fogaskerek melegeedésének kérdésével is szeretnék foglalkozni. Ezért a szakirodalomban szereplő melegeedési képletekből származó értékeket hasonlítottam össze mérési eredményekkel.

A kisméretű műanyag fogaskerek gyártásakor és szerelésekor előfordulhatnak hibák. Ezek a hibák a fogaskerék vagy a hajtómű deformációjából, a hőmérséklet és a nedvességtartam változásából származhatnak. A hibák méret-, alak- és helyzeteltérésekben nyilvánulhatnak meg [27].

Méretbeli eltérés lehet például az egyik fog vastagságának megváltozása, amit okozhat a nem megfelelő gyártás, a hőmérséklet jelentős megváltozása a fog környezetében, vagy poliamid fogaskerekknél, amik jó nedvességszívó tulajdonságokkal rendelkeznek, a nedvességfelvételtől adódó duzzadás. Alakbeli eltérés származhat a nem megfelelően pontos gyártásból, ha az elkészült fogprofil nem evolvens. Helyzetbeli eltérés lehet például a hajtómű deformációjából származóan a tengelytáv változása, vagy ha gyártás közben az egyik fog tangenciális irányban a szabványostól eltérő helyen kerül kialakításra.

Ezek az eltérések befolyásolhatják a fogaskerek futási karakterisztikáját. Emellett erősen befolyásolhatják a fogakon ébredő feszültségeket, különösen gondolva itt a fogtőfeszültségre és az érintkező fogoldalokon kialakuló Hertz-feszültségre. A fogaskerek tönkremenetelének gyakori oka, hogy ez meghaladja a megengedett értéket. Ezért kutatásaim során vizsgáltam, hogy ezeket a hibákat a ki lehet-e mutatni és ha igen, hogyan, valamint vizsgáltam, hogy milyen hatásuk van a kialakuló feszültségekre.

## 2. A 3D NYOMTATOTT KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK PONTOSSÁGA

### 2.1. A 3D nyomtatás

A 3D nyomtatás additív gyártási folyamat, mely során egy geometria modellből fizikai tárgyat hozunk létre anyag folyamatos hozzáadásával. A hagyományos gyártási eljárásokkal szemben a 3D nyomtatásnak számos előnye van. Rendkívül összetett és változatos geometriák előállítására alkalmas, átlépve egyes gyártási technológiák korlátait. A 3D nyomtatás olyan összetett geometriák és belső szerkezetek létrehozását teszi lehetővé, amelyek hagyományos módszerekkel nem állíthatók elő. Mivel az eljárások többségében a berendezés a folyamat során az anyagot folyamatosan adagolja a készülő darabhoz, ezért csak a gyártáshoz szükséges anyagmennyiséget használja fel, így a gyártási anyagveszteség minimális. Akár kis sorozat, akár egyedi, akár prototípus gyártásról van szó, a 3D nyomtatás gyártási költségei viszonylag stabilak maradnak, és nem emelkednek jelentősen a drága szerszámok vagy a folyamatok összetettsége miatt [34] [35] [36] [37].

A 3D nyomtatók az utóbbi években az iparban is elterjedt gyártási eszközökké váltak, így egyre több és több műanyag alkatrész készül ilyen módszerrel [38] [39].

### 2.2. A nyomtatáshoz használt geometria előállítása

A 3D nyomtatáshoz először szükség volt 3D modellek előállítására. A fogaskerékgeometriát 0,5 mm modullal generáltam a KISSSoft szoftverével. A vizsgálatokhoz kétféle fogszámot választottam, ezek  $z=30$  és  $z=50$  voltak. A generált fogazatok 3D modelljét a 2. ábra mutatja.



2. ábra: A 3D modellek fogai (balra:  $z=30$ , jobbra:  $z=50$ )

### 2.3. A használt nyomtatási technológiák

Ebben a kutatásban háromféle technológiával végeztem méréseket. Ezek az FDM, az SLA és az SLS voltak.

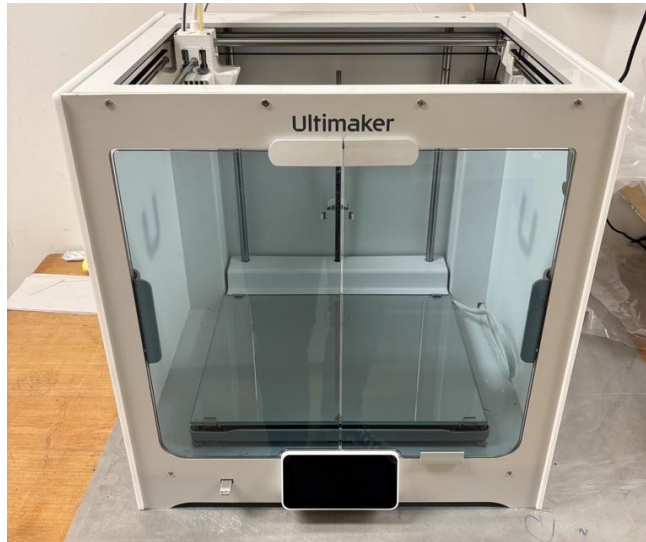
A legelterjedtebb 3D nyomtatási eljárás az FDM (Fused Deposition Modeling). Az FDM eljárás hőre lágyuló műanyagokat használ fel, úgynevezett filamentek formájában. A filament egy feltekercselt vékony polimer szál. A nyomtatás során a 3D nyomtató megolvasztja a vékony szálát, majd egy nyomtatófej rétegenként a tárgyasztalra helyezi, ahol megszilárdul és létrejön a végleges 3D nyomtatott tárgy [34] [40].

A technológia előnye az egyszerűsége, a költsége és az alkalmazható anyagok sokfélesége. Hátránya, hogy a nyomtatási paraméterekre nagyon érzékeny, a mechanikai tulajdonságai viszonylag gyengék, erősen korlátozott a felbontása és a nyomtatott felületek nem optimálisak [34] [40].

Az FDM nyomtatáshoz kétféle nyomtatót használtam: egy Raise3D Pro3 Plus-t és egy Ultimaker S5-öt. Mindkét esetben 0,4 mm-es fűvókát használtam. Előbbi nyomtatóval PLA (politejsav), utóbbi nyomtatóval TPLA (tough PLA, a politejsav egy speciális változata) alapanyagból gyártottam a fogaskerekeket. A felhasznált nyomtatók már inkább az ipari célból használt nyomtatók kategóriájába tartoznak, azonban azok közül még az elérhetőbb árkategóriából.



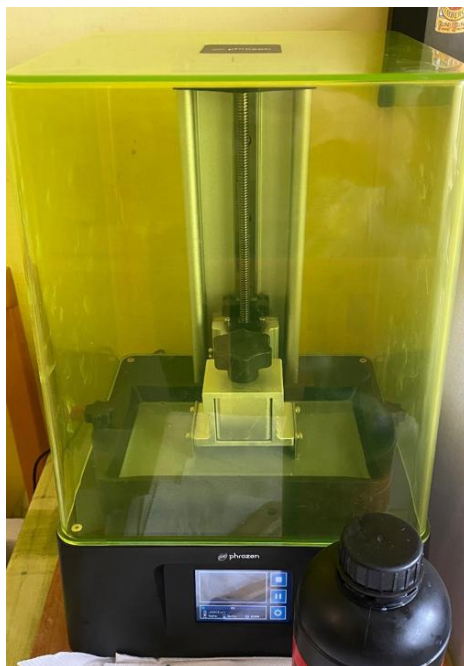
3. ábra: Raise3D Pro3 Plus



4. ábra: Ultimaker S5

Az SLA (sztereolitográfia) egy folyékony gyantaszerű fotopolimer alapanyagot használ. A fotopolimer olyan polimer, mely az UV-fény hatására megváltoztatja fizikai tulajdonságait. A folyamat során vagy egy lézer végigpásztázza a szilárdítani kívánt kontúr, vagy egy digitális kijelző rétegről rétegre megvilágítja a fotopolimert. Az UV-fény hatására a polimer megszilárdul és elnyeri végleges formáját. Ez az eljárás általánosan nagyobb felbontású, izotróp és vízzáró tulajdonságokkal rendelkező alkatrészek gyártását teszi lehetővé, illetve az így létrehozott test akár utólag megmunkálható is [34] [36] [40].

Az SLA nyomtatáshoz egy Phrozen Sonic Mini 8k s nyomtatót használtam, illetve a Phrozen Rock Black Stiff nevű anyagát. Ez egy bárki számára könnyen és olcsón beszerezhető nyomtató.



5. ábra: Phrozen Sonic Mini 8k



Az SLS (Selective Laser Sintering) porolvasztásos eljárás. Az eljárás por formájú polimer alapanyagot használ. A gyártási folyamat során egy lézer a porított anyagot megolvasztja, ami ezután szilárduláskor összekapcsolódik, miközben a 3D geometria által meghatározott térbeli pontokra irányul. Előnye, hogy nagyméretű, nagy szilárdságú és merevségű alkatrészeket tud gyártani [34] [41] [42].

Mivel az SLS nyomtatók nagy építési térrel rendelkeznek és az ipari 3D nyomtatók közül is a drágábbak közé tartoznak, ezért a fogaskerekek nyomtatását a Technoplast Group Kft. végezte el.

### 2.4. A vizsgálatokhoz használt eszközök

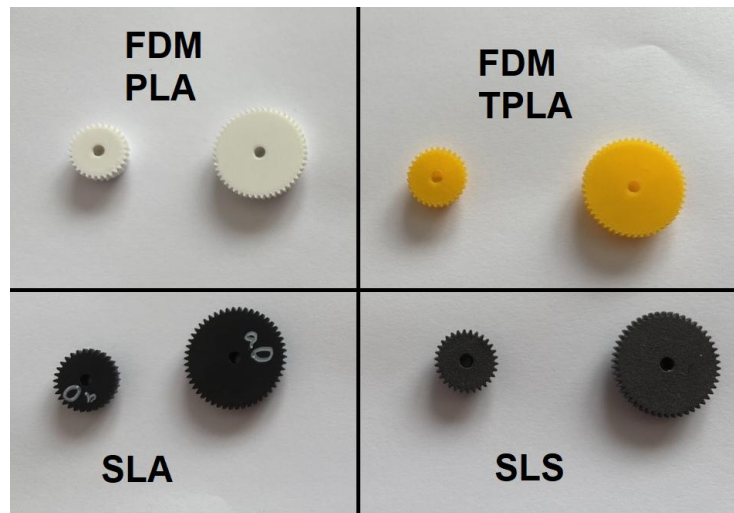
A vizsgálatok során a geometriál ellenőrzéséhez és a méretek méréséhez egy Keyence VHX-950F optikai mikroszkópot használtam, ennek a képét a 6. ábra mutatja. Bár a fogazatok pontosságának mérésére általában egyéb, nem optikai méréseken alapuló vizsgálatokat szoktak alkalmazni, én ezeket azért váltottam ki optikai mikroszkópos mérésekkel, mert ilyen kis méretek esetén ez könnyebb és pontosabb megoldás. Például egy foghúrmérő használatakor ilyen kis modul esetén nehezebb a műszer mérőfelületeit pont a megfelelő mérési pontra illeszteni. Emellett nem is könnyű olyan mérőeszközöket találni, amelyek ilyen kis méreteket is képesek megfelelő pontossággal kezelni.



6. ábra: A mikroszkóp

A vizsgálatokhoz speciális mérősablonokat terveztem és gyártottam le SLA nyomtatással. A sablonok két hengerből álltak össze, a kisebb átmérőjű, hosszabb hengeres rész a fogaskerék furatába helyezhető, így pozicionálva a sablont. A nagyobb átmérőjű rész vastagsága 1,5 mm volt, ez szolgált a mérési pontok megtalálásának egyszerűsítésére. Minden fogaskerékhez két ilyen sablont készítettem, az egyik az osztókör, a másik a lábkör átmérőjével rendelkezett. A sablonok méreteit a nyomtatás után ellenőriztem mikrométer segítségével és megfelelőnek

találtam őket a mérésekhez. A kinyomtatott fogaskerekeket a 7. ábra, sablonokat a 8. ábra mutatja.



7. ábra: A nyomtatott fogaskerekek



8. ábra: A sablonok

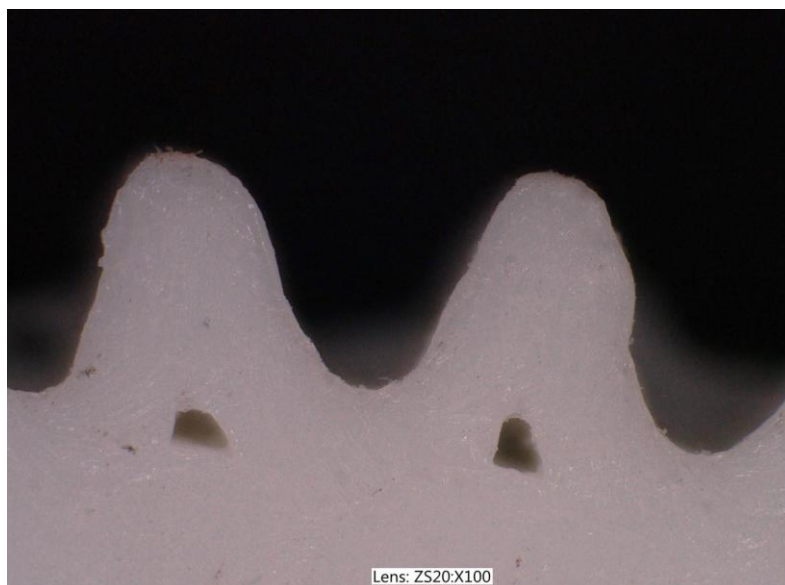
### 2.5. A vizsgált paraméterek

A mikroszkóp felhasználásával öt paramétert vizsgáltam. Ezek a fog alakja, a fogvastagság, az osztás, a fogmagasság és a fejmagasság voltak. A fog alakját egy-egy fogon, a többi paraméter esetén méréseket 40 darab, véletlenül kiválasztott fogon végeztem el.

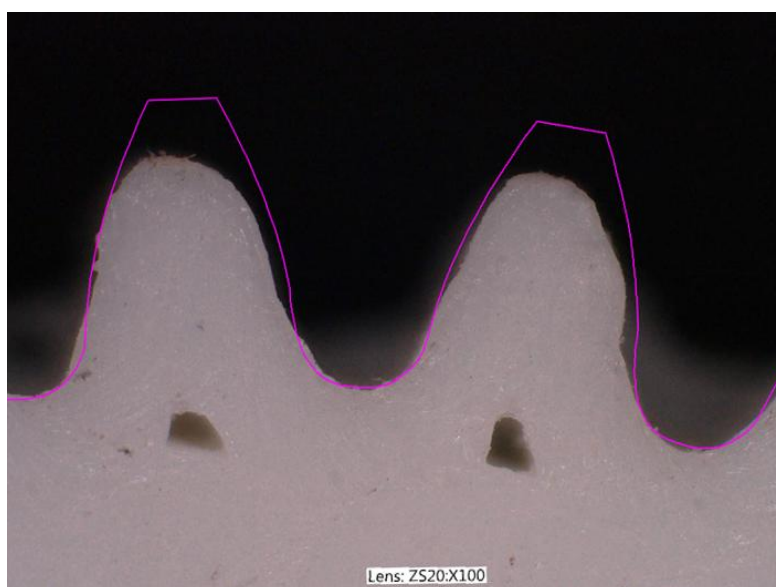
#### 2.5.1. A fog alakja

A nyomtatott fogak alakját nem csupán szemrevételezés alapján hasonlítottam össze, hanem mindegyiket összevetettem a kiindulási geometria fogprofiljával is. Ehhez a mikroszkópi képeket bemásoltam a Solid Edge CAD tervezőszoftver 2D rajzolómoduljába háttérként és erre igazítottam rá a fogaskerekek profilját. A mikroszkóppal készített képek százszoros nagyítással készültek.

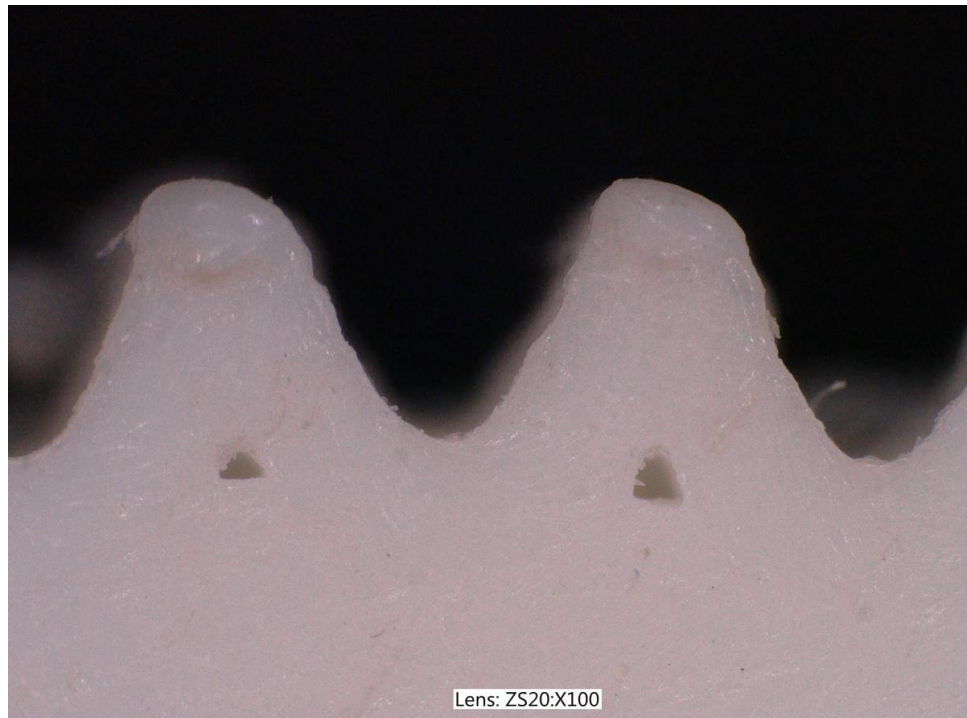
A 9. ábra és a 11. ábra az FDM nyomtatott fogaskerekek közül a PLA alapanyagból készült darabok fogait mutatja. A 10. ábra és a 12. ábra pedig ezeknek az összehasonlítását a kiindulási geometriával. A felvételeken jól látható, hogy a fogprofilok szinte egyáltalán nem hasonlítanak a 3D modellek fogprofiljaihoz. Emellett megfigyelhető az összes fog közepén egy-egy üreg is. Ezt az üreget a nyomtatási technológia korlátai okozzák. Kialakulása, elhelyezkedése és mérete a nyomtató pontosságától is függ, de leginkább a fogak mérete, az extruder átmérője és a választott szeletelési irány, valamint a nyomtatás során megtett út (amelynek elsődleges paramétere a falvastagság) befolyásolja ezeket a jellemzőket. A felhasznált nyomtatók és szeletelőszoftverek esetében a legkedvezőbb üzemeltetési és nyomtatási helyzetekben ebben a mérettartományban minden fogon megjelenik egy-egy ilyen üreg.



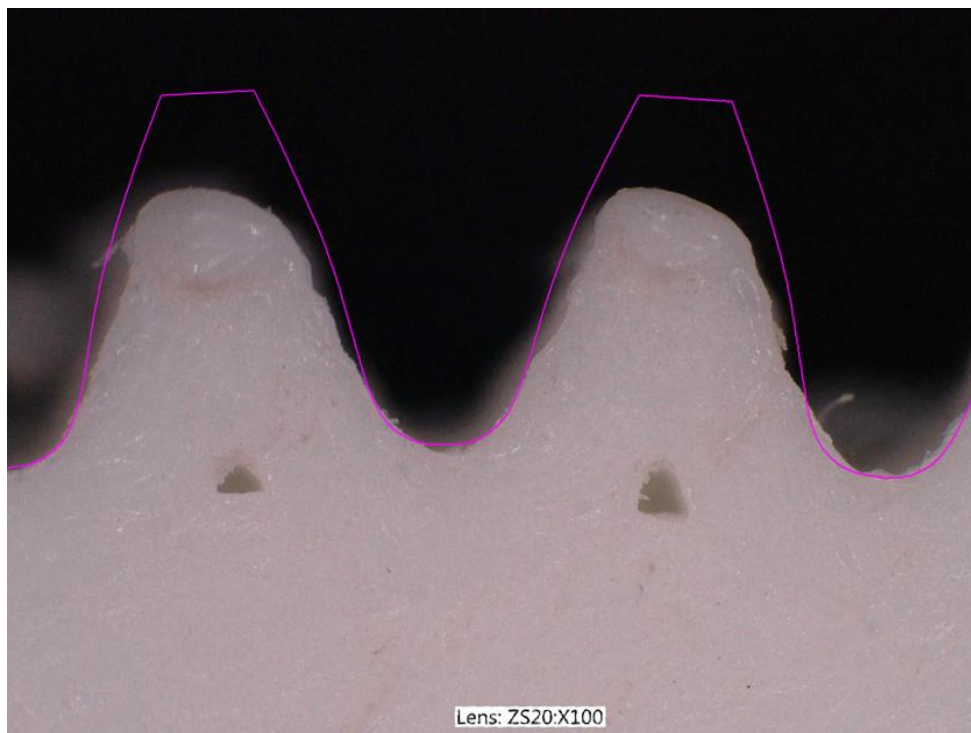
9. ábra: Az FDM-PLA fogaskerék fogának mikroszkópikus képe  $z=30$  esetén



10. ábra: Az FDM-PLA fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával  $z=30$  esetén



11. ábra: Az FDM-PLA fogaskerék fogának mikroszkópikus képe  $z=50$  esetén



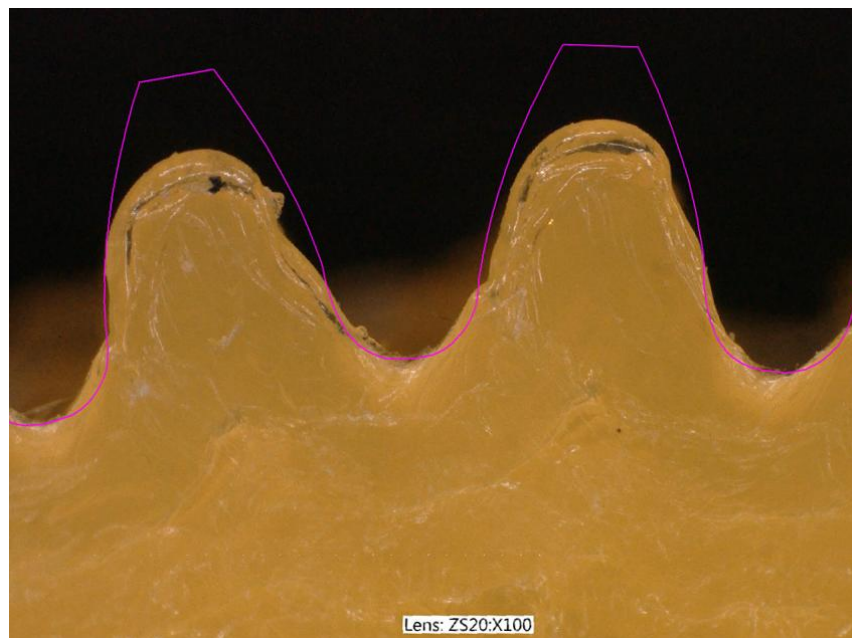
12. ábra: Az FDM-PLA fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával  $z=50$  esetén

A 13. ábra és a 15. ábra az FDM nyomtatással készült darabok közül a TPLA anyagú fogaskerekeket mutatja, melyeknek profilját a 14. ábra és a 16. ábra hasonlítja össze a kiindulási geometriával. Bár a fogak közepén található üregek eltűntek, ami pontosabb gyártást jelent, maga a fogprofil még mindig csak nagyon kicsit hasonlít a 3D modellek fogaihoz.

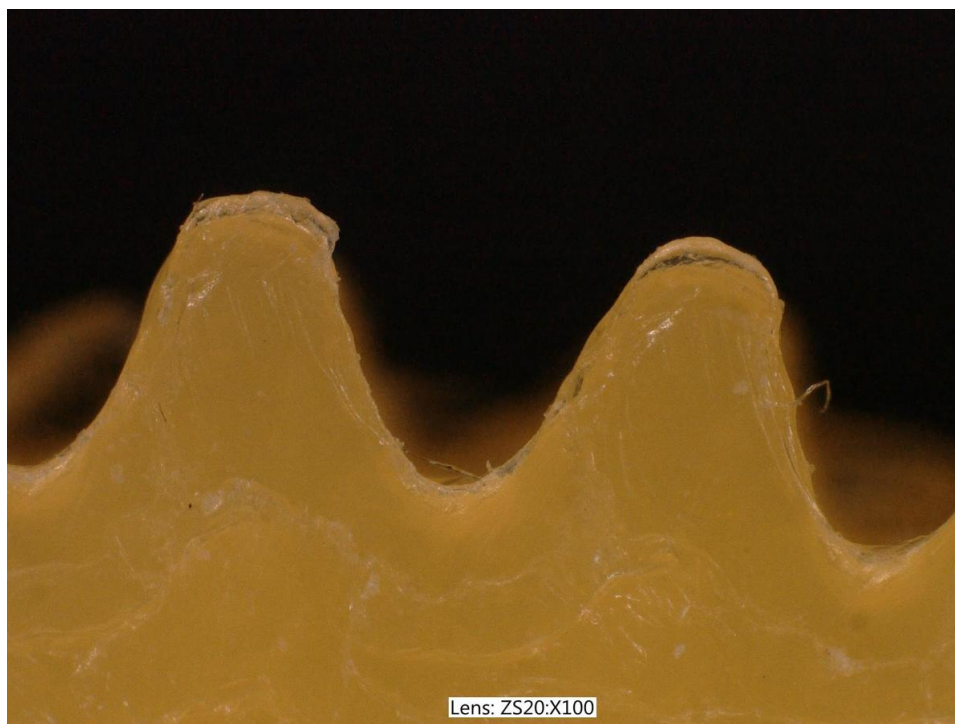




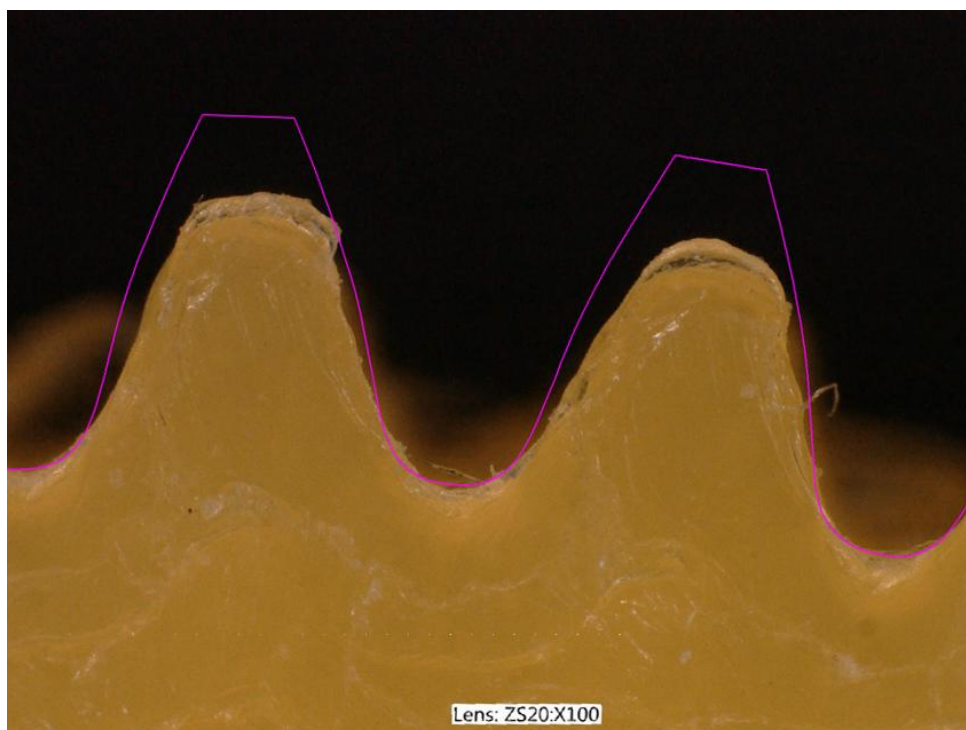
13. ábra: Az FDM-TPLA fogaskerék fogának mikroszkópikus képe  $z=30$  esetén



14. ábra: Az FDM-TPLA fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával  $z=30$  esetén



15. ábra: Az FDM-TPLA fogaskerék fogának mikroszkópikus képe  $z=50$  esetén

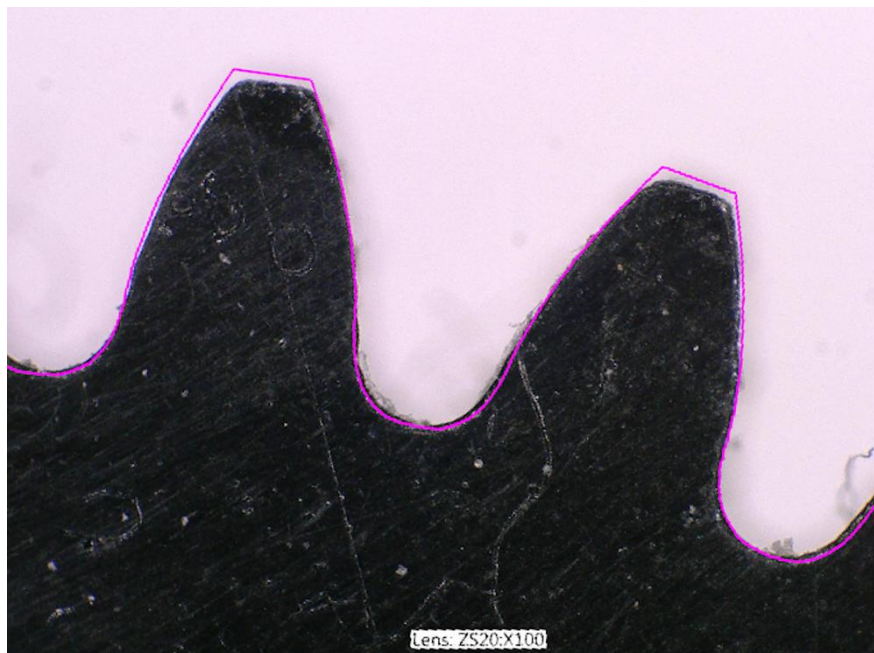


16. ábra: Az FDM-TPLA fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával  $z=50$  esetén

A 17. ábra és a 19. ábra az SLA technológiával nyomtatott fogaskerekek fogait, a 18. ábra és a 20. ábra pedig ezek összehasonlítását mutatja a kiindulási geometriával. A mikroszkóppal készült felvételeken jól látszik, hogy a nyomtatott fogprofilok jól követik a KISSSoft-ban generált fogak profilját.

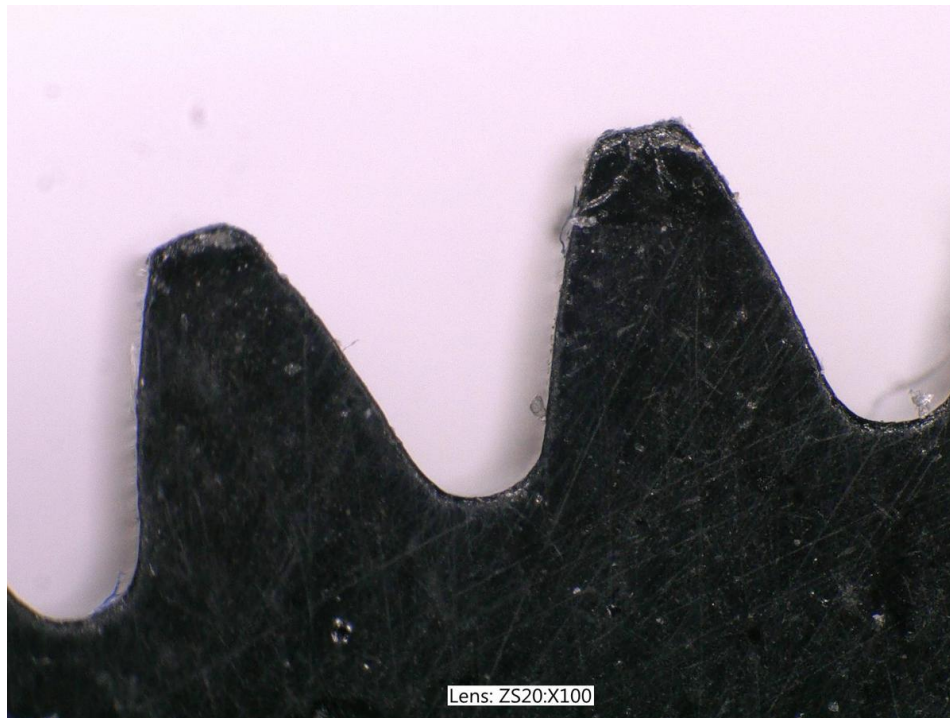


17. ábra: Az SLA nyomtatott fogaskerék fogának mikroszkópikus képe  $z=30$  esetén



18. ábra: Az SLA fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával  $z=30$  esetén





19. ábra: Az SLA nyomtatott fogaskerék fogának mikroszkópikus képe  $z=50$  esetén

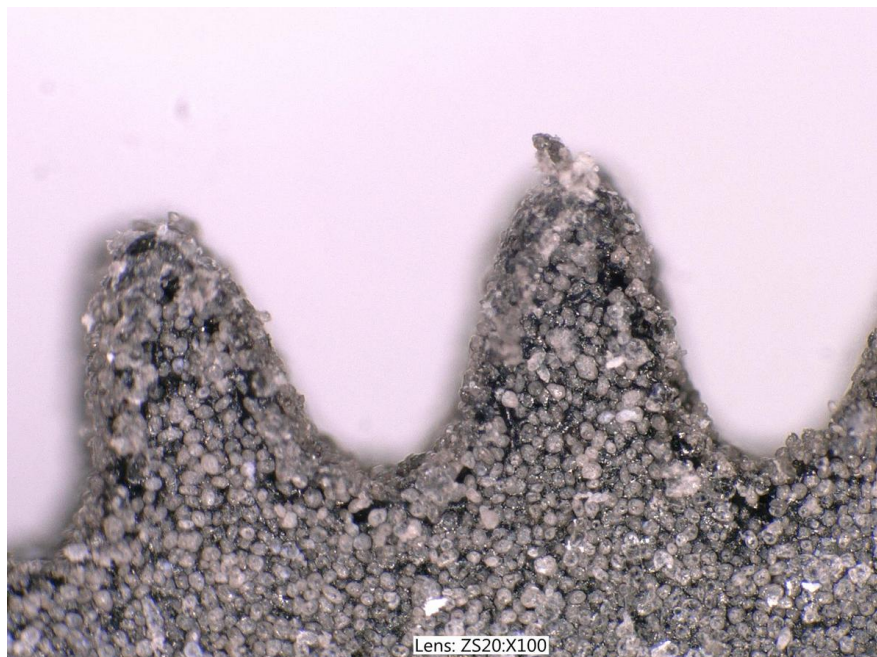


20. ábra: Az SLA fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával  $z=50$  esetén

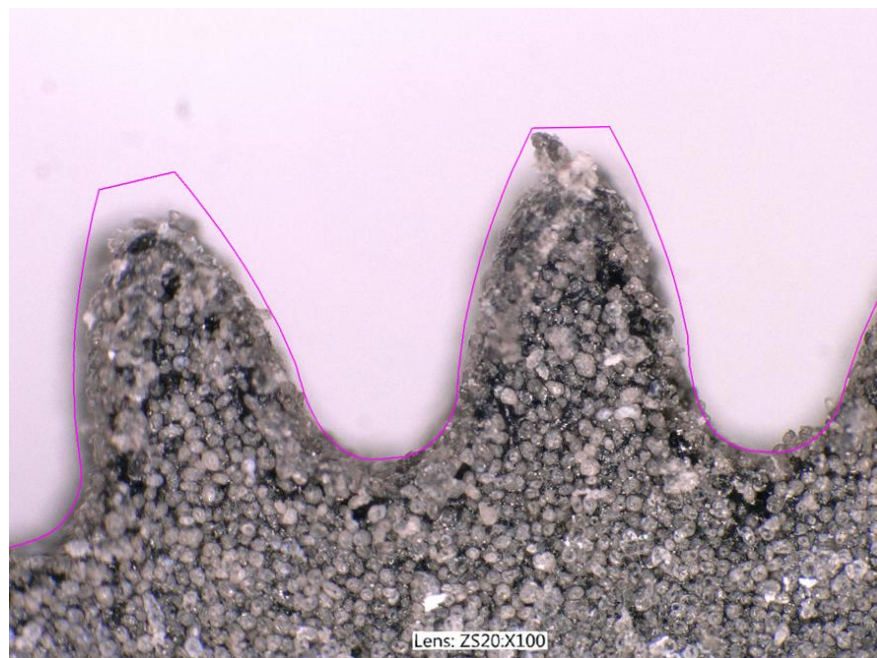
Az SLS nyomtatással gyártott fogaskerekek mikroszkópikus képét a 21. ábra és a 23. ábra mutatja. A 22. ábra és a 24. ábra pedig azt mutatja, hogy ezek hogyan viszonyulnak a kiindulási geometria fogprofiljához. Az látható, hogy az így gyártott fogaskerekek jobban hasonlítanak a kiindulási geometriához, mint az FDM nyomtatással készültek, azonban az SLA technológiához képest észrevehető némi pontatlanság. Ez az SLS technológia alapelvéből következhet, hiszen,



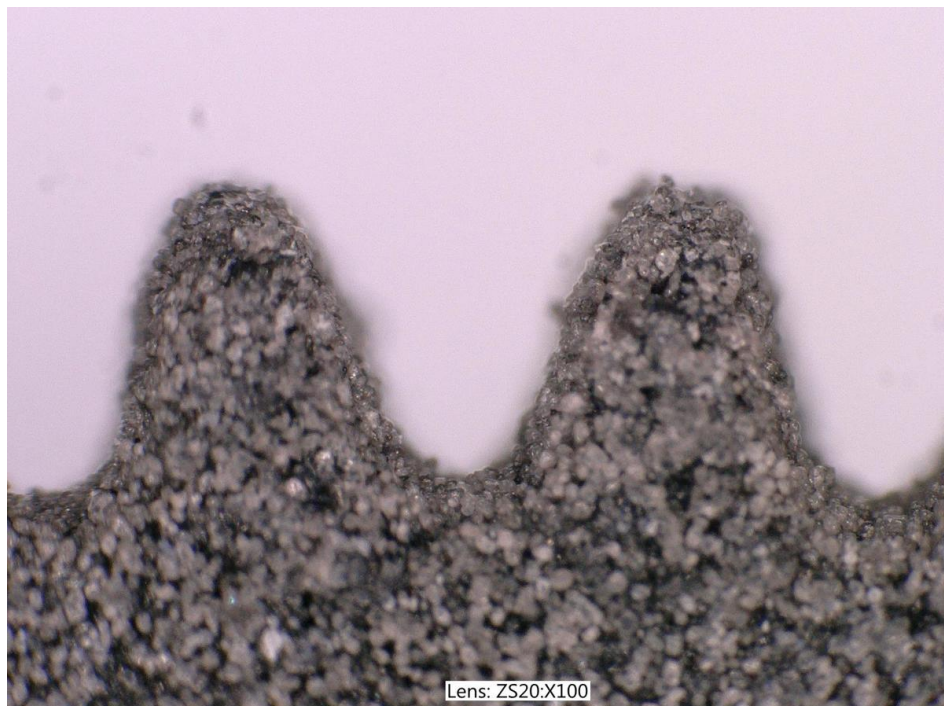
ahogy az a mikroszkópikus képeken is látszik, a fogaskerekek műanyag szemcsékből épülnek fel, ezért itt egy szemcsés szerkezet figyelhető meg, ellentétben az SLA tömörségével.



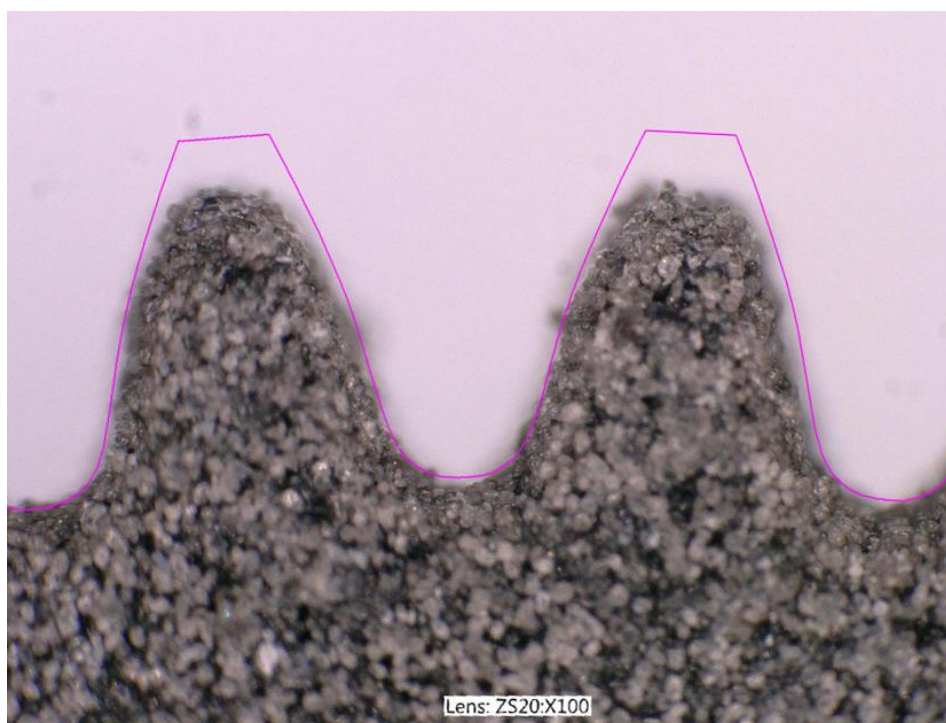
21. ábra: Az SLS nyomtatott fogaskerék fogának mikroszkópikus képe  $z=30$  esetén



22. ábra: Az SLS fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával  $z=30$  esetén



23. ábra: Az SLS nyomtatott fogaskerék fogának mikroszkópikus képe z=50 esetén



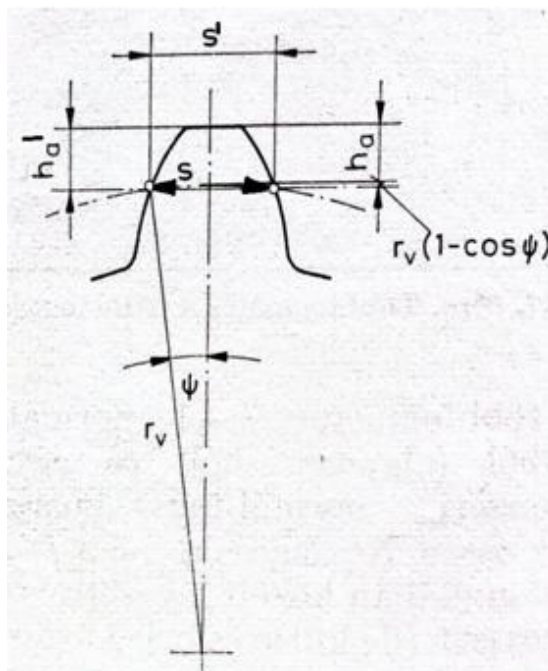
24. ábra: Az SLS fogaskerék profiljának összehasonlítása a kiindulási geometriával z=50 esetén

### 2.5.2. A fogvastagság

A fogvastagság a fog két ellentétes profilja között, az osztókörön mért távolság ívhosszban kifejezve. Ezt közvetlenül azonban nem tudjuk mérni, ezért más, mérhető méretekkel szokták ellenőrizni a fogvastagságot [43].

Ezek közül a leggyakrabban alkalmazott eljárás a többfogmérés mérése. A többfogmérésnél egyszerre nem egy fogat mérünk, hanem többet, így egy nagyobb méretet, mint a fogvastagság. Azonban a rendelkezésemre álló legkisebb tartományban használható többfogmérő még így is túl nagyak bizonyult ilyen kis modul esetén.

