

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK



VARGOVICS TAMÁS

Auxetikus struktúrák tervezése és mechanikai modellezése

Tudományos Diákköri Konferencia

Témavezető:

Dr. Kossa Attila

Egyetemi docens



BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

Absztrakt	IV
Jelölések jegyzéke	V
1. Bevezetés	1
1.1. Célkitűzések	1
1.2. Áttekintés	1
2. Szakirodalmi áttekintés	2
2.1. Auxetikus anyagok tulajdonságai	2
2.2. Auxetikus anyagok a szakirodalomban	3
3. Struktúrák tervezése és gyártása	9
3.1. Próbatetek geometriájának létrehozása	9
3.2. Próbatetek gyártása	11
3.2.1. Lézervágó gépek	11
3.2.2. Beállítások, megvalósítás	12
4. Hiperelasztikus anyagmodell illesztése	14
4.1. Hiperelasztikus anyagok	14
4.2. Egytengelyű húzóvizsgálat	15
4.3. Anyagmodell illesztés	18
4.4. Eredmények	20
5. Mérés	21
5.1. Mérési környezet	21
5.2. Mérés kiértékelés	22
5.2.1. Erő-elmozdulás (Mérés)	22
5.2.2. Poisson-függvény (Mérés)	23
6. Végeelem számítások	27
6.1. Szimulációs környezet	27

6.2. Szimulációk kiértékelése	31
6.2.1. Erő-elmozdulás (VEM)	31
6.2.2. Poisson-függvény (VEM)	32
6.2.3. Hálófüggetlenségi vizsgálat	34
6.3. Eredmények összehasonlítása	35
6.3.1. Erő-elmozdulás függvények	36
6.3.2. Poisson-függvények	36
6.3.3. Eltérések lehetséges okai	38
7. Optimalizáció	43
7.1. Geometria paraméterezése	43
7.2. Kiértékelés, eredmények	46
8. Összefoglalás	49
8.1. Eredmények	49
8.2. Javaslatok	49
Summary	50
Irodalomjegyzék	52

Absztrakt

Auxetikusnak nevezzük azokat az anyagokat vagy struktúrákat, amelyek Poisson-tényezője negatív értékeket is felvehet, vagyis hosszirányú húzás esetén a keresztirányú méretük megnőhet, továbbá a hagyományos anyagokhoz képest megnövekedett energiaelnyelő képességgel és több előnyös tulajdonsággal rendelkezhetnek. Ezen dolgozat elsődleges célja egy átfogó módszertan kifejlesztése, amely megkönnyíti az említett metaanyagok tervezési folyamatát, ezzel kiterjesztve a lehetséges alkalmazási területeket.

Munkámban mechanikai szempontból vizsgáltam 2 mm vastag, szilikon lapokból kialakított struktúrákat mérésekkel és numerikus szimulációkkal. Négy különböző geometriát hoztam létre, különböző cellaszámokkal. A perforációk egy lézervágó gép segítségével kerültek kialakításra. A szilikon alapanyag mechanikai viselkedésének pontos modellezése érdekében egy harmadrendű, összenyomhatatlan, Ogden-féle hiperelasztikus anyagmodellt alkalmaztam. Ez egy hat paramétert tartalmazó konstitutív modell, melynek illesztését Matlab-ban végeztem el a mérési eredmények, valamint a modell előrejelzése közötti hibafüggvény minimalizálásával. Az illesztéshez szabványos próbatesten elvégzett, egytengelyű húzásból származó, valamint az ebből megalkotott virtuális kéttengelyű húzási eredményeket használtam fel. Az auxetikus próbatestenek is egytengelyű szakításnak lettek alávetve, egyoszlopos Instron univerzális tesztgép segítségével, nagy axiális alakváltozásokat elérve. A kísérletek nagy, 8K felbontású kamerával, videón kerültek rögzítésre, a felvételeket egy speciális mozgáskövető szoftverrel értékeltem ki. A pillanatnyi Poisson-tényezőt a hosszirányú és a keresztirányú nyúlásokból számoltam. A véges elem szimulációk elvégzéséhez a Simulia Abaqus 2022-es verzióját használtam [1]. A dolgozat utolsó nagyobb eleme egy optimalizáció, amit paramétersöprés formájában valósítottam meg, numerikus környezetben. Az egyik struktúra két geometriai paraméterét változtatva vizsgáltam a Poisson-tényező, valamint a szakítógép által kifejtett erő változását.

A kapott eredmények alapján elmondható, hogy sikerült megbízható mérési és szimulációs környezetet kialakítani, továbbá egy konkrét, auxetikus elem tervezése esetén fontos információval szolgál a paramétersöprés is, tekintettel arra, hogy a geometria függvényében az eredmények számottevő változása figyelhető meg.

Köszönetnyilvánítás

Ez a dolgozat az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az FK 142457 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Budapest, 2023

Vargovics Tamás

Jelölések jegyzéke

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik a hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
F	húzóerő	N
u	axiális elmozdulás	m
v	sebesség	m/s

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	fajlagos axiális alakváltozás	1
λ	axiális nyúlás	1
ν	Poisson-tényező	1

Indexek, rövidítések

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték
2D	kétdimenzió
3D	háromdimenzió
i	általános futóindex (egész szám)
STR1	első struktúra
STR2	második struktúra
STR3	harmadik struktúra
STR4	negyedik struktúra
ún.	úgynevezett

1. Bevezetés

Manapság, a különféle tudományterületek folytonos fejlődésével az emberek egyre nagyobb biztonságban, egészségben, kényelemben élhetnek. Nap, mint nap születnek új ötletek, jelennek meg új eszközök, berendezések. Mérnökként azonban tudjuk, hogy mindig vannak megoldandó problémák, fejlesztendő és fejlesztendő szektorok, és bár ezek egyre speciálisabbak és nehezebben megfoghatóak, feladatunk, hogy foglalkozzunk velük. Az új technológiák új anyagok megjelenését és használatát követelik meg, amik elé ugyancsak egyre speciálisabb követelményeket állítunk. Az ún. auxetikus anyagok, vagy auxetikus struktúrák is ebbe a csoportba tartoznak, és bár ezek a természetben is előfordulnak, a kutatók csak az utóbbi időben kezdték el áthatóbban vizsgálni őket.

1.1. Célkitűzések

Az auxetikus anyagok az ún. mechanikai metaanyagok közé tartoznak, ami lényegében annyit jelent, hogy valamilyen, a megszokottól eltérő alapvető tulajdonsággal rendelkeznek, ami sok esetben előnyt jelenthet a hagyományos anyagokkal szemben. Hiányosságuk, hogy viszonylag nehezen modellezhetőek, sok esetben a tervezésük és előállításuk nehézségét nem kompenzálja a felhasználásukkal nyerhető haszon. Dolgozatom célja ennek leküzdése ezen auxetikus struktúrák mechanikai tulajdonságainak fejlesztésével, gyárthatóságuk kiterjesztésével, továbbá az ezekkel kapcsolatos pontosabb modellezhetőség elérésével, ami alatt a megalkotott modellek és a valós darabok viselkedésének közelítését értem. Ehhez újszerű, vagy ezen a területen kevésbé jellemző módszereket és technológiákat alkalmazok. Mindezzel az említett metaanyagok különféle alkalmazási területekre történő implementálhatóságának javítását célozom meg, ezzel elősegítve ezen szektorok és a témakör fejlődését.

1.2. Áttekintés

Dolgozatomban mechanikai szempontból vizsgáltam szilikon lapokból kialakított auxetikus struktúrákat. Első lépésként a négy kiválasztott struktúra geometriáját alkottam meg, és gyártottam le egy lézervágó gép segítségével, különböző cellaszámokkal. A következőkben egy harmadrendű, Ogden-féle hiperelasztikus anyagmodellt alkalmaztam az alapanyag mechanikai viselkedésének pontos modellezésére, melyhez egy szabványos próbatesten elvégzett szakító kísérlet eredményeit használtam fel. Az auxetikus próbatestek is egytengelyű szakításnak lettek alávetve, nagy axiális alakváltozásokat elérve. A kísérletekről készült videófelvételeket egy speciális mozgáskövető szoftverrel értékeltem ki. Végül a megfelelő végeelem szimulációkat végeztem el, majd a geometriák optimalizálására egy paramétersöprést hajtottam végre, ahol az egyik struktúra két geometriai paraméterét változtatva vizsgáltam annak mechanikai jellemzőit.

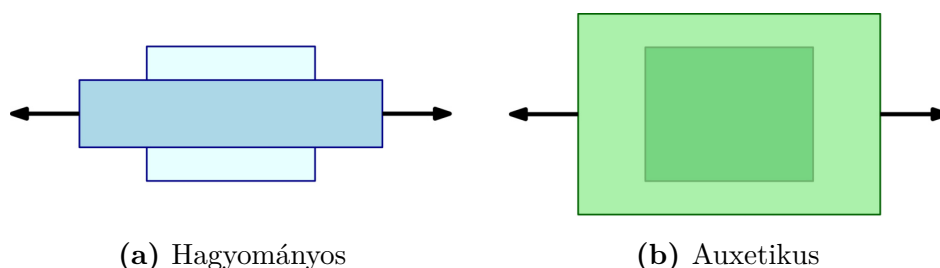
2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Auxetikus anyagok tulajdonságai

Napjainkban egyre többen foglalkoznak auxetikus anyagok vizsgálatával, egyre több kutatás és cikk jelenik meg a kiadóknál, amik közül a számomra relevánsakat fogom ismertetni. Ahhoz azonban, hogy el tudjuk helyezni ezen anyagokat, röviden bemutatom a rájuk jellemző általános tulajdonságokat, a témakörrel kapcsolatos fogalmakat, kifejezéseket.

Homogénnek nevezünk egy anyagot, vagy közeget, ha az anyagtulajdonságok azonosak annak határain belül, nincsenek különböző fázisok. Ilyen anyagok a fémek, kerámiák, valamint a polimerek döntő többsége. Ellentéte a heterogén, vagy inhomogén közeg, itt a fázishatárok jól elkülöníthetőek, az anyag nem egységes. Az anyagtudományban izotropnak tekintünk egy anyagot, ha annak tulajdonságai a tér három irányában megegyeznek, irányfüggetlenek; anizotropnak pedig akkor, ha valamilyen mértékben különböznek. Ezen tulajdonságok lehetnek például a hővezetőképesség, elektromos vezetőképesség, de akár a rugalmassági modulus, vagy egyéb mechanikai jellemzők is [2]. Ezek fontos fogalmak, azonban az auxetikus anyagokat általánosan nem tudjuk egyik csoportba se sorolni, léteznek homogén, inhomogén, valamint izotrop, anizotrop anyagszerkezetűek. Az általam vizsgált struktúrák jellemzőit bővebben a 3.1. fejezetben fogom kifejteni.

Az auxetikus anyagok a mechanikai metaanyagok csoportjába tartoznak. Négy tudományterületen beszélhetünk metaanyagokról, ezek az elektromágnesesség, hőtan, akusztika, és mechanika. A mechanikai metaanyagok fő jellemzője a negatív Poisson-tényező [3]. Másként definiálva a metaanyagok olyan anyagok, melyek a tulajdonságaikat nem, vagy nem csak az alkotó anyag tulajdonságaiból nyerik, hanem a geometriai felépítésükből. A Poisson-tényező a szilárd testek mechanikájának egyik fontos dimenziótlan mennyisége, egy test egytengelyű feszültségi állapotánál a keresztirányú és a hosszirányú derfomációk viszonyát fejezi ki, a keresztirányú és a hosszirányú alakváltozások hányadosának negatívja. Értéke hagyományos, izotrop anyagok esetén szinte kivétel nélkül 0 és 0,5 közötti, állandó [4]. Fontos megjegyezni, hogy auxetikus anyagok esetén legtöbbször (és ebben a dolgozatban is), a nagy alakváltozások miatt a Poisson-tényezőre mint függvényre tekintünk, értéke nem állandó, a terhelés függvényében változik. Munkámban auxetikusnak tekintek egy anyagot, ha ez a függvény a terhelés során negatív értéket is felvesz (1. ábra).



1. ábra. Auxetikus anyagok viselkedése húzás esetén

Sejtszerű szerkezetűnek tekintünk egy anyagot, struktúráat, ha a makroszkopikus méreteinél jóval kisebb, de nem mikroszkopikus méretű, ismétlődő cellákból felépülő mikrostruktúrával rendelkezik. Ezeket a struktúrákat két csoportra oszthatjuk. Az egyik a sztochasztikusak, ekkor a cellák nem egyformák, véletlenszerű a méretük és a helyzetük. Ilyenek a természetben fellelhető habok, de a mesterséges polimer és fémhabok is. Ezzel ellentétben, a szabályos sejtszerű anyagok egyforma, rendezetten elhelyezett cellákból épülnek fel, szerkezetük precízen tervezhető. A cellát, amiből felépülnek elemi cellának nevezzük. Előállításuk nehezebb, ezért kevésbé elterjedtek. Ellenpéldaként tekinthetjük a hagyományos méhsejtszerkezetet, amit ugyancsak sorolhatunk ebbe a csoportba, és széles körben használják a mérnöki gyakorlatban.

