Gradus Vol 13, No 2 (2026)
ISSN 2064-8014
Article no. 2026.2.ENG.009

Hálóérzékenységi vizsgálat egy csigalevél-hajlító készülék végeselemes modelljén

Mesh Sensitivity Analysis of a Finite Element Model of a Helical Blade Bending Device

Ignácz Patrik[1], Papp Klaudia[2],

1 Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország
https://orcid.org/0009-0006-7796-1020
2 Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország
https://orcid.org/0000-0002-7505-6944

https://doi.org/10.47833/2026.2.ENG.009

Kulcsszavak:
Végeselemes módszer
Hálóérzékenység
Hálófinomítás
Feszültségelemzés
Csigalevél-hajlító készülék

Keywords:
Finite Element Method
Mesh Sensitivity
Mesh Refinement
Stress Analysis
Helical Blade Bending Device

Cikktörténet:
Beérkezett 2026. november 4.
Átdolgozva 2026. november 6.
Elfogadva 2026. november 8.

Összefoglalás
Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy a végeselemes hálósűrűség milyen hatással van a szimuláció eredményeire, különös tekintettel a feszültség- és deformációs értékekre. A vizsgálatot egy lemezhajlító gépre szerelhető, moduláris csigalevél-hajlító készülék példáján keresztül végeztük. A szimulációk során különböző hálófinomságokat alkalmaztunk, és elemeztük azok hatását a lokális feszültségeloszlásra, a maximális feszültség helyére, valamint a szerkezet deformációjára és stabilitására. A vizsgálatokhoz PTC Creo és ANSYS végeselemes környezeteket alkalmaztunk. Az eredmények alapján a hálósűrűség jelentősen befolyásolta a lokális feszültségértékeket és a feszültségcsúcsok térbeli helyzetét, míg a szerkezet globális stabilitására és oldalirányú kihajlására nem gyakorolt számottevő hatást. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a megfelelő hálófinomság megválasztása alapvető fontosságú a megbízható és reális végeselemes eredmények meghatározásához.

Abstract
The aim of this research is to investigate the effect of finite element mesh density on simulation results, with particular emphasis on stress and deformation values. The investigation was carried out using a modular scroll-blade bending device that can be mounted on a sheet metal bending machine as a case study. Different mesh refinements were applied in the simulations, and their effects on local stress distribution, the location of maximum stress, as well as structural deformation and stability were analyzed. The simulations were performed using the PTC Creo and ANSYS finite element environments. The results showed that mesh density significantly affected local stress values and the spatial location of stress concentrations, while it had no significant effect on the global stability or lateral buckling of the structure. The results highlight that selecting an appropriate mesh refinement is essential for obtaining reliable and realistic finite element simulation results.

Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: papp.klaudia@nje.hu

1. Bevezetés

Kutatás célja annak vizsgálata, hogy a végeselemes hálósűrűség milyen hatással van a szimuláció eredményeire, különös tekintettel a feszültség és deformációs értékekre. egy lemezhajlító gépre szerelhető, moduláris csigalevél-hajlító készülék fejlesztésén keresztül. A fejlesztés során olyan kiegészítő egység kialakítására törekszünk, amely a meglévő lemezhajlító gép erőforrásait kihasználva képes csigalevél-geometriájú alkatrészek előállítására. A kutatás további célja a különböző tervezési és szimulációs módszerek vizsgálata, valamint annak meghatározása, hogy azok milyen hatással vannak a tervezési folyamatra és a készülék működésére. A kialakított megoldás alternatívát jelenthet a csigalevél-geometriájú alkatrészek hagyományos gyártási eljárásaival szemben.

A csigalevél-geometriájú alkatrészek kiemelt szerepet töltenek be a szállítástechnika, a mezőgazdasági gépgyártás és az anyagmozgató berendezések területén. Spirális kialakításuk lehetővé teszi különböző halmazállapotú anyagok axiális irányú továbbítását. Jelen helyzetben ez a készülék egy bányának a légkeverőjéhez (1. ábra) lett megtervezve.

A csigalevél-hajlító készülék geometriai kialakítása Solid Edge tervezőszoftver alkalmazásával történt, míg a szerkezet szilárdságtani vizsgálata végeselemes módszerrel, a Creo és az ANSYS szimulációs rendszerek felhasználásával valósult meg. A numerikus szimulációk során a készülék két kritikus állapotát és komponensét vizsgáltuk.