A másik lehetséges módszer a foghúrmérés mérése. A foghúrmérés, a fogvastagsághoz hasonlóan, szintén a fog két ellentétes profilján megjelenő pontok közötti távolságot jelenti, de nem ívhosszban, hanem ez a pontokat összekötő egyenes szakasz hossza, így könnyen mérhető. A foghúrmérés során egy erre a célra kialakított mérőműszert, egy úgynevezett foghúrmérőt használnak. A foghúrmérésnél nem csak a foghúrmérés meghatározása fontos, hanem a mérési magasság pontos beállítása is, hiszen enélkül pontatlanságot lehet bevinni a mérésbe. A 25. ábra a fogvastagság és a foghúrmérés kapcsolatát, illetve a mérési magasságot mutatja [43].



25. ábra: A különbség a fogvastagság ( $s$ ) és a foghúrmérés ( $s'$ ) között,  $r_v$  a normál keresztmetszet virtuális osztóköri sugara,  $\psi$  a fogvastagság félszöge,  $h_a$  a fejmagasság,  $h_a'$  a foghúrmérés mérési magassága [43]

Mivel optikai mikroszkópos mérésnél semmi nem korlátozza a mérési magasságot, ezért az tetszőlegesen felvehető. Ezért úgy döntöttem, hogy a foghúrmérést az osztókörön fogom mérni. Ilyenkor a 25. ábra által mutatott az  $r_v$  egyenlő lesz az  $r$  osztókör sugarával.

A foghúrmérés az osztókörön az (1) egyenlet segítségével számítható ki [44].

$$s' = 2r \sin \psi \quad (1)$$

Ahol  $s'$  a foghúrmérés,  $r$  az osztókör sugara és  $\psi$  a fogvastagság félszöge. Az  $s$ -sel jelölt fogvastagság értéke úgy aránylik az osztókör kerületéhez, mint a fogvastagság félszögének kétszerese a teljes kör  $360^\circ$ -ához. Ebből az arányosságból kiszámítható a fogvastagság félszöge.



Mivel a fogaskerek generálásakor a KISSSoft szoftver megadja a fogvastagság értékét, amely mindkét esetben 718  $\mu\text{m}$ , megkapjuk, hogy a fogvastagság félszöge  $z=30$  esetén  $2,74^\circ$  és  $z=50$  esetén  $1,64^\circ$ . Az (1) egyenlet segítségével kiszámítható, hogy a foghúrméret  $z=30$  esetén 716,16  $\mu\text{m}$  és  $z=50$  esetén 717,14  $\mu\text{m}$ . A mikroszkóppal mért értékeket így ezzel a két értékkel kellett összevetnem. A 2. táblázat a különböző fogaskerekeken mért foghúrméreteket tartalmazza. A 3. táblázat pedig a mért maximum, minimum, illetve az átlagos értékek kiindulási geometriához képesti eltérését mutatja.

2. táblázat: A foghúrméretek legnagyobb, legkisebb és átlagos értékeinek összehasonlítása

| <b>Fogaskerék</b> | <b>Maximum [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>Átlag [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>Minimum [<math>\mu\text{m}</math>]</b> |
|-------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| $z=30$ , FDM-PLA  | 790,12                                    | 734,86                                  | 631,71                                    |
| $z=50$ , FDM-PLA  | 814,53                                    | 737,19                                  | 672,7                                     |
| $z=30$ . FDM-TPLA | 796,07                                    | 720,99                                  | 648,81                                    |
| $z=50$ . FDM-TPLA | 795,94                                    | 724,7                                   | 652,62                                    |
| $z=30$ , SLA      | 757,91                                    | 727,4                                   | 698,8                                     |
| $z=50$ , SLA      | 753,08                                    | 727,19                                  | 706,73                                    |
| $z=30$ , SLS      | 826,74                                    | 748,73                                  | 670,39                                    |
| $z=50$ , SLS      | 869,3                                     | 771,96                                  | 670,39                                    |

3. táblázat: A foghúrméretek maximumának, minimumának és átlagának eltérése a kiindulási geometriához képest  $\mu\text{m}$ -ben és százalékban

| <b>Fogaskerék</b> | <b>A maximum és a kiindulási geometria különbsége [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>Az átlag és a kiindulási geometria eltérése [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>A minimum és a kiindulási geometria különbsége [<math>\mu\text{m}</math>]</b> |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $z=30$ , FDM-PLA  | 73,96 (10,3%)                                                                    | 18,7 (2,6%)                                                                   | 84,45 (11,8%)                                                                    |
| $z=50$ , FDM-PLA  | 97,39 (13,6%)                                                                    | 20,05 (2,8%)                                                                  | 44,44 (6,2%)                                                                     |
| $z=30$ . FDM-TPLA | 79,91 (11,2%)                                                                    | 4,83 (0,7%)                                                                   | 67,35 (9,4%)                                                                     |
| $z=50$ . FDM-TPLA | 78,93 (11%)                                                                      | 7,56 (1,1%)                                                                   | 64,52 (9%)                                                                       |
| $z=30$ , SLA      | 41,75 (5,8%)                                                                     | 11,24 (1,6%)                                                                  | 17,36 (2,4%)                                                                     |
| $z=50$ , SLA      | 35,94 (5%)                                                                       | 10,05 (1,4%)                                                                  | 10,41 (1,5%)                                                                     |
| $z=30$ , SLS      | 110,58 (15,4%)                                                                   | 32,57 (4,5%)                                                                  | 45,77 (6,4%)                                                                     |
| $z=50$ , SLS      | 152,16 (21,2%)                                                                   | 54,82 (7,6%)                                                                  | 46,75 (6,5%)                                                                     |

A mért eredmények alapján megállapítható, hogy ha a legnagyobb és legkisebb értékek eltérését nézzük a kiindulási geometriához képest, akkor a sztereolitográfia messze a legpontosabb eljárás, hiszen a legnagyobb eltérés is 6% alatti.

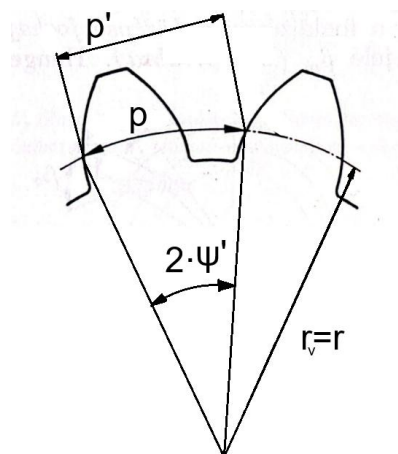
Az is látszik, hogy átlagos érték alapján nem szabad választani a technológiák közül, hiszen a TPLA-ból gyártott fogaskerek foghúrméretének átlagos értéke közelebb van a kiindulási geometriához, mint az SLA, ugyanakkor az egyes értékek akár több, mint 11%-kal is eltérhetnek a névlegeshez képest.

### 2.5.3. Az osztóköri osztás

Ez a szomszédos fogak egyoldali fogfelületeinek távolsága az osztókörön ívhosszban értve a fogosztás vagy röviden osztás [43]. Ez azt jelenti, hogy a fogvastagsághoz hasonlóan ezt a méretet sem tudjuk egyszerűen mérni.

Emellett bár az osztás fogalma szorosan összekapcsolódik az osztókör fogalmával, az osztáshiba nem szokott olyan szoros összefüggésben lenni vele, mivel a méréskor nem tudják a tapintót pontosan a fogfelületek osztóköri pontjaira beállítani. Ezért általában megelégszenek azzal, hogy az osztókör közelében, egy azzal egytengelyű úgynevezett mérőkörön értelmezik az osztáshibát. Ráadásul az osztáshiba vizsgálatokor egyenes hosszt mérnek, mivel a körívben értendő osztás és az egyenes szakaszon mért hossz közötti eltérést elenyészőnek tekintik [43].

Az osztás hibáinak vizsgálatára is optikai mikroszkópot használtam és itt is a fogvastagsághibákhoz hasonlóan jártam el. Egyrészt nem tekintettem el az osztás köríven és egyenes szakaszon mért méretei közötti különbségtől. Ezért a továbbiakban az egyenes szakaszon mért távolságot  $p'$  jelöléssel láttam el és osztóhúrméretnek neveztem el.



26. ábra: Az osztóhúrméret meghatározása

Itt is elmondható ugyanaz, mint a foghúrméretnél, hogy a 26. ábra által mutatott  $\psi'$  szög úgy aránylik egy teljes kör  $360^\circ$ -jához, mint a körívben mért osztás fele az osztókör kerületéhez. Így ha átalakítom az (1) egyenletet, megkapom az osztóhúrméretet, amit a (2) egyenlettel számolhatunk ki.

$$p' = 2r \sin \psi' \quad (2)$$

Így kapjuk meg, hogy az osztóhúrméret 30 fognál 1567,93  $\mu\text{m}$ , 50 fognál pedig 1569,76  $\mu\text{m}$ . A mikroszkópon mért értékeket pedig ezekkel az értékekkel kell összehasonlítani.

4. táblázat: Az osztóhúrméretetek legnagyobb, legkisebb és átlagos értékeinek összehasonlítása

| Fogaskerék     | Maximum [ $\mu\text{m}$ ] | Átlag [ $\mu\text{m}$ ] | Minimum [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| z=30, FDM-PLA  | 1639,39                   | 1565,17                 | 1526,47                   |
| z=50, FDM-PLA  | 1643,51                   | 1565,09                 | 1528,61                   |
| z=30, FDM-TPLA | 1655,65                   | 1570,85                 | 1522,57                   |
| z=50, FDM-TPLA | 1664,84                   | 1568,32                 | 1525,6                    |
| z=30, SLA      | 1586,66                   | 1569                    | 1553,16                   |
| z=50, SLA      | 1589,47                   | 1569,97                 | 1548,8                    |
| z=30, SLS      | 1608,5                    | 1571,56                 | 1493,25                   |
| z=50, SLS      | 1617,19                   | 1571,87                 | 1497,59                   |

5. táblázat: Az osztóhúrméretetek maximumának, minimumának és átlagának eltérése a kiindulási geometriához képest  $\mu\text{m}$ -ben és százalékban

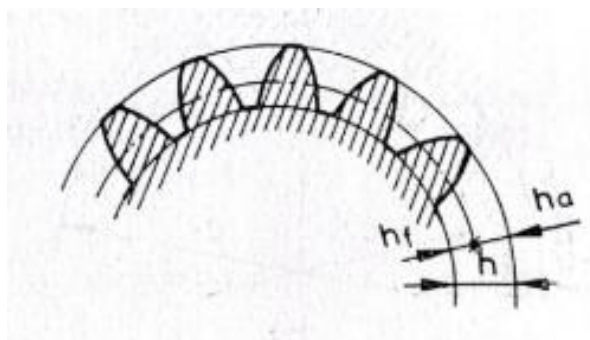
| Fogaskerék     | A maximum és a kiindulási geometria különbsége [ $\mu\text{m}$ ] | Az átlag és a kiindulási geometria eltérése [ $\mu\text{m}$ ] | A minimum és a kiindulási geometria különbsége [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| z=30, FDM-PLA  | 71,46 (4,6%)                                                     | 2,76 (0,2%)                                                   | 41,46 (2,6%)                                                     |
| z=50, FDM-PLA  | 73,75 (4,7%)                                                     | 4,67 (0,3%)                                                   | 41,15 (2,6%)                                                     |
| z=30, FDM-TPLA | 87,72 (5,6%)                                                     | 2,92 (0,2%)                                                   | 45,36 (2,9%)                                                     |
| z=50, FDM-TPLA | 95,08 (6,1%)                                                     | 1,44 (0,1%)                                                   | 44,16 (2,8%)                                                     |
| z=30, SLA      | 18,73 (1,2%)                                                     | 1,07 (0,1%)                                                   | 14,77 (0,9%)                                                     |
| z=50, SLA      | 19,71 (1,3%)                                                     | 0,21 (0,07%)                                                  | 20,96 (1,3%)                                                     |
| z=30, SLS      | 40,57 (2,6%)                                                     | 3,63 (0,2%)                                                   | 74,68 (4,8%)                                                     |
| z=50, SLS      | 47,43 (3%)                                                       | 2,11 (0,1%)                                                   | 72,17 (4,6%)                                                     |

A mért értékek itt is azt mutatják, hogy a sztereolitográfia a legpontosabb eljárás, hiszen a legnagyobb eltérés 1,3%. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy osztóhúrméretek esetén az eltérések nem olyan nagyok, mint a foghúrméretek esetén voltak, mivel a legrosszabb esetben is csak 6,1% a különbség a névleges értékhez képest.

#### 2.5.4. A fogmagasság és a fejmagasság

A fogmagasság a fog a lábkör és a fejkör közötti, a fogfelületre merőlegesen elhelyezkedő szakaszának a mérete. A fejmagasság a fogmagasságnak a fejkör és az osztókör közötti szakasza [43] [45].

A fogmagasságot és a fejmagasságot a 27. ábra mutatja.



27. ábra: A fogmagasság ( $h$ ), a fejmagasság ( $h_a$ ) és a lábmagasság ( $h_f$ ) [43]

A fogmagasságot általában nem szokták ellenőrizni. Azonban a fogvastagsággal és az osztással ellentétben, ez könnyen mérhető mikroszkóppal, hiszen ez egy egyenes szakasz hossza. A fogakon mért eredményeket a 6. táblázat tartalmazza, az eléréseket a kiindulási geometriától pedig a 7. táblázat.

6. táblázat: A fogmagasságok legnagyobb, legkisebb és átlagos értékeinek összehasonlítása

| Fogaskerék        | Maximum [ $\mu\text{m}$ ] | Átlag [ $\mu\text{m}$ ] | Minimum [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| $z=30$ , FDM-PLA  | 1081,89                   | 991,3                   | 877,56                    |
| $z=50$ , FDM-PLA  | 1076,7                    | 987,3                   | 878,41                    |
| $z=30$ . FDM-TPLA | 1129,74                   | 1004,12                 | 895,03                    |
| $z=50$ . FDM-TPLA | 1131,67                   | 1008,37                 | 887,7                     |
| $z=30$ , SLA      | 1150,31                   | 1124,51                 | 1098,59                   |
| $z=50$ , SLA      | 1153,81                   | 1124,47                 | 1104,18                   |
| $z=30$ , SLS      | 1143,43                   | 1076,79                 | 985,81                    |
| $z=50$ , SLS      | 1142,9                    | 1082,31                 | 989,01                    |



7. táblázat: A fogmagasságok maximumának, minimumának és átlagának eltérése a kiindulási geometriához képest  $\mu\text{m}$ -ben és százalékban

| Fogaskerék     | A maximum és a kiindulási geometria különbsége [ $\mu\text{m}$ ] | Az átlag és a kiindulási geometria eltérése [ $\mu\text{m}$ ] | A minimum és a kiindulási geometria különbsége [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| z=30, FDM-PLA  | 43,11 (3,8%)                                                     | 133,7 (11,9%)                                                 | 247,44 (22%)                                                     |
| z=50, FDM-PLA  | 48,3 (4,3%)                                                      | 137,7 (12,2%)                                                 | 246,59 (21,9%)                                                   |
| z=30. FDM-TPLA | 4,74 (0,4%)                                                      | 120,88 (10,7%)                                                | 229,97 (20,4%)                                                   |
| z=50. FDM-TPLA | 6,67 (0,6%)                                                      | 116,63 (10,4%)                                                | 237,3 (21,1%)                                                    |
| z=30, SLA      | 25,31 (2,2%)                                                     | 0,49 (0,04%)                                                  | 26,41 (2,3%)                                                     |
| z=50, SLA      | 28,81 (2,6%)                                                     | 0,53 (0,05%)                                                  | 20,82 (1,9%)                                                     |
| z=30, SLS      | 18,43 (1,6%)                                                     | 48,21 (4,3%)                                                  | 139,19 (12,4%)                                                   |
| z=50, SLS      | 17,9 (1,6%)                                                      | 42,69 (3,8%)                                                  | 135,99 (12,1%)                                                   |

Az eredmények azt mutatják, hogy a legpontosabb ebben az esetben is az SLA eljárás a maximálisan 2,6%-os eltéréssel. Az SLS esetén ez már 12% feletti, az FDM nyomtatás esetén pedig akár a 22%-ot is elérheti a különbség.

A fogmagassághoz hasonlóan a fejmagasságot sem szokás ellenőrizni. Illetve mivel ez is egy egyenes szakasz hossza, ezért ezt is könnyű mikroszkópi mérésekkel mérni.

8. táblázat: A fejmagasságok legnagyobb, legkisebb és átlagos értékeinek összehasonlítása

| Fogaskerék     | Maximum [ $\mu\text{m}$ ] | Átlag [ $\mu\text{m}$ ] | Minimum [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| z=30, FDM-PLA  | 451,7                     | 368,3                   | 253,54                    |
| z=50, FDM-PLA  | 449,92                    | 369,4                   | 258,69                    |
| z=30. FDM-TPLA | 506,53                    | 374,98                  | 258,54                    |
| z=50. FDM-TPLA | 506,4                     | 378,23                  | 258,54                    |
| z=30, SLA      | 527,05                    | 499,46                  | 473,94                    |
| z=50, SLA      | 528,21                    | 499,7                   | 473,02                    |
| z=30, SLS      | 517,56                    | 457,13                  | 362,14                    |
| z=50, SLS      | 519,38                    | 457,73                  | 360,26                    |

9. táblázat: A fejmagasságok maximumának, minimumának és átlagának eltérése a kiindulási geometriához képest  $\mu\text{m}$ -ben és százalékban

| <b>Fogaskerék</b> | <b>A maximum és a kiindulási geometria különbsége [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>Az átlag és a kiindulási geometria eltérése [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>A minimum és a kiindulási geometria különbsége [<math>\mu\text{m}</math>]</b> |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| z=30, FDM-PLA     | 48,3 (9,7%)                                                                      | 131,7 (26,3%)                                                                 | 246,46 (49,3%)                                                                   |
| z=50, FDM-PLA     | 50,08 (10%)                                                                      | 130,6 (26,1%)                                                                 | 241,31 (48,3%)                                                                   |
| z=30, FDM-TPLA    | 6,53 (1,3%)                                                                      | 125,02 (30,4%)                                                                | 235,4 (47,1%)                                                                    |
| z=50, FDM-TPLA    | 6,4 (1,3%)                                                                       | 121,77 (24,4%)                                                                | 241,46 (48,3%)                                                                   |
| z=30, SLA         | 27,05 (5,4%)                                                                     | 0,54 (0,1%)                                                                   | 26,06 (5,2%)                                                                     |
| z=50, SLA         | 28,21 (5,6%)                                                                     | 0,3 (0,06%)                                                                   | 26,98 (5,4%)                                                                     |
| z=30, SLS         | 17,56 (3,5%)                                                                     | 42,27 (8,5%)                                                                  | 137,86 (27,6%)                                                                   |
| z=50, SLS         | 19,38 (3,9%)                                                                     | 42,87 (8,6%)                                                                  | 139,74 (27,9%)                                                                   |

A mért eltérések a névleges értékekhez képest  $\mu\text{m}$ -ben majdnem egyezők a fogmagasságnál mért eltérésekkel. A minimális különbséget a mért fogak kiválasztásának véletlensége adja, hiszen nem biztos, hogy ugyanazokat a fogakat sikerült kiválasztani mindkét mérésnél.

### 3. AZ ÁTFORGATÁSI NYOMATÉK MÉRÉSE

#### 3.1. Az átforgatási nyomaték mérésének alapjai

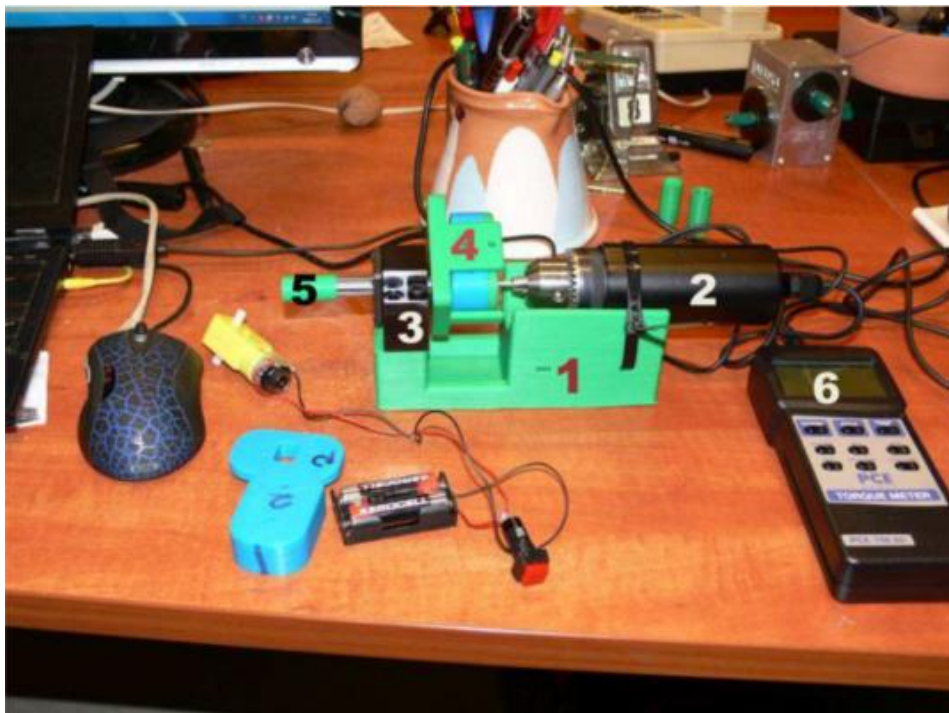
Az átforgatási nyomaték alatt azt a nyomatékot értjük, ami ahhoz szükséges, hogy a hajtóművet az egyik tengelyénél terhelés nélkül forgatva legalább egy teljes fordulatnyival átforgassuk.

Mivel az átforgatási nyomaték arányos a hajtómű belső súrlódásával, a mérése ellenőrzési módszerként régóta alkalmazott eljárás, különösen nagyméretű, kúpkeres hajtóművek esetén. A módszert kisméretű hajtóművek esetén is szokták alkalmazni, mert az ilyen hajtóműveknél az elvárt gyártási költségek és a gyártott tömeg jellemzően nem teszik lehetővé alaposabb minőségellenőrzési eljárások alkalmazását. Azonban jellemzően csak a hajtómű maximális átforgatási nyomatékát hasonlítják össze a megfelelőséghez tartozó legnagyobb értékkel. Ha átlépi ezt az értéket, akkor a hajtóművet nem megfelelőnek ítélik, a hiba okát és hatását nem vizsgálják [46]. Amennyiben bizonyos hibák megfelelő pontossággal kimutathatók lennének ezzel a módszerrel, az jelentős megtakarítást eredményezhetne a gyártási folyamatokban. Pl. egy fröccsöntési hibás fog felismerésekor azonnal ki lehetne vonni a problémás alkatrészeket a gyártásból, kevesebb lenne a selejt hajtómű, így nem veszne el annyi összeszerelésbe és ártalmatlanításba fektetett energia,

Ennek a módszernek a módosítását tűztem ki egyik célomnak, olyan módon, hogy a nyomatékgörbe vizsgálatából megállapítható legyen nem csak az, hogy a hajtómű hibás fogaskerekeket tartalmaz, hanem a hiba okára is lehessen következtetéseket levonni.

Az átforgatási nyomaték mérésével kapcsolatos munkám és eredményeim bemutatása előtt, azonban röviden össze kell foglalnom, témavezetőm, Dr. Bihari János eredményeit a témával kapcsolatban, mivel korábban ő is foglalkozott hasonló kutatással.

A Bihari-féle nyomatékmérő berendezést a 28. ábra mutatja. Az 1. jelű vázhoz van 2. jelű PCE TM-80 statikus nyomatékmérő tengely, illetve a 3. jelű csapágybak rögzítve. A 4. jelű befogóba voltak rögzítve a vizsgált fogaskerekeket tartalmazó hajtóművek. Az 5. jelű egység egy tengelykapcsoló volt, ami a meghajtást biztosító motorhoz volt kapcsolva. A 6. pedig a nyomatékmérőhöz tartozó felvevőegység [3].



28. ábra: A Bihari-féle nyomatékmérő berendezés [3]

Mint, ahogy azt a 28. ábra mutatja, a berendezés nem a fogaskerekeket, hanem a hajtóművet forgatta és a hajtómű bemenő tengelye, ami a vizsgálat során nem mozgott, volt a nyomatékmérő tengelyhez csatlakoztatva. Az, hogy a vizsgálat során nem a fogaskerék tengelyét, hanem a hajtóművet forgatják a kisméretű hajtóművek ellenőrzésénél gyakori [3].

Az ezzel a berendezéssel végzett vizsgálatok során Dr. Bihari János néhány példán keresztül bemutatta, hogy a kisméretű műanyag fogaskerekekkel szerelt hajtóműveknek vannak olyan hibái, amelyek az átforgatási nyomaték minimális vagy maximális értékének mérésével nem lehet kimutatni, a nyomatékmérés jelleggörbéje alapján azonban felismerhetőek és ártékelhetőek a hatásaik [3].

Azonban ez a berendezés csak a jelenségek mérhetőségének bizonyítására volt alkalmas. Nagyon korlátozottan volt alkalmas arra, hogy adatokat lehessen gyűjteni a nagyobb pontosságú hibaelemzéshez. Emellett a vizsgálatok során nem állt rendelkezésre olyan technológia, amivel gazdaságosan, gyorsan és megfelelő pontossággal lehetett volna olyan fogaskerekeket gyártani, amelyek egy-egy adott hibát tartalmaztak volna [3].

### 3.2. Új berendezés fejlesztése

Mivel behatóbban szerettem volna foglalkozni a hibák hatásaival és kimutathatóságával, ezért új berendezést kellett fejlesztenem, amivel jobb és pontosabb méréseket tudtam végezni.

Mivel a 3.1 részfejezetben említett PCE TM-80 statikus nyomatékmérő tengely rendelkezésemre állt, viszont forgó nyomatékmérő nem, ezért kezdetben a Bihari-féle berendezés alapelvét követtem én is a tervezésnél.

Ennek egyik fontos részét képezte annak az egység-hajtóműnek a tervezése, ami a vizsgálni kívánt fogaskerekeket tartalmazta.

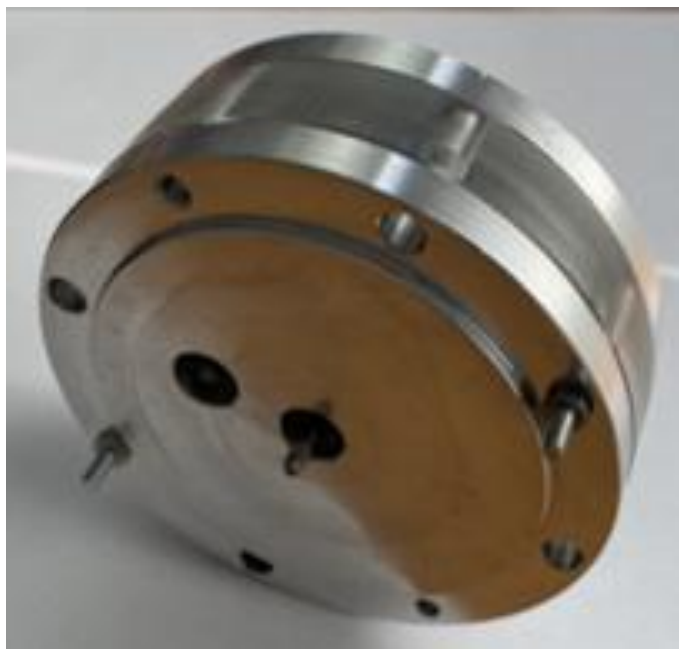
Mivel a mérések során én is a teljes hajtóművet kívántam forgatni, ezért a tervezésnél fontos volt a hajtóművek tömege és alakja is. Ezek a tényezők ugyanis befolyásolhatják a mérést. A túl nagy tömeg a hajtómű lehajlását okozhatja. Az alaknak az egytengelyűség biztosításánál van nagy szerepe, ugyanis bár a meghajtást biztosító motor a teljes hajtóművet forgatja, azonban egytengelyűnek kell lennie a bejtő oldali tengellyel, aminek pedig a nyomatókmérővel kell egytengelyűnek lennie. A hajtómű befogójának biztosítani kell ezt az egytengelyűséget, máskülönben a mérés eredményeit befolyásolja ennek a hibája [47].

A tervezés során több prototípust is gyártottam és vizsgáltam. Ezek közül mutat egy kezdeti kialakítást a 29. ábra.



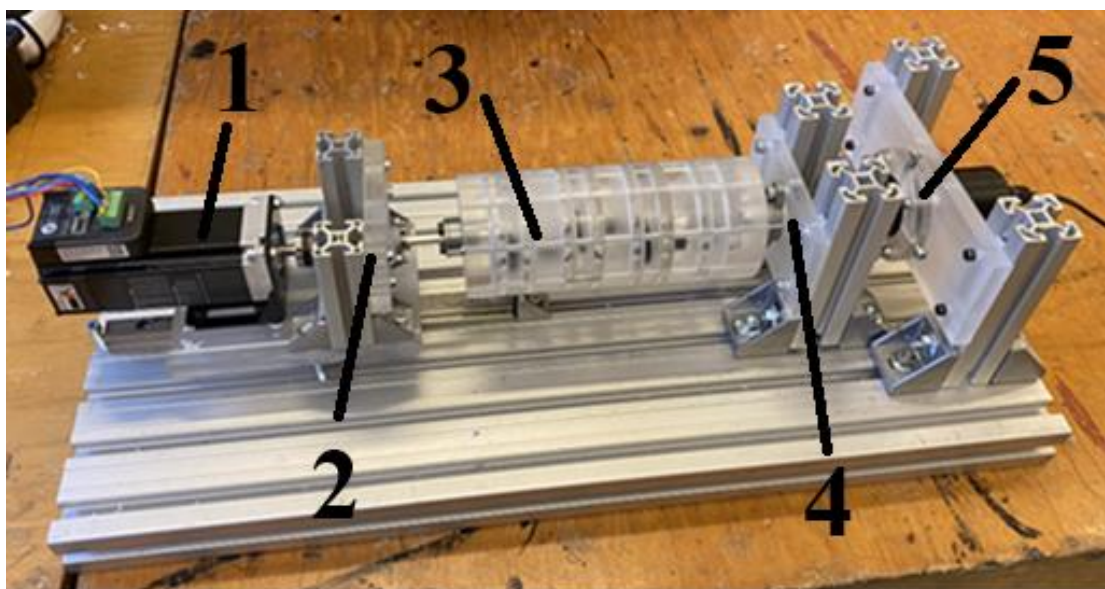
29. ábra: Egy kezdeti prototípus

A véglegesnek gondolt berendezéshez végül egy, az eddigiektől teljesen eltérő kialakítást választottam. Ez egy hengeres házba szerelt egység-hajtómű, amit a 30. ábra mutat be. Ez azért bizonyult előnyösnek, mert a hajtómű fedele úgy lett kialakítva, hogy a vizsgált tengely egytengelyű a hajtóművel. Így könnyebb volt a motor, a hajtómű és a nyomatókmérő tengely egytengelyűségét beállítani. Volt azonban ennek egy nagy hátránya is, a tömege, amely minden vizsgálatnál egy lefelé mutató erőt vitt a rendszerbe, amely lehúzta a hajtóművet, így elveszítve az egytengelyűséget. Ezt kétoldali csapágyazással oldottam meg.



30. ábra: A véglegesnek gondolt egységghajtómű

A véglegesnek gondolt berendezést a 31. ábra mutatja. Az 1. jelölt motor a 2. jelű csapágyozáson keresztül kapcsolódott a 3. számú hajtóműhöz, ami a 4. jelű csapágyazással volt a másik oldalról is megtámasztva. Az itt csapágyazott tengely egy csőtengely volt, amin keresztül a hajtómű behajtó tengelye kilógott. Ez a behajtó tengely kapcsolódott az 5. jelű nyomatékmérőhöz.



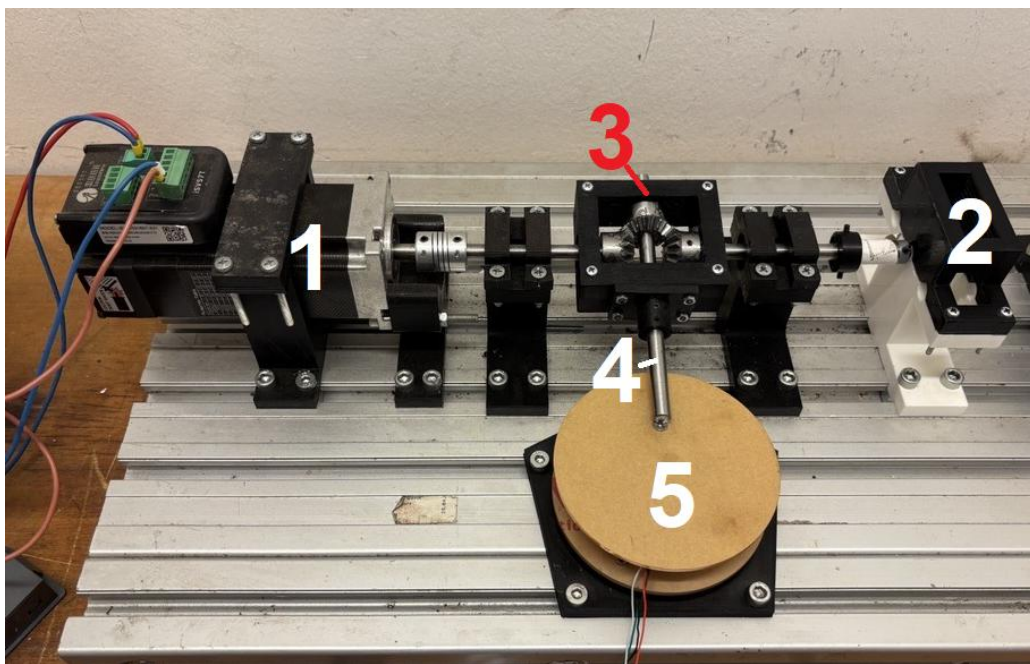
31. ábra: A véglegesnek gondolt berendezés

Ennek a berendezésnek azonban számos hibája és hiányossága volt. Az első és legfontosabb az volt, hogy hiába tudtam én is bizonyítani mérésekkel, hogy a fogaskerekek hibái kimutathatóak az átforgatási nyomaték jelleggörbéjének vizsgálatával, azonban pontosabb vizsgálatokat ezzel a berendezéssel nem tudtam végezni. A berendezéssel kimutattam, hogy ha a



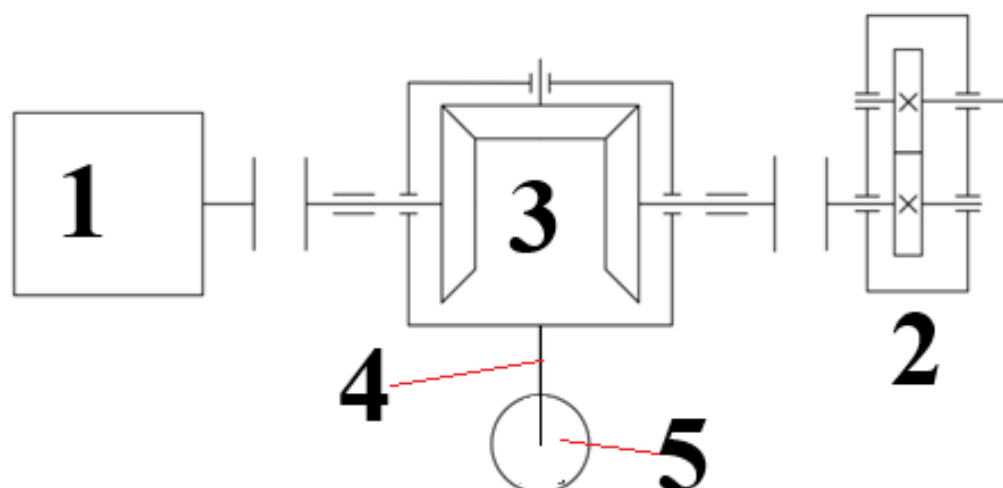
fogaskerek összes foga egy bizonyos hibát tartalmaz, akkor van eltérés a hiba nélküli esethez képest, azonban nem voltam képes olyan fogaskereket vizsgálni, amelyeknek csak egy foga tartalmazott hibát. Erre rárlett az is, hogy a nyomatókmérő mintavételi ideje 1 s volt, ami lassúnak bizonyult. Illetve másik hátrány, hogy egy-egy mérés előkészítése, illetve az egység-hajtóművek beszerelése és beállítása órákat vett igénybe. Ez azért volt előnytelen, mivel a mérés időtartama ezzel szemben csak 1 perc volt. Így túl sok munkát kell ahhoz befektetni, hogy egy csekély eredményt elérjek.

Ezért más megoldást kellett kitalálnom. A probléma gyökerét a statikus nyomatókmérő tengely használatában láttam, mivel túl sok kötöttséget és kompromisszumot követelt a tervezés során. Forgó nyomatókmérő azonban nem állt a rendelkezésemre és a forgó nyomatókmérők ára a statikusokhoz képest sokkal nagyobb. Ezért egy differenciálmű elvén terveztem egy dinamikus nyomatókmérőt. A berendezést a 32. ábra mutatja.

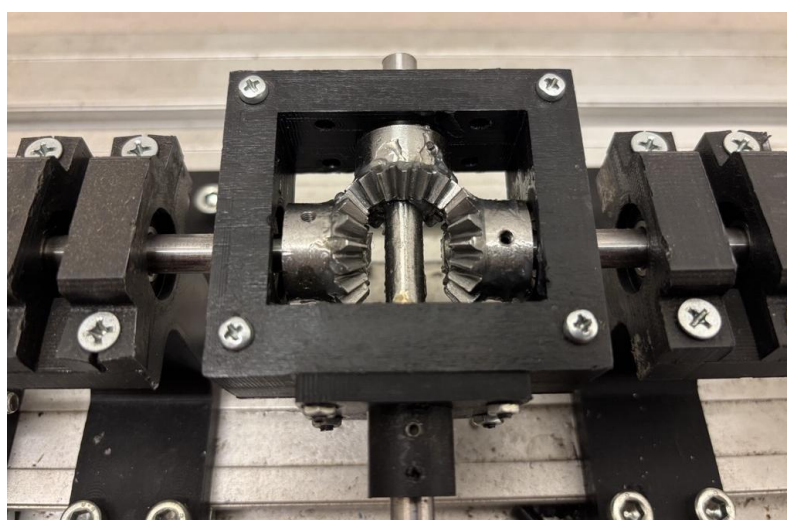


32. ábra: A dinamikus nyomatókmérő berendezés

Az 1. jelű motor biztosítja a meghajtást, ami a 3. jelű egység egyik kúpkerekéhez kapcsolódik. Az egység egy másik kúpkereke a 2. jelű hajtóműhöz van kapcsolva. Ez a hajtómű tartalmazza a mérni kívánt fogaskereket. A 3. jelű egységben van egy harmadik kúpkerek is, ami a másik kettőt köti össze. Ez a kúpkerek szabadon el tud fordulni és a kúpkereket körülvevő keretben van csapágyazva. A terhelés hatására ez a kúpkerek megbillenti a keretet, aminek a végén található a 4. jelű mérőtengely. A mérőtengely, bár egytengelyű a szabadon elfordulni tudó kúpkerekkel, azzal nem kapcsolódik és a mérés során nem forog. Ez a mérőtengely nyomja meg a mérés során a terhelésnek megfelelően az 5. jelű mérőszenzort. A berendezés sematikus ábráját a 33. ábra mutatja. A 3. jelű egység kúpkerekeit közelebbről a 34. ábra mutatja.



33. ábra: A berendezés sematikus ábrája



34. ábra: A kúpkerekek

Az 5. jelű szenzor egy 1 kg-os Hx711 mérőcella, amely tömegmérésre alkalmas, ez a 35. ábrán látható. A mérőcella pontossága 0,02 %. A mérőcella által mért adatokat a vele összekötött Raspberry Pi 400 dolgozza fel, ezt a 36. ábra mutatja. A mérés időtartama 1 perc és a mintavételezési idő 0,3 s. A terhelést a Raspberry grammban rögzíti. Ezt a gravitációs gyorsulás értékével szorozva megkapjuk a terhelés értékét Newtonban, amit az erőkarral megszorozva pedig az átforgatási nyomaték értékét lehet megkapni.



35. ábra: A mérőcella



36. ábra: A Raspberry Pi 400

A berendezés pontosságát úgy ellenőriztem, hogy nem kapcsoltam kisméretű műanyag fogaskerekeket tartalmazó hajtóművet hozzá, azaz „üresen” futtattam. Az így mért értékek 0,01 Nmm-en belül voltak, ami azt jelenti, hogy ekkora a berendezés pontossága. Minden nyomatókmérés elején van egy néhány másodperces szakasz, ahol az értékek nullát vesznek fel. Ez annak a következménye, hogy a mérés elején nagyon rövid ideig a mérőtengelyt el kell választani a szenzortól, hogy a 0 értéket biztosan megtalálja és felvegye.

A berendezésnek van egy további előnye a korábbiakban bemutatott berendezésekhez képest. Ezzel a berendezéssel bármilyen kialakítású hajtómű vizsgálható, mivel a vizsgálatok során a hajtómű egésze nem mozog. Ezért csak azt kell biztosítani, hogy a vizsgálat során a hajtómű ne tudjon elmozdulni. A hajtóműveket a berendezés alapját képező alumíniumprofilok hornyaihoz kapcsolódó rögzítési pontokon, vagy lefogókkal lehet rögzíteni, ami tovább növeli az alkalmazhatóság rugalmasságát.

### 3.3. A mérésekhez használt fogaskerekek gyártása

Ahhoz, hogy a kisméretű műanyag fogaskerék hibáit vizsgálni tudjam, olyan fogaskerekeket kellett gyártanom megfelelő pontossággal, amelyeknek csak az egyik foga tartalmaz hibát.

Ehhez a KISSSoft szoftverrel generált fogaskerék geometriákat használtam. A hibákat ezek után a Solid Edge nevű CAD tervezőszoftverrel helyeztem el a fogakon.

A következő lépésként egy olyan gyártási eljárását kellett találnom, ami viszonylag jó pontossággal képes létrehozni a fogaskerekeket. Bár a kisméretű műanyag fogaskerekeket leggyakrabban fröccsöntéssel gyártják, ez a technológia nem jöhetett szóba. A fröccsöntés drága és csak nagy volumenek esetén gazdaságos, nekem pedig a vizsgálatokhoz csak kis mennyiségű fogaskerékre volt szükségem. A forgácsolás szintén nem kerülhetett szóba, hiszen nem állt rendelkezésemre olyan lehetőség, ahol ilyen kis méretben megfelelően pontosan tudtam volna a rendelkezésemre álló forrásokból fogaskerekeket gyártatni.