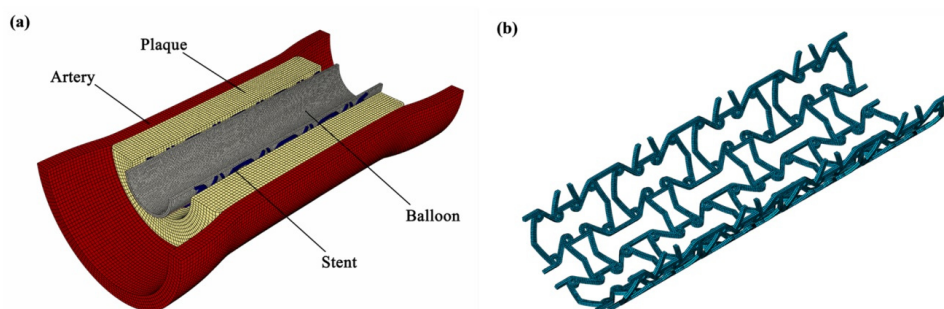
2.2. Auxetikus anyagok a szakirodalomban

A következőkben a különböző kutatók által végzett vizsgálatok, tanulmányok közül a dolgozat szempontjából relevánsakat fogom ismertetni. Mint említettem, a témakört jelenleg is széles körben kutatják világszerte, így folyamatosan jelennek meg újítások ezen anyagokkal kapcsolatban.

A kérdéskörrel foglalkozó kutatók és mérnökök sokáig úgy gondolták, hogy hasonló anyagok a természetben csak elvétve fordulnak elő, az utóbbi időben azonban egyre több kutatás foglalkozik ezek feltárásával, és sorra jelennek meg munkák természetes, organikus metaanyagokról [5]. Természetben előforduló, organikus auxetikus anyag egyes kerámiákon kívül lehet egyes állatok bőre, például a macskabőr is viselkedhet így. Ebben az esetben a megfigyelések alapján a negatív Poisson-tényező nagyrészt a bőr hierarchikus szerkezetének következménye, és nagyban segít megvédeni az állatot a külső behatásoktól. Egyéb organikus metaanyagok lehetnek különféle polimerek is, valamint a természetes, de nem organikus csoportba tartoznak egyes, különleges rácsszerkezettel rendelkező fémek, speciális terhelés esetén.

Jelenleg a legnagyobb hangsúly azonban a mesterséges auxetikus struktúrák fejlesztésén van, jelennek meg kifejezetten felhasználás-specifikus munkák, de olyanok is, amik elméletibb módon közelítik meg a témakört. Abbaslou és társai egy auxetikus struktúrából készült vaszkuláris sztentet vizsgáltak mérésekkel és végeselemes szimulációkkal [6]. Az érsebészeti sztent széles körben kutatott terület. Érszűkület esetén alkalmazzák, az érelzáródás (akár trombózis) megelőzésére, ami komoly egészségügyi veszélyt hordoz magában, okozhat szívrohamot, szervkárosodást, stroke-ot [7]. Egy érsebészeti sztentnek jó radiális merevséggel, axiális rugalmassággal, és könnyű tágíthatósággal kell rendelkeznie. Auxetikus struktúrából készült sztent előnye lehet a hagyományossal szemben, hogy behelyezés után hosszanti irányban nem rövidül meg, akár nőhet is a hossza. A közelmúltban megjelentek biológiai úton lebomló anyagokból készült sztentek is, ebben a tanulmányban is ilyet használtak a kutatók. A saját tervezésű, sík struktúrákon első lépésként végeselem szimulációkat végeztek (2. ábra), egy paramétersöprés formájában, ahol a geometriát változtatták. A szimulációkat mérésekkel validálták, a próbatestek gyártásához az egyik legelterjedtebb 3D nyomtatásos technológiát, FDM-et ("Fused Deposition Modeling")

választottak, melynek során a gép egy vékony, megolvasztott műanyag réteget oszlat szét a nyomtatási felületen. Ez az egyik leggyorsabb és leginkább költséghatékony additív gyártástechnológia. Később egy kiválasztott geometriát implementáltak a sztent hengeres formájára, numerikus környezetben tesztelték a behelyezés folyamatát, majd hárompontos hajlítókísérletet végeztek ugyanezen hengeres testen szimulációs és valós környezetben is. Az FDM hátránya, hogy a minimálisan gyártható méretek korlátozottak, így jelen esetben is, a sztent egy felnagyított változatán végezték a teszteket. Az eredmények alapján a szerzők mechanikai szempontból megfelelőnek találták az általuk fejlesztett elemet érszűkületi problémák kezelésére.



2. ábra. Auxetikus sztent modell [6]

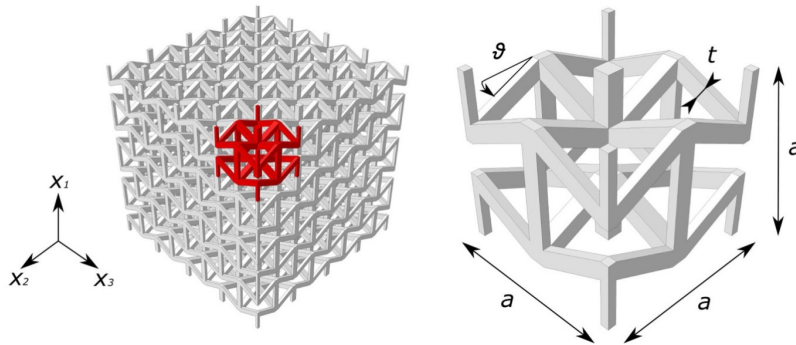
További orvostechnikai alkalmazások lehetnek a különféle implantátumok [8]. Jiang és társai egy csigolyaközi porckorong pótlásának lehetőségét vizsgálták, ágyéksérvben szenvedő betegek megsegítésére. A problémát az okozza, hogy a porckorong hosszú távon van kitéve nyomásnak, így deformálódhat, és sérvet okozhat. A hagyományos implantátumok esetén is fennáll ez a probléma, mivel nyomás esetén keresztirányban tágulnak. Erre lehet megoldás egy auxetikus implantátum. Egy ilyen implantátumnak jelentős energiaelnyelő képességgel, a terhelés egyenletes elosztásának képességével, valamint megfelelő csillapítással és stabilitással kell rendelkeznie. Ezt megvalósítandó, egy háromdimenziós geometriát alkalmaztak a szerzők, ami azt jelenti, hogy a tér mindhárom irányában változik a keresztmetszete, így az auxetikus viselkedés is eggyel több irányban jelentkezik. A viszonylag bonyolult geometria nem teszi lehetővé a hagyományos gyártástechnológiák alkalmazását, így a kutatók ismét az additív technológiákhoz fordultak, jelen esetben SLS ("Selective Laser Sintering") módszert alkalmaztak. Ebben az esetben műanyag por alapanyagot fektet a gép egymásra vékony rétegekben, majd rétegről-rétegre egy lézersugár segítségével szilárdítja meg a megfelelő részeket, így egy nagy pontosságú, szilárd, ellenálló elemet kapunk. Az anyagtulajdonságok modellezésére egy harmadrendű Ogden-féle hiperelasztikus modellt illesztettek a mérési eredményekre. Az implantátumot véges elemes vizsgálatokkal és valós tesztekkel is elemezték, többek között az energiaelnyelő képességet, a csillapítást, valamint a ciklikus terhelésre adott reakcióját szem előtt tartva. Az eredmények különösen biztatóak, a próbatestek a hétköznapi életben praktikus terheléseknek is megfeleltek, továbbá a strukturális szempontból előnyös tulajdonságaik is megmutatkoztak. További pozitív sajátosságuk, hogy a cellaszerkezet változtatásával, az alkotó struktúra típusának helyes megválasztásával könnyen programozható, személyre szabhatóak a jellemzőik, így páciens-specifikusan lehet implantátumokat tervezni.

Egy másik jelentős felhasználási terület az energiaelnyelő és protektív elemek lehetnek, akár az autóiparban, járművek törésmechanikai alkatrészeihez, akár az űrparban, hadászati védelmi berendezésekhez, illetve sporteszközökhöz is. Az alábbi tanulmányban a szerzők alumínium habbal töltötték ki egy henger formájú auxetikus elemet [9]. A külső héj rozsdamentes acélból készült, az ellipszis alakú perforációk egy lézervágó géppel kerültek kialakításra, míg az alumínium hab henger formájúvá alakítását egy EDM ("Electrical Discharge Machining"), elektromosan töltött huzallal végezték el. Vizsgálták a hab sűrűségének hatását, a perforációk formájának, fajtájának hatását, valamint ezek sűrűségének hatását. A legfontosabb következtetés amit levontak azonban az, hogy a kompozit struktúra, tehát a héj és a belső rész együttesen nagyobb energiát képes elnyelni, mint külön-külön összesítve. Ez a jellemző a héj auxetikus voltának következménye. Nyomásnál ugyanis radiális irányban nem tágul, hanem összemegy, amit az alumínium hab gátolni próbál. Az alábbi munkára tekinthetünk úgy, mint a fentiek továbbfejlesztésére. A kedvező tulajdonságok mellett lényeges megemlíteni egy kevésbé kedvezőt is, mégpedig azt, hogy a kompozit elem relatív sűrűsége sokkal nagyobb, mint egy hasonló méretű általánosan használt struktúráé, például méhsejt szerkezeté. Ezen negatívum javítása érdekében alkottak meg három, kikönnnyített auxetikus geometriát, majd gyártották le ezek alapján a külső héjat. Az alkalmazott módszerek teljesen hasonlóak az előbbiekhöz, az eredmények pedig reménykeltőek, ugyanis a tömeg nagymértékű csökkenését sikerült elérni az auxetikus tulajdonságok, valamint a relatív elnyelt energia értékének gyengülése nélkül [10]. További fejlesztési lehetőség ezen cikkek esetén a dinamikus szimulációk és tesztek elvégzése (a fentiekben kvázistatikus módszert alkalmaztak), ami az energiaelnyelés szempontjából lényeges.

Az előző két publikációban kétdimenziós struktúrákat vizsgáltak a szerzők, de természetesen háromdimenziós struktúrákat is használnak energiaelnyelő elemek fejlesztéséhez [11]. Az alábbiakban háromdimenziós, poliamid 12-ből, ugyancsak SLS technológiával legyártott próbatesteken végeztek egytengelyű nyomásos tesztek, valamint végelem vizsgálatokat is a megfelelő modellen. A Poisson-tényező meghatározása a mérési eredményekből közvetlen úton nem lehetséges, így valamilyen egyéb módszerhez kell folyamodni. A jelen tanulmányban DIC-t ("Digital Image Correlation") használnak a kutatók, ami a mérésről készített nagy felbontású videófelvétel elemzését jelenti. A peremfeltételek hatását elkerülendő, nem a teljes szerkezet széleit vették számításba, hanem egy belső négyzet alakú részt. A kiértékelést egy speciális szoftverrel végezték, ami a megadott pontok elmozdulását képes lekövetni. A Poisson-tényezőt a pontok elmozdulásából határozzák meg, majd ezt hasonlítják össze a szimulációs eredményekkel. Mindemellett egy analitikus modell is megalkotásra került a struktúra mechanikai viselkedésének leírására.

A következő kutatás is energiaelnyelő elemekkel foglalkozik, pontosabban egy sportolóknak szánt, arcsérülés utáni, vagy annak megelőzésére szolgáló arcmaszkkal, melynek adott terhelési kritériumoknak kell megfelelnie, továbbá a maximális kiterjedése is előírás szerinti. A szerzők egy téglatest alakú kompozit próbatestet alkottak meg a maszk modellezésére, a homogén külső héj által behatárolt részt kétféle háromdimenziós rácsszerkezetekkel töltötték ki, melyek közül az egyik a 3. ábrán látható. Az első a hagyományos méhsejt, a második az auxetikus méhsejt

volt. Mindkét geometria alacsony relatív tömegű, azaz a tömegéhez képest viszonylag nagy helyet tölt ki, ez alacsony tömegű elemek gyártását teszi lehetővé, ami az emberi test védelmét szolgáló eszközök lényeges jellemzője ergonómiai szempontból. Az alsó és felső réteg anyaga merev etilén-vinil-acetát, míg a középső, auxetikus rétegé ugyanezen anyag rugalmas variánsa. A két geometria viselkedésének vizsgálatára egy becsapódásos tesztet végeztek, egy merev golyó 1,5 m/s-os kezdősebességről történő ütköztetésével. Az eredményeket összehasonlították a szakirodalomban megtalálható hagyományos oltalmi eszközökkel kapottakkal. Elmondható, hogy mindkét rácsszerkezet kedvező tulajdonságokat mutat, a maximálisan elnyelt energia hasonló mértékű a hagyományos maszkokéhoz, azonban jóval egyenletesebben elosztva az idő függvényében. Az alsó lapról, azaz a viselő arcára átadódó erő pedig jóval alacsonyabb maximális értékeket mutat az újonnan bemutatott próbatestek esetén, a kettő közül is az auxetikus méhsejt tűnik kedvezőbbnek. Továbbifejlesztési lehetőség a valós geometria végelelemes vizsgálata, valamint a próbatestek és az arcmaszk gyártása és ezeken tesztek elvégzése, ezzel együtt a szimulációk validálása. [12]

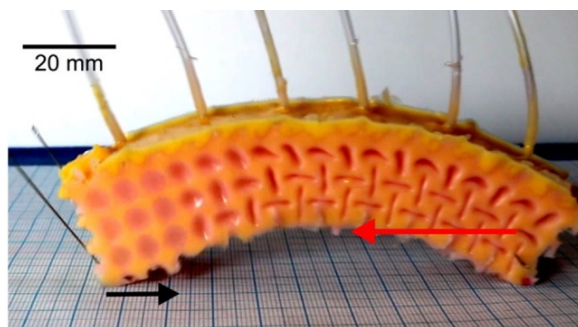


3. ábra. Háromdimenziós struktúra [12]

Napjainkban egyre szélesebb körben alkalmaznak ún. mesterséges intelligenciát a gépészmérnöki gyakorlatban is. A következőkben az ML ("Machine Learning"), azaz gépi tanulás alkalmazását láthatja az olvasó, auxetikus struktúrák geometriájának adott Poisson-tényező értékre való optimalizálására [13]. Az előzőektől eltérően, ahol a megfelelő geometria megtalálása egy adott cél érdekében nagyban függött a tervező tapasztalatától, és legtöbbször egy iteratív folyamatot jelentett, itt egy inverz, fordított tervezési folyamatról beszélhetünk, azaz a kívánt tulajdonságból határozzuk meg a kialakítást egy algoritmus segítségével. Manapság a legelterjedtebb inverz tervezőeljárás az ún. topológiai optimalizálás, azonban ez viszonylag számításgényes, és megkívánja a matematikai, fizikai modellek átható ismeretét. Ezekben a tényezőkön javíthat az aktuális módszer, ami BPNN ("Back Propagation Neural Network"), azaz egy speciális neutrális háló, továbbá egy GA ("Generic Algorithm"), azaz egy generikus algoritmus ötvözésével készült. Az algoritmust nulla értékű Poisson-tényezővel rendelkező ún. "re-entrant", kétdimenziós struktúra geometriájának megalkotására állították be, majd a kapott szerkezeten végelelem szimulációt végeztek, amit egy valós húzókísérlettel validáltak. Az eredmények alapján az algoritmus tökéletesen működött, a szimulációval és a méréssel kapott Poisson-tényező is nulla értéket mutatott. Összességében elmondható, hogy ez a típusú tervezési

eljárás komoly potenciállal rendelkezik az auxetikus anyagok fejlesztése terén.

