



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

PIEZOREZISZTÍV ELVEN MŰKÖDŐ 3D ERŐMÉRŐ SZENZOR STATIKAI ANALÍZISE ÉS ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL

Szerző:

Szeledi Anett

mechatronikai mérnök BSc. szak, III. évf.

Konzulensek:

Dr. Volk János

Laboratóriumvezető

Bozorádi János Márk

PhD hallgató

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont,
Nanoérzékelők Laboratórium

Dr. Szakács Tamás

egyetemi docens

Budapest, 2024. április 17.



TARTALOM

1.	Bevezetés és célkitűzések	4
2.	Irodalmi áttekintés	6
2.1.	A statikus karakterisztika	6
2.2.	Piezorezisztív hatás szilícium egykristályban.....	7
2.3.	Az alapmodell felépítése és működése	10
3.	Kísérleti eszközök és módszerek	14
3.1.	A mikromanipulátorra szerelt új geometriájú erőmérő statikus analízise COMSOL multiphysics szoftver használatával	15
4.	Alkalmazási területek bemutatása.....	20
4.1.	Kalibrációs eszköz tervezése	20
4.2.	Nanométerű platinaszál rugalmassági modulusnak meghatározása	29
5.	Eredmények és értékelésük.....	33
6.	Összefoglalás	35
7.	Köszönetnyilvánítás	36
8.	Irodalomjegyzék	37
9.	Mellékletek, függelék	38



ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A statikus karakterisztika jellemzői [2]	7
2. ábra: Normális és nyírófeszültségek szemléltetése [5]	9
3. ábra: Az alapmodell gyártási lépéseinek technológiai sorrendje [7]	12
4. ábra: A szenzor működése és az eszközoldalon kialakított áramkör sematikus rajza [7]	13
5. ábra: Kleindiek Nanotechnik GmbH elektronmikroszkóphoz tervezett mikromanipulátora [8]	14
6. ábra: Elektronmikroszkópos kép a középvezetékben kettéfűrésztelt új geometriájú erőmérő szenzoráról	15
7. ábra: Az új geometria szerint megtervezett erőmérő geometriai modellje COMSOL Multiphysics szoftverben	16
8. ábra: A von Mises-féle feszültség szimulációs vizsgálatra kiválasztott pont és a terhelt felület szemléltetése	17
9. ábra: Az új geometriájú erőmérő szenzor elmozdulása 1000 μN terhelés esetén	18
10. ábra: Az új geometriájú erőmérő szenzor membránján jelentkező maximális von Mises-féle feszültség értékek a bementi terhelések függvényében	18
11. ábra: A 3D erőmérő szenzor elmozdulása 2000 μN terhelés esetén, valamint a joystick környezetében jelentkező von Mises-féle feszültség szemléltetése	19
12. ábra: A 3D erőmérő szenzor membránján jelentkező maximális von Mises-féle feszültség értékek a bementi terhelések függvényében	19
13. ábra: Gyűrűs giroszkóp geometriai modellje [11]	20
14. ábra: Az első modell geometriai modellje (μm)	22
15. ábra: Az első modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására	22
16. ábra: Az első modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése	23
17. ábra: A második és harmadik modell geometriai modellje (μm)	24
18. ábra: A második modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására	24
19. ábra: A második modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése	25
20. ábra: A harmadik modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására	25
21. ábra: A harmadik modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése	26
22. ábra: A negyedik modell geometriai modellje (μm)	26
23. ábra: A negyedik modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására	27
24. ábra: A negyedik modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése	28
25. ábra: A pontozás szemléltetése a rúdelemek esetén: bal előlap, jobb hátlap	29
26. ábra: A pontozás szemléltetése a belső körgyűrű esetén: bal előlap, jobb hátlap	29
27. ábra: Pt nanoszál elektronmikroszkóp képe (kisebb Pt nanoszál: $h=5,824 \mu\text{m}$, $d=0,62 \mu\text{m}$; nagyobb Pt nanoszál: $h=12,38 \mu\text{m}$, $d=1,257 \mu\text{m}$)	30
28. ábra: Pt nanoszál Young-modulus értékei az elmozdulás mező x komponensének elmozdulásai és az erő függvényében	32
29. ábra: 3D felületi ábrázolás a Pt nanoszál elmozdulásáról és a von Mises-féle feszültségről	32



1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az elektronmikroszkópia áttörést hozott a tudományos kutatásban, lehetővé téve a mikroszkopikus világ mélyebb megismerését és az anyagok legapróbb részleteinek feltárását. Ez a technológiai áttörés nemcsak új perspektívákat teremtett a természettudományokban és az orvostudományban, hanem a nanotechnológia és az anyagtudomány területén is új kihívások elé állította a kutatókat. A mikro- és nanoméretű objektumok mozgatása és manipulálása a mikroszkóp alatt olyan precizitást és technikai tudást igényel, amely korábban elképzelhetetlen volt. A kutatóknak új műszaki megközelítéseket kell kifejleszteniük ahhoz, hogy hatékonyan vizsgálhassák és módosíthassák a mikro- és nanoméretű struktúrákat. A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Nanoérzékelők Laboratóriuma (a továbbiakban Nanoérzékelők Laboratóriuma) olyan intézmény, amely ezen kihívásokra összpontosít, és célul tűzte ki a mikro- és nanoméretű erőmérők fejlesztésével kapcsolatos kutatásokat. Lehetőséget kaptam, hogy részt vegyek egy innovatív kutatás-fejlesztési projektben, amelynek középpontjában a piezorezisztív elven működő szilícium 3D erőmérő továbbfejlesztése állt. A hangsúly a miniatürizáláson és az erőmérő érzékenységének növelésén volt.

A dolgozat első részben áttekintést nyújtok a témához kapcsolódó elméleti szakirodalmi alapokról, majd bemutatom a fejlesztés alapját képező erőmérő szerkezeti felépítését és működését.

A második részben bemutatom az erőmérő szenzor nagyobb érzékenység érdekében megváltoztatott geometriájának statikai szimulációs analízisét. A szimulációs munkám során a COMSOL Multiphysics szimulációs szoftvert alkalmaztam, amely egyedülálló módon képes modellezni többfajta fizikai jelenséget egy környezetben, lehetővé téve az interakciók és összetett rendszerek valós idejű vizsgálatát.

A harmadik részben bemutatom egy kalibrációs eszköz tervezési és megvalósítási lehetőségeit, melynek célja, hogy egyszerű módon kalibrálható legyen az ipari piaci szereplők számára a 3D erőmérő szenzor. Végül, a dolgozat zárásaként bemutatok egy konkrét alkalmazási példát, ahol szimuláció segítségével meghatározom egy 500 nm átmérőjű nanoszál



platinaszál rugalmassági modulusát, mellyel azt kívánom demonstrálni, hogy az új geometriával rendelkező mikromanipulátorra szerelt erőmérő szenzor potenciálisan alkalmas különböző anyagok rugalmassági modulusának meghatározására, amely módszer hasznos lehet számos műszaki és tudományos területen.



2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az emberi szervezet érzékelés során különböző ingereket felfog és értelmez, például lát, hall, tapint, ízlel és szagol. Az agyunk érzékszerveink összehangolt működésének köszönhetően segít megérteni és értelmezni a körülöttünk lévő világot. Azonban észlelésünknek vannak fizikai határai. Emiatt műszaki folyamatainkban a szenzorok kiemelkedő fontossággal bírnak, mivel általuk nyomon követhetjük és mérhetjük a környezeti változásokat és az eseményeket. Az érzékelők olyan eszközök, amelyek más energiaformákat, például hőt, fényt, hangot, nyomást vagy erőt alakítanak át elektromos jelekké [1].

2.1. A STATIKUS KARAKTERISZTIKA

Az erőmérő érzékenységének meghatározásához elengedhetetlen a statikus karakterisztika elemzése, amely meghatározza, hogy hogyan válaszolnak az érzékelők a bemeneti jelekre, és hogyan befolyásolják ezt a reakciót a környezeti változások. A referenciafeltételek alapján képesek vagyunk meghatározni az érzékelő kimeneti értékeit különböző bemeneti értékek esetén.

Az erőmérő érzékenységvizsgálata során szükséges meghatározni a mérési tartományt, amelyen belül az erőmérő a specifikációban meghatározott feltételeket teljesíti, valamint a töréshatárt. Az 1. ábrán a $B_{min} - B_{max}$ mutatja a mérési tartományt, amely a $K_{min} - K_{max}$ kimeneti jeltartomány által behatárolt szakaszon teljesül, és B_T pont jelöli azt a töréshatárt, amely felett az erőmérő várhatóan el fog törni.



A félvezető struktúrák kialakításában különböző kémiai és fizikai maratások játszanak szerepet. Ezek a folyamatok lehetővé teszik a kívánt alak és méret kialakítását a félvezető anyagban, létrehozva az ideális struktúrát. A piezoellenállásokat a struktúrára implantációs és/vagy diffúziós eljárásokkal alakítják ki, azokon a területeken, ahol a legnagyobb hajlítófeszültségek érzékelhetők, és ennek következtében a legkiemelkedőbb alakváltozások figyelhetők meg.

Egy l hosszúságú, d vastagságú és w szélességű téglatest alakú vezető ellenállásának változása deformáció hatására a következő formában írható le:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta w}{w} \quad (2)$$

ahol ρ a fajlagos ellenállás, l az ellenállás hossza, d az ellenállás vastagsága, és w az ellenállás szélessége.

A fajlagos ellenállásváltozás részben a mechanikai feszültség (T) hatására, részben pedig a deformáció által okozott méretváltozás következtében alakul ki. Ezt a jelenséget a piezorezisztív effektusnak nevezzük, melynek során a piezoellenállás relatív fajlagos ellenállása a mechanikai stresszre vagy a deformációra adott válaszként megváltozik. A jelenséget a piezorezisztív együtthatóval írhatjuk le [4]:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \Pi T \quad (3)$$

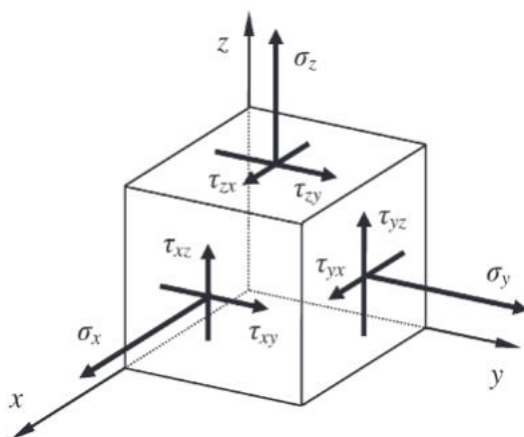
A feszültségmátrix felírásához szükséges felvennünk egy P pontot, és tételezzük fel, hogy erre a P pontra normális és nyírófeszültségek hatnak. Általános esetben σ_x, σ_y , és σ_z , valamint (a csúsztatófeszültségek dualitása miatt) $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}$ és $\tau_{yz} = \tau_{zy}$.