Szóba jöhettek még a 2. fejezetben kapott eredmények alapján az ott bemutatott 3D nyomtatási technológiák, különösen a sztereolitográfia. Az SLA nyomtatás megfelelően pontos

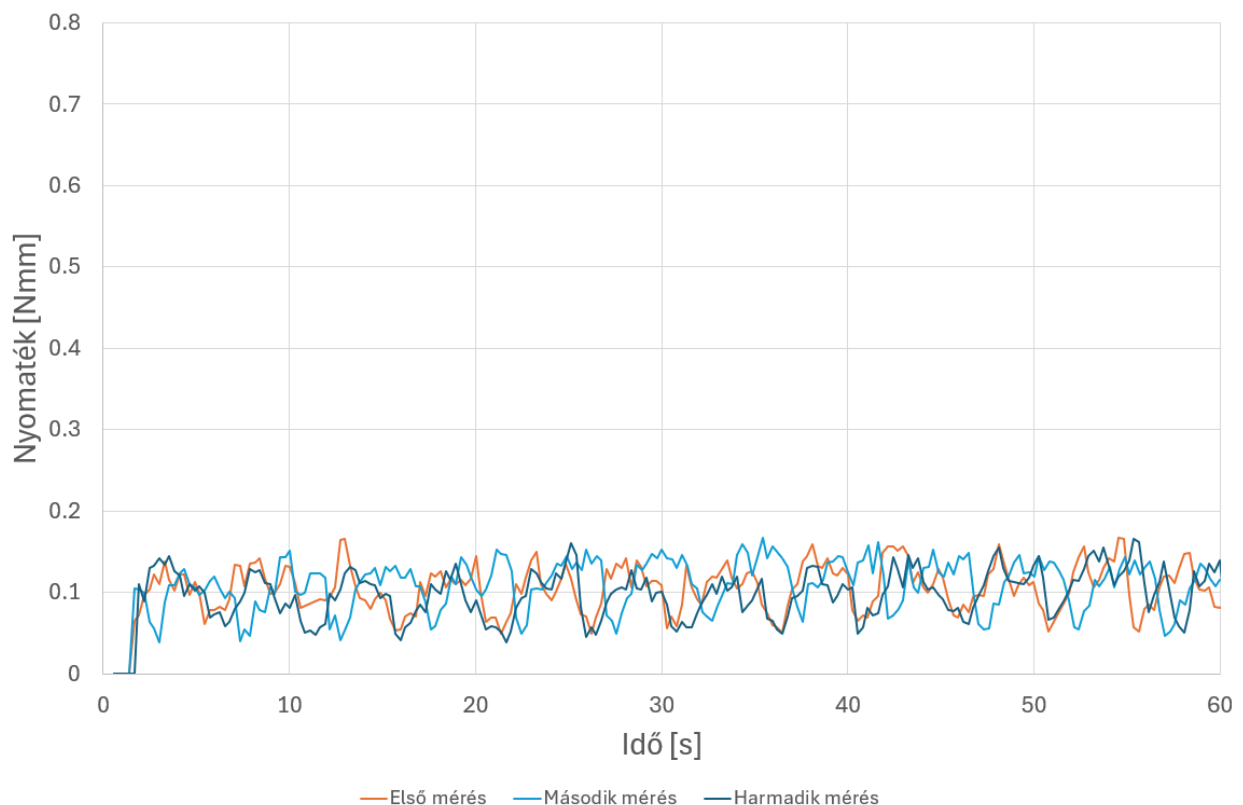
gyártási eljárásnak tűnt az eredmények alapján. Azonban ennek megerősítésére átforgatásnyomaték-vizsgálatokat is végeztem mindhárom nyomtatási eljárásra.

Minden esetben olyan fogaskerékpárokat vizsgáltam, amelyek egyik tagja sem tartalmazott általam a CAD szoftverben létrehozott hibát, így csak a nyomtatási technológiák hibái befolyásolták az átforgatási nyomaték értékét.

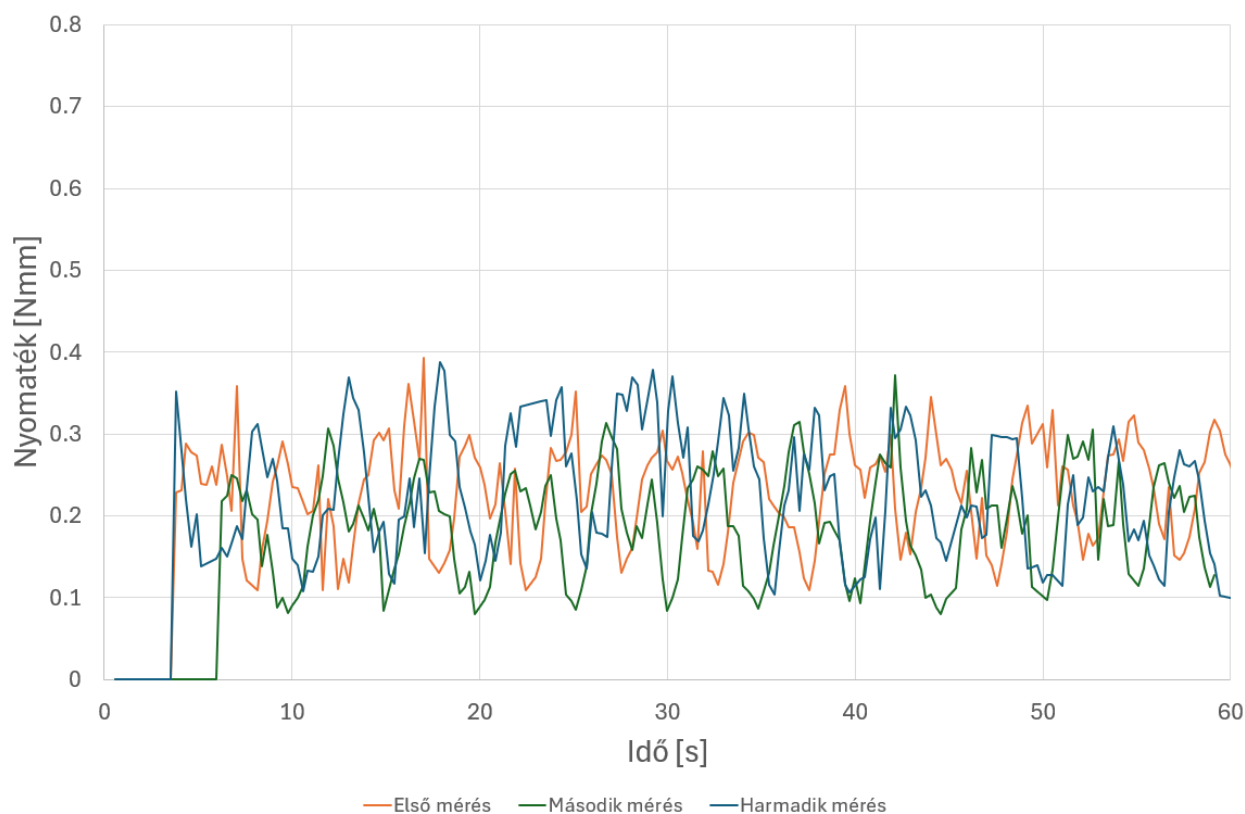
A méréseket két esetre hajtottam végre. Az egyik esetben a fogaskerékpár mindkét tagja  $z=30$  fogszámmal rendelkezett, a második esetben pedig  $z=50$  volt mindkét fogaskerék fogszáma. Ezen belül minden fogaskerékpárra 3-3 egymástól független mérést végeztem el. A fogaskerekeket a meghajtó motor 12 1/min fordulatszámmal forgatta.

Egy fogaskerékpár pontossága annál jobb, minél közelebb van egymáshoz a maximum és a minimum értéke az átforgatási nyomaték jelleggörbéjén.

Mivel a 3D nyomtatási technológiák közül a sztereolitográfia tűnt magasan a legbiztatóbbnak, azzal kezdtem a vizsgálatokat. Az eredményeket a 37. ábra és a 38. ábra mutatják, illetve a 10. táblázat foglalja össze a mért értékek maximumát, minimumát és átlagát. Az ábrákon a függőleges, nyomatékot mutató tengely skálázását azért így választottam meg, hogy könnyebben összehasonlítható legyen a többi technológiával.



37. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje SLA eljárással nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=30$  esetén



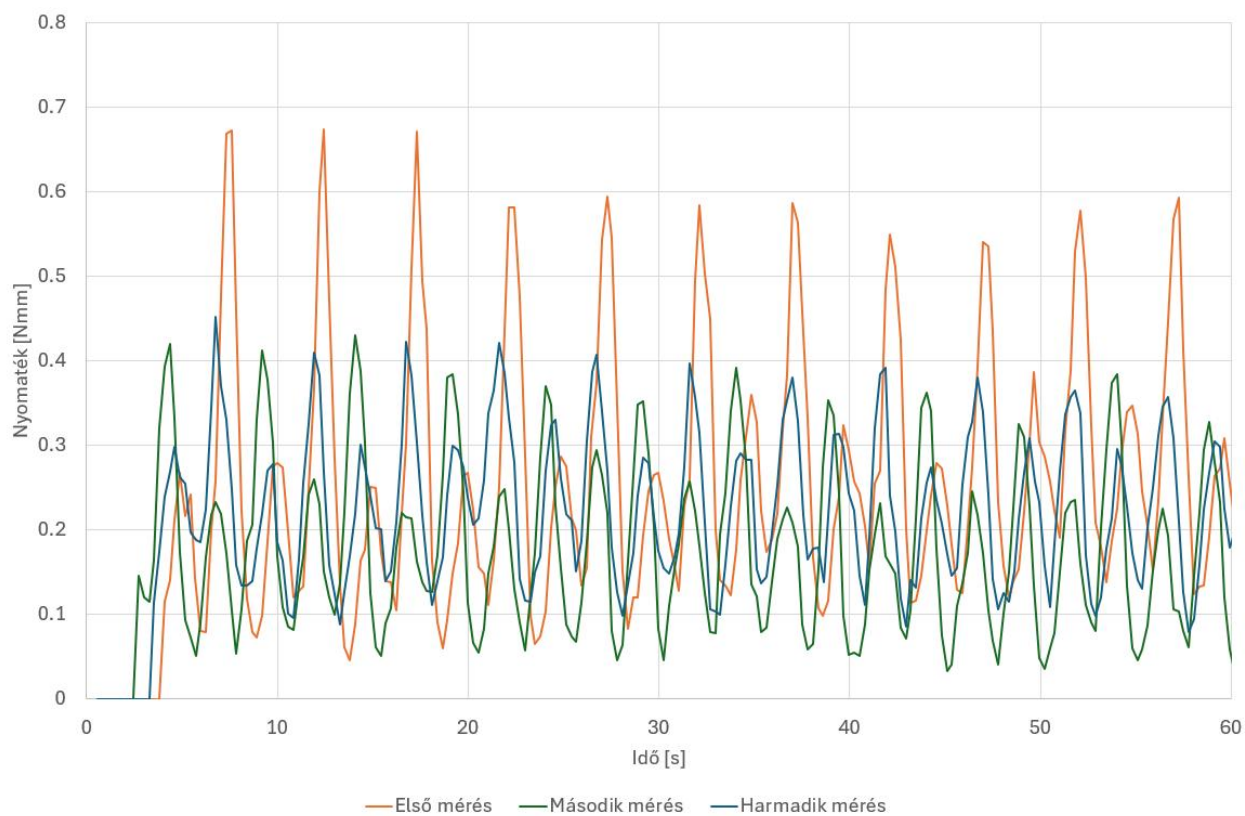
38. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje SLA eljárással nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=50$  esetén

10. táblázat: A sztereolitográfiával gyártott fogaskereken mért értékek

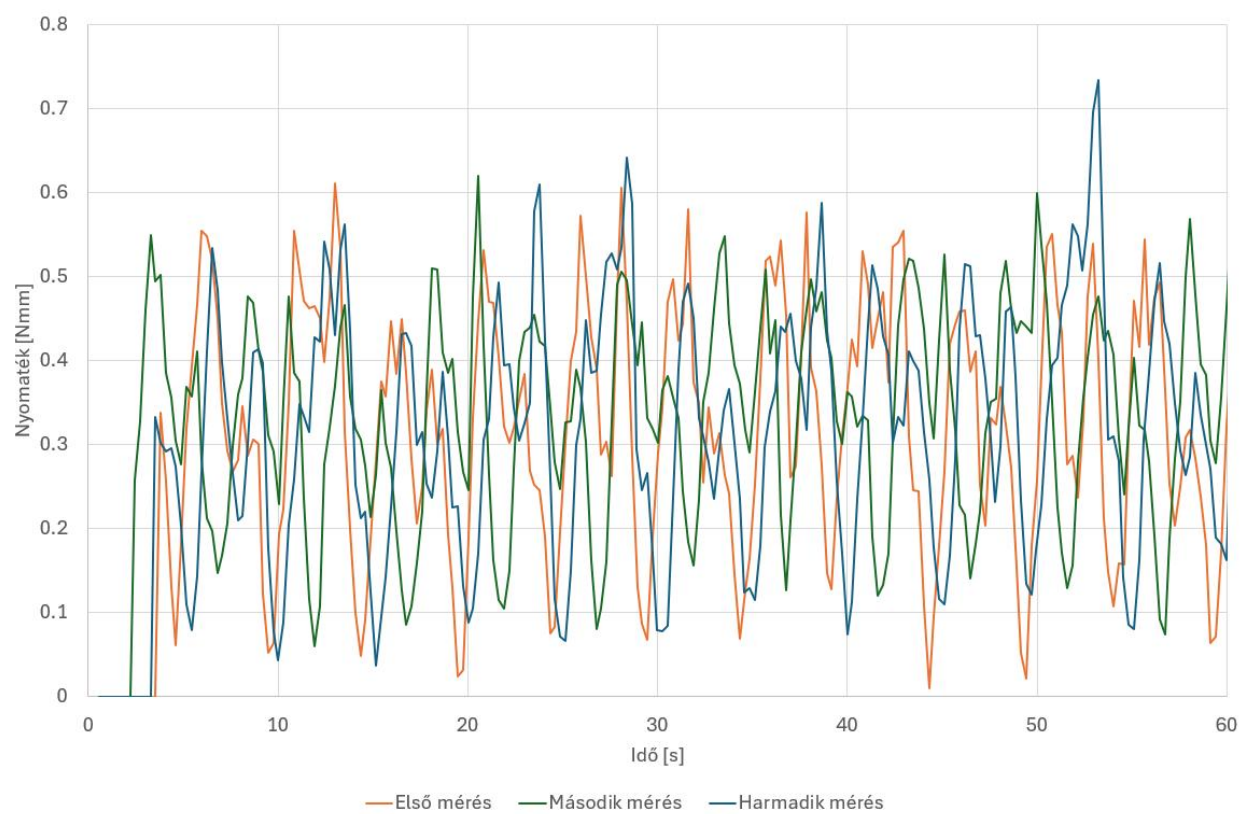
| Fogaskerék   | Mérés    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------------|----------|---------------|-------------|---------------|
| $z=30$ , SLA | 1. mérés | 0,16701525    | 0,110430311 | 0,038259      |
|              | 2. mérés | 0,16701525    | 0,106189796 | 0,0485595     |
|              | 3. mérés | 0,16554375    | 0,098932946 | 0,03899475    |
| $z=50$ , SLA | 1. mérés | 0,39362625    | 0,231702011 | 0,10913625    |
|              | 2. mérés | 0,37155375    | 0,192418527 | 0,07970625    |
|              | 3. mérés | 0,387495      | 0,228799856 | 0,0981        |

Az SLS technológiával gyártott fogaskerekek diagrammait a 39. ábra és a 40. ábra mutatják. Ebben az esetben is összefoglaltam az eredményeket egy táblázatban, ez a 11. táblázat.





39. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje SLS eljárással nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=30$  esetén



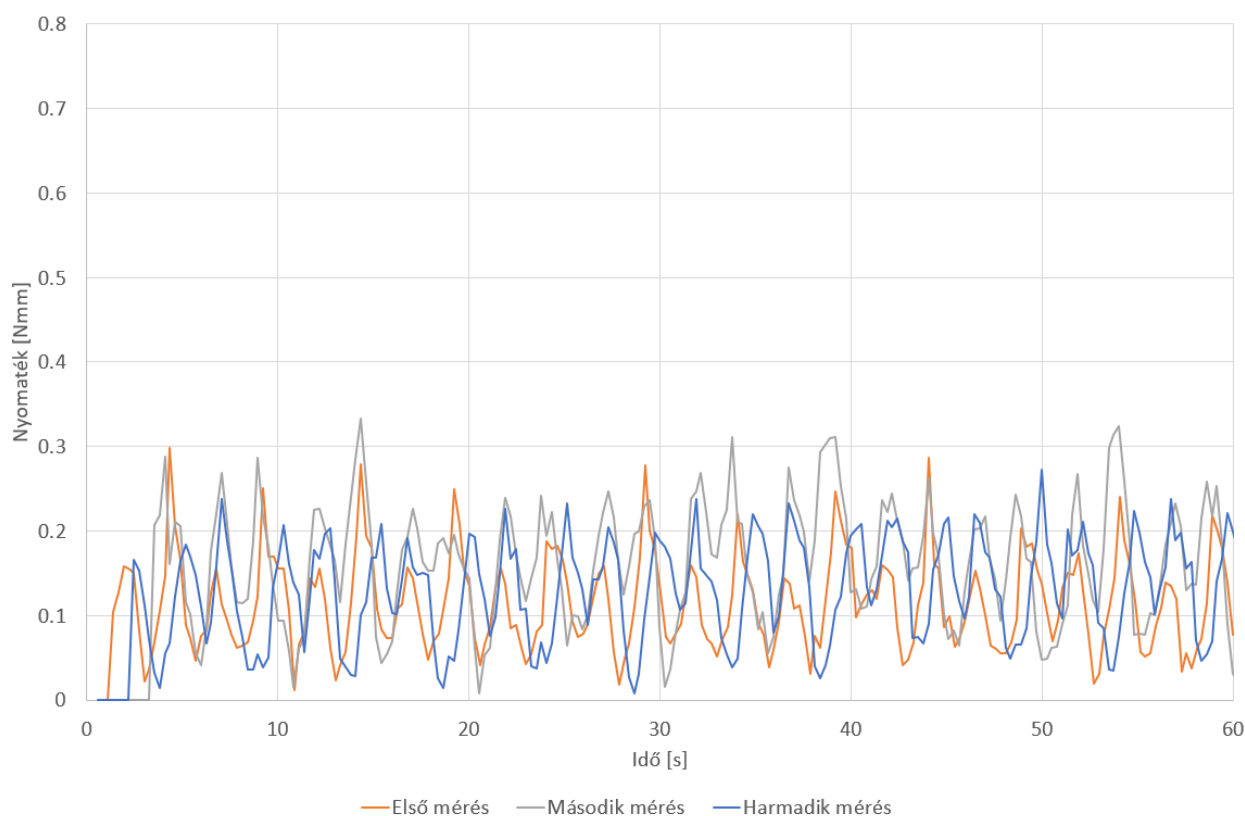


40. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje SLS eljárással nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=50$  esetén

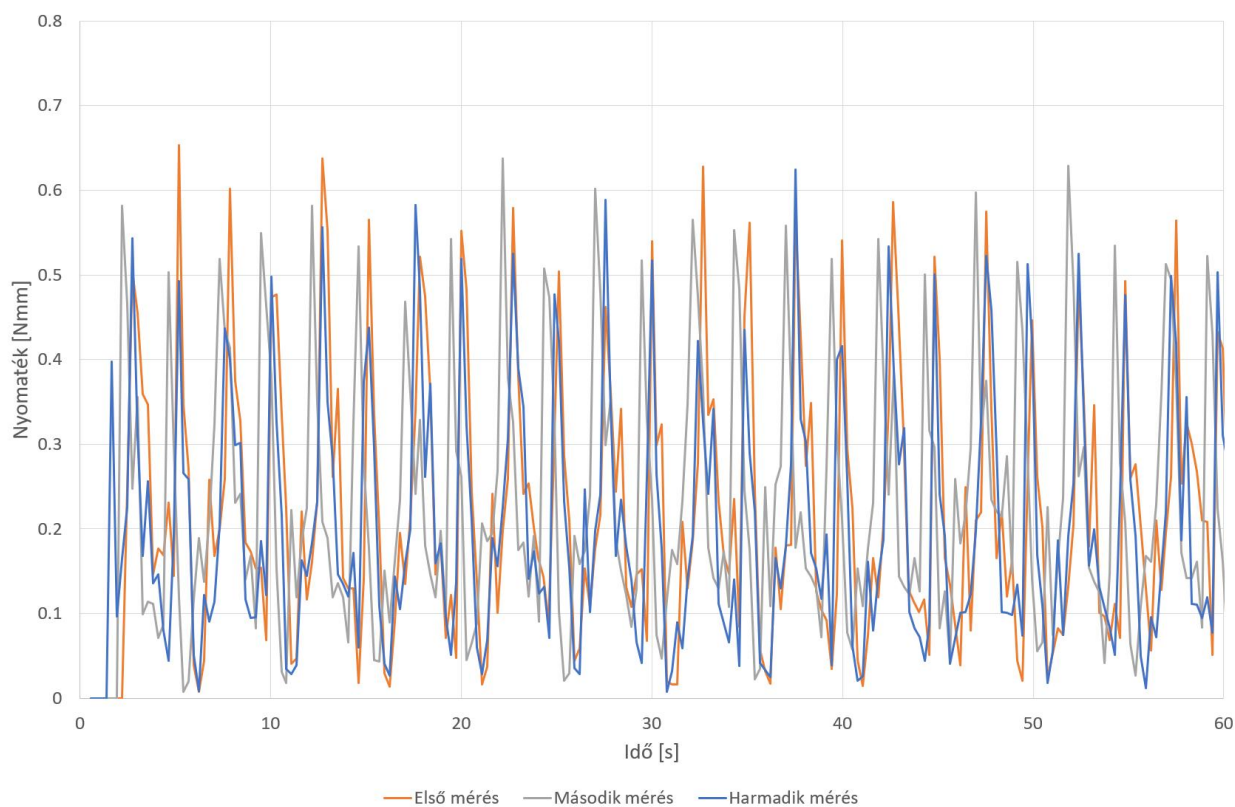
11. táblázat: Az SLS technológiával gyártott fogaskerékpárokon mért értékek

| Fogaskerék   | Mérés    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------------|----------|---------------|-------------|---------------|
| $z=30$ , SLS | 1. mérés | 0,673947      | 0,266728737 | 0,04635225    |
|              | 2. mérés | 0,4311495     | 0,180159046 | 0,02869425    |
|              | 3. mérés | 0,4517505     | 0,22912859  | 0,079461      |
| $z=50$ , SLS | 1. mérés | 0,61189875    | 0,323227821 | 0,00981       |
|              | 2. mérés | 0,6204825     | 0,339089494 | 0,06008625    |
|              | 3. mérés | 0,73452375    | 0,32544675  | 0,0367875     |

A Raise3D Pro3 Plus FDM nyomtatóval PLA alapanyagból nyomtatott fogaskerekek átforgatási nyomatékának jelleggörbéit a 41. ábra és a 42. ábra mutatja. Az eredményeket a 12. táblázat foglalja össze.



41. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje FDM eljárással PLA alapanyagból nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=30$  esetén

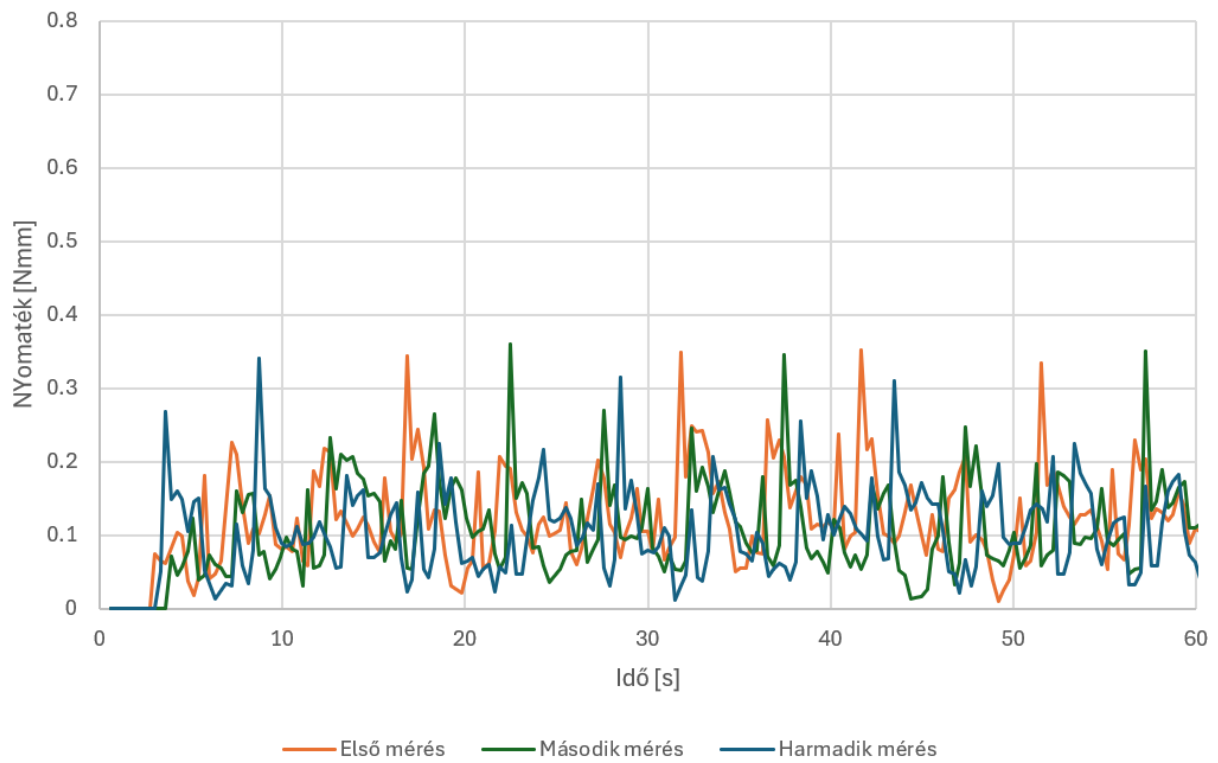


42. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje FDM eljárással PLA alapanyagból nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=50$  esetén

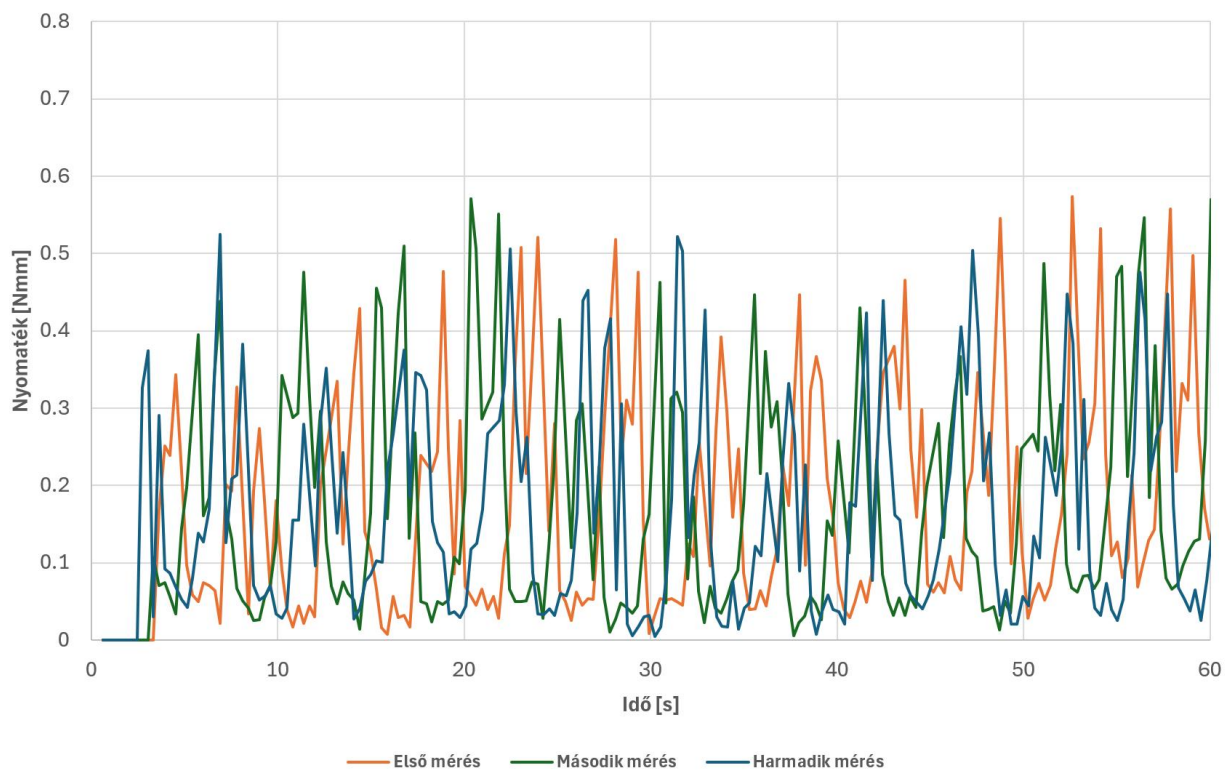
12. táblázat: A PLA-ból gyártott fogaskerekeken mért eredmények összefoglalása

| Fogaskerék   | Mérés    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------------|----------|---------------|-------------|---------------|
| $z=30$ , PLA | 1. mérés | 0,299009      | 0,1149      | 0,012066      |
|              | 2. mérés | 0,333148      | 0,163013    | 0,008155      |
|              | 3. mérés | 0,272816      | 0,131872    | 0,007946      |
| $z=50$ , PLA | 1. mérés | 0,653591      | 0,230872    | 0,007358      |
|              | 2. mérés | 0,63765       | 0,23695     | 0,007357      |
|              | 3. mérés | 0,624161      | 0,208701    | 0,007358      |

Az Ultimaker S5 nyomtatóval TPLA alapanyagból nyomtatott fogaskerekek átforgatási nyomatékának görbéit a 43. ábra és a 44. ábra mutatja. Az eredményeket a 13. táblázat foglalja össze.



43. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje FDM eljárással TPLA alapanyagból nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=30$  esetén



44. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje FDM eljárással TPLA alapanyagból nyomtatott fogaskerékpároknál  $z=50$  esetén

13. táblázat: A TPLA-ból gyártott fogaskerekeken mért eredmények összefoglalása

| Fogaskerék | Mérés    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|------------|----------|---------------|-------------|---------------|
| z=30, TPLA | 1. mérés | 0,3517        | 0,1262      | 0,0103        |
|            | 2. mérés | 0,3598        | 0,1123      | 0,0132        |
|            | 3. mérés | 0,3407        | 0,1079      | 0,011         |
| z=50, TPLA | 1. mérés | 0,5738        | 0,178       | 0,0074        |
|            | 2. mérés | 0,5708        | 0,1737      | 0,0055        |
|            | 3. mérés | 0,5248        | 0,1646      | 0,0049        |

Az átforgatási nyomaték eredményeiből, illetve a 1. fejezetben bemutatott mikroszkópos vizsgálatok eredményeiből egyértelműen látszik, hogy a sztereolitográfia messze a legpontosabb 3D nyomtatási technológia a három közül. Mivel a technológiák közül csak az SLA nyomtatás felel meg a további vizsgálatokhoz elvárt minőséghez, ezért az átforgatási nyomaték mérésével folytatott további vizsgálataimhoz ezzel a technológiával gyártott fogaskerekeket használtam és referenciaértékként a 10. táblázat értékeit használtam fel.

### 3.4. A hibák méréseinek alapjai

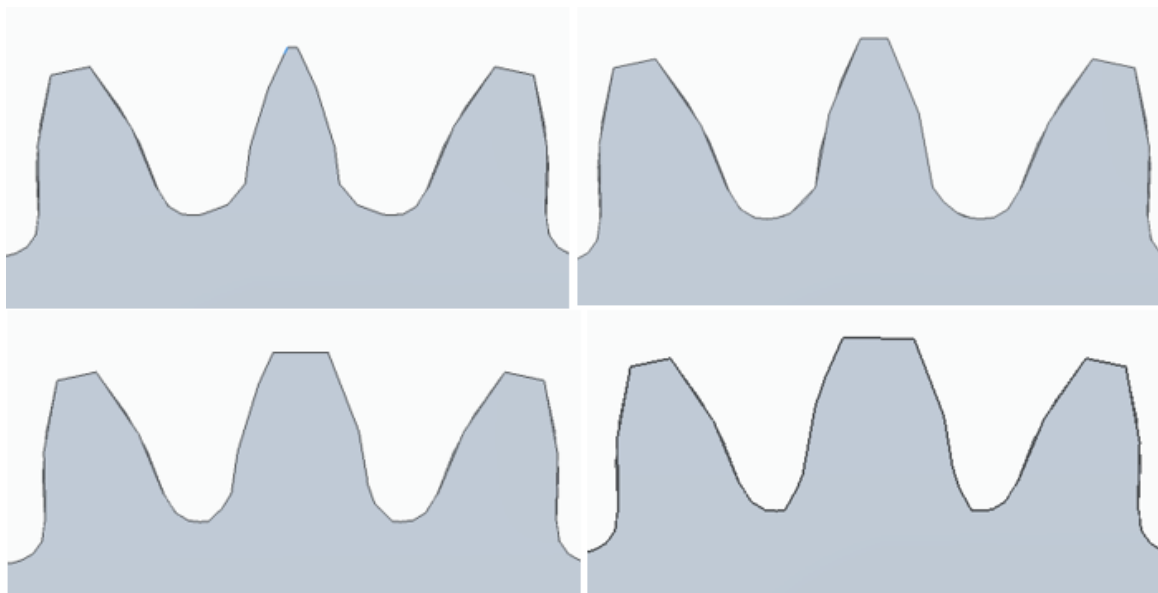
A hibák kimutathatóságának méréseit minden esetben két esetre hajtottam végre. Az egyik esetben a fogaskerékpár mindkét tagja z=30 fogszámmal rendelkezett, a második esetben pedig z=50 volt mindkét fogaskerék fogszáma. Ezen belül minden fogaskerékpárra 3-3 egymástól független mérést végeztem el. Minden esetben csak a fogaskerékpár egyik tagja tartalmazott hibát, a másik nem.

A fogaskerekeket minden esetben 12 1/min fordulatszámmal forgatta a motor. Ez azt jelenti, hogy a hibás fog az egy perces mérés során tizenkétszer érintkezett. Ez alapján a jelleggörbéken 12 olyan ciklikusan elhelyezkedő pontnak kell lennie, ahol a nyomaték értéke eltér a referenciamérések értékétől. Kivételt képeznek az olyan mérések, ahol a 12 pont egyike abba a szakaszba esik bele, ami a görbék elején lévő 0 értéket felvevő szakaszban van. Itt értelemszerűen csak 11 ilyen pont jelenik meg a görbén, de a ciklikusságból látszik, hogy hol lenne a 12. pont.

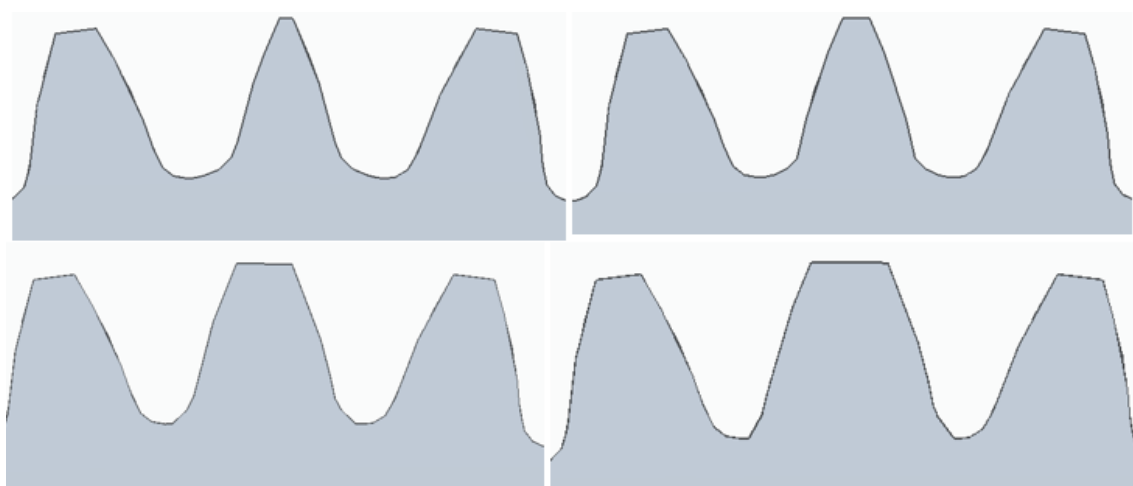
### 3.5. A fogvastagság hibáinak vizsgálata az átforgatási nyomaték mérésével

Elsőként a kisméretű műanyag fogaskerekek fogvastagsághibáival foglalkoztam, mivel a korábbi kutatások utaltak arra, hogy ezeket a hibákat ki lehet mutatni ezzel a módszerrel. Ehhez olyan fogaskerekre volt szükségem, ahol az egyik fog vastagsága más, mint a többié. Ehhez a

Solid Edge CAD szoftver segítségével módosítottam egy fogat a generált geometrián. Mivel korábban meghatároztam az SLA technológia pontosságát, olyan mértékű változtatásra volt szükségem, ami bármilyen esetben kimutatható és a nyomatékgörbén nem téveszthető össze a technológia korlátaiból adódó hatásokkal. Ezért 0,1 és 0,2 mm eltérést választottam. Négyféle esetet vizsgáltam. A módosított fog az első esetben 0,2 mm-rel kisebb, a másodikban 0,1 mm-rel kisebb, a harmadikban 0,1 mm-rel nagyobb, a negyedikben pedig 0,2 mm-rel nagyobb volt a szabványos értéktől. Az így módosított fogazatok 3D modelljének képét a 45. ábra és a 46. ábra mutatják.

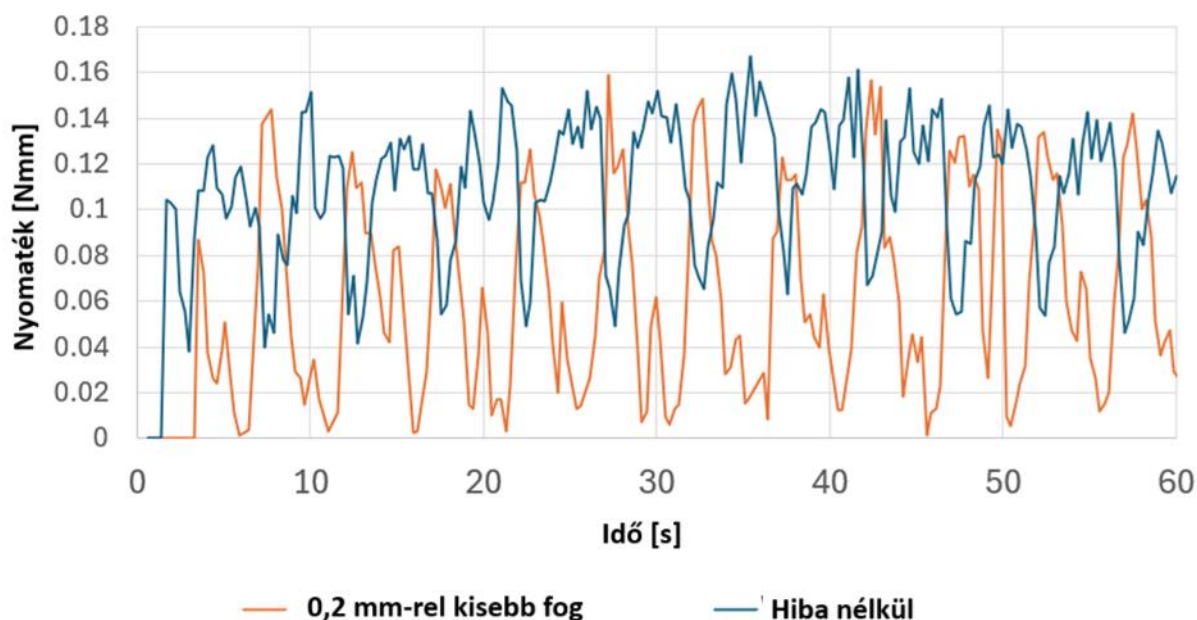


45. ábra: A  $z=30$  fogaskerekek módosított fogazata (balra fent: 0,2 mm-rel csökkentett fog, jobbra fent: 0,1 mm-rel csökkentett fog, balra lent: 0,1 mm-rel növelt fog, jobbra lent: 0,2 mm-rel növelt fog).

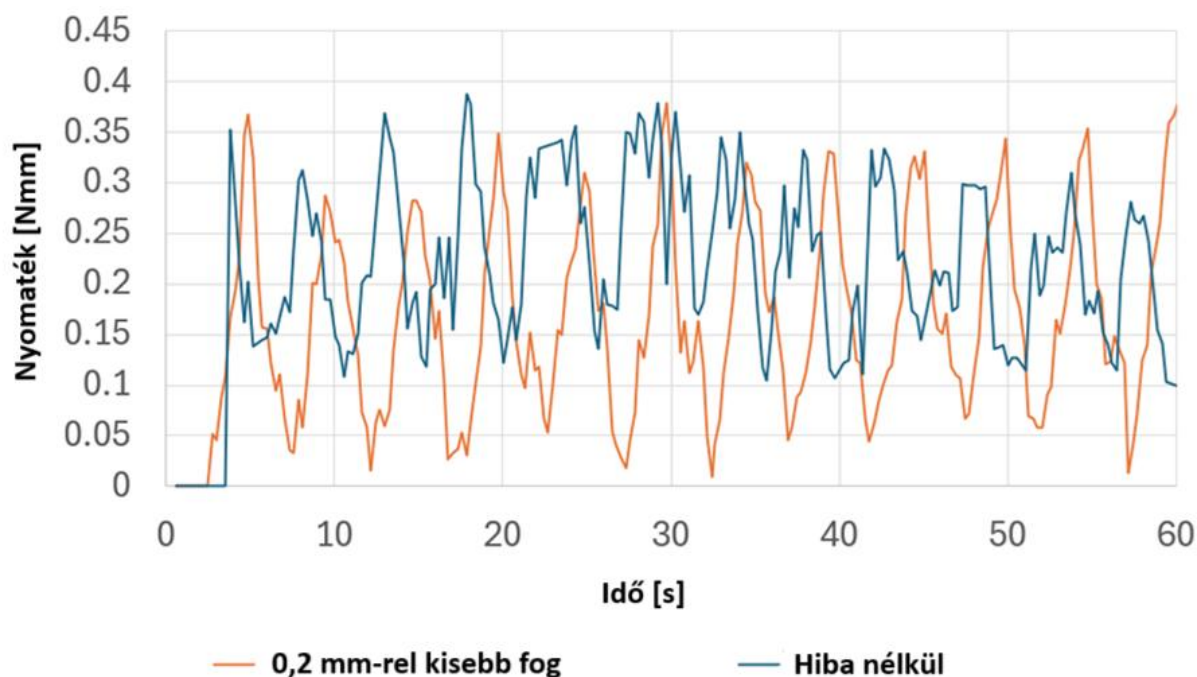


46. ábra: A  $z=50$  fogaskerekek módosított fogazata (balra fent: 0,2 mm-rel csökkentett fog, jobbra fent: 0,1 mm-rel csökkentett fog, balra lent: 0,1 mm-rel növelt fog, jobbra lent: 0,2 mm-rel növelt fog).

A 47. ábra és a 48. ábra azt az esetet mutatják, amikor a fogvastagságot 0,2 mm-rel csökkentettem. A diagrammokon jól láthatóak azok a ciklikusan ismétlődő helyek, ahol az átforgatási nyomaték értéke jelentősen lecsökken a referenciaértékhez képest. Az is látható, hogy ezeket a helyeket leszámítva az összes többi érték a hiba nélküli fogaskerékpárokhoz tartozó értékeket veszi fel.



47. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje  $z=30$  esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,2 mm-rel kisebb a többinél



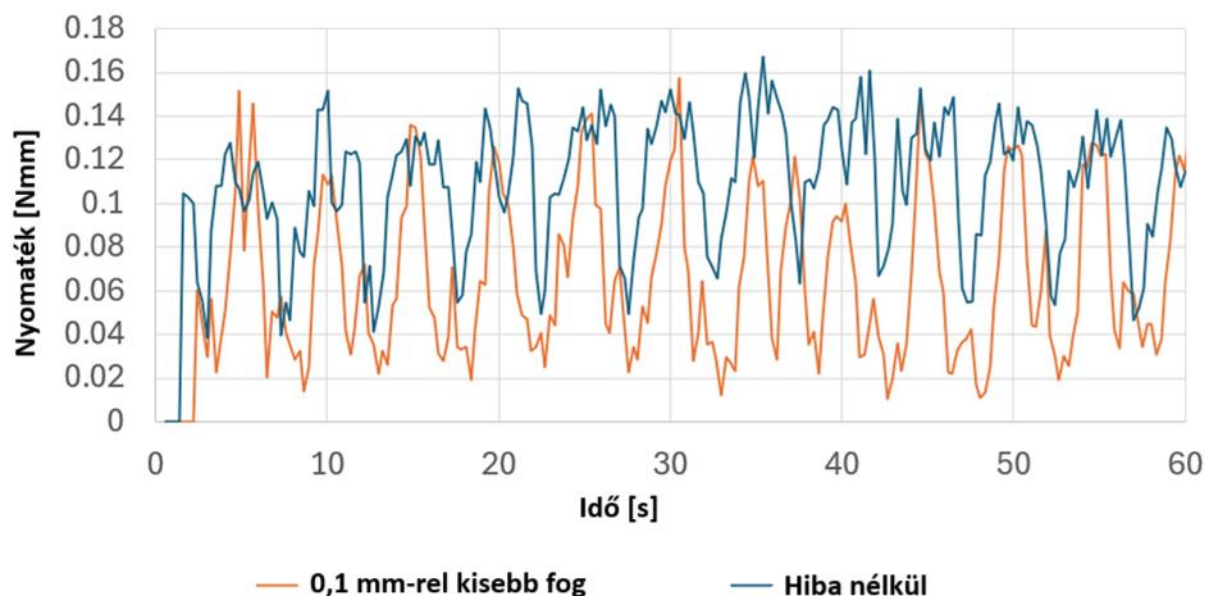
48. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje  $z=50$  esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,2 mm-rel kisebb a többinél



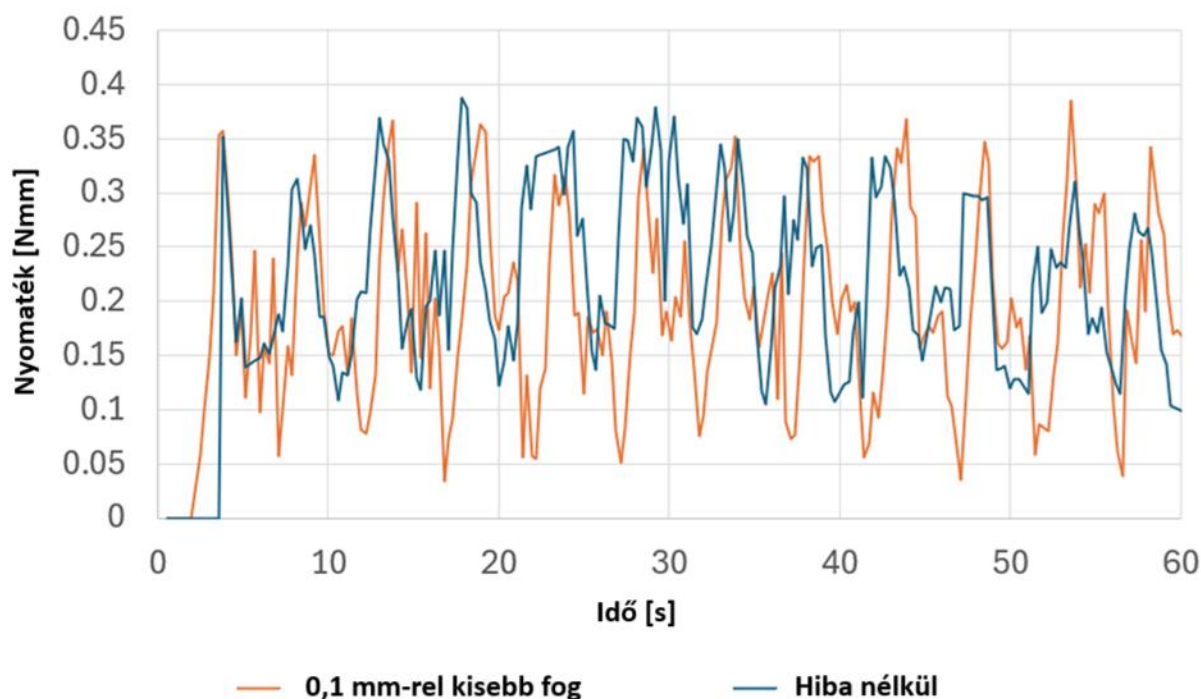
14. táblázat: A nyomatékgörbén a hiba nélküli esethez képest eltérő pontok legnagyobb, legkisebb és átlagos értéke 0,2 mm-rel kisebb fogvastagsághiba esetén

| Fogsám | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------|---------------|-------------|---------------|
| z=30   | 0,01839375    | 0,008353079 | 0,00073575    |
| z=50   | 0,06744375    | 0,028092273 | 0,0073575     |

A 49. ábra és az 50. ábra a 0,1 mm-rel csökkentett fogú fogaskerkekkel végzett vizsgálatok eredményeit mutatja. Az eredmények azt mutatják, hogy ilyenkor is feltűnik a ciklikusan megjelenő hely, ahol a nyomaték lecsökken. Azonban mivel a hiba kisebb, így a nyomatékcsökkenés mértéke is kisebb, mint a 0,2 mm-es hiba esetén.



49. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje z=30 esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,1 mm-rel kisebb a többinél

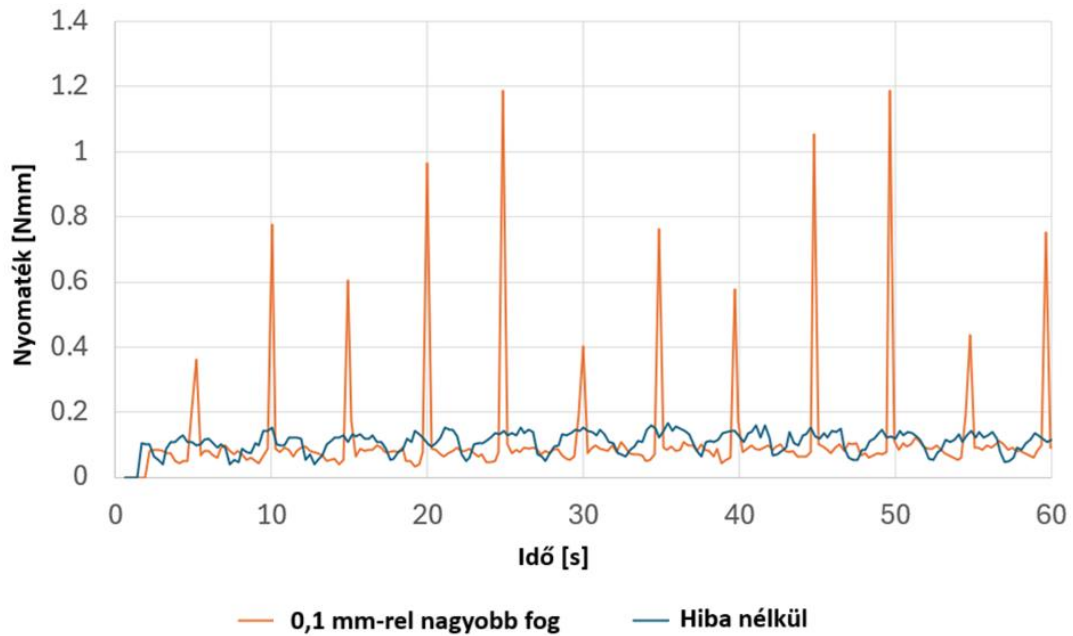


50. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje  $z=50$  esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,1 mm-rel kisebb a többinél

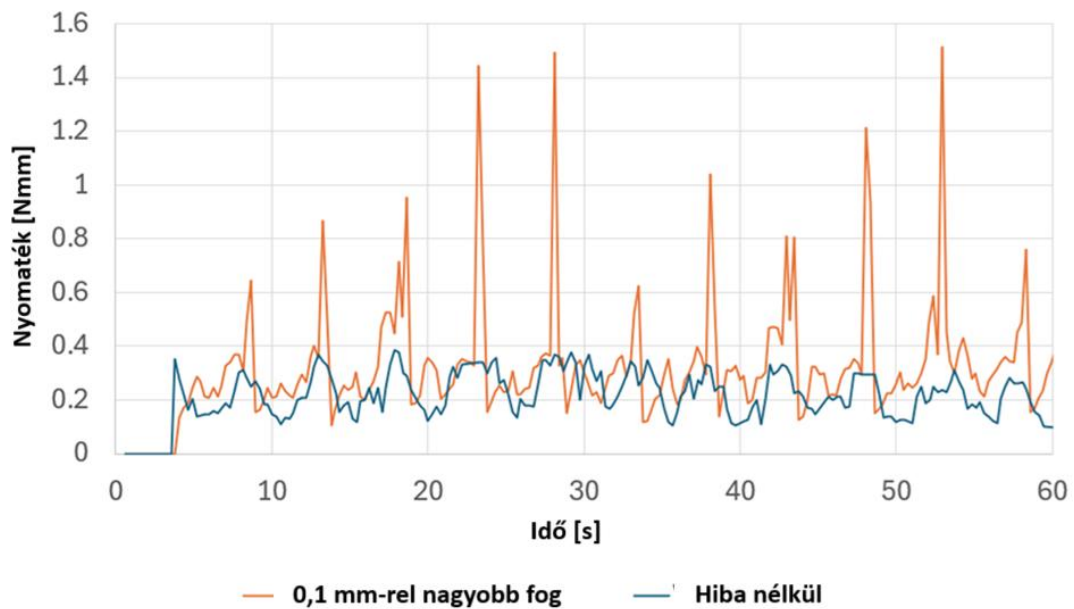
15. táblázat: A nyomatékgörbén a hiba nélküli esethez képest eltérő pontok legnagyobb, legkisebb és átlagos értéke 0,1 mm-rel kisebb fogvastagsághiba esetén

| Fogsám | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------|---------------|-------------|---------------|
| $z=30$ | 0,0309015     | 0,017457498 | 0,00809325    |
| $z=50$ | 0,0858375     | 0,057577734 | 0,03310875    |

Az 51. ábra és az 52. ábra azokat az eseteket mutatja, amikor a hibás fog 0,1 mm-rel nagyobb a többinél. Mint a diagrammokon látható, mikor a hibás fog lép kapcsolódásba, a nyomaték jelentősen megnő, egyébként viszont a nyomaték értéke a hiba nélküli eset értékeit veszi fel.



51. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje  $z=30$  esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,1 mm-rel nagyobb a többinél

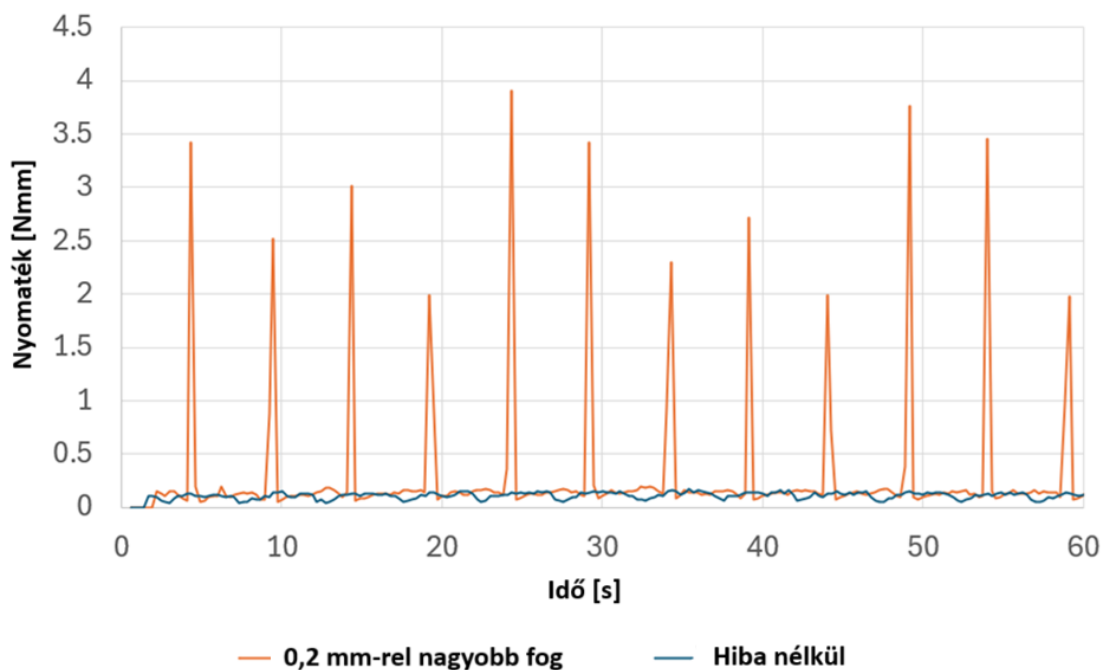


52. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje  $z=50$  esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,1 mm-rel nagyobb a többinél

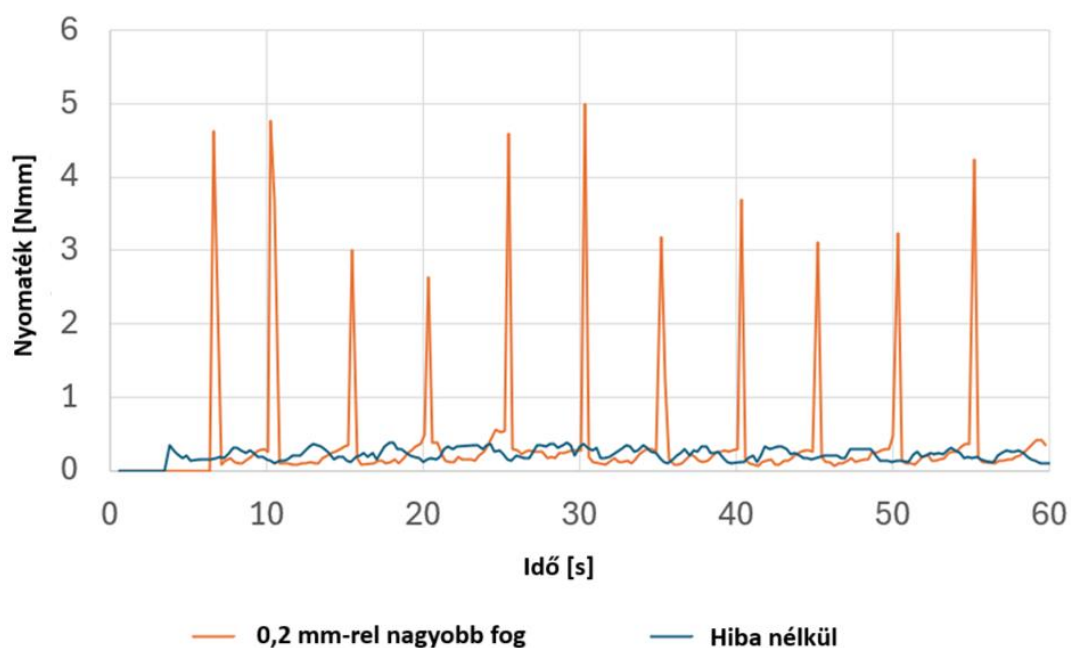
16. táblázat: A nyomatékgörbén a hiba nélküli esethez képest eltérő pontok legnagyobb, legkisebb és átlagos értéke 0,1 mm-rel nagyobb fogvastagsághiba esetén

| Fogsám | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------|---------------|-------------|---------------|
| $z=30$ | 1,1875005     | 0,681010979 | 0,28767825    |
| $z=50$ | 1,71307125    | 1,131593382 | 0,6204825     |

Az 53. ábra és az 54. ábra a 0,2 mm-re nagyobb fogakat tartalmazó fogaskerékpárok nyomatéki görbéjét mutatja. Itt a 0,1 mm-rel nagyobb esethez hasonló folyamat játszódik le, tehát a hibás fog érintkezésekor a nyomaték jelentősen megnő, azonban mivel ebben az esetben a hiba nagyobb, ezért az eltérés is nagyobb ezeknél a helyeknél.



53. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje  $z=30$  esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,2 mm-rel nagyobb a többinél



54. ábra: Az átforgatási nyomaték görbéje  $z=50$  esetén, ha az egyik fogaskerék egyik foga 0,2 mm-rel nagyobb a többinél

17. táblázat: A nyomatékgörbén a hiba nélküli esethez képest eltérő pontok legnagyobb, legkisebb és átlagos értéke 0,2 mm-rel nagyobb fogvastagsághiba esetén

| Fogszám | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|---------|---------------|-------------|---------------|
| $z=30$  | 3,94141275    | 2,66233841  | 1,26033975    |
| $z=50$  | 5,84553375    | 3,790858826 | 1,603935      |

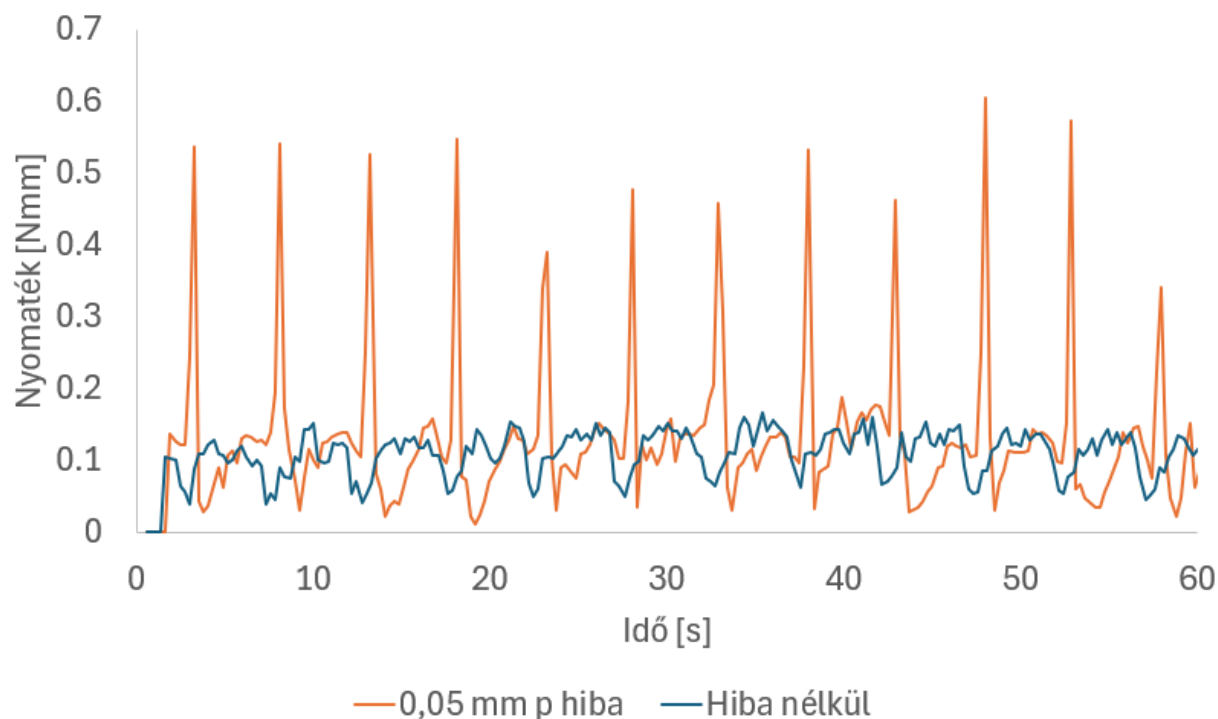
Az eredmények bebizonyították, hogy ez a módszer alkalmas arra, hogy a fogvastagsághibákat kimutassam.

### 3.6. Az osztás hibáinak vizsgálata

A következő általam vizsgált hiba a kisméretű műanyag fogaskerek osztóköri osztásának hibája volt. Ebben az esetben a Solid Edge CAD tervezőszoftverrel az osztáshibát úgy hoztam létre, hogy a fogaskerék egyik fogát elforgattam a fogaskerék tengelye körül. A hibás fogat úgy forgattam el, hogy az osztás egyik esetben 0,05, másik esetben 0,1 mm-rel változzon a szabványoshoz képest. Ezt az 55. ábra szemlélteti. Az ábrán a fekete nyíl jelöli az elforgatás irányát. Az ábrán található egy I. jelölésű fehér nyíl is. Ez arra szolgál, hogy a továbbiakban megkülönböztessem a hibás fogaskerék két forgásirányát. A nyíl által mutatott iránynak megfelelő forgásirányt a továbbiakban I. jelöléssel, a nyíl irányával ellentéteset II.-vel fogom jelölni.

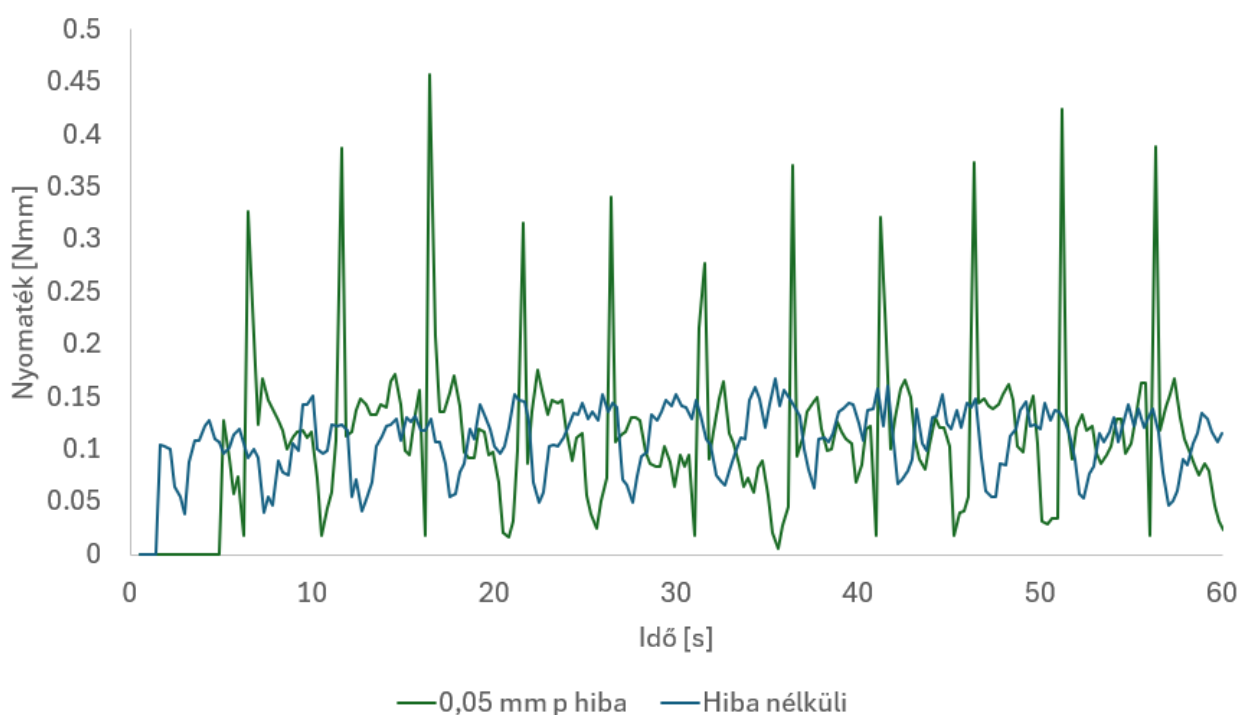


55. ábra: Az osztás hibájának szemléltetése



56. ábra: A nyomatéki görbe  $z=30$ , 0,05 mm osztáshiba és I. forgásirány esetén

A  $z=30$  fogszám esetén a 0,05 mm-es osztáshibánál, ha a hibás fogaskerék az I. forgásirányban forog, azt tapasztaltam, hogy amikor a hibás fog lép kapcsolatba, a nyomaték jelentősen megnő, majd hirtelen lecsökken. Ez azzal magyarázható, hogy a csökkentett osztású résznél a foghézag is lecsökken a szabványoshoz képest, míg a fog másik oldalán a foghézag a szabványos érték fölé kerül. Az ehhez tartozó nyomatékgörbét az 56. ábra mutatja.



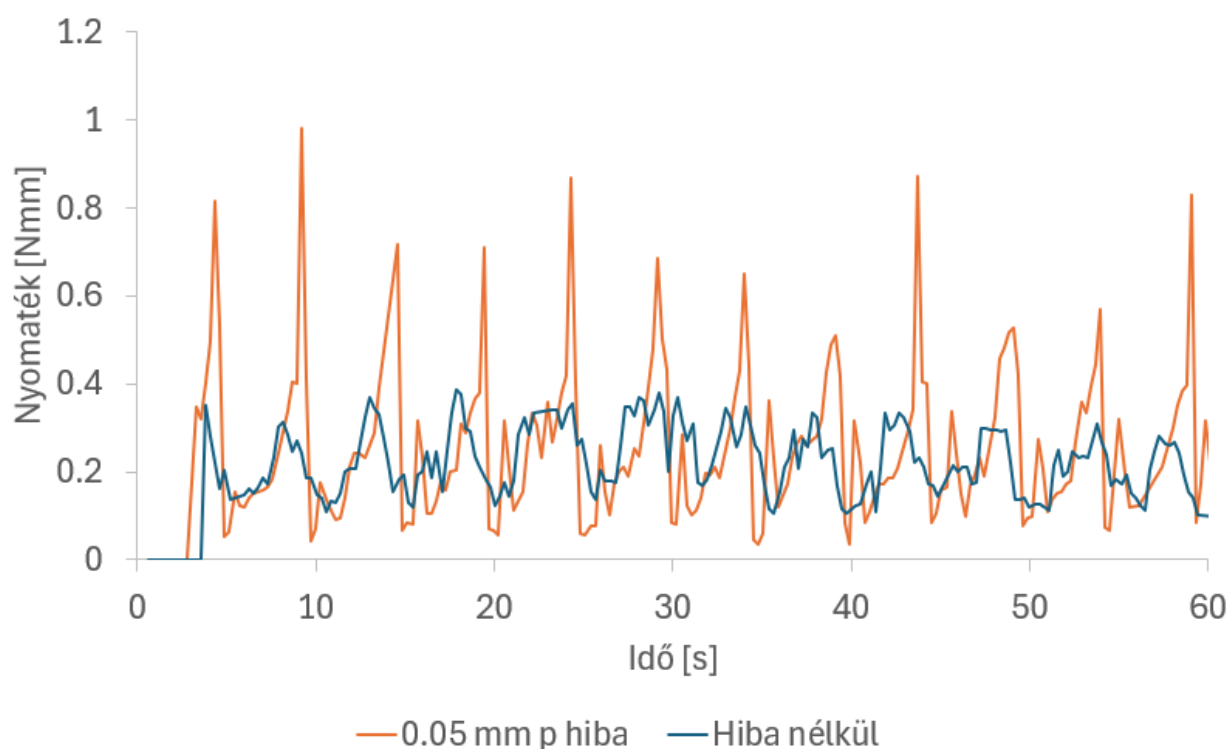
57. ábra: A nyomatéki görbe  $z=30$ , 0,05 mm osztáshiba és II. forgásirány esetén



II. forgásirány diagrammját az 57. ábra mutatja. Ebben az esetben az I. forgásiránnyal ellentétes folyamat zajlik le. A nyomaték jelentősen lecsökken, majd megnő. A kiugró értékek nagysága nagyjából megegyezik az I. forgásirány esetén tapasztalttal. Ezeket a referenciaértékektől eltérő nyomatékokat a 18. táblázat foglalja össze.

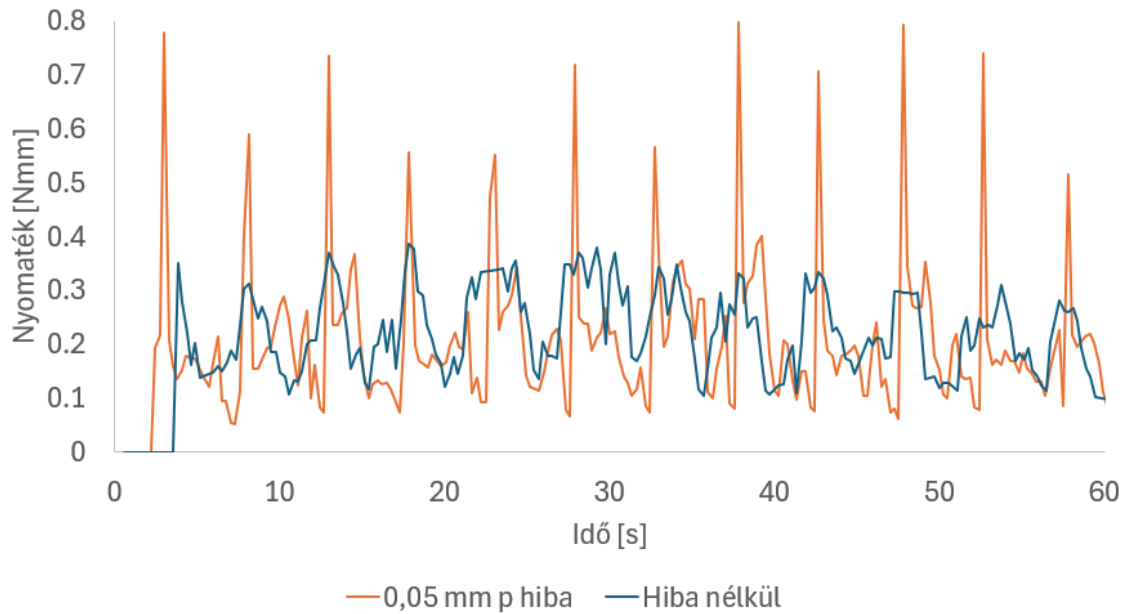
18. táblázat: Az átfogatási nyomaték referenciaértékektől eltérő értékeinek maximuma, átlaga és minimuma 0,05 mm osztáshiba esetén,  $z=30$  fogszámú fogaskerékpárokra

|                    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------------------|---------------|-------------|---------------|
| Csökkentett osztás | 0,6364        | 0,4511      | 0,2774        |
| Növelt osztás      | 0,0345        | 0,0244      | 0,0103        |



58. ábra: A nyomatéki görbe  $z=50$ , 0,05 mm osztáshiba és I. forgásirány esetén

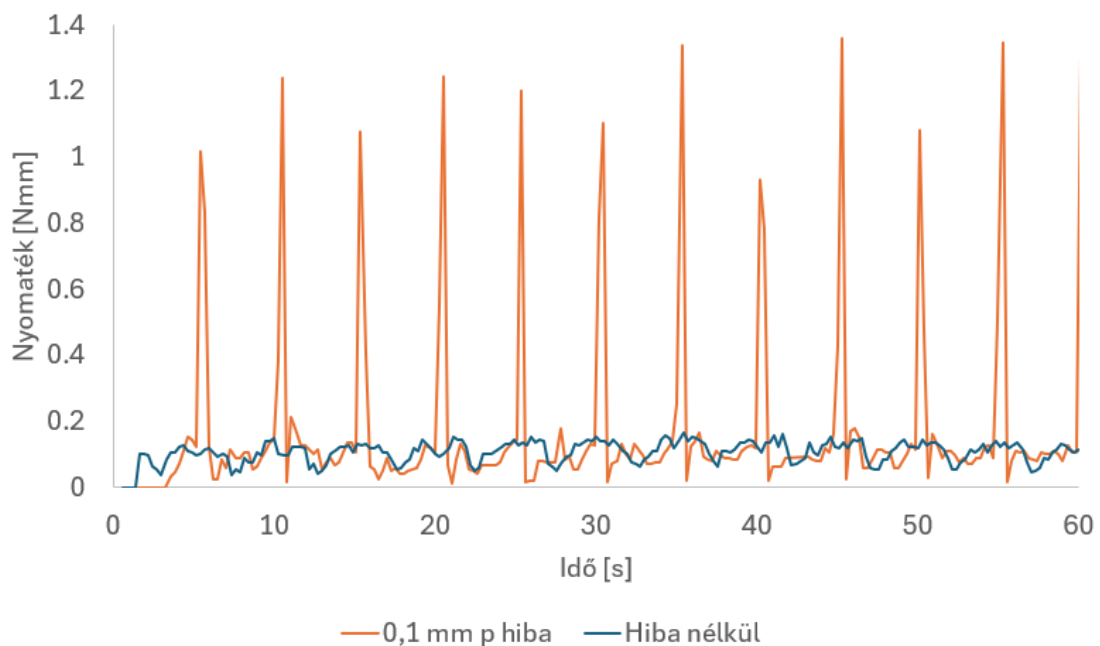
A  $z=50$  és 0,05 mm osztáshiba esetén is ugyanaz figyelhető meg, mint  $z=30$  esetén. A különbség csak a hibás fognál tapasztalható nyomaték nagyságában van. Ezeket az értékeket a 19. táblázat tartalmazza. Az I. forgásirányt az 58. ábra, a II. forgásirányt az 59. ábra mutatja.



59. ábra: A nyomatéki görbe  $z=50$ , 0,05 mm osztáshiba és II. forgásirány esetén

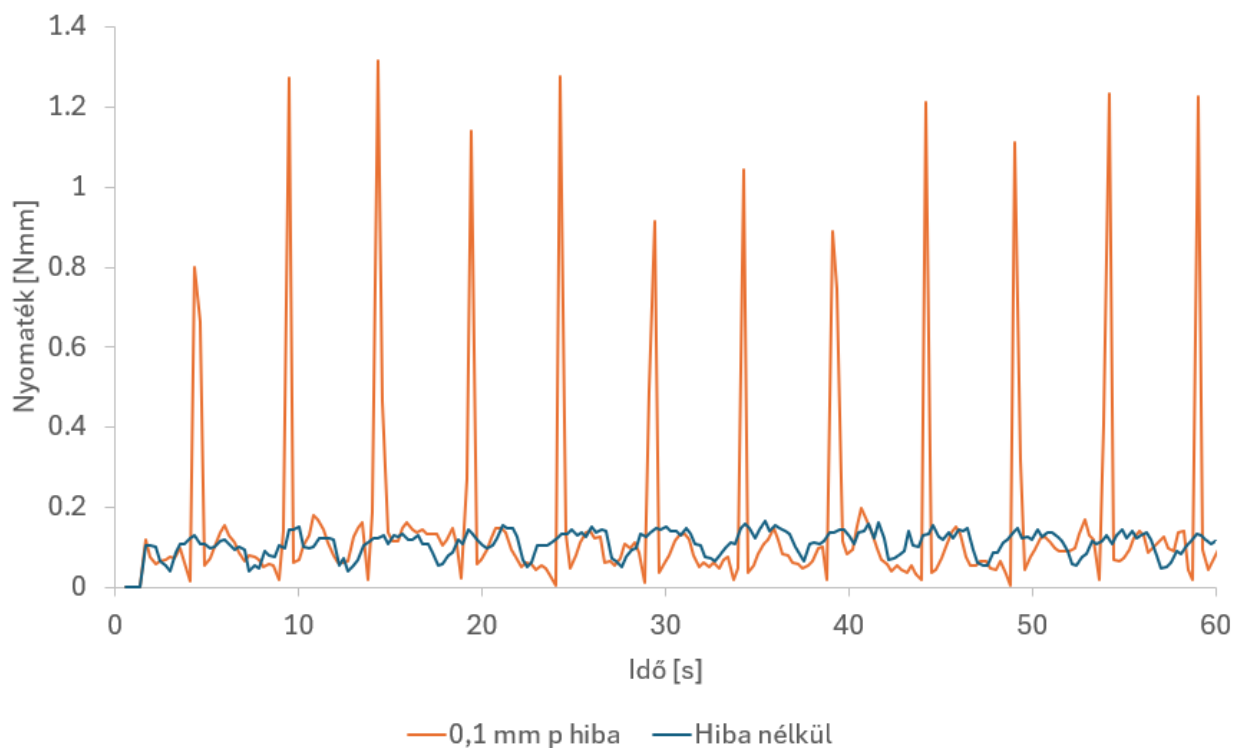
19. táblázat: Az átfogatási nyomaték referenciaértékektől eltérő értékeinek maximuma, átlaga és minimuma 0,05 mm osztáshiba esetén,  $z=50$  fogszámú fogaskerékpárokra

|                    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------------------|---------------|-------------|---------------|
| Csökkentett osztás | 0,9798        | 0,6761      | 0,5039        |
| Növelt osztás      | 0,0919        | 0,0677      | 0,0343        |



60. ábra: A nyomatéki görbe  $z=30$ , 0,1 mm osztáshiba és I. forgásirány esetén

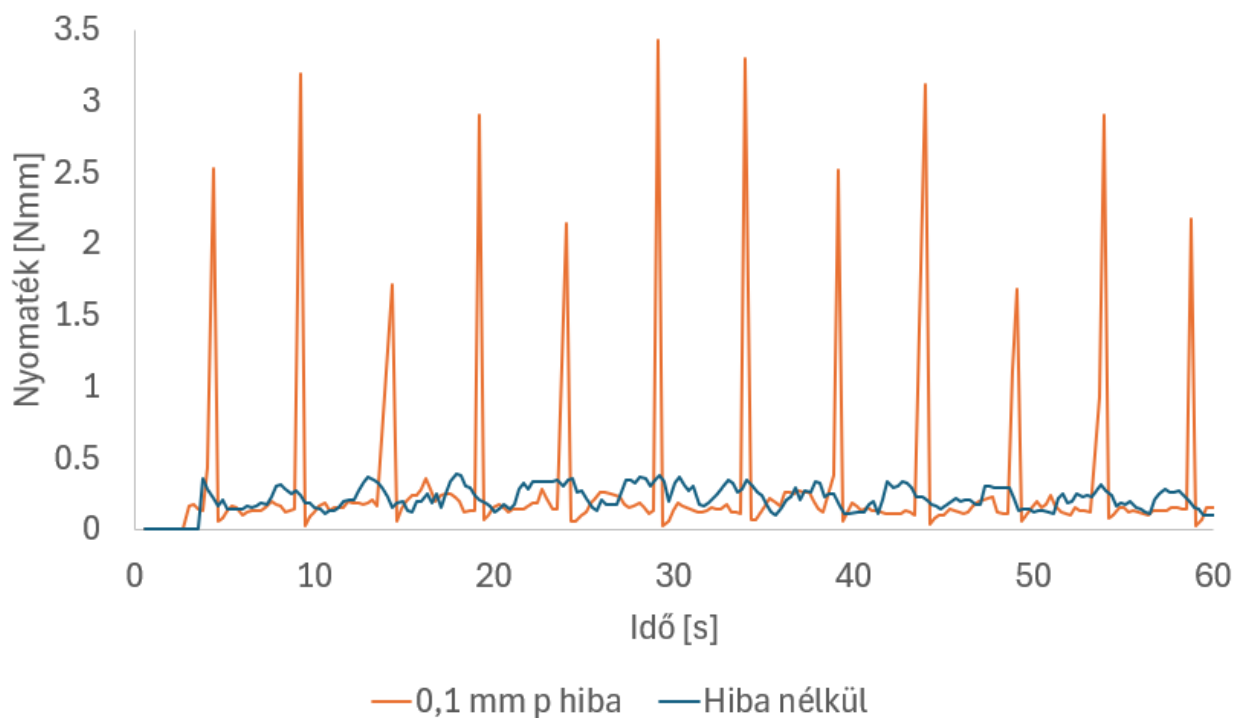
A  $z=30$  és 0,1 mm osztáshibával rendelkező fogaskerekek esetén ugyanazt a jelenséget tapasztaltam, mint 0,05 mm-es hiba esetén. Azonban mivel itt az osztáshiba nagyobb volt, így a hibás fog kapcsolódásakor mért nyomatok és a referenciaértékek különbsége is nagyobb lett. Ezeket az értékeket a 20. táblázat tartalmazza. A nyomatékgörbét a 60. ábra és a 61. ábra mutatja.



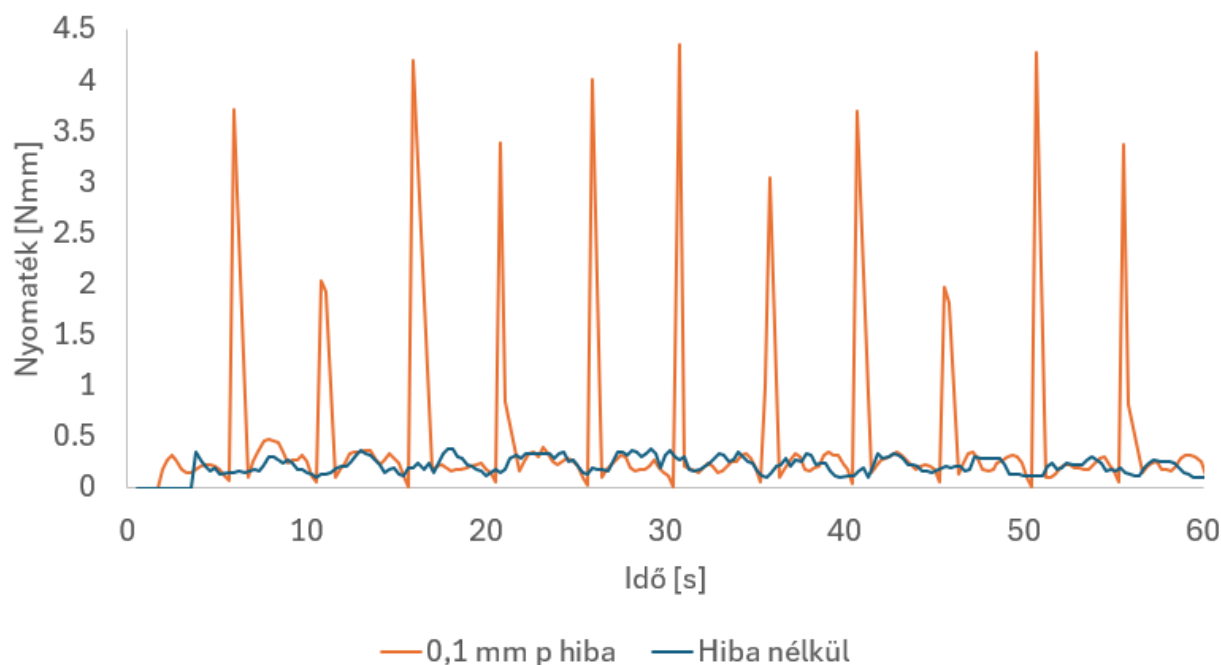
61. ábra: A nyomatéki görbe  $z=30$ , 0,1 mm osztáshiba és II. forgásirány esetén

20. táblázat: Az átfogatási nyomaték referenciaértékektől eltérő értékeinek maximuma, átlaga és minimuma 0,1 mm osztáshiba esetén,  $z=30$  fogszámú fogaskerékpárookra

|                    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------------------|---------------|-------------|---------------|
| Csökkentett osztás | 1,3604        | 1,1121      | 0,7181        |
| Növelt osztás      | 0,0333        | 0,0207      | 0,0022        |



62. ábra: A nyomatéki görbe  $z=50$ , 0,1 mm osztáshiba és I. forgásirány esetén



63. ábra: A nyomatéki görbe  $z=50$ , 0,1 mm osztáshiba és II. forgásirány esetén

A  $z=50$  fogszám és a 0,1 mm-es osztáshiba esetében is ugyanazt tapasztaltam, mint a hasonló fogszámú és kisebb osztáshibás méréseknél. Annyi a különbség ismételten, hogy a hiba növekedésével a referenciaértékektől eltérő értékek különbsége is nagyobb a referenciaértékekhez képest, mint kisebb hiba esetén. Ezeket az értékeket a 21. táblázat foglalja össze. A mérések nyomatékgörbéit a 62. ábra és a 63. ábra mutatja be.

21. táblázat: Az átfogatási nyomaték referenciaértékektől eltérő értékeinek maximuma, átlaga és minimuma 0,1 mm osztáshiba esetén,  $z=50$  fogszámú fogaskerékpárokra

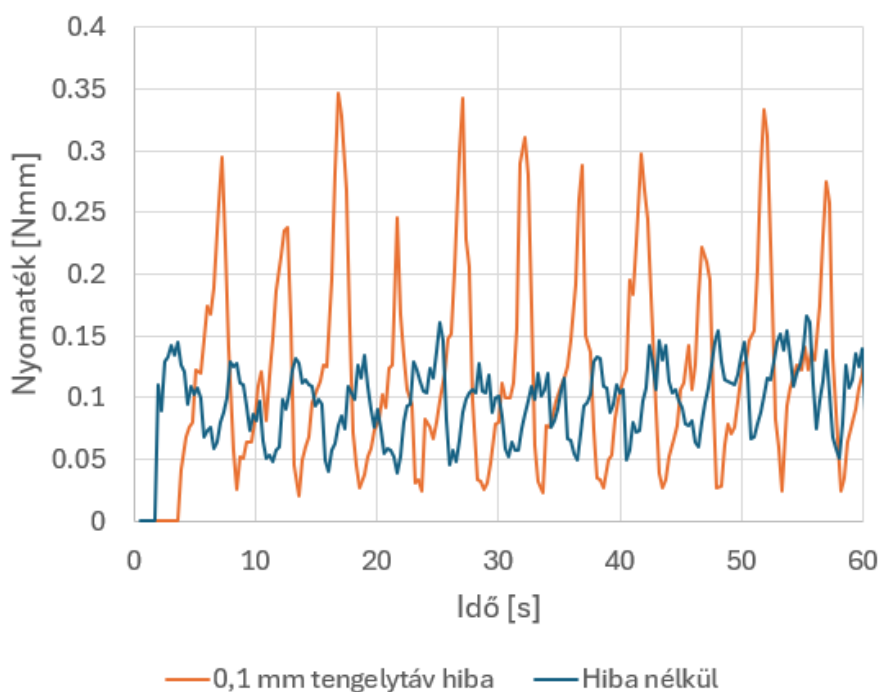
|                    | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|--------------------|---------------|-------------|---------------|
| Csökkentett osztás | 4,9896        | 3,3206      | 1,6824        |
| Növelt osztás      | 0,0736        | 0,0449      | 0,0111        |

A mérési eredmények megmutatták, hogy ez a módszer az osztáshibák vizsgálatára is alkalmas.