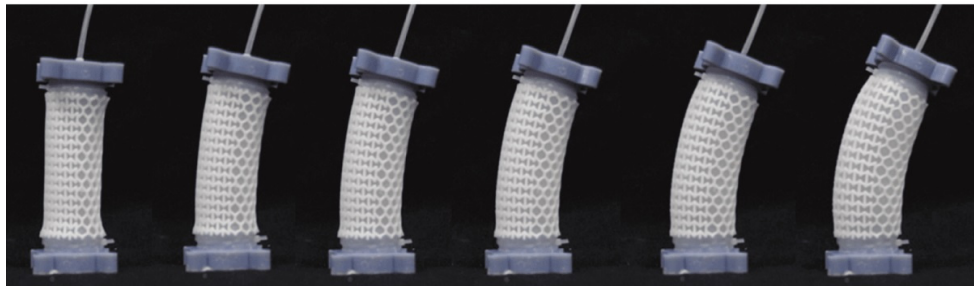
Manapság az egyik leginkább kecsegtető felhasználási formája az auxetikus anyagoknak az ún. lágy robotok területe. A robotikának ebben az ágazatában a robotok valamilyen lágy, rugalmas anyagból állnak, továbbá szabályozásuk nem egy külső, komplex vezérlővel van megvalósítva. A három, talán legelterjedtebb szabályozási forma a lágy robotok területén az elektromos tér általi, a termikus (gondolhatunk itt az alakemlékező polimerek kedvező tulajdonságainak kihasználására), valamint a nyomáskülönbségen alapuló (pneumatikus) szabályozásra. Ezek a szabályozási formák sokszor a robot mechanikai instabilitását használják ki a kívánt deformáció előidézésére, legyen szó akár kihajlásról, gyűrődésről, hullámosodásról, vagy átpattanásról. A lágy robotok figyelemre méltó lehetőségekkel rendelkeznek, többek között az orvostechikában, úrkutatásban, modern gyártósorok esetén, és általánosságban az ember-robot interakciók során. Nagy előnyük a hagyományos robotokhoz képest a tömegük, rugalmasságuk, formálhatóságuk, és az embereket tekintve biztonságosabbak fémből készült társaiknál. Az alábbiakban egy auxetikus lágy robot fejlesztését bemutató publikációt tekintek át. A szerzők egy hernyó mozgását utánzó robotot alkottak egy auxetikus váz, valamint pneumatikus szabályozás alkalmazásával [14], ami a 4. ábrán látható. Az ún. biomimetikus, azaz a természetet imitáló lágy robotok csoportja egyre nagyobb figyelmet kap, az állatok mozgása sokak számára az inspiráció forrása intelligens gépek és anyagok fejlesztésénél. Jelen kutatásban három, általánosan használt szilikon anyagból, öntéssel kreálták meg a hernyó testét, aminek a "Metarpillar" nevet adták. Az öntészeti eljárás a struktúra kétdimenziós volta miatt lehetséges. A test hat cellából épül fel, melyek belső nyomása külön-külön állítható, így létrehozható a kívánt mozgásforma, amit az szerzők izomorf, kihajlás-vezérelt deformációnak neveznek. A hernyó mozgását végül nem csak formailag, de dinamikai szempontból is sikerült lemásolni, ami annyit tesz, hogy a megfelelő beállításokkal és anyagválasztással az állat sebességét is sikerült elérni.



4. ábra. Biomimetikus lágy robot [14]

A lágy robotok egyik legfontosabb mozgásformája a valamely tengely körüli elhajlás, ezzel számos felhasználási területen implementálható alkatrészt kapunk, például mesterséges izmokhoz, protézisekhez, gyártósorok robotjainak alkatrészeihez. Tekinthezünk rá a forgási szabadságfokkal rendelkező csukló rugalmas alternatívájaként is. Ebben a tanulmányban egy hengeres belső rétegre illesztettek a henger egyik oldalán auxetikus, a másik oldalán hagyományos méhsejt szerkezetet (5. ábra). Az mechanizmus szabályozását pneumatikus aktuátorral valósítják meg, a belső tér nyomásának változtatásával. A hajlás az auxetikus rész eltérő deformációs

jellemzői miatt következik be, a mértékét a Poisson-tényező értékének beállításával, valamint a nyomáskülönbséggel lehet szabályozni. A nyomásnak kitett belső héj anyagának egy viszonylag lágy szilikont, míg a külső rácsnak egy keményebb szilikont választottak, amiket a végelem szimulációknál hiperelasztikus anyagmodellekkel modelleztek. A cél a minél nagyobb mértékű elhajlás volt, amihez a rács geometriáját, valamint a nyomást is változtatták. A szimulációs és mérési eredményeket összehasonlították, amik jó egyezést mutattak, így a végelelemes környezet alkalmasnak bizonyult a geometria optimalizálására, tesztelésére. [15]



5. ábra. Pneumatikus szabályozású lágy robot [15]

Bistabilnak tekintünk egy flexibilis mechanizmust, ha annak két stabil egyensúlyi helyzete van, tehát két olyan helyzete, ahonnan csak erővel tudjuk kimozdítani. Rafsanjani és Pasi-ni olyan bistabil auxetikus mechanizmusokat prezentálnak, amelyek struktúraszerkezetéhez ősi geometriai motívumok adták az ihletet (6. ábra). Munkájukban több különféle kétdimenziós, természetes gumilapból előállított auxetikus struktúrát vizsgáltak mérésekkel és végelelemes szimulációkkal [16]. Egytengelyű húzásos kísérleteket hajtottak végre, vizsgálták a Poisson-tényező, és a erő-elmozdulás karakterisztikákat. Előbbi felettébb szokatlan viselkedést mutat, az axiális elmozdulás növekedésével egyre növekszik, ellentétben a legtöbb eddig tárgyalt függ-vénnyel. Egyes geometriák különleges, fogazott Poisson-függvényeket produkálnak. Utolsó lépésként egy stabilitástérképet alkottak meg a szerzők, melynek segítségével könnyen kivá-laszthatjuk a bistabil viselkedés eléréséhez szükséges geometriai paraméterek méreteit, azok pozícióját. A megalkotott módszer, mechanizmus lehetséges felhasználási területei többek kö-zött a különféle kapcsolók, aktuátorok lehetnek.



6. ábra. Két stabil egyensúlyi helyzettel rendelkező, ún. bistabil struktúrák [16]

3. Struktúrák tervezése és gyártása

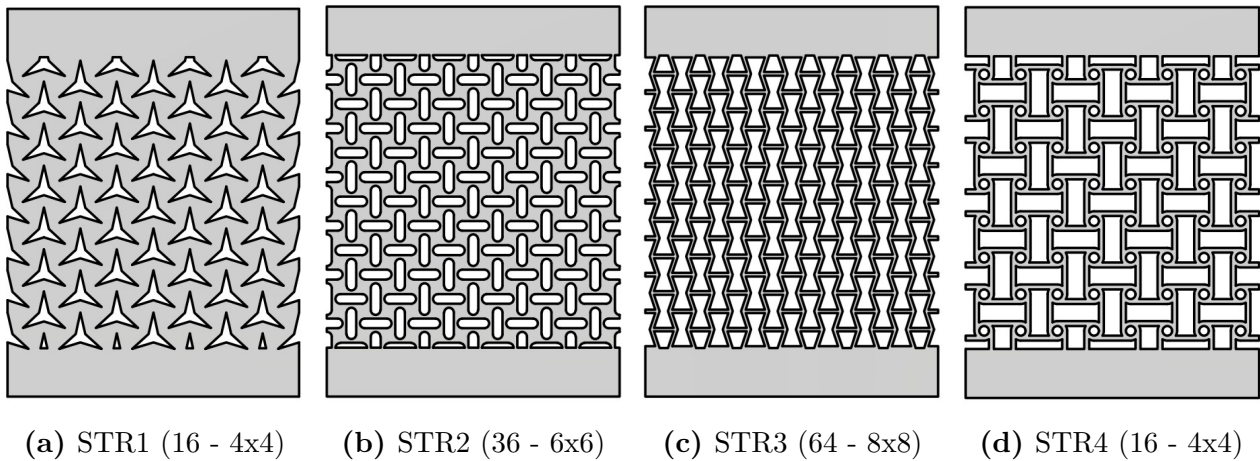
A szakirodalomban fellelhető releváns munkák áttekintése fontos lépés a témakör megértése szempontjából. Feltérképezhetőek a már vizsgált, és a még nem vizsgált területek, ami lényeges a dolgozat pozicionálása szempontjából. Munkámmal egy fejlesztési módszert kívánok megalkotni, ami elősegíti az aktuális igényeket kielégítő struktúra realizálását. Ennek első lépése a struktúrák geometriájának tervezése, majd gyártása.

3.1. Próbatetek geometriájának létrehozása

Dolgozatomban négy auxetikus struktúrát vizsgálok, melyek geometriáját az Autodesk Inventor 2023-as verziójában [17] alkottam meg. Első lépésben mechanikai szempontból jellemzem ezen geometriákat, amint azt a 2. fejezetben említettem. A dolgozatban szereplő próbatetek, ahogy az olvasó is látni fogja, sejtszerű, celluláris szerkezetűek, elemi cellákból épülnek fel. Kétdimenziós geometriával rendelkeznek, szilikon lemezekből készülnek perforációkkal, az auxetikus viselkedést ezek formája és elhelyezése adja. Elemi celláik egyformák, meghatározott sorban követik egymást, tehát a rendezett sejtszerű struktúrákhoz tartoznak. Ha anyagként tekintünk rájuk, akkor ezen elemi cellák a teljes mérethez képesti viszonylag alacsony száma miatt inhomogénnek mondanánk, emiatt a dolgozatban inkább struktúrának nevezem őket. Fontos, hogy ha kétdimenziósnak tekintjük a próbateteket, akkor van köztük izotrop és anizotrop is, ezt részletesebben az adott struktúránál fogom bemutatni.

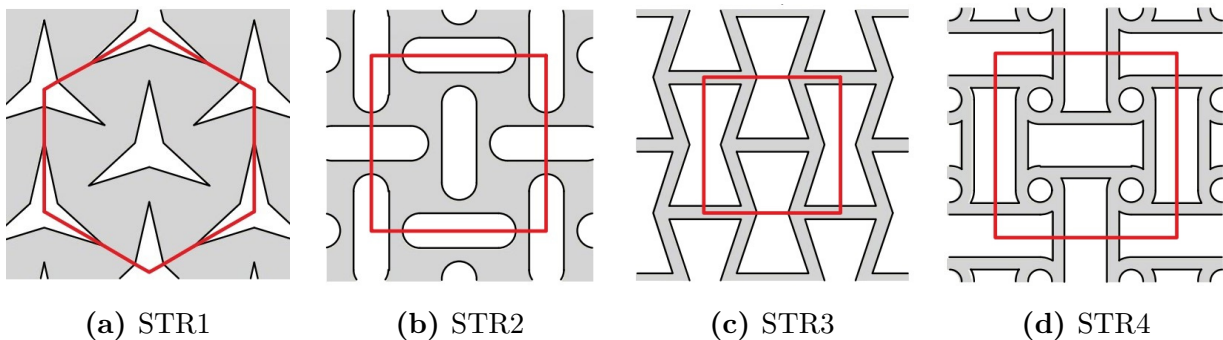
Mindegyik próbatest 120 x 90 x 2 mm-es befoglaló mérettel rendelkezik, ami később, a szakítógépre való behelyezés esetén lesz lényeges, továbbá, ugyancsak a befogás miatt a a próbatetek alsó és felső része 15 mm ráhagyással készült. Maguk a struktúrák egy 90 x 90 mm-es blokkon helyezkednek el, eltérő elemi cellaszámokkal. Az elemi cellák a 8. ábrán láthatóak. Három próbatestnél az elemi cella négyzet alakú, az első struktúra esetén hatszöget formál. Az elemi cellák száma egy auxetikus struktúra esetén fontos jellemző, ugyanis nagyban függhetnek tőle a tulajdonságai. Minél nagyobb a cellaszám, annál kevésbé érvényesülnek a peremek, befogások hatásai, továbbá egyéb, nagyrészt nemkívánatos jelenségek. Intuíciónk alapján elmondható, hogy minél sűrűbb a cellaszerkezet, annál inkább anyagszerűek a struktúrák, ebben a dolgozatban azonban viszonylag alacsony cellaszámú próbateteket hoztam létre, többek között a későbbi végelelem vizsgálatok számításigényének optimális szinten tartása érdekében. Az elemi cellák száma és kiosztásuk a próbatetek esetén a 7. ábrán látható. Ez a négy különböző struktúra az előzetes vizsgálatok és a szakirodalom elemzése alapján merőben eltérő viselkedést mutathat, így a későbbi lehetséges felhasználás során szélesebb tartományt fedhetnek le, ezért esett rájuk a választásom.