A kapott értékeket egy 3x3-as mátrixba felírva megkaphatjuk a P pontból a feszültségmátrixot:

$$F_P = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

A feszültségmátrix jól szemléltethető egy kockán is, amelynek lapjai merőlegesek az x , y és z koordinátatengelyekre. A kocka lapjain fellépő feszültségek közül a σ feszültségek a koordinátatengelyekkel párhuzamosak, míg a τ feszültségek esetében az első index azt mutatja meg, hogy melyik koordinátatengely irányú lapon lépnek fel, míg a második index meghatározza, hogy ezek a feszültségek melyik irányba mutatnak ezen a lapon. Ezáltal a τ feszültségek pontosan meghatározzák a feszültségvektorok irányát és elhelyezkedését a kocka felületein (6. ábra) [5].



2. ábra: Normális és nyírófeszültségek szemléltetése [5]



Köbös egykristály esetében a (4) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$\frac{1}{\rho} x \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{11}\tau_{12}\tau_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \tau_{12}\tau_{11}\tau_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \tau_{12}\tau_{12}\tau_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{44} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

ami azt jelenti, hogy a piezoreziszív viselkedés leírása három tényező (τ_{11} , τ_{12} , és τ_{44}) megadásával lehetséges [6].

2.3. AZ ALAPMODELL FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

A modern műszaki fejlesztések terén egyre növekvő igény mutatkozik miniatürizált, nanoméretű, rendkívül érzékeny és pontos érzékelők iránt, különösen az erőmérés területén. Ezen igények kielégítése érdekében a Nanoérzékelők Laboratóriumának munkatársai egymásra épülő projektek eredményeként kiemelt figyelmet fordítottak a szilícium-alapú 3D piezorezisztív erőmérő szenzorok fejlesztésére. Ebben a fejezetben részletesen bemutatom munkájuk eredményeként kifejlesztett alapmodellt, a szenzor felépítését és működési elveit.

2.3.1. AZ ALAPMODELL FELÉPÍTÉSE

A szenzor alapját egy hagyományos MEMS technológiával készült (100) n-típusú szilícium-szigetelő típusú (SOI — Silicon-on-Insulator) kiinduló szelet képezi. Ezek a SOI szeletek olyan Si–SiO₂–Si szendvicsszerkezetek, amelyek egy vastagabb hordozóréteget (475 $\mu\text{m} \pm 15 \mu\text{m}$), egy vékony (1 μm) eltemetett oxidréteget (BOX— buried oxide) és egy annak felületén kialakított —szintén egykristályos— Si eszkörréteget (device layer) tartalmaznak. Az 50 μm -es ($\pm 0,5 \mu\text{m}$) eszkörréteg vastagságú SOI szelet célja, hogy az erőmérő membránja egységes vastagságú legyen az egész szelet területén. A mély Reaktív Ionmarás (DRIE - Deep Reactive Ion Etching) módszerrel mély és precíz marásprofilokat alakítottak ki a szilícium alapú szeleteken, biztosítva a membrán egységes vastagságát. A kiinduló szelet n-típusú és



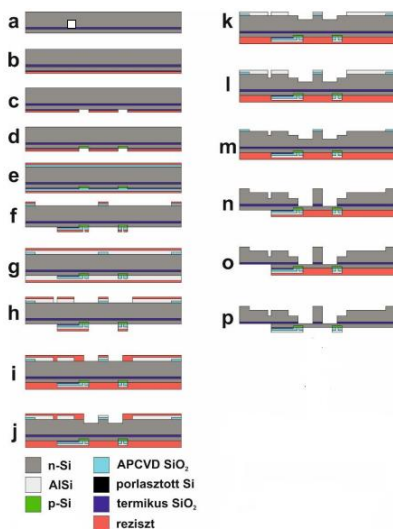
(100) kristálytani orientációval rendelkezik, a kialakított piezoellenállások p–n átmenetekkel elektromosan elszigetelt, hossztengegyükben [110] és az arra merőleges $[\bar{1}10]$ irányú, p–típusúak. Az ellenállásokat bór adalékkal végzett ion-implantációval hozták létre, majd behajtó és aktiváló hőkezeléssel fejezték be a folyamatot [7].

2.3.2. AZ ALAPMODELL GYÁRTÁSI FOLYAMATÁNAK BEMUTATÁSA

A gyártási folyamat lépéseit bemutató vázlatrajz látható a 3. ábrán. A technológiai lépéseket a)-tól p)-ig pontokba szedve foglaltam össze:

- a) A gyártási folyamat kiindulópontja a (100) orientációjú n–típusú SOI szeletek, melyeket szimulációs tervezés alapján készítettek el.
- b) A szilícium megmunkálásának első lépése a termikus oxid növesztése az eszközoldalon 100 nm vastagságban, amit hátoldali lakkvédővel láttak el.
- c) Az oxid rétegen pufferelt oxidmaróval nyitották meg az ellenállások helyét.
- d) A kialakított ablakokon keresztül a bór implantációt az előírt dózissal és energiával hajtották végre, majd aktiváló és behajtó hőkezeléseket alkalmaztak.
- e) Mindkét oldalon 1 μm vastagságú termikus szilícium-dioxidréteget növesztettek,
- f) amit a hátoldali felületeken és a piezoellenállások kontakt furatainál oxidmaróval kinyitottak.
- g) Porlasztással AlSi ötvözetet választottak le a jobb lépcsőfedés érdekében.
- h) Az alumínium maróval eltávolították a hátoldali fémet, és előoldalon kialakították a vezetékeket.
- i) DRIE vastaglakkot alkalmaztak az előoldalon, és megnyitották a hátoldali marási felületet.
- j) Kialakították a hátoldali lakkvédelmet, majd 1. DRIE marás során 20 μm vagy 50 μm mélységig martak a hátoldalba.

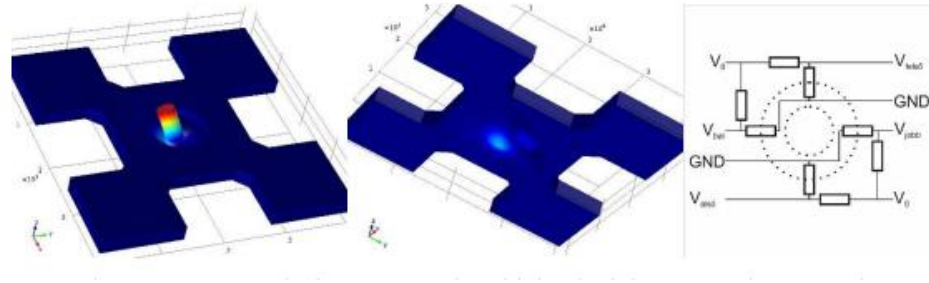
- k) Eltávolították a vastaglakkot, majd újra lakkvédelmet helyeztek el a hátoldalon.
- l) 2. DRIE marási szakaszában további 250 μm mélységben folytatták a marást a hátoldalon.
- m) Az AlSi réteget ezt követően eltávolították a hátoldalról.
- n) A 3. DRIE marás során bemarták a membrán területén a szilíciumot a BOX-oxidig.
- o) Az előoldalon újabb DRIE marással kimarták a szilíciumot a vezetékek kialakításához.
- p) A folyamat utolsó lépése a lakk eltávolítása [7].



3. ábra: Az alapmodell gyártási lépéseinek technológiai sorrendje [7]

2.3.3. AZ ALAPMODELL MŰKÖDÉSI ELVE

Az erőmérő szenzor működése a 4. ábra alapján magyarázható. Az erő hatására a közvetítő elem meghajlik, ami deformálja a membránt. A membránnal együtt kialakított aktív piezorezisztív ellenállások is deformálódnak, ami megváltoztatja az ellenállásukat. Az aktív piezoelemeket referenciaellenállásokkal feszültségosztóban kapcsolják össze, így az ellenállások változása feszültségváltozásokként mérhető. A mért feszültségváltozás nemcsak az erő nagyságától, hanem irányától is függ.



4. ábra: A szenzor működése és az eszközoldalon kialakított áramkör sematikus rajza [7]

A négy hídfeszültség alkalmazásával, figyelembe véve az α_{ln} normál és α_{ls} nyíró irányú lineáris együtthatókat, az alábbi egyenletrendszer segítségével határozható meg az erővektor három komponense [7]:

$$F_x = \frac{4}{\alpha_{ls}\pi_{44}} (\Delta V_{jobb} - \Delta V_{bal}), \quad (6)$$

$$F_y = \frac{4}{\alpha_{ls}\pi_{44}} (\Delta V_{felső} - \Delta V_{alsó}), \quad (7)$$

$$F_z = \frac{4}{\alpha_{ls}\pi_{44}} \left(\frac{\Delta V_{jobb} + \Delta V_{bal} + \Delta V_{felső} + \Delta V_{alsó}}{2} \right). \quad (8)$$

Az (5) egyenletben részletezett piezorezisztív viselkedés leírása használt három tényező a (6), (7), (8) egyenletekben jelentik meg. A szimulációs vizsgálatok során csak az x-y irányt fogom használni.



3. KÍSÉRLETI ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

A modern nanotechnológiai kutatások és fejlesztések folyamán a komplex mechanikai viselkedési elemzések elengedhetetlen eszközzé váltak. Ezek az elemzések lehetővé teszik számunkra, hogy mélyebben megértsük, és előre jelezzük a különböző szerkezetek és anyagok viselkedését változatos körülmények között.