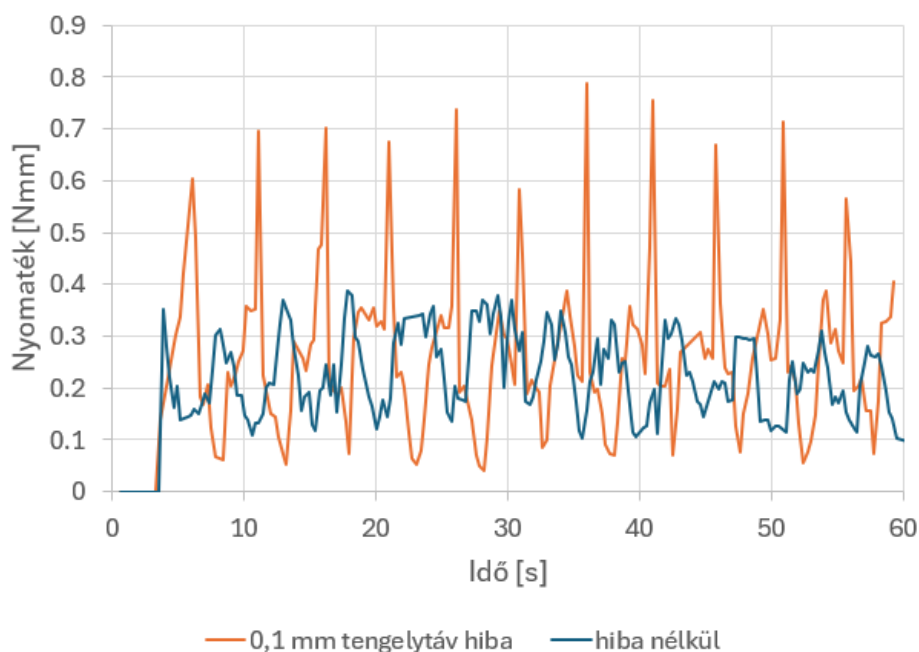
### 3.7. A tengelytáv hibáinak vizsgálata

A tengelytáv hibáinak vizsgálatához olyan fogaskerekeket készítettem, amiknek a tengelye 0,1 illetve 0,2 mm-rel el volt mozgatva a szabványoshoz képest. A módosításokat ebben az esetben is a Solid Edge CAD szoftverrel végeztem el.

A 0,1 mm hibák hatásait az átfogatási nyomaték görbéjén a 64. ábra és a 65. ábra mutatják.



64. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása 0,1 mm hiba és  $z=30$  esetén


 65. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása 0,1 mm hiba és  $z=50$  esetén

A diagrammokon az látszik, hogy a nyomaték folyamatosan növekszik egy ciklikusan megjelenő maximum pontig, majd csökken egy szintén ciklikusan megjelenő minimum pontig. Ez azzal magyarázható, hogy a vizsgálat során a két fogaskerék fogai folyamatosan közelednek és távolodnak egymáshoz képest. Közelítéskor a fogak közötti foghézag lecsökken, így a nyomaték megnő, míg a távolításkor a nyomaték a foghézag növekedése miatt lecsökken. Azokban a pontokban, ahol a tengelytáv a szabványossal megegyező, ott nyomaték értéke a hiba nélküli fogaskerékpároknál mért értéket veszi fel.

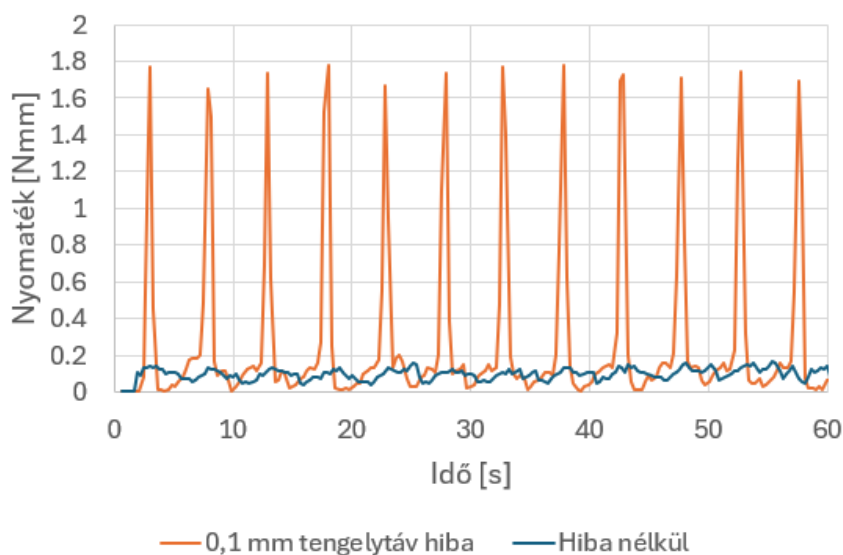
A 22. táblázat a ciklikusan megjelenő maximum és minimumpontok legnagyobb, legkisebb és átlagos értékeit tartalmazza.

22. táblázat: Az átfogatási nyomaték referenciaértékektől eltérő értékeinek maximuma, átlaga és minimuma 0,1 mm tengelytáv hiba esetén

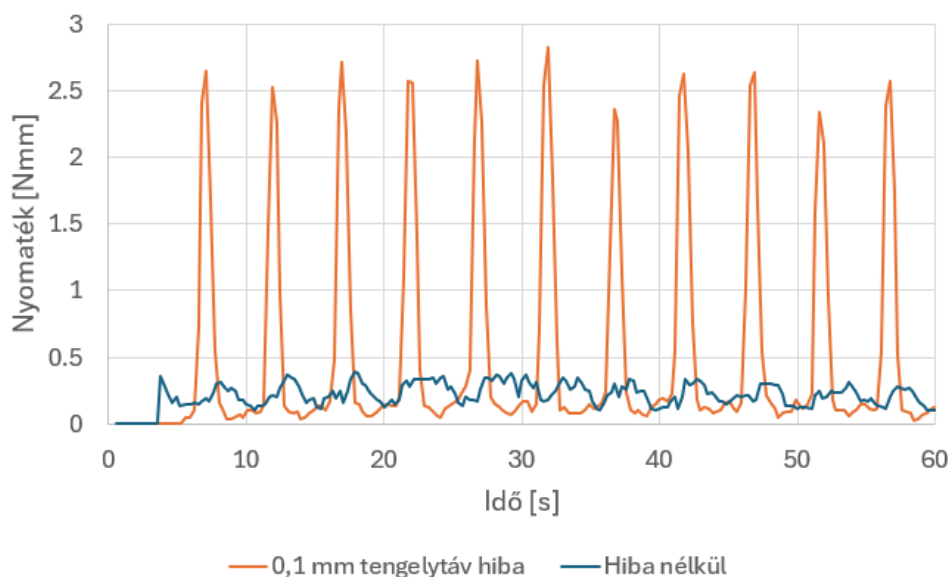
| Fogsám                      | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|-----------------------------|---------------|-------------|---------------|
| $z=30$ , -0,1 mm tengelytáv | 0,031         | 0,026       | 0,021         |
| $z=30$ , +0,1 mm tengelytáv | 0,347         | 0,274       | 0,2           |
| $z=50$ , -0,1 mm tengelytáv | 0,072         | 0,06        | 0,042         |
| $z=50$ , +0,1 mm tengelytáv | 0,798         | 0,652       | 0,506         |



A 66. ábra és a 67. ábra a 0,2 mm tengelytávhiba hatásait mutatja az átforgatási nyomaték görbéjére.



66. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása 0,2 mm hiba és  $z=30$  esetén



67. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása 0,2 mm hiba és  $z=50$  esetén

A diagrammok ugyanazt mutatják, mint 0,1 mm hiba esetén, azzal a különbséggel, hogy mivel a hiba nagysága is nagyobb lett, ezért a ciklikusan megjelenő maximum és minimum értékek is nagyobb mértékben térnek el a hibamentes esethez képest. Ezeknek a maximum és minimum értékeknek a legnagyobb, legkisebb és átlagos értékeit a 23. táblázat tartalmazza.

23. táblázat: Az átfogatási nyomaték referenciaértékektől eltérő értékeinek maximuma, átlaga és minimuma 0,2 mm tengelytáv hiba esetén

| Fogszám                     | Maximum [Nmm] | Átlag [Nmm] | Minimum [Nmm] |
|-----------------------------|---------------|-------------|---------------|
| z=30, -0,2 mm<br>tengelytáv | 0,02          | 0,011       | 0,002         |
| z=30, +0,2 mm<br>tengelytáv | 1,879         | 1,753       | 1,652         |
| z=50, -0,2 mm<br>tengelytáv | 0,049         | 0,034       | 0,023         |
| z=50, +0,2 mm<br>tengelytáv | 2,823         | 2,56        | 2,311         |

Mindent összevetve elmondható, hogy az átfogatási nyomaték mérésnek módszerével a tengelytáv hibái is kimutathatóak.

#### 4. A HIBÁK HATÁSA A FOGAKON ÉBREDŐ FESZÜLTSÉGEKRE

A 3. fejezetben tárgyalt hibák nem csak az átforgatási nyomatéokra lehetnek hatással, hanem kihathatnak a kapcsolódáskor a fogakon ébredő feszültségekre is. Ebben a fejezetben a felületi- és a fogtőfeszültségekre gyakorolt hatásokat vizsgáltam végelelemes módszer segítségével.

##### 4.1. A végelelemes modell felépítése

A végelelemes analízishez az Ansys nevű szoftvert használtam. A szoftverben felépített modell két fogaskerékből állt pontosan abban a pillanatban, amikor egy-egy foguk kapcsolódott. Mindkét fogaskerék modulja 0,5 mm, fogszélessége 2,5 mm, fogszáma pedig 30 volt. A fogaskerékek anyaga az Ansys anyagadatbázisába beépített PA6 típusú poliamid volt, melyet gyakran használnak műanyag fogaskerékek alapanyagaként. A választott anyag anyagparamétereit a 24. táblázat tartalmazza. A vizsgálatokat háromféle terhelés esetére végeztem el, ezek 1 N, 0,75 N és 0,5 N voltak.

24. táblázat: A PA6 anyagjellemzői

| Anyagparaméter megnevezése (jele) | Értéke   |
|-----------------------------------|----------|
| Rugalmassági modulus (E)          | 1111 Mpa |
| Poisson-tényező (ν)               | 0,3499   |

##### 4.2. A feszültségek számítása műanyag fogaskerékek esetén

Ahhoz, hogy a szimulációval kapott eredményeket validálhassam, össze kellett hasonlítanom a szakirodalomban szereplő feszültség számító képletekkel. A feszültségek számítását a VDI 2736 irányelv alapján végeztem el. A fogtőfeszültség és a felületi Hertz-feszültség számítását a VDI 2545 és egyes alapanyaggyártók is a VDI 2736 irányelvhez hasonló képletet alkalmazva mutatják be [7] [8] [48] [49].

###### 4.2.1. A fogtőfeszültség

A fogtőfeszültséget a (3) egyenlettel számoltam ki [49].

$$\sigma_f = \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot Y_\beta \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{\varepsilon\alpha} \cdot Y_{Sa} \cdot K_F \quad (3)$$

A (3) egyenletben szereplő praméterek [49]:

- $F_t$  a tangenciális erő a fogon,
- $b$  a fogszélesség,
- $m$  a modul,
- $Y_\beta$  a fogferdeségi tényező, a (4) egyenletből számítható ki,
- $Y_{Fa}$  a az alaktényező, a VDI 2736 irányelv diagrammjából állítható meg,
- $Y_{\epsilon\alpha}$  a kapcsolószám tényező, az (5) egyenletből számítható ki,
- $Y_{Sa}$  a a feszültségkorrekciós tényező, a VDI 2736 irányelv diagrammjából állítható meg,
- $K_F$  a fogtő terhelési tényező.

A fogferdeségi tényező a (4) egyenletből számítható ki a  $\beta$  fogferdeségi szög és az  $\epsilon_\beta$  átfedési kapcsolószám felhasználásával. [49]

$$Y_\beta = 1 - \frac{\epsilon_\beta \cdot \beta}{120^\circ} \quad (4)$$

A kapcsolószám tényező az (5) egyenletből számítható ki az  $\epsilon_\alpha$  kapcsolószám segítségével. [49]

$$Y_{\epsilon\alpha} = 0,25 + \frac{0,75}{\epsilon_\alpha} \quad (5)$$

A számított fogtőfeszültség értékeket a 25. táblázat tartalmazza.

25. táblázat: A VDI 2736 képletével számított fogtőfeszültségek

| Terhelés [N] | Fogtőfeszültség [MPa] |
|--------------|-----------------------|
| 1 N          | 2,48738               |
| 0,75 N       | 1,86554               |
| 0,5 N        | 1,24369               |

#### 4.2.2. A felületi feszültség

A felületi Hertz feszültséget a (6) egyenlettel számoltam ki. [49]

$$\sigma_{HC} = Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\beta \cdot Z_{\varepsilon\alpha} \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot K_H}{b \cdot d_1} \cdot \frac{u+1}{u}} \quad (6)$$

A (6) egyenletben szereplő paraméterek [49]:

- $F_t$  a fogra ható tangenciális erő,
- $b$  a fogszélesség,
- $d_1$  a hajtó oldali fogaskerék osztókörmérője,
- $u$  a fogszámviszony,  $u=z_2/z_1$ , ebben az esetben  $u=1$ ,
- $K_H$  a fogfelületi terhelési tényező,
- $Z_E$  a rugalmassági tényező, számítása a (7) képlet alapján történik,
- $Z_H$  a felületi forma tényező, a DIN 3990-ben szereplő diagramból állapítható meg,
- $Z_{\varepsilon\alpha}$  a kapcsolószám tényező, a (8) képlet alapján számítható ki,
- $Z_\beta$  a fogferdeségi tényező, egyenes fogú fogaskerék esetén  $Z_\beta=1$ .

A rugalmassági tényező számításához az  $E$  rugalmassági modulus-t és a  $\nu$  Poisson-tényezőt használjuk fel, számítása a (7) képlet alapján történik. [49]

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (7)$$

A kapcsolószám tényezőt a (8) egyenlet felhasználásával történik, az egyenletben az  $\varepsilon_\alpha$  kapcsolószám és az  $\varepsilon_\beta$  átfedési kapcsolószám jelenik meg. [49]

$$Z_{\varepsilon\alpha} = \sqrt{\left( \frac{4-\varepsilon_\alpha}{3} \cdot (1-\varepsilon_\beta) + \frac{\varepsilon_\beta}{\varepsilon_\alpha} \right)} \quad (8)$$

A kapott Hertz feszültségeket a 26. táblázat tartalmazza.

26. táblázat: A VDI 2736 képletével számított felületi feszültségek

| Terhelés [N] | Felületi feszültség [MPa] |
|--------------|---------------------------|
| 1 N          | 7,24712                   |
| 0,75 N       | 6,27618                   |
| 0,5 N        | 5,12448                   |

### 4.3. A végelelemes modell validása

A modell felállításának egyik legfontosabb része a végelelemes háló elemméretének meghatározása volt. Ennek érdekében hiba nélküli fogaskerékpárok esetére is elvégeztem szimulációkat. A validáláshoz a szimuláció eredményeit a 25. táblázat és a 26. táblázat értékeivel hasonlítottam össze.

A validáláshoz durvább hálóméretekkkel indultam el és addig finomítottam az elemek nagyságát, amíg megfelelő pontossággal nem kaptam meg a képletekből kapott értékeket. Egy elemméretet csak akkor fogadtam el, ha mindhárom terhelés esetén kisebb az eltérés, mint 0,1 %.

Az egyes elemméretekhez tartozó feszültségértékeket a 27. táblázat és a 28. táblázat tartalmazza, a képletekből kapott eredményektől való százalékos eltérés alakulását az elemméret függvényében pedig a 68. ábra és a 69. ábra mutatják.

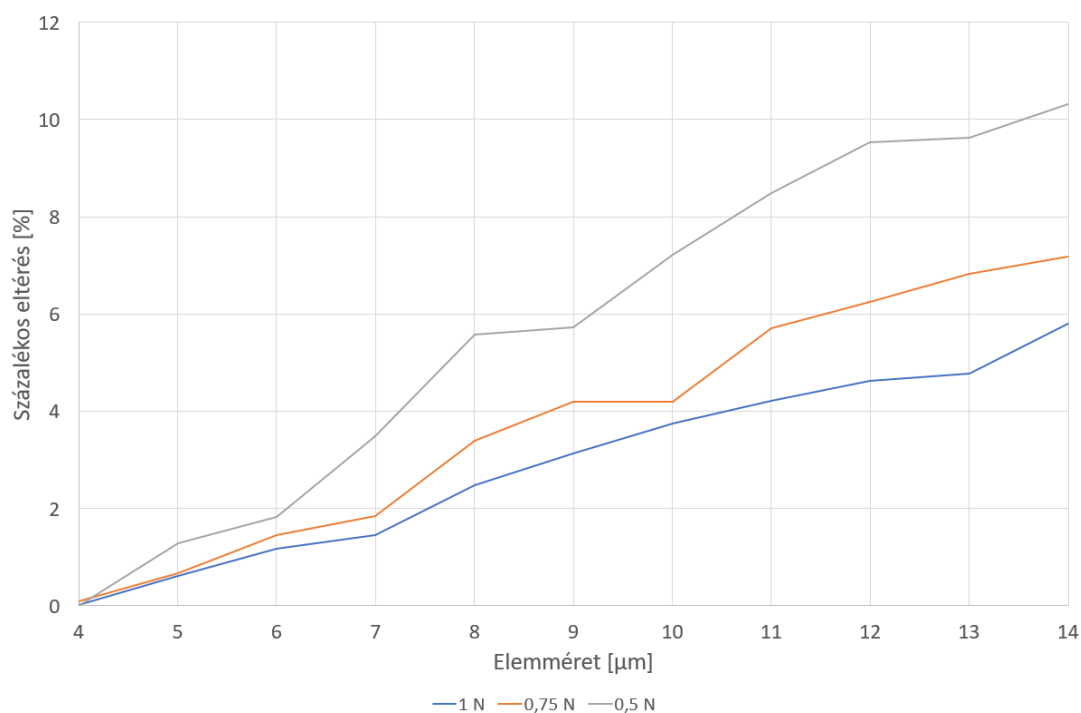
27. táblázat: A felületi feszültségek változása az elemmérettel összefüggésben

| Elem mérete [μm] | Feszültség 1 N esetén [MPa] | Százalékos eltérés 1 N esetén[%] | Feszültség 0,75 N esetén [MPa] | Százalékos eltérés 0,75 N esetén[%] | Feszültség 0,5 N esetén [MPa] | Százalékos eltérés 0,5 N esetén[%] |
|------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 4                | 7,2482                      | 0,01                             | 6,2705                         | 0,09                                | 5,1247                        | 0,004                              |
| 5                | 7,2022                      | 0,62                             | 6,2338                         | 0,68                                | 5,0588                        | 1,28                               |
| 6                | 7,1619                      | 1,18                             | 6,1844                         | 1,46                                | 5,0306                        | 1,83                               |
| 7                | 7,1414                      | 1,46                             | 6,1607                         | 1,84                                | 4,95                          | 3,49                               |
| 8                | 7,0674                      | 2,48                             | 6,0627                         | 3,4                                 | 4,8386                        | 5,58                               |
| 9                | 7,0203                      | 3,13                             | 6,0138                         | 4,19                                | 4,8313                        | 5,72                               |
| 10               | 6,9752                      | 3,75                             | 6,0127                         | 4,2                                 | 4,7552                        | 7,21                               |
| 11               | 6,9422                      | 4,21                             | 5,9177                         | 5,71                                | 4,6897                        | 8,48                               |
| 12               | 6,9003                      | 4,63                             | 5,8884                         | 6,24                                | 4,6361                        | 9,53                               |
| 13               | 6,9116                      | 4,78                             | 5,8475                         | 6,83                                | 4,6315                        | 9,62                               |
| 14               | 6,8263                      | 5,81                             | 5,8256                         | 7,18                                | 4,5955                        | 10,32                              |

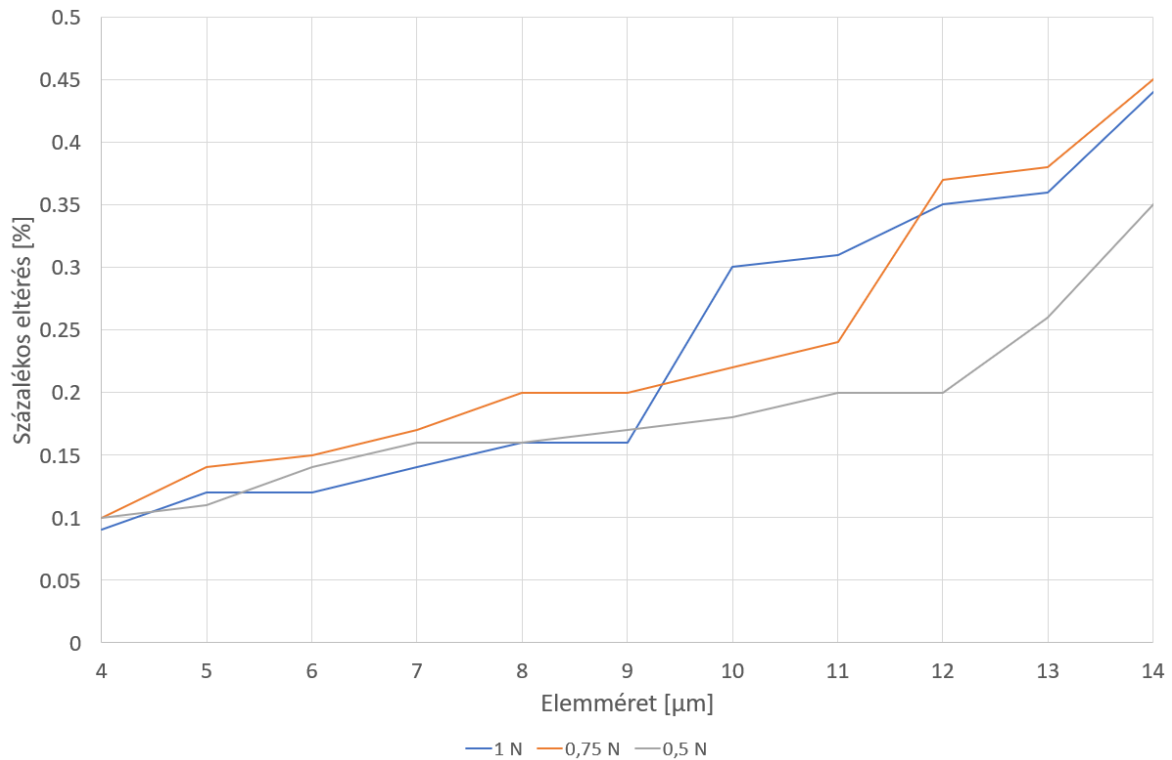


28. táblázat: A fogtőfeszültségek változása az elemmérettel összefüggésben

| Elem mérete [μm] | Feszültség 1 N esetén [MPa] | Százalékos eltérés 1 N esetén[%] | Feszültség 0,75 N esetén [MPa] | Százalékos eltérés 0,75 N esetén[%] | Feszültség 0,5 N esetén [MPa] | Százalékos eltérés 0,5 N esetén[%] |
|------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 4                | 2,4851                      | 0,09                             | 1,8635                         | 0,1                                 | 1,2424                        | 0,1                                |
| 5                | 2,4845                      | 0,12                             | 1,8629                         | 0,14                                | 1,2423                        | 0,11                               |
| 6                | 2,4843                      | 0,12                             | 1,8628                         | 0,15                                | 1,242                         | 0,14                               |
| 7                | 2,4838                      | 0,14                             | 1,8623                         | 0,17                                | 1,2417                        | 0,16                               |
| 8                | 2,4834                      | 0,16                             | 1,8619                         | 0,2                                 | 1,2417                        | 0,16                               |
| 9                | 2,4833                      | 0,16                             | 1,8619                         | 0,2                                 | 1,2416                        | 0,17                               |
| 10               | 2,4799                      | 0,3                              | 1,8614                         | 0,22                                | 1,2415                        | 0,18                               |
| 11               | 2,4797                      | 0,31                             | 1,861                          | 0,24                                | 1,2412                        | 0,2                                |
| 12               | 2,4786                      | 0,35                             | 1,8586                         | 0,37                                | 1,2412                        | 0,2                                |
| 13               | 2,4785                      | 0,36                             | 1,8584                         | 0,38                                | 1,2404                        | 0,26                               |
| 14               | 2,4764                      | 0,44                             | 1,8572                         | 0,45                                | 1,2393                        | 0,35                               |



68. ábra: A felületi feszültség százalékos eltérése az elemmérettel összefüggésben

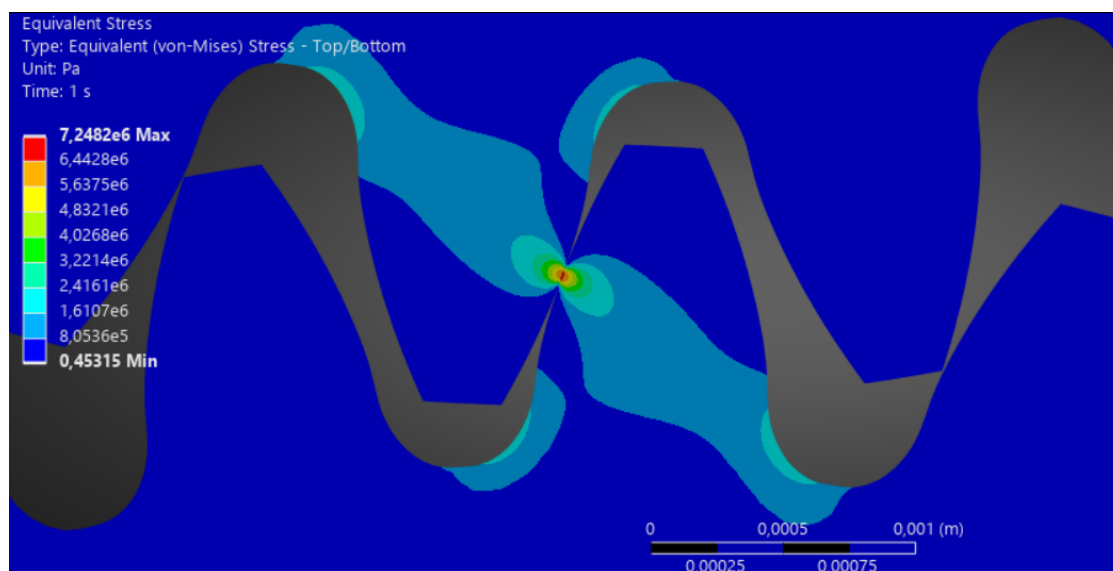


69. ábra: A fogtőfeszültség százalékos eltérésének változása az elemmérettel összefüggésben

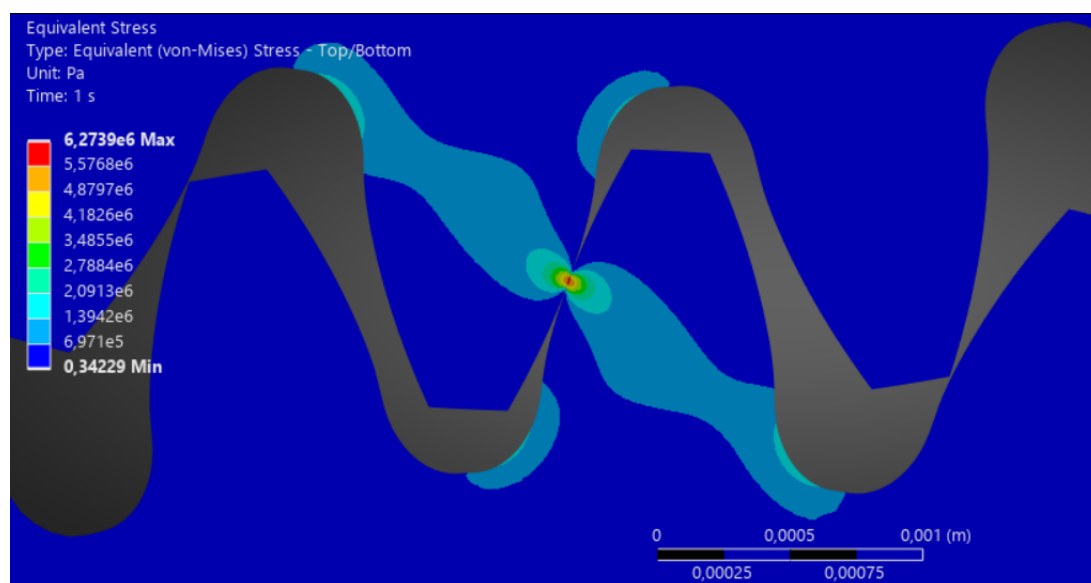
Mint azt a 27. táblázat és a 28. táblázat mutatja, a 4 μm nagyságú háló felel meg a feltételeknek. Az ehhez tartozó hálót a 70. ábra mutatja. Az ezzel a hálóval kapott eredményeket pedig a 71. ábra, 72. ábra és a 73. ábra. A továbbiakban az egyes hibák által generált feszültségeket ezekkel az értékekkel hasonlítottam össze.



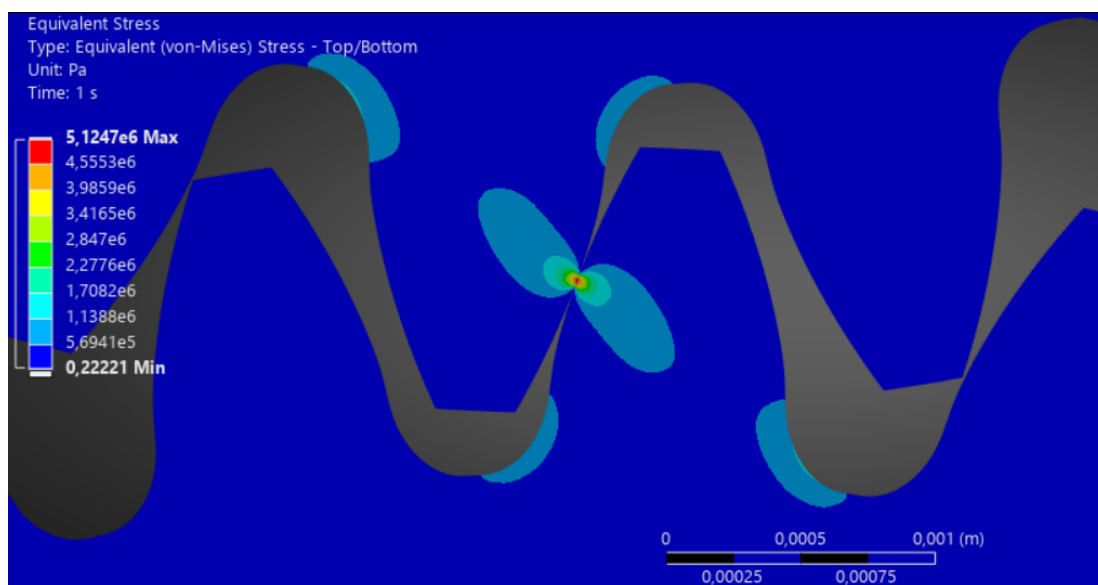
70. ábra: A szimulációkhoz használt 4 μm-es háló



71. ábra: A hiba nélküli fogaskerékpár feszültségei 1 N esetén



72. ábra: A hiba nélküli fogaskerékpár feszültségei 0,75 N esetén

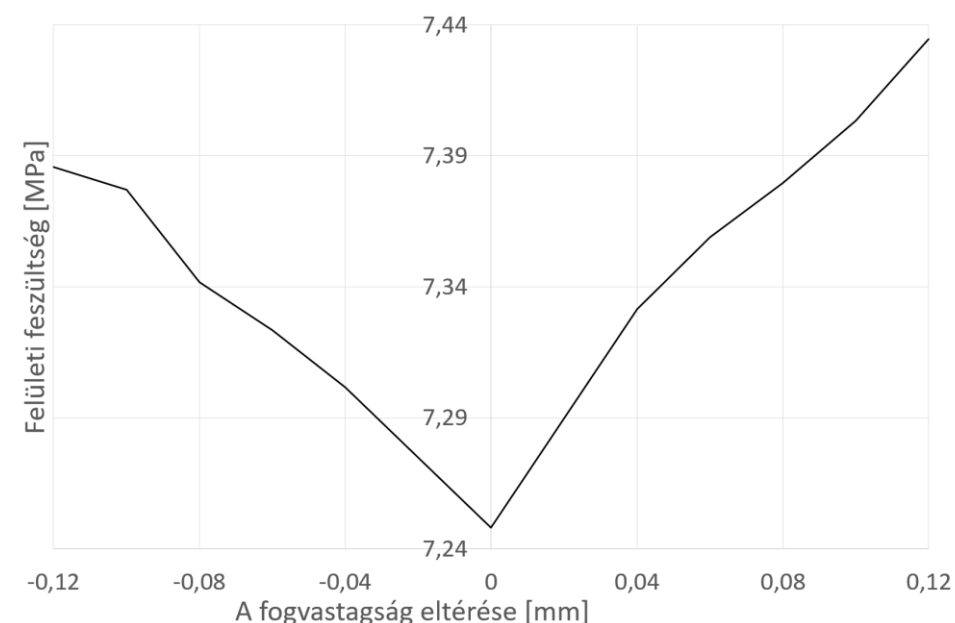


73. ábra: A hiba nélküli fogaskerékpár feszültségei 0,5 N esetén

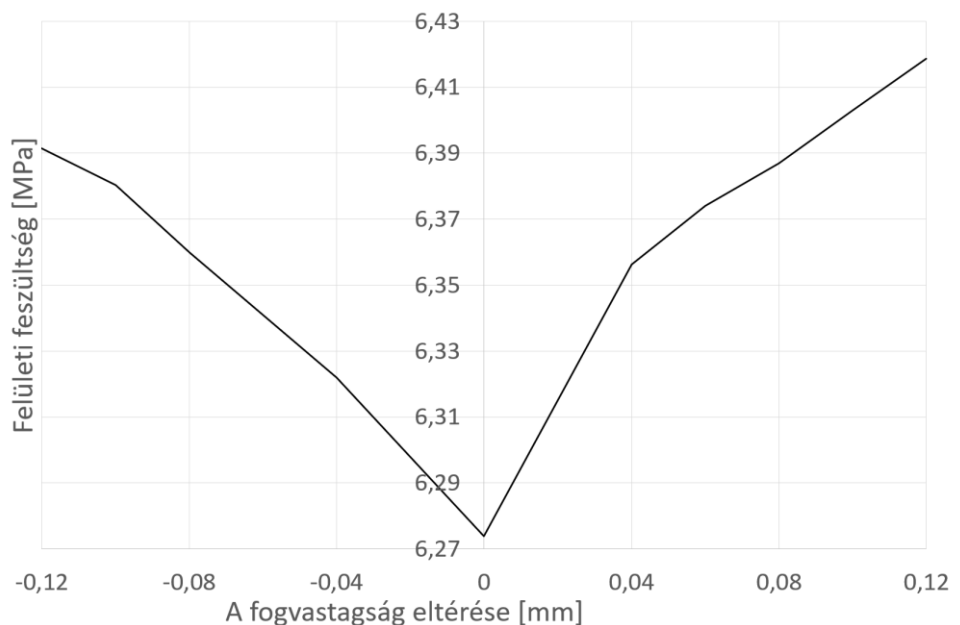
#### 4.4. A fogvastagsághibák hatásai

A méreteltérések hatásának szemléltetésére fogvastagsághibákat használtam. Ehhez olyan eseteket vizsgáltam, amikor a két érintkező fogaskerék egyikének fogvastagsága kisebb vagy nagyobb volt a szabványosnál.

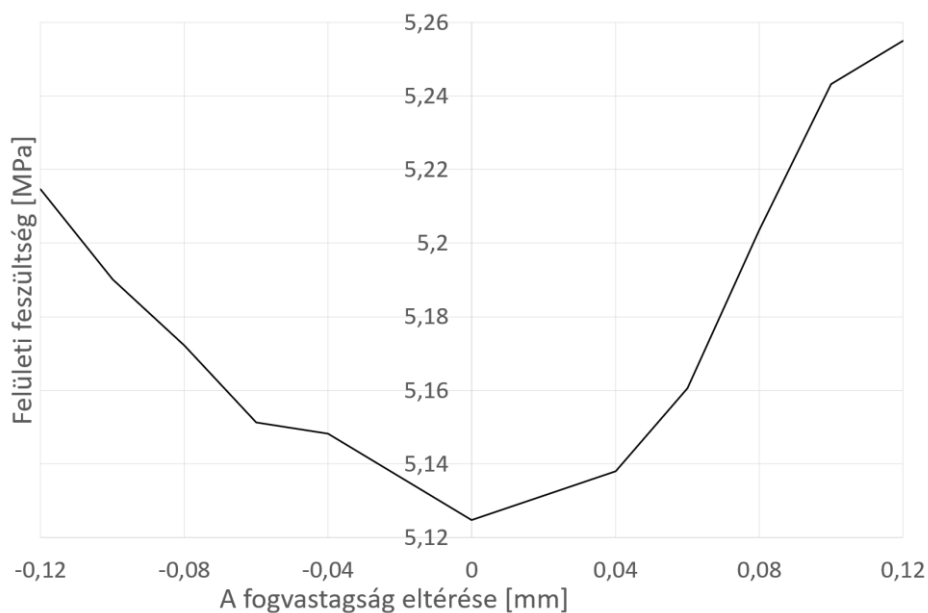
A fogvastagsághibák hatását az felületi feszültségre 74. ábra, a 75. ábra és a 76. ábra mutatja. Az ábrák azt mutatják, hogy minél jobban eltér a fogvastagság értéke a szabványostól, akár negatív, akár pozitív az eltérés, annál jobban nő a felületi feszültség a kiindulási értékhez képest.



74. ábra: A fogvastagsághibák hatása a felületi feszültségre 1 N esetén

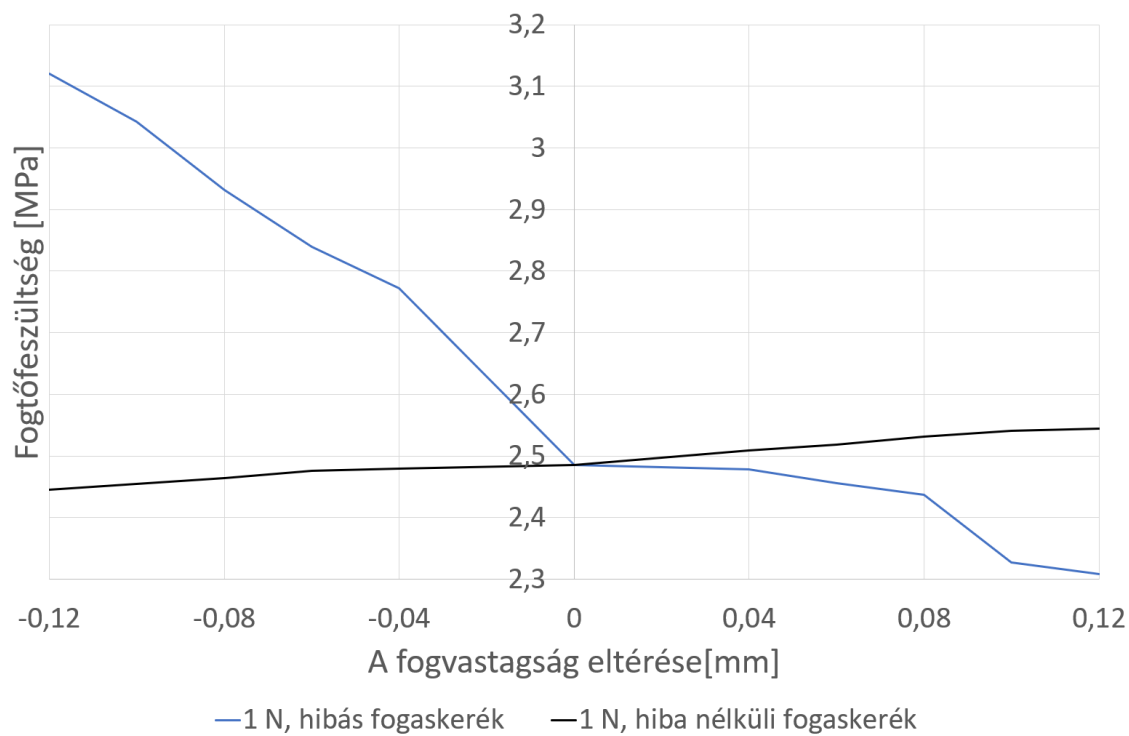


75. ábra: A fogvastagsághibák hatása a felületi feszültségre 0,75 N esetén

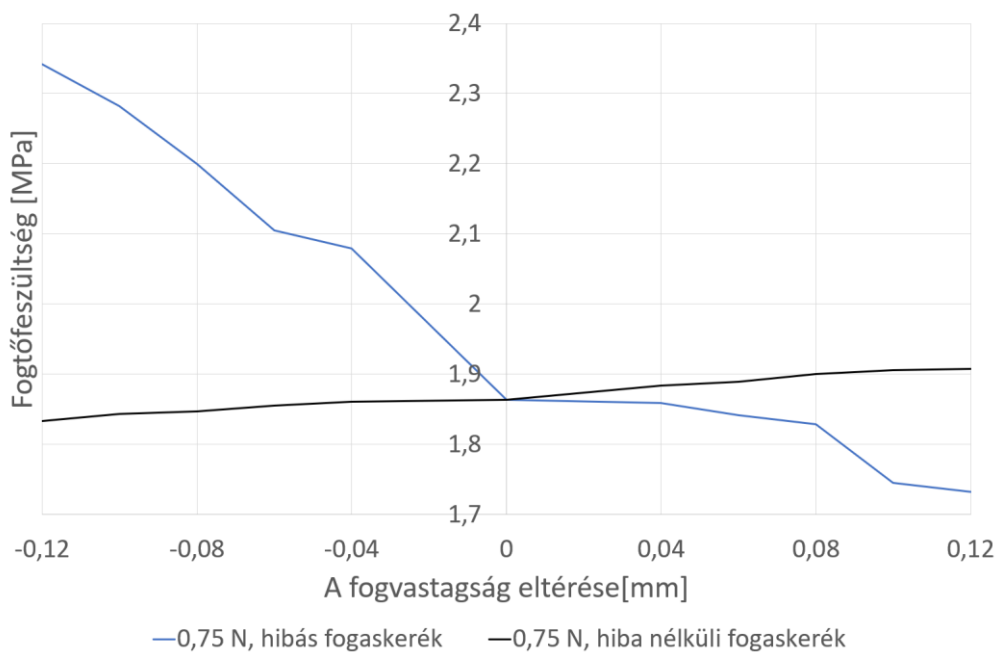


76. ábra: A fogvastagsághibák hatása a felületi feszültségre 0,5 N esetén

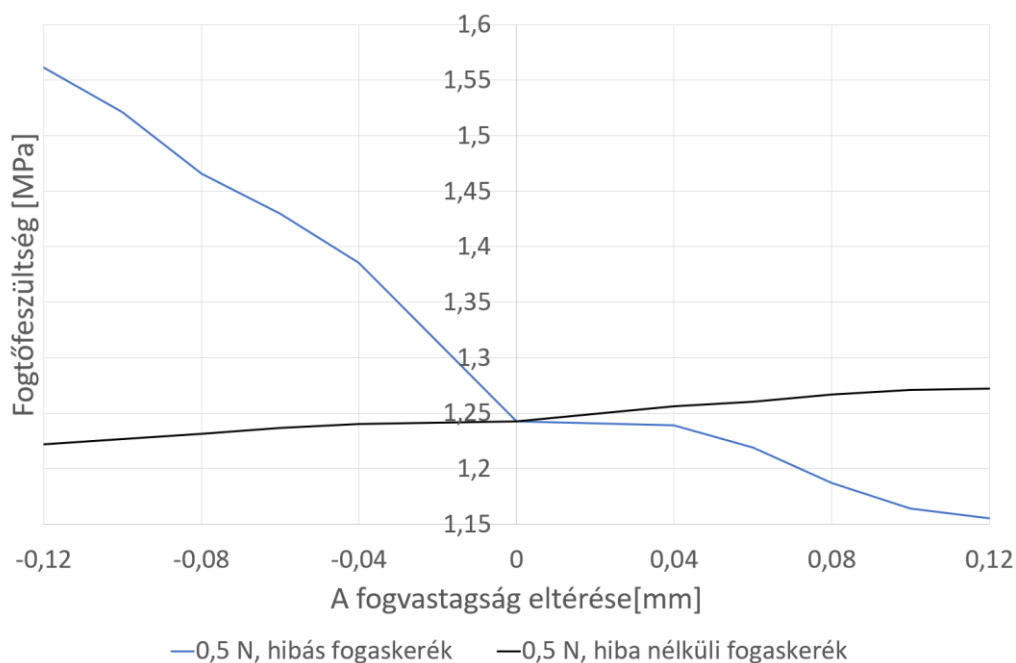
A fogvastagsághibák hatását a fogtőfeszültségre a 77. ábra, a 78. ábra és a 79. ábra mutatja. A fogtőfeszültségek esetén látható, hogy minél kisebb a hibás fog vastagsága, annál nagyobb lesz rajta a fogtőfeszültség, de minél nagyobb lesz a fog vastagsága, annál kisebb lesz a fogtőfeszültség a hibás fogon. Ezzel szemben minél vastagabb a hibátlan foghoz kapcsolódó fog, annál nagyobb a fogtőfeszültség a hiba nélküli fogaskeréken. Ha a hibátlan fog egy kisebb vastagságú foggal érintkezik, akkor a fogtőfeszültség is csökken a fogán.



