

# ZÁRÓJELENTÉS

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, lokalizált hordképpel. A fogfelületek módosításának a célja a terheléseloszlás egyenletesebbé tétele, az áttétel ingadozásának a csökkentése és az élmenti érintkezés elkerülése, amely a gyártásban jelentkező fogfelületi hibák, valamint a beépítés utáni, a kapcsolódó fogaskerekeknek egymáshoz viszonyított helyzethibái eredményeként jelentkezik. Az elméleti pontérintkezés terhelés alatt felületi érintkezésbe megy át. A fogfelületek módosítása történhet az elméletileg helyes gépbeállítás, vagy a fogfelületeket kimunkáló szerszám átmérőjének, illetve profiljának a megváltoztatásával.

Az új, hatszabadságfokú, CNC szerszámgépek kifejlesztésével (mint amilyen a Gleason Phoenix), lehetővé vált egy új, más típusú fogfelület-módosítás a szerszámgép-beállítás megfelelő törvényszerűség szerinti folyamatos változtatásával a megmunkálás folyamán. Ezen új gépek adta lehetőséget alkalmaztuk a fogaskerekek optimalizálásához.

## 1. A kutatások elméleti alapjai

Meghatároztuk a hipoid fogaskerekek és íveltfogú kúpkerékek geometriáját a hatszabadságfokú, CNC szerszámgépek mozgáslehetőségeinek függvényében, valamint kiválasztottuk azon szerszámgép-beállítási paramétereket, amelyek lehetővé teszik a fogfelületgeometria optimális változtatását. Kivizsgáltuk az egyes szerszámgépbeállítási paraméterek különböző függvények szerinti változtatásának a befolyását a pillanatnyi érintkezési pontok nyomvonalának és a "potenciális" érintkezési vonalaknak az alakjára és helyzetére a fogaskerekek legördülése folyamán, valamint a fogaskerekek egyes pillanatnyi helyzeteiben a fogfelületek között fellépő hézag alakjára és nagyságára. Ezen "potenciális" érintkezési vonalak a következőképpen értelmezhetők: A fogfelület-módosítások alkalmazásának eredményeként, terheletlen állapotban, elméletileg pontérintkezés lép fel a kapcsolódó fogfelületek között, azonban terhelés alatt ez a pontérintkezés felületi érintkezésbe megy át. Az általános feltételezés szerint az érintkezési felület ellipszis alakú. Azonban a témavezető korábbi kutatásai azt bizonyítják, hogy tekintettel a fogfelület-módosítások aránylag kis mértékére (nagyobb felület-módosítások esetén lényegesen csökkenne a fogaskerékpár terhelhetősége), hipoid fogaskerekek, kúpkerékek és hengeres csigahajtások esetében, az elméleti pontérintkezés terhelés alatt egy meghatározott vonal mentén elhelyezkedő, kis szélességű, felületi érintkezésbe megy át. Ezt a vonalat neveztük el "potenciális" érintkezési vonalnak. Matematikai meghatározása szerint, a "potenciális" érintkezési vonal azon pontok mértani helye, mely pontokban a kapcsolódó felületek közötti hézag minimális értékű a fogaskerekek egy adott helyzetében. A kapcsolódó felületek közötti hézagot leíró függvény minimizációjával meghatároztuk a "potenciális" érintkezési vonal pontjainak a koordinátáit.