Amint az olvasó is láthatja, az első két struktúra bizonyos feltételeket tekintve külön osztályba sorolható a második két struktúrához képest, ez pedig a kivágások jellege. A 8. ábra első két szerkezetét mondhatjuk ténylegesen perforáltként, az alsó kettőt pedig tekinthetjük rácsos



7. ábra. A négy próbatest CAD modellje

kialakításúnak, ugyanis az ezeket alkotó rácsvonalak állandó vastagságúak. A dolgozat metódusa szempontjából nem lényeges megkülönböztetni a két csoportot, ezért a továbbiakban nem is vizsgálom a struktúrákat ebből a szempontból, egyes alkalmazásoknál azonban lényeges a két típus közötti különbség megvalósíthatóság tekintetében, ez is az egyik oka hogy mindkét kategóriából hoztam példákat.

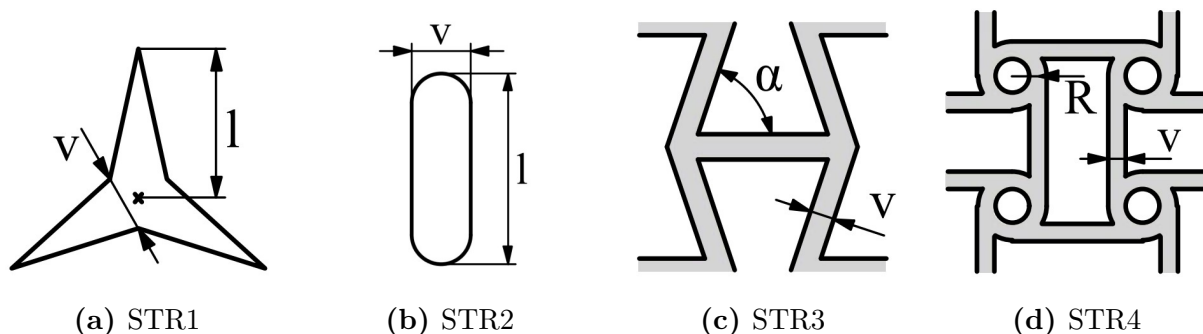


8. ábra. A struktúrák elemi cellái, pirossal jelölve

Egy másik csoportosítási lehetőség az izotrópia szerinti besorolás. Ha szemügyre vesszük a próbatestek belső szegmensét, akkor láthatjuk, hogy a második és a negyedik esetén a függőleges és a vízszintes irány egyenértékű, a tulajdonságoknak ezekben az irányokban egyezniük kell. Ezt felfoghatjuk úgy is, hogy húzás esetén a két irányban ugyanazt a képet kapjuk az anyagról. Ugyanez az első és a harmadik próbatestről nem mondható el, ha derékszögben elforgatnánk a kivágott részt, más lenne a Poisson-függvény, és valószínűleg a szakítógéppel kifejtett erő is. Ezt a tényezőt is figyelembe kell venni a megvalósítás során.

A struktúrák geometriája az elemi cellákra épül. Ezen egységek felépítése természetesen megannyi geometriai elem, méret, és kényszer összessége, ennek ellenére mindegyik esetén két meghatározó paraméter változtatásával jól lehet befolyásolni a rendszer jellemzőit. Az alábbiakban szavakkal, valamint a 9. ábrán az elemi cellákon jelölve láthatja ezeket az olvasó.

- **STR1:** A csillag alakú kivágás szárának hossza, szélessége
- **STR2:** A lóversenypálya alakú kivágás hossza, szélessége
- **STR3:** A rácsvonalak vastagsága, és egymáshoz képesti szöge
- **STR4:** A rácsvonalak közti kör sugara, a rácsvonalak vastagsága



9. ábra. Az elemi cellák fő paramétereit

3.2. Próbatestek gyártása

A próbatestek geometriájának modellezése utáni első lépés a megtervezett mintadarabok gyártása. A 2. fejezetben látható volt, hogy a tanulmányok nagy részében additív gyártástechnológiát alkalmaztak a kutatók. Ez a módszer a háromdimenziós struktúrával rendelkező daraboknál szinte az egyedüli lehetőség, és természetesen alkalmazható kétdimenziós esetben is, utóbbinál azonban igénybe vehetünk egyéb technológiákat is. Az anyagleválasztó, vagy anyagszétválasztó megmunkálási technológiák alapvetően két csoportba sorolhatóak. Az első a hagyományos, forgácsolási eljárások, itt a szerszámnak alapvetően keményebbnek kell lennie a munkadarabnál, ezen az elven megy végbe az anyagleválasztás. Léteznek ún. különleges megmunkálási technológiák is, amiket a megmunkálandó anyagok fejlődése hívott életre. Ilyenek például a különféle sugaras módszerek, melyek többféle energiafajtát használnak működésük során, közös jellemzőjük, hogy a munkadarabbal nem érintkezik szerszám. Ezek közül a legismertebb az abrazív vízsugaras technológia, ami egy nagy nyomású vízsugár és abrazív részecskék keverékét használva választja szét az adott anyagot. Ide sorolhatjuk még többek között az elektronsugaras, plazmasugaras, és lézersugaras megmunkálásokat is.

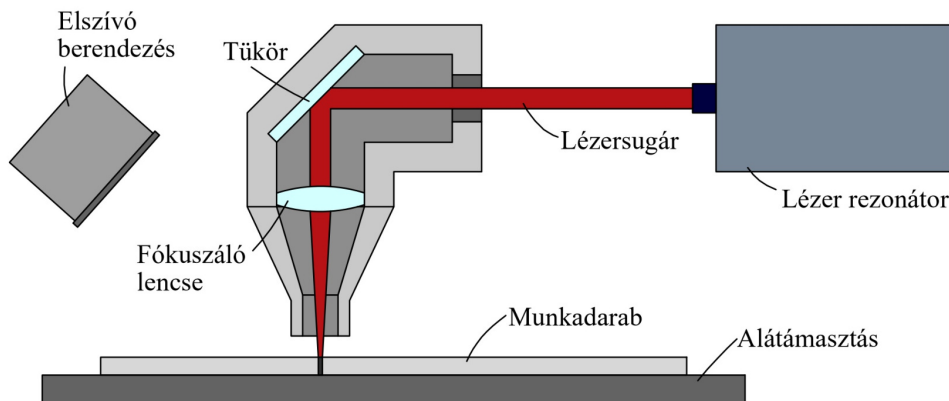
3.2.1. Lézervágó gépek

Dolgozatomban egy lézervágó gépet használtam a próbatestek előállítására. A lézervágás egy automatizált, termikus anyagszétválasztási eljárás [18]. A vágáshoz szükséges hőt a lézersugár biztosítja, a nyaláb megfelelő helyre pozicionálását pedig legtöbbször CNC végzi. A lézer egy indukált emisszió alapuló, nagy energiasűrűségű, koncentrált fénysugár, ami legtöbbször a

látható fény tartományába eső frekvenciájú sugarakat használ [19]. A lézervágó technológiákat az anyagok különbözősége miatt három csoportba oszthatjuk:

- **Oxidációs vágás:** Az vágandó részre nagy tisztaságú oxigént fújnak, majd az anyagot gyulladáspontig hevítik. Ötvözetlen és gyengén ötvözött acélok esetén használt.
- **Olvasztó vágás:** Az anyagot olvadáspontig hevítik, majd a megolvadt anyagrészeket semleges gáz (legtöbbször nitrogén) segítségével, nagy nyomáson kifújják. Alumínium, titán, magnézium vágása esetén használt.
- **Szublímációs vágás:** Ennek során a lézersugár az anyagot a szublímációs hőmérsékletére hevíti, azaz szilárdból egyből gáz halmazállapotúvá válik. Olvadásponttal nem rendelkező anyagok esetén használt, ilyenek egyes műanyagok, a fa, kerámia, papír.

Működésük során a berendezés belsejében elhelyezkedő üvegcsőben gerjesztenek egy nagy tisztaságú gázkeveréket. Az így keletkezett fénysugarat tükrökön keresztül juttatják a vágófejhez, majd különleges lencsékkel egy nagyon kis területre fókuszálják, így nagy energiasűrűséget elérve. Előnyei a gyorsaság, pontosság, továbbá a viszonylag kis hőhatásterület, ami a munkadarab anyagának megmunkálás utáni minősége miatt fontos. Ebben a dolgozatban is főként ezen jellemzők miatt esett a lézervágás technológiájára a választás. A struktúrák viszonylag kis mérete és részletessége miatt van szükség a lézervágó pontosságára, a szilikon anyagtulajdonságainak minél hatékonyabb megőrzése érdekében pedig a kis hőhatásterületre. Egy ilyen lézervágó berendezés sematikus rajza a 10. ábrán látható.



10. ábra. Lézervágó gép működésének szemléltetése

3.2.2. Beállítások, megvalósítás

Ebben a munkában az ALFA LCE-2 (9060) modellnevű lézervágó és gravírozó berendezést használtam [20]. Ez egy kifejezetten nem-fémes anyagok megmunkálására tervezett 900 x 600 mm munkaterű eszköz, teljesítménye 80-100 W. Rezonátorgáza szén-dioxid, vízhűtéses, vágási

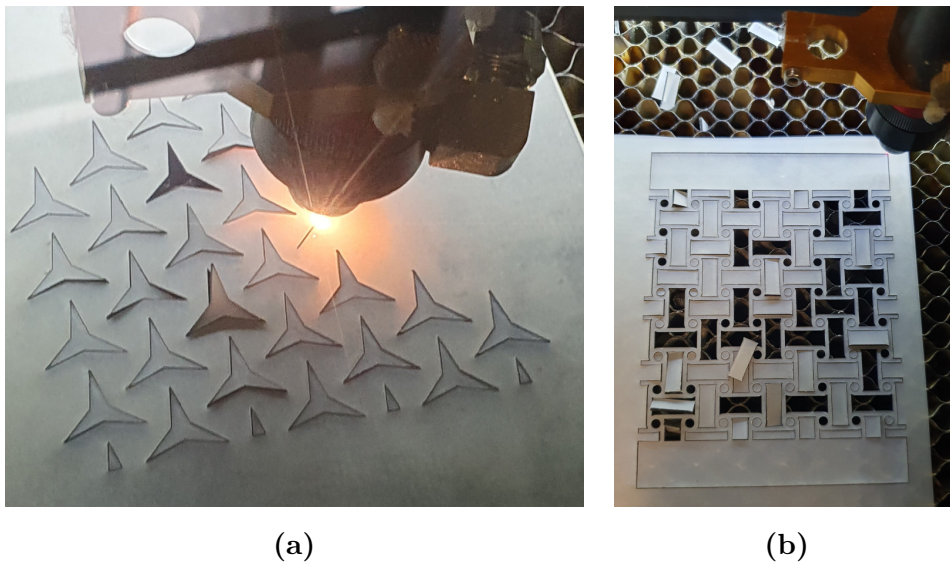
sebessége 0 és 24 000 mm/perc között állítható. Vezérléséről egy DPS rendszer gondolkodik, a működés során keletkezett füst elszívását pedig egy centrifugál ventilátor végzi.

A geometriákat (.dxf) kiterjesztésű fájlként importáltam a berendezés vezérlőegységébe. A két fő állítható paraméter a vágási sebesség, és a teljesítmény (százalékosan megadva), az elkészült munkadarab minősége nagyban függ ezek értékétől. A cél a hőmérséklet hatásának minél hatékonyabb csökkentése mellett a kapott vágási élek magas minősége, és a pontosság volt.

Az optimális beállítások néhány iteráció után a következőre adódtak:

- **Vágási sebesség:** 20 mm/s
- **Minimum teljesítmény:** A berendezés maximális teljesítményének 30 %-a
- **Maximum teljesítmény:** A berendezés maximális teljesítményének 50 %-a

A 11. ábrán látható a gép működés közben, továbbá az egyik munkadarab elkészültekor. A technológia további előnye, hogy gyártás után minimális utómunkát igényel, ami a kivágott részek eltávolításában, valamint a darabok letakarításában merül ki. Összességében elmondható, hogy ezzel az anyagszétválasztási technológiával a dolgozat során alkalmazott szilikon alapanyag, és a kétdimenziós struktúrák esetében megfelelően pontos, magas minőségű próbatesteket lehetett létrehozni, viszonylag gyorsan és egyszerűen.



