

## 1. A kutatások elméleti alapjai

A kedvezőbb kapcsolódás érdekében a hipoid fogaskerekek és az ívelt fogú kúpkerékek korrigált fogfelülettel készülnek, aminek eredményeként az elméletileg konjugált fogfelületek vonalérintkezése helyett pontérintkezés lép fel. Ezen korrekció történhet az elméletileg helyes gépbeállítás, vagy a fogfelületeket kimunkáló szerszám átmérőjének, illetve profiljának a megváltoztatásával. Kutatásaink során meghatároztuk egy ilyen korrigált gépbeállításnak és a fogakat megmunkáló szerszám geometriájának megfelelő fogfelületek valós geometriáját és az így kialakított fogak egymással történő kapcsolódásának a jellemzőit, mint például, a fogaskerekek egy meghatározott relatív helyzetének megfelelő, a fogfelületek között jelentkező, hézag alakját és nagyságát. Ugyancsak meghatároztuk a fogfelületi korrekciók eredményeként fellépő áttételi szám ingadozását, vagyis a hajtott kerék szögelfordulási hibáját.

A kapcsolódó felületek terheletlen állapotban fellépő elméleti pontérintkezése, az eddig alkalmazott elmélet szerint, terhelés alatt, egy ellipszis alakú érintkezési felületté alakul át, ami kutatásaink alapján, egyes esetekben, csak durva közelítése a valóságban létrejövő érintkezési felületnek. Az új módszer alap gondolata, hogy terhelés alatt ez a pontérintkezés egy meghatározott vonal teljes hosszában, vagy rész hosszában húzódó, kis szélességű, felületi érintkezésbe megy át. Ezen "potenciális" érintkezési vonalat azon megfontolásból határoztuk meg, hogy a fogszélesség irányában ezen vonal azon pontok mértani helye, mely pontokban a kapcsolódó felületek közötti hézag minimális értékű. Kidolgoztunk egy matematikai módszert, amely a felületek közötti távolságot leíró függvény értékének a minimalizációján alapul, s amely egy hét egyenletről álló egyenletrendszer megoldásaként megadja a "potenciális" érintkezési vonal pontjainak a koordinátáit.

A továbbiakban meghatároztuk a "potenciális" érintkezési vonal pontjaiban a fogfelületek normál görbületét, vagyis azon görbületet, amely a fogfelületeknek a "potenciális" érintkezési vonalra merőleges metszősíkjához tartozik. A fogfelületek így meghatározott görbületére a terheléssel szétosztás számításánál van szükség.

Következő lépésként elvégeztük az íveltfogú kúpkerékpár és a hipoid fogaskerékpár terhelés alatti kapcsolódásának a vizsgálatát. A kapcsolódó fogak között és mentén fellépő terheléssel szétosztás meghatározására, a fogak valós geometriájának a figyelembevételével, amint már említettük, egy új módszert dolgoztunk ki. A módszer lényege, hogy terhelés alatt a pontérintkezés felületi érintkezésbe megy át a "potenciális" érintkezési vonal teljes vagy rész hosszában. A módszer figyelembe veszi a fogak hajlításból és nyírásból eredő deformációját, a fogak lokális Hertz-féle összenyomódását, a tengelyek alakváltozását, a kapcsolódó fogaskerekek beállítási hibáit, valamint a csapágyakban fellépő hézagokat.