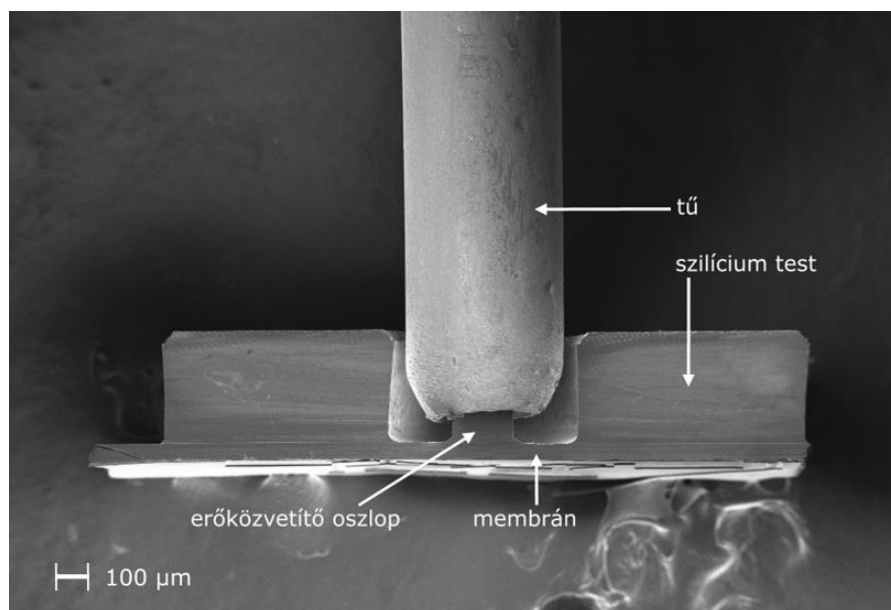
Az irodalmi áttekintésben olvasható, hogy az erőmérő chip korábbi kalibrációja már megtörtént. Az új fejlesztési folyamat során, amelyhez kapcsolódtam, egy új geometriával rendelkező erőmérőt tervezünk létrehozni, amelynek az alapját a korábban kalibrált erőmérő chip képezte.

Egy olyan MEMS technológiával készülő, új geometriával rendelkező erőmérő rendszert fejlesztettünk ki, amelyet érzékeny mikromanipulátorok végére lehet felszerelni. A 5. ábrán látható Kleindiek Nanotechnik GmbH elektronmikroszkóphoz tervezett mikromanipulátorát használtuk a fejlesztés során.



5. ábra: Kleindiek Nanotechnik GmbH elektronmikroszkóphoz tervezett mikromanipulátora [8]

Az új geometriai modellben az erőmérő chip erőkarját megnöveltük egy 13 mm hosszúságú rozsdamentes acéltű használatával. A tű egy adapterben van elhelyezve, amelyet a chip erőközvetítő oszlopához (továbbiakban: joystick) rögzítettünk. Az így létrejött kb. 60-szor nagyobb erőkar a fent részletezett érzékenységet várhatóan javítja, lehetővé téve a szenzor alacsonyabb erőtartományokban történő alkalmazását.



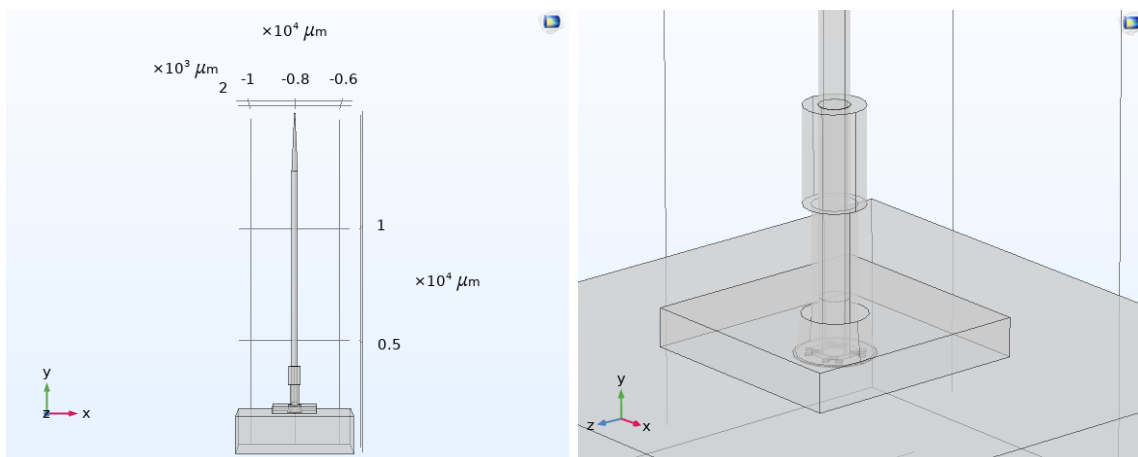
6. ábra: Elektronmikroszkópos kép a középvezetékben kettéfűrészelt új geometriájú erőmérő szenzorról

Az alkalmazott megoldás során a modellek vizualizációja és értékelése lehetővé tette a deformációk és a kritikus terhelési pontok szemléletes megjelenítését és elemzését. A megépített új geometriával rendelkező erőmérő prototípusát még nem vizsgáltuk kísérleti módon a töréspont meghatározására. Az általam elkészített szimulációk segítségével azonban meghatároztuk a mérési tartományát, annak érdekében, hogy biztonságosan alkalmazható legyen az eszköz valós környezetben is, minimalizálva ezzel a kísérleti munka során bekövetkező törések kockázatát.

3.1. A MIKROMANIPULÁTORRA SZERELT ÚJ GEOMETRIÁJÚ ERŐMÉRŐ STATIKUS ANALÍZISE COMSOL MULTIPHYSICS SZOFTVER HASZNÁLATÁVAL

A szimulációs modell tervezési fázisában számos szempontot végig gondoltam a modell felépítésével kapcsolatban, melyek kiválasztásában Dr. Tamás Péter et al. [9] által javasolt szempontok nyújtottak segítséget.

A modellem egy fizikai probléma komplex mechanikai viselkedési elemzésére összpontosít. Az elemzés statikai jellegű, mely azt jelenti, hogy az eseményeket egyensúlyi állapotban vizsgáltam, figyelembe véve az alkalmazott terheléseket és kényszereket. A valóság közelítését lineárisnak választottam. A modellem egy háromdimenziós testet reprezentál, melyhez tetraéderes háromdimenziós végelemeket alkalmaztam. Az elvárásom az volt a modellemmel szemben, hogy megfelelően leírja a geometriai alakot, és lehetővé tegye a pontosság és a számítási hatékonyság kombinálását. A hálósűrűség elemmérete kapcsán az elvárásom az volt, hogy megfelelően be legyen állítva az elemek átfedésének minimalizálására és a számítások hatékonyságának biztosítására. A részletesség helyi hálósűrítéseket is magában foglal, különösen azokon a területeken, ahol nagyobb geometriai változások vagy terhelések vannak jelen.



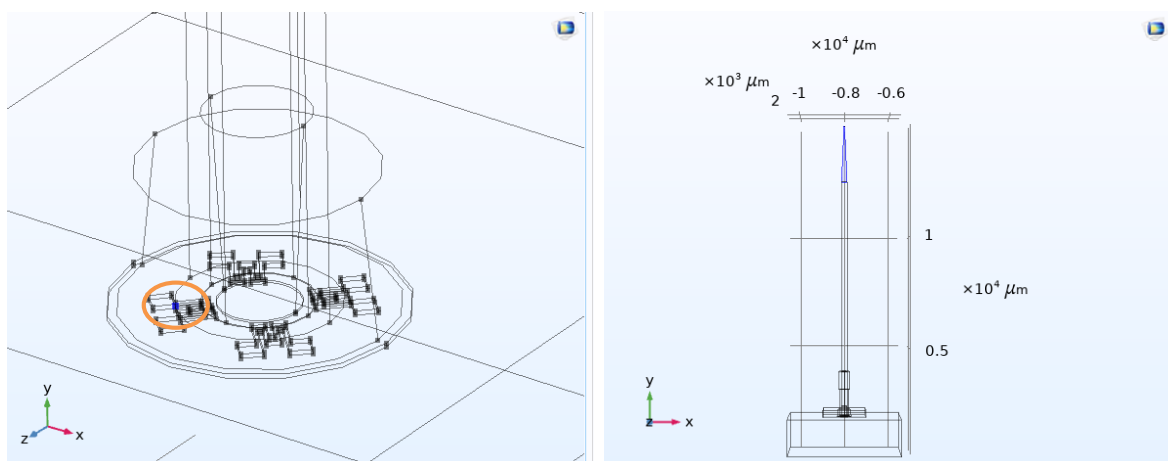
7. ábra: Az új geometria szerint megtervezett erőmérő geometriai modellje COMSOL Multiphysics szoftverben

A geometriai tervezés folyamata Autodesk Inventor szoftver segítségével zajlott. A tervezett geometriai adatokat a COMSOL Multiphysics végelem szoftverbe DWG fájl formátumban importáltam. Az erőmérőhöz és a membránhoz n-Silicon (egykristály, gyengén adalékolt) anyagot, míg a tűhöz és az adapterhez rozsdamentes acélt rendeltem hozzá.



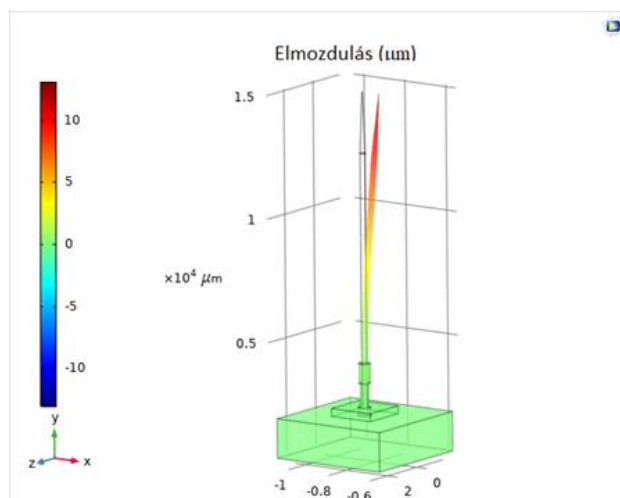
A modell összetett, több részre tagolódik, így a hálózat kialakításánál figyelmet fordítottam arra, hogy a csomópontok megfelelően illeszkedjenek az egyes részek kapcsolódásánál, a határfelületeknél, ahol jelentős terhelések és hatások jelentkezhetnek. Mivel ezeket a hatásokat a hálózat csomópontjai közvetítik az elemekbe, ezáltal befolyásolva azok által hordozott terheléseket és a modell viselkedését, fontos szempontnak tartottam a megfelelő hálóméret beállítását.

Az erőmérő a Nyomtatott Áramkörüi Lap (továbbiakban: NYÁK) alsó részén van rögzítve, ahol az elmozdulás értéke nullának tekinthető. A vizsgálatra kiválasztott pont a membránon, a piezorezisztív elemnél található a joystick mellett.

