



Miskolci Egyetem



Gépészmérnöki és Informatikai kar
Szerszámgépek Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

A téma címe:

Kompakt lineáris vezeték típus előfeszítettség végeselemes analízise

Készítette: Kázsik Tamás

BSc Gépészmérnöki, Szerszámgépészet és Mechatronika szakirány

Konzulensek: Dr. Takács György tanszékvezető egyetemi docens
Dr. Szilágyi Attila egyetemi docens

1. Előszó

Már az első szerszámgépek megjelenésével, egyik fő problémává vált a minél precízebb szánvezetés megvalósítása, a minél pontosabb megmunkálás érdekében. Kezdetben csúszó-súrlódó felületek biztosították a lineáris mozgások megvalósítását. A felületek kialakítása miatt is adódtak pontatlanságok, illetve a „stickslip”- akadozva csúszás effektus is befolyásolta a pontosságot. Később különböző felületkezelő eljárásokkal növekedtek az élettartamok is, illetve az érintkező felületeket kisebb súrlódási együtthatóval rendelkező anyagokkal borították, amelyek mérsékeltek a hibákat, ám költségeibbe tették a gép építését.

Jelentős előrelépés volt az egymáson csúszó felületek helyett gördülő elemek alkalmazása. Csökkentve a súrlódást, kevesebb hő keletkezett, nőtt az élettartam. Újabb, a felhasználást elősegítő konstrukció volt a cirkuláló elemeket tartalmazó egység, amellyel precíz csatlakozó felületen, előfeszítés biztosította a változó terhelések mellett az állandó futáspontosságot.

Napjainkban kompakt kialakítású egységeket készre szerelt állapotban szállítanak, ami könnyedén rögzíthető a gépeken, valamennyi géptípuson.

Célom egy általam megtervezett egy golyós típusú kompakt lineáris vezetékegység előfeszítettségének és terhelhetőségének analízise végeselemes szoftver segítségével. A vizsgálat során többdimenziós terhelések felvétele ad majd pontos képet a konstrukció szilárdságáról.

Az előfeszített vezetékegység előnye, hogy a terhelt és terheletlen állapotban egyaránt teljesíti ugyanazt a pontosságot. Az előfeszítés mértékének több fokozata van felhasználási területtől függően. Megfelelő előfeszítettség esetén sincs futáspontosságot befolyásoló mértékű elmozdulás, terhelés hatására. Az egység mechanikai modellje a merev testként viselkedő vezeték és a rugalmas testként viselkedő gördülőelemek és kocsik.

A digitális prototípuson végzett numerikus analízissel, a keletkező feszültségekről, elmozdulásokról szeretnék pontos képet kapni. Az így kapott eredményeket további konstrukciós kialakítás javítására és gyártástechnológiai paraméterek meghatározására használok majd fel.

2. Summary

In the beginning of the XX. century, the most of machine tool had a sliding linear motion, but already then a lot of attention paid to the precise guiding of the linear motions. They were sliding friction surfaces and about the failures, the guides weren't so much precise.

Using the rolling elements was a great progress, in the manufacturing. There weren't as much friction as before, less heat generated, and had fewer abrasion.

The circulating elements in the roller shoe was very useful, and has allowed universal installation.

Preload adjustability has provide for the constant operating parameters.

Nowadays there are many compact linear motion guide, which built in many machine tool.

The aim of the study is, to introduce the optimal preloading int for the manufacturing, and improve the construction with new ideas and results of the analysis.

The digital prototype will be examine by fine element method, because this modul is available in many CAD system.

3. A téma bevezetése

3.1. Az előfeszítés oka és megoldásai

3.1.1. Az előfeszítés fogalma

A megfelelő relatív elmozdulást biztosító gördülővezetés konstrukciós kialakításának alapkritériuma: *a gördülőelemek és a gördülópálya közti érintkezés kellő szintű megvalósítása úgy, hogy ezen érintkezés a vezetékre ható igénybevételek mellett minden esetben kellő pontossággal és merevséggel biztosítva legyen.* [1]

Az előfeszítés során a papucsok és golyós kocsik gördülőterhei és a futópályái a kapcsolódási zónában azonos feszültségeknek vannak kitéve, amelyek a gördülőelemek rugalmas alakváltozási terébe esnek, illetve hatnak. [2]

3.1.2. Az előfeszítés alkalmazásának célja

Már a csúszó-súrlódással működő szánvezetékeknél is előfordult, hogy bizonyos mértékű terhelés hatására a szán megbillent, és két addig érintkező felület között hézag, játék keletkezett. Ez kelthetett rezgéseket is, amik tovább rontották a futáspontosságot. Továbbá a terhelt oldalon jelentősen növelte az igénybevételt, ami rövidítette a vezeték élettartamát, és megnövelte a „stickslip” jelenség bekövetkezésének esélyét a lassú mozgásoknál.

A gördülőelemekkel szerelt vezetékeknél továbbra is gondot okozott a terhelések hatására keletkező játék. Ha bár az egymással érintkező felületeket felváltották a gördülőelemek, a kis terheléseknél és gyors mozgásoknál fenn állt a veszélye a csúszásnak. A súrlódási erő mértéke annyira lecsökkent, hogy a gördülőelem egy nagyobb mértékű gyorsulásváltozás hatására csúszva gördülést végzett. Ez a jelenség a gördülőelemeket károsította, a külső felületükben hibák keletkeztek. Emiatt a szán futáspontossága jelentősen romlott, a nem szimmetrikus vagy kopott gördülőelemek lengéseket idéztek elő, rezgéseket váltottak ki. A kopástermék szennyeződések bekerülve a vezetékekbe szintén újabb hiba kialakulásához vezethettek. A súrlódás miatt

keletkező többlet hő pedig deformációkat okozott a vezetékekben, és a gépeken egyaránt, amivel rontotta a futáspontosságot.

A megtámasztási irányokban elő kellett feszíteni a megvezetéseket. Az előfeszítéssel megvalósult a változó terhelés hatására is állandó futáspontosságú megvezetés. A fellépő külső terhelő erők hatására is merevek maradnak a vezetékek. Megakadályozza az előfeszítés a csekély mértékben terhelt, de nagy sebességgel működő vezetékekben a gördülőelemek csúszását, javul a zajszintjük és rezgésállapotuk. [1]

3.1.3. Az előfeszítő erő mértéke

A kompakt lineáris vezetékek esetében az előfeszítés mértéke is fontos szerepet kap a felhasználás során. Korábban alkalmazott vezetékeknél külön elemekkel fokozatmentesen állítható volt a mértéke, a felhasználó igényei szerint. Ez a megoldás azt eredményezte, hogy a kopás, az újbóli beállítások és a különböző hibák miatt nem lehetett ugyanazt a mértéket produkálni. Így aztán a működés során megváltoztak különböző paraméterek.

Ezt küszöbölték ki azzal, hogy a külön beállító elem helyett gyártástechnológiai paraméterekkel értek el előfeszítést a vezeték kompaktságának köszönhetően.

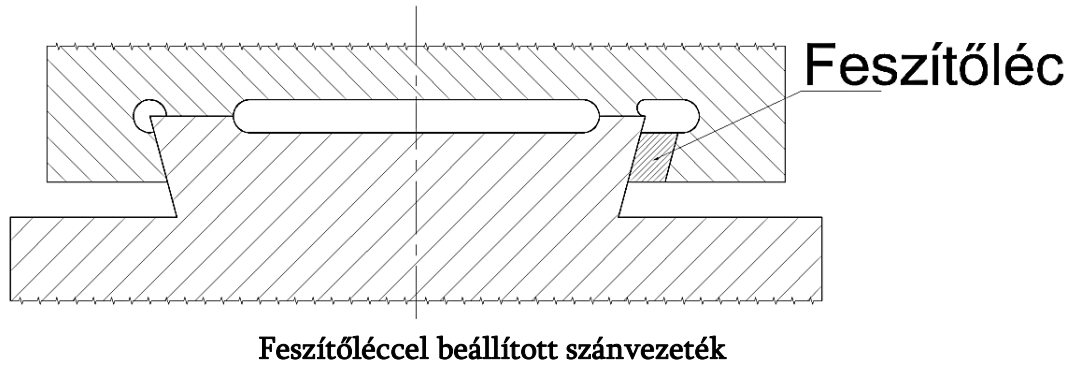
Az igényekhez mérten, az előfeszítő erő nagysága több fokozatból megválasztható előre. Az igények a pontossági fokozatra terjednek ki. A megrendelő számára a gyártáskor olyan paraméterekkel gyártják le, amelyen kategóriájút a vevő kíván.

3.1.4. Az előfeszítés megvalósítása

3.1.4.1. A csúszó-súrlódással működő szánvezetékek

Ezeknél a szánvezetékeknél (1. ábra) is előfordult, hogy egy bizonyos mértékű erő hatására a rugalmas alakváltozás akkora volt, hogy az addig két érintkező felület között hézag, játék keletkezett. Ez tovább rontotta a működést. Az addig érintkező felületek között nem volt kontaktus, a megvezetés egy vagy több felületen megszűnt, már nem volt csúszó-súrlódás, változott a rezgésállapot is. A terhelt oldalon megnőtt a súrlódási erő, a keletkező hő mértéke nagyobb lett, jobban kopott, csökkent az élettartama.