A fogak hajlításból és nyírásból eredő deformációjának a számítására kidolgoztunk két, a végeselem-módszeren alapuló, számítógépes programot az ívelt fogú kúpkerékek illetve a hipoid fogaskerekek fogaiban fellépő feszültségek és deformációk meghatározására. Tekintettel a kutatott fogaskerekek összetett geometriájára, egy 20 csomóponttal rendelkező, izoparametrikus végeselemet alkalmaztunk. Külön módszert dolgoztunk ki a végeselemhálózat automatikus képzésére a fogakban és a keréktestben, amely módszer a fogak pontos geometriáján alapul, s ez mellett lehetővé teszi az elemek és csomópontok számára a tetszőleges megválasztását a fogaskerekek egyes tartományaiban: a fogakban, a fogtőben és a fogaskerék testében. Ezzel lehetővé vált az eredmények konvergenciójának a vizsgálata a háló sűrűségének a függvényében és a legmegfelelőbb végeselemháló kiválasztása. A módszer utolsó lépéseként, az előírt határfeltételekkel összhangban, meghatároztuk a peremcsomópontok elmozdulását. Az ezen elméleti alapokon megalkotott számítógépes programokat leteszteltük és alkalmassá tettük a megfelelő elmozdulások és feszültségek számítására a terheléssel szétosztást meghatározó módszer szükségleteinek a kielégítésére. Ezen számítógépes programok sorozatos futtatásával és a kapott eredmények regresszióanalízises feldolgozásával,

egyenleteket fejlesztettünk ki, amelyek segítségével egyszerűen és gyorsan számíthatók az ívelt fogú kúpkerékek és hipoid fogaskerekek fogainak hajlításból és nyírásból eredő deformációi és a bennük fellépő feszültségek. Az egyenletek segítségével meghatározható a fog bármely felületi pontjának az elmozdulása, egy a fogfelület bármely másik pontjában ható erő hatására, illetve a maximális fogtőfeszültségek számítása tetszőleges foghosszmenti keresztmetszetben. Ezen egyenletek alkalmazása különleges jelentőséggel bír, mivel a terheléseloszlást leíró nemlineáris egyenletrendszer csak egy közelítő és iterációs módszer segítségével oldható meg, s a végeelem-módszer közvetlen használata az iteráció folyamán a fogak deformációjának a számítására meglehetősen időigényes.

A terheléseloszlást számító módszer a fogdeformációk kompatibilitásán alapul: A pillanatnyilag kapcsolódásban lévő fogfelületi pontok elmozdulásának összhangban kell lennie a hajtott fogaskerék pillanatnyi szögelfordulásával és az átvitt nyomatékkal. Mivel az így kapott egyenletrendszer nem oldható meg zárt formában, a következő módszert dolgoztuk ki: A pillanatnyi kapcsolódásban lévő fogpárok potenciális érintkezési vonalait felosztottuk nagyszámú kis szegmensre és a szegmensekre ható fognyomást koncentrált erőkkkel helyettesítettük a szegmensek középpontjában. Alkalmazva ezen pontok elmozdulására vonatkozó kompatibilitási feltételt, iteráció segítségével meghatároztuk az egyes szegmens-középpontokban ható erőket, amelyek összessége meghatározza a terhelés-, valamint fognyomás-eloszlást. A számítási módszer eközben ellenőrzi, hogy a szegmens-középpontok, a helyi deformációk hatására, pillanatnyilag érintkezésben vannak-e. A terheléseloszlás számításának melléktermékeként kiadódik a hajtott fogaskerék pillanatnyi szögelfordulása és annak eltérése az elméletitől, vagyis a fogaskerékáttételi szám ingadozása. Az így kifejlesztett elmélet gyakorlati alkalmazására megalkottuk a megfelelő számítógépes programokat.

Ezen számítógépes programok segítségével kivizsgáltuk a gépbeállítási paraméterek befolyását a kapcsolódás jellegére és minőségére: a pillanatnyi, elméleti érintkezési pont pályájára a fogaskerekek legördülése folyamán, a "potenciális" érintkezési vonalak helyzetére, a fogaskerekek egyes helyzeteiben a fogfelületek között fellépő hézagok alakjára és nagyságára, valamint a terheléseloszlásra. Az aktuális terheléseloszlás alapján kiszámítottuk a fogak között fellépő maximális felületi nyomást, valamint a hajtott nagykerék összetett szögelfordulási hibáját. A kapott eredmények alapján meghatároztuk a gépbeállítási paraméterek optimális értékét.