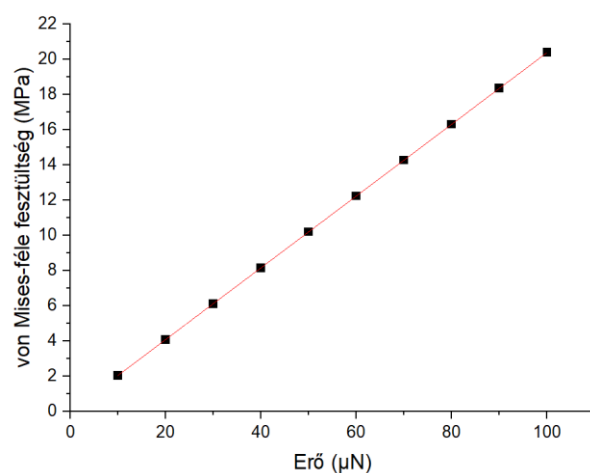


8. ábra: A von Mises-féle feszültség szimulációs vizsgálatra kiválasztott pont és a terhelt felület szemléltetése

A teljes terhelést x-y irányban, 0-1000 μN , valamint 0-2000 μN erőtartományban állítottam be. A kiértékelésnél az x-y komponens kapcsán az elmozdulásmezőt, valamint a von Mises-féle feszültség értéket vizsgáltam. Az erőmérő vizsgálata során ezeknek a jellemzőknek a meghatározása azért fontos, mivel segít azonosítani azokat a területeket az anyagban, ahol a feszültségek kritikusak lehetnek. Az 1000 μN -os terhelés hatására a tű elmozdulása 13,04 μm eredményt adott, amely elmozdulás mellett a legnagyobb von Mises-féle feszültség az erőmérő joystick részén jelentkezik, amely értéke 43,96 MPa.

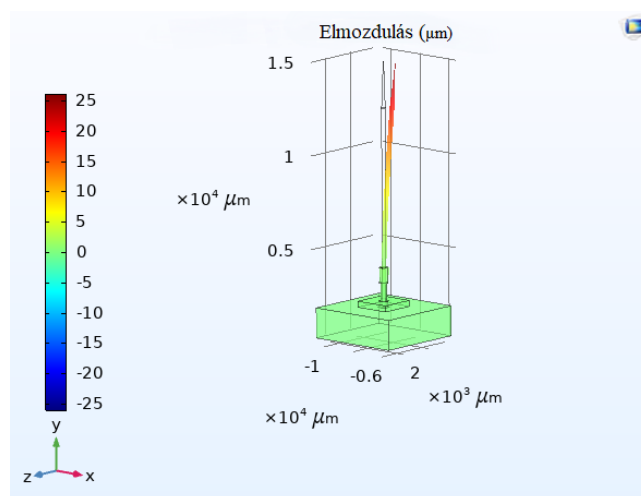


9. ábra: Az új geometriájú erőmérő szenzor elmozdulása 1000 μN terhelés estén

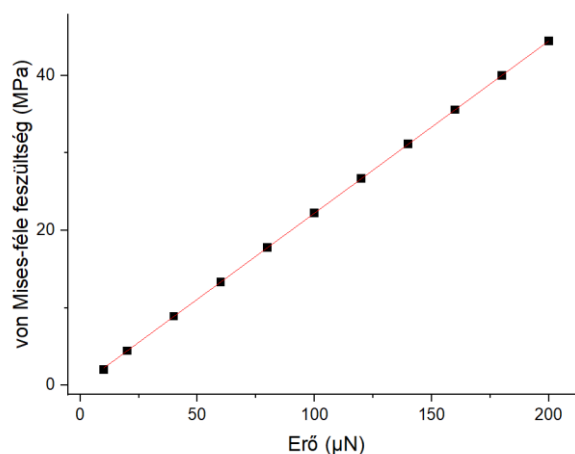


10. ábra: Az új geometriájú erőmérő szenzor membránján jelentkező maximális von Mises-féle feszültség értékek a bementi terhelések függvényében

A 2000 μN -os terhelés hatására a tű elmozdulása 26,09 μm , amely elmozdulás mellett a legnagyobb von Mises-féle feszültség értéke 87,92 MPa.



11. ábra: A 3D erőmérő szenzor elmozdulása 2000 μN terhelés estén, valamint a joystick környezetében jelentkező von Mises-féle feszültség szemléltetése



12. ábra: A 3D erőmérő szenzor membránján jelentkező maximális von Mises-féle feszültség értékek a bementi terhelések függvényében

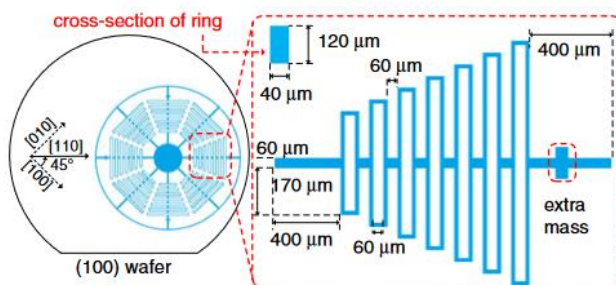
Marek Boniecki et. al [10] kutatásuk során kimutatták, hogy szobahőmérsékleten a szilícium egykristály négyponos hajlítószilárdsága $\sigma_c = 289 \pm 61 \text{ MPa}$. A szimulációs vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy az új geometriával kialakított erőmérő terhelése 1000-2000 μN között nem vezet töréshez.

4. ALKALMAZÁSI TERÜLETEK BEMUTATÁSA

4.1. KALIBRÁCIÓS ESZKÖZ TERVEZÉSE

A Nanoérzékelők Laboratóriumában végzett kutatás során a 3D erőmérőszenzor kalibrálását Pásztázó Elektronmikroszkóp (SEM - Scanning Electron Microscopy) felhasználásával végeztük el, amelyhez előre bekalibrált Atomerő-mikroszkóp (AFM - Atomic force microscopy) szondát alkalmaztunk, amely eljárás saját fejlesztésünk eredménye. Az AFM-szondás mérési eljárás bonyolult és költséges volt, ezért szükségessé vált egy optikai mikroszkóppal is alkalmazható, 2D irányfüggő vizsgálatot is lehetővé tevő MEMS eszköz kifejlesztése.

A tervezési munka kiindulási alapját Zesen Bai et.al [11] szerint megtervezett gyűrűgiroszkóp (CTRG - Christmas tree ring gyroscope) adta, amelynek geometriai felépítése a 13. ábrán látható. Az eszköz egy mikrogűrűs konstrukcióra épül, melynek belső és külső gyűrűit „karácsonyfa” jellegű rugó köti össze. A forgó tömeget itt egy rezgő gyűrű jelenti. Amikor a giroszkópot elforgatják, a rezgő gyűrű tendenciát mutat arra, hogy megőrizze az eredeti orientációját, ami a Coriolis-erő következménye. Az ω szögsebesség miatt az elmozdulás hatására egy érintőmenti rezgőmozgás jön létre. A gyűrűs giroszkópot eredetileg forgásérzékelésre fejlesztették ki, azonban mi szeretnénk kihasználni a rugalmas rendszer tulajdonságait az új geometriával rendelkező erőmérő elmozdulásainak optikai úton történő követésére.



13. ábra: Gyűrűs giroszkóp geometriai modellje [11]



4.1.1. GEOMETRIAI MODELL TERVEZÉSE

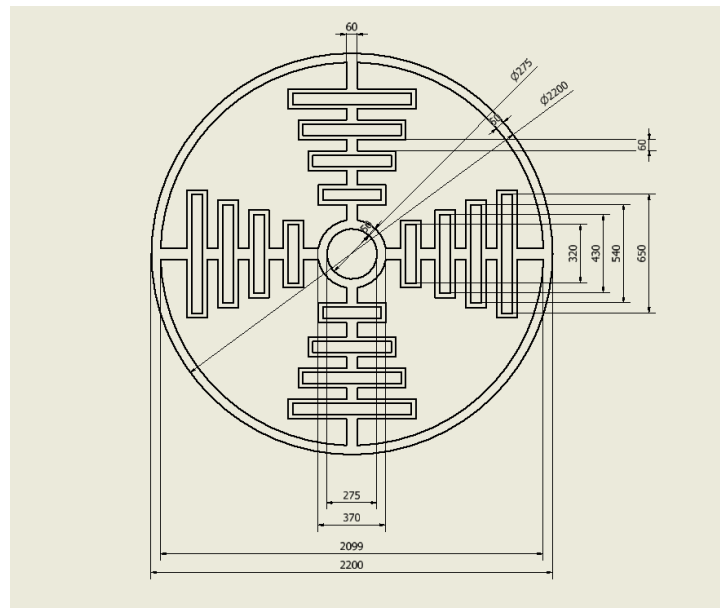
Négy különböző modellt terveztem meg az Autodesk Inventor szoftver segítségével. A szimulációkat a COMSOL Multiphysics végeelem szoftverben futtattam le. A hálózás során felmerült egy alapvető hiba, amely a geometria túlzott elvékonyodását érintette. A kalibrációs eszköz külső gyűrűjének a kezdeti tervezési fázisában 20 μm szélességet határoztam meg. Azonban a hálózás során a túlzottan finom méretű forma nem biztosított megfelelő alapot a hálózat kialakításához, ezáltal a szimuláció nem volt lefuttatható. Megoldásként növeltem a méretet 50 μm -re, amely eredményeként a tetraédes hálózat megfelelően létrejött. Az belső gyűrű átmérője 275 μm , melynek méretét változtatlanul hagytam a tervezés során mind a négy modellenél. Ennek az az oka, hogy ez a méret pontosan meghatározza azt a távolságot, amelybe az erőmérő hegye úgy helyezhető el, hogy semmilyen irányban ne érjen hozzá a gyűrű falához.