11. ábra. A próbatestek gyártása lézervágó géppel (a), valamint egy elkészült darab (b)

4. Hiperelasztikus anyagmodell illesztése

Az alapanyagként használt szilikon mechanikai viselkedésének modellezése lényeges eleme a dolgozatnak, főként a későbbi végeselem vizsgálatok szempontjából, ahol a mérési eredmények minél precízebb lekövetése érdekében megfelelő anyagmodellt kell alkalmaznunk.

4.1. Hiperelasztikus anyagok

Az kontinuummechanikában elasztikusnak nevezzük az anyagoknak (testeknek) azon képességét, hogy a terhelés hatására bekövetkezett deformáció a terhelés elvételével megszűnik, azaz a test visszanyeri eredeti alakját. Az egyszerű, lineárisan rugalmas modellel ellentétben, ahol a feszültség-alakváltozás függvény egy adott merekségű egyenes, a hiperelasztikus anyagmodell esetén ez egy nemlineáris görbe. Definíció szerint ez egy olyan konstitutív modell, melynek jellemzője, hogy a feszültség-alakváltozás kapcsolat egy ún. alakváltozási energiasűrűség függvényből képezhető. További jellemzője, hogy csak a végső alak számít, az út amin a test eljutott odáig nincs hatással az eredményekre [21]. Nagy alakváltozásoknál, általános esetben a 2. Piola-Kirchhoff feszültségtenzor a következő formát veszi fel:

$$\mathbf{S} = \frac{\partial W}{\partial \mathbf{E}}, \quad (1)$$

ahol W az alakváltozási energia sűrűségfüggvénye, ami a alakváltozási tenzor, valamint az anyagparaméterek függvénye, \mathbf{E} pedig a Green-Lagrange-féle alakváltozási tenzor. Fontos megjegyezni, hogy különféle feszültségi és alakváltozási tenzorok használhatóak. A kérdés esetünkben hogy hogyan képezzük W -t.

Hiperelasztikus anyagmodelleket legtöbbször gumi-szerű anyagok viselkedésének modellezésére használunk. Ebben a dolgozatban a próbatestek alapanyaga egy általános szilikon gumi, tehát ebbe a kategóriába tartozik. Az ilyen anyagokat homogénnek, izotropnak, és ami nagyon fontos, összenyomhatatlannak tekintjük. Ha az anyag izotrop, akkor W is izotrop lesz, azaz irányfüggetlen. Ebben az esetben W az aktuális alakváltozási vagy deformációs tenzor (jelen esetben a jobboldali Cauchy-Green-féle deformációs tenzor) skalár invariánsainak segítségével képezhető:

$$W = W(I_1, I_2, I_3). \quad (2)$$

A második Piola-Kirchhoff-féle feszültségtenzor végső alakja izotrop esetben a következő:

$$\mathbf{S} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\lambda_i} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} (\mathbf{N}_i \otimes \mathbf{N}_i), \quad (3)$$

ahol \mathbf{N}_i a jobboldali Cauchy-Green-féle deformációs tenzor normált sajátvektorai, míg λ_i ugyan ezen tenzor sajátértékeinek négyzetgyökei. A Cauchy-féle feszültségtenzor is hasonló formában írható fel, a különbség az deformációs tenzorhoz kapcsolódó mennyiségekben van, itt az előző inverzét, a baloldali Cauchy-Green-féle deformációs tenzort használjuk. Ez egy Euler-féle

rendszerben felírt tenzor, azaz a pillanatnyi és nem a kezdeti konfigurációban értelmezett.

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\lambda_i} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} (\mathbf{n}_i \otimes \mathbf{n}_i). \quad (4)$$

Az összenyomhatatlanság a térfogatarány egységnyi értékét jelenti ($J = 1$), vagy másként fogalmazva a kezdeti Poisson-tényező 0,5-tel egyenlő. Izotrop, összenyomhatatlan esetben a feszültségtenzort felbonthatjuk deviátoros és hidrosztatikus részekre, analitikus formája rövid levezetés után az alábbi:

$$\boldsymbol{\sigma} = \text{dev} \left[\sum_{i=1}^2 \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} (\mathbf{n}_i \otimes \mathbf{n}_i) \right] + \mathbf{p}, \quad (5)$$

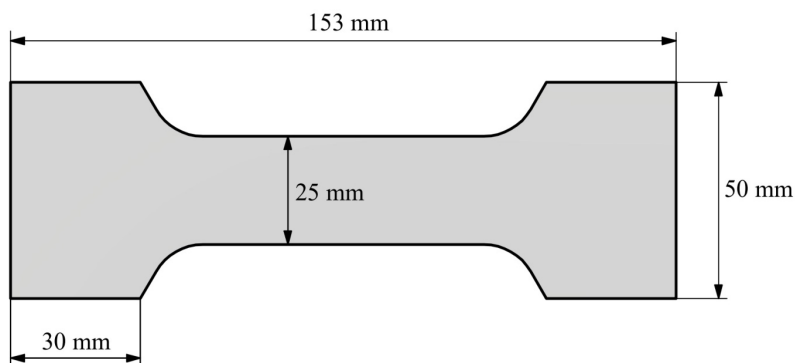
ahol \mathbf{p} a hidrosztatikus rész, amit konstitutív szinten nem tudunk meghatározni, ehhez megfelelő peremfeltételekre van szükség. Számos elérhető hiperelasztikus modell létezik, amik közül nincsenek kifejezetten jók vagy kevésbé jók, továbbá elmondható, hogy legtöbbször egy anyag viselkedésének lekötésére több modell is kielégítően alkalmas. Ebben a dolgozatban egy harmadrendű, Ogden-féle modellt alkalmaztam, amit bővebben a 4.3. fejezetben fogok bemutatni.

4.2. Egytengelyű húzóvizsgálat

A modell paramétereinek későbbi meghatározásához, illesztéséhez szükségünk van mérési eredményekre a valós anyagról. Hiperelasztikus anyagok esetén három homogén deformációs típusból, az egytengelyű húzásból, kéttengelyű húzásból, és a síkbeli húzásból (ez mérsékelt nyúlásoknál jóformán megegyezik a tiszta nyíró igénybevétellel) származó eredményeket lenne optimális használni, az anyagok terheléstől függő viselkedése miatt. A modellek paramétereit aztán a kapott görbék szimultán figyelembevételével adódnának. A dolgozat keretei között egytengelyű kísérletek elvégzésére volt lehetőség, így közvetlenül az első deformációs típust tudtam hasznosítani, azonban a precízebb illesztés érdekében, mint azt az olvasó is látni fogja, egy virtuális kéttengelyű adatsort is létrehoztam, ezt is alkalmaztam.

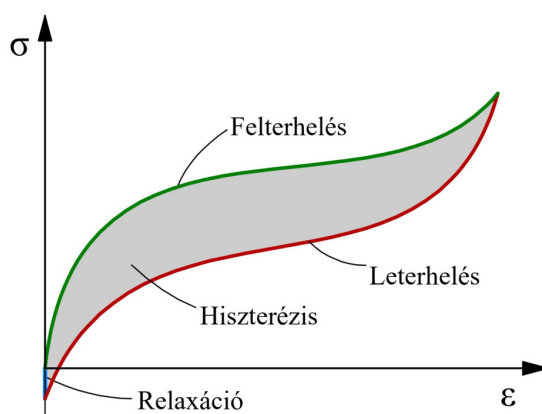
Az egytengelyű húzóvizsgálat elvégzésére tehát mindenképpen szükség van. Ehhez egy egytengelyű, Instron 3345 Univerzális mechanikai anyagvizsgáló berendezést, szakítógépet vettem igénybe, melynek felső terhelési határa 5 kN, függőleges lökethossza pedig 1123 mm [22]. A próbatest, amin a méréseket végeztem hasonló szilikon lapból lett kialakítva, mint az auxetikus struktúrák (annyi különbséggel, hogy ennek vastagsága 1 mm), szintén a lézervágó géppel, a 3.2.2. fejezetben megadott beállításokkal. Méretei a 12. ábrán láthatóak.

Egytengelyű húzókérdés esetén a próbatest két végét befogjuk a berendezés erre megfelelő részébe, majd a gép felső részét elkezdjük mozgatni meghatározott sebességgel, mérve és folytonosan ábrázolva az elmozdulást, és az ehhez szükséges, berendezés által kifejtett erőt. A cél kvázisztatikus mérések elvégzése, ami a viszkoelasztikus hatások kiküszöbölése miatt lényeges. Ez az anyag deformációs sebességtől függő tulajdonsága, ami egy hiszterézist ad a feszültség-alakváltozás görbéhez. Leterhelés után végtelenül hosszú idő elteltével elméletben a függvény visszatér a kiindulópontba, tehát maradó alakváltozás (plasztikus hatás) nincs, viszont a görbe



12. ábra. A dolgozatban a húzókísérlethez használt próbatest

leterhelési szakasza ebben az esetben nem egyezik meg a felterheléshez kapcsolódóval, így hő formájában energia disszipálódik, az anyagtulajdonságok megváltoznak, ami esetünkben mindenképpen elkerülendő (13. ábra).



13. ábra. A viszkoelasztikus hatás szemléltetése

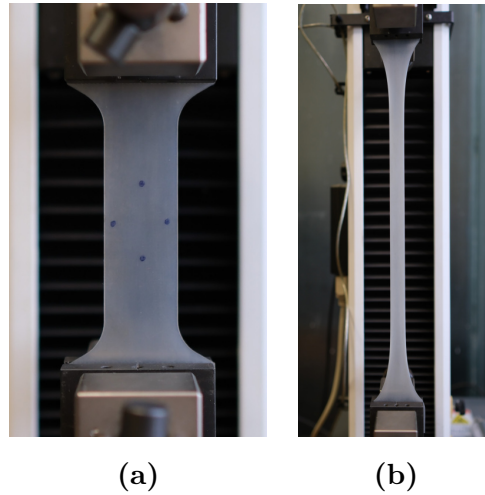
Ezen hatás vizsgálatára számos módszer létezik, munkámban közvetett módon vettem figyelembe. Három próbatesten végeztem méréseket, különböző húzási sebességekkel. A berendezés beállításai az egyes méréseknél az alábbi táblázatban láthatóak.

1. táblázat. A mérések beállításai

Mennyiség	L_0	v	$\dot{\epsilon}$	t_{mv}
Mértékegység	mm	mm/perc	1/s	ms
1. Próbatest	93	558	0,1	10
2. Próbatest	93	55,8	0,01	10
3. Próbatest	93	5,58	0,001	100

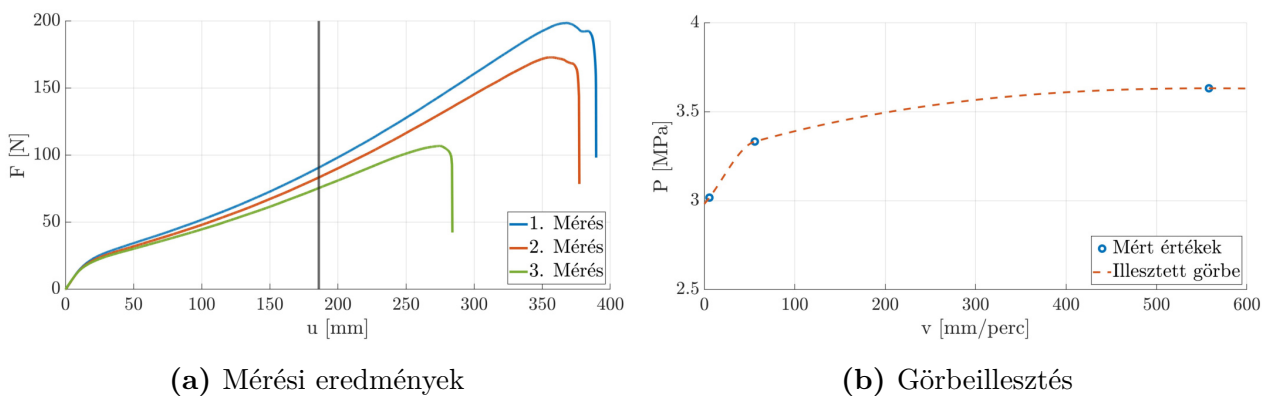
A darabok kezdeti hosszai megegyeznek. Ez a próbatest szabad, azaz a szakítógéppel által nem befogott hossza, a későbbiekben is ezt a hosszt használom a számításoknál. A húzás sebessége az alakváltozási sebességből lett számolva, utóbbit vettem alapnak. Látható, hogy az egyes mérések között az adott értékekben tízszeres különbségek vannak. Az utolsó jellemző

paraméter a mintavételezési idő, ami a mérési pontok számát befolyásolja. A mérésekről készült képek a 14. ábrán láthatóak.



14. ábra. Egytengelyű húzó kísérlet az anyagmodell illesztéshez

A mérés során az anyagot nagy mértékben húzzuk, ahogy az a 14. ábrán is látható. Ennek eredményeképpen mindhárom próbatest esetében több, mint négyszeres megnyúlások jelentkeztek. A viszkoelasztikus hatás kiküszöbölésére választott módszer a következő: a 15. ábra szerint a kapott erő-elmozdulás függvények egy meghatározott pontján (itt ezt $u = 180$ mm-re, azaz $\varepsilon = 2$ -re választottam meg) veszem a különböző mérésekből származó erőértékeket, majd a kezdeti keresztmetszet területével mérnöki feszültséget számolok, és ábrázolom a pontokat a húzás sebességének függvényében.