A további kutatások folyamán meghatároztuk a hipoid fogaskerekek optimális fogmódosítását a kiskerék fogát kimunkáló szerszám profiljának és átmérőjének optimális megválasztásával. A szerszám profilja, a szokásos egyenes vonal helyett, két különböző sugarú körívből áll, amely körívek a főpontban érintkeznek és közös érintőjük dőlésszöge az adott profilszög. Kivizsgáltuk ezen módosítások hatását a fogak kapcsolódására: a terheléseloszlásra és a hajtott nagykerék szögelfordulási hibájára. Az így kapott eredmények alapján meghatároztuk a szerszám optimális átmérőkorrekcióját és a kés profilját alkotó két körív optimális sugarát és helyzetét.

Az előbbieken ismertetett elméleti alapok és számítógépes programok segítségével kivizsgáltuk ívelt fogú kúpkerékek és hipoid fogaskerekek esetében a fogaskerekek geometriai paramétereinek, valamint a foghiba és a fogaskerék-tengelyek beállítási hibájának a hatását a fogoldalak pillanatnyi érintkezési pontjának a pályájára a fogaskerekek legördülése folyamán, a potenciális érintkezési vonalak alakjára és helyzetére, a fogaskerekek egyes helyzeteiben a fogfelületek között fellépő hézagok alakjára és nagyságára, a terheléseloszlásra és hordképre, valamint a hajtott fogaskerék elfordulási szögének a hibájára.

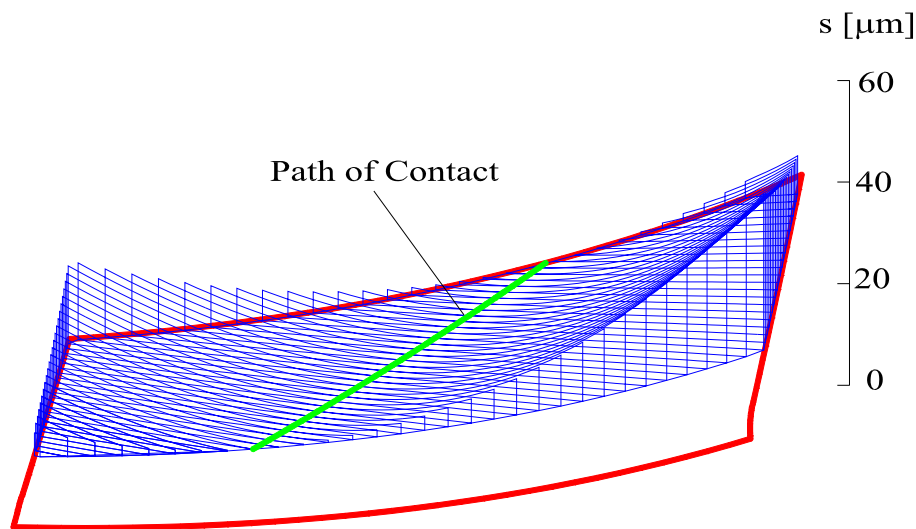
Kutatásaink során kidolgoztunk egy új módszert a hipoid fogaskerékpár és az íveltfogú kúpkerékpár termo-elasztohidrodinamikus kenésvizsgálatára, amely magában foglalja a kenőanyag viszkozitásának nyomás- és hőmérsékletfüggőségét, valamint a kapcsolódó felületek deformációit. Ugyancsak figyelembe veszi a kenőanyag sűrűségének a nyomás általi változá-