A kalibrációs eszköz használatakor optikai úton követjük az elmozdulást, ahol a megfelelően érzékelhető elmozdulási tartományt 5-50 μm között becsültük meg. A szimuláció során meghatároztam a modellben azt a teljes terhelési erőt, amely az x-y irányban 50 μm -es elmozdulást eredményezett. Ezt az erőt 10 egyenlő részre osztottam, majd a szimulációt ezekkel az erőbeállításokkal futtattam le. Az adatok elemzéséhez Origin Pro szoftver használtam, ahol lineáris illesztést végeztem a szimulációs során kapott értékekkel, az erő és az elmozdulás között. A modell rugóállandója a következőképpen írható fel:

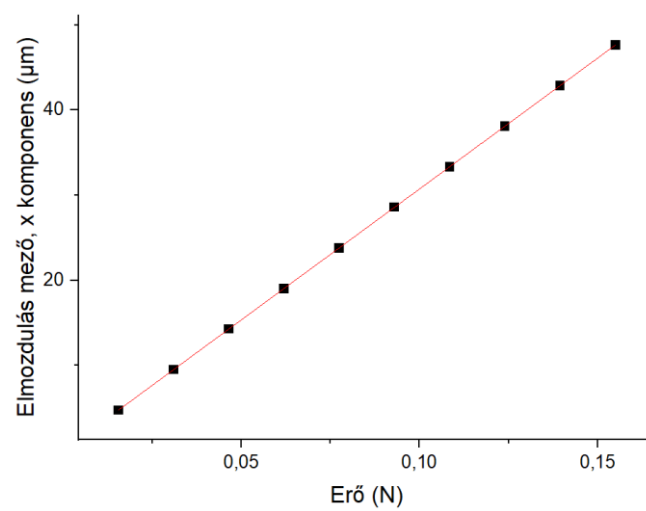
$$s = \frac{\Delta F}{\Delta x}, \quad (9)$$

ahol s a rugóállandó (N/m), ΔF az erőváltozás (N), Δx az elmozdulás (m)[12].

Az első modell hasonló az irodalom által már feltárt modellhez, viszont átmérője csak 2200 μm . A rugóelemek ebben a modellben négy elemet tartalmaznak, melyek 45 fokos szögben, négy irányban ismétlődnek. A 14. ábrán részletesen ismertetem a modell geometriai méreteit.

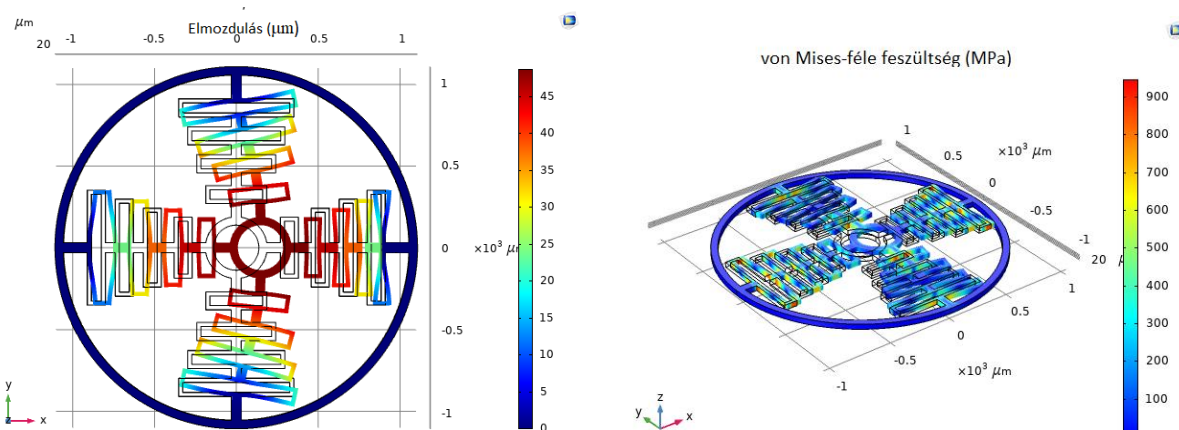


14. ábra: Az első modell geometriai modellje (μm)



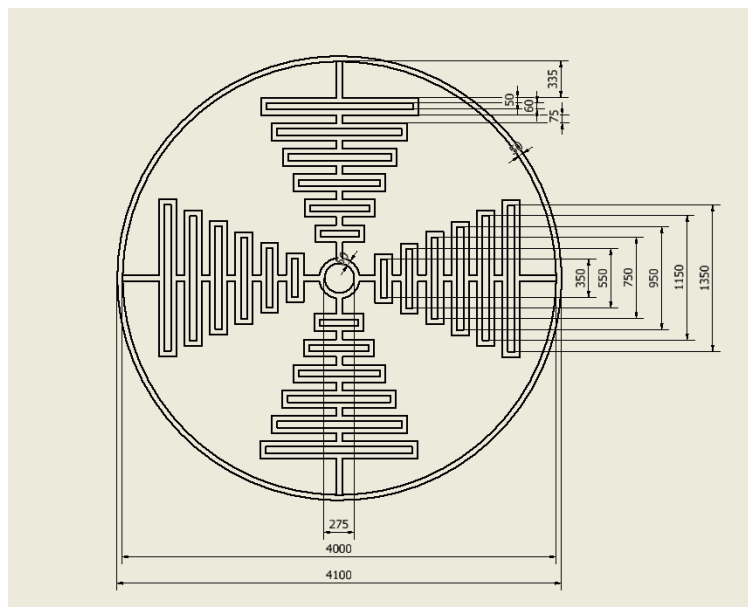
15. ábra: Az első modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x -irányú terhelő erők hatására

A 15. ábrán látható a szimuláció eredményként meghatározott meredekség, amely értéke az első modell kapcsán $3,25 \cdot 10^3 \frac{N}{m}$. A maximális von Mises-féle feszültség értéke 988,62 MPa, amely arra utal, hogy a kalibrációs eszköz modellje túl merev, és a maximális 0,155 N erő hatására 50 μm -es elmozdulás során ez a modell a valóságban eltörne.



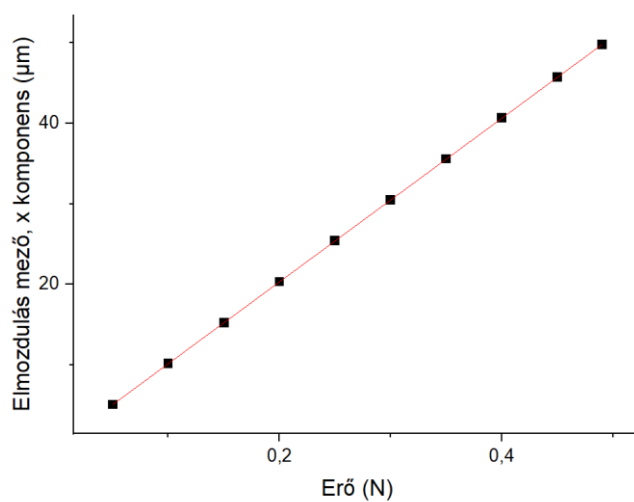
16. ábra: Az első modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése

Annak érdekében, hogy a modell rugalmasabb legyen növeltem a modell átmérőjét 2200 μm -ről 4100 μm -re, valamint a rugóelemek számát négyről hat elemre módosítottam. Különbség a második és a harmadik modell között a kalibrációs eszköz keresztmetszetének vastagságában van, amely a második modell esetén 200 μm , míg a harmadik modellnél 40 μm .

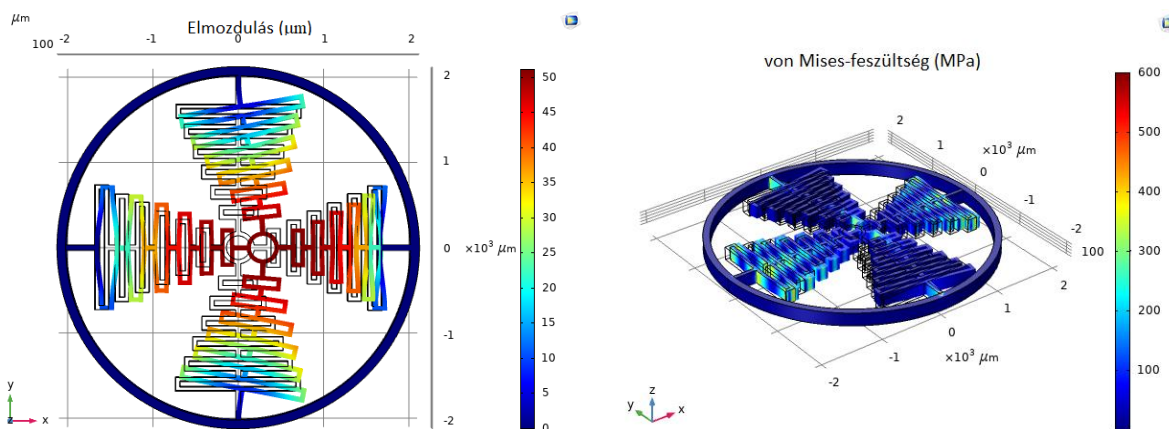


17. ábra: A második és harmadik modell geometriai modellje (μm)

A 18. ábrán látható a szimuláció eredményként meghatározott meredekség, amely értéke a második modell kapcsán $9,84 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$.

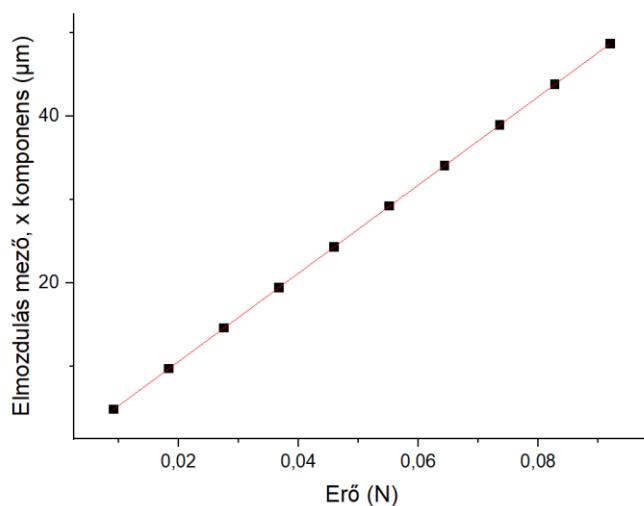


18. ábra: A második modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására

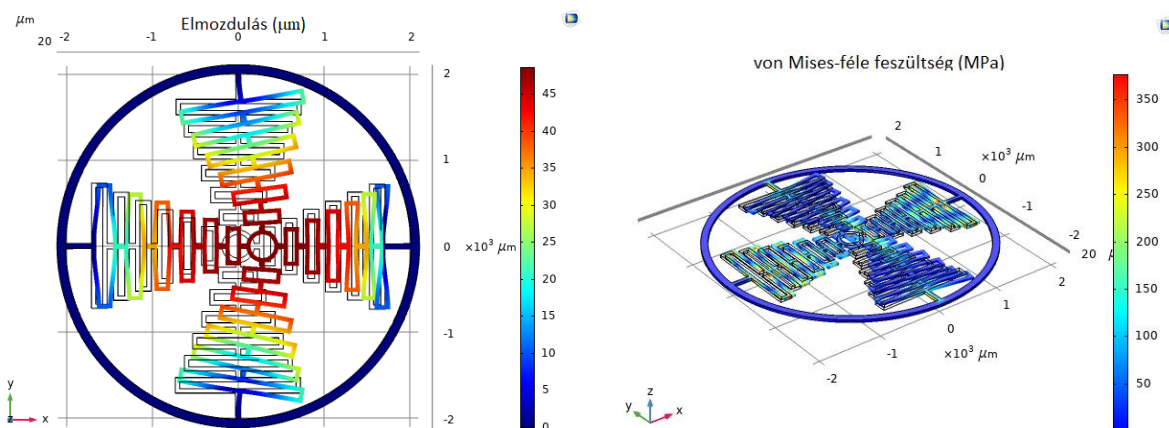


19. ábra: A második modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése

A kalibrációs eszköz keresztmetszetének csökkentése 200 μm -ról 40 μm -re javított a rugalmasságon, viszont a von Mises-féle feszültség értéke még mindig magas értéket mutat (411,14 MPa), amely azt jelzi, hogy a modell még mindig túlságosan merev, és a valóságban, az 50 μm -es elmozdulás mellett már eltörne az eszköz a maximális 0,092 N erő hatására. A 20. ábra mutatja a harmadik modell merevedésként, amely $1,89 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$.

