

Fogazott hajtópárok tervezése, modellezése és fogazatkapcsolódási (TCA) elemzése

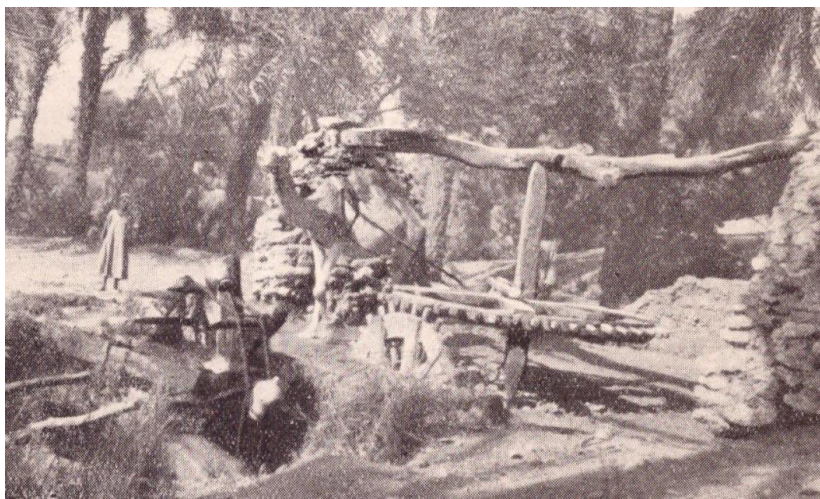
Bodzás Sándor

okl. mérnök, egyetemi docens, Debreceni Egyetem

Bevezetés

Az összefoglaló írás témája a különböző fogazott hajtópárok – közismert példájuk, a fogaskerekek – számítógépes geometriai tervezése, modellezése, szerelése és kapcsolódás-elemzése. Ezeket széles körben alkalmazzák különböző gépészeti szerkezetekben (pl. járművek, szerszámgépek, robotok, órák stb.), ahol fontos a terhelés, a teljesítmény és a nyomaték átadás az áttétel módosítása mellett. A fogazatok elméleti kutatásai igen összetettek. A magas fogazásgeometriai ismeretek mellett nélkülözhetetlenek a matematikai, programozási, gyártástechnológiai, mechanikai, számítógépes modellezési és szimulációs ismeretek.

A fogaskereket Kínában találták fel a Kr.e. 4. században a Csou-dinasztia idején. Valószínűleg onnan került nyugatra, Alexandriai Hérón a Kr.u. 1. században már a Ptolemaida-kori Egyiptomban is alkalmazta [11]. Az egyiptomi vízemelő szerkezet (Sakie), ősi alakját évezredekken keresztül változatlanul őrizte meg. Ezt tartják a fogaskerek első megjelenési formájának [13]. A zugmantelli egykori castellum (római őrtorony) kútjában találtak egy, a Római Birodalom korából származó pörgőt (2. ábra), melynek korát legalább 1700 évre becsülik, s jelenleg a saalburgi múzeumban őrzik. [13].



1. ábra. Egyiptomi vízemelő szerkezet [13]



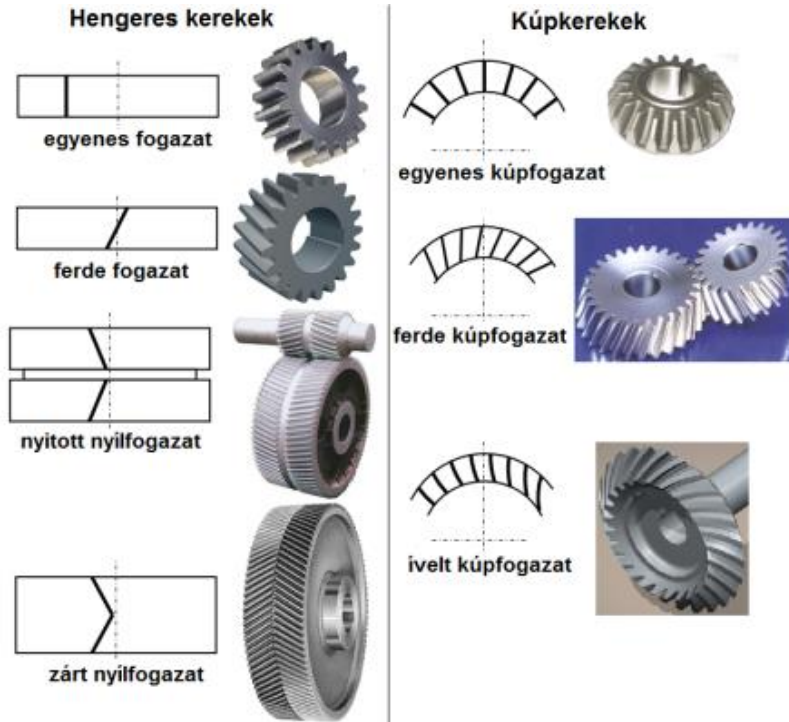
2. ábra. Pörgő [13]