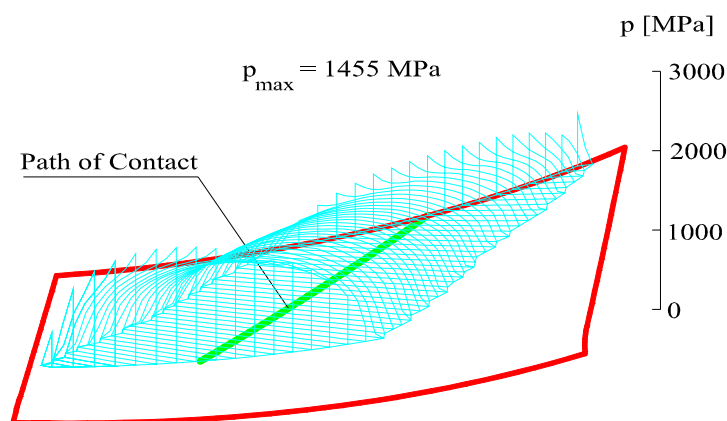
Az elméleti kutatásokat a megfelelő számítógépes szimuláció segítette. Az újonnan kifejlesztett számítógépes program segítségével kivizsgáltuk a hajtó kúpfogaskerék fogainak kimunkálása folyamán, a szerszámgépen alkalmazott áttétel különböző függvények szerinti változtatásának a befolyását a "potenciális" érintkezési vonalaknak az alakjára és helyzetére, a fogaskerekek egyes pillanatnyi helyzeteiben a fogfelületek között fellépő hézag alakjára és nagyságára, valamint a hajtott fogaskerék elfordulási szöghibájára, vagyis a fogaskerékpár áttételének az ingadozására.

Elvégeztük az új módszerrel származtatott hipoid fogaskerek és íveltfogú kúpkerék kapcsolódásának terhelés alatti vizsgálatát, ami magában foglalta a terheléeloszlás meghatározását a pillanatnyilag kapcsolódásban lévő fogpárok között, valamint ezen fogpárok érintkezési vonalai mentén. A számítási módszer figyelembe veszi a fogak, fogaskeréktetek és tengelyek deformációját, a gyártásból eredő foghibákat, valamint a fogaskerek egymáshoz viszonyított helyzethibáit.

Elvégeztük a hipoid fogaskerékpár és íveltfogú kúpkerékpár termo-elasztohidrodinamikusanésvizsgálatát. A módszer a Reynolds-féle hidrodinamikai, a rugalmassági, az energetikai és a Laplace-féle hővezetési egyenletek szimultán megoldásán alapul. Figyelembe vettük az olaj viszkozitásának és sűrűségének nyomás- és hőmérséklet függőségét. A számítási módszer a fogaskerékpárok valós geometriáján és kinematikáján alapul, tehát a fogak közötti valós hézag határozza meg a kenőfilm alakját és vastagságát, valamint a fogfelületek valós relatív sebessége szerepel a Reynold's és energia egyenletekben. Az egyenletrendszer bonyolultságára való tekintettel, a véges különbségek módszerét, numerikus integrálást, valamint a sorozatos közelítések módszerét alkalmaztuk megoldására. Eredményként az olajfilmben létrejövő nyomás- és hőmérsékleteloszlást, a fogfelületek deformációját és a fogakban fellépő hőmérsékleteloszlást kaptuk. Ezen eredmények szolgáltak alapul az olajfilm hidrodinamikai terhelhetőségének és az olajfilmben fellépő energiaveszteségeknek a meghatározására.

## 2. Az eredmények kivonatos ismertetése

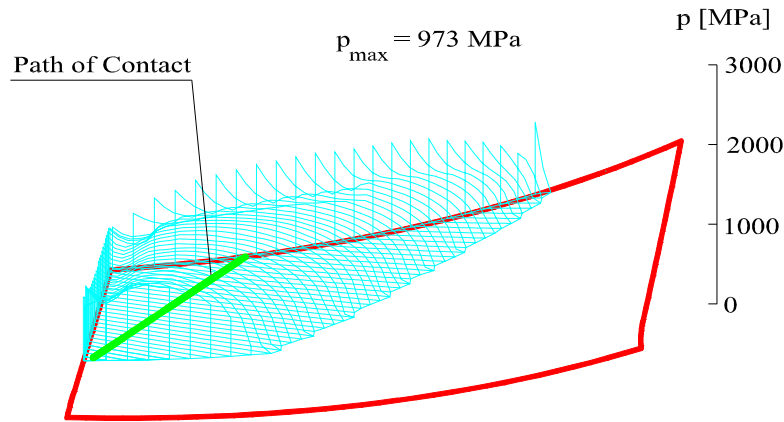
A hajtó kisfogaskerék fogfelületét módosítottuk a szerszámgép-beállítási paraméterek megfelelő változtatásával. Kivizsgáltuk az egyes szerszámgép-beállítási paraméterek befolyását a maximális fogfelületi nyomásra, terheléeloszlási tényezőre és a hajtott nagykerék összetett szögelfordulási hibájára. Arra a megállapításra jutottunk, hogy a maximális felületi nyomásra a késfej tengely irányú eltolása (sliding base setting) és hipoid eltolása (blank offset) vannak a legnagyobb befolyással. Optimalizálással a maximális felületi nyomás 33%-kal csökkenthető (1. és 2. ábrák), azonban ezzel párhuzamosan lényegesen növekszik a hajtott nagykerék összetett szögelfordulási hibája.