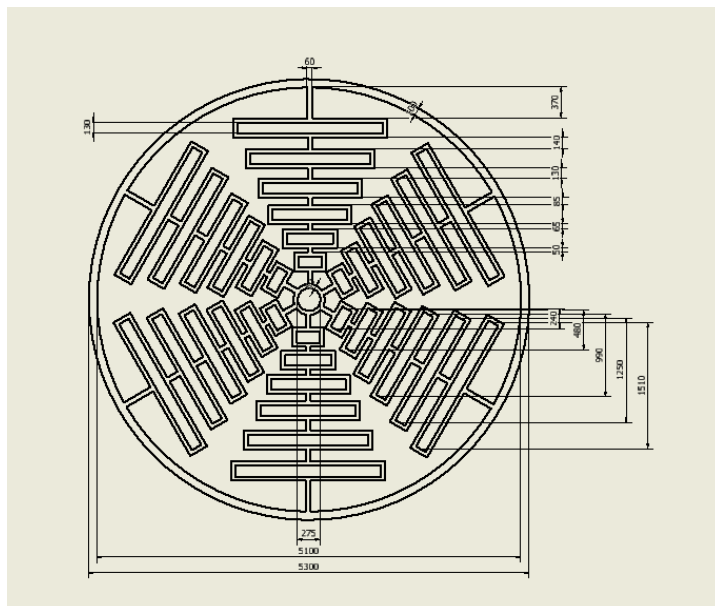


20. ábra: A harmadik modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására



21. ábra: A harmadik modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése

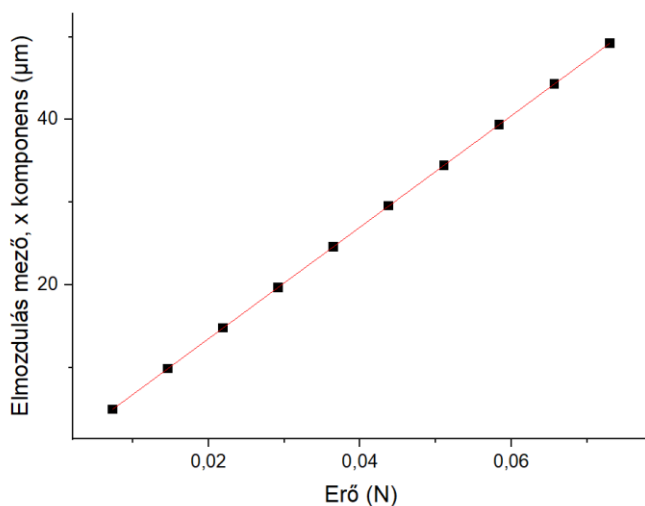
A rugalmasság további növelése érdekében megnöveltem az átmérőt 4100 μm -ről 5300 μm -re, valamint a karácsonyfa alakú rugók számát hét elemre emeltem. A rugók hat irányban ismétlődnek ebben a modellben. A kalibrációs eszköz keresztmetszetének vastagsága kapcsán megtartottam a 40 μm -et.



22. ábra: A negyedik modell geometriai modellje (μm)



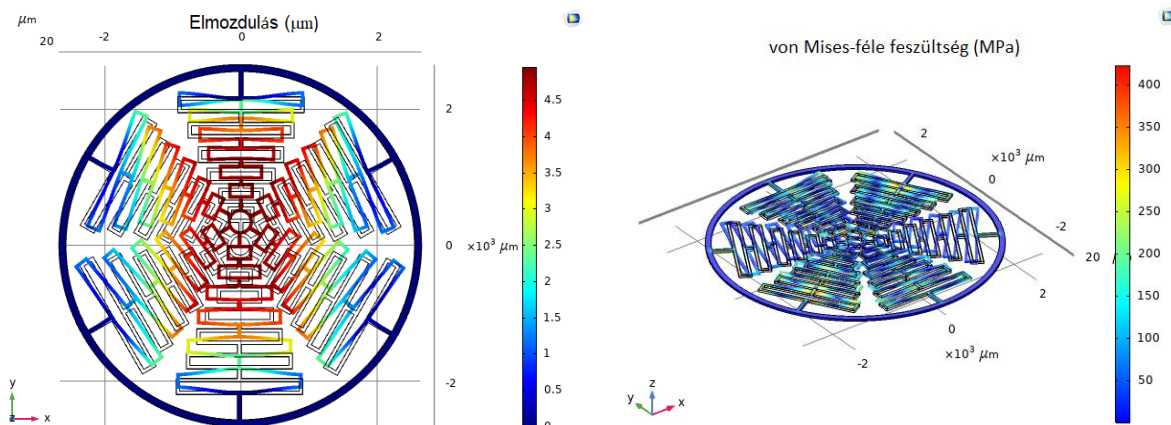
A negyedik modell kezdeti tervezési fázisában, a szimuláció során a külső rúdelem csavarodását lehetett megfigyelni a legnagyobb terhelés alatt, valamint azt, hogy a külső gyűrű falához való érintkezés problémája is felmerült. A csavarodás jelenségének megoldására a következő lépéseket alkalmaztam: az egyes rúdelemek közötti távolságot a rúdelemeket összekötő tartóelemen 50 – 65 – 85 – 130 – 140 μm -re állítottam be, mint ahogy a 22. ábrán is látható, emellett pedig a rúdelemek belső távolságát 85 μm -ről 130 μm -re növeltem. A rúdelemeket összekötő tartóelem szélessége szintén 60 μm .



23. ábra: A negyedik modell középső gyűrűjének elmozdulása különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására

A negyedik modell esetében a 25 μm elmozduláshoz szükséges erő 0,073 N, amelyhez tartozó legnagyobb von Mises-féle feszültség értéke 504,54 MPa. A merekség értéke ennél a modellnél $1,48 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a modell továbbra is túl merev ahhoz, hogy biztonságosan használható legyen a 0-50 μm -es tartományban, anélkül hogy törés következne be. Ugyanakkor 0,0073 N erőnél 5 mikrométeres elmozdulási tartományban 50,454 MPa, míg 25 mikrométernél 252,27 MPa feszültség lenne, amely azt jelenti, hogy az eszköz várhatóan nem törne el. A szimulációs eredmények alapján úgy döntöttünk, hogy a kalibrációs eszközzel kapcsolatos mérési feladatokat a jövőben, a

kutatási terv szerint, optikai mikroszkóppal vagy pásztázó elektronmikroszkóppal fogjuk elvégezni. Ennek oka, hogy az 5-25 μm -es elmozdulás könnyen követhető ezzel a mikroszkóppal.



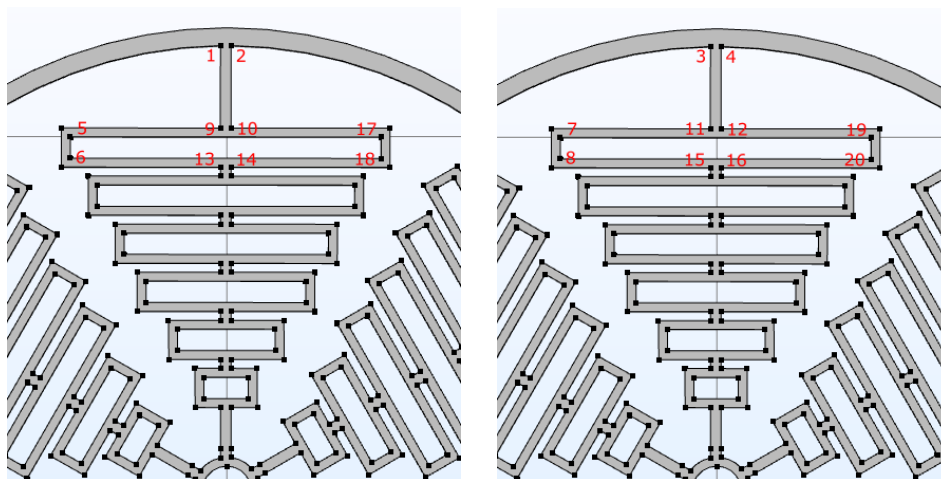
24. ábra: A negyedik modell deformációja 50 μm -es elmozdulás mellett, valamint a von Mises-féle feszültség szemléltetése

4.1.2. TÖRÉS VIZSGÁLAT ÉS KRITIKUS PONTOK AZONOSÍTÁSA

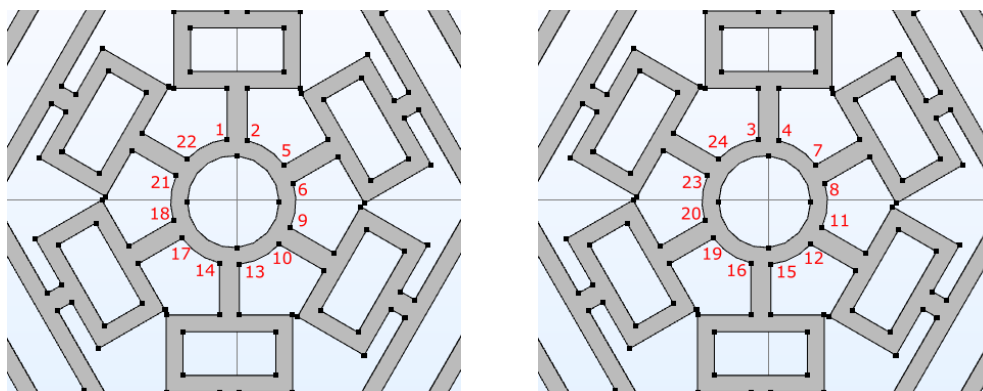
A negyedik modell kapcsán a törésvizsgálat célja nemcsak a maximális von Mises-féle feszültség kimutatása volt, hanem azoknak a kritikus helyeknek a részletes vizsgálata is, amelyek feszültséggyűjtő helyként törést okozhatnak. Az COMSOL Multiphysics programból exportált 3D felszíni diagramon a színskálát megvizsgálva határoztam meg, hogy hol lokalizálhatók a legnagyobb von Mises-féle feszültség értékek 50 μm elmozdulás esetén. A rúdelemek elemzése során 20 pontot vizsgáltam, a körgyűrűnél 24 pontot vettem fel, melyet az alábbi ábrákon (25-26. ábra) szemléltetek.