A felfogató rendszer feszültségvizsgálata (2–4. ábra) során a készüléket hat darab csavar rögzíti, amelyekre a szerkezet saját tömegéből származó terhelés hat. A csavarokat kizárólag ez a súlyból eredő erő terheli, amely a „z” irány negatív tartományába mutat, és a csavar palástfelületén megoszló terhelésként érvényesül. A von Mises-feszültségelemzést és a hálóérzékenységi vizsgálatokat ezeken az elemeken végeztük el, mivel a legnagyobb feszültségkoncentrációk a csavartövek környezetében, a húzott és nyomott szálak mentén alakulnak ki.

A gyártási folyamat során fellépő maximális terhelés szimulálására a szerkezetre egy 12 tonna tömegnek megfelelő erőt alkalmaztunk, amely a „z” irány negatív tartományába mutat. Az erő a modellben a legnagyobb feltételezett igénybevételi helyre került. A befogás a szerkezet alsó részén valósult meg, azon a felületen, ahol az elem a tárgyasztalhoz felfekszik, illetve ahol a rögzítőcsavarok kapcsolódnak. Ezen elemzés célja a szerkezet globális stabilitásának és a lehetséges oldalirányú kihajlásnak a vizsgálata volt. [1, 2]



1. ábra: A légkeverő berendezés

2. Felhasznált anyagok és eljárások

2.1. Szakirodalom áttekintés

Bright és Rayfield (2011) a végeselemes modellek hálósűrűségének hatását vizsgálták különböző hálósűrűségű koponyamodellek összehasonlításával. Kutatásuk célja annak meghatározása volt, hogy a háló finomsága milyen mértékben befolyásolja a számítási eredményeket. Az eredmények alapján a túl durva háló pontatlanabb elmozdulási és alakváltozási értékeket eredményezhet, míg a lokális, nagy alakváltozású területek megfelelő modellezéséhez finomabb hálóra van szükség. A vizsgálat során megállapították, hogy az egyes területek eltérő mértékben érzékenyek a hálósűrűség vá ltozására, és a legtöbb vizsgált területen körülbelül 1 mm-es elemátmérő mellett megfelelő konvergenciát tapasztaltak. A tanulmány alapján a hálókonvergencia vizsgálata fontos része a végeselemes szimulációknak, mivel a megfelelő hálósűrűség hozzájárul a számítási eredmények megbízhatóságához [3].

Ezzel összhangban Mack és munkatársai (2023) a végeselemes modellek hálófinomításának hatását vizsgálták nukleáris minőségű grafitalkatrészek esetében. Különböző hálósűrűségű modellek összehasonlításával kimutatták, hogy a háló finomítása jelentősen befolyásolhatja a lokális feszültségértékeket, és a maximális feszültség megfelelő konvergenciájához bizonyos esetekben finomabb hálóra van szükség. A vizsgált egyszerűbb esetekben a hálófinomítás nem minden esetben változtatta meg a szerkezeti megfelelőség eredményét, részletesebb értékeléseknél azonban a hálósűrűség a meghibásodási valószínűség számítására is hatással volt. A szerzők ezért szintén hangsúlyozzák a hálókonvergencia vizsgálatának fontosságát, valamint a megfelelő hálósűrűség meghatározását a megbízható végeselemes eredmények elérése érdekében [4].

2.2. Modellimport és hálózás

A modellimport és a hálógenerálás a numerikus szimuláció meghatározó előkészítő lépései közé tartoznak, mivel a kialakított végeselemes modell minősége jelentős hatással van a számítási eredmények pontosságára és megbízhatóságára. A vizsgálatok előkészítése során célunk az volt, hogy a Solid Edge környezetben létrehozott háromdimenziós modell megfelelő formátumban kerüljön át a vizsgált szimulációs rendszerekbe. Ennek érdekében a modellt STEP formátumban exportáltuk, amely lehetővé tette a geometria és a topológiai információk megőrzését, valamint a modell beolvasását az Ansys és a Creo Simulate környezetébe.