sát, valamint a kenőanyagréteg és a kapcsolódó fogak közötti hőátadást. Ebből kifolyólag, ezen kenésvizsgálat a Reynolds, energetikai, rugalmassági és Laplace-féle egyenletek szimultán megoldásán alapul. Tekintettel arra, hogy az így kapott, erősen nemlineáris, integro-differenciális egyenletrendszer zárt alakban nem oldható meg, a véges differenciák módszerét, numerikus integrálást, valamint a sorozatos közelítések módszerét alkalmaztuk. A megoldás részelemei: a nyomás- és hőmérsékleteloszlás a kenőanyagrétegben, a kapcsolódó felületeknek az olajnyomás által kiváltott deformációi, a hőmérsékleteloszlás a fogaskerekben, a kenőanyagréteg hidrodinamikusan terhelhetősége, valamint a kenőanyagrétegben fellépő súrlódási veszteségek. Az ezen módszer alapján felépített számítógépes program segítségével kivizsgáltuk a fogaskerek tervezési, üzemeltetési és a használt kenőanyag paramétereinek hatását a kenési viszonyokra.

## 2. Az eredmények kivonatos ismertetése

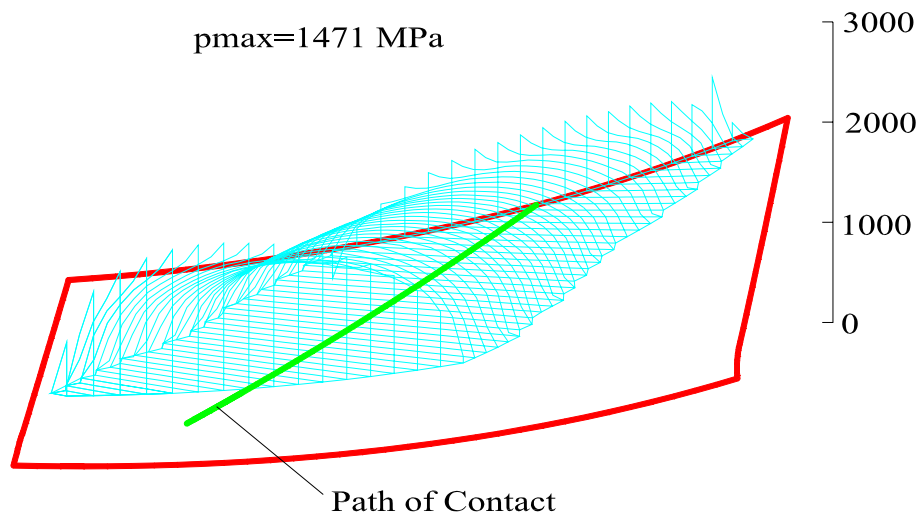
A kutatás eredményeinek a részletes ismertetésére a jelentés mellékleteként megadott közleményekben került sor, itt csak az eredmények kivonatos bemutatása következik.

Az 1. ábrán az íveltfogú kúpkerék kapcsolódása folyamán fellépő pillanatnyi érintkezési pontok által alkotott görbe (zöld vonal), a fogaskerek 21 pillanatnyi kapcsolódási helyzetének megfelelő potenciális érintkezési vonalak és az azok mentén, a fogfelületek között jelentkező hézagok (kék vonalak) kerültek bemutatásra.