1. ábra Fogfelületi nyomáeloszlás a szerszámgép alapbeállítása esetén

Tekintettel arra, hogy a hajtott nagykerék szögelfordulási hibája nagy befolyással van a fogaskerékpár egyenletes járására, valamint a fogaskerékpár által gerjesztett dinamikus erőkre, ezért külön figyelmet fordítottunk a fogaskerékpár áttételének mind egyenletesebbé tételére.

Ennek érdekében vizsgáltuk a késfej sugárirányú eltolásának (basic radial) és a szerszámgép kinematikai lánc áttételének a változtatását leíró függvény alakjának a befolyását a hajtott nagykerék szögelfordulási hibájára. Az eredmények azt mutatják, hogy a „basic radial” két optimalizált ötödfokú polinom (1) szerinti változtatásával (egy fog megmunkálásának a ciklusát két részre osztottuk a kedvezőbb eredmények érdekében), a fogaskerék áttételének az ingadozása 81%-kal csökkenthető (3. ábra), a szerszámgép kinematikai lánc áttételének két negyedfokú polinom (2) szerinti változtatása esetén pedig 63%-kal kisebb a fogaskerékpár áttételének az ingadozása (4. ábra). Ezzel párhuzamosan, 4%-kal (5. ábra), illetve 7%-kal (6. ábra) csökken a maximális felületi nyomás is.



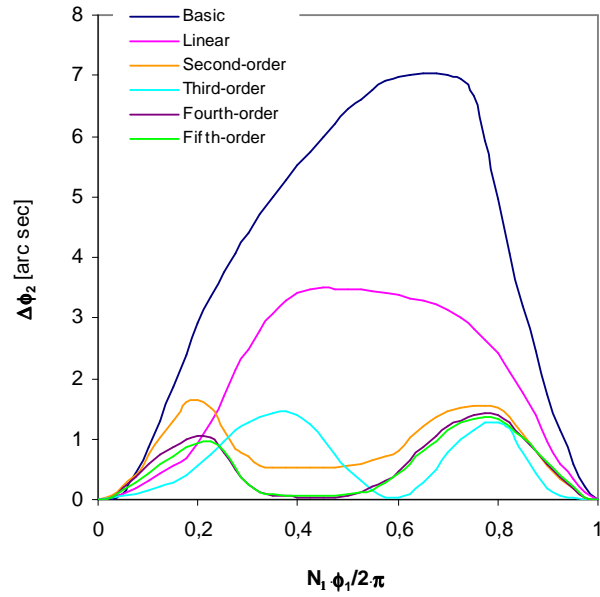
2. ábra Fogfelületi nyomáseloszlás a szerszámgép optimális beállítása esetén

$$e_p^{(1)} = e_{p0} + 0.025 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0}) - 6.4 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^2 + 6.25 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^3 - 9 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^4 - 6 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^5 \quad (1)$$