A fogaskerekekről

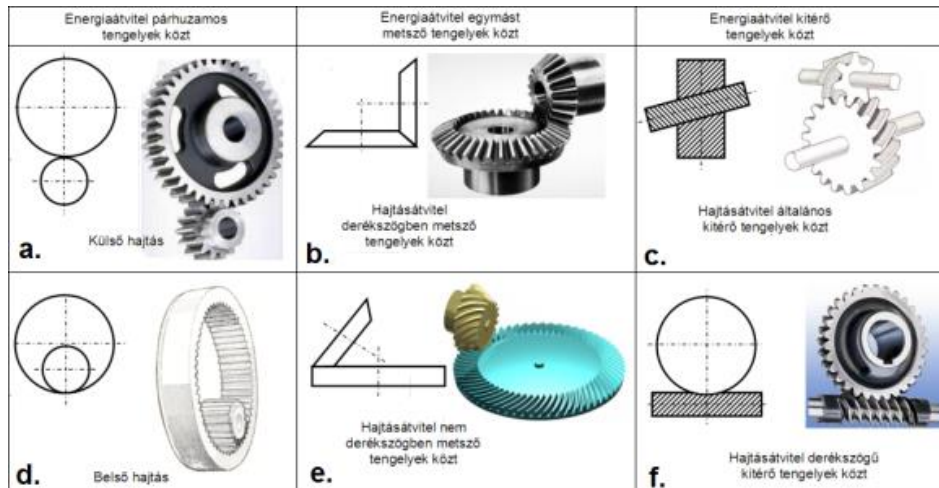
A fogaskerekeknél a két tengely meghajtása között szükséges módosítást egy kiskerék és egy nagykerék alkalmazásával valósíthatjuk meg. A fogaskerekek geometriai alakjuk, fogazásuk, és egymáshoz viszonyított elhelyezésük szerint többféleképpen lehetnek. A csoportosítás történhet [12]:

- a fogak kialakításának jellege szerint: *egyenes, ferde vagy ívelt fogazás* (3. ábra),
- a tengelyek elhelyezése szerint: *párhuzamos, egymást szögben metsző és kitérő* (4. ábra),
- a fogak egymásra hatása szempontjából a fogérintkezés történhet: *vonal mentén vagy pontszerűen*.

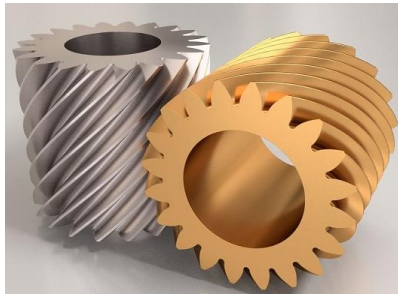
A fogaskerekes hajtások előnyei közé tartoznak: a hajtás nagy pontossága, a kis méretekben is nagy terhelhetőség, valamint a nagy fordulatszám lehetősége. Olyan esetekben, ahol a hajtó és hajtott tengely mozgásának szigorúan összerendeltnek kell lennie, például órákban, műszerekben, szerszámgépekben, a fogaskerekeknek alig van versenytársuk (korábban pl. a szíjhajtás). Ugyancsak fontos, hogy nagy teljesítmények, illetve nyomatékok átvitelére is alkalmasak. A gépko-csik, mozdonyok, sínhez kötött járművek, felvonók, emelő- és szállítógépek, mezőgazdasági gépek működése elképzelhetetlen fogaskerekes hajtóművek nélkül. [11].