77. ábra: A fogvastagsághibák hatása a fogtőfeszülésre 1 N esetén



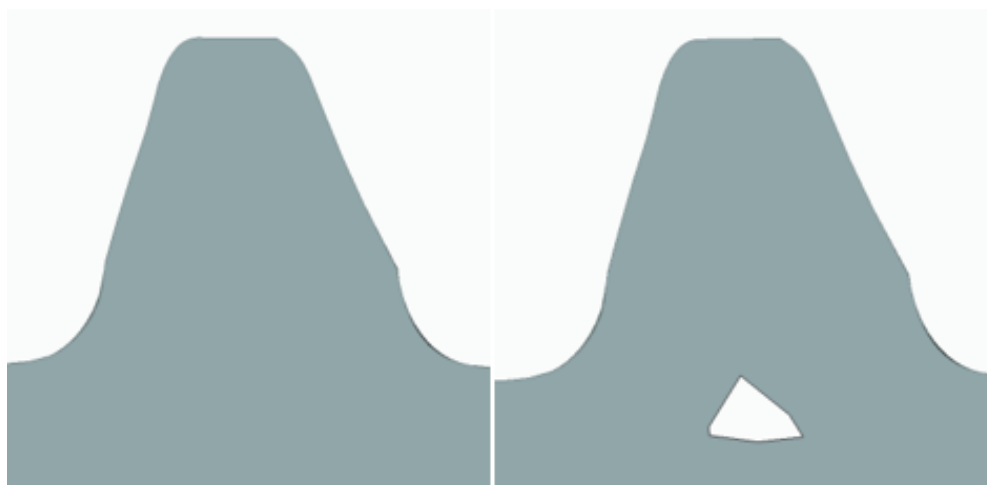
78. ábra: A fogvastagsághibák hatása a fogtőfeszülésre 0,75 N esetén



79. ábra: A fogvastagsághibák hatása a fogtőfeszültségre 0,5 N esetén

#### 4.5. A fog alakhibáinak hatása

Az alakhibáknál az FDM technológiával gyártott fogaskerek esetét vizsgáltam. Ez azért kiemelkedően fontos, mert az ilyen fogaskerekknél nem csak külső, hanem belső alakhibák is jellemzőek, ezek üregek a fogak belsejében. A 9. ábra mutatta ennek a mikroszkópi képét Raise3D Pro3 Plus nyomtató és FDM alapanyag esetén, illetve 13. ábra Ultimaker S5 nyomtató és TPLA anyag esetén. Ezért CAD szoftver segítségével újraalkottam a PLA-ból készült fogaskerék fogait. Ezekkel két esetet vizsgáltam. Az elsőnél csak a profilt alkottam újra, a fogaknál megjelenő üregeket nem. A másikonál a profil mellett az üregeket is létrehoztam. Mindkét esetben mindkét érintkező fogaskerék ugyanazt a hibát tartalmazta. A CAD szoftverben létrehozott fogakat a 80. ábra mutatja. A kapott feszültségeket a 29. táblázat tartalmazza.



80. ábra: A CAD szoftverrel létrehozott fogak (balra: üreg nélkül, jobbra: üreggel)



29. táblázat: Az alakhibák hatása a feszültségekre

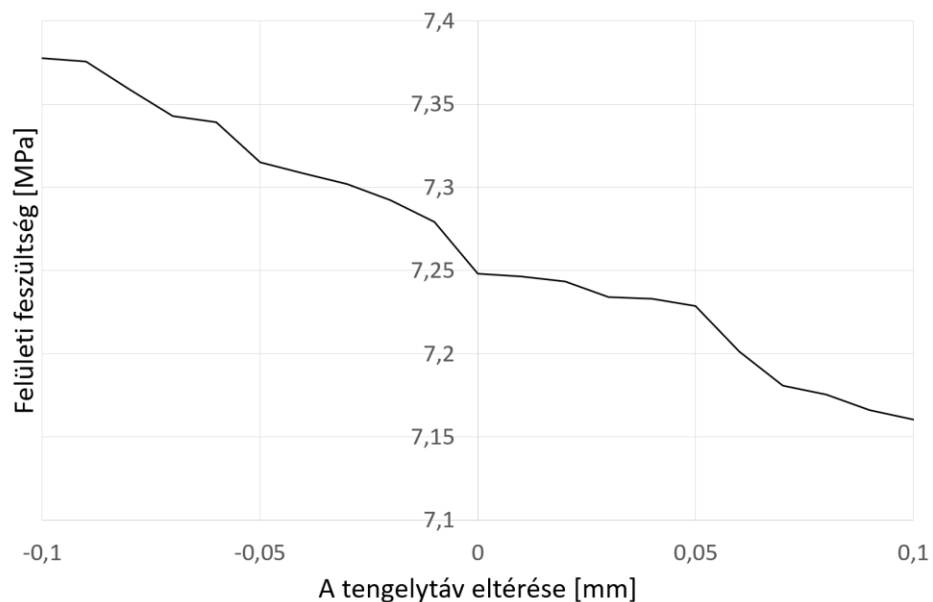
|                                         | Hiba nélküli [MPa] | Hibás, üreg nélkül [MPa] | Hibás, üreggel [MPa] |
|-----------------------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|
| Felületi feszültség, 1 N terhelésnél    | 7,2482             | 13,663                   | 13,664               |
| Fogtőfeszültség, 1 N terhelésnél        | 2,4851             | 3,0512                   | 3,0815               |
| Felületi feszültség, 0,75 N terhelésnél | 6,2739             | 11,756                   | 11,761               |
| Fogtőfeszültség, 0,75 N terhelésnél     | 1,8633             | 2,2882                   | 2,3111               |
| Felületi feszültség, 0,5 N terhelésnél  | 5,1247             | 9,4141                   | 9,438                |
| Fogtőfeszültség, 0,5 N terhelésnél      | 1,2424             | 1,5233                   | 1,5385               |

Az eredményekből az látszik, hogy már az üreg nélküli esetben is jelentősen megnőtt a feszültség a hiba nélküli esethez képest. Azonban a második esetben, mikor az üregek is elhelyezésre kerültek a geometrián, a feszültségértékek kis mértékben még tovább nőttek.

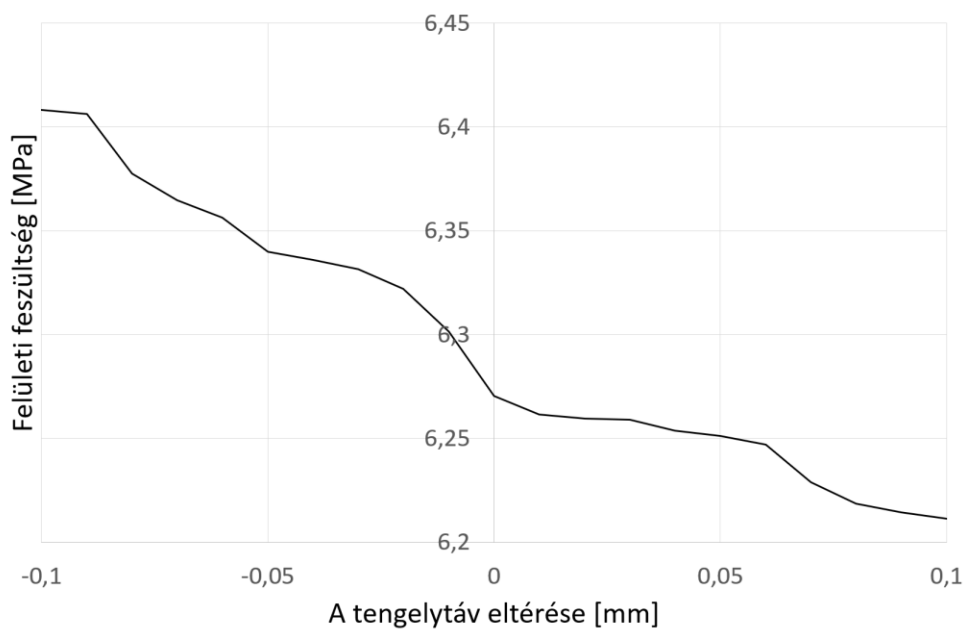
#### 4.6. A tengelytáv hibáinak hatásai

A helyzethibák közül a fogaskerekek tengelytávjának hibáját választottam. Ezekben a vizsgálatokban a fogaskerek közötti tengelytávot úgy változtattam, hogy a két fogaskerék a szabványos tengelytávhoz képest közelebb vagy távolabb került egymástól. A fogaskerekeket geometriáját ezekhez a vizsgálatokhoz nem változtattam meg.

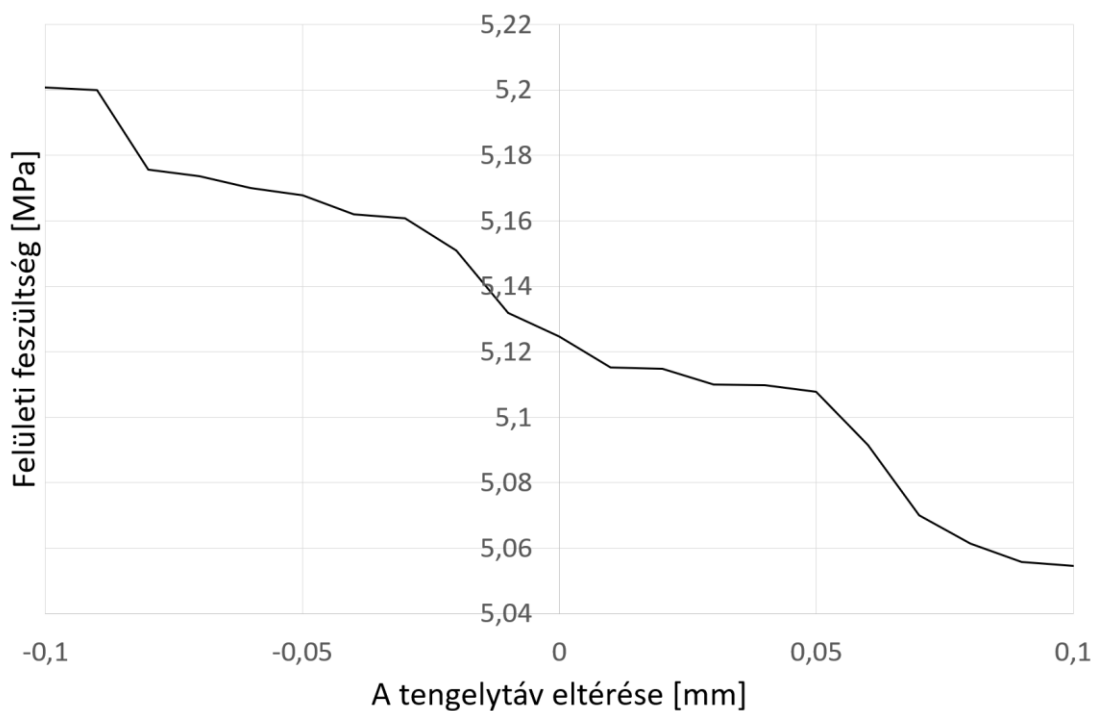
A tengelytáv változásának hatását a felületi feszültségre a 81. ábra, a 82. ábra és a 83. ábra mutatja. Az ábrák azt mutatják, hogy a tengelytáv csökkenésével nő a felületi feszültség, és a tengelytáv növekedésével pedig csökken az érintkezési felületen ébredő feszültség.



81. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a felületi feszültségre 1 N esetén

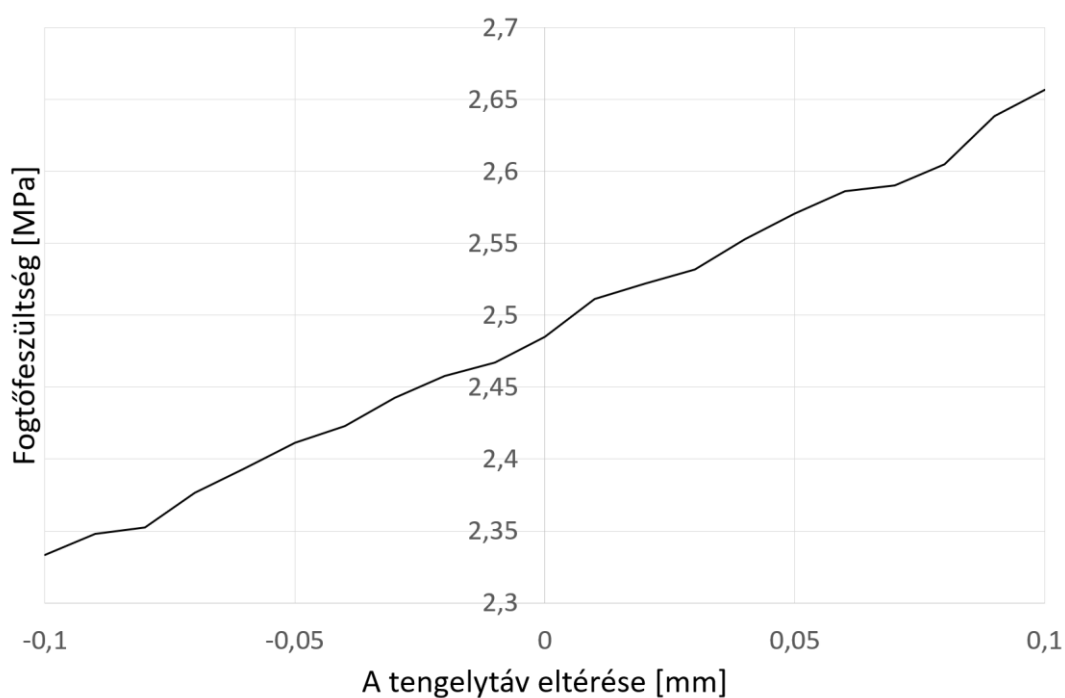


82. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a felületi feszültségre 0,75 N esetén

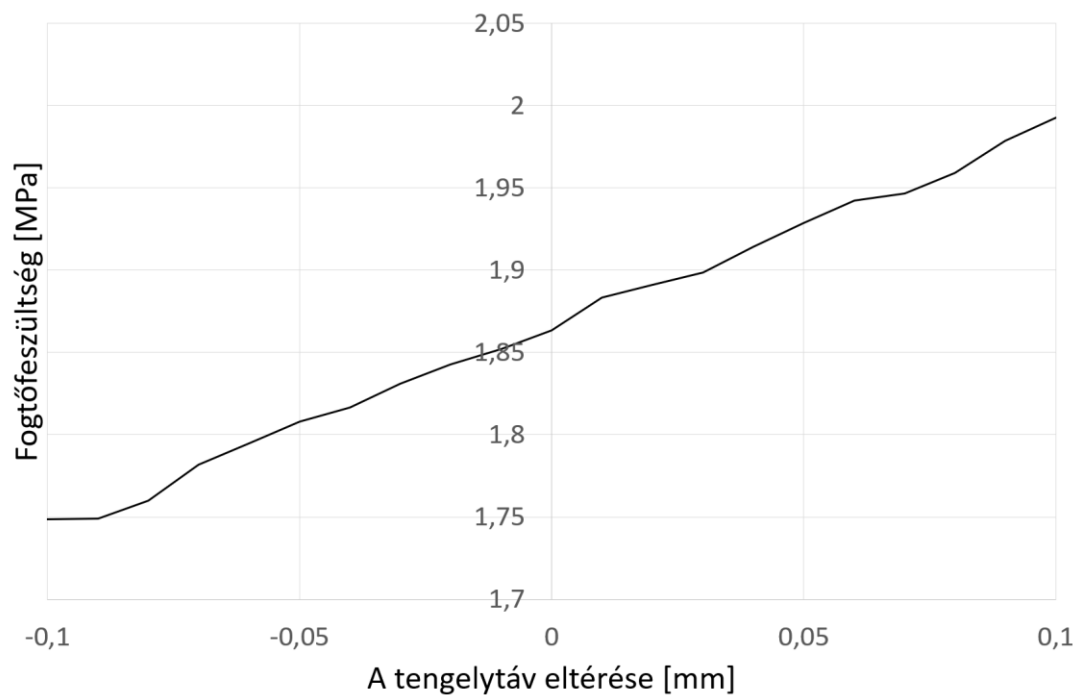


83. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a felületi feszültségre 0,5 N esetén

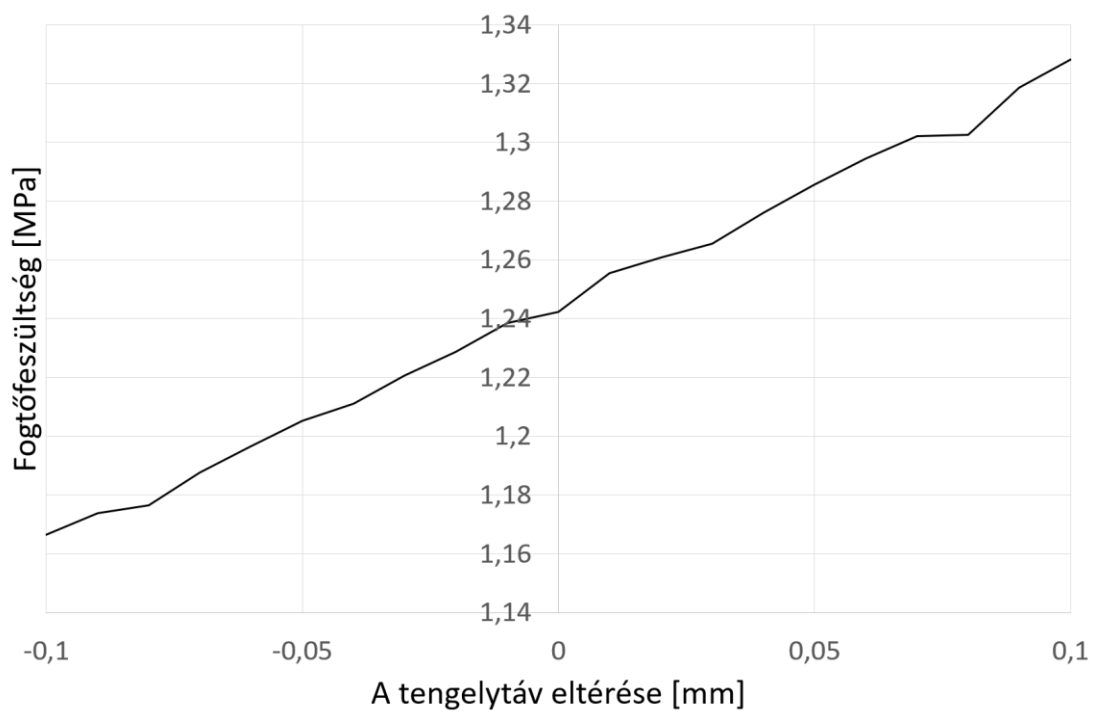
A tengelytáv hibáinak hatását a fogtőfeszültségre a 84. ábra, a 85. ábra és a 86. ábra mutatja. Amint az ábrákon látható, a fogtőfeszültségnél az ellentétes folyamat játszódik le, mint a felületi feszültségnél. Ahogy nő a tengelytávolság, úgy nő a távolság a fogtő és fogra ható tangenciális erő között, és így nő a fogtőfeszültség is. És ahogy a tengelytáv csökken, úgy csökken a fogtőfeszültség is.



84. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a fogtőfeszültségre 1 N esetén



85. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a fogtőfeszültségre 0,75 N esetén



86. ábra: A tengelytáv hibáinak hatása a fogtőfeszültségre 0,5 N esetén

## 5. A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREK MELEGEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

### 5.1. A műanyag fogaskerek melegedésének meghatározására szolgáló képletek bemutatása

A műanyag fogaskerek melegedésének meghatározására műanyag fogaskerek tervezését segítő szabványok és irányelvek vagy számításos módszert, vagy kísérletek és számítások kombinációját használják.

Európában a műanyag fogaskerek tervezésének alapjául sokáig a VDI 2545 irányelv szolgált. Ez az irányelv 1981-ben jelent meg, és 1996-ban vonták vissza. Mivel a visszavonása után nem állt rendelkezésre más hasonló irányelv, a gyakorlatban egészen a VDI 2736 irányelv 2016-os megjelenéséig általában ezt használták, a mai napig fontosnak számít.

A VDI 2545 irányelv szerint a műanyag fogaskerek melegedését a (9) egyenlettel lehet kiszámítani [21] [48].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + 136 \cdot P \cdot \mu \cdot \frac{1+u}{z_2+5} \cdot \left( \frac{17100}{b \cdot z_{1,2}} \cdot \frac{k_2}{(v \cdot m)^\kappa} + 6,3 \cdot \frac{k_3}{A} \right) \quad (9)$$

A (9) képletben szereplő mennyiségek [21] [48]:

- $\vartheta_k$  a környezet hőmérséklete [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $P$  a hajtás teljesítménye [kW],
- $\mu$  a súrlódási tényező,
- $u$  a fogsámviszony,
- $z$  a fogsámok,
- $b$  a fogszélesség [mm],
- $v$  a fogaskerék gördülőkörü sebessége [m/s]
- $m$  a modul [mm],
- $A$  a hajtómű belső felülete [ $\text{m}^2$ ]
- $k_2$  az anyagtényező, értékét a VDI 2545-ben szereplő táblázat alapján lehet megállapítani,
- $k_3$  a hajtómű tényező [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ] , értékét a VDI 2545-ben szereplő táblázat alapján lehet megállapítani,

- $\kappa$  a párosított fogaskerek anyagainak veszi figyelembe, értékét a VDI 2545-ben szereplő táblázat alapján lehet megállapítani.

Mivel évekig nem állt rendelkezésre általánosan elfogadott módszer a melegedés számításához, több alapanyaggyártó is kidolgozott olyan segédanyagokat, amelyek jól alkalmazhatóak adott határokon belül. Ezek közül a Licharz cég módszere a VDI 2545 egy tapasztalati adatok alapján módosított változata. Ezt a (10) egyenlet mutatja be. [7]

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + 136 \cdot P \cdot \mu \cdot f \cdot \frac{1+i}{z_{1,2} + 5 \cdot i} \cdot \left( \frac{17100}{b \cdot z_{1,2}} \cdot \frac{k_2}{(v \cdot m)^{\frac{3}{4}}} + 7,33 \cdot \frac{k_3}{A} \right) \quad (10)$$

A (10) képletben szereplő mennyiségek [7]:

- $\vartheta_k$  a környezet hőmérséklete [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $P$  a hajtás teljesítménye [kW],
- $\mu$  a súrlódási tényező,
- $u$  a fogsávviszony,
- $z$  a fogszámok,
- $b$  a fogszélesség [mm],
- $i$  az áttétel,
- $v$  a fogaskerék gördülőköri sebessége [m/s]
- $m$  a modul [mm],
- $A$  a hajtómű belső felülete [ $\text{m}^2$ ]
- $k_2$  anyagtényező, értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- $k_3$  a hajtómű tényező [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ], értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- $f$  a hajtómű szakaszos üzemét figyelembe vevő korrekciós tényező, értékét diagramból lehet meghatározni.

2016-ban aztán végül megjelent a VDI 2736 irányelv. A VDI 2736-ban szereplő melegedési képletet Hachmann és Strickle munkássága alapján hozták létre [50]. Manapság ezt a képletet használják a melegedés számítására. A VDI 2736 szerinti számítási módszert a (11) egyenlet tartalmazza [49].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + H_v \cdot P \cdot \mu \cdot \left( \frac{k_{\vartheta}}{b \cdot z \cdot (v \cdot m)^{\frac{3}{4}}} + \frac{R_{\lambda,G}}{A_G} \right) \cdot ED^{0,64} \quad (11)$$

A (11) képletben szereplő mennyiségek [49]:

- $\vartheta_k$  a környezet hőmérséklete [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $P$  a hajtás teljesítménye [W],
- $\mu$  a súrlódási tényező,
- $z$  a fogsók, számok,
- $b$  a fogszélesség [mm],
- $v$  a fogaskerék gördülőkori sebessége [m/s]
- $m$  a modul [mm],
- $A_G$  a hajtómű belső felülete [ $\text{m}^2$ ]
- $k_9$  a hőátadási tényező [ $\text{K}(\text{m/s})^{0,75}\text{mm}^{1,75}/\text{W}$ ], értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- $R_{\lambda,G}$  a hajtómű tényező [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ], értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- $ED$  a relatív terhelési ciklus, azt állapítja meg, hogy a hajtómű folyamatos vagy szakaszos üzemű-e,
- $H_v$  a fog veszteségi foka, a (12) egyenlettel lehet kiszámítani.

A veszteségi fokot a (12) képlettel lehet kiszámítani [49]:

$$H_v = \frac{\pi \cdot (u + 1)}{z_2 \cdot \cos \beta_b} \cdot (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) \quad (12)$$

A (12) egyenletben szereplő paraméterek [49]:

- $\beta_b$  a fogferdeségi szög az alapkörön,
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  a fogaskerek részleges kapcsolószáma, amit a (13) egyenlettel lehet kiszámítani.

A részleges kapcsolószám a (13) egyenlettel számítható ki [49]:

$$\varepsilon_i = \frac{z_i}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{d_{ai}}{d_{bi}} \right)^2 - 1} - \tan \alpha_{wt} \right) \quad (13)$$

A (13) egyenletben szereplő paraméterek [49]:



- $d_a$  a fejkörátmérő,
- $d_b$  az alapkörátmérő,
- $\alpha_{wt}$  a kapcsolószög.

Említést érdemel még a japán JIS B 1759 szabvány. Bár ebben a szabványban nem szerepel külön számítás a műanyag fogaskerek melegedésére, a szabvány a hőmérséklet hatását a fogaskerék anyagának fogtónél vett megengedett hajlítófeszültségénél veszi figyelembe. Ezt a (14) egyenlet mutatja be [13].

$$\sigma_{FP} = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{\theta} \cdot Y_{\Delta\theta} \cdot Y_L \cdot Y_M \quad (14)$$

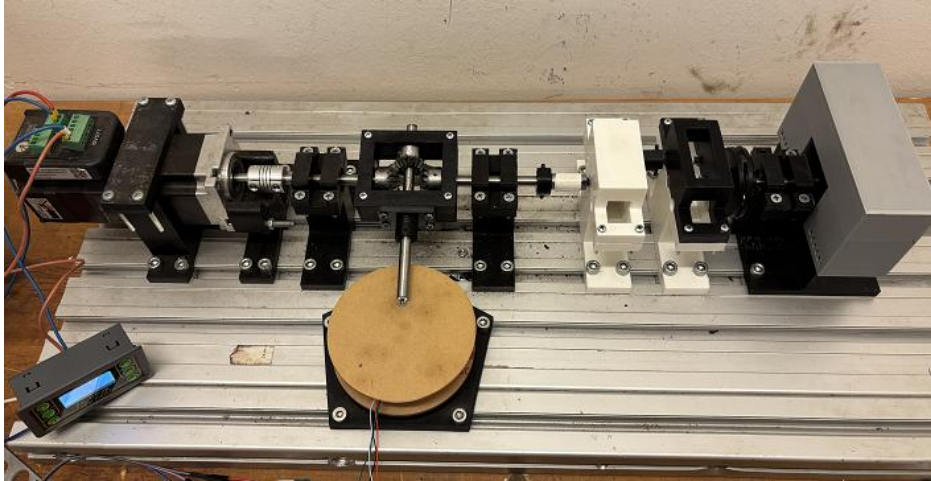
Ahol [13]:

- $\sigma_{Flim}$  a fogaskerék anyagának megengedett hajlítófeszültsége, amit tesztekkel lehet meghatározni
- $Y_{NT}$  az élettartam tényező
- $Y_M$  a fogaskerék párjának anyagát figyelembe vevő tényező
- $Y_L$  a kenési tényező
- $Y_{\theta}$  a környezeti hőmérséklet tényezője
- $Y_{\Delta\theta}$  a hőmérséklet növekedési tényező

A (14) egyenletben a melegedést a  $Y_{\theta}$  a környezeti hőmérsékleti tényező és a  $Y_{\Delta\theta}$  a hőmérséklet növekedési tényező veszi figyelembe. Mindkettőnél a szabvány alapján méréseket kell végezni etalon paraméterekkel és ezeket az eredményeket kell összehasonlítani a tényleges paraméterekkel. Így a JIS B 1759 szabvány módszeréről elmondható, hogy nagy mértékben különbözik a VDI irányelvekben használt módszerektől, hiszen a JIS B 1759 módszerében a tényezők nagy része nem korábbi adatokat tartalmazó táblázatokból és diagramokból származik, hanem leírja, hogyan lehet olyan méréseket végezni, hogy a szilárdságot befolyásoló tényezőket megkapjunk [13].

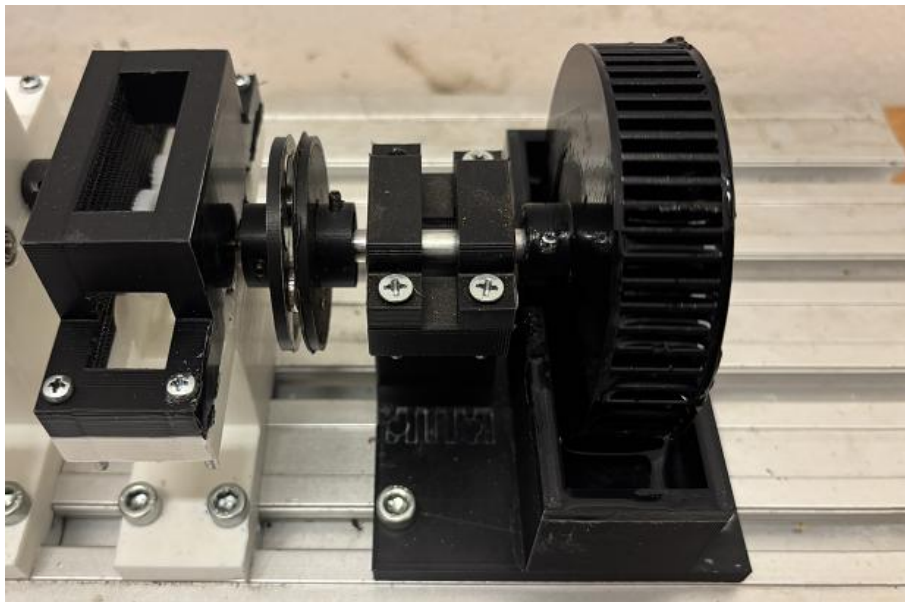
## 5.2. Melegedés mérése

A melegedés méréséhez az átforgatási nyomaték méréséhez is alkalmazott berendezést használtam. A különbség annyi volt, hogy a vizsgált fogaskerekre terhelést is adtam. Ezt a kiegészített berendezést a 87. ábra mutatja.



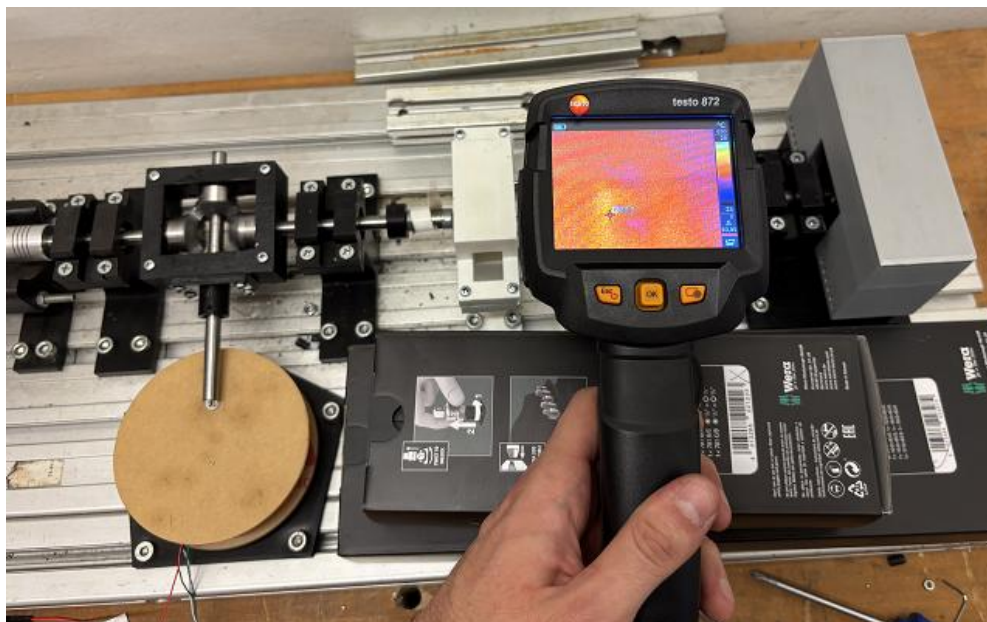
87. ábra: A melegedés méréséhez használt berendezés

A terhelést egy általam tervezett terhelőegység adta, amely egy folyadékba merülő vízkerékből állt, ezt a 88. ábra mutatja. Az ellenállást a mérések közben a kerék vízbe merülő lapátjai biztosítják. A terhelést a mérés során a nyomaték mérő berendezéssel mértem.



88. ábra: A terhelést adó vízkerék

A fogaskerek melegedésének méréséhez egy Testo 872 hőkamerát használtam. A mérést a 89. ábra mutatja. Mivel a mérések során a külső hőmérsékletet nem tudtam szabályozni, ezért annak mérésére és ellenőrzésére egy egyszerű digitális hőmérséklet mérőt használtam.



89. ábra: A melegedés mérése

Minden mérés esetén két  $m=0,5$  mm modulú fogaskereket mértem. A hajtott oldali fogaskerek fogszáma 30, a másiké 50 volt. A fogaskerek fogszélessége 3 mm volt, anyaguk POM. A fordulatszám és a terhelés is minden mérés esetén más és más volt. Emellett, mivel a méréseket különböző napokon végeztem el, hogy egy mérés után legyen ideje a berendezésnek lehűlni, ezért a környezeti hőmérséklet is különbözött az egyes mérések során. Így végeztem el öt mérést, amit az 5.1 fejezetben bemutatott képletekből kapott eredményekkel vettem össze. A méréseket úgy végeztem el, hogy első körben mértem 30 percet, aztán 30 percig nem leállítva magára hagytam a berendezést, majd újabb 10 percet mértem, ezt követően újabb 30 percre hagytam a berendezést futni, végül egy újabb 10 percig mértem a hőmérséklet változását. A mérések során a hőkamerát beállítottam, hogy az úgynevezett „hot spot”-ot mérje, azaz a legmelegebb pontot, mely a fogaskerek érintkezési pontjának környezetében volt.

Az így mért értékeket értékeltem ki öt szakaszban. Az I. szakasz a mérés kezdeti 10 percét jelenti, a II. szakasz a következő 10 percet, a III. szakasz pedig a harmadik 10 percet. A IV. szakasz az első 30 perces mérés nélküli futás utáni 10 percet jelöli, az V. szakasz pedig az utolsó 10 perces hőmérsékletmérést.

A VDI 2736 irányelv felállításakor is hasonló mérést használtak a felületi hőmérséklet képletének meghatározásához. Az irányelv 4 számú része hőkamera alkalmazásáról ír és kenés nélküli esetről. A méréseket nem megszakított futtatásokkal végezték el, ahol azt a kvázi-stacionárius állapotot keresték, ahol hőegyensúly áll be, azaz a fogaskerek nem melegednek tovább. Ezt tapasztalatok alapján 20 és 45 perc közötti időtartam esetén érték el [51].

A mérések paramétereit a 30. táblázat, a képletekkel számított hőmérséklet értékeket a 31. táblázat tartalmazza.

30. táblázat: A mérések paraméterei

| Mérés    | Tangenciális erő a fogon [N] | A kiskerék fordulatszáma [1/min] | A külső hőmérséklet [°C] |
|----------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 1. mérés | 0,0413                       | 273,73                           | 25,1                     |
| 2. mérés | 0,7284                       | 660                              | 22,8                     |
| 3. mérés | 0,3991                       | 500                              | 22,1                     |
| 4. mérés | 0,114                        | 360                              | 21,6                     |
| 5. mérés | 0,2615                       | 600                              | 21,3                     |

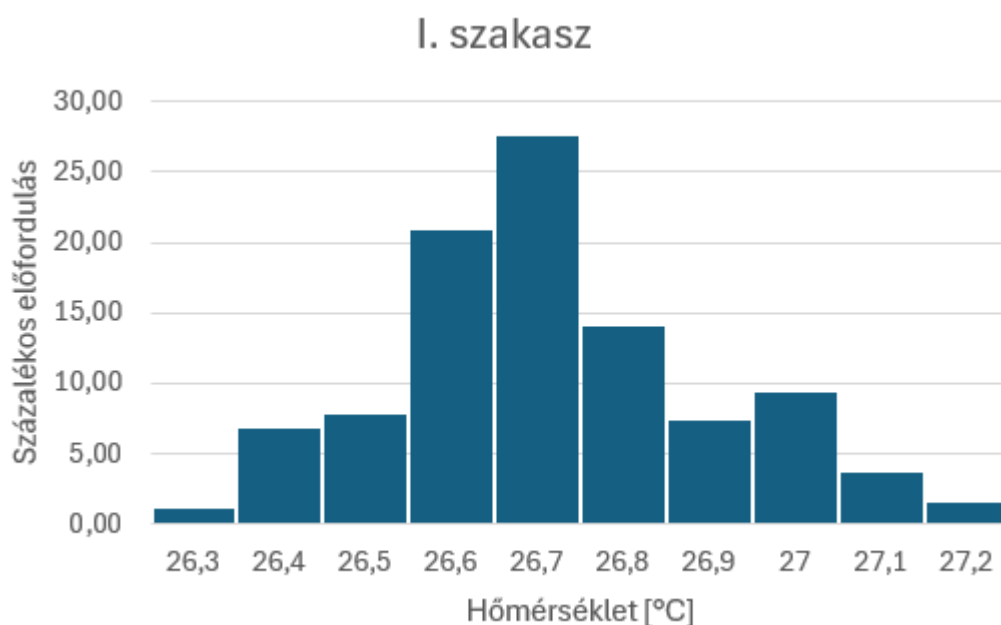
31. táblázat: A képletekkel kapott eredmények az egyes mérési esetekre

| Mérés    | VDI 2545 [°C] | Licharz [°C] | VDI 2736 [°C] |
|----------|---------------|--------------|---------------|
| 1. mérés | 25,15         | 25,27        | 25,27         |
| 2. mérés | 24,39         | 26,45        | 26,46         |
| 3. mérés | 22,84         | 23,96        | 23,97         |
| 4. mérés | 21,77         | 22,09        | 22,09         |
| 5. mérés | 21,84         | 22,58        | 22,58         |

### 5.2.1. Első mérés

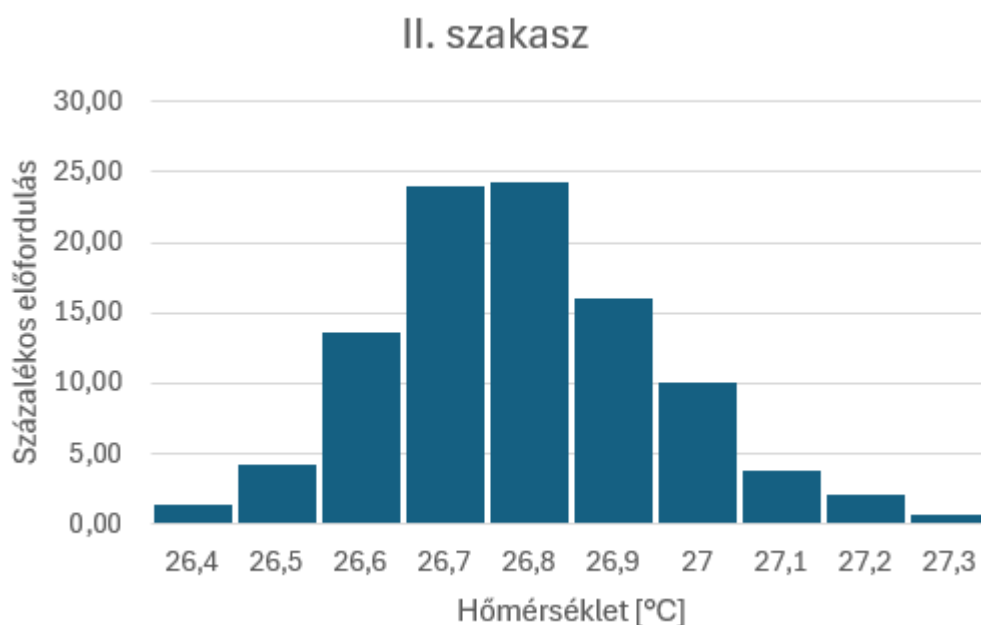
Az első mérés során az öt szakasznál mért hőmérsékletek százalékos eloszlását a 90. ábra, a 91. ábra, a 92. ábra, a 93. ábra és a 94. ábra mutatja.

A mérések azt mutatták, hogy az I. szakaszban a hőmérséklet 26,3 és 27,2 °C között változott, 26,7 °C-os átlaggal. Látható, hogy már a mért hőmérsékletek minimuma is több, mint 1 °C-kal volt melegebb, mint a képletekkel számított hőmérsékletek.