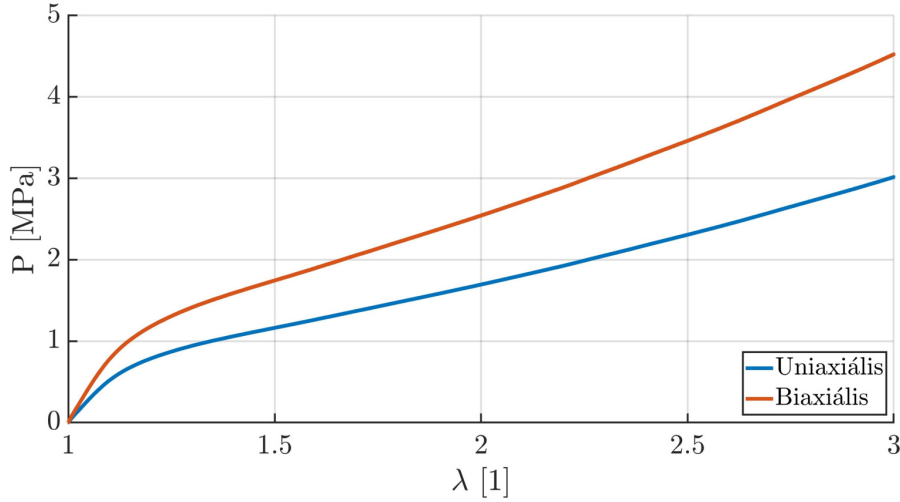


15. ábra. A viszkoelasztikus hatás figyelembevétele

Az illesztett görbén látható, hogy a végtelenül lassú, azaz $v = 0$ m/s-hoz tartozó feszültségérték ($P_0 = 2,98$ MPa) szinte teljesen megegyezik a harmadik mérés során kapott értékkel ($P_3 = 3,01$ MPa), ezért a továbbiakban ezt az adatsort tekintem mérvadónak. Tönkremeneteli modellt nem alkalmazok, hatását nem veszem figyelembe, az illesztést a tönkremenetel előtti pillanatig meglévő adatokra végzem el.

4.3. Anyagmodell illesztés

Az egytengelyű húzókísérlet eredménye szolgált tehát alapként az anyagmodell megalkotására, az anyagtulajdonságok minőségibb imitálása érdekében azonban egy ún. virtuális kéttengelyű adatsort is készítettem (16. ábra). Ezt az egytengelyű adatok konstanssal való felszorozásával (1,5-szörös) értem el, ami annak ellenére, hogy a kapcsolat valamilyen függvény, nem egy konstans, a szakirodalomban fellelhető mérési adatok alapján jó közelítés [23].



16. ábra. A mérés eredményei

A fenti diagram a mérnöki feszültséget ábrázolja az axiális nyúlás függvényében. Ezeket a következőképpen kaptam meg:

$$\lambda = \frac{L}{L_0}, \quad (6)$$

$$P = \frac{F}{A_0}, \quad (7)$$

ahol $L_0 = 93$ mm a próbatest kezdeti hossza, $A_0 = 25$ mm² pedig a középső szakasz kezdeti keresztmetszetének területe. Dolgozatomban a Matlab R2022a verziójában [24], majd egyfajta ellenőrzésképpen a Simulia Abaqus 2022 beépített modulját használva végeztem el az illesztést. A következőkben a saját, Matlab-ban alkalmazott módszert fogom bemutatni. A harmadrendű, inkompresszibilis, Ogden-féle hiperelasztikus modell eredeti energiasűrűség függvénye a következő formában áll:

$$W = \sum_{k=1}^3 \frac{2\mu_k}{\alpha_k^2} (\lambda_1^{\alpha_k} + \lambda_2^{\alpha_k} + \lambda_3^{\alpha_k} - 3). \quad (8)$$

A meghatározandó anyagparaméterek μ_k és α_k , ezáltal összességében ez egy hat paraméterből felépülő konstitutív modell. Mindemellett, λ_1 , λ_2 és λ_3 a főnyúlások. Ez egy, a legtöbb hiperelasztikus modellhez hasonló ún. fenomenologikus modell, magyarán nem analitikus levezetéssel, axiómákból, hanem megfigyelések alapján került kialakításra. Az általános függvényből levezethetőek zárt képletek az egyes terhelési esetekre, a mérnöki feszültségre vonatkozóan. Ezek

rövid levezetés után a következő formát veszik fel:

$$P_U^{Ogden} = \sum_{k=1}^3 \frac{2\mu_k}{\alpha_k} (\lambda^{\alpha_k-1} - \lambda^{-\alpha_k/2-1}), \quad (9)$$

$$P_B^{Ogden} = \sum_{k=1}^3 \frac{2\mu_k}{\alpha_k} (\lambda^{\alpha_k-1} - \lambda^{-2\alpha_k-1}). \quad (10)$$

P_U^{Ogden} az egytengelyű terheléshez, míg P_B^{Ogden} a kéttengelyű terheléshez kapcsolódó mérnöki feszültség, a többi paraméter pedig megegyezik a pár sorral feljebbiekkel (λ : axiális nyúlás).

Az anyagparaméterek illesztése egy hibafüggvény segítségével történik, a fenti összefüggések implementálásával. Ebben a dolgozatban az ún. RMS ("Root Mean Squared") relatív hibát alkalmaztam, ami a modell előrejelzése, és a mérési pontok közötti átlagos eltérés a mérési pontok kiterjedésével normálva. Ennek általános formája kifejezhető az egytengelyű, továbbá a kéttengelyű esetre is, ezek a következők:

$$Q_U = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_U^{exp} - P_U^{Ogden}}{P_U^{exp}} \right)^2}, \quad (11)$$

$$Q_B = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_B^{exp} - P_B^{Ogden}}{P_B^{exp}} \right)^2}, \quad (12)$$

ahol P_U^{exp} a mérésből származó értékek, P_U^{Ogden} pedig a számított függvény ugyanezen helyen felvett értéke uniaxiális esetben. Kéttengelyű (biaxiális) esetben hasonlóan formálódnak feszültségek. Ezután a két terhelési formára vonatkozó összefüggések átlagát vettem, ezt használtam a továbbiakban a terhelési esetekre vonatkozó szimultán illesztéshez:

$$Q = \frac{Q_U + Q_B}{2}. \quad (13)$$

Az illesztés során a cél ezen hibafüggvény globális minimumának megtalálása, azaz a valós és a számolt értékek közötti hiba minimalizálása, a paraméterek értékének iteratív változtatásával. Erre különböző algoritmusok állnak rendelkezésre, én a Matlab beépített "fminsearch" függvényét használtam, ami egy Nelder-Mead féle szimplex (egy matematikai objektum) algoritmust használ a globális minimum keresésére [25]. Ez egy ún. direkt keresőmódszer, nem használ analitikus vagy numerikus gradienseket, lényegében végigpásztázza az alapvető lehetséges megoldásokat, amíg meg nem találja az optimálisat, ha az létezik. Ezt egy $n+1$ pontból álló szimplex segítségével teszi meg a keresett n dimenziós vektorok esetén. Az algoritmusnak az optimalizáció elindításához szüksége van kezdeti értékekre, ebben az esetben az összes paramétert egységnyi kezdeti értékkel láttam el. Ezen túl a függvény kiértékelésének értékére az alapértelmezettnél nagyobb számot adtam meg (5000), továbbá a maximum iterációs számot is az alapértelmezettnél jóval nagyobbra, 10000-re választottam. Az program ezután az éppen aktuális Q értékeket az iteráció függvényében ábrázolva keresi a minimum pontot, végül pedig megadja a helyét (a paramétereket értékét), valamint értékét (a hibafüggvény minimális értékét).

4.4. Eredmények

Fontos megjegyezni, hogy az illesztést $\lambda = 3$ -ig végeztem, mivel a dolgozat szempontjából ez a tartomány releváns. A paraméterek optimális értékét végül hozzávetőleg 1000 db iteráció után találta meg az algoritmus. A szimultán illesztés során a hibafüggvények átlaga, valamint az ebből visszaszámított egytengelyű és kéttengelyű hibafüggvények minimuma százalékos formában alább látható.

2. táblázat. A hibafüggvények minimum értékei

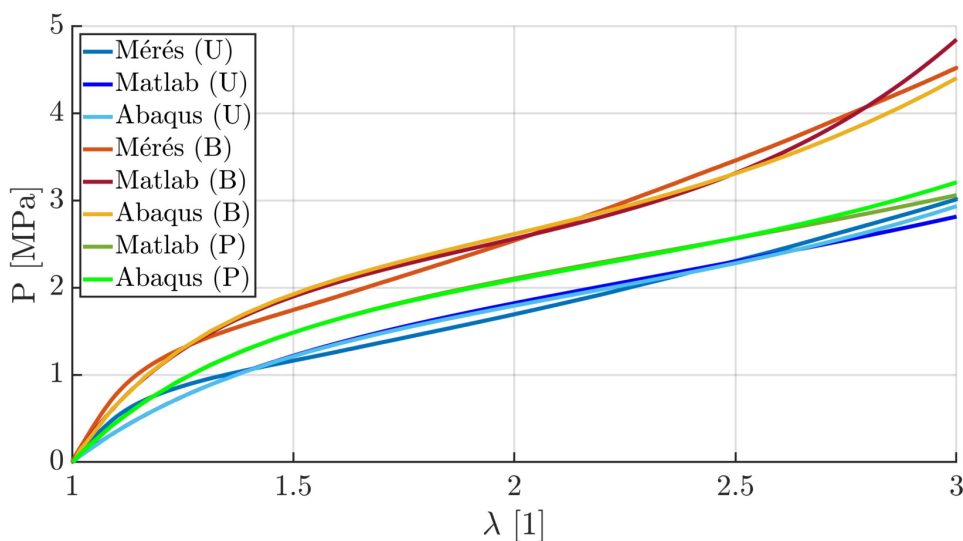
Hibafüggvény	Q	Q_U	Q_B
Érték	9,13 %	11,74 %	6,52 %

Az Abaqus-ban végzett illesztés során csupán a mérési adatokat, és a használandó modell jellemzőit kell megadni. A saját Matlab kódból, valamint az Abaqus beépített illesztőjéből kapott paraméter értékek az alábbi táblázatban láthatóak.

3. táblázat. Az illesztés során kapott paraméterek

Paraméter	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3
Mértékegység	MPa	MPa	MPa	1	1	1
Matlab	0,0023	0,0608	1,2505	-3,7694	0.8823	4.1153
Abaqus	0,1269	0,2141	1,2893	-2.3562	0.9661	5.8141

A mérés során kapott, valamint az illesztett paraméterekkel felépülő modellek görbéi a 17. ábrán láthatóak. Megfigyelhetjük, hogy a Matlab-ban kapott függvények szinte teljesen megegyeznek az Abaqus-ban kapottakkal, és mindkettő jól illeszkedik a mérési pontokra, így összességében elmondható, hogy megfelelő konstitutív modellt sikerült alkotni.



17. ábra. Az anyagmodell illesztés eredménye, az illesztett görbék

5. Mérés

A dolgozat fő eleme az auxetikus struktúrák mechanikai szempontból történő vizsgálata, amin jelen esetben a merevségüket (erő-elmozdulás görbék) és az alakjuk megváltozását (Poisson-tényező függvények) értjük. Ezeket a jellemzőket valós mérésekkel, és numerikus, végelem szimulációkkal is vizsgáltam. Ebben a fejezetben a struktúrákon végzett méréseket mutatom be.

5.1. Mérési környezet

A 3. fejezetben látottak szerint megtervezett és legyártott próbatesteken egytengelyű húzókísérleteket végeztem, a 4.2. fejezetben ismertetett berendezéssel. A szakítógép alapvető beállításai megegyeztek az anyagmodell megalkotásához szükséges teszt beállításával, annyi különbséggel, hogy itt minden struktúra esetén azonos mértékű elmozdulást eszközöltem.

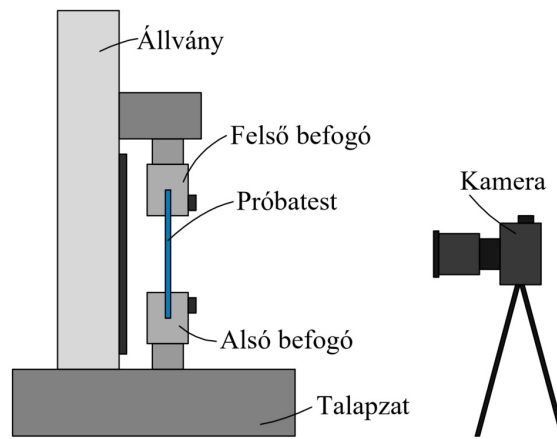
4. táblázat. Az auxetikus próbatesteken végzett mérések beállításai

Mennyiség	L_0	ΔL	v	ε	t_{mv}
Mértékegység	mm	mm	mm/perc	1	ms
Érték	90	100	5,58	0,001	100

A berendezés felső, mozgó befogásának emelési sebességét (v) a 4.2. fejezet szerinti legalacsonyabb értékben határoztam meg, a kvázistatikus mérés, így a dinamikus hatások minél hatékonyabb kiküszöbölése érdekében. ΔL a maximális elmozdulást, t_{mv} pedig a mintavételezési időt jelöli. Az auxetikus struktúrák lehetséges felhasználási formái számára releváns nyúlások megközelítőleg a $\lambda = 1,5 \dots 2$ tartományra esnek, ezért választottam elmozdulásnak a táblázatban szereplő értéket. A mintavételezési idő a mérési pontok optimális száma szempontjából meghatározó, figyelni kell arra is, hogy a görbék folytonossága érdekében legyen elég, a kezelhetőség érdekében viszont ne legyen indokolatlanul sok mérési pont. A 100 ms-os érték másodpercenként 10 pontot jelent, azaz egy körülbelül két perces mérés során 1200 pontot kapunk, ami minden igényt kielégít. Az adatok kinyerése a kiértékeléshez a következőképpen zajlott:

- **Az erő-elmozdulás függvényekhez:** az anyagvizsgáló berendezés beépített erőmérő cellájának értékei, és a megadott, vezérelt elmozdulás értékek minden pontban közvetlenül exportálhatóak.
- **A Poisson-tényező függvényekhez:** a mérések videófelvételen kerültek rögzítésre, majd ezek egy speciális mozgáskövető szoftverben lettek kiértékelve.