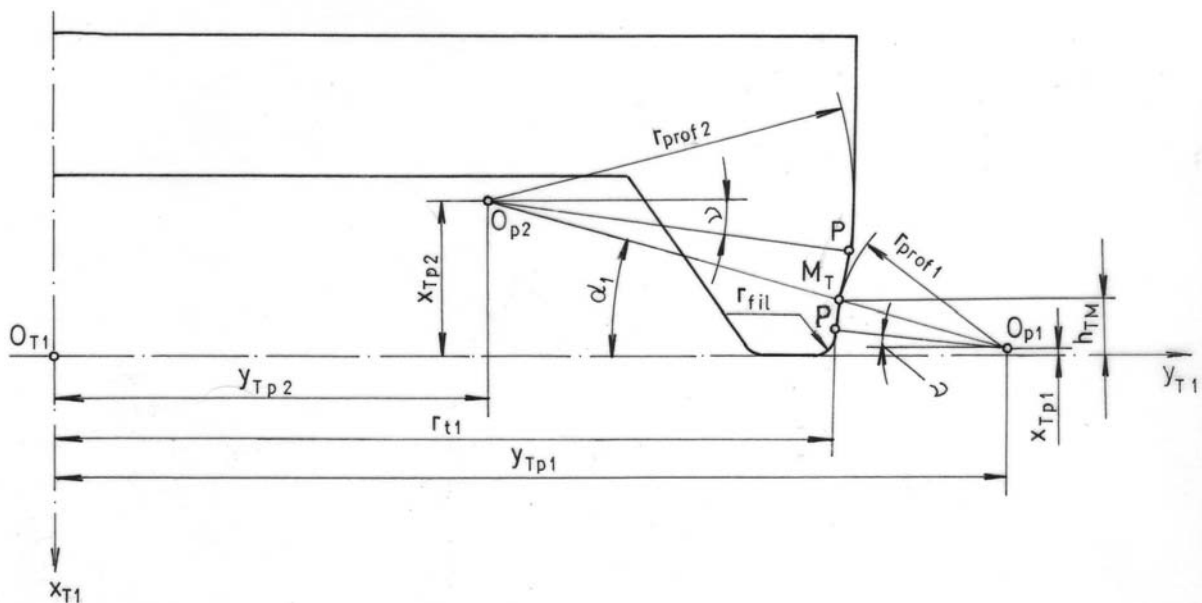
1. ábra A pillanatnyi érintkezési pontok görbéje, potenciális érintkezési vonalak és fogfelületek közötti hézagok a potenciális érintkezési vonalak mentén íveltfogú kúpkerék esetében

A 2. ábrán ugyanezen íveltfogú kúpkerék fogai között fellépő fognyomás-eloszlás látható, szintén a fogaskerek 21 pillanatnyi kapcsolódásbeli helyzetének megfelelően.



2. ábra A pillanatnyi érintkezési pontok görbéje és fognyomáseloszlás íveltfogú kúpkerékek esetében

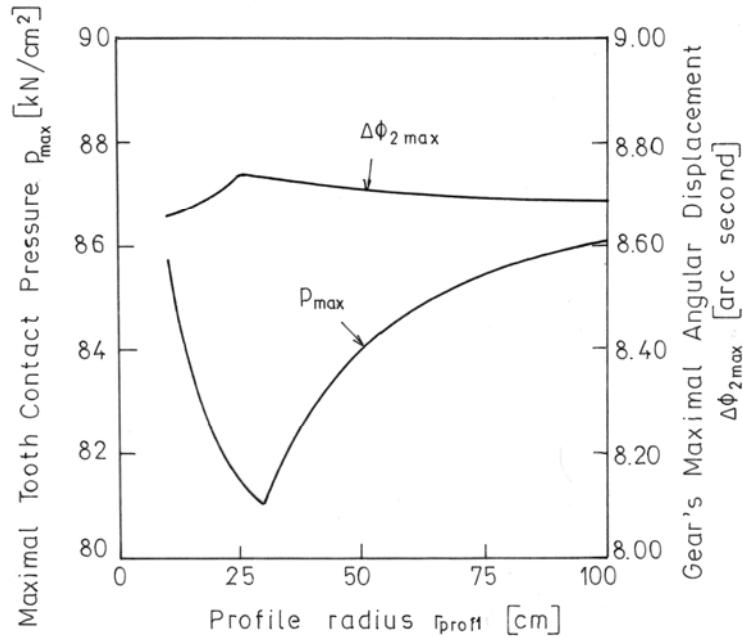
A hipoid fogaskerekek optimális fogmódosítása a 3. ábrán bemutatott, a kiskerék fogát kimunkáló, szerszám profiljának és átmérőjének optimális megválasztásával történt. A szerszám profilja, a szokásos egyenes vonal helyett, két különböző sugarú körívből áll, amely körívek a főpontban érintkeznek és közös érintőjük dőlésszöge az adott profilszög.