A 2-es számú pont esetén észlelhető volt a legnagyobb von Mises-féle feszültség, ami 161,45 MPa volt a 315 fokos irányban található elemnél. A 6-os számú pontnál a legnagyobb érték 211,39 MPa volt a 180 fokos irányban lévő elemnél. A 9-es számú pontnál a legnagyobb értéket, 205,12 MPa-t mutattam ki a 0 irányban. A 15-ös számú pontnál szintén a 0 irányban észleltem a legnagyobb értéket, amely 218,83 MPa volt, míg a 20-as pontnál a 180 fokos

irányban volt a legmagasabb, 212,83 MPa. A körgyűrű kapcsán a 11. számú pontnál jelentkezett a legnagyobb feszültség, amely 238,74 MPa.



25. ábra: A pontozás szemléltetése a rúdelemek esetén: bal előlap, jobb hátlap



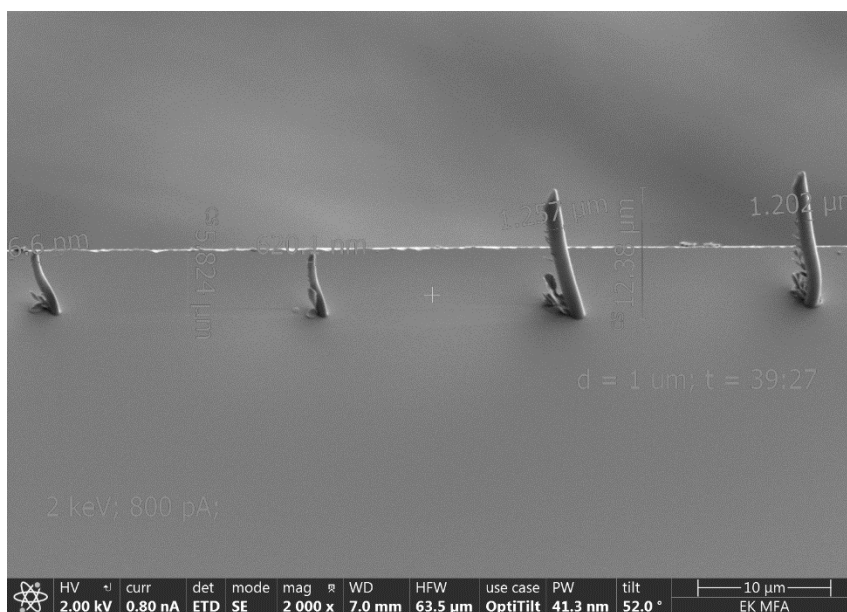
26. ábra: A pontozás szemléltetése a belső körgyűrű esetén: bal előlap, jobb hátlap

4.2. NANOMÉRETŰ PLATINASZÁL RUGALMASSÁGI MODULUSNAK MEGHATÁROZÁSA

A mikromanipulátoros erőmérő képességeit mikrométerű objektumok mechanikai vizsgálatával szerettük volna demonstrálni. Mintaként egy 1 mikrométer átmérőjű platina nanoszálát választottunk, melyet elektronsugaras leválasztási technikával állítottunk elő.



Az EBAD/IBAD (Electron/Ion Beam Assisted Deposition) technikák esetében elektron, ill. Ga ionnyalábotkat használnak fel különböző minőségű felületen lévő rétegek lokális kialakításához vagy leválasztásához ionágyúval ellátott (keresztcsugaras) pásztázó elektronmikroszkópban. Az ionnyalábok segítségével precízen manipulálhatók a rétegek, lehetővé téve vékonyrétegek létrehozását, nanoméretű szerkezetek építését, valamint a felületek mintázását. Az EBAD és IBAD technikák rendkívül hasznosak a kutatási célokra, gyártástechnológiában kevésbé alkalmazhatóak.



27. ábra: Pt nanoszál elektronmikroszkóp képe (kisebb Pt nanoszál: $h=5,824 \mu\text{m}$, $d=0,62 \mu\text{m}$; nagyobb Pt nanoszál: $h=12,38 \mu\text{m}$, $d=1,257 \mu\text{m}$)

A minta paraméterei a következők voltak: a sugárenergia értéke 2 keV, a sugáráram intenzitása 800 pA, a besugárzott terület nominális átmérője 1 mikrométer, és a növesztés időtartama 39 perc 27 másodperc volt. Az összetétel analízise alapján megállapítható, hogy a platina tartalom mintegy 80 tömegszázalék, míg a szén tartalom 20 tömegszázalékot tesz ki. A hidrogén jelenlétét nem volt lehetséges mérni. A minták előállításához használt prekursor anyag a trimetil metil-ciklopentadienil platina.



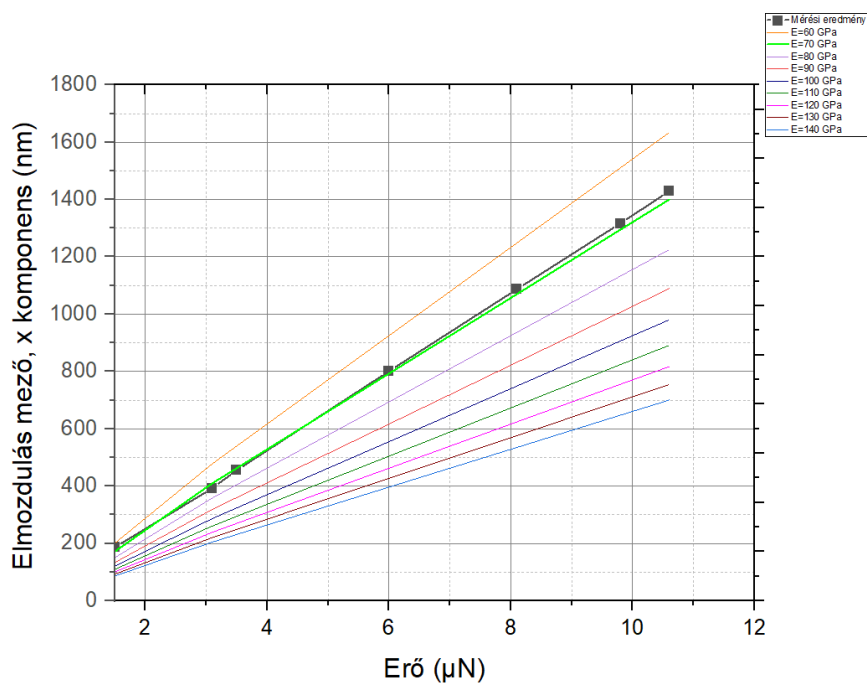
A mérés során pásztázó elektronmikroszkóp (SEM: Scanning Electron Microscope) technikával készült képeket rögzítettük. A képernyőképek elemzése során, figyelembe véve a képek részletességét és a pixelarányokat, pontosan meghatároztam a platinaszál méreteit és geometriai jellemzőit. Továbbá, az elemzés során rögzítettem, hogy az erőmérő melyik élen érintkezik a platinaszállal terhelés alatt. A szimuláció célja az erő támadáspontjában mért elmozdulások meghatározása.

A COMSOL Multiphysics szoftver segítségével létrehoztam a modellezési geometriát, amely egy egyszerű ábrázolást nyújtott a platinaszál struktúrájáról. A modellem egy olyan hengert tartalmazott, amelynek magassága $5,66\ \mu\text{m}$, és sugarának értéke $0,27\ \mu\text{m}$, amely hengert egy $0,27\ \mu\text{m}$ sugarú félgömb zár le a tetején, létrehozva ezzel a platinaszál egyszerűsített formáját. A modellhez a szoftverben definiált „Platinum” anyagot rendeltem hozzá.

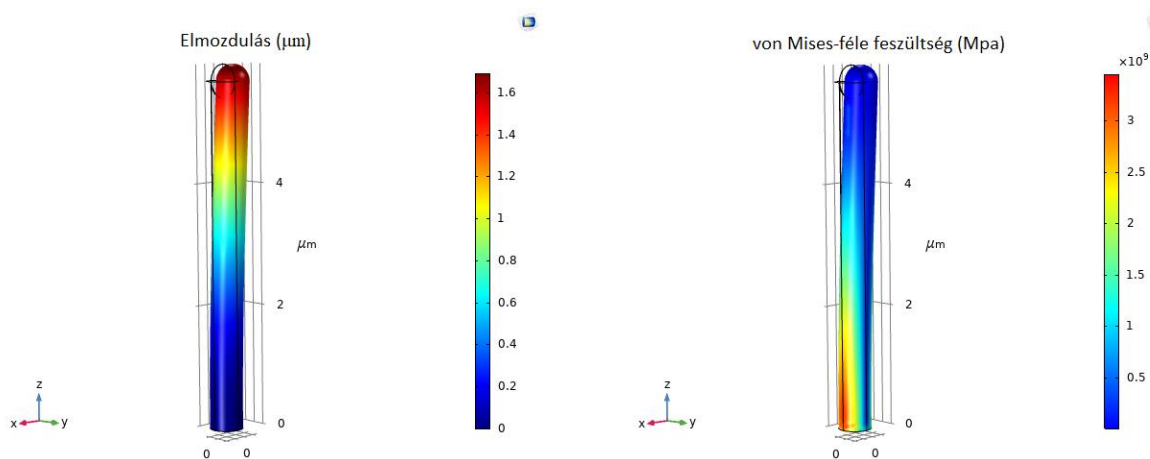
A peremfeltételek kialakításakor a rögzítést a platinaszál talpazatához alkalmaztam, hogy a valós körülményeknek megfelelően rögzítsem a modell alapját. A terhelést egy specifikus élen helyeztem el a platinaszál felső harmadában, ezáltal megfelelően szimulálva a mérés során kifejtett terhelést. A terhelési erőt a mérések alapján határoztam meg, a szimulációk során az erőtartományt a $1,5\text{--}10,6\ \mu\text{N}$ között változtattam. Tetraéderes elemekből álló háromdimenziós hálót alkalmaztam, hogy megfelelően modellezhessem a platinaszál geometriáját és viselkedését terhelés alatt. A szimuláció során az időbeli változást figyelmen kívül hagytam, mivel a platinaszál viselkedése terhelés alatt a statikus egyensúlyi állapotban maradt, így nem szükséges időbeli változások vagy dinamikus folyamatok figyelembevétele a szimuláció során.