A mérési környezet, a méréshez használt eszközök és berendezések a 18. ábrán láthatóak.



18. ábra. Mérési elrendezés

A méréshez használt univerzális anyagvizsgáló berendezésről részletesebben a 4.2. fejezetben írtam. A Poisson-függvények meghatározásához szükséges videófelvevételekhez egy Fujifilm X-H2 típusú, 8K felbontású digitális kamerát használtam, Fujinon Lens XF16-80mmF4 R OIS típusú lencsével felszerelve, melynek minimális fókusztávolsága 35 cm. A kamera tényleges videó felbontása 7680 x 4320 pixel, ami a mozgáskövető szoftver pontossága aspektusában központi kérdés.

Figyelni kellett továbbá a mérési elrendezés pontos beállítására. Ilyen a próbatest precíz befogása, amin a pofák közötti határozott megszorítást, valamint a megfelelően egyenes, se nem előfeszített, se nem túl laza befogást értem. A kamera konfigurációja is fontos szereppel bír a pontosságban, lényeges hogy a lencséje derékszöget zárjon be a próbatesttel mind függőleges, mind vízszintes irányban, továbbá a megfelelő fókusztávolság is elengedhetetlen.

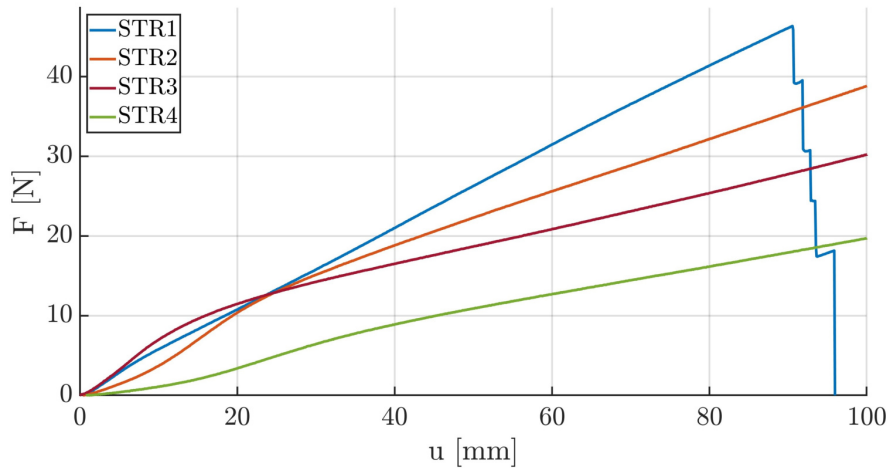
5.2. Mérés kiértékelés

A struktúrákon egy-egy mérést végeztem, melyeket alapvetően Matlab-ban értékeltem ki. Ezt, valamint a nyers adatok nagy részén szükséges preprocesszálást az alábbiakban mutatom be.

5.2.1. Erő-elmozdulás (Mérés)

A vizsgált karakterisztikák közül az első a próbatestek húzásához szükséges erő az elmozdulás függvényében, ami a struktúrák merevségét jellemzi. Munkámban leginkább ezek jellegére, a numerikus értékeikre csak másodsorban vagyok kíváncsi. Az említett függvényeket a szakítógéphez tartozó szoftverből Microsoft Excel [26] fájlként lehetséges exportálni, ezeket az adatsorokat Matlab-ba importálva, és ábrázolva kapjuk a 19. ábrán látható diagramot.

Első pillantásra hasonlóknak tűnhetnek a görbék, azonban lényeges különbségek is megfigyelhetőek közöttük. A legmerevebb struktúra az első, viszont megközelítőleg $\lambda=1$ -nél tönkremenetel következik be, a próbatest elszakad. Ezen túl érdekes, hogy az ehhez tartozó függvény szinte teljesen lineáris, ami értékes tulajdonság lehet a későbbi felhasználások esetén. A második és



19. ábra. Erő-elmozdulás függvények

a negyedik struktúra egymáshoz hasonló viselkedést mutat, kezdetben progresszív, majd degresszív, végül lineáris a jellegük. A harmadik próbatest esetén a progresszív szakasz szinte teljesen kimarad, gyakorlati szempontból inkább egy lineáris résszel kezdődik, a továbbiakban viszont hasonló a jellege az előbbiekhöz.

5.2.2. Poisson-függvény (Mérés)

Ebben a fejezet részben a próbatestek Poisson-tényezője és az axiális, logaritmikus alakváltozás kapcsolatának meghatározását mutatom be. Az előzőekkel ellentétben ez egy többlépéses folyamat, melynek első eleme a mérések videón történő rögzítése volt. A videók a meghatározott elmozdulás és húzási sebesség értékekből következően körülbelül két percesek lettek. Kiértékelésüket az ún. Motion Tracker Beta [27] szoftverben végeztem, ami egy ingyenesen elérhető, nyílt forráskódú "motion-tracking" program, grafikus felhasználói felülettel (GUI). Az utóbbi években, az optikai eszközök folyamatos fejlődésével és árak csökkenésével egyre elterjedtebbek a dedikált szenzorok helyett videófelveleltek feldolgozásán alapuló mérési eljárások, melyek alkalmasak mechanikai kísérletek, biomechanikai tesztek, és számos egyéb terület szükségleteinek kielégítésére.

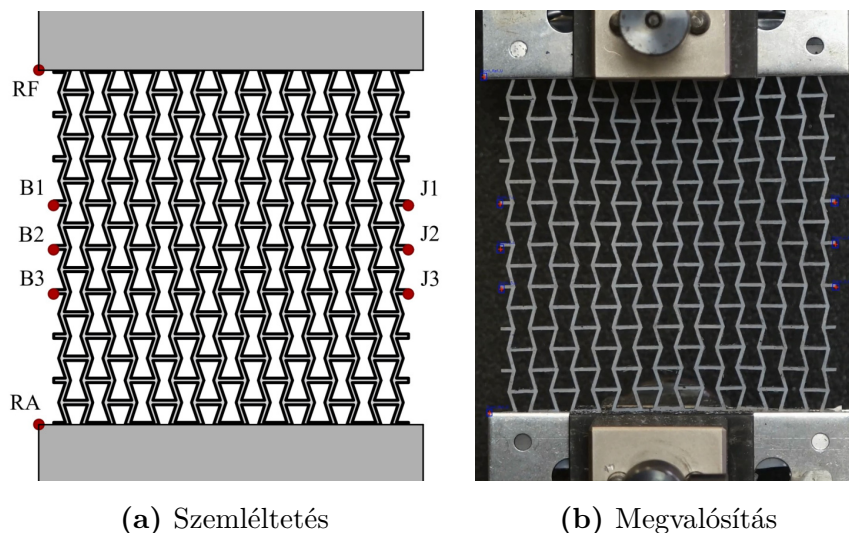
A mérésekről készült felvételek kiértékelésének lépései ebben a dolgozatban a következők voltak:

1. **Beolvasás, megnyitás.** A szoftver egyik előnye, hogy többféle fájltypust is képes kezelni (MP4, MOV, MKV, AVI). Ebben a dolgozatban MP4 fájlként, az eredetihez képest tízszeresre felgyorsítva dolgoztam fel a felvételeket, a procedura gyorsabbá tétele érdekében (a minőség ezzel nem romlott). Beolvasás után láthatjuk a videó fontosabb paramétereit, azaz a felbontását, képkockasebességét, és hosszát.
2. **Pontok felvétele.** Következő lépésben az általunk lekövetni kívánt pontok (objektumok) felvételét eszközöltem. Minden objektumhoz három lényeges paraméter tartozik: név,

pont, terület. A későbbiekben használt algoritmusok csak a felvétel meghatározott régióit képesek lekövetni, ezért fontos a pontot körülvevő terület megadása is. Az elemzés során magának a pontnak a pozíciója az elmentett érték.

3. **Követés:** Ennek során kiválaszthatjuk az implementált algoritmusokból a számunkra legmegfelelőbbet, melyek a Python [28] OpenCV könyvtárán alapulnak. Ebben a munkában a CSRT algoritmust alkalmaztam, pontossága és stabilitása miatt. A szoftver képes a felvett objektumok szimultán követésére.
4. **Kiértékelés, exportálás:** A pontok mozgásának követésével azok pozícióját kapjuk meg képkockánként, pixelben. A kapott görbéken egy Gauss-féle simítást alkalmaztam három iterációval, ami kiegyenlíti a numerikus zaj hatását, viszont nem képez valótlanul sima, elmosódott függvényeket. Az eredményeket Excel munkafüzetbe exportáltam, később ezeket manipuláltam.

Az egyik leglényegesebb lépés a pontok elhelyezése volt, ez korántsem triviális. Alapvetően, egy homogén anyag esetében a Poisson-tényezőt a darab széleinek elmozdulásából, valamint az axiális elmozdulásból határozzák meg. Dolgozatomban is ezt a módszert követtem, a hosszirányú elmozduláshoz kijelöltem egy felső és alsó referenciapontot (mindezt a szakítógép egyik elemén tettem meg, a stabilabb követhetőség érdekében), valamint oldalanként struktúrától függően 3, vagy 4 oldalsó pontot jelöltem ki a próbatestek szélső, de a hossz mentén középső részén, a vízszintes, keresztirányú elmozdulás mérésére. Mindez a 20. ábrán látható.



20. ábra. A felvételek kiértékeléséhez felvett pontok a kezdeti időpillanatban

A több pont kijelölésének az oka az egyes helyeken fellépő esetleges nagyobb ingadozások, valótlan elmozdulások, valamint a befogás hatásának kiküszöbölése volt. Az pedig, hogy mindkét oldalon szimmetrikusan felvettem pontokat nagyrészt a felvételek esetleges ferdeségének kezelésére, valamint a szimmetria ellenőrzésére szolgál. Végül az oldalsó pontok vízszintes pozícióját, továbbá a referenciapontok függőleges pozícióját exportáltam ki minden képkockában, pixelben megadva, adatsorokba.

Az így kapott adatok kiértékelését Matlab-ban folytattam. A következőkben a Poisson-tényező függvényének számítási lépéseit mutatom be, egy oldalaként három felvett ponttal rendelkező próbatesten (a módszer a négy ponttal rendelkezők esetén is ugyanez). A számítást két részre bontottam, először a függőleges, hosszirányhoz tartozó mennyiségeket határozom meg. A mértékegységet nem váltom át, pixelben számolok, mivel végül dimenziótlan mennyiségeket kapunk, amik ugyanazt az értéket vennék fel mm-ben számolva is. A próbatest kezdeti hosszát a következő formulával kapjuk meg.

$$L_0 = \left| y_{RF(1)} - y_{RA(1)} \right|, \quad (14)$$

ahol $y_{RF(1)}$ a felső referenciapont y koordinátája az első időpillanatban. A függőleges elmozdulás, és ezzel a pillanatnyi hossz:

$$u = \left| y_{RF} - y_{RF(1)} \right|, \quad (15)$$

$$L = L_0 + u, \quad (16)$$

ahol y_{RF} a felső referenciapont pillanatnyi, adott képkockában elfoglalt pozíciója. A pillanatnyi axiális megnyúlás, és a pillanatnyi axiális alakváltozás a következőképpen adódnak:

$$\lambda_y = \frac{L}{L_0}, \quad (17)$$

$$\varepsilon_y = \ln(\lambda_y). \quad (18)$$

A vízszintes (x) irányú mennyiségek meghatározása az alábbi kifejezések szerint történt. A próbatest kezdeti szélessége, továbbá a jobb, és baloldali elmozdulások:

$$H_0 = L_0, \quad (19)$$

$$v_J = [(x_{J1} - x_{J1(1)}) + (x_{J2} - x_{J2(1)}) + (x_{J3} - x_{J3(1)})]/3, \quad (20)$$

$$v_B = [(x_{B1} - x_{B1(1)}) + (x_{B2} - x_{B2(1)}) + (x_{B3} - x_{B3(1)})]/3. \quad (21)$$

A fenti képletekben szereplő x_{Ji} az jobb, x_{Bi} pedig a baloldali pontok pillanatnyi x koordinátája, az egyes indexű paraméterek pedig ugyancsak az első időpillanatban vett értékeket jelölik. Az összesített vízszintes elmozdulás, valamint a próbatest aktuális szélessége könnyedén adódik:

$$v = -v_B + v_J, \quad (22)$$

$$H = H_0 + v. \quad (23)$$

A dimenziótlan x irányú mennyiségek, azaz a megnyúlás, és az alakváltozás pedig a következő alakban állnak:

$$\lambda_x = \frac{H}{H_0}, \quad (24)$$

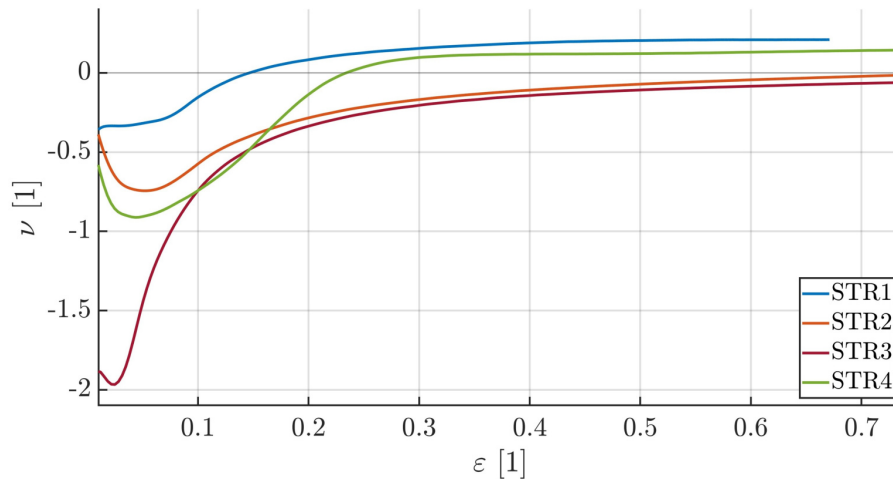
$$\varepsilon_x = \ln(\lambda_x). \quad (25)$$

Fontos megjegyezni, hogy az alakváltozások ún. logaritmikus formáját használtam, nem éltem az ún. mérnöki alakváltozás egyszerűsítésével. Kis alakváltozások esetén a két mennyiség csaknem azonos eredményt ad, ebben az esetben azonban az előreláthatóan pontosabb logaritmikus,

vagy valódi alakváltozás képletét alkalmazom. Végül, a Poisson-tényező az alábbi összefüggésből határozható meg. Ezt minden képkockában, minden pontban számolom, így kapom meg a keresett függvényeket.