A hálógenerálást párhuzamosan végeztük az Ansys 2025 R2 és a PTC Creo 12 környezetében. Az Ansys fejlett hálógeneráló eszközei lehetőséget biztosítottak az elemtípus, az elemméret, valamint a lokális hálófinomítások részletes szabályozására. Különös figyelmet fordítottunk a csavarfuratok és a terhelési pontok környezetére, ahol a geometriai kialakítás és a terhelések miatt jelentős feszültségkoncentrációk alakulhatnak ki, ezért ezeken a területeken finomabb hálót alkalmaztunk.

A PTC Creo Simulate esetében a modell közvetlenül a tervezési környezetből volt betölthető, így nem volt szükség külön geometriai konverzióra, ami egyszerűsítette és felgyorsította a szimuláció előkészítését. A háló paramétereinek beállítási lehetőségei az Ansyshez képest korlátozottabbak voltak, ugyanakkor a rendszer lehetővé tette a vizsgálatok következetes elvégzését. Ezáltal a két szimulációs környezetben kapott eredmények összehasonlíthatóvá váltak, ami alapot biztosított a különböző szoftverek vizsgálatához [5, 6].

2.3. Hálóérzékenységi vizsgálat

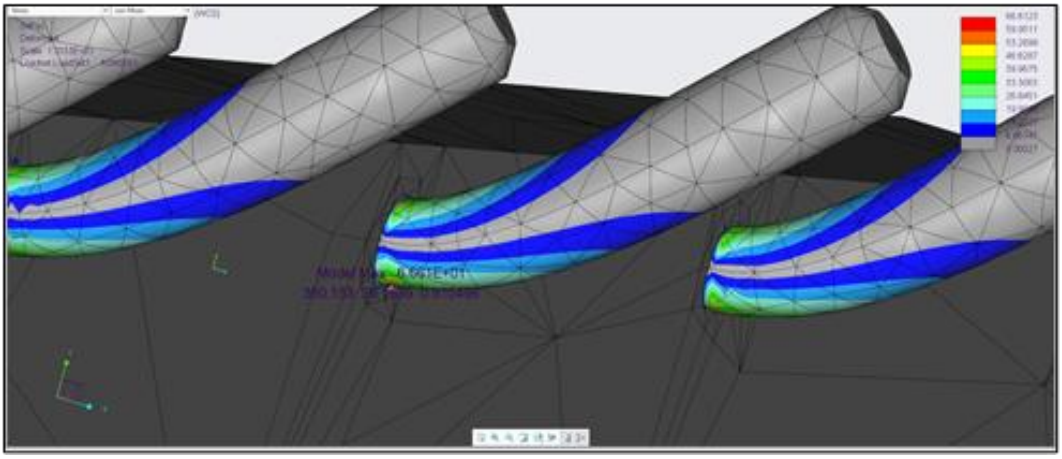
A végeselemes szimulációk hitelesítésének alapvető feltétele a hálóérzékenységi vizsgálat elvégzése. A vizsgálat során a háló finomságának szisztematikus növelésével igazolható a numerikus megoldás konvergenciája, biztosítva, hogy a számított feszültség és deformációs értékek a modell valós fizikai viselkedését reprezentálják, és megfelelő mértékben függetlenek legyenek a hálófelbontástól. A háló kialakítása nemcsak az eredmények pontosságára, hanem a számítási igényre is jelentős hatással van, ezért a megfelelő hálóméret kiválasztásakor a numerikus pontosság és a számítási hatékonyság együttes figyelembevétele szükséges.[7]

A jelen vizsgálat során megfogalmazott hipotézis alapját az képezte, hogy a csigalevél hajlító készülék egyes elemei, különösen a hajlítóél és a megtámasztó szerkezeti részek, geometriailag