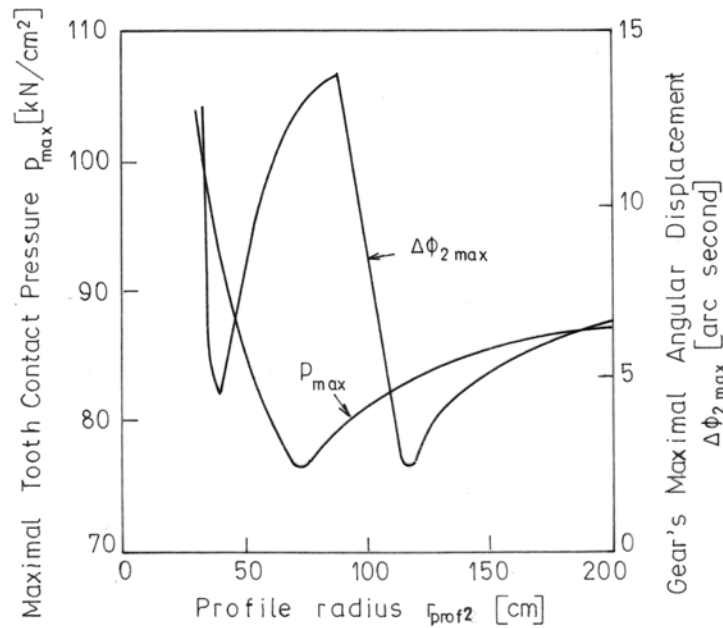
3. ábra A hipoid fogaskerékpár kiskerekének fogait kimunkáló szerszám profilja

Az optimalizáció kritériuma a maximális fogfelületi nyomás és a hajtott nagykerék szögelfordulási hibájának a minimizációja volt. Egyben kivizsgáltuk a tengelyek beállítási szöghibájának a hatását a fognyomásra és az áttételi hibára. A 4.-6. ábrák a szerszámprofil körívsugarainak, illetve a szerszám sugárváltozásának a befolyását mutatják a maximális fogfelületi nyomásra ( $p_{max}$ ), illetve a hajtott fogaskerék szögelfordulási hibájára ( $\Delta\phi_{2max}$ ). A számított

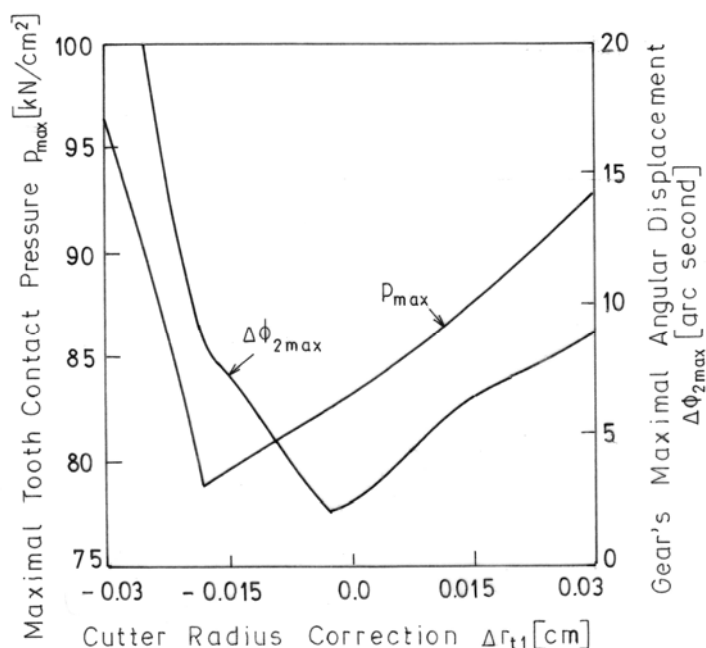
eredmények alapján az optimális profilkörív-sugarak  $r_{\text{prof1}} = 300 \text{ mm}$  és  $r_{\text{prof2}} = 1150 \text{ mm}$ , az optimális szerszámsugár korrekció pedig  $\Delta r_{11} = -0.18 \text{ mm}$ . Ezekkel a szerszámadatokkal a maximális fogfelületi nyomást 16.22 %-kal, a hajtott kerék szögelfordulási hibáját pedig 178.72 %-kal sikerült csökkenteni.