A Young-modulus értékét változtattam $60\ \text{GPa} - 140\ \text{GPa}$ tartományban. Rögzítettem az elmozdulás mező x komponensének elmozdulásait $1,5 - 10,6\ \mu\text{N}$ erőtartományban, majd összehasonlítottam a mérés eredményeit a szimuláció során kapott eredményekkel.

Az eredményeket vizuálisan összegző grafikonról leolvasható, hogy a $70\ \text{GPa}$ Young-modulus beállítással lefutott szimulációs eredmény közelít leginkább a mért eredményhez.



28. ábra: Pt nanoszál Young-modulus értékei az elmozdulás mező x komponensének elmozdulásai és az erő függvényében



29. ábra: 3D felületi ábrázolás a Pt nanoszál elmozdulásáról és a von Mises-féle feszültségről



5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

A szimulációk három fő területre összpontosítottak. Az első terület az új geometriával rendelkező erőmérő szenzor statikai analízise volt, melynek célja az volt, hogy meghatározzam a membrán legnagyobb von Mises-féle feszültségét 0-2000 μN erőtartományban. A szimulációk eredményeként megállapítottam, hogy az 1000 μN -os terhelésnél a legnagyobb von Mises-féle feszültség 43,96 MPa. míg 2000 μN -os terhelésnél ez az érték 87,92 MPa. Az irodalomkutatásból származó adatforrás alapján meghatároztam, hogy az új geometriával rendelkező erőmérő nem fog eltörni a 0-2000 μN erőtartományban alkalmazott mérések során. A szimulációs eredményeimet felhasználva biztonsággal elvégezhető volt az új geometriával rendelkező erőmérő szenzor érzékenységvizsgálata, mely során 60 μN -nál 1740 μV mérési eredményre jutottunk.

A Nanoérzékelők Laboratóriumában végzett kutatás során a 3D erőmérőszensor kalibrálását Pásztázó Elektronmikroszkóp segítségével végeztük el, amelyhez előre bekalibrált Atomerő-mikroszkóp (AFM - Atomic force microscopy) szondát alkalmaztunk. Az AFM-szondás mérési eljárás bonyolult és költséges volt, ezért szükségesnek tartottuk egy optikai mikroszkóppal is alkalmazható, 2D irányfüggő vizsgálatot is lehetővé tevő MEMS eszköz kifejlesztését. A kalibrációt megkönnyítő eszköz jellemzője, hogy rugalmasan elmozdul a 0-50 μm tartományban, és még maximális terhelés mellett sem jelennek meg olyan magas von Mises-féle feszültségek, amelyek töréshez vezethetnének a kalibrációs eszközben vagy az új geometriájú erőmérő szenzor membránjában. A modellezés eredményeként arra a következtetésre jutottam, hogy az 50 μm elmozdulási tartományban a tervezett modellek nem felelnek meg az elvárásainknak. Ellenben a negyedik modell esetében a 0-25 μm tartományban még olyan von Mises-féle feszültségek jelentkeznek, amelyek valószínűsíthetően nem okoznak törést a mérések során.

A modellezési eredményeimet felhasználva a jövőben a kalibrációs eszközzel kapcsolatos mérési kutatási munkáinkat az általam javasolt elmozdulási tartományban, optikai mikroszkóppal vagy pásztázó elektronmikroszkóppal tervezzük megvalósítani.



A harmadik területet a gyakorlati hasznossága miatt kiemelném a többi közül. A szimulációs modellem megerősítette a korábbi mérés eredményét, ezáltal igazolta, hogy az új geometriájú erőmérő képes **1,5-10,6 μ N erőtartományban különböző anyagok Young-modulus értékének meghatározására. Ebben a **mérettartományban meghatározott Young-modulus értékének olyan szakmai eredménnyel bírnak, amelyek tudományos, kutatási területen széleskörűen felhasználhatók.** A szimulációs munkám során elemeztem egy platina nanoszál elmozdulását különböző nagyságú x-irányú terhelő erők hatására, és meghatároztam, hogy az anyag Young-modulus értéke 70 GPa. Az általam végzett szimulációs eredmények megegyeztek a kísérleti mérések eredményeivel.**



6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatomban egy piezorezisztív elven működő mikromanipulátorra szerelhető erőmérő szenzor továbbfejlesztésének statikai analízishez kapcsolódó szimulációs modellezési munkáit mutattam be. Az erőmérő szenzor fejlesztésének célja a további miniatürizálás és az érzékenység növelése.

Az elméleti áttekintés során bemutattam a piezorezisztív elv alapjait és a COMSOL Multiphysics szoftver lehetőségeit a szimulációkhoz, valamint összefoglalóan ismertettem a fejlesztés alapját adó erőmérő szenzor felépítését és működését.

Az új geometriával szimulációs analízist végeztem a szenzor statikai viselkedéséről. A szimulációk eredményei alapján megállapítottam, hogy az új geometria biztonságosan alkalmazható a tervezett terhelési tartományban, nem következik be törés. Az érzékenységvizsgálathoz kapcsolódó méréseket a szimulációs vizsgálati eredményeket követően elvégeztük.

A mérési kalibráció egyszerűsítése érdekében kalibrációs eszköz megvalósításához előzetes statikai szimulációs vizsgálatokat végeztem, amely során négy modellt alkottam. A modellezés eredményei alapján iránymutatásokat adtam a további mérési munkánk szervezéséhez.

Végül egy konkrét alkalmazási példát mutattam be, ahol a szimuláció segítségével meghatároztam egy Pt nanoszál Young-modulusát. A szimulációs eredmények összhangban voltak a kísérleti mérés eredményével, amely igazolta, hogy az új geometriájú erőmérő alkalmas arra 1,5-10,6 μN erőtartományban különböző anyagok Young-modulus értékének meghatározására. Az új innováció széleskörűen felhasználható a tudományos kutatásokban, ezáltal új perspektívákat nyit meg a mikro- és nanoskálán történő mérési és manipulációs technikák terén.



7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném köszönetemet kifejezni a lehetőségért, hogy részt vehettem a **HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Nanoérzékelők Laboratóriumában** végzett erőmérő szenzor kutatás-fejlesztési munkáiban **Bozorádi János Márknak** és **Dr. Volk Jánosnak**, konzulenseimnek, valamint a projektcsoport tagjainak **Nagy Attilának** és **Illés Leventének**. A közös munka során szerzett tapasztalatok és a laboratóriumi környezetben való részvétel segített mélyíteni az eddigi egyetemi tanulmányaim során szerzett elméleti ismereteimet, és hozzájárult a szakmai fejlődésemhez, motivációt adott számomra a kutatási életpálya választásához. A munka a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával, a TKP2021-NVA-03 azonosítószámú projekt keretében valósult meg.

Az **Óbudai Egyetem** részéről **Dr. Szakács Tamásnak**, konzulensemnek szeretném kifejezni a köszönetemet. Nagyra értékeltem a szimulációs munkám iránt tanúsított figyelmét, valamint az általa nyújtott támogatást és útmutatást. Igényességre, precizításra és pontosságra való törekvésre inspirált.

Hálás vagyok **Dr. Biró Tamás Sándornak**, a **HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont** Nanoplazmonikus Lézeres Fúzió Kutatólaboratóriumának témavezetőjének, amiért rugalmasan kezelte munkaidőmet. A fejlesztéssel kapcsolatos mérések munkaidőben zajlottak, így támogatásával lehetőségem nyílt aktívan részt venni ezeken.

Nem utolsó sorban köszönettel tartozom a **Lányomnak** és a **családomnak**, amiért türelmükkel és támogatásukkal segítették a tudományos munkámat.



8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Túrós László-Zsolt, Székely Gyula: **Érzékelők és mérőhálózatok**, Scientia Kiadó, Kolozsvár, 2022; 27-28., ISBN 978-606-975-060-5
- [2] Dr. Fock Károly: **A folyamatműszerezés érzékelői**, Magyar Elektronika, 2009, 7-8.
- [3] Bársony István: **Nanotechnológia**, Magyar Tudomány, 2003/9 1083. o.
- [4] Hahn Emil, Harsányi Gábor, Lepsényi Imre, Mizsei János: **Érzékelők és beavatkozók**, 1999, Budapest, Műegyetemi kiadó, 44..
- [5] Tóth Bence: **Mechanika II.**, Budapest, Dialóg Campus, 2019, 101.; ISBN 978-963-531-014-2
- [6] C. Kósa, **Nyugvó rendszerek mechanikája**. Budapest: Óbudai Egyetem, 2010.
- [7] Radó János: **Mikro– és nanoméretű erőmérő szerkezetek**, Doktori (PhD) értekezés, 2020, 43-44.
- [8] A kép forrása: <https://www.nanotechnik.com/mm3a-em.html>; utoljára megtekintve: 2024. 04. 17.
- [9] Dr. Tamás Péter, Bojtos Attila, Décsei-Paróczy Annamária, Dr. Fekete Róbert Tamás: **Végeselem módszerek**, BME MOGI, 2014, ISBN 978-963-313-145-9
- [10] Marek Boniecki, Paweł Kamiński, Władysław Wesołowski, Konrad Krzyżak: **Mechanical strength and fracture toughness of brittle monocrystalline and ceramic materials**, Access: Open, Electronic Materials, 2016, 44, 4
- [11] Zesen Bai, Jian Cui, Qiancheng Zhao, Zhenchuan Yang and Guizhen Yan: **Initial frequency split reduction of MEMS ring gyroscope based on cascaded springs geometrical compensation**; Electronics Letters 11th July 2019 Vol. 55 No. 14 pp. 806–808
<https://doi.org/10.1049/el.2019.1356>
- [12] Dr. Czifra Árpád: **Mechanika 3.**, Budapest: Óbudai Egyetem, 2013.



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

9. MELLÉKLETEK, FÜGGELÉK