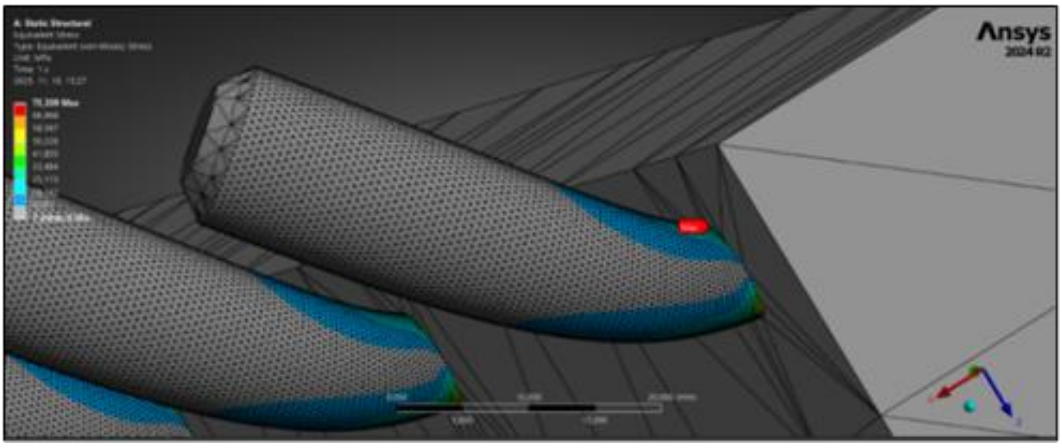
karcsú, hajlításra igénybevett alkatrészek, amelyek esetében a stabilitásvesztés lehetősége mérnöki szempontból releváns. Ismert, hogy az ilyen típusú szerkezetek érzékenyek lehetnek geometriai és numerikus imperfekciókra, ezért feltételeztük, hogy egy nem szimmetrikus, illetve durvább végeselem-háló alkalmazása mesterséges instabilitást idézhet elő. Ennek megfelelően azt a hipotézist állítottuk fel, hogy a háló aszimmetriája és ritkább felbontása kisebb terhelések mellett is oldalirányú kihajlás megjelenéséhez vezethet a numerikus modellben.

A feszültségállapot elemzéséhez 40 mm, 4 mm és 0,4 mm-es, míg a deformációs mező vizsgálatához 100 mm, 20 mm és 4 mm-es globális elemméreteket alkalmaztunk. A hálóérzékenységi vizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a hálósűrűség jelentős hatással van a lokális feszültségeloszlásra. A háló finomításával a feszültségmaximum helye a csavartó húzott régiójából a nyomott szál irányába tolódott el (2–3. ábra). Ez arra utal, hogy a durvább háló nem képes megfelelő részletességgel leképezni a lokális feszültségmezőt, ezért a lokális igénybevételek meghatározásához finomabb hálózás szükséges.

A vizsgálat során a deformációs mező mellett a háló finomságának a szerkezet stabilitására gyakorolt hatását is elemeztük. A különböző hálókialakítások összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a hálófelbontás és annak geometriai elrendezése a lokális viselkedés mellett a szerkezet globális deformációs és stabilitási viselkedésére is hatással lehet. Ez különösen fontos a vizsgált, karcsú geometriai kialakítású alkatrészek esetében, ahol a numerikus modellben megjelenő oldalirányú kihajlás megítélése csak megfelelően kialakított és kellően finom háló alkalmazása mellett tekinthető megbízhatónak. A hálóérzékenységi vizsgálat ezért a további szimulációk során alkalmazott hálóparaméterek meghatározásának alapját képezte.