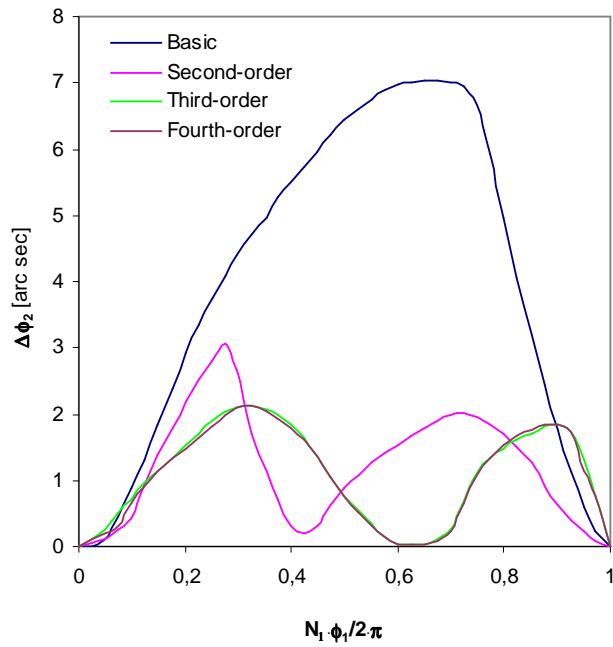
$$e_p^{(2)} = e_{p0} + 0.133 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0}) - 0.125 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^2 - 0.275 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^3 + 8.75 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^4 + 24 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^5$$

$$\psi_1^{(1)} = \psi_{10} + i_{gp} \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0}) + 0.2425 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^2 - 0.065 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^3 - 0.0075 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^4 \quad (2)$$

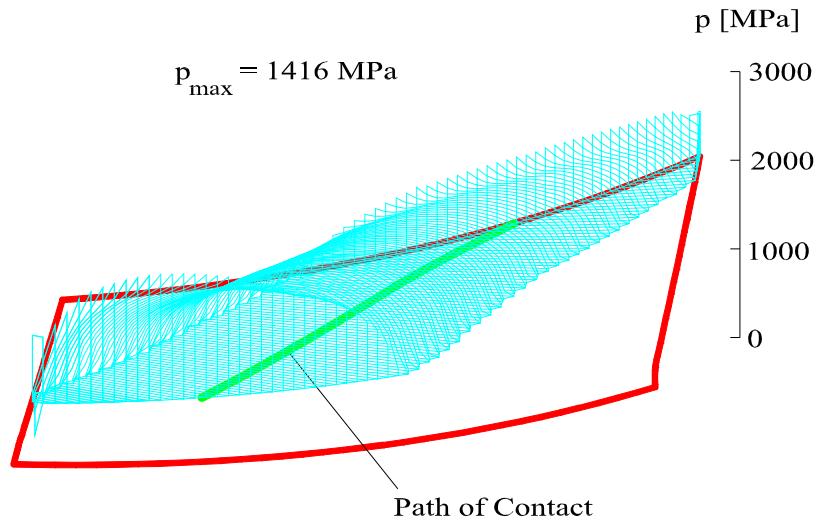
$$\psi_1^{(2)} = \psi_{10} + i_{gp} \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0}) - 0.01925 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^2 - 0.0205 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^3 - 0.0075 \cdot (\psi_{cp} - \psi_{cp0})^4$$



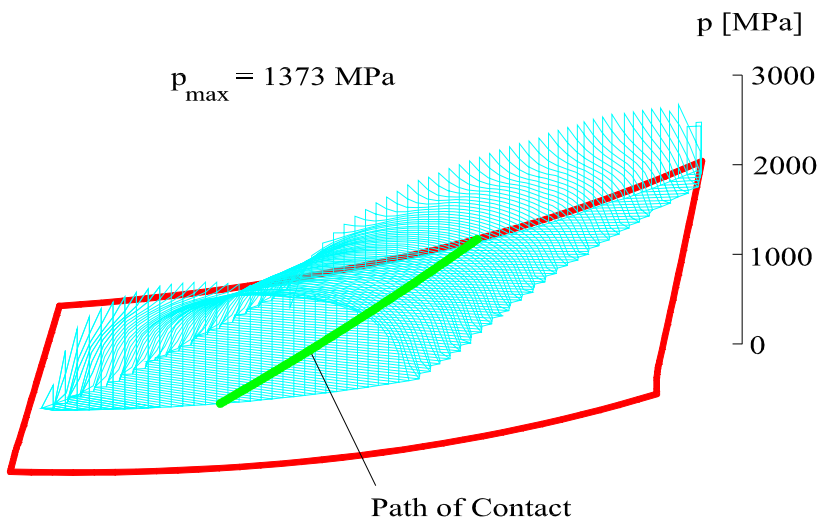
3. ábra A hajtott fogaskerék szögelfordulási hibájának a változása egy kapcsolódási ciklus folyamán a „basic radial” különböző fokú polinomokkal való változtatása esetén