4. ábra Az  $r_{\text{prof1}}$  szerszámprofil-sugár befolyása a maximális fogfelületi nyomásra és a hajtott fogaskerék szögelfordulási hibájára



5. ábra Az  $r_{\text{prof2}}$  szerszámprofil-sugár befolyása a maximális fogfelületi nyomásra és a hajtott fogaskerék szögelfordulási hibájára



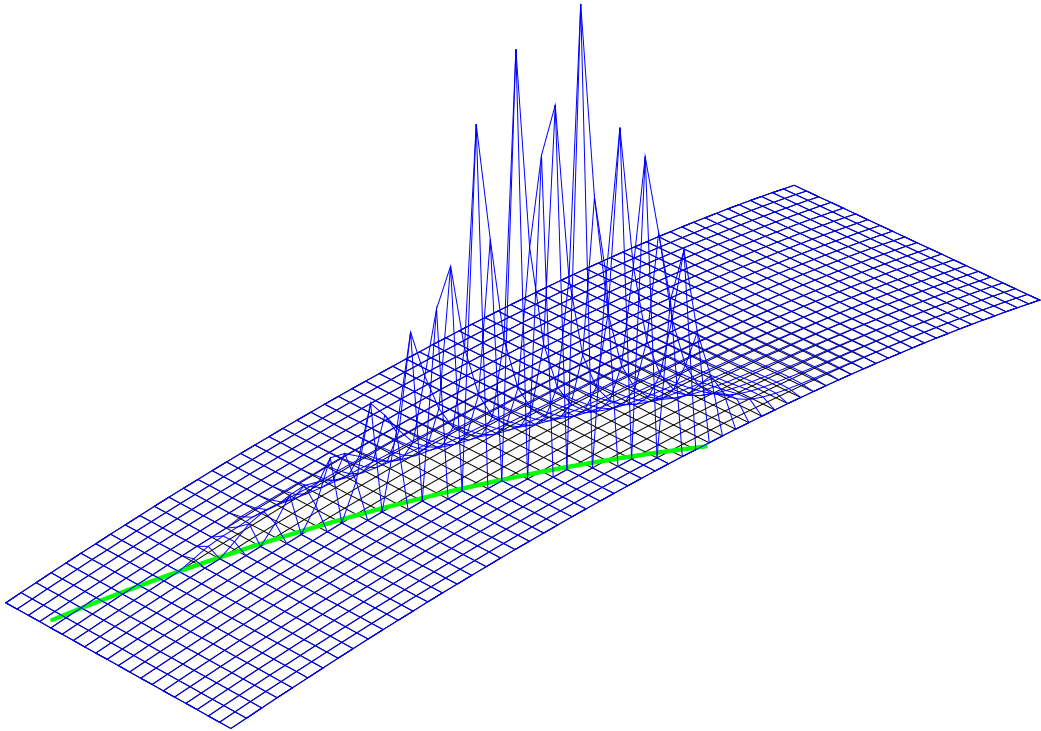
6. ábra A  $\Delta r_{t1}$  szerszámsugár-változás befolyása a maximális fogfelületi nyomásra és a hajtott fogaskerék szögelfordulási hibájára

Ugyancsak kivizsgáltuk a gépbeállítási paraméterek befolyását a fogak között fellépő maximális felületi nyomásra valamint a hajtott nagykerék összetett szögelfordulási hibájára. A számítások azt mutatják, hogy a gépbeállítási paraméterek optimalásával a maximális fogfelületi nyomás további 5.8 %-kal, a hajtott kerék szögelfordulási hibája pedig 65.4 %-kal csökkenthető.