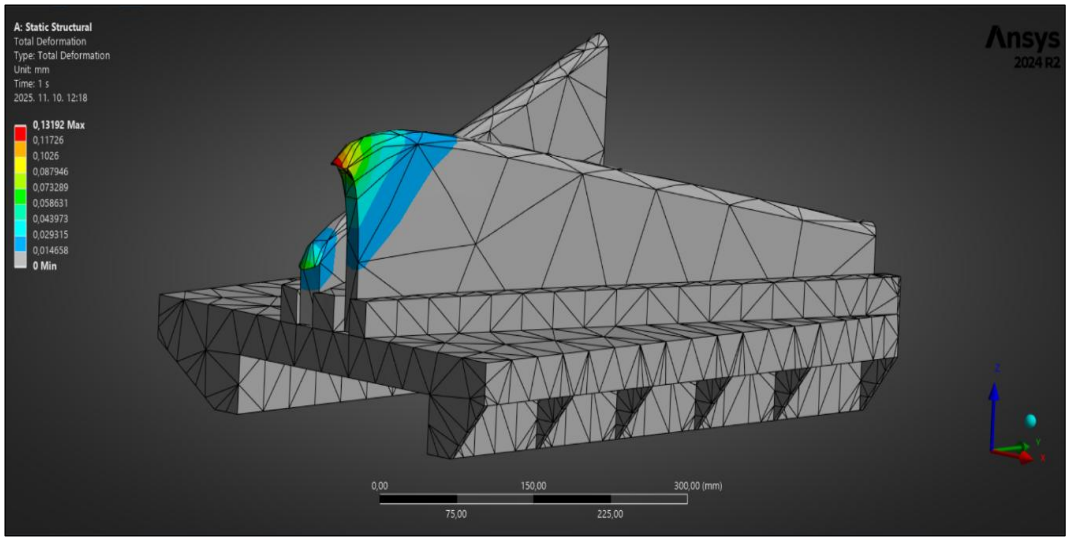


2. ábra:Felfogató ébredő maximális feszültség 4mm-es hálósűrűségnél



3. ábra:Felfogató ébredő maximális feszültség 4mm-es hálósűrűségné

A hipotézissel ellentétben azonban a globális stabilitás vizsgálata során egyik hálófelbontás esetén sem jelentkezett számottevő oldalirányú kihajlás (4. ábra). Ez azt jelenti, hogy a vizsgált szerkezet esetében a háló aszimmetriája nem eredményezett mesterséges instabil viselkedést, és a modell stabilitása elsősorban a geometriai kialakítástól és a peremfeltételektől függ. [5, 6]



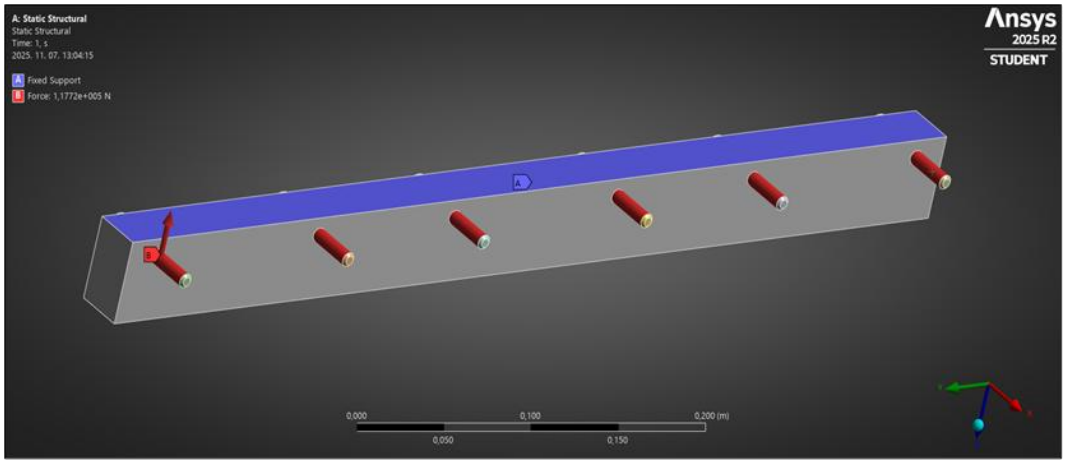
4. ábra: Hajlítókészülék alsó állórészének a deformációs vizsgálata 100mm-es hálósűrűségnél

2.4. Feszültség vizsgálat

A csavarokat kizárólag a szerkezet saját tömegéből származó, 1250 N nagyságú erő terheli, amely a „z” irány negatív tartományába mutat. A terhelés a csavarok palástfelületén megoszló terhelésként került alkalmazásra. A kialakuló feszültségállapotot Von Mises-feszültségelemzéssel vizsgáltuk. A befogás és a terhelések elhelyezése a szimulációban a 5. ábrán bemutatott módon történt.

A hat darab csavarra a test saját tömegéből származó terhelés hat, amelynek következtében kialakuló feszültségállapotot végeselemes szimulációval vizsgáltuk. A hálósűrűség változtatása nemcsak a számított feszültségértékek nagyságára, hanem azok térbeli eloszlására és kialakulási helyére is hatással volt. Ritkább háló alkalmazásakor a legnagyobb feszültség a csavar tövének alsó részén, a húzott szál közelében jelent meg. Finomabb háló esetén ezzel szemben a maximális feszültség a csavar felső zónájába, a nyomott szál irányába tolódott.

Ez jól szemlélteti, hogy a háló finomsága nem csupán a numerikus pontosságot befolyásolja, hanem a lokális feszültségcsúcsok helyének és nagyságának meghatározását is. Ezért a megfelelő hálófinomság kiválasztása alapvető fontosságú a szimulációk megbízhatósága szempontjából [8–11].