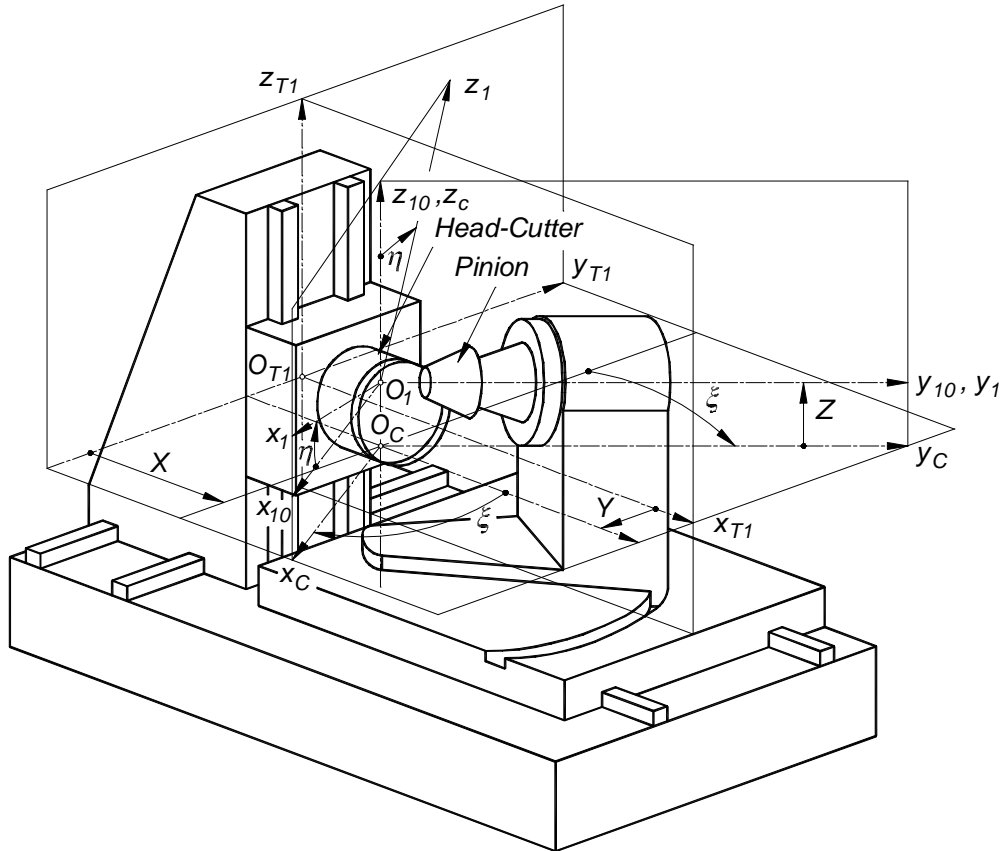
4. ábra A hajtott fogaskerék szögelfordulási hibájának a változása egy kapcsolódási ciklus folyamán a szerszámgép kinematikai lánc áttételének különböző fokú polinomokkal való változtatása esetén



5. ábra Fogfelületi nyomáeloszlás a „basic radial” optimális változtatása esetén



6. ábra Fogfelületi nyomáeloszlás a szerszámgép kinematikai láncáttételének optimális változtatása esetén