3. ábra. A fogak kialakításának jellege az alaptesten [14]



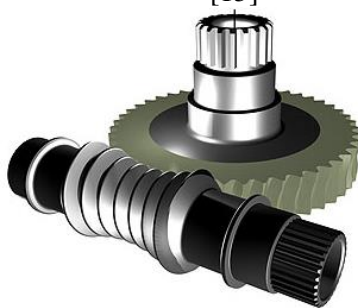
4. ábra. Fogaskerek osztályozása a tengelyek elhelyezése szerint [14]



[15]



[16]



[17]



5. ábra. Összetett geometriájú fogazott hajtópárok

A fogazatok geometriai tervezésével és gyártástechnológiai fejlesztésével számos kutató és mérnök szakember foglalkozott. Napjainkban nagyon sokféle komplex geometriájú (és anyagú) hajtópár létezik (5. ábra), elősegítve a különböző gépek és gépészeti egységek nagyobb teljesítményét, változatos funkcióját és határfokát. A fogazat gyártástechnológiája is folyamatosan fejlődik. A legkorszerűbb eljárások a 6., 7., 8. és 9. ábrákon láthatóak.



6. ábra. Ferde fogazatú hengeres fogaskerék előállítás 'millturn' technológiával [18]

7. ábra. Spirál fogazatú kúpkerék gyártása 'millturn' technológiával [21]



8. ábra. Külső és belső fogazat megmunkálása forgó szerszámossal lefejtéssel CNC szerszámgépen



9. ábra. Fogmarás váltólapkás szármaróval egyenes fogirányú hengeres kerék esetén [22]

A 'millturn' technológia CNC szerszámgépen egyesíti az esztergálási és marási technológiák előnyeit, lehetőséget adva komplex geometriájú alkatrészek gyártására a gyártási hatékonyság és pontosság növelése céljából.

A kutatás gyakorlati hasznosulása abban rejlik, hogy ezeket a fogazatkapcsolódási vizsgálatokat, melyekkel a kutatásom során is foglalkoztam, az igénybe-

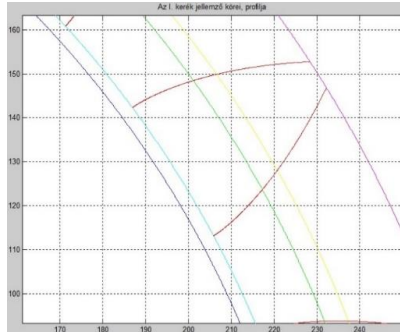
vételek és az anyagminőség ismeretében el kell végezni. Ha szükséges, módosítani kell a fogazatgeometriát, hogy az adott mérnöki tervezési feladatra optimalizált hajtópárt kapjunk. Csak ezek után érdemes gyártástervezéssel foglalkozni, majd ezt követően a konkrét gyártással. A számítógépes gyártás (CAM = *Computer Aided Manufacturing*) rendszerint CAD (*Computer Aided Design*) modellek alapján történik, technológiai tervezőszoftver felhasználásával. Itt megtervezhetőek a megmunkálási szerszám-útvonalak és a forgácsolástechnológiai paraméterek a szerszámgép és az alkalmazandó gyártástechnológia ismeretében. Végezetül elkészíthető a CNC (*Computer Numerical Control*) program, melynek alapján a szerszámgép végrehajtja a megmunkálási technológiát, a korszerű több tengelyes gyártást (6., 7., 8. és 9. ábrák).

Számítógépes geometriai tervezés

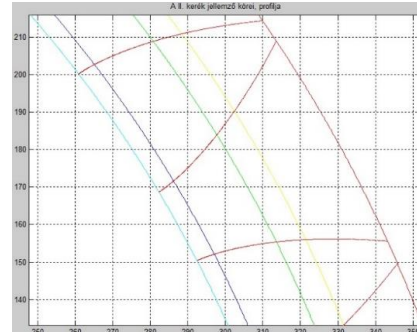
A hajtópárok tervezési ismereteit tartalmazó szakmunkák ajánlásait figyelembe véve saját fejlesztésű számítógépes programokat készítettem MATLAB nyelven. A MATLAB számítógépes programozási nyelv, melynek során a mérnöki munkákat segítő programok és szimulációk készíthetőek – a hajtópárok tervezési folyamatának egyszerűsítése céljából:

- hengeres fogaskerekek tervezése egyenes fogiránnyal (elemi, általános és kompenzált fogazatok) (10. ábra),
- hengeres fogaskerekek tervezése ferde fogiránnyal (elemi, általános és kompenzált fogazatok),
- egyenes fogazatú kúpkerék tervezése (11. ábra).