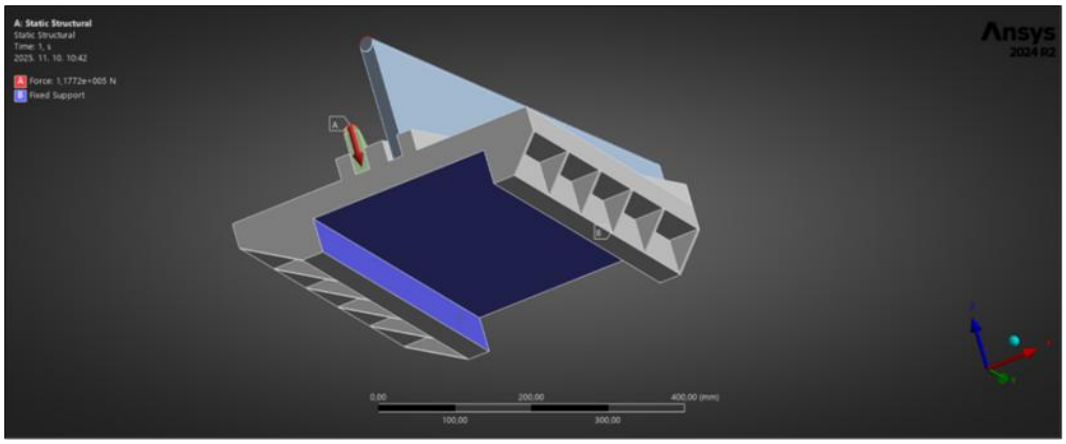


5. ábra: Feszültségvizsgálatnál a készülék rögzítéséből adódó peremfeltételek

2.5. Deformáció vizsgálat

A szerkezetre 12t tömegnek megfelelő, 117 720 N nagyságú erő hat, a „z” irány negatív tartományába mutatva. Az erő a modellben a legnagyobb feltételezett igénybevételi helyre került alkalmazásra, ezzel szimulálva a valóságban fellépő maximális terhelést.

A befogás a szerkezet alsó részén valósult meg, azon a felületen, ahol az elem a tárgyasztalhoz felfekszik, illetve ahol a rögzítőcsavarok kapcsolódnak. A szimuláció futási idejének csökkentése és a numerikus stabilitás javítása érdekében a modell alsó szakasza egyetlen összefüggő testként került kialakításra, a furatok és a csavarok külön geometriai megjelenítése nélkül. Ezáltal a szerkezet alsó részének viselkedése közelítő módon, de számítási szempontból hatékonyan reprezentálja a valós szerelési állapotot [10, 11].



6. ábra: Deformáció vizsgálatnál a készülék terhelés alatti peremfeltételei

3. Eredmények

A végeselemes hálóérzékenységi vizsgálat alapján a hálósűrűség jelentősen befolyásolta a lokális feszültségeloszlást és a maximális feszültség helyét. Ritkább hálónál a maximális feszültség a csavartő alsó, húzott szálhoz közeli részén, míg finomabb hálónál a csavar felső, nyomott szál felőli zónájában jelent meg. A 12 tonnának megfelelő terhelés mellett egyik hálófelbontásnál sem jelentkezett számottevő oldalirányú kihajlás, így a háló aszimmetriája nem okozott mesterséges instabilitást.

4. Összefoglalás

A kutatás célja annak vizsgálata volt, hogy a végeselemes hálósűrűség milyen hatással van a szimulációs eredményekre, különös tekintettel a feszültség és deformációs értékekre. A vizsgálatot egy lemezhajlító gépre szerelhető, moduláris csigalevél-hajlító készülék példáján keresztül végeztük. A szerkezet tervezése Solid Edge környezetben történt, míg a végeselemes vizsgálatokat PTC Creo és ANSYS rendszerekben végeztük. A hálóérzékenységi vizsgálatok során több különböző globális elemméretet alkalmaztunk, és elemeztük azok hatását a lokális feszültségeloszlásra, a maximális feszültség helyére, valamint a szerkezet deformációjára és stabilitására. Az eredmények alapján a hálósűrűség jelentős hatással volt a lokális feszültségértékekre és a maximális feszültség kialakulási helyére. A finomabb háló alkalmazásával a feszültségmaximum a csavartő húzott oldaláról a nyomott szál irányába tolódott el. A 12 tonnának megfelelő terhelés esetén azonban egyik vizsgált hálófelbontás mellett sem jelentkezett számottevő oldalirányú kihajlás. Ez alapján a vizsgált esetben a háló aszimmetriája nem okozott mesterséges globális instabilitást. A vizsgálatok eredményei rámutatnak arra, hogy a megfelelő hálófinomság megválasztása alapvető fontosságú a lokális feszültségviszonyok megbízható meghatározásához, miközben a szerkezet globális stabilitását elsősorban annak geometriai kialakítása és a meghatározott peremfeltételek befolyásolták.