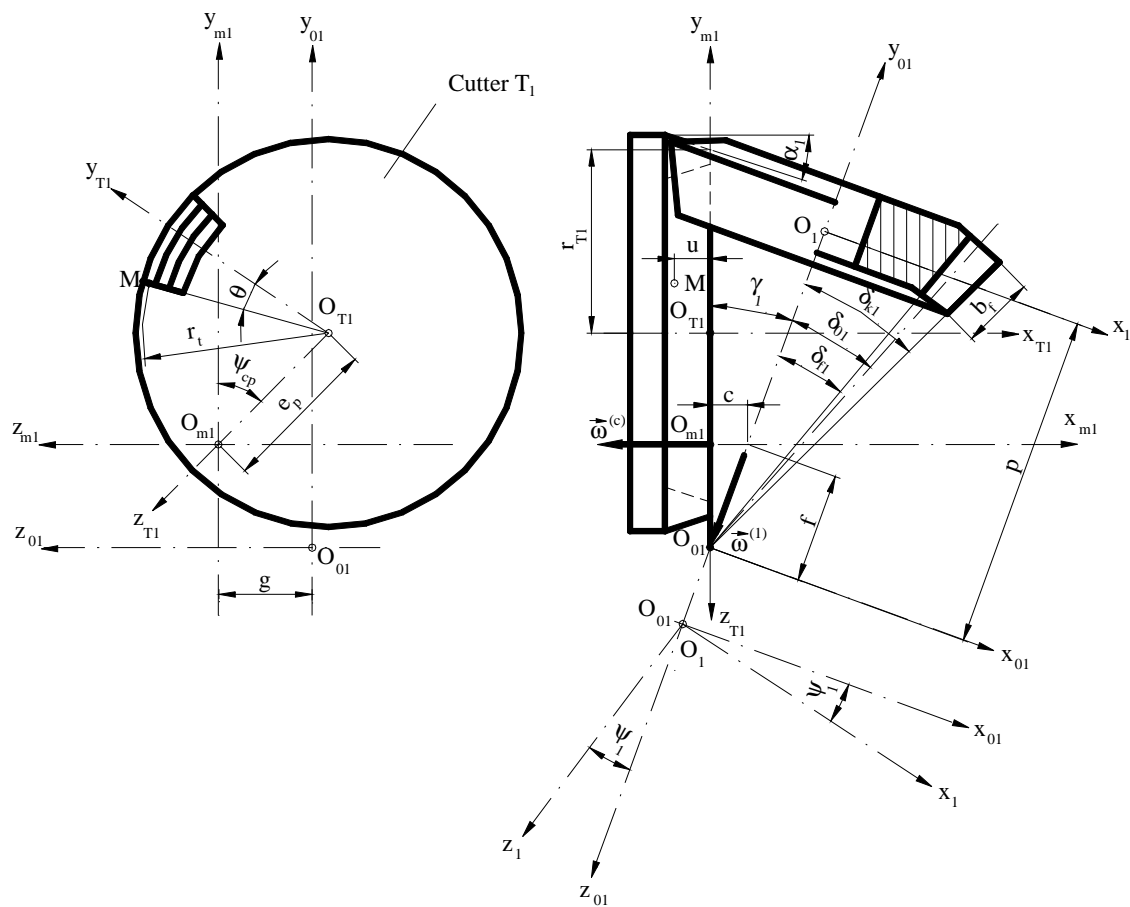
7. ábra CNC típusú, íveltfogú kúpkerékeket és hipoid fogaskerekeket megmunkáló, szerszámgép kinematikai vázlata

Meghatároztuk az összefüggéseket a CNC (7. ábra) és a klasszikus (8. ábra) íveltfogú kúpkerékeket és hipoid fogaskerekeket megmunkáló szerszámgépek mozgásparamétereinek között. A 9. ábra a CNC fogazógép mozgásparamétereinek a változását szemlélteti a klasszikus fogazógép alapelfordulási szögének ( $\psi$ ) a függvényében, nem módosított fogfelülettel rendelkező fogaskerékpár esetében. A 10. ábra a CNC fogazógép mozgásparamétereinek a különbségét mutatja be fogfelület-módosítások esetén.