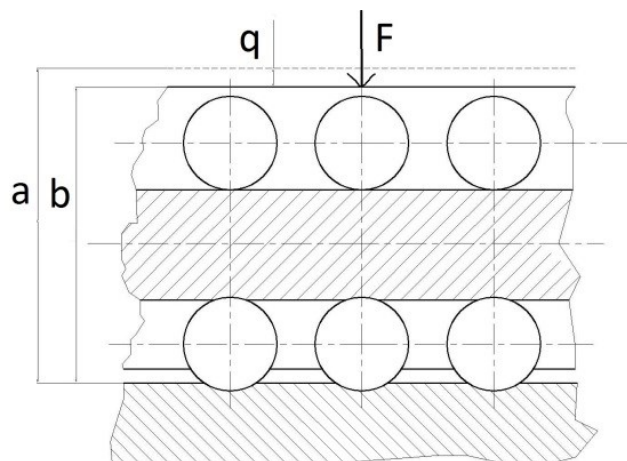
Ennek kiküszöbölésére építettek be feszítőléceket a szánokba. Ezekkel a feszítőlécekkel, amik rendszerint más anyagból készültek lehetett beállítani az előfeszítés mértékét. Nem volt vele biztosítható az állandó mértékű előfeszítő erő, a kopás, súrlódási hő keletkezése és alakhibák miatt.



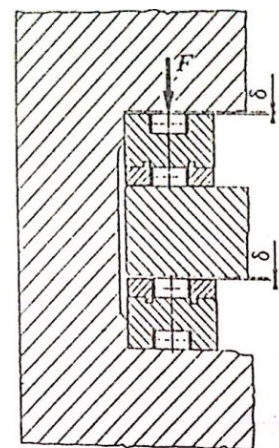
1. ábra [10]

3.1.4.2. A gördülőpapucsos szánvezetékek

Az ilyen egységekkel készült szánvezetékeknel is elő kellett feszíteni a megtámasztási irányokban. A megvalósításukhoz ismerni kellett a szán tulajdonságain kívül magának a gördülőpapucsoknak, mint szerkezeti egységnek a merevségi jellemzőit.



A terhelő erő hatására bekövetkező alakváltozás
2. ábra [1]



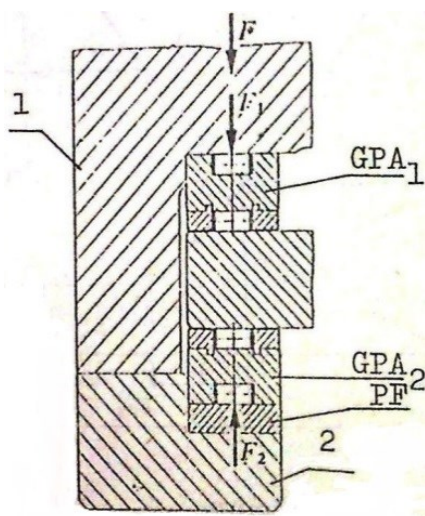
Az elmozdulások előfeszítés nélkül
3. ábra [1]

Az egységet F erővel terhelték (2. ábra , melynek hatására a papucs rugalmas deformációja következett be. Ezek egy merevségi görbével voltak jellemezhetők, aminek felvételekor a gördülőpapucs szerelési hátfelülete, és a vezetékpálya közé eső elemek F terhelő erő hatására bekövetkező összegzett deformációt vették figyelembe.

Egymással szemben beépített két papucs esetén (3. ábra), előfeszítés nélkül, a terhelőerő hatására csak az egyik papucs deformálódik. A másik papucs és a szerelési hátfelület között játék keletkezik, ami szán relatív billenését okozza.

Előfeszítés esetén, az egyik papucsra felírható megnövelt terhelésére, illetve a deformáció és előfeszítés összege. Ez megegyezik a másik papucs csökkentett terhelésével, illetve a deformáció és az előfeszítés különbségével. Határeset az, amikor a második papucsnál a deformáció és előfeszítés különbsége nulla lesz, ilyenkor játék keletkezhet, ami szintén a szán billenését eredményezi.

Gyakorlatban ezeknek a papucsoknak ez előfeszítését feszítőléc közbeiktatásával (4. ábra), és deformáció mérésekkel állítják be. [1]



Papucsfeszítővel beállított gördülőpapucsok

4. ábra [1]

3.1.4.3. A kompakt lineáris vezetékek

Ezek esetében annyiban változik az előfeszítés megvalósítása az eddig felsoroltakkal szemben, hogy a vezetékléc és a kocsi egy egységet alkot, és külön feszítő elem nélkül, csatlakoztatva valósul meg az előfeszítés.

Az előfeszítés mértékét az alkalmazandó terület igényeihez mérten alapítják meg. Általában 3 csoportot különböztetünk meg: logisztikai berendezések, általános felhasználás szerszámgépekre, ultraprecíziós gépek. Az előfeszítési erőt a statikus alapterhelhetőség százalékos arányában fejezzük ki.

A kiválasztás során a felhasználáshoz kapcsolódó merevségi igényt, a várható élettartamot a terhelés függvényében illetve a pontossági igényeknek megfelelően határozzák meg. A már tisztázott szükséges előfeszítő erő mértéke, és a statikus egyenértékű alapterhelés ismert. Ezek után meg kell határozni azt a tűrésmezőt, ami a vezetékléc-gördülőelem-kocsitest érintkezési felületeinek kialakításához kell.

Ez a tűrésmező túlfedéssel készül, ahhoz mérten, hogy a beépítendő golyó milyen tűrésmezővel rendelkezik. A túlfedés által a kocsi anyaga rugalmas deformációt szenved, és a keletkező feszültségek hozzák létre a korábban meghatározott előfeszítő erőt.

3.1.5. Az előfeszítés hátrányai, negatív tulajdonságai

Az előfeszítő erőnek számos előnye van a vezetékegységeknél, ami kedvezően befolyásolja a működési paramétereket, javítja a végkimenetel tulajdonságait. Az előnyök mellett azonban vannak negatív tulajdonságai is.

A gördülőmozgást végző alkatrészek folyamatos érintkezésben vannak a futópályákkal. Az érintkező felületek a terhelés és a gördülési ellenállás miatt súrlódnak. A kialakuló súrlódást erősíti a terhelés mellett az előfeszítő erő folyamatos fennállása. Az érintkezési pontokban feszültségek keletkeznek, amik a gördülőelemeket deformálják.

A megnövekedett terhelés hatására károsodhatnak a golyók vagy görgők az egységekben, ridegtörést, fokozott kopást, berágódást szenvedhetnek el. A futófelületek az érintkezés pillanatában rugalmas alakváltozást szenvednek el, ami a felületek kráteresedéséhez vezethet.

Összességében az előfeszítés a futáspontosságot és rezgésállapotot javítja, viszont az élettartamot a terhelő erő nagyságától függően befolyásolja. Az előfeszített egységek mellett a kedvezőbb működési paraméterek miatt, hátrányaik ellenére döntenek.

A különböző területeken más és más nagyságú előfeszítést alkalmaznak, a működési feltételekhez szabva.

3.1.6. Szerelhetőség és annak megoldásai

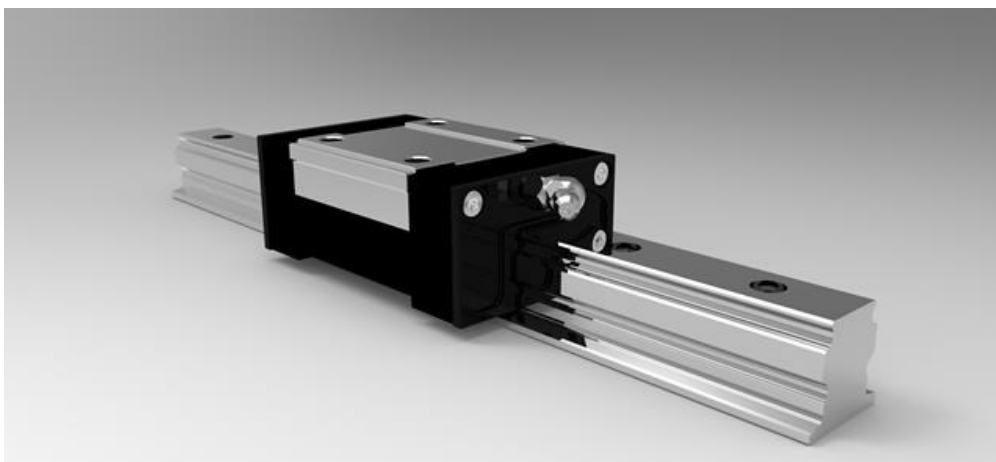
A napjainkban alkalmazott kompakt lineáris vezetékeknek számos követelménynek kell megfelelni. Azonban az egyik legfőbb elvárás, ami meghatározza a felhasználás minden körülményét, az egység szerelhetősége.

A karbantartási műveletek, javítások során kívánt dolog, hogy könnyedén szerelhető legyen mind alkatrészenként, mind pedig önállóan az egység.

Az előfeszítést nem szereléssel állítják be, így mértéke mindig állandó marad, amíg nem kopik a vezeték. Amikor a vezeték lécről a kocsi test eltávolításra kerül, és vissza felhelyezésre, a meghatározott gyártási paramétereknek köszönhetően az előfeszítettség mértéke megmarad.

3.2. Az analízis során vizsgált vezetékegység és részei

A vizsgálat során nem csak az egész vezetékegységre végezzük el az analízist, hanem az egyes részeire, amelyek felveszik a terhelést a működés során. Ezek a vezeték lécs, kocsi test, és a golyók. A vizsgált egység a digitális prototípus.



Az összeállított vezetékegység renderelt képe
5. ábra [10]

3.2.1. A vezeték ismertetése, típusa

A vezetékegység egy kompakt típusú lineáris vezeték, ami a piacon kapható termékek standardizálása után, a blokk típusú kategóriába tartozik.

Ez egy típuscsalád része, általános felhasználásra tervezve. A konkrét típus a piacon kapható termékcsaládok alapján a „30” méretű jelzést kapta.