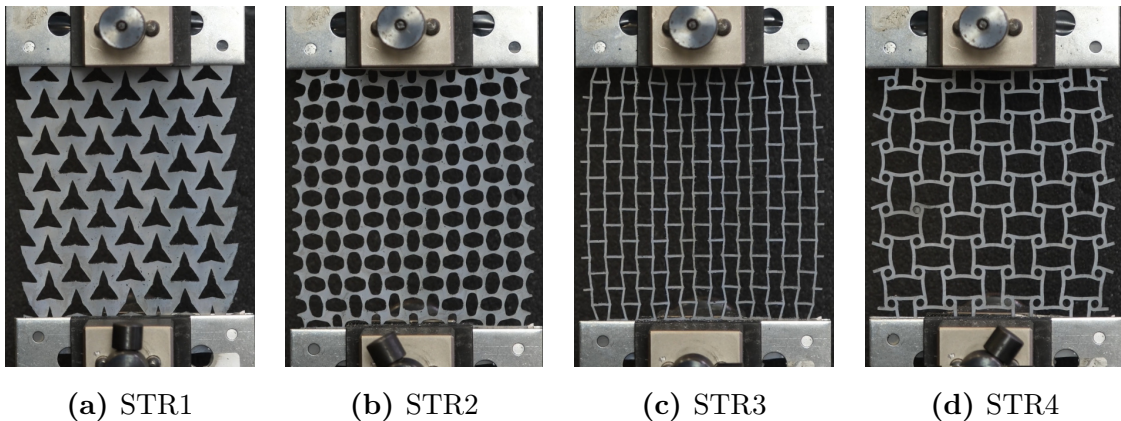
$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}. \quad (26)$$

Az így kapott Poisson-tényező értékeit az axiális alakváltozás függvényében ábrázoltam, ez pedig az alábbi, 21. ábrán látható.



21. ábra. Poisson-tényező függvények

Megfigyelhető, hogy alapvetően az összes struktúra a leginkább auxetikus viselkedést az alakváltozási tartomány első szakaszában mutatja. Közülük kettő tartja meg auxetikus jellegét a teljes tartományon (a második és a harmadik), a másik kettő Poisson-tényezője egy bizonyos ε_y után átvált pozitívrá. Ez azonban nem probléma, vagy előnytelen tulajdonság, sok esetben előnyös is lehet egy nagy alakváltozással járó alkalmazás esetén ez a különös jelleg. Említésre méltó a harmadik struktúra kezdeti, abszolút értékben nagyon nagy Poisson-tényező értéke, ami később gyors lecsengést mutat. A próbatesteken végzett mérésekről képeket a 22. ábrán láthat az olvasó.



(a) STR1

(b) STR2

(c) STR3

(d) STR4

22. ábra. A próbatestek 15%-os alakváltozásnál

6. Végeelem számítások

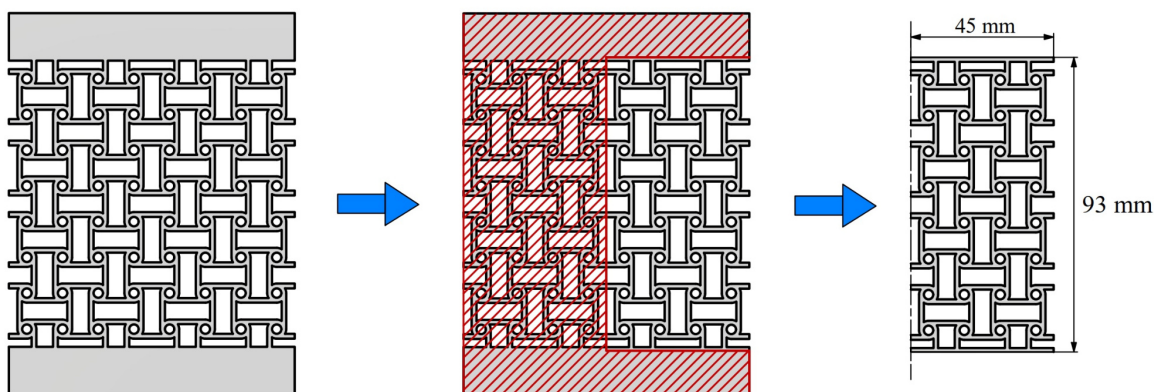
A próbatestek mechanikai szempontból történő vizsgálatának valós teszteken kívüli másik fontos eleme a végeelemes szimulációk elvégzése volt. Ezen vizsgálatok elvégzése után, a mérési eredményekkel összehasonlítva validálhatjuk a szimulációinkat, és további fontos következtetéseket vonhatunk le a témakörrel kapcsolatban. Ebben a fejezetben az előzőekben látott négy, különböző, kétdimenziós struktúrán elvégzett végeelem vizsgálatokat mutatom be.

6.1. Szimulációs környezet

A végeelem-módszer (VEM) egy parciális differenciálegyenletek megoldására szolgáló, a szilárd testek mechanikájában használt numerikus módszer. Ebben a dolgozatban a Simulia Abaqus 2022-es verzióját használtam a végeelem vizsgálatok elvégzésére, ami az egyik legelterjedtebb szoftver hasonló problémák elemzésére. A dolgozat ezen fejezetéhez a grafikus kezelőfelületet használtam (CAE). A következőkben a végeelem szimulációk felépítését, beállításait, továbbá a megalkotásukhoz szükséges megfontolásokat ismertetem.

Az első, vagy inkább nulladik lépés a szimuláció típusának kiválasztása. Lehetőség van explicit analízist alkalmazni, azonban számunkra tökéletesen megfelel a "Standard", azaz az alapértelmezett megoldás, ami képes lineáris, nemlineáris problémák vizsgálatára is, statikus esetben általánosan és széleskörűen használt.

A valódi első lépés a szimulációk összeállítása során a vizsgálandó test geometriájának megalkotása ("Part module"). Először a 3.1. fejezetben bemutatott struktúrák vázlatának importálását hajtottam végre, melyeket egy kevés utómunkával a későbbi analízisnek megfelelő formára alakítottam. Ez azt jelenti, hogy a 7. ábrán látható geometriákat az elemszám csökkentése, és így a szimulációk felgyorsítása érdekében a hossz tengelyük mentén kettévágtam, majd a hossz tengelyre megadtam egy szimmetriát, így csak az egyik oldalt kellett hálózni. Ezen túl a szakítógépbe való befogáshoz szükséges ráhagyásoknak is csak kis részét hagytam meg, ezzel is az előbbi célt szolgálva. Itt is fontos volt a peremfeltételek helyes megadása, amit egy későbbi pontban fogok részletesebben bemutatni. Ezután ezekből a vázlatrajzokból hoztam létre a kétdimenziós, deformálható, síkelemekből felépülő testeket, amit a 23. ábrán láthat az olvasó, a negyedik struktúrán bemutatva. A továbbiakban is ezen a struktúrán fogom szemléltetni az analízisek beállításait. További módosításként a struktúrák geometriáit kisebb felületekre osztottam fel, ami a későbbi hálógenerálás során lesz előnyös a háló minősége szempontjából. A deformálhatóság természetesen a feszültséganalízis elengedhetetlen feltétele, a 2D közelítést pedig ugyancsak a vizsgálatok optimalizálása érdekében alkalmaztam. A későbbi lépések és a kiértékelés megkönnyítése érdekében a globális koordináta rendszert a szimmetriatengelyre, a test aljára helyeztem el. Végezetül pedig ebben a modulban kell felvenni a későbbi analízishez szükséges pontokat, objektumokat, ezekhez a szimulációkhoz a 24. ábrán szereplő pontokat definiáltam.



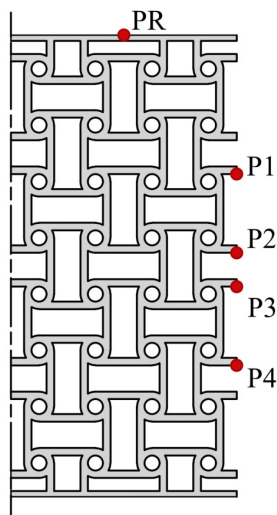
23. ábra. A szimulációk során alkalmazott geometria

A következő lépés az anyagtulajdonságok és a test (keresztmetszet) típusának megadása, amit az ún. "Property module"-ban tudunk megadni. Sűrűséget és egyéb jellemzőket nem kell megadni, mivel statikus vizsgálatokat folytatok. Az elasztikus jellemzőn belül a hiperelasztikus fül alatt kell megadni a kívánt anyag jellemzőit. Először is, hogy az alapanyag homogén, és a 4. fejezetben bemutatott harmadrendű Ogden-féle modell írja le a viselkedését, amit a saját kóddal illesztett anyagparaméterek megadásával implementáltam. Fontos megjegyezni, hogy itt megadható lenne kívánt mértékű összenyomhatóság a D1 értékkel, azonban ezt zérus értékre állítva az anyagot a végeelem vizsgálatokban is összenyomhatatlannak tekintem. Hőmérsékleti, valamint dinamikus és tönkremeneteli hatásokat nem vettem figyelembe. Az anyagot hozzárendeltem egy "Solid, Homogeneous", azaz szilárd, tömör, homogén szekcióhoz, továbbá beállítottam a 2 mm-es anyagvastagságot, majd ezt az egységet hozzárendeltem a megalkotott geometriához.

Az ezutáni lépcsőben lehet létrehozni az összeállítást ("Assembly module"), azonban esetünkben ezt csak egy objektum (test) alkotja, tehát csak ezt kell hozzárendelni az alapértelmezett módon, azaz a test lokális, és az összeállítás globális koordináta rendszere meg fog egyezni.

A "Step module"-ban beállított paraméterek lényegesek a szimulációk szempontjából. Ebben a modulban lehet megadni az analízis lépéseit, akár többet is. Ezekkel lekövethejtjük és befolyásolhatjuk a peremfeltételeket, a modell típusát, az analízis módját, megadhatjuk hogy milyen változók, értékek kimenetét kérjük le, továbbá szabályozhatjuk a megoldási paramétereket. Egy ún. "Initial Step", azaz kezdeti lépéssel kezdődik a lépések sorozata, amit a szoftver automatikusan generál, ezt nem tudjuk manipulálni, azonban megadhatunk például peremfeltételeket, amik már ebben a lépésben is hatnak. Ebben a dolgozatban az "Initial Step"-en kívül 1 lépést adtam meg, ami alatt a rendszer ráadja a testre a később beállított terhelést, a mérésekkel konzisztensen. Elengedhetetlen az "Nlgeom" funkció bekapcsolása, mivel az analízisben mindenképpen nagy deformációk és várhatóan nagy alakváltozások lesznek. Ez a funkció tehát a fellépő nemlineáris hatásokat veszi figyelembe. Fontos továbbá, hogy itt adom meg, hogy statikus legyen a lépés, azaz a dinamikus hatásokat nem veszi figyelembe a szoftver. Az ún. "History Output Request"-ek megadása a kiértékeléshez szükséges. Ezekkel az általunk meg-

adott pontokban az elmozdulást, az ott fellépő erőket, stb. kapjuk meg minden elemi lépés végén. Jelen munkában a 24. ábrán látható referencia pont függőleges (y irányú) elmozdulását és az itt ható erőt, valamint a négy oldalsó pont vízszintes (x irányú) elmozdulását állítottam be követendő paraméternek. Végül megadtam, hogy az adatokat 200 pontban számítsa ki a szoftver, ezzel az Abaqus automatikusan ennyinek vette az elemi lépések számát is, egyenlő lépéshosszokkal.