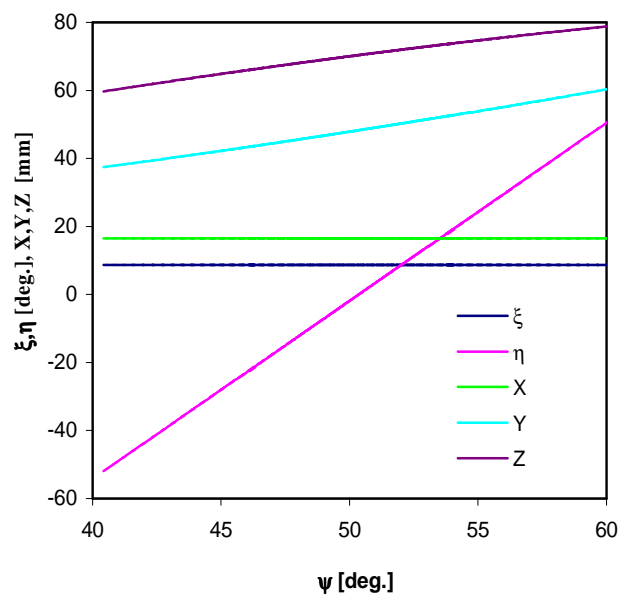
Az erre a feladatra kifejlesztett számítógépes programmal megvizsgáltuk a szerszámgép-beállítási paraméterek változtatására felállított függvények befolyását a kenési viszonyokra és paraméterekre. Meghatároztuk az alkalmazott olajok és üzemi körülmények, valamint a foghibák és a fogaskerekek helyzethibájának a befolyását az olajfilmben fellépő maximális nyomásra és hőmérsékletre, valamint a fogaskerékpár hidrodinamikai terhelhetőségére és az olajfilmben fellépő veszteségekre.

A kapott eredmények alapján meghatároztuk az optimális fogaskerékkapcsolódási viszonyokat biztosító foggenerálási törvényszerűségeket.

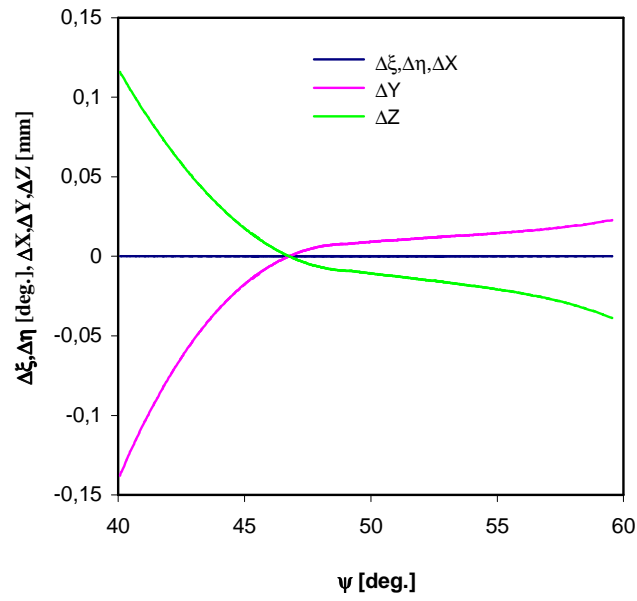
A kutatások eredményeinek részletes bemutatására szolgál a 9 impakt faktoros folyóiratcikk és rangos nemzetközi konferenciákon elhangzott 13 előadás proceedings nyomtatvánnyal.



8. ábra Klasszikus íveltfogú kúpkerékeket és hipoid fogaskerekeket megmunkáló szerszámgép kinematikai vázlatja



9. ábra A CNC fogazógép mozgásparamétereinek a változása a klasszikus fogazógép alapelfordulási szögének ( $\psi$ ) a függvényében



10. ábra A CNC mozgásparamétereinek a különbsége fogfelület-módosítások esetén