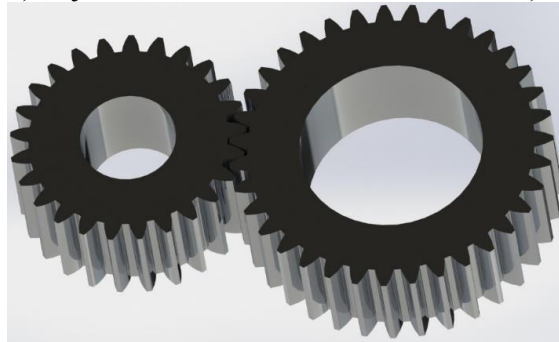
A készített programok a bemenő adatok megadása után kiszámítják az összes geometriai paramétert, melyek a CAD számítógépes modellek felépítéséhez szükségesek, illetve a hajtópárok tengelymetszeti profilgörbéit is megjelenítik. A kapott számítási eredmények és profilpontok *txt* fájlba kimenthetőek. A pontsor CAD szoftverbe importálható, melyre interpoláló görbe illesztésével elkészül a fogazat profil. A programokban lehetőség van a geometriai paraméterek módosítására vagy egy konkrét paraméter módosítására, ezáltal a szabványostól eltérő hajtópárok is előállíthatók.



a) Hajtó kerék

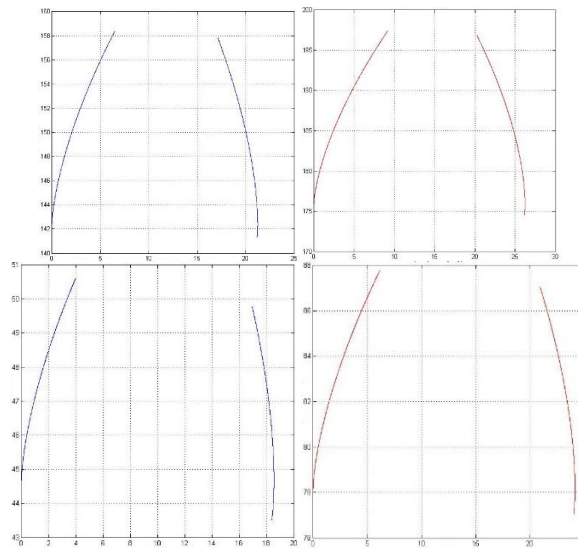


b) Hajtott kerék



c) CAD modell előállítás

10. ábra. Általános, egyenes fogazatú hengeres fogaskerékpár előállítása [1]



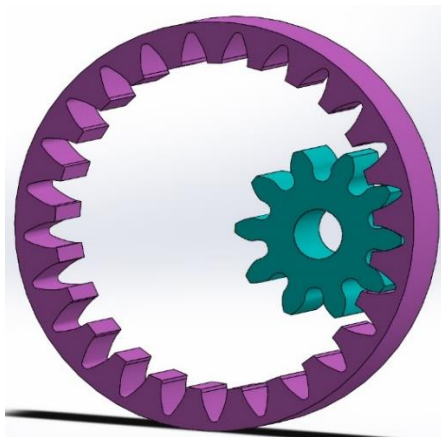
a) hajtó kerék

b) hajtott kerék

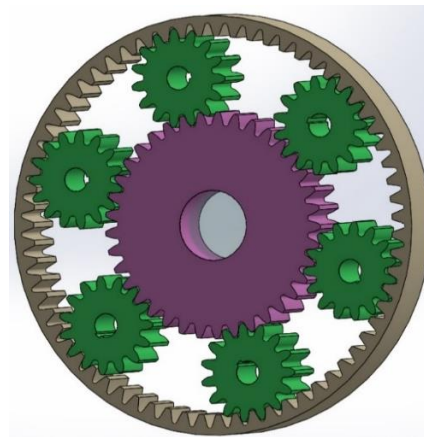


11. ábra. Egyenes fogazatú kúpkerékpár tervezése [2]

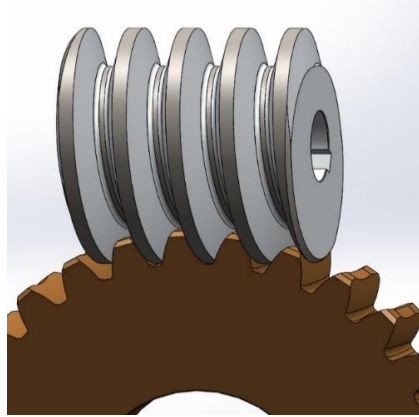
Összetettebb fogazatok tervezésére a GearTeq számítógépes fogazattervező szoftvert alkalmaztam, mely képes a tervező mérnöknek segítséget nyújtani csigahajtások, egyenes és ívelt fogazatú kúpkerékpárok, hengeres fogaskerékpárok (egyenes, ferde és ívelt), bolygóműves és elliptikus hajtások tervezésére többek között. A szoftver kiválóan együttműködik a *SolidWorks* mérnöki tervező szoftverrel, ezáltal a tervezett hajtás-geometriák közvetlenül importálhatóak modellező szoftverbe és a CAD modellek automatikusan felépíthetők. Természetesen a CAD rendszerben a kapcsolódáshelyes szerelést minden esetben el kell végezni.