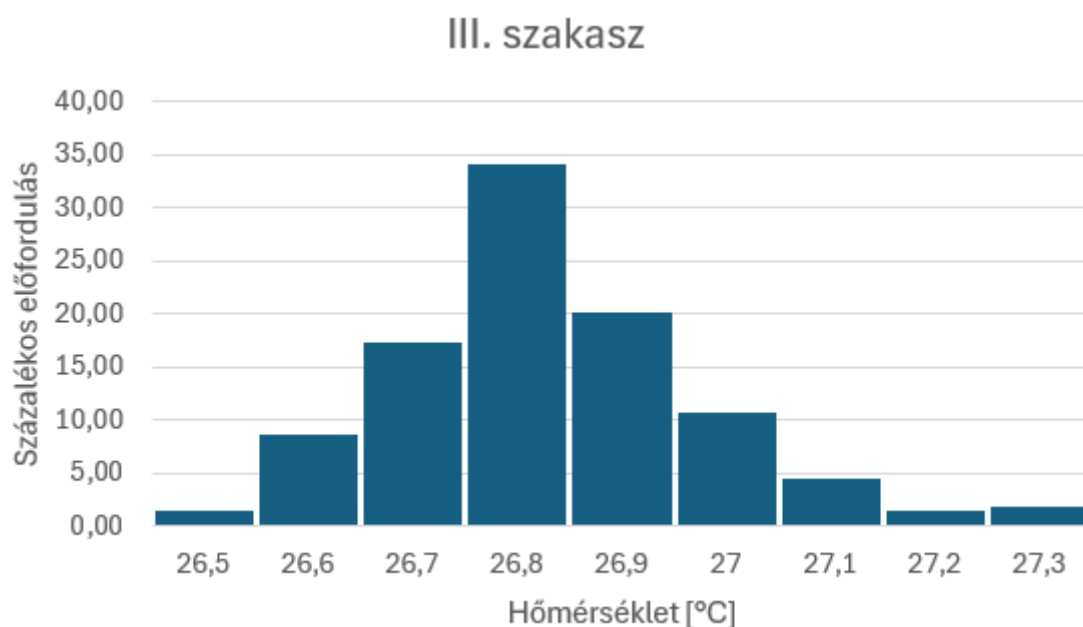
90. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az első mérés I. szakaszán

A II. szakaszban a mért hőmérséklet minimuma és maximuma is 1 °C-kal nőtt. Az átlaghőmérséklet ebben a szakaszban 26,8 °C volt. A maximum a mérés további szakaszaiban már nem nőtt tovább, megállt 27,3 °C-on.



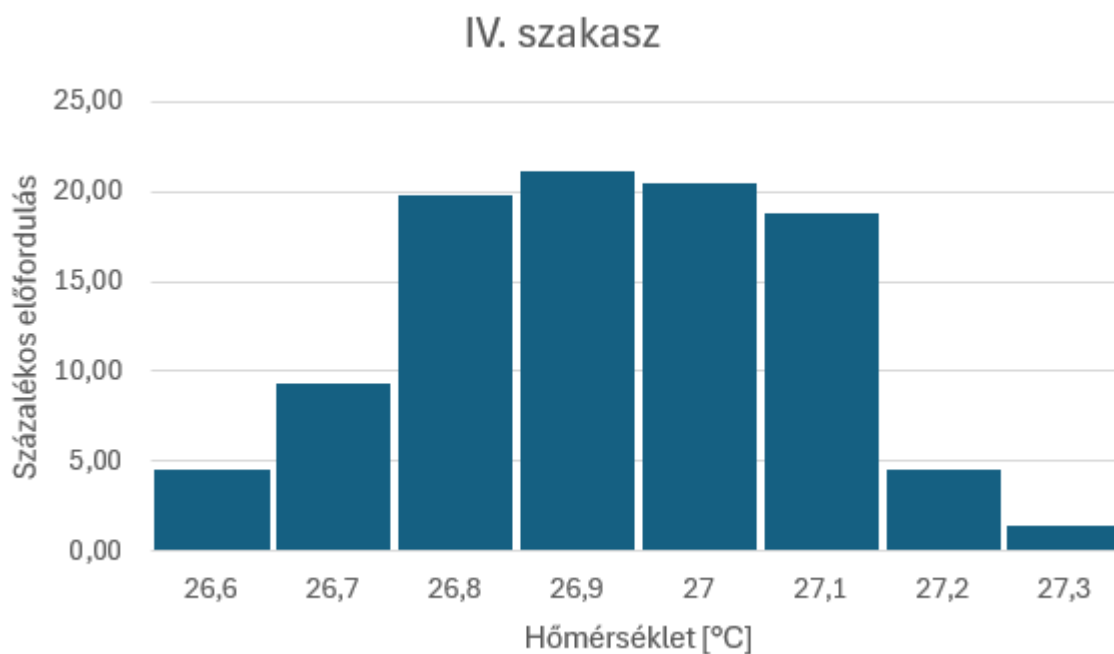
91. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az első mérés II. szakaszán

A III. szakaszban tovább növekedett a mért értékek minimuma, ismételten 1 °C-kal. A III. szakaszban mért hőmérsékletek átlaga 26,8 °C volt.



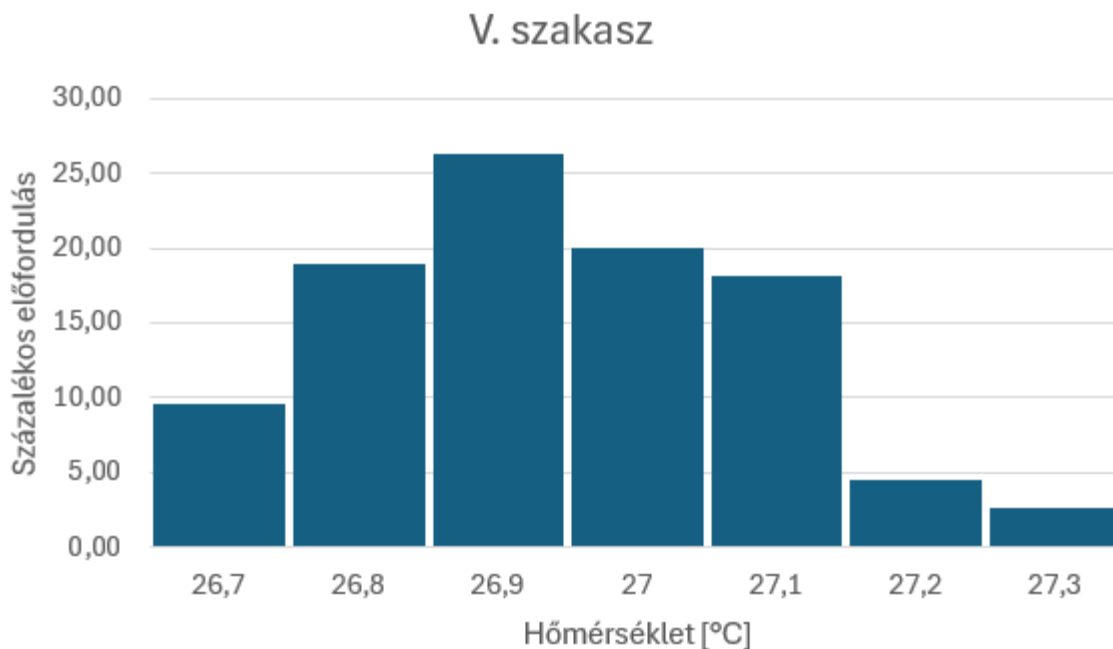
92. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az első mérés III. szakaszán

A minimum érték a IV. szakaszban is 1 °C-ot nöött. Az átlagérték itt 26,9 °C volt.



93. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az első mérés IV. szakaszán

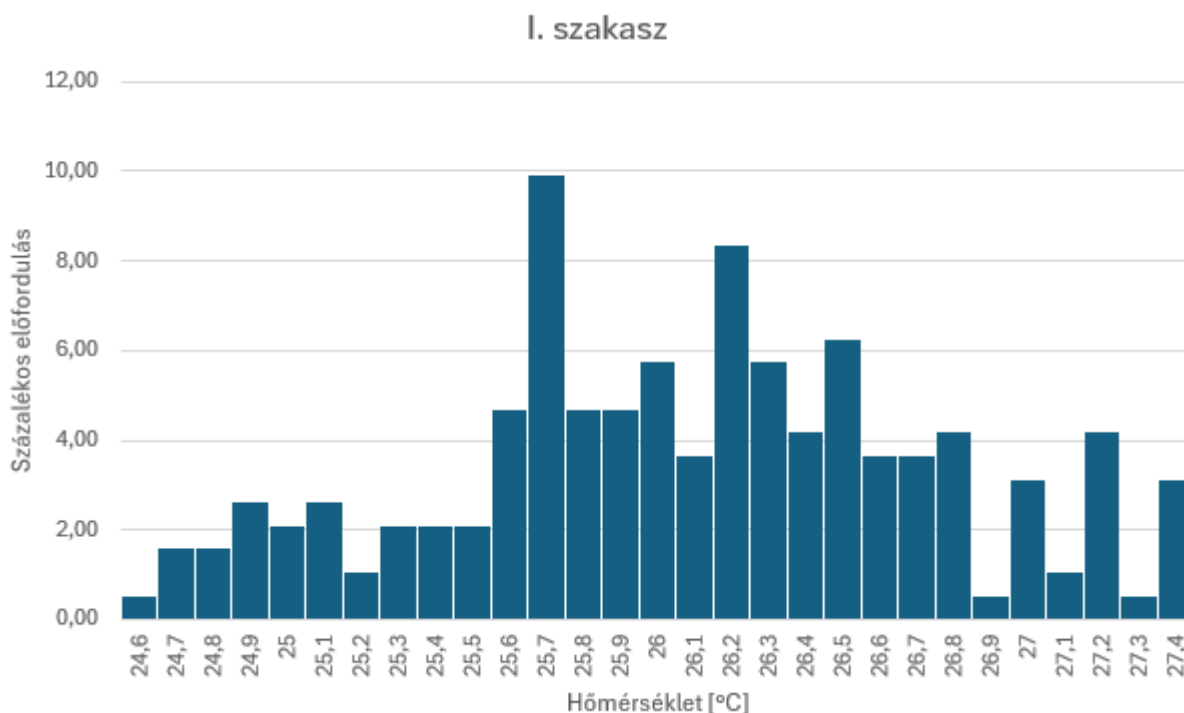
A minimum értékének 1 °C-os növekedése az V. szakaszban is folytatódott. Az átlagérték itt is 26,9 °C volt.



94. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az első mérés V. szakaszán

### 5.2.2. Második mérés

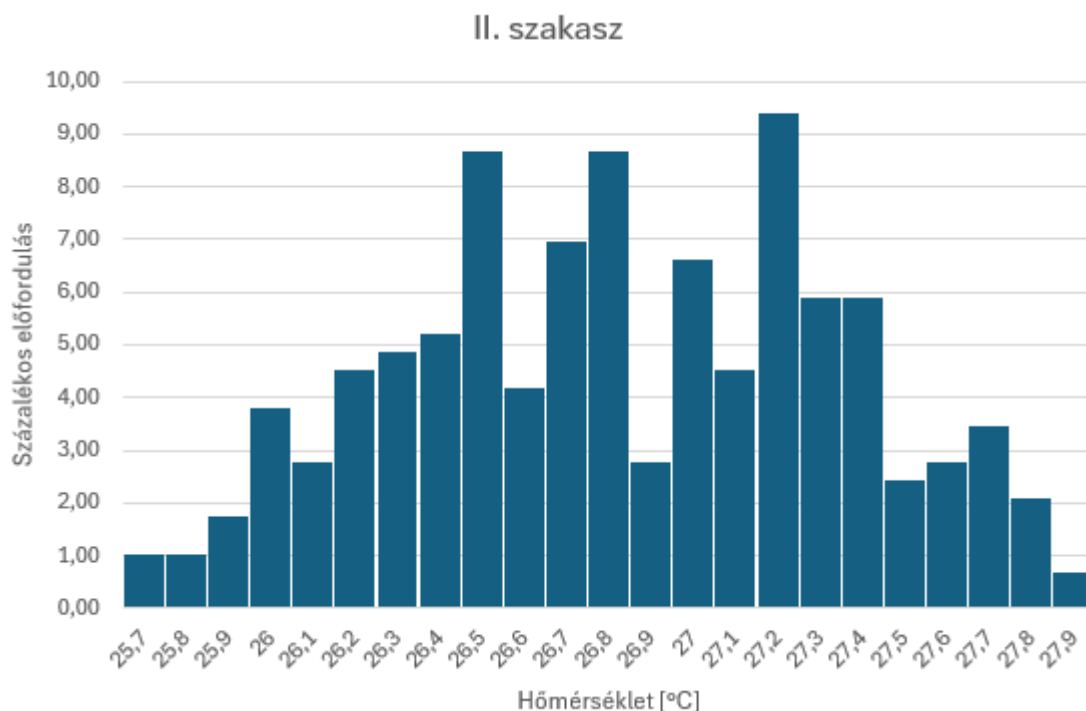
A második mérés öt szakaszát a 95. ábra, a 96. ábra, a 97. ábra., a 98. ábra és a 99. ábra mutatja. Az I. szakaszban a hőmérséklet 24,6 és 27,4 °C között mozgott. Az átlaghőmérséklet ebben a szakaszban 26,1 °C volt. Bár a minimum érték a VDI 2545-öt leszámítva kisebb, mint a képletekkel számítottak, a maximum értéke mindet túllépi.



95. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a második mérés I. szakaszán

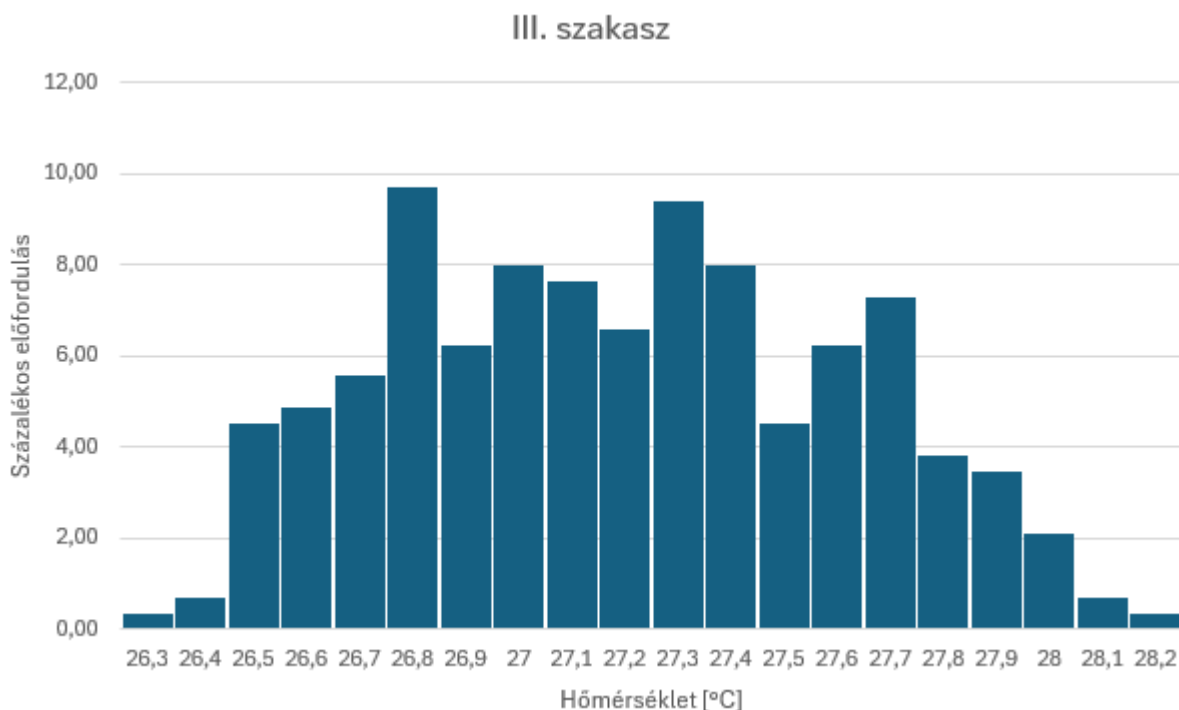


A II. szakaszban a hőmérséklet 25,7 és 27,9 °C között változott, 26,8 °C-os átlaggal.



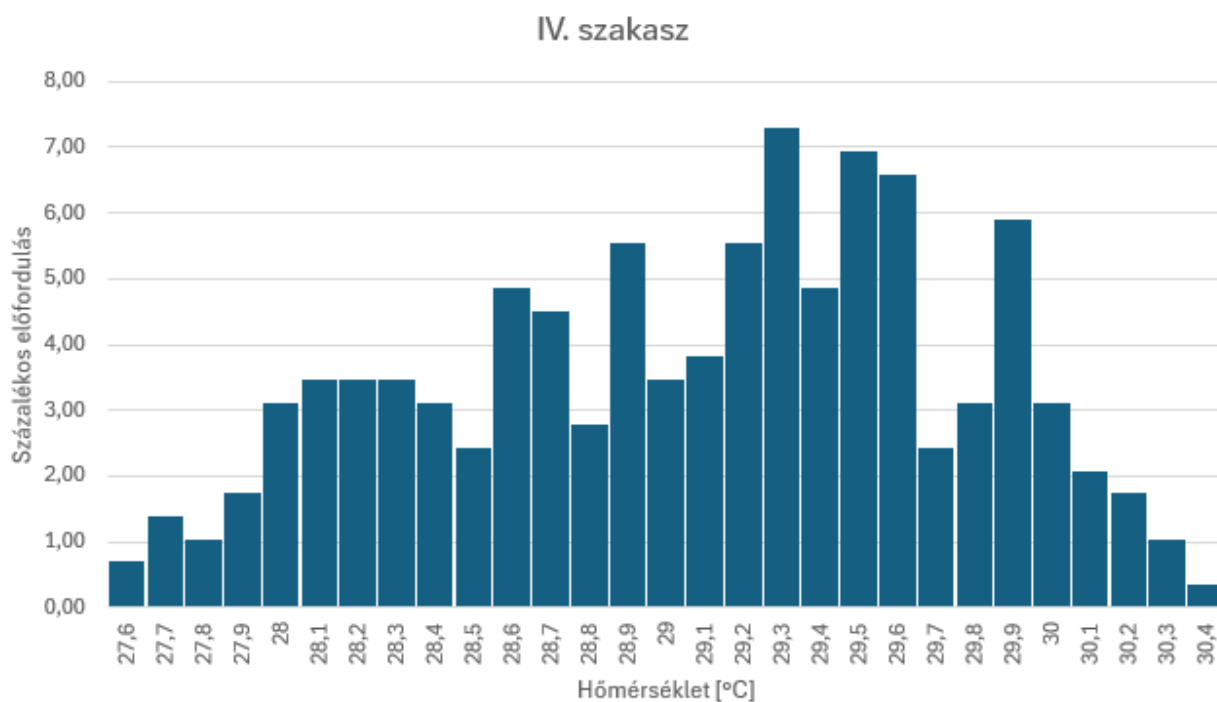
96. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a második mérés II. szakaszán

A III. szakaszban tovább folytatódott a maximum és minimum érték növekedése. Előbbi 28,2, utóbbi 26,3 °C lett. A mért hőmérsékletértékek átlaga is növekedett, ez 27,2 °C lett.



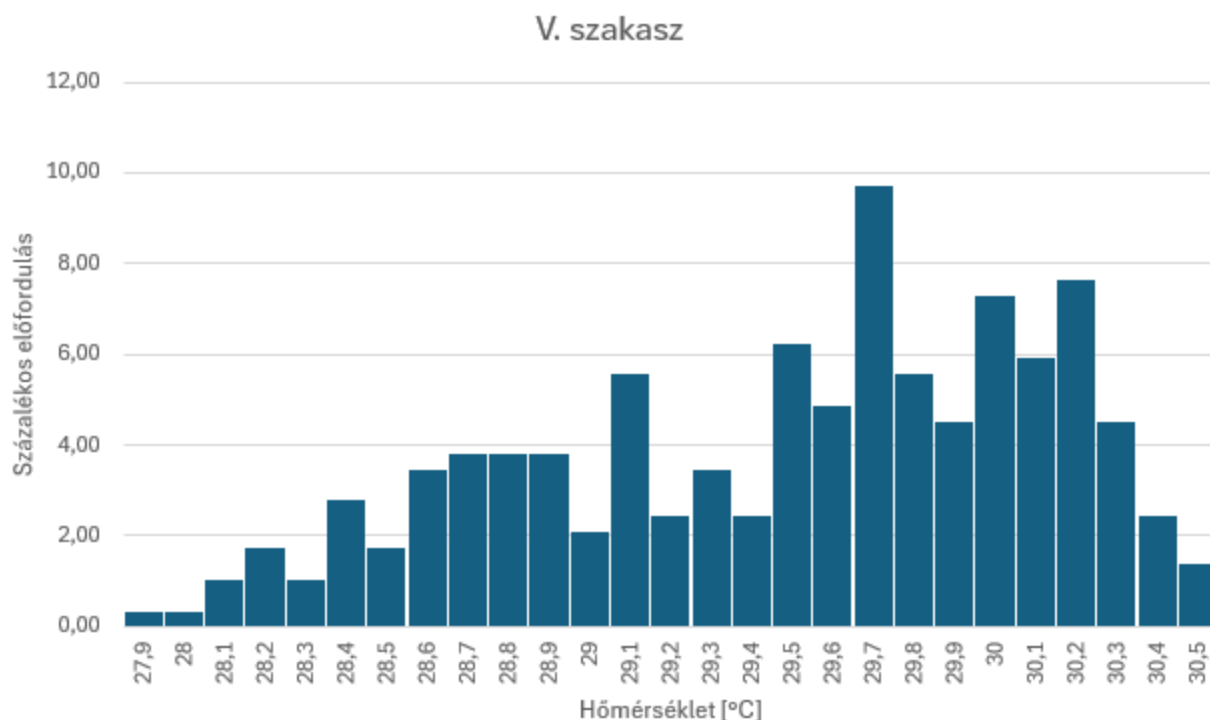
97. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a második mérés III. szakaszán

A IV. szakasz már jelentős hőmérsékletnövekedést mutat, mivel ez a mérés történt a III. szakasz utáni 30 perces mérés nélküli futtatás után. A minimum értéke itt minden esetben meghaladta a képletekkel számolt hőmérsékletet, 27,6 °C volt a hőmérséklet minimuma. A maximum értéke 30,4 °C volt. A IV. szakaszban mért értékek átlaga 29,1 °C.



98. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a második mérés IV. szakaszán

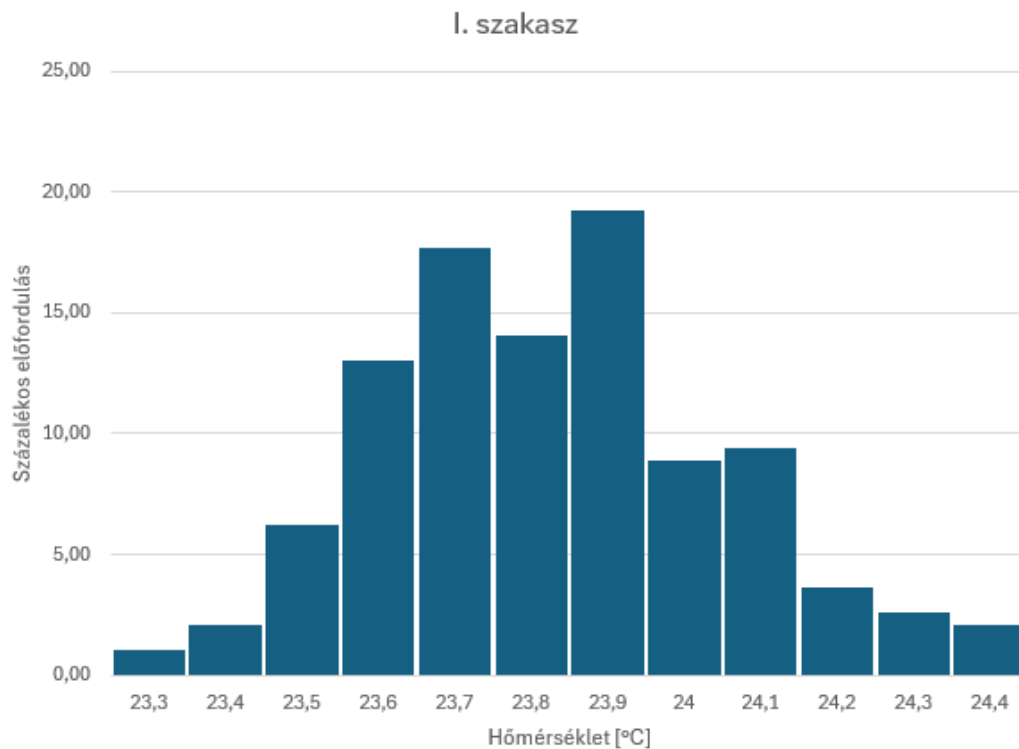
Az V. szakaszban a minimum értéke 27,9 °C-ra növekedett. A maximum értéke már csak 0,1 °C-ot nöött, 30,5 °C-ra. Ez azt jelentheti, hogy a maximum értéke már további futás esetén sem növekedne jelentősen. Az átlagérték az V. szakaszban 29,5 °C volt.



99. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a második mérés V. szakaszán

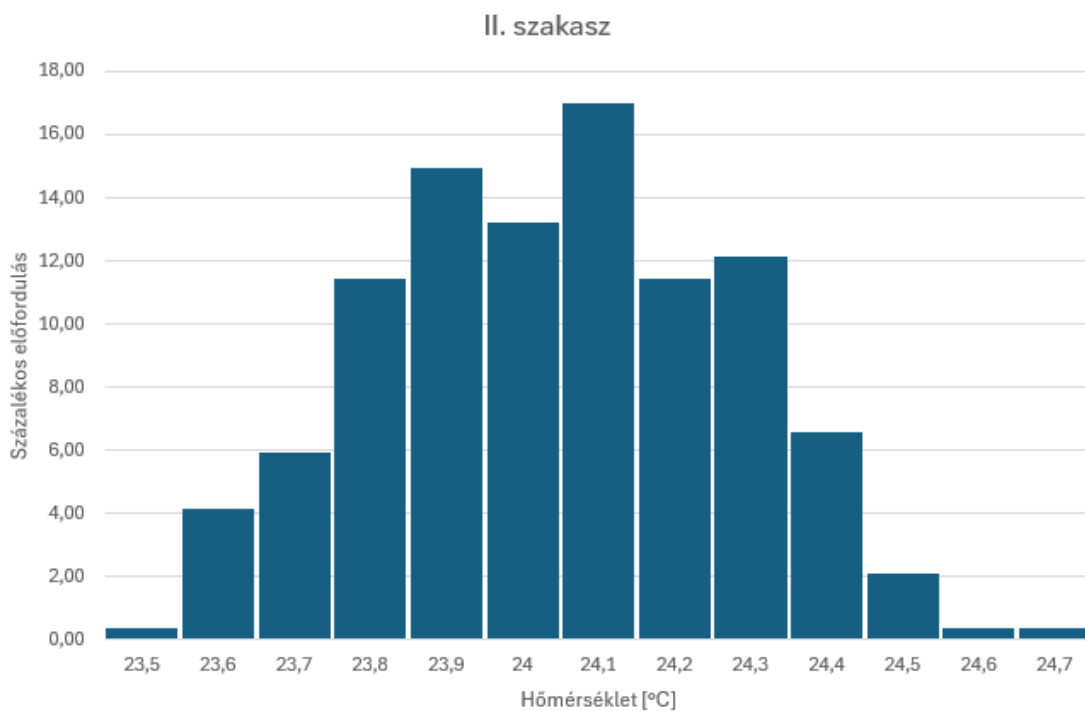
### 5.2.3. Harmadik mérés

A harmadik mérés szakaszait a 100. ábra, a 101. ábra, a 102. ábra, a 103. ábra és a 104. ábra mutatja. Az I. szakaszban a hőmérséklet 23,3 és 24,4 °C közötti értékeket vesz fel, 23,8 °C-os átlaggal. A Licharz és a VDI 2736 képleteivel kapott eredmény ebbe a tartományba esik, de a maximumnál kisebb. A VDI 2545 szerint számolt érték már ezt a tartományt sem éri el.



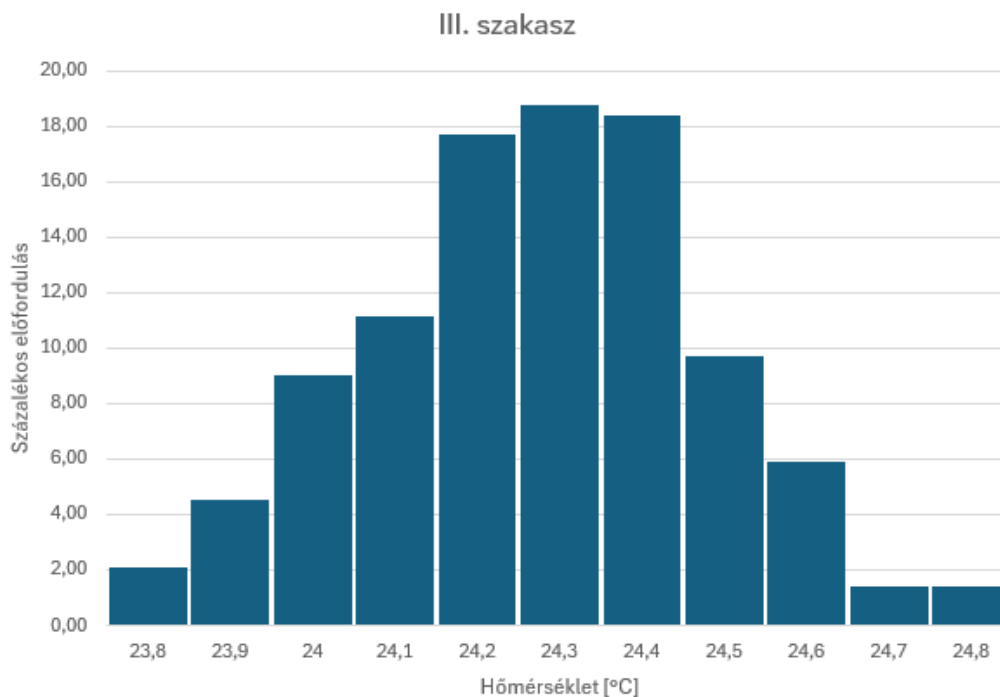
100. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a harmadik mérés I. szakaszán

A II. szakaszban a minimum értéke 23,5 °C-ra, a maximum értéke 24,7 °C-ra növekedett. Az átlagérték 24 °C volt.



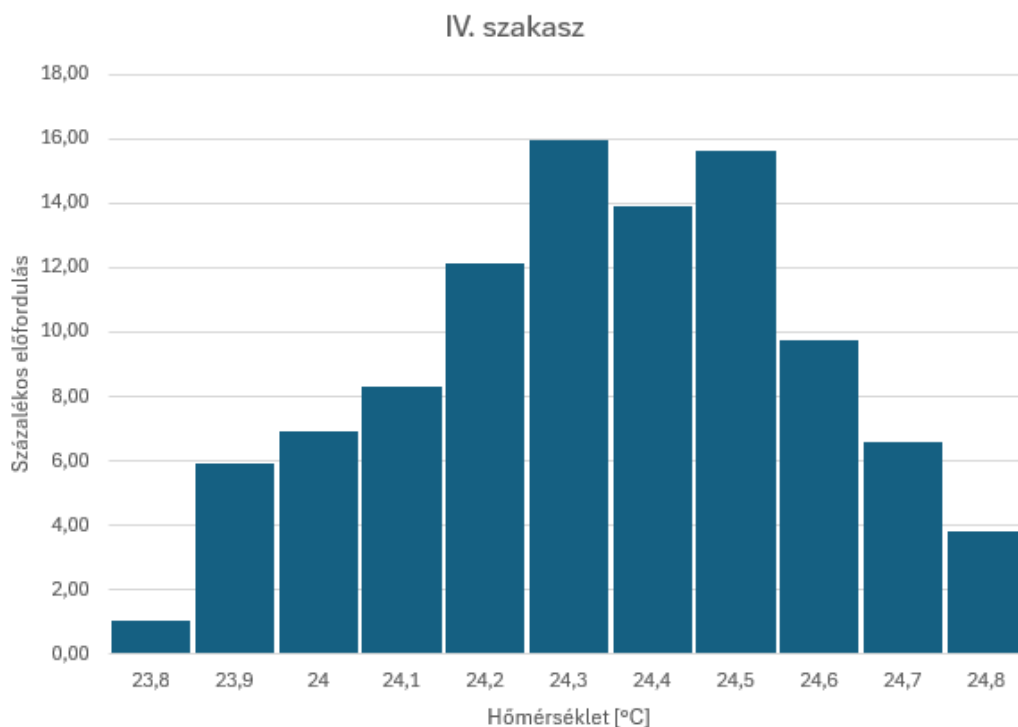
101. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a harmadik mérés II. szakaszán

A III. szakaszban a hőmérséklet 23,8 és 24,8 °C közötti értékeket vett fel. Az átlag ebben a szakaszban 24,3 °C volt.

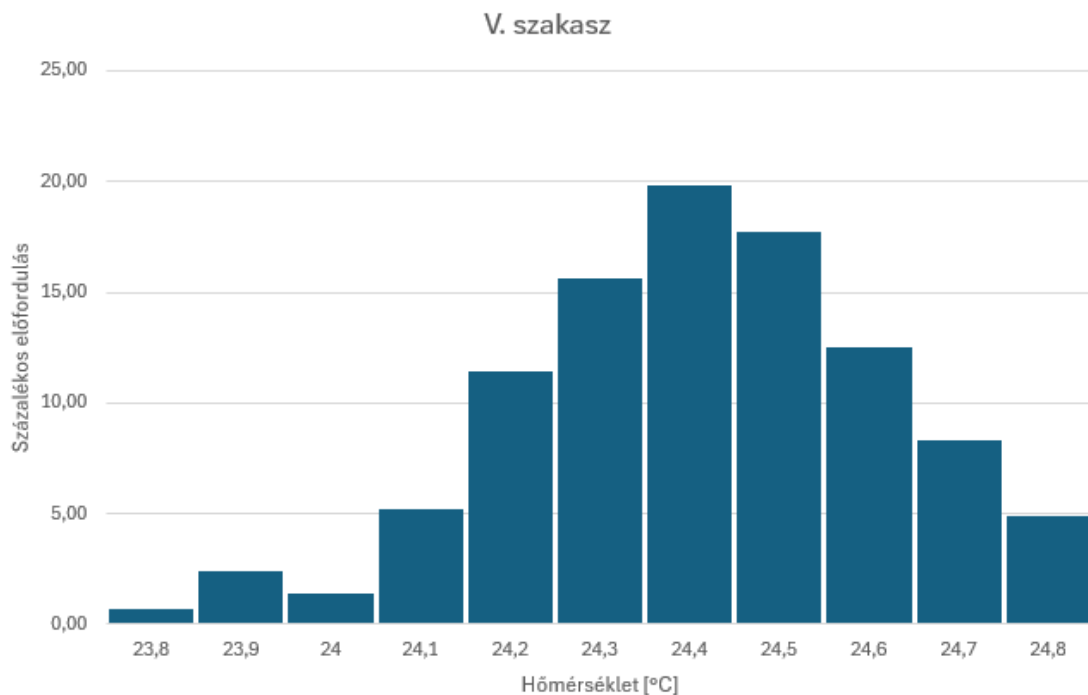


102. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a harmadik mérés III. szakaszán

A maximum és minimum értéke már a IV. és V. szakaszra sem változott. Elmondható így tehát, hogy a képletekkel számított értékek a Licharz és a VDI 2736 esetén körülbelül 0,1 °C-kal voltak nagyobbak a mért értékek minimumától, a maximumot azonban nem érték el. A IV. szakaszban az átlag 24,3 °C volt, az V. szakaszban 24,4 °C.



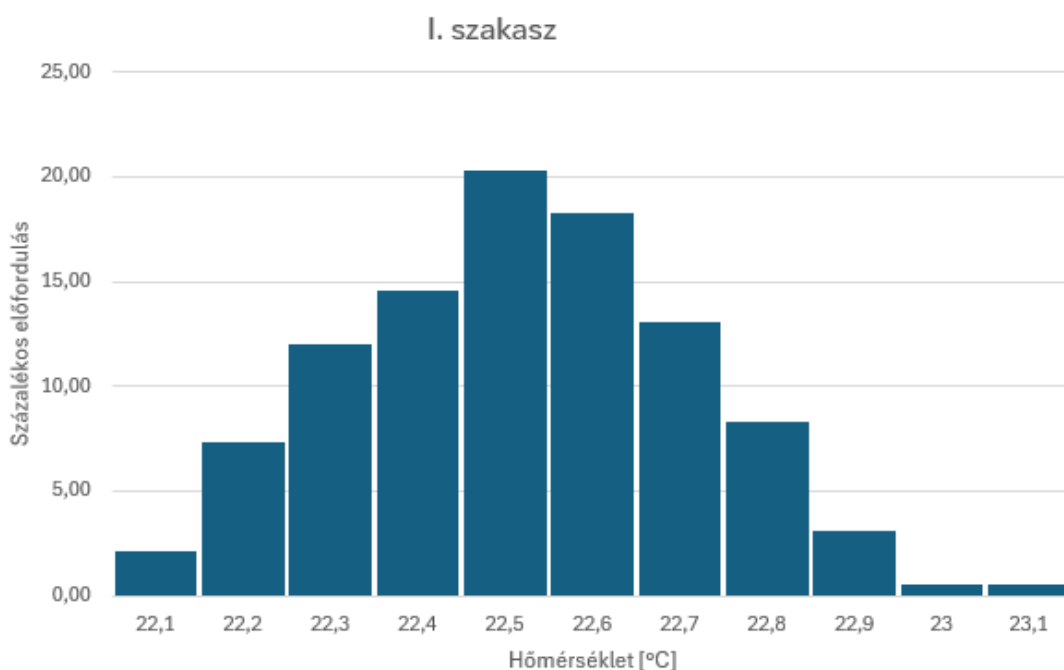
103. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a harmadik mérés IV. szakaszán



104. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a harmadik mérés V. szakaszán

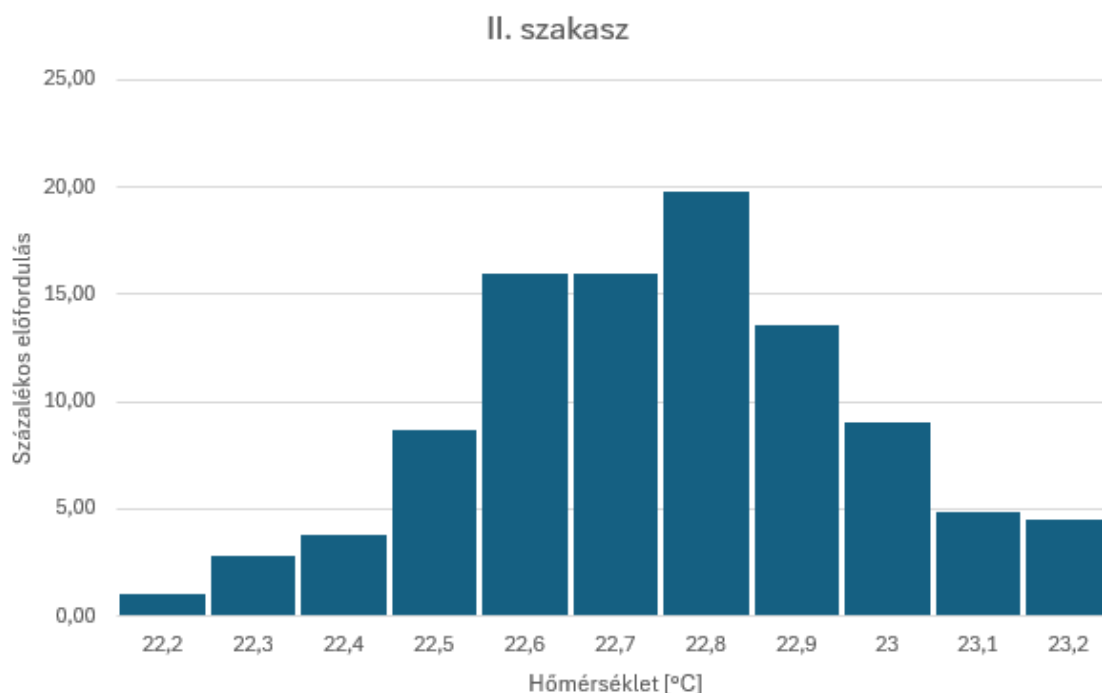
#### 5.2.4. Negyedik mérés

A negyedik mérés öt szakaszán mért hőmérséklet értékek százalékos előfordulását a 105. ábra, a 106. ábra, a 107. ábra, a 108. ábra és a 109. ábra mutatja. Az I. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22,1 °C volt, ami 0,01 °C-kal nagyobb, mint a képletekkel kapott legnagyobb érték. A mért értékek maximuma 23,1 °C volt. Az I. szakaszban mért értékek átlaga 22,5 °C volt.



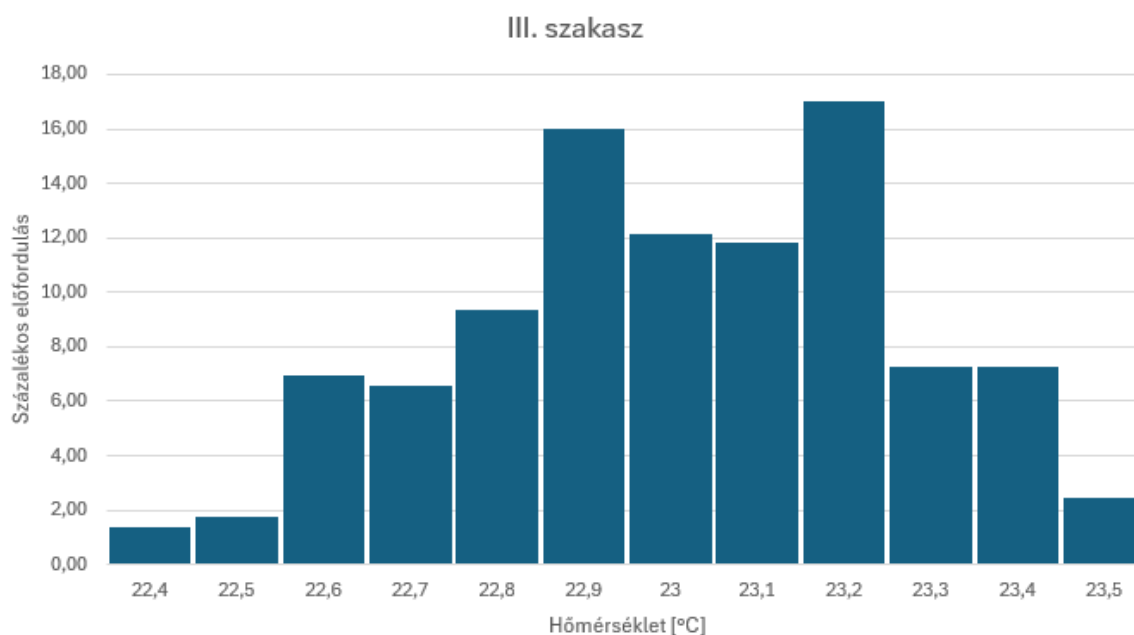
105. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a negyedik mérés I. szakaszán

A II. szakaszban a minimum és a maximum értéke is 0,1 °C-kal nőtt. Az átlag értéke 22,8 °C lett.



106. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a negyedik mérés II. szakaszán

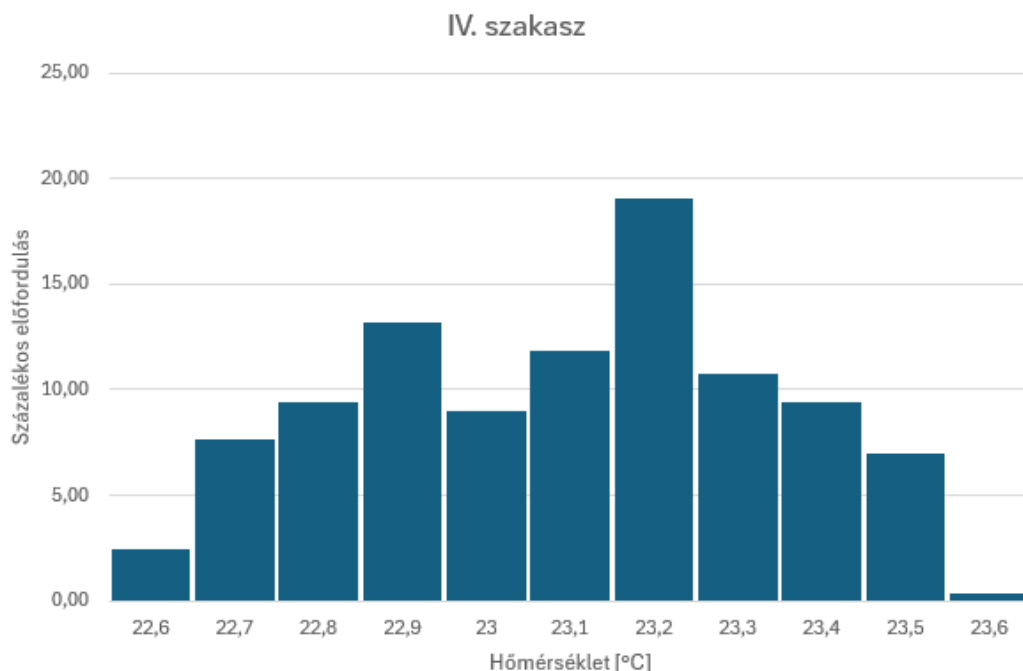
A III. szakaszban a minimum 22,4, a maximum 23,5 °C értéket vett fel. A mért hőmérsékletek átlagos értéke 23 °C volt.



107. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a negyedik mérés III. szakaszán

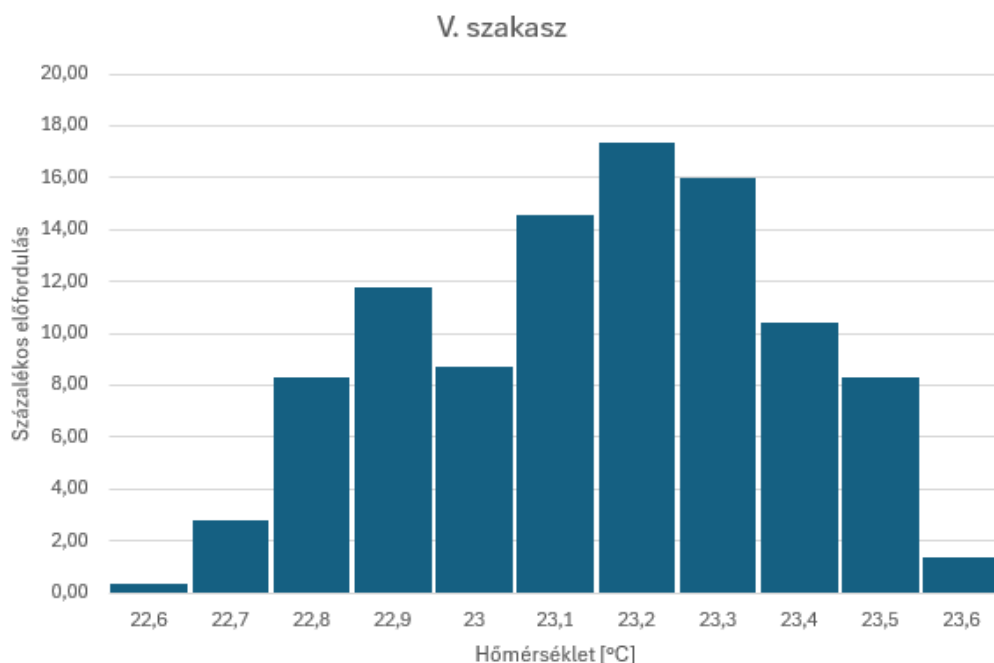
A IV. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22,6 °C volt, a legnagyobb pedig 23,6 °C. Az átlag 23,1 °C lett.





108. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a negyedik mérés IV. szakaszán

Az V. szakaszban sem a minimum, sem a maximum értéke nem változott. Az átlag 0,1 °C-kal növekedett a IV. szakaszhoz képest.

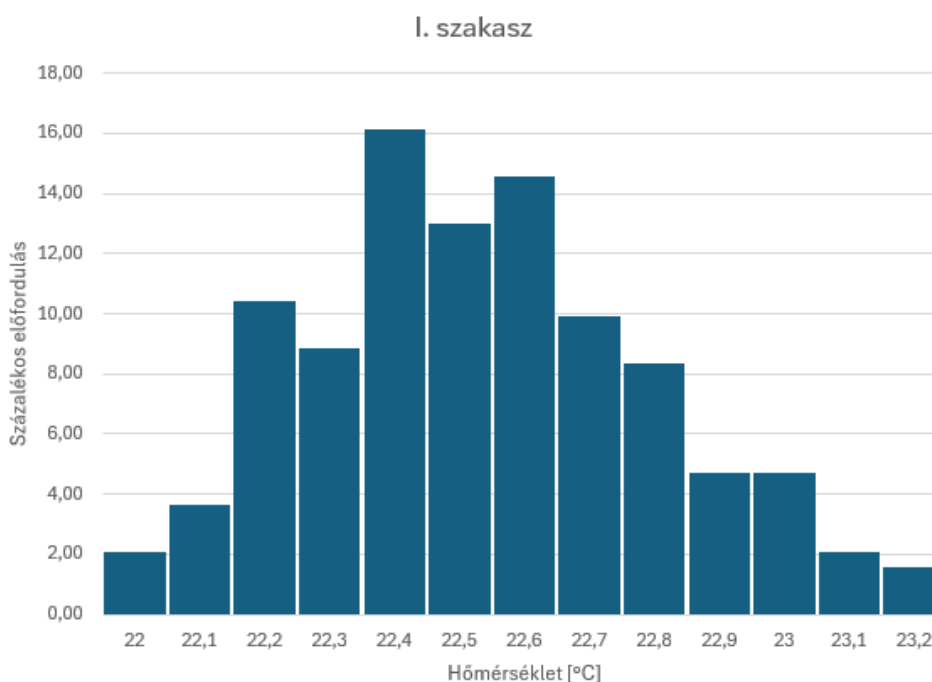


109. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása a negyedik mérés V. szakaszán

### 5.2.5. Ötödik mérés

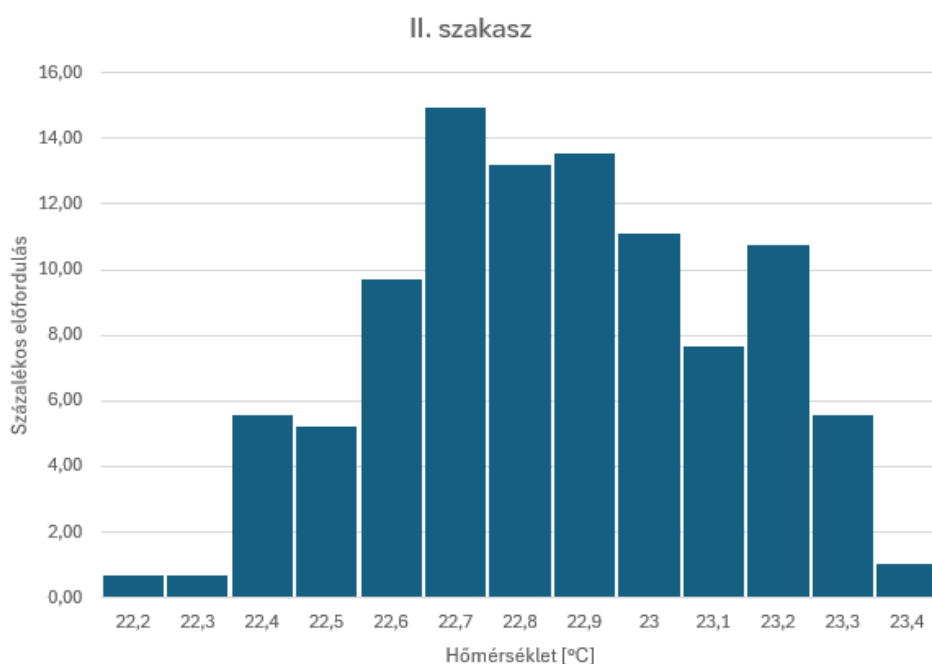
Az ötödik mérés szakaszait a 110. ábra, a 111. ábra, a 112. ábra, a 113. ábra és a 114. ábra mutatja. Az I. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22 °C volt. Ezt az értéket a VDI 2545

képletből számított érték nem érte el, a másik kettő képletéből számított hőmérséklet azonban igen. Azonban egyik számított eredménysem érte el a maximum értékét, ami 23,2 °C volt. A mért értékek átlaga ebben a szakaszban 22,5 °C volt.



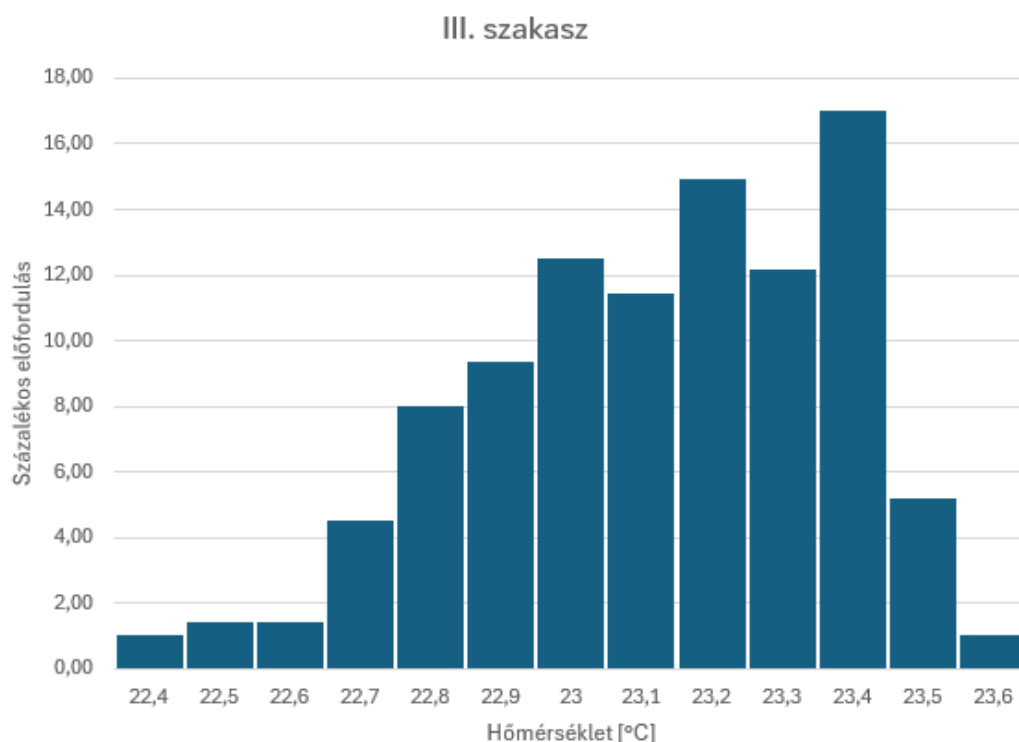
110. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az ötödik mérés I. szakaszán

A II. szakaszban a maximum és a minimum értéke is 0,2 °C-kal nőtt. Az átlagos érték ebben a szakaszban 22,8 °C volt.



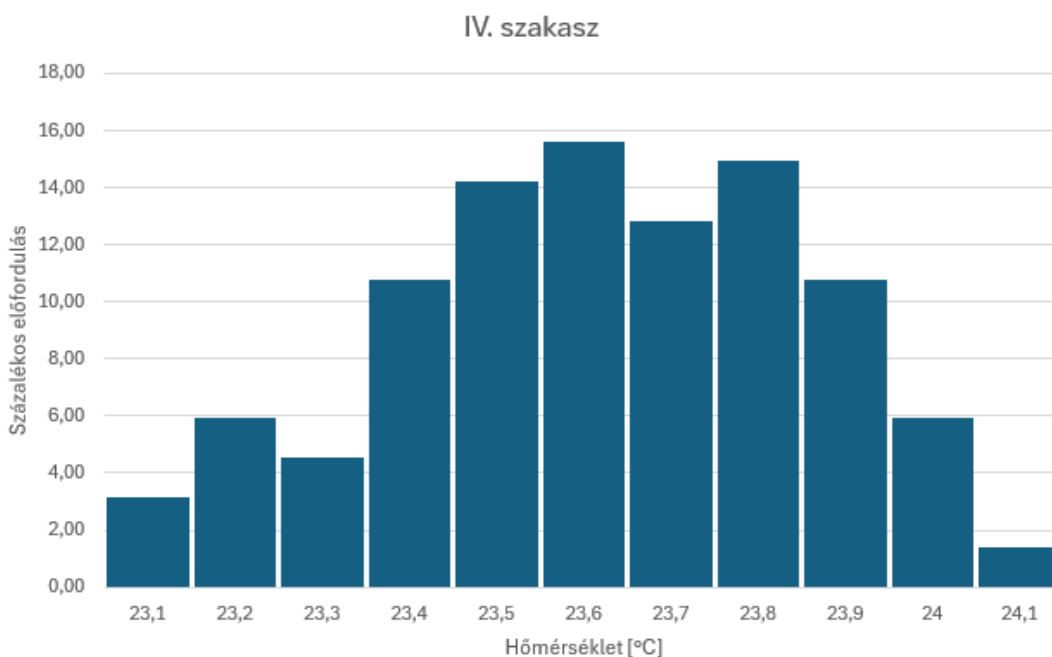
111. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az ötödik mérés II. szakaszán

A III. szakaszban újabb 0,2 °-kal nőtt a maximum és a minimum értéke. Az átlagos érték itt már 23,1 °C volt.



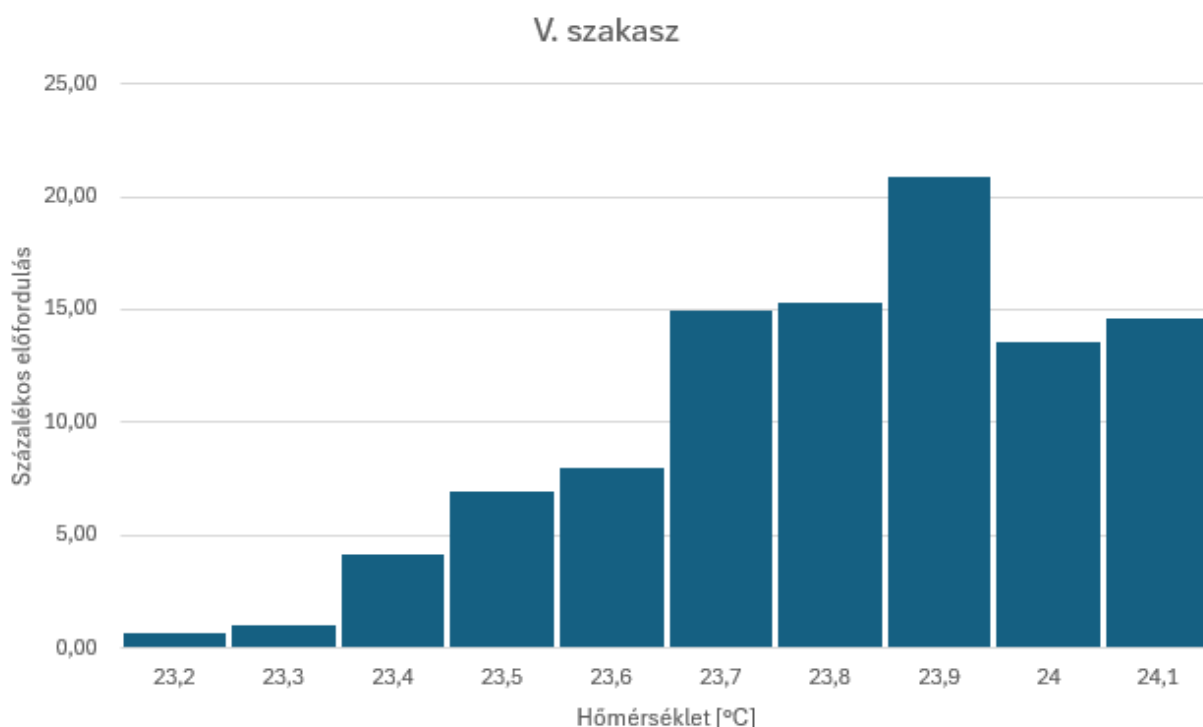
112. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az ötödik mérés III. szakaszán

A IV. szakaszban mind a maximum, mind a minimum értéke jelentősen megnőtt. A legkisebb mért érték 23,1 °C volt, ami már meghaladja az összes számított értéket. A legnagyobb mért érték pedig 24,1 °C volt. A mért értékek átlaga 23,6 °C volt.



113. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az ötödik mérés IV. szakaszán

Az V. szakaszra a maximum értéke nem változott, a minimumé azonban még 0,1 °C-kal nőtt. Az átlagos érték 0,2 °C-kal nőtt 23,8 °C értékre.



114. ábra: A mért hőmérséklet százalékos eloszlása az ötödik mérés V. szakaszán

Összességében elmondható, hogy a mért értékek maximuma minden mérésnél jelentősen meghaladta a képletekből számított mennyiséget. A Licharz és a VDI 2736 szerinti képletekből kapott eredmények egyes esetekben a mért tartományokon belül voltak, míg a VDI 2545 esetében ez sohasem következett be. Azonban a kisméretű műanyag fogaskerek melegedésének szempontjából nem elég, ha a melegedés számítására használt képletek beleesnek a mérési tartományba. A maximum értékének minél jobb megközelítése lenne a céljuk, ugyanis a műanyagok esetében a hőmérsékletnek nagyobb a hatása a szilárdsági és alakváltozási jellemzőkre, mint a fémeknél. Ezért nem mindegy, hogy mi az a legnagyobb hőmérséklet, amire működés közben a fogaskerek felmelegednek. Ezért egy új képlet meghatározása lenne javasolt. Erre sajnos jelenleg nem állnak rendelkezésemre megfelelő eszközök, hiszen ez nagyon sok vizsgálattal járna, amiknek megismételhetőnek kéne lenniük, de mivel több más paraméterrel együtt a környezeti hőmérsékletet sem tudom befolyásolni, így annak a hatását nem tudom vizsgálni a melegedésre.

## 6. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

### 6.1. 1. tézis

Összehasonlítottam a 3D nyomtatási technológiák közül a három legismertebb eljárás pontosságát kisméretű műanyag fogaskerek esetén. A fog profiljának összehasonlítása a kiindulási geometria fogprofiljával kimutatta, hogy az SLA technológia kis eltéréssel, jó közelítéssel hasonlít az elvárt profilhoz. Az FDM technológia ezzel szemben jelentősen különbözött a szabványos profiltól. Az SLS eljárással gyártott fogaskerek profilja a kettő közötti pontosságot ért el. Fogvastagság tekintetében az SLA eljárásnál 5,8% volt a legnagyobb eltérés, az FDM-nél és az SLS-nél már bőven 10% feletti. Az osztóköri osztásnál az SLA 1,3%-os pontosságú volt, a másik két eljárás ezzel szemben 4% feletti hibát mutatott. Fogmagasság tekintetében az SLA legnagyobb eltérése 2,6% volt, az SLS eljárásé 10% feletti, az FDM technológiáé 20% feletti. A fejmagasságok esetén az eltérés  $\mu\text{m}$ -ben hasonló nagyságú volt, mint a fogmagasságé.

- T1. A leggyakrabban használt 3D nyomtatási technológiák közül (FDM, SLA, SLS) a sztereolitográfia (SLA) a legpontosabb és ezzel lehet a kapcsolódás szempontjából legjobb kisméretű műanyag fogaskereket gyártani.**

Kapcsolódó publikáció: (1), (2), (3), (4)

### 6.2. 2. tézis

Az átforgatási nyomaték jelleggörbéjének segítségével vizsgáltam a kisméretű műanyag fogaskerek hibáinak kimutathatóságát. Terveztem egy nyomatékmérésre alkalmas berendezést. A berendezéssel vizsgáltam a fogvastagság hibáit, mint méretbeli eltérést. Kimutattam, hogy ezzel a módszerrel kimutatható a fogvastagsághibák jelenléte és nagysága is. A gyártás során megjelenő helyzetbeli eltérések közül az osztóköri osztás hibáit vizsgáltam a berendezéssel. Kimutattam, hogy a módszer az ilyen típusú hibák kimutatására is alkalmas. Szereléskor megjelenő helyzetbeli hibaként a tengelytáv hibáinak hatását vizsgáltam. Kimutattam, hogy a módszerrel az ilyen típusú hibák is kimutathatóak. Azt is kimutattam, hogy az eddig felsorolt hibák nem csak felismerhetőek a jelleggörbéken, de el is különíthetőek egymástól. Emellett az egyes 3D nyomtatott fogaskerek átforgatási nyomatékainak jelleggörbéit is összehasonlítottam, mely alakbeli eltérésnek tekinthető. A jelleggörbék is ugyanazt a pontossági sorrendet mutatták, mint a mikroszkópos vizsgálatok.

- T2. Az átforgatási nyomaték jelleggörbéjének vizsgálatával kimutatható a kisméretű műanyag fogaskerek méret-, alak- és helyzethibáinak jelenléte, típusa és nagysága.**

Kapcsolódó publikáció: (5), (6), (7)

### 6.3. 3. tézis

Az egyes hibák hatásait a fogakon ébredő fogtőfeszültségek és felületi Hertz-feszültségek értékeire végeselemes analízisekkel vizsgáltam. A három lehetséges eltérési típusból választottam egy-egy hibát. A méreteltérések hatásának vizsgálatára a fogvastagsághibákat használtam. Kimutattam, hogy a felületi feszültség annál nagyobb, minél nagyobb a fogvastagság eltérése bármelyik irányban a szabványoshoz képest. A fogtőfeszültség értéke a hibás fogon annál nagyobb, minél kisebb ennek a fognak a vastagsága. Ezzel ellentétesen a nem hibás fog fogtőfeszültsége annál nagyobb, minél vastagabb a vele érintkező fog. A fog alakhibáinak vizsgálatára az FDM technológiával nyomtatott fogaskerekeket használtam. Az eredmények kimutatták, hogy mind a fogtőfeszültség, mint a felületi feszültség jelentősen megnő alakhibás fogak érintkezésekor. A helyzethibák vizsgálatára a tengelytáv hibáit használtam. Az eredmények megmutatták, hogy minél közelebb kerülnek egymáshoz a fogaskerekek a szabványoshoz képest, annál nagyobb lesz a Hertz-feszültség az érintkezési helyen. A fogtőfeszültség ezzel szemben annál nagyobb, minél messzebb kerülnek egymástól a fogaskerekek.

- T3. A kisméretű műanyag fogaskerekek méret-, alak- és helyzethibái jelentősen megnövelik a fogtőfeszültséget és/vagy a felületi feszültséget a fogakon, ezért fontos ezeknek a hibáknak a felismerése és elkerülése.**

Kapcsolódó publikáció: (8)

### 6.4. 4. tézis

A műanyag fogaskerekek melegedésének meghatározására szolgáló képletek helyességét is ellenőriztem kis méretek esetén. Az érvényben lévő VDI 2736, a már visszavont VDI 2545 és a Licharz nevű műanyag fogaskerékgyártó képleteivel kapott eredményeket hasonlítottam össze öt mérés eredményeivel. A mérések eredményei nagyobb melegedést mutattak, mint azt bármelyik képlettel számítani lehetne. Ebből arra a következtetésre jutottam, hogy ezek a képletek nem megfelelőek kis méretek esetén. Ezért új képlet felállítását javaslom kifejezetten kisméretű műanyag fogaskerekek esetére.

- T4. A műanyag fogaskerekek melegedésének számítására leggyakrabban használt képletek kisméretű műanyag fogaskerekek esetén a valóságostól eltérő eredményeket adnak, ezért új képlet felállítására lenne szükség kifejezetten a kisméretű műanyag fogaskerekek esetére.**

Kapcsolódó publikáció: (9), (10), (11)

## 7. THESES – NEW SCIENTIFIC RESULTS

### 7.1. 1. thesis

I compared the accuracy of three of the best-known 3D printing technologies for small plastic gears. Comparison of the tooth profile with the tooth profile of the initial geometry showed that SLA technology closely resembles the expected profile with a small deviation. In contrast, the FDM technology differed significantly from the standard profile. The profile of the gear produced by the SLS process achieved an accuracy between the two other technologies. In terms of tooth thickness, the SLA process had a maximum deviation of 5.8%, while FDM and SLS had a deviation of well over 10%. For the pitch, SLA had an accuracy of 1.3%, while the other two procedures showed errors of over 4%. For tooth height, SLA had a maximum deviation of 2.6%, SLS over 10% and FDM over 20%. For addendum, the deviation in  $\mu\text{m}$  was similar to that for tooth height.

- T1. From the most commonly used 3D printing technologies (FDM, SLA, SLS), stereolithography (SLA) is the most accurate and can be used to produce small plastic gears that are ideal in terms of connection.**

Related publications: (1), (2), (3), (4)

### 7.2. 2. thesis

I used the characteristic curve of the recirculation torque to investigate the detectability of defects in small plastic gears. I designed a torque measuring device. I used the equipment to investigate tooth thickness errors as dimensional deviations. I have shown that this method can detect both the presence and magnitude of tooth thickness faults. Among the positional deviations that occur during production, I used the equipment to investigate the faults in the pitch. It has been shown that the method can also detect this type of faults. As positional deviations occurring during assembly, I investigated the effect of centre distance faults. I have shown that the method can be used to detect these types of faults. I have also shown that the faults listed so far are not only detectable on the characteristic diagrams, but can also be separated from each other. In addition, I compared the characteristic curves of the recirculation torque of each 3D printed gear, which can be considered as a form deviation. The characteristic curves also showed the same order of accuracy as the microscopic tests.

- T2. By examining the characteristic curve of the recirculation torque, it is possible to detect the presence, type, and magnitude of dimensional, form, and positional faults in small plastic gears.**

Related publications: (5), (6), (7)

### 7.3. 3. thesis

I investigated the effects of individual faults on the values of the root stresses and surface stresses on the gear using finite element analyses. I selected one of each of the three possible types of deviations. I used tooth thickness faults to investigate the effect of dimensional deviations. I showed that the greater the deviation of tooth thickness in either direction from the standard, the greater the surface stress. The value of the root stress on the defective tooth is greater the smaller the thickness of that tooth is. In contrast, the greater the thickness of the tooth in contact with the non-faulty tooth, the greater the root stress on the non-faulty tooth. To investigate tooth deviations, I used gears printed using FDM technology. The results showed that both the root stress and the surface stress increase significantly when defective teeth are in contact. To investigate the positional deviations, I used the centre distance faults. The results showed that the closer the gears are to each other compared to the standard, the higher the Hertz stress at the contact point will be. In contrast, the root stress is higher the further away the gears are from each other.

- T3. The dimensional, shape, and positional faults of small plastic gears significantly increase the root stress and/or surface stress on the teeth, so it is important to recognize and avoid these faults.**

Related publications: (8)

### 7.4. 4. thesis

I also checked the correctness of the formulas for determining the heating of plastic gears for small sizes. I compared the results obtained with the formulas of the current VDI 2736, the now withdrawn VDI 2545 and the plastic gear manufacturer Licharz with the results of five measurements. The results of the measurements showed a higher heating than would be calculated with any of the formulas. This led me to the conclusion that these equations are not appropriate for small sizes. Therefore, I suggest to develop a new formula specifically for small plastic gears.

- T4. The formulas most commonly used to calculate the heating of plastic gears give results that differ from reality in the case of small plastic gears, so a new formula needs to be developed specifically for small plastic gears.**

Related publications: (9), (10), (11)



## 8. ÖSSZEFOGLALÁS

Kisméretű műanyag fogaskerekekkel szinte minden területen találkozhatunk. Megbízható kialakításukhoz azonban nem áll rendelkezésre nemzetközi szabvány, hanem csak regionális, nemzeti vagy cégen belüli irányelvek. Ezért ebben a kutatásban a kisméretű műanyag fogaskerekek legfontosabb tervezési kérdéseit vizsgáltam.

Ehhez első lépésként megvizsgáltam, hogy egyedi- és kis sorozat gyártásnál helyettesíthető-e az ilyenkor költséges fröccsöntési gyártási eljárás 3D nyomtatással. Ennek érdekében összehasonlítottam a három leggyakrabban használt 3D nyomtatási technológiát: az FDM, SLA és az SLS eljárásokat. A vizsgálatokhoz optikai mikroszkópot és mérési sablonokat használtam. Vizsgáltam a fog alakját, a fogvastagságot, az osztást, a fogmagasságot és a fejmagasságot. Ezek alapján az SLA technológia volt messze a legpontosabb és az egyetlen a három közül, amivel lehetséges kisméretű műanyag fogaskerekeket megfelelő pontossággal gyártani.

Következő lépésként azt vizsgáltam, hogy a kisméretű műanyag fogaskerekek hibáit lehetséges-e az átforgatási nyomaték jelleggörbéjének használatával kimutatni és elkülöníteni egymástól. Ez azért volt fontos, mert ezek a hibák elősegíthetik a fogaskerekek túl hamar történő tönkremenetelét. Ezért terveztem és építettem egy mérőberendezést, amivel lehetséges az átforgatási nyomaték mérése. A berendezéssel először a háromféle 3D nyomtatási technológiával gyártott fogaskereket vizsgáltam. Itt ugyanazt kaptam pontosság tekintetében, mint az optikai mikroszkópos mérések esetén. Ezután vizsgáltam a kisméretű műanyag fogaskerekek fogvastagság-, osztás- és tengelytávhibáit. Az eredmények megmutatták, hogy mindhárom hiba kimutatható és hatásaik jól megkülönböztethetők a nyomatékgörbéken.

Ezután végeselemes modell segítségével vizsgáltam, hogy az egyes hibák milyen hatással vannak a fogakon ébredő felületi Hertz-feszültségre és fogtőfeszültségre. Első lépésként validáltam a modellt. Ezután a fogvastagsághibák hatását vizsgáltam, mint mérethibákat. Kimutattam, hogy a felületi feszültség annál nagyobb, minél nagyobb a fogvastagság eltérése bármelyik irányban a szabványoshoz képest. A fogtőfeszültség értéke a hibás fogon annál nagyobb, minél kisebb ennek a fognak a vastagsága. Ezzel ellentétesen a nem hibás fog fogtőfeszültsége annál nagyobb, minél vastagabb a vele érintkező fog. A fog alakhibáinak vizsgálatára az FDM nyomtatott fogaskerekeket vizsgáltam. Az eredmények kimutatták, hogy mind a fogtőfeszültség, mint a felületi feszültség jelentősen megnő alakhibás fogak érintkezésekor. Végül a tengelytáv hibáit vizsgáltam, mint helyzethiba. Az eredmények megmutatták, hogy minél közelebb kerülnek egymáshoz a fogaskerekek a szabványoshoz képest,

annál nagyobb lesz a felületi feszültség az érintkezési helyen. A fogtőfeszültség ezzel szemben annál nagyobb, minél messzebb kerülnek egymástól a fogaskerek.

Végezetül a kisméretű műanyag fogaskerek melegedését vizsgáltam. Ehhez először bemutattam a leggyakrabban használt képleteket, amiket a melegedés számítására használnak. Ezután hőkamerával öt, egymástól független mérést végeztem, amiknek az eredményét összevetettem a képletekkel kapott melegedéssel. Mivel minden esetben nagyobb hőmérsékletet mértem, mint amit a képletekből kaptam, ezért arra a következtetésre jutottam, hogy a képletek nem megfelelőek kis méretek esetén. Ezért új képlet felállítását javaslom kifejezetten kisméretű műanyag fogaskerek esetére.

## 9. SUMMARY

Small plastic gears can be found in almost every field. However, there are no international standards for their reliable design, only regional, national or company guidelines. Therefore, in this research I have investigated the most important design issues for small plastic gears.

As a first step, I investigated whether 3D printing could replace the costly injection moulding process for individual and small series production. To this end, I compared the three most commonly used 3D printing technologies: FDM, SLA and SLS. For the tests I used an optical microscope and measurement templates. I examined tooth shape, tooth thickness, pitch, tooth height and addendum. These showed that the SLA technology was by far the most accurate and the only one of the three that could produce small plastic gears with sufficient accuracy.

Next, I investigated whether it is possible to detect and separate the faults in small plastic gears using the characteristic curve of the recirculation torque. This was important because these defects can contribute to gears failing faster than they should. Therefore, I designed and built a measuring device to measure the recirculation torque. I first used the equipment to test gears manufactured using the three different 3D printing technologies. Here I obtained the same accuracy as for the optical microscope measurements. I then examined the tooth thickness, pitch and centre distance faults of the small plastic gears. The results showed that all three errors are detectable and their effects are well distinguishable on the torque curves.

I then used a finite-element model to investigate the effect of each fault on the surface Hertzian stress and root stress on the teeth. As a first step, I validated the model. I then investigated the effect of tooth thickness faults as dimension deviation. I showed that the greater the deviation of tooth thickness in either direction from the standard, the greater the surface stress. The value of the root stress on the faulty tooth is greater the smaller the thickness of this tooth. Conversely, the greater the thickness of the tooth in contact with the non-faulty tooth, the greater the tooth stress on the non-faulty tooth. FDM printed gears were used to test the form deviations of the tooth. The results showed that both the root stress and the surface stress increase significantly when deformed teeth are in contact. Finally, I investigated centre distance faults as a positional deviation. The results showed that the closer the gears are to each other compared to the standard, the higher the surface stress at the contact area will be. In contrast, the root stress is higher the further the gears are from each other.

Finally, I investigated the heating of small plastic gears. To do this, I first presented the most commonly used formulas to calculate the heating. Then, using a thermal imaging camera, I made five independent measurements and compared the results with the heating obtained using the equations. Since in all cases I measured temperatures higher than those obtained from the

equations, I concluded that the equations are not appropriate for small sizes. I therefore suggest a setting up of a new formula specifically for small plastic gears.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szereték köszönetet mondani mindazoknak, aki támogattak a tanulmányaim és az értekezésem elkészítése során.

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Bihari Jánosnak, aki már BSc-s éveim óta támogatja tanulmányaimat. A PhD értekezésem mellett a pneumobil versenyeken, TDK és OTDK dolgozataim során, illetve szakdolgozatom és diplomamunkám témavezetőjeként is hozzájárult az elért szakmai eredményekhez.

Köszönet illeti a Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézetének minden munkatársát, akik minden felmerülő kérdésben készséggel segítettek, tanácsaikkal és útmutatásaikkal segítették ennek az értekezésnek az elkészülését. Külön köszönet illeti Potyka Attilát, aki számos felmerülő műszaki probléma megoldására adott működőképes javaslatot, emellett a hosszú mérések során tartotta bennem a lelket. Szeretném megköszönni Gere Arankának is, aki a doktori tanulmányaim során minden olyan esetben segített, ami szervezéssel járt. Köszönet illeti Jálics Károlyt is, aki meggyőzött, hogy kezdjem el doktori tanulmányaimat.

Köszönet tartozom a kollégáimnak a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nél, akik lehetővé tették, hogy a munka mellett is lehetőségem legyen elvégezni a kutatásokhoz szükséges méréseket és megírni az értekezést.

Végül szeretném megköszönni szüleimnek és barátaimnak a folyamatos támogatásukat. Köszönöm, hogy mindvégig ösztönöztek a céljaim elérésében és átsegítettek a nehéz időszakokban.

**IRODALOMJEGYZÉK**

- [1] Bihari, J.: Kisméretű műanyag fogaskerekekkel szerelt hajtóművek tűrésezési problémái, GÉP 2016/5-6., pp: 14 – 17, 2016.
- [2] Sarka, F., Bihari, J., Takács, Á., Tóbis, Zs.: Test Method for Investigation of Reactive Loads on Gear Drives with Supporting Function, Lecture Notes In Mechanical Engineering 22 pp. 265-272., 8 p. (2021)
- [3] Bihari J., Kisméretű műanyag fogaskerekek tervezési és fejlesztési kérdései, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2017.
- [4] Bihari J., Kisméretű műanyag fogaskerekekre ható külső hatások vizsgálata, GÉP, vol. 68, no. 3, pp. 15–18, 2017.
- [5] Bihari, J. – Kamondi, L.: Kis méretű műanyag fogaskerekek vizsgálata, GÉP 62:(7-8), pp: 21 – 24, 2011.
- [6] Bae, I. & Kissling, U.: Comparison of strength ratings of plastic gears by VDI 2736 and JIS B 1759 – In vision of building a new international standard, 2019, 10.51202/9783181023556-1267
- [7] LICHARZ GMBH: Designing with engineering plastics. Licharz GmbH, Buchholz, Németország, 2016.
- [8] DuPont: General Design Principles – Module I., Du Pont de Nemours International SA, Genf, Svác, 2003.
- [9] Erhard, G., Strickle, E: Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen, VDI Verlag, Düsseldorf, 1974.
- [10] Moriwaki I., Ueda A., Nakamura M., Yoneda K.: New Japanese Standard JIS B 1759 on load capacity of plastic gears, Proceedings of International Gear Conference 2014, pp. 1172 – 1178, Lyon, France, 2014
- [11] ISO 6336-3, Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 3, 2007.
- [12] DIN 3990 Teil 3, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern – Berechnung der Zahnfußfähigkeit, 1987.
- [13] JIS B 1759:2019 (JGMA/JSA) Estimation of tooth bending strength of cylindrical plastic gears, Japanese Standards Association, Tokyo, 2020.
- [14] Péter J.: A géptervezés alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2017.
- [15] Szendrő P.: Gépelemek, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2007.
- [16] Terplán Z., Lendvay P.: Általános Géptan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
- [17] Komócsin M.: Gépipari anyagismeret, COKOM Mérnökiroda Kft., Miskolc, 1995.
- [18] Tisza M.: Az anyagtudomány alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2008.
- [19] Dudley D., Winter H.: Zahnräder – Berechnung, Entwurf und Herstellung nach amerikanischen Erfahrungen, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961.
- [20] Szota Gy.: Gépelemek IV., Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.

- 
- [21] Antal, M.: Műanyagok gépészeti alkalmazása II. kötet, Gépipari Tudományos Egyesület Kiadványszerkesztési és Műszaki Iroda, Budapest, 1987.
- [22] Antal, M.: Műanyagok gépészeti alkalmazása I. kötet, Gépipari Tudományos Egyesület Kiadványszerkesztési és Műszaki Iroda, Budapest, 1987.
- [23] Bihari, J.: Heating behaviour of small plastic gears, Design of machines and structures 2:(1), pp: 5 – 14, Miskolc, 2012.
- [24] Bihari J., Heating behaviour of plastic gears, in Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tools, 2012, pp. 323–328.
- [25] AGMA 920-B15 Materials for Plastic Gears, American Gear Manufacturers Association, Virginia, 2015.
- [26] Vörös I.: Gépelemek III., Tankönyvkiadó, Budapest, 1972.
- [27] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 1, BeuthVerlag, Berlin, 2016.
- [28] Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, 2003.
- [29] Tadmor Z., Gogos C.: Principles of polymer processing, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [30] Macskási L., Czél Gy., Érseki Cs., Falk Gy., Molnár L.: Műanyagok fröccsöntésének elmélete és gyakorlata, Sunplant Kft., Miskolc, 2024.
- [31] Ghazali, W., Idris, D. & Sofian, A., Siregar, J., Aziz, I.: A review on failure characteristics of polymer gear, MATEC Web of Conferences. 90. 01029., 2017., 10.1051/mateconf/20179001029.
- [32] Jain, M., Patil, S., Ghosh, S.: A review on failure characteristics of polymeric gears, AIP Conference Proceedings, 2148. 030057., 2019. 10.1063/1.5123979.
- [33] Karimpour, M., Dearn, K., Walton, D.: A kinematic analysis of meshing polymer gear teeth, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part L-journal of Materials-design and Applications - PROC INST MECH ENG L-J MATER. 224. 101-115., 2010., 10.1243/14644207JMDA315.
- [34] Xu, Y.: Types and applications of 3D printing, Highlights in Science, Engineering and Technology, 119. 697-702., 2024., 10.54097/26ya9h57.
- [35] Ma, J.: The application of 3D printing in mechanical manufacturing, Applied and Computational Engineering, 117. 44-50., 2025., 10.54254/2755-2721/2025.20112.
- [36] N. Shahrubudina, T.C. Leea, R.Ramlana: An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, 2019.
- [37] Saptarshi S., Zhou C.: Basics of 3D Printing, 3D Printing in Orthopaedic Surgery, M. Dipaola and F. M. Wodajo, Eds., Elsevier, 2019, pp. 17–30. doi: 10.1016/B978-0-323-58118-9.00002-6.
- [38] Thomas D., Claypole T.: 3-D Printing, Printing on Polymers: Fundamentals and Applications, Elsevier Inc., 2015, pp. 293–306. doi: 10.1016/B978-0-323-37468-2.00018-X.
- [39] Hossain, N., Chowdhury, S., Shuvho, M.: 3D printed objects for multipurpose applications, Journal of Materials Engineering and Performance, 30, 4756-4767., 2021.
- [40] Ntousia M.: 3D Printing Technologies & Applications: An Overview, 243-248, 2019.
- [41] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.

- [42] Jandyal A., Chaturvedi I., Wazir I., Raina A., Haq M., 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0, Sustainable Operations and Computers 3, 33-42, 2022.
- [43] Erney Gy.: Fogaskerekek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.
- [44] Zsáry Á.: Gépelemek II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
- [45] Terplán Z.: Gépelemek II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1964.
- [46] Bihari, J.: Kisméretű műanyag fogaskerekes hajtások hibái, GÉP 65:(2), pp: 19 – 22, 2014.
- [47] Bihari, J.- Kamondi, L.: Design grounds of a machine for testing small plastic gears, Advanced Engineering (5), (2011), pp: 15 – 26, 2011.
- [48] VDI 2545 Zahnräder aus thermoplastischen Kunststoffen, BeuthVerlag, Berlin, 1981.
- [49] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 2, BeuthVerlag, Berlin, 2014.
- [50] Hachmann, H., Strickle, E.: Polyamide als Zahnradwerkstoffe, Konstruktion 18 (1966) 3, S. 81-94
- [51] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 4, BeuthVerlag, Berlin, 2016.



**A DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK**

- (1) Marada I., Csörgő Zs., Kovács S.: FDM nyomtatott PLA és kenderszál erősített PLA fogaskerekek pontosságának vizsgálata, In: Barabás, István OGÉT 2024 - XXXII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia : 32nd International Conference on Mechanical Engineering, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2024) pp. 236-241. , 6 p.
- (2) Marada I., Bihari J.: Measuring the effects of faults for the rotational characteristics of small plastic gears, Journal Of Physics-Conference Series 2848 : 1 Paper: 012010 (2024)
- (3) Marada I., Bihari J.: Analysis of small plastic gears manufactured by SLS printing, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 14 : 2 pp. 47-54. , 8 p. (2024)
- (4) Marada I., Bihari J.: Comparing the Accuracy of 3D Printing Methods for Small Plastic Gears, Journal Of Physics-Conference Series (megjelenés alatt)
- (5) Marada I., Bihari J.: A kisméretű műanyag fogaskerékpárok átforgatási nyomatékának vizsgálatára szolgáló berendezések összehasonlítása, GÉP 74 : 4 pp. 106-109. , 4 p. (2023)
- (6) Marada I., Bihari J.: Investigation of tooth thickness faults in small plastic gears, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 14 : 2 pp. 158-166. , 9 p. (2024)
- (7) Marada I., Bihari J.: Kisméretű műanyag fogaskerekek osztáshibáinak vizsgálata, GÉP 75 : 3-4 pp. 65-68. , 4 p. (2024)
- (8) Marada I., Bihari J.: The Analysis of Stresses on Small Plastic Gears with Finite Element Simulation, Journal Of Physics-Conference Series (megjelenés alatt)
- (9) Marada I., Bihari J.: Calculation Methods and Measurement of the Heating of Small Plastic Gears, Lecture Notes In Mechanical Engineering Vehicle and Automotive Engineering 4 pp. 223-236. Paper: Chapter 20, 14 p. (2022)
- (10) Marada I., Bihari J.: Comparison of Methods for Calculating the Heating of Plastic Gears, IOP Conference Series: Materials Science And Engineering 1237 : 1 Paper: 012007 , 10 p. (2022)
- (11) Marada I., Bihari J.: A kisméretű műanyag fogaskerekek melegedésének mérése. GÉP, (megjelenés alatt)