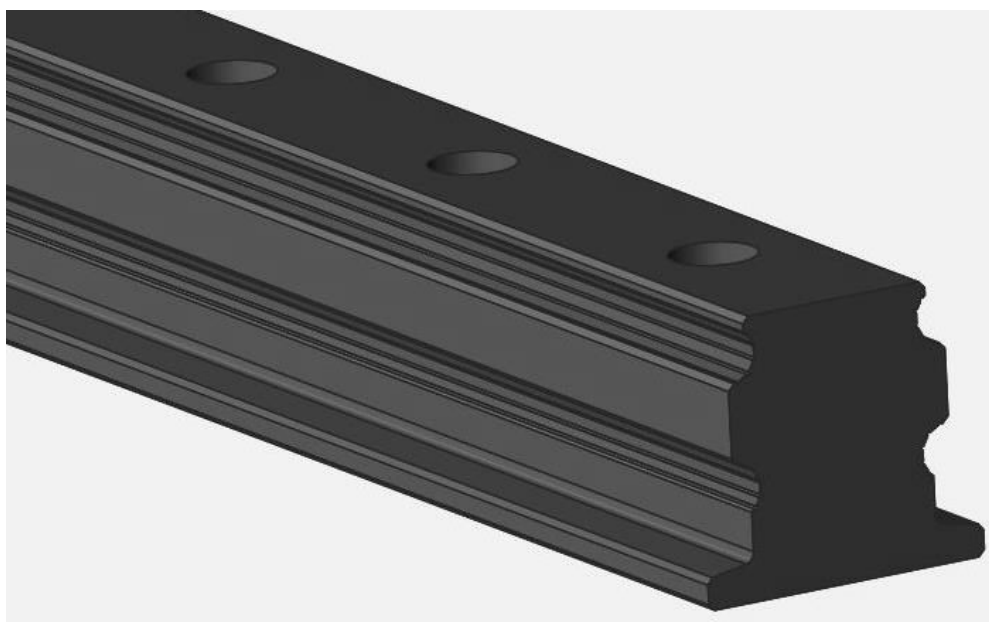
A statikus egyenértékű alapterhelése $C_0=32\text{kN}$, míg a dinamikus egyenértékű alapterhelése $C=30\text{kN}$.

3.2.2. A megtervezett vezeték részei

A megtervezett vezetékegység alkatrészei különböző funkciók hordozói, más és más szerepet töltenek be a működés során. Egyes alkatrészek fő-funkció hordozók, míg mások mellékfunkció hordozók. A főfunkció hordozók a követelmények teljesülését segítik elő, míg a mellékfunkció, hordozók alkatrészek elősegíti a főfunkciók teljesülését, vagy részét képezik azoknak, illetve teljesíthetnek különböző kívánságokat is. [3] A különböző alkatrészekre bontva az egységet, egyenként is sor kerül az analízisre. A funkció hordozók töltik be elsődlegesen a funkciómegvalósulásának szerepét, és a terhelés felvételét, így az analízis azokra irányul.

3.2.2.1. Vezetékléc

A vezetékléc felel a felhasználási területen való rögzítéséért az egész egységnek. A rögzítésnek több módja van, az egyes területeken való lehetőségek szerint.



A vezetékléc axonometrikus nézete

6. ábra [10]

A vezetékléc képezi az egyik oldalról a futópályáját a golyóknak. A futópálya és a golyók érintkezésével valósul meg a terhelés átadása. Az érintkezési felületeket síkfelületek képezik.



A vezetékléc előlnézeti képe

7. ábra [10]

A legtöbb vezetéktípus családnál a futófelületet egy hengeres felület, vagy több hengeres felület metszete képezi. Az ilyen típusú vezetékeknél a golyó érintkezése a felületi hibák miatt csak ideális esetben lehet körív a körívén.

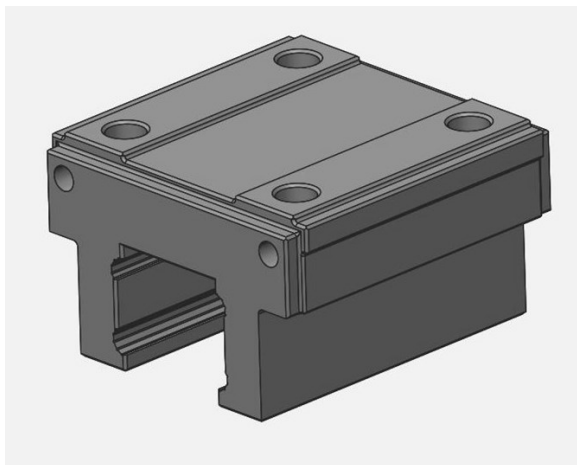
Az egyéni konstrukció arra alapoz, hogy az egymással szöget bezáró síkfelületeken az érintkezés mindig pontszerű, így a gördülőelem és a futópálya felületi hibáitól függetlenül a pontbeli érintkezés mindig megvalósulhat.

Előnye az, hogy a deformálódó vezetékléc állandó kapcsolatban maradhat a golyóval, mivel a golyó kontúrja a vezetékléc síkfelületeivel érintőként kapcsolódik.

A vezetékléc anyagául: 54SiCr6-t választottam, ami számos egysoros mélyhornyú golyóscsapágy belső és külső gyűrűjének anyaga. Melegen hengerelt nemesíthető rugóacél, EN ISO 10027 számjele: 1.7102. Felhasználási területe a csapágygyártáson túl a gépjárműiparban jelentős. Járművek lengéscsillapító rugói és stabilizátorai készülnek ilyen anyagból.

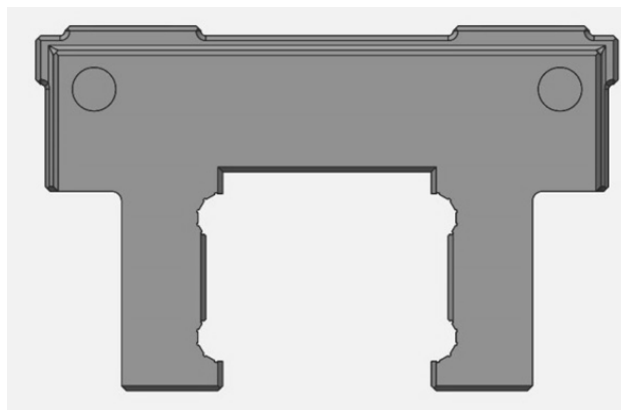
A vizsgálat során a vezetékléc merev testként definiálható.

3.2.2.2. Kocsitest



A kocsitest axonometrikus nézete

8. ábra
[10]



A kocsitest elől nézete

9. ábra [10]

A kocsitest biztosítja az asztalok, szánok, egyéb gépegységek rögzítését az ágyra, állványokra. A rögzítés csavarozással történik.

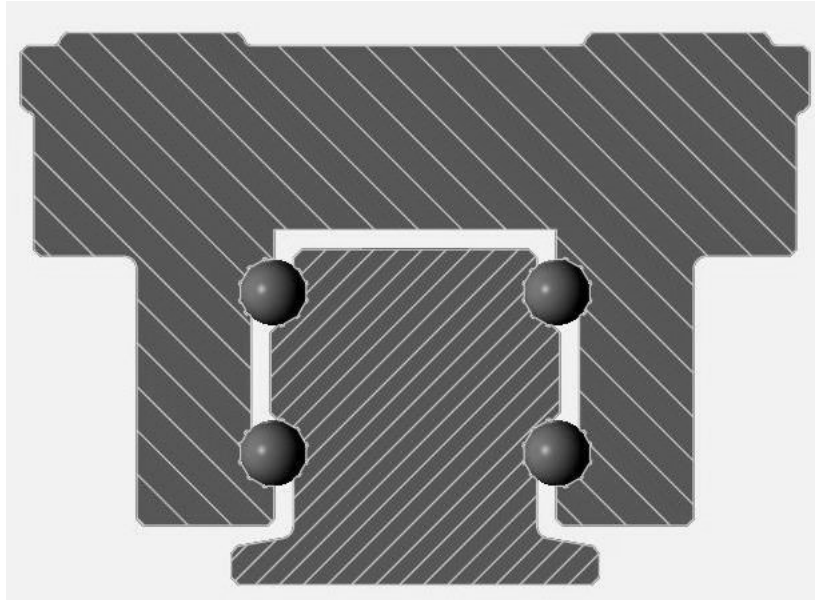
A rögzítésen kívül a mozgásban lévő részegység egy szabadságfokú mozgását is valósítja meg a vezetékegységgel. A részegységekre ható terhelések jó részét a vezetékegységek veszik fel, amiből elsőként a kocsitestet éri a hatás.

Az előfeszítés és a gépegységeket érő erőhatások miatt leginkább a kocsitest deformálódik a vezetékegységen belül. A vezetékléc deformációja az egységben a többi alkatrészhez viszonyítva jóval kisebb mértékű, így az a működést kevésbé befolyásolja. A kialakításának köszönhetően nem csak a hajlító nyomatékokkal, de a csavaró nyomatékokkal szemben is ellenálló. A vizsgálatban rugalmas testként kerül definiálásra.

3.2.2.3. Golyók

A golyós kocsin belül a golyók végeznek cirkuláló mozgást, és teszik lehetővé a lineáris vezetés megvalósítását. A mozgás során így folyamatosan változik az érintkezési helyük a futópályával.

A golyók a standardoknak megfelelően készülnek. A prototípusban lévő gördülőelemek névleges átmérője $\varnothing d=5\text{mm}$. Anyaga: 100Cr6. Keménységük kb. HRC=58.