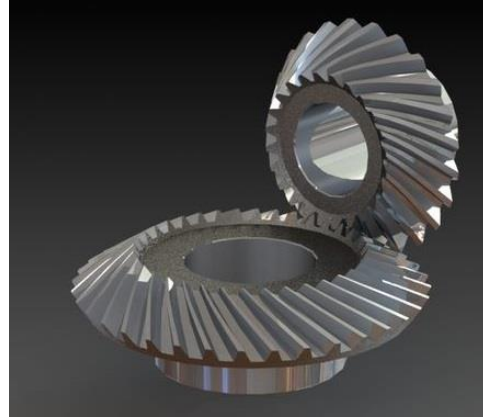
a



b



c



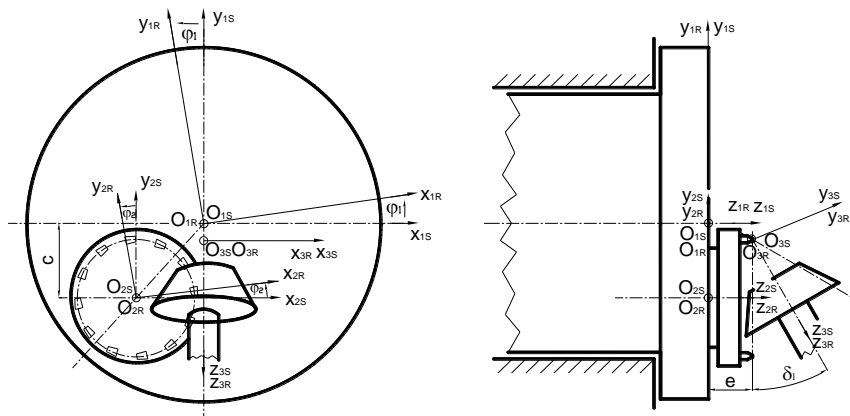
d

- a) belső fogazatú hajtópár [3], b) bolygóműves hajtás [3]
 c) csigahajtás [4], d) ívelt fogazatú kúpkerékpár [5]

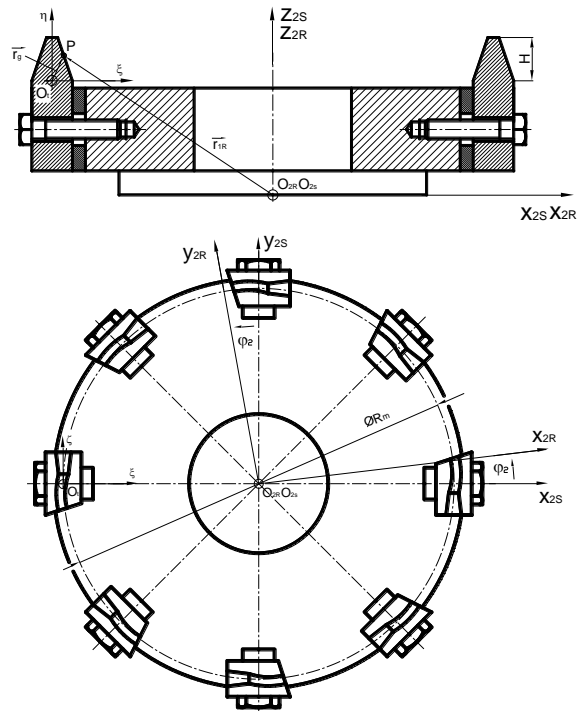
12. ábra. Fogazott hajtópárok tervezése GearTeq szoftverrel

Matematikai számítások

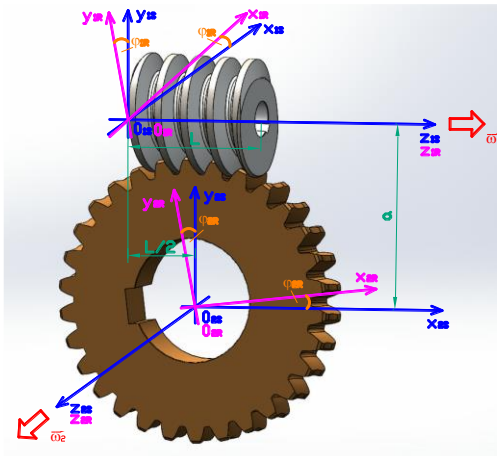
A numerikus matematikai számítások során a szerszám profiljának vagy a hajtó elem profiljának és a kinematikai paramétereknek ismeretében meghatározzuk a kapcsolódó elem fogfelületét vagy az érintkezési pontokat. A geometriai paraméterek változtatásával lehetőség van a fogérintkezési pontok helyeit befolyásolni, azaz kedvezőbb kapcsolódást elérni. A számításokhoz szükséges a koordináta rendszer elrendezések és a transzformációs mátrixok meghatározása (hengeres fogaskerék, kúpkerék, csigahajtás) (13., 14. és 15. ábrák). A koordináta rendszer elrendezések alkalmazhatók a CNC szerszámgéppel való gyártástervezés során is.



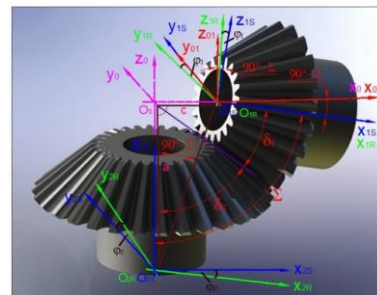
13. ábra. Ívelt fogú kúpkerék gyártás matematikai modellezése [5]



14. ábra. Szerszám főél egyenletének számítása kúpkerék megmunkálás esetén



a) hengeres csigahajtás [4]



b) egyenes fogú kúpkerék-hajtás [6]

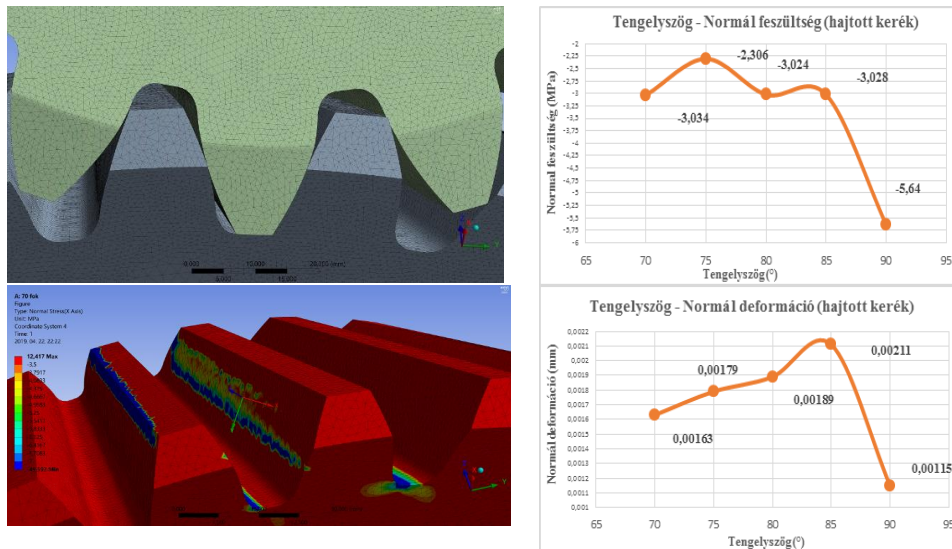
15. ábra. Kapcsolódó hajtópárok matematikai elemzése

TCA vizsgálatok

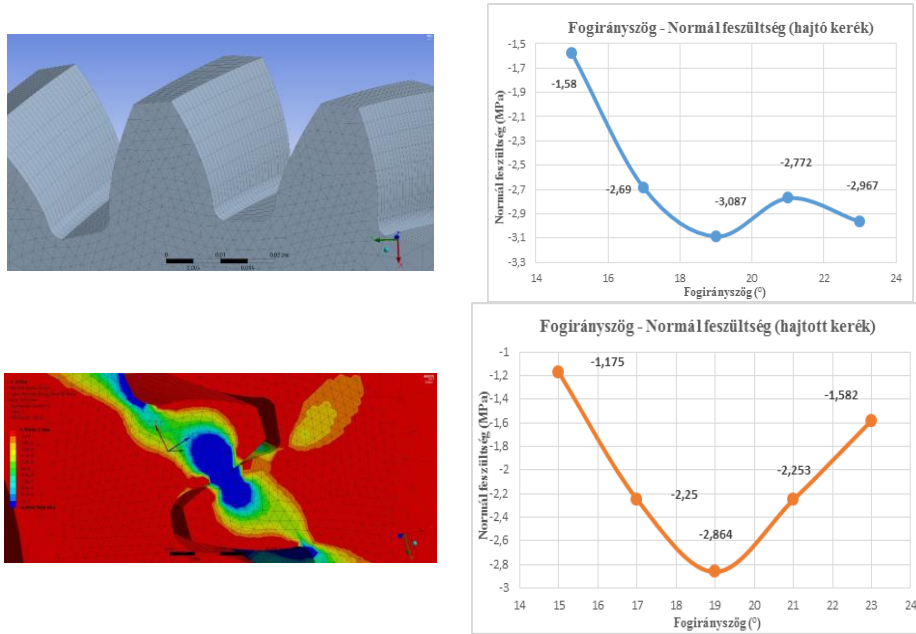
A TCA (Tooth Contact Analysis) fogazatkapcsolódási vizsgálatok célja a különböző geometriájú hajtópárok végeselemes kapcsolódási vizsgálata a fogérintkezési zónában lévő mechanikai jellemzők (normál feszültség, normál alakváltozás, adott irányú feszültség és alakváltozás stb.) elemzése céljából a hajtó és a hajtott keréken. A kutatómunka során a fogtóradiuszokban ébredő mechanikai jellemzőket is vizsgálattam.

A vizsgálatok elvégzése előtt definiálni kell az anyagminőségeket, a koordináta rendszer elrendezéseket, a terhelési és peremfeltételeket és a végeselemes hálózás módját.

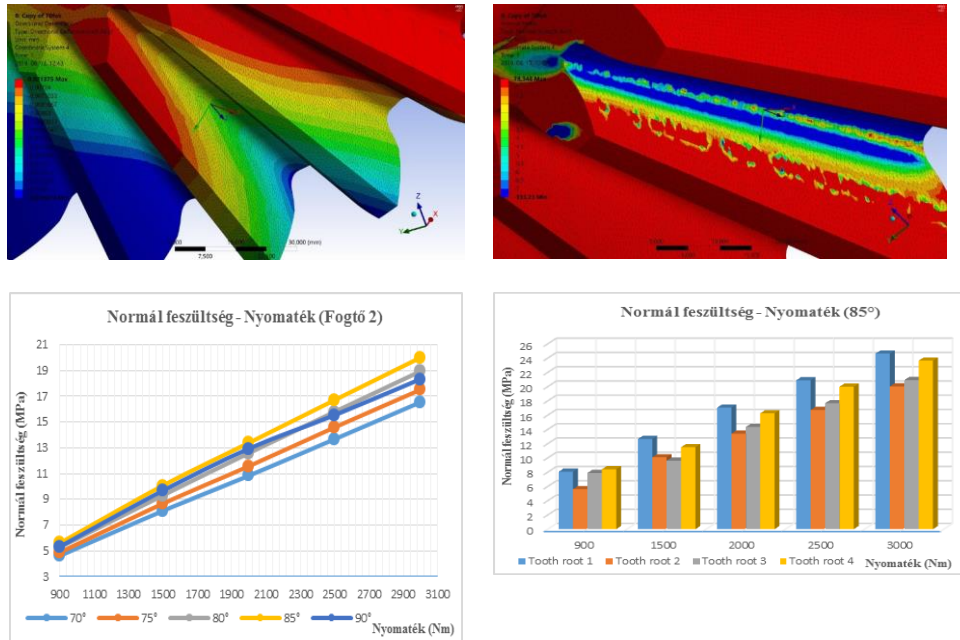
Több azonos típusú, de különböző geometriai paraméterekkel rendelkező hajtópárt terveztem a kutatásokhoz. Vizsgáltam a hajtópár geometriai paraméterek változásának hatására a kapott mechanikai jellemzőket, a kapott eredményeket diagramokba szerkesztettem és kiértékeltem. A 16., 17. és 18. ábrákon néhány kutatási eredmény látható.



16. ábra. Egyenes fogú kúpkerékek TCA elemzése tengelyszög módosítás függvényében [6]



17. ábra. Ferde fogazatú hengeres fogaskerékpár TCA elemzése fogirányszög módosítás függvényében [7]



18. ábra. Egyenes fogú kúpkerék fogtőterhelés vizsgálata tengelyszög módosítás függvényében [8]

Összefoglalás

A kutatómunka alapötletét az Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) -en (Carthage, Spanyolország) töltött tanulmányúton szerzett tapasztalatok adták. A Dr. Alfonso Fuentes Aznar professzor témavezetésével működő kutatócsoport munkájában lehetőségem volt betekintést nyerni a különböző fogazott hajtások tervezési, modellezési és végelem vizsgálati folyamatába. Nagyon megtetszett a téma időszerűsége és összetettsége. Fogazott hajtópárokat napjainkban nagyon sok gépészeti szerkezetben használnak, ezért az ezirányú kutatás, fejlesztés mind konstrukciós, mind technológiai téren fontos.

A kutatómunkám a fogazatok számítógéppel segített geometriai tervezésére, matematikai és számítógépes modellezésére, szerelésére és kapcsolódás elemzésére (TCA) terjed ki. Terveztem hengeres és ferde fogazatú fogaskerékpárokat, egyenes és ívelt fogazatú kúpkerékpárokat és hengeres csigahajtópárokat. Ezen fő típusokon belül több geometriai változat elkészült a geometriai paraméterek változásának függvényében. Mindig egy kiválasztott geometriai jellemző (modul, bekezdés szám, fogirányszög, tengelyszög stb.) változásának hatását vizsgálatam a TCA vizsgálatok során adott terhelések hatására.

Köszönetnyilvánítás

A kutatási eredmények a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készültek.



Felhasznált irodalom

- [1] Bodzás, S.: *Computer aided designing and modelling of spur gear pairs having normal and modified straight teeth*, International Review of Applied Sciences and Engineering 10 : 2 pp. 157–163., 7 p. (2019)
- [2] Bodzás, S.: *Computer-aided design and loaded tooth contact analyses of bevel gear pair having straight teeth by different loaded torques*, Mechanics & Industry 21 : 1 Paper: 109 (2020)
- [3] Bodzás, S.: *Különböző típusú fogazott hajtópárok tervezése és modellezése a GearTeq szoftver alkalmazásával*, Limes tudományos évkönyv, II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola, (megjelenés alatt)

- [4] Bodzás, S.: *Designing and loaded tooth contact analysis of an Archimedean worm gear drive focusing for the connecting teeth of the worm wheel by loaded torques*, Mechanics & Industry 21 : 4 Paper: 405 (2020)
- [5] Bodzás, S.: *Designing and Analysis of the TCA Parameters of a Bevel Gear Having Circular Tooth Direction in the Function of the Moment*, Journal of Applied Science & Process Engineering 6 : 1 pp. 310–328., 19 p. (2019)
- [6] Bodzás, S.: *The TCA's effects of the modification of the sum of pitch angles in case of bevel gear pairs having straight teeth*, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering (bírálat alatt)
- [7] Bodzás, S.: *Tooth contact analysis of x-zero helical gears by the modification of the tooth trace*, International Journal of Automotive Science and Technology 3 : 4 pp. 77–83., 7 p. (2019)
- [8] Bodzás, S.: *TCA on the tooth roots of bevel gear pairs having straight teeth in the function of the modification of the sum of pitch angles*, Journal of Mechanism and Machine Theory, Elsevier, (2020) (bírálat alatt)
- [9] Bodzás, S.: *Tooth contact analysis of Archimedean worm gear drives for the modification of the number of threads on the worm helical surface*, J. Machine Design, University of Novi Sad, Serbia, (2020) (bírálat alatt)
- [10] Litvin, F. L., Fuentes A., A.: *Gear Geometry and Applied Theory*, Cambridge University Press, 2004., ISBN 978 0 521 81517 8
- [11] Technikatörténeti szemle, III. évfolyam, 1–2., 1964
- [12] Vörös, I.: *Gépelemek III., Fogaskerekek*, 4. kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1964
- [13] Szeniczai L.: *Az általános fogazás*, 2. átdolgozott kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1955.
- [14] https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/2011_0001_521_Gepelemek/ch06.html
- [15] <https://www.differencebox.com/engineering/difference-between-parallel-helical-gear-and-crossed-helical-gear/>
- [16] https://www.showal.com/en/technology/automobile/hypoid_gear.html
- [17] <https://www.directindustry.com/prod/spirsin-s-coop/product-84827-1057499.html>
- [18] <https://www.ctemag.com/news/articles/shifting-gears>
- [19] <http://production-south.dvs-gruppe.com/index.php?id=1078&L=1>
- [20] <https://www.secotools.com/article/113163>
- [21] <https://www.youtube.com/watch?v=91m-NoE5OfY>
- [22] <https://www.youtube.com/watch?v=ye2wumdIsBQ>