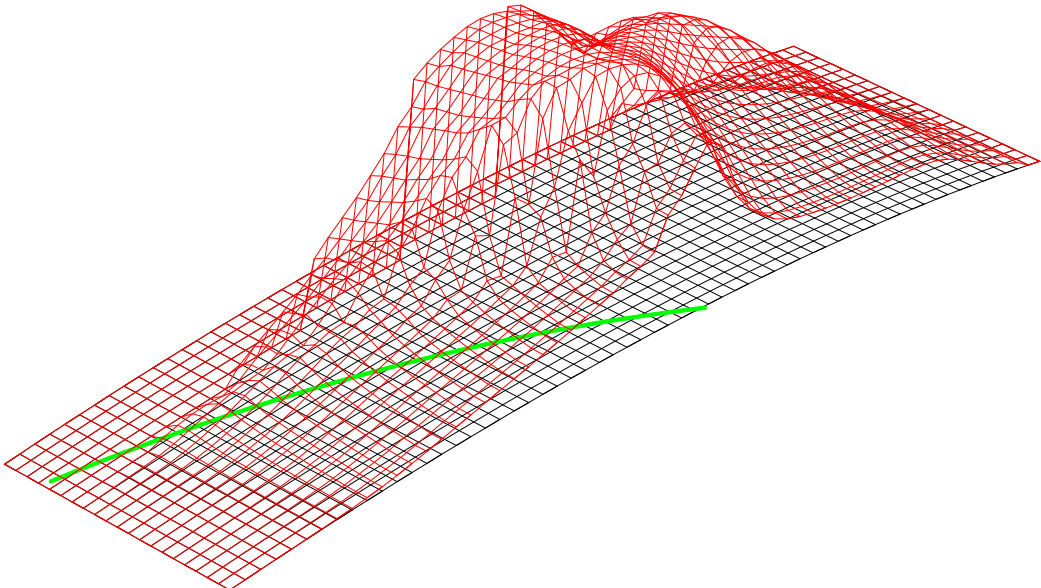
Az előbbieken ismertetett módszer és a megfelelő számítógépes program segítségével elvégeztük a hipoid fogaskerékpár termo-elasztohidrodinamikusan vizsgálatait. A számítások eredményeként a nyomás- és hőmérsékleteloszlást a kenőanyagrétegben, a kapcsolódó felületeknek az olajnyomás által kiváltott deformációit, a hőmérsékleteloszlást a fogaskerekben, a kenőanyagréteg hidrodinamikusan terhelhetőségét, valamint a kenőanyagrétegben fellépő súrlódási veszteségeket kaptuk. Kivizsgáltuk a fogaskerek tervezési, üzemeltetési és a használt kenőanyag paramétereinek hatását a kenési viszonyokra. A kapott eredmények alapján kiválasztható a legkedvezőbb fogaskerékpár konstrukció és a legmegfelelőbb tulajdonságokkal rendelkező kenőanyag. A 7. és 8. ábrán az olajfilmben fellépő nyomás és hőmérsékleteloszlás került bemutatásra, miközben zölddel a pillanatnyi potenciális érintkezési vonalat jeleltük, vagyis a fogfelületek közötti hézag minimális értékeinek a helyét.

### 3. Önértékelés

A leírtakból kitűnik, hogy a tervezett kutatásokat teljes egészében elvégeztük és az alkalmazott módszerek, valamint a kapott eredmények bizonyítják a kutatások tudományos megalapozottságát, illetve az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságát.



7. ábra Nyomáseloszlás az olajfilmben



8. ábra Hőmérséklet-eloszlás az olajfilmben