10. ábra
[10]

A golyókkal szerelt vezetékegység metszetben

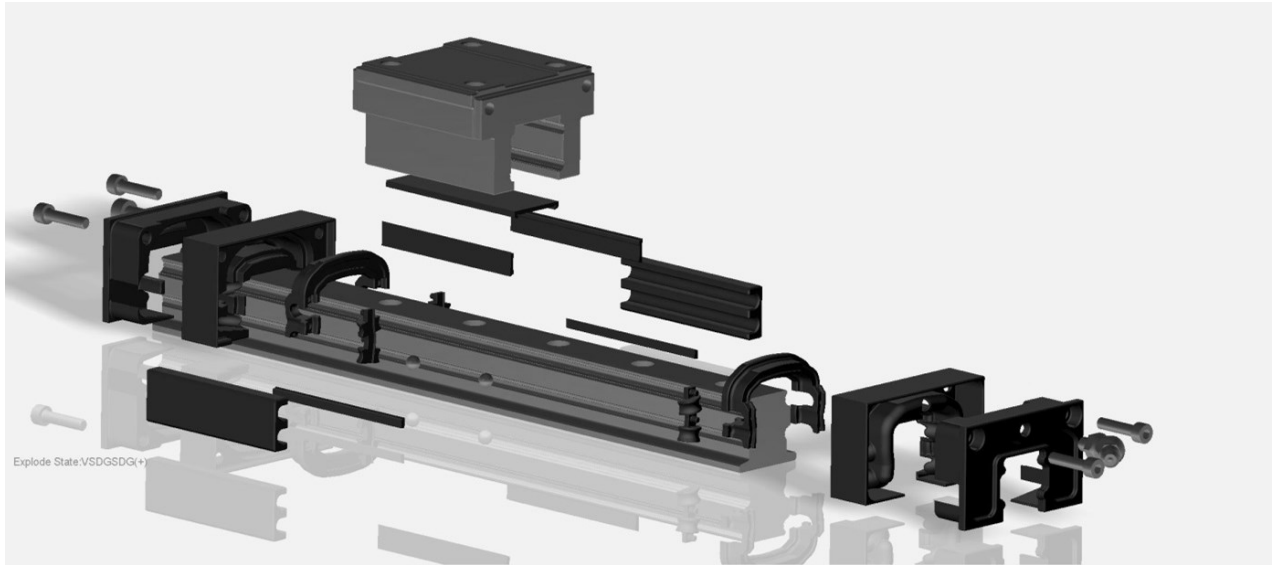
A kereskedelemben kapható golyók között választhatóak tűrésmező szerinti kategóriákból. Az előfeszített készülékekben a kis tűrésmezővel rendelkező golyók az ideálisak, mivel így kerülhető el a rossz rezgésállapot, és a rossz futáspontosság.

3.2.2.4. Egyéb alkatrészek

A fő alkatrészekon kívül sok egyéb alkatrész van, ami a főfunkció hordozókat segíti a működés során.

Ezek az alkatrészek:

- ✓ tömítés
- ✓ golyó visszatérítő
- ✓ kenőbetét
- ✓ golyó visszavezető
- ✓ külső fedél



A vezetékgyűjtő robbantott ábrája
11. ábra [10]

3.3. A vizsgálat kitűzött célja

3.3.1. A tűrésmező meghatározása az előfeszítő erőhöz

Ahhoz hogy a kocsi, a golyók és a vezeték lécs egy bizonyos hatásvonalon megfelelő előfeszítő erővel rendelkezzen, pozitív tűrésmezőben kell legyártani a kocsit, hogy a rugalmas alakváltozás következtében a keletkező feszültségek szolgáltatassák a megfelelő erőt.

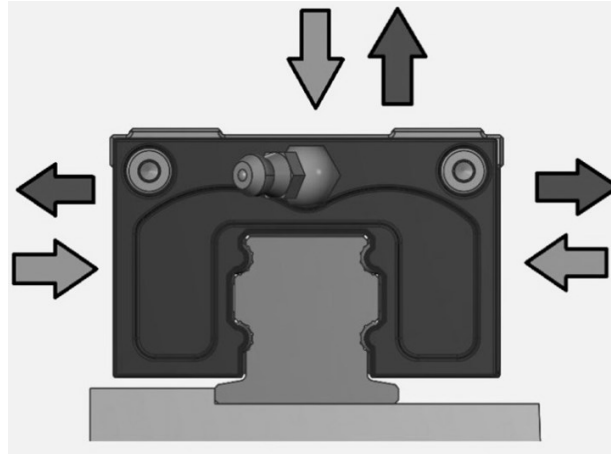
A hatásvonal, ami a golyóvezető hornyok által bezárt szögek képeznek. Két horony egymással 60° -os szöget zár be.

A különböző nagyságuk előfeszítő erők szolgáltatásához és meghatározásához más és más tűrésmezőre van szükség. Az itt vizsgált típus esetében: $F_e = C_0 \times 0,05 = 32000 \text{ N} \times 0,05 = 1600 \text{ N}$. A feladatot megközelítés módja szerint, az F_e erőt kell alapul venni. [4]

3.3.2. Statikus terhelhetősége az egységnek

A vezetékgyűjtőt működés közben erőhatások, nyomatékok érik. Meg kell felelni több irányú csavaró nyomatéknak, illetve vezeték-léc tengelyéhez viszonyítottan több irányú radiális terhelésnek.

A vizsgálat során különböző irányú erőkkel és nyomatékokkal terhelve a vezetékgyűjtőt, meghatározásra kerül az elmozdulások nagysága.



Példa a lehetséges vezetékét érő erőhatásokról

12. ábra [10]

A statikus egyenértékű erőt katalógusok alapján a következőképpen számoljuk:

$$f_s = \frac{C_0}{P_0}, \text{ ebből kifejezve } P_0\text{-at, } P_0 = \frac{C_0}{f_s} = \frac{32000 \text{ N}}{5} = 6400 \text{ N}$$

Ahol:

- A statikus biztonsági tényező: $f_s=5$ katalógusban található érték, általános terhelés esetén
- $C_0=32000\text{N}$: Statikus egyenértékű alapterhelés, standard érték.
- $P_0=6400 \text{ N}$: Statikus egyenértékű terhelés

Ezek a meghatározott terhelőerők alapján, elvégezhető a vizsgálat. [4]

4. Az előfeszítő erő megvalósítása és annak vizsgálata

A feladat megoldása során több változatot is megvizsgálunk. A több változat, jobb szilárdsági állapotok felkutatására ad módot.

4.1. A megoldáshoz alkalmazott végeselemes módszer

Az előfeszítő erő meghatározásához numerikus megoldási módszerre lenne szükség, mivel hogy az elmozdulások kismértékűek. Az ismert numerikus megoldási módszerek:

- véges differencia módszer
- véges elemek módszere
- perem elemek módszere

A legelterjedtebb a véges elemek módszere a numerikus megoldások körében, ahol a vizsgált alkatrészeket, szerkezetet, egységeket, véges számú elemekre bontjuk, és úgy közelítjük a geometriát, illetve az elmozdulásokat és a keletkező feszültségeket.

A végeselem módszeres analízis szoftverek segítségével a CAD modell bevitelével elvégezhető, a geometria egyszerűsítése nélkül, így azzal célszerű az analízist elvégezni.

4.1.1. A végeselemes módszer

A mérnöki gyakorlatban manapság gyakran alkalmazott, hogy a megtervezett berendezés vagy eszköz működéséről, még a megvalósítása, legyártása előtt számítógép segítségével szimulációt végeznek. Így fény derülhet az esetleges problémákra.

A szimuláció egyik legelterjedtebb formája a végeselemes módszer. A módszerrel alapvetően a térben eloszló fizikai mennyiségek számítására és a velük kapcsolatos fizikai jelenségeket szimulálják, ami során a vizsgált tartományt kisméretű, egyszerű alakú részekre, elemekre bontják, amit együttesen végeselemes hálónak hívunk. [6]

A módszer a testben kialakuló pl. elmozdulás mezőt kis altartományok (véges elemek) felett oly módon közelíti, hogy az elemek között az folytonos, az ismeretlen paramétereknek véges számú ponthoz rendelt elmozdulások felelnek meg. Ezen csomópontok elmozdulását a potenciális energia minimumából határozzuk meg, algebrai egyenletrendszer megoldásán keresztül.[7]

A mechanikára a mérnöki gyakorlatban kiemelt szerep hárul, hogy az a mérnöki alkotó munkában minél jobb, hatékonyabb gépeket eljárásokat megtervezni, legyártani piacra dobni lehessen.

Az egyik legfontosabb dolog az, hogy a megfelelő modellezéssel ismertté válnak a különféle berendezésekben, gépekben, szerkezetekben, technológiai eljárásokban lejátszódó mechanikai folyamatok, azok paramétereinek hatása, melyek birtokában optimalizálhatóvá válik a termék és a technológiai eljárás. Az üzemeltetésnél tisztázhatóvá válik az élettartamkérdés.

A szimuláció során a prototípus legyártása nélkül lehet tisztázni a termék tényleges tulajdonságait. A szimuláció költséghatékonyabb, mint a prototípussal valós kísérletezés, és gyorsabb, mint a kísérleti idők.

A megrendelők egyre több alkalommal megkívánják a termék minőségi tanúsítványához a mechanikai számítások bemutatását.

Napjainkban programrendszerek, és programok segítik a mérnököket a tervező munkában. A programrendszerekhez csatlakoztatható végeselemes programok kiegészítik a szokványos tervezést, lehetővé teszik a magas igényű tervezést mechanikai számításokkal megvalósítva.

A tervezőrendszerekben a geometriai leírás, anyagtulajdonságok, szabványok, előírások és minőségbiztosítási feltételek kívül a megtervezett gép vagy szerkezet stb. technológiai mechanikai analízisére, szimulációjára, optimalizálására is sort lehet keríteni a végeselemes módszerre alapozott közelítő számításokat végző modulokkal. Ezek vagy be vannak építve a tervezőrendszerbe, vagy valamilyen úton csatlakoztathatóak.

A végeselemes módszer matematikai szempontból közelítő módszer, tehát az azt használó mérnöknek jó látni a számítás hibáját, az eredmények pontosításának útját.

Három féle útja terjedt el a számításnak a gyakorlatban. Az első esetben a számítás pontosságát a felvett elemháló sűrítésével, a másodiknál az elemméret változatlan hagyása mellett az elemen belüli közelítő polinom fokszámának növelésével és a harmadik változatban pedig az elemméret h és a p fokszám együttes megváltoztatása változtatása útján érhető el. Ez az úgynevezett hp eljárás. [8]

4.1.2. A p verziós számítás és annak előnyei

A h típusú közelítéshez képest egyenletes elemsűrítés mellett a p típusú közelítés kétszer olyan gyorsan konvergál. Ugyanazon hibát p típusú közelítéssel kevesebb ismeretlennel tudjuk elérni. Térbeli feladatoknál a p verziójú számítások konvergencia sebessége gyorsabb a h verziójú számításénál.

Miután felismerték a p verziós számítás előnyeit, a hagyományos végeselemes programrendszer fejlesztők is p verziójú elemeket építettek be az elemválasztékukba.

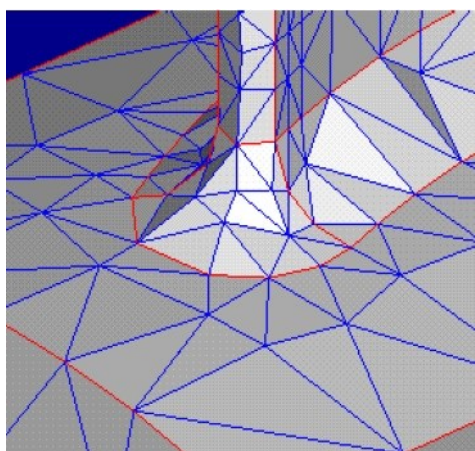
Előnyei:

- kevesebb a felvett elemek száma, mint a h verziós számításokhoz szükséges
- Érzéketlen azokra a számítási problémákra a módszer, amelyek az alacsony fokú megközelítésből erednek
- A h verziónál tapasztaltnál gyorsabb konvergenciájú megoldás érhető el a gyakorlati számításokban
- a p fokszám növelésével bármilyen pontosság elérhető
- jól használható tervezés és ellenőrzési munkákban. [8]

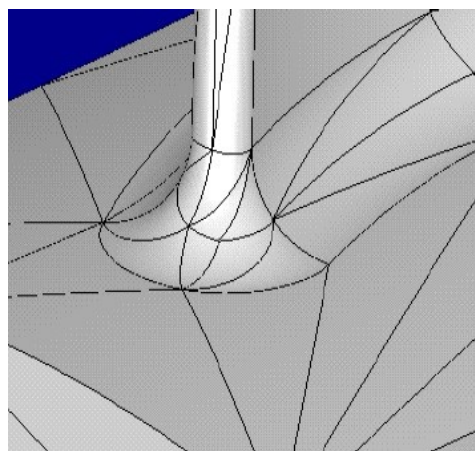
A programok futása a kisebb elemszámokkal jelentősen gyorsult. Így lerövidült a tervezés ideje, ami hatékonyabb munkát eredményez. Az eredmények megbízhatóbbá váltak, nem függenek a háló sűrűségétől, az adaptív p megoldónak köszönhetően.

A tervezőrendszereknek köszönhetően a CAD modellek átalakítása, konvertálása nem szükséges, az analízis azonnal végezhető a modellen. Így a hálózás elvégezhető a geometria leegyszerűsítése nélkül, valamint rúd, héj és testmodelleken is végezhető szimuláció könnyedén.

Példa a h és p verziós hálózás közötti különbségre:

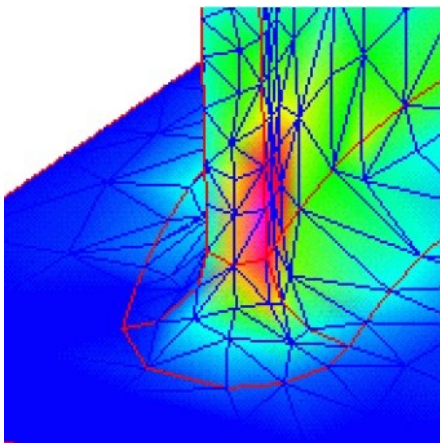


A h verziós hálózás
13. ábra [10]

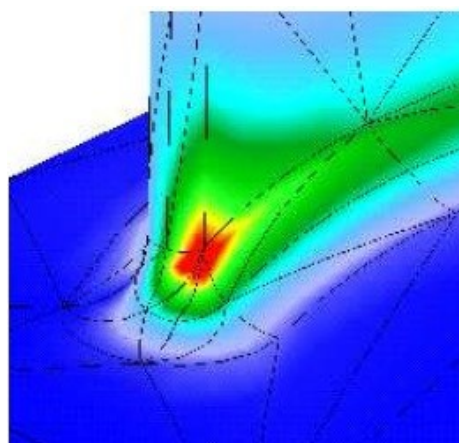


A p verziós hálózás
14. ábra [10]

Mivel a p verziós számításoknál a pontos geometria meghatározható, ezért a háló sűrítése nélkül elsőre jó közelítést ad az analízis. A h verziós számításoknál viszont a háló sűrítésével, az elemszám növelésével, és az



H verziós számítás analízis után
15. ábra [9]

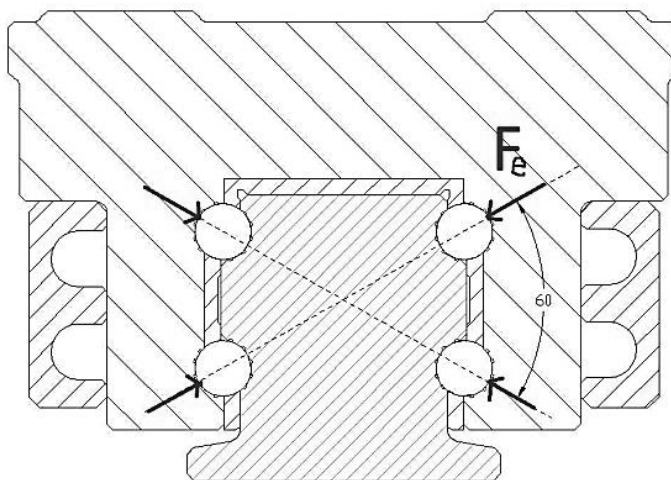


P verziós számítás analízis után
16. ábra [9]

elemek méretének csökkentésével növekedhet az eredmény pontossága, és a háló sűrítés mértékének megállapításához nagy tapasztalat szükséges. [9]

4.2. Az első megközelítési mód

Az első megközelítésben a vizsgált alkatrész a kocs test lesz. A tűrésmezőt a terhelő erő ráadásával és az elmozdulás nagyságával határozzuk meg.



17. ábra [10]

Az előfeszítő erő és hatásvonala

A hatásvonalban ható erők miatt a vízszintessel 30° -ot bezáró síkfelületre helyezzük a korábban katalógusok alapján, kereskedelmi termékeknél standardizált, kiszámított $F_e=1600\text{N}$ erőt. Az így kapott kép alapján az elmozdulásokról, kiderül a deformáció nagysága. Ezt fogom felhasználni a későbbiekben a konstrukció végleges kialakításához.

A terhelt test a kocs test szimmetria síkja mentén kettévágott és $l=5\text{mm}$, a golyó átmérőjének hosszán extrudált test. Mindkét arra az oldalra eső golyóvezető hornyot vizsgáljuk. A két horony és a kocs test deformációja eltérő nagyságú lehet, az egymással szöget bezáró hatásvonal miatt, mivel a keresztmetszet nagysága változik.

A terheléseket a kijelölt felületen, az előfeszítő erő hatásvonalában, az érintkezési pontban vesszük fel. Az erők eredői 30° -ot zárnak be egymással, így komponensekre bontva tudjuk felvenni a terhelést.

Az x irányú komponens számítható: $F_x=F_e \cdot \cos 30^\circ=1385\text{ N}$

A y irányú komponens: $F_y=F_e \cdot \sin 30^\circ= 800\text{ N}$

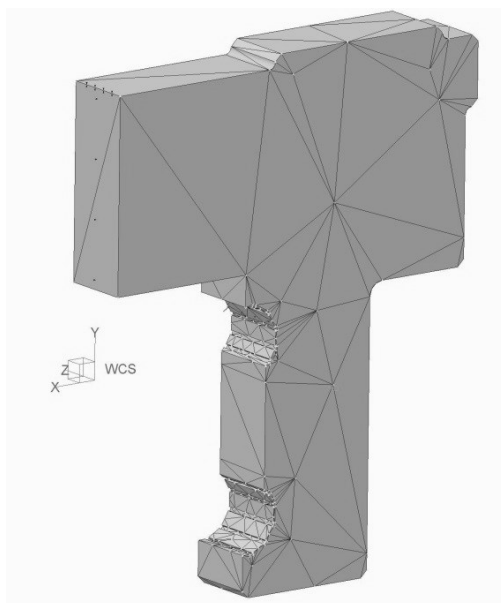
Továbbá figyelembe kell venni a koordináta rendszer tengelyeinek irányait az előjelek szempontjából.

A megfogásokat is be kell állítani a modellen. Mind a golyó visszatérítővel rendelkező és a golyó visszatérítő nélküli kocsitesten is ugyanazon beállításokat alkalmazzuk. Így az x , y , z tengelyek körüli rotációt mindkét esetben lekötjük, és egy oldalfelületen állítunk be x irányban kötött, y és z irányban szabad mozgást, egy élen állítunk be y irányban kötöttséget, x és z -ben szabad elmozdulást. A test hátlapján z irányú elmozdulás kötött, az x és y irányú szabad.

4.2.1. Vizsgálat golyó visszavezető betét nélküli kocsin

A kocsin test alapvetően anyag költséghatékonyság miatt golyó-visszavezető nélkül készül el, külön alkatrész valósítja meg a visszavezetést. Mivel műanyagból készül, ezért nem rendelkezik akkora szilárdsági tulajdonságokkal. A vizsgálatot csak a főfunkció hordozókkal végezzük el, az összeállításból eltávolításra kerülnek a mellékfunkció hordozók, nem acél alkatrészek.

Az eredmény eléréshez a problémát indirekt módon közelítjük meg. A kocsin test szimmetria síkja mentén eltávolított és $l=5\text{mm}$, a golyó átmérőjének hosszán kihúzott test. Mindkét, arra az oldalra eső futópályára eső terhelést vizsgáljuk. A két horony és a kocsin test deformációja eltérő nagyságú.

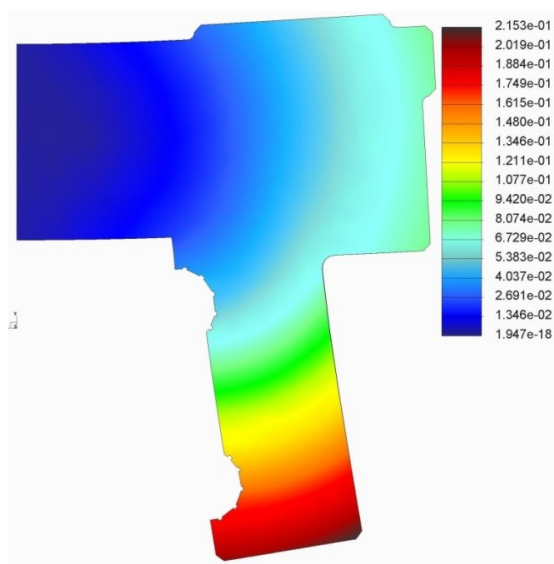


Végeselemes háló, terhelések, megfogások elhelyezése után
18. ábra [10]

Az elképzelés az, hogy megvizsgálva abban az esetben mennyi az elmozdulás és a keletkező feszültség, hogyha a golyók tökéletesen merev testként viselkednek, vagy elmozdulásuk nagyon kismértékű.

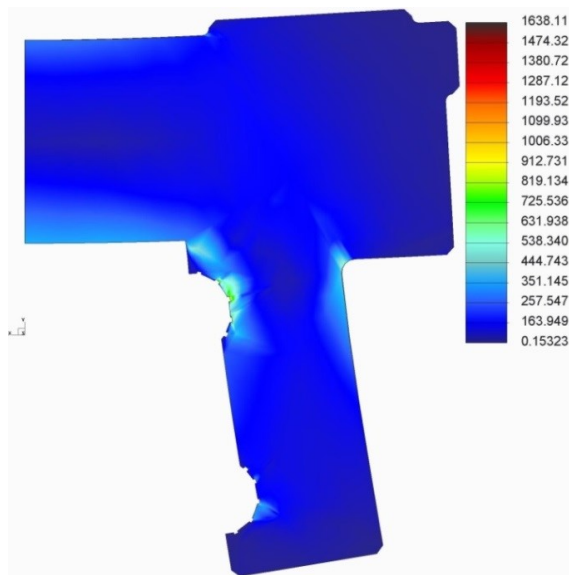
Ezek alapján meghatározhatóvá válik a test rugalmas alakváltozása, és egyértelművé válik a gyártáshoz szükséges adatok, amivel az előfeszítő erőt érjük el.

A kapott eredményeket megjelenítve, *felnagyítva* a deformáció mértékét, leolvasható a skáláról az elmozdulások mértéke, és a keletkező feszültségek nagysága. Az ábrák alapján az elmozdulás mértéke a vizsgált pontban, az erőfeszítő erő hatásvonalában $\Delta l = 4,5 \cdot 10^{-2} mm$. A keletkező feszültség a diagramból leolvasható $\sigma = 600 MPa$. Az alsó golyóvezető horonyban $\Delta l = 1,7 \cdot 10^{-1} mm$ az elmozdulás nagysága a vizsgált érintkezési felületen, és $\sigma = 500 MPa$ a keletkező feszültség nagysága a futópályán.



A kapott eredmény, az elmozdulások [mm]

19. ábra [10]



A redukált feszültség Huber-Mises-Hencky alapján [MPa]

20. ábra [10]

Látható, hogy az alsó futópálya esetén az elmozdulás mértéke jelentősebb volt, mint a felső esetén. Ez alapján ugyanazon nagyságú előfeszítő erő eléréséhez nagyobb ráhagyás szükséges a gyártás során. A keletkező feszültség nagysága viszont kisebb, így megoldás lehet más méretű golyó alkalmazása a konstrukcióban. Az ilyen változtatás más terhelés hatására bekövetkező deformáció változást is eredményezhet. Az eltérő kihajlás nagysága létrehozhat más rezgésállapotot, illetve vezethet más csúszva gördülési tulajdonságokhoz is.

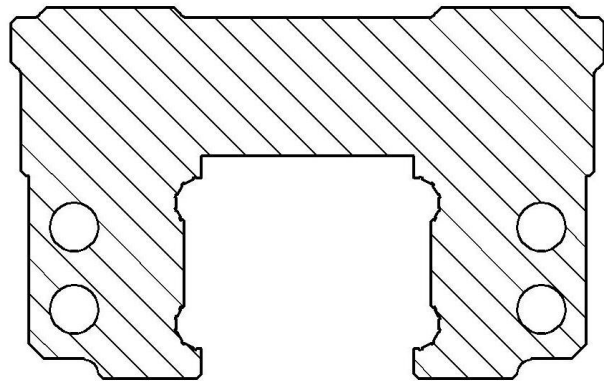
A kihajlás mértéke csökkenthető, ha növeljük a keresztmetszetet azokon a pontokon, ahol nagyobb mértékű feszültség keletkezik. Ilyen látható a kocsitest külső oldalán lévő lekerekítésnél is.

4.2.2. Vizsgálat a golyó visszavezetővel rendelkező kocsi testen

A kocsi testet, szilárdsági okokból golyó-visszavezetővel készítjük el. Ennek célja, hogy növelje a szilárdsági mutatóit a vezetékegységnek. Ezen kívül célja, hogy nagyobb merevség igényű berendezésekben lehessen felhasználni.



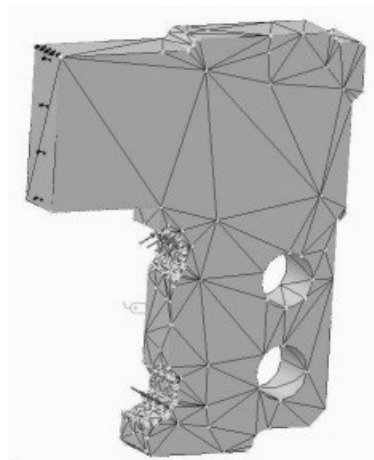
Az növelt kocsitest axonometrikus nézete
21. ábra [10]



A kocsitest metszeti ábrája
22. ábra [10]

Az előző pontban 4.2.1 vizsgált kocsin a működés közben a kihajlás mértéke ronthat különböző tulajdonságokon. A megfogásokat és terheléseket az előző pont vizsgálata szerint vesszük fel.

A kocsi saját golyó visszavezető furattal elkészítve, keresztmetszetét megnövelve javíthatunk a működési jellemzőin.



A végelelemes háló, a megfogások és terhelések felhelyezése után

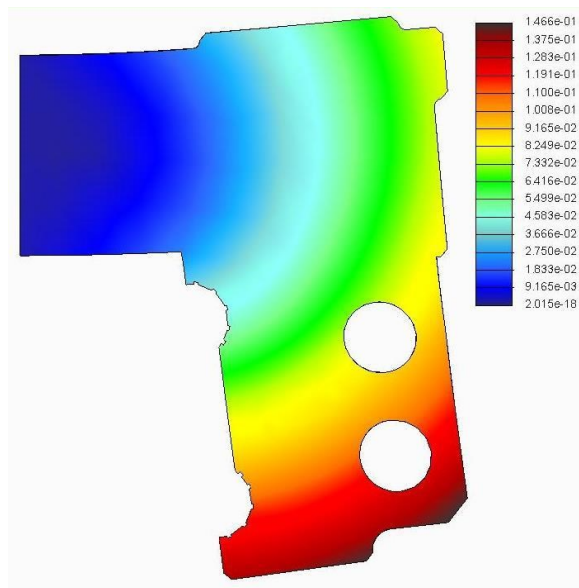
23. ábra [10]

A végeleemes szimuláció után az eltérések az előzőekben vizsgáltakhoz képest az alábbiakat mutatják.

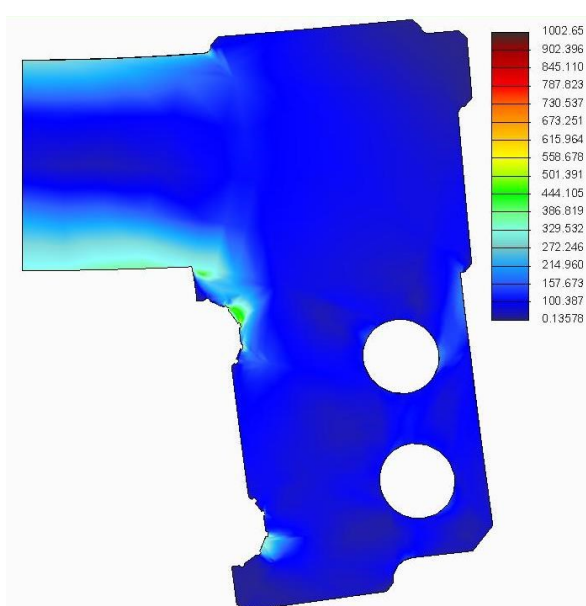
A 4.2.1 pontban vizsgáltakkal szemben eltérő eredményeket produkált a módosított kocsi. A felső golyóvezető horony eddig vizsgált pontjában az elmozdulás mértéke $\Delta l = 4,2 \cdot 10^{-2} mm$ -re csökkent. Az alsó golyóvezető horonynál ez az érték $\Delta l = 1,1 \cdot 10^{-1} mm$ -re csökkent. Ez azt jelenti, hogy a gyártási adatokat 0,01 mm pontosságra kell megadni. A kisebb gyártási ráhagyás hatására javul a merevsége a vezetéknek, ezáltal a futáspontosság és a rezgésállapot is.

A keletkező feszültségek nagyságát tekintve is jelentős változás következett be. Az előző verzióhoz képest az ébredő feszültség a felső futópálya vizsgált részén $\sigma = 450 MPa$ -ra csökkent, míg az alsó golyóvezető horonyban $\sigma = 300 MPa$ -ra csökkent. A kisebb kihajlás elősegíti az előfeszítő erő biztosítását terhelt és terhelt állapotokban egyaránt, ami a megfelelő futáspontosság kulcsa.

Változtak a feszültséggyűjtő helyek is, a keresztmetszetben keletkező feszültségek egyenletesebb eloszlásúak lettek.



A kapott eredmény, az elmozdulások
[mm]
24. ábra [10]



A redukált feszültség Huber-Mises-Hencky
alaján [MPa]
25. ábra [10]

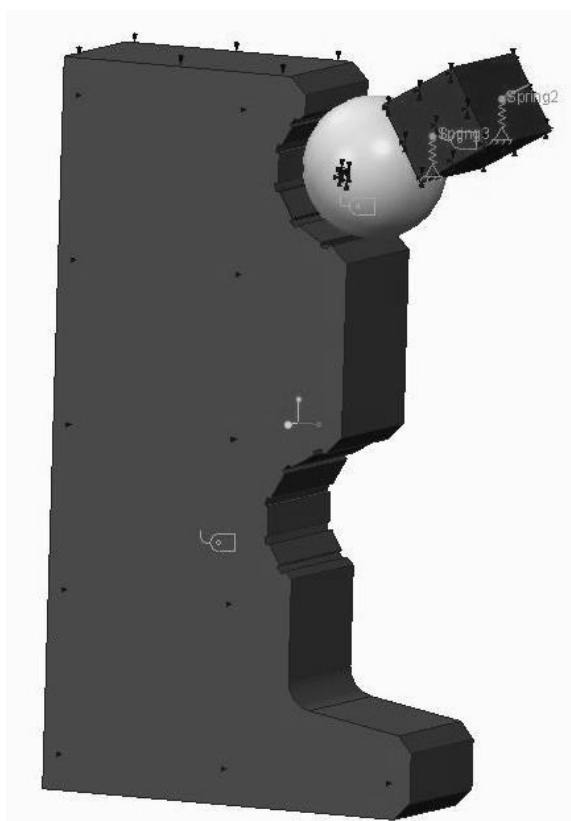
4.3. Második megközelítési mód

A feladatban elsőként csak a kocsit vizsgáltuk, hogy mekkora elmozdulás keletkezik a megadott terhelés esetén. A golyó elmozdulás és keletkező feszültségeit nem vizsgáltuk. Ez viszont csak akkor értelmezhető, hogy ha a golyók teljesen merev testek.

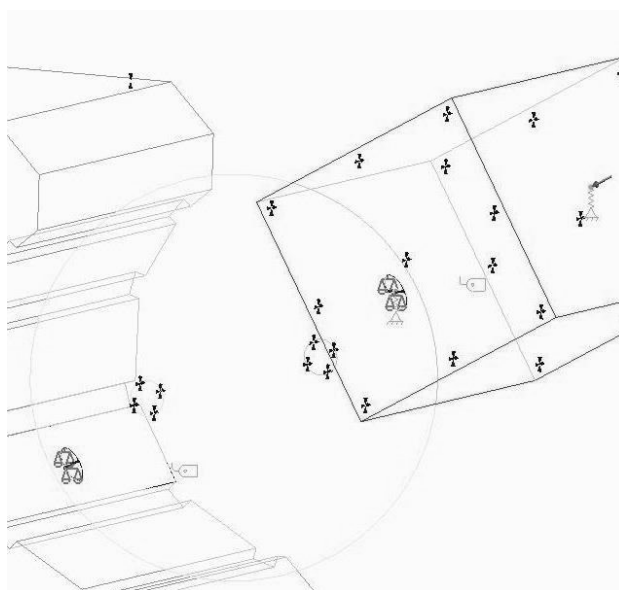
A következő lépés, hogy a golyó elmozdulását kell megvizsgálni, modellezve a terhelő erőt.

A vezetékszelet modelljére illesztjük a golyót, és a golyót terheljük egy erővel. Az érintkezést modellezve, a kocsitestet egy nagyon merev testtel helyettesítjük, így vizsgálva az elmozdulást.

A vizsgálat során egy új koordináta rendszer felvételére volt szükség. Ez megkönnyíti a terhelő erő nagyságának leírását, illetve a későbbiekben definiált megfogások, rugók felvételét is leegyszerűsíti.



Az összeállított modell a szimulációhoz
26. ábra [10]



A csatlakozó felületek, definiált rugók,
modellrészlet
27. ábra [10]

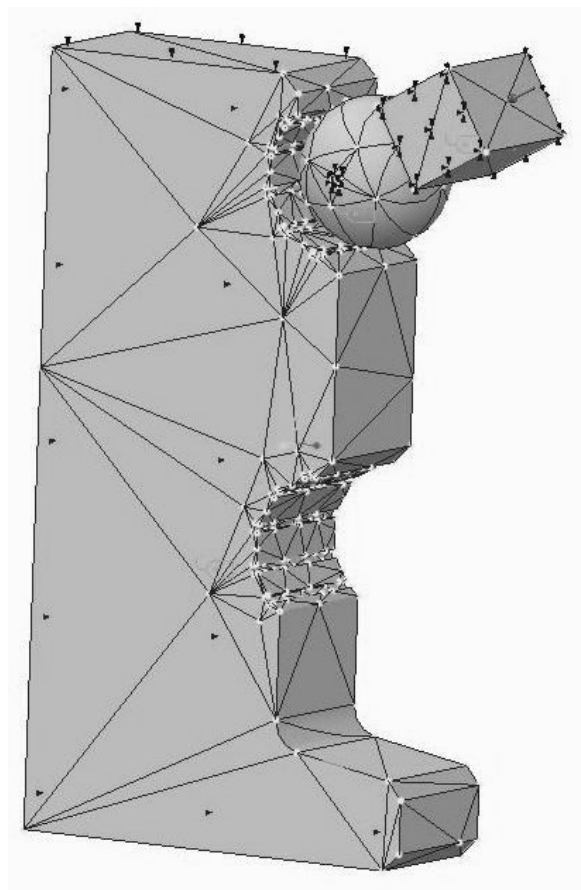
A golyón ki kellett alakítani a szimmetriasíkokkal párhuzamos, kis kiterjedésű síkfelületeket. Erre azért volt szükség, hogy biztosíthassuk a felvett koordináta-rendszer menti kényszerezett elmozdulást, illetve az alkatrészeket

felület-felület opcióval lehessen csatlakoztatni egymáshoz. Ezek a felületek 0,01 mm levágást jelentenek a golyókból. Így két csatlakoztatott felület van:

- golyó-vezeték futófelület
- golyó-nagy merevségű test

A golyó és a vezeték között viszont ennek a 0,01mm nagyságú levágásnak megfelelő távolság van. Ezt az analízis során le kell vonni az elmozdulás nagyságából.

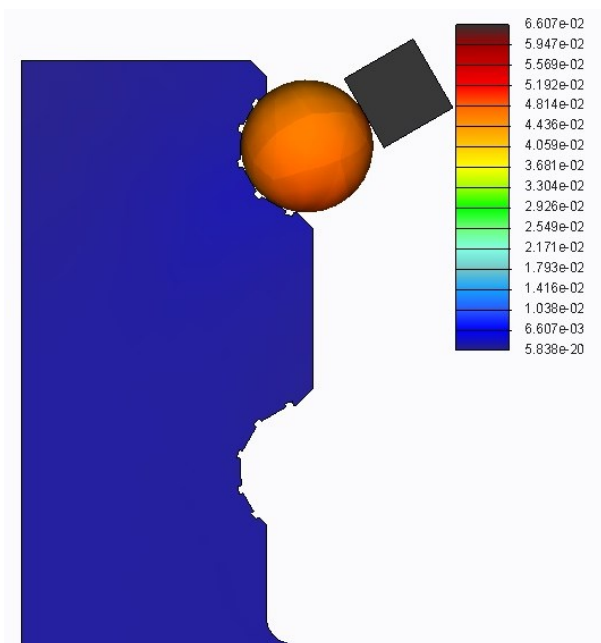
Ahhoz hogy biztosíthassuk a rugalmas test alakváltozásának szimulációját, rugókat kell definiálnunk kitüntetett pontokban. Ez a két pont a felvett terhelés pontjában, és a golyó- nagy merevségű test érintkezési felületén kijelölt pont. A rugóállandót a felvett koordináta rendszer tengelyeihez igazítva vesszük fel.



Az modell végeleemes hálóval terhelések, megfogások, definiált rugók és érintkezési felületekkel ellátva

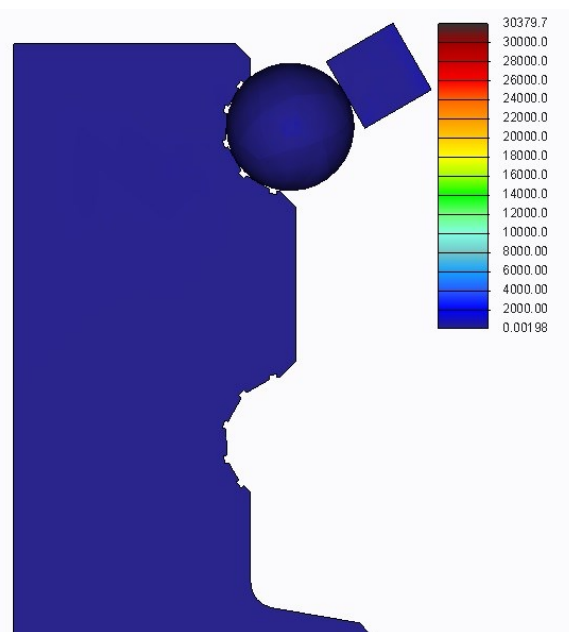
28. ábra [10]

Az analízis futása után a kapott eredmények alapján megállapítható a korábbi analízisek eredményeinek helytállása.



Az elmozdulások

29. ábra [10]



A redukált feszültség HMH alapján

30. ábra [10]

Az analízis eredményeit vizsgálva, látható hogy a golyó elmozdulása közel $\Delta l = 0,05$ mm. Mivel a vezeték és a golyón kialakított síkfelület távolsága $l = 0,01$ mm, ezért a kettő különbségét véve a tényleges elmozdulás $\Delta l = 0,04$ mm.

A vezeték elmozdulását nézve közel $\Delta l = 0,001$ mm, ami a többi alkatrészhez viszonyítva elhanyagolható nagyságúnak tekinthető.

A keletkező feszültségeket vizsgálva láthatjuk, hogy a golyón ébredő feszültségek mértéke az érintkező felületeknél, az előfeszítő erő hatásvonalában a legnagyobb. Az érintkezési pontban ébredő feszültség eléri a $\sigma = 1000$ MPa-t is.

Mivel mindkét golyóvezető horonyban ugyanaz az az előfeszítő erő hat, ezért elegendő csak az egyiket vizsgálni erővel terhelve. Mivel a kocsitest esetében vizsgált elmozdulás nagyobb, ezért más gyártástechnológiai, paraméterek szükségesek amik kompenzálják a nagyobb kihajlás okozta deformációt. A golyó mértét nem szükséges változtatni ilyen esetben.

5. Összefoglalás

A TDK dolgozatban egy saját konstrukciós kialakítású kompakt lineáris vezetőegység digitális prototípusa került vizsgálatra.

A vizsgálat során a kitűzött cél annak a gyártási tűrésnek a meghatározása, amivel az előfeszítő erő nagyságát elérjük. Ehhez alapul vettem a Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszékén kidolgozott oktatási segédletet, amiben a gördülőpapucsos szánvezetékek tervezési irányelvei között az előfeszítés megvalósítása is szerepel. A korábban kidolgozott előfeszítési módszer alapelveit felhasználtam a lineáris kompakt vezetékek előfeszítésének meghatározására. A kereskedelmi forgalomban kapható ilyen típusú vezetékek és azok előfeszítettség kategóriái alapján kiválasztottam egy a megtervezetthez hasonló típust, és arra méreteztem az előfeszítő erőt.

Tervezőrendszer segítségével a digitális prototípust elkészítettem, és meghatároztam az előfeszítés fő irányait és helyeit. Ezek után a végeselemes analízisben csak a főfunkció hordozókkal végeztem el a vizsgálatot, és annak kapott eredményeit elemeztem. A főfunkció hordozókat egyenként vizsgáltam meg, a kialakuló terheléseket egyenként modelleztem.

Először a kocsi került vizsgálatra. Meghatároztam, hogy a mekkora a megfelelő tűrésmező, amivel az előfeszítő erő elérhető, illetve a feszültséggyűjtő helyeket, amiket a konstrukciós kialakításban javítani kellene.

A vizsgálat során a módosított funkció hordozóról, ami különleges igényekre szánt, megállapítottam, hogy az elmozdulások mértéke 90 illetve 65%-ra csökkent, a keletkező feszültségek pedig a 2/3-ukra csökkentek.

Különbontva a szerkezetet, a gördülőelem terhelése esetén is végeztem vizsgálatot. A vizsgálatához segédelemeket használtam, amivel modellezhető volt a terhelés alatt lévő gördülőelem. A kapott eredményekből megállapítottam, hogy a vezetékléc deformációja a többi elemhez képest jóval kisebb mértékű, a gördülőelemé pedig közel megegyező mértékű a kocsiival.

Ezek alapján elmondható, hogy az előfeszítő erőhöz szükséges tűrésmező nagyságát helyesen határoztam meg, amivel le kell gyártani az alkatrész.

Megállapítottam, hogy a kocsi testben kialakított golyóvezető horony jóval kedvezőbb szilárdsági mutatókkal rendelkezik, így az általános igényeken túl máshol is felhasználható.

A vizsgálatokat p verziós számításra képes végeselemes szoftverrel végeztem el, amely segítségével a létező CAD modellen azonnal el lehetett végezni a vizsgálatot geometriai egyszerűsítések nélkül. A p verziós végeselemes

háló segítségével az elemek nagyságának változtatása és a háló sűrítése nélkül elsőre pontos eredményt kaptam.

6. Fejlesztési lehetőségek

A gördülővezetéken, a vizsgálat során felvetődött néhány fejlesztési lehetőség.

A keletkező feszültségeket vizsgálva néhány feszültséggyűjtő pont mutatkozik, aminek mérséklése megelőzheti a ridegtörést, kifáradást stb. A feszültségek a lekerekítésekénél keletkeznek javarészt, illetve a húzott szálakon. A lekerekítések megnövelése csökkentheti a keletkező feszültség nagyságát, illetve a húzott keresztmetszetek megnövelése.

Az elmozdulásokat vizsgálva a kocsin, megállapítható, hogy a golyó-visszavezető furat nélküli kocsitest elmozdulása nagyobb. A kihajlás szempontjából a keresztmetszet növelés lehet megoldás. Az alsó golyóvezető horony elmozdulása nagyobb, így a keresztmetszet növelésnél főként arra kell irányulnia, hogy az alsó futópálya elmozdulása csökkenjen.

7. Irodalom jegyzék

- [1] B. B. M. J. T. G. Molnár László, „Gördülőpapucsos megvezetés tervezés irányelvei,” in *Oktatási segédlet*, Miskolc, Nehézipari Műszaki Egyetem, 1988.
- [2] Confidenza, „Confidenza Műszaki Leírások: Csapágyhézag, csapágyak rögzítése,” [Online]. Available: http://www.confidenza.hu/NTNkatalogus/ntn_muszaki_8.html.
- [3] D. V. György, Szerző, *Szerszámgépek I..* [Performance]. Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke, 2012.
- [4] G. P.-. W. Beitz, A géptervezés elmélete és gyakorlata, Budapest: Műszaki könyvkiadó, 1981.
- [5] IKO, *Linear Motion Rolling Guide Series General Catalog Blue*.
- [6] G. Szabolcs, „Adaptív automatikus hálógenerálás a végeelem módszerhez,” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatika Kar Elméleti Villamosságtan Tanszék, Budapest, 2003.
- [7] P. D. P. István, Szerző, *VEM alapjai 1. előadás*. [Performance]. Miskolci Egyetem, 2009.
- [8] P. D. P. István, „A NUMERIKUS MECHANIKA SZEREPE A MÉRNÖKI ALKOTÓI TEVÉKENYSÉGBEN,” in *Miskolci Egyetem Mechanika Tanszék*, Miskolc, 2003.
- [9] S. Kft, „Pro Mechanica adatlap 2010 magyar,” 2010. [Online]. Available: http://www.snt.hu/boxcontent/cadcam/ProMECHANICA_adatlap_2010.pdf.
- [10] K. Tamás, „Gördülő papucs család tervezése,” 2013.



8. Tartalomjegyzék

1.	ELŐSZÓ	1
2.	SUMMARY	2
3.	A TÉMA BEVEZETÉSE	3
3.1.	AZ ELŐFESZÍTÉS OKA ÉS MEGOLDÁSAI.....	3
3.1.1.	Az előfeszítés fogalma.....	3
3.1.2.	Az előfeszítés alkalmazásának célja.....	3
3.1.3.	Az előfeszítő erő mértéke	4
3.1.4.	Az előfeszítés megvalósítása	4
3.1.5.	Az előfeszítés hátrányai, negatív tulajdonságai.....	7
3.1.6.	Szerelhetőség és annak megoldásai.....	8
3.2.	AZ ANALÍZIS SORÁN VIZSGÁLT VEZETÉKEGYSÉG ÉS RÉSZEI	8
3.2.1.	A vezeték ismertetése, típusa	8
3.2.2.	A megtervezett vezeték részei	9
3.3.	A VIZSGÁLAT KITŰZÖTT CÉLJA.....	13
3.3.1.	A túrásmező meghatározása az előfeszítő erőhöz	13
3.3.2.	Statikus terhelhetősége az egységnek.....	13
4.	AZ ELŐFESZÍTŐ ERŐ MEGVALÓSÍTÁSA ÉS ANNAK VIZSGÁLATA	14
4.1.	A MEGOLDÁSHOZ ALKALMAZOTT VÉGESELEMES MÓDSZER	14
4.1.1.	A végeselemes módszer.....	15
4.1.2.	A p verziós számítás és annak előnyei.....	16
4.2.	AZ ELSŐ MEGKÖZELÍTÉSI MÓD.....	18
4.2.1.	Vizsgálat golyó visszavezető betét nélküli kocsin	19
4.3.	Második megközelítési mód	23
5.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	26
6.	FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK	27
7.	IRODALOM JEGYZÉK.....	28
8.	TARTALOMJEGYZÉK	29