Ábrajegyzék

1. ábra: A légkeverő berendezés 2
2. ábra:Felfogató ébredő maximális feszültség 4mm-es hálósűrűségnél.....4
3. ábra:Felfogató ébredő maximális feszültség 4mm-es hálósűrűségné 4
4. ábra: Hajlítókészülék alsó állórészének a deformációs vizsgálata 100mm-es hálósűrűségnél 5
5. ábra: Feszültségvizsgálatnál a készülék rögzítéséből adódó peremfeltételek 5
6. ábra: Deformáció vizsgálatnál a készülék terhelés alatti peremfeltételei 6

Irodalomjegyzék

[1] A. Nesvidomin, S. Pylypaka, T. Volina, M. Lokhonia, and Y. Borodai, “Forming helical blades from flat blanks with minimal deformation,” *Naukovij Žurnal «Tehnìka Ta Energetika»*, vol. 16, no. 3, pp. 9–19, Sep. 2025, doi: 10.31548/machinery/3.2025.09.

[2] Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar Műszaki Menedzsment Intézet Anyagmozgatás és Logisztika Tanszék, “Tervezési segédlet szállítócsigákhoz - Repository of the Academy’s Library.” https://real.mtak.hu/119328/

[3] Bright, J., & Rayfield, E. (2011). The Response of Cranial Biomechanical Finite Element Models to Variations in Mesh Density. The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology, 294. https://doi.org/10.1002/ar.21358

[4] Mack, A., Hoffman, W., Bass, J., & Windes, W. (2023). Finite Element Model Mesh Refinement Effects on Qualification of Nuclear Grade Graphite Components. Volume 1: Codes & Standards. https://doi.org/10.1115/pvp2023-107369

[5] Papp Klaudia, Dr. Piros István Attila: Alsó állkapcsi hídpótlás statikus terhelési vizsgálata és numerikus szimulációs módszerek összehasonlítása

[6] O. V. Piontkevych, O. V. Bereziuk, D. O. Lozinskyi, and O. I. Kavetskyi, “Application of CAD/CAE-systems AUTODESK INVENTOR for the improvement of NC-controlled router (Ukr),” Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.31649/2307-5376-2025-1-178-186.

[7] Kikale, S., Katkati, A., Kulkarni, A. B., Mache, A., Deshpande, A., & Shinde, S. (2024). Mesh Convergence Study on Side Bracket using Hex-dominant and Tetrahedron-dominant Mesh. International Journal of Vehicle Structures and Systems. https://doi.org/10.4273/ijvss.16.6.05

[8] S. Pradhan, H. Singh, and O. Parkarsha, “Bending strength analysis of involute helical gear using FEA software,” in *Lecture notes in mechanical engineering*, 2021, pp. 651–660. doi: 10.1007/978-981-33-4684-0_66.

[9] A. Hase and J. Chang, “Implementation of Artificial Intelligence in Bending Analysis of Propeller/Fan Blade,” in *Proc. ASME 2021 30th Conf. on Information Storage and Processing Systems (ISPS2021)*, Virtual, Online, Jun. 2–3, 2021, Paper No. ISPS2021-65267, doi: 10.1115/ISPS2021-65267.

[10] B. I. Fehér, Járműipari alkatrész mélyhúzásának szimulációja, szakdolgozat, Debreceni Egyetem, Debrecen, 2024.

[11] R. Losonczki, Kétszemélyes gokart vázszerkezetének szilárdságtani vizsgálata, szakdolgozat, Debreceni Egyetem, Debrecen, 2025.

[12] S. Pylypaka *et al.*, “Designing a helical knife for a shredding drum using a sweep surface,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 1 (130), pp. 37–44, Aug. 2024, doi: 10.15587/1729-4061.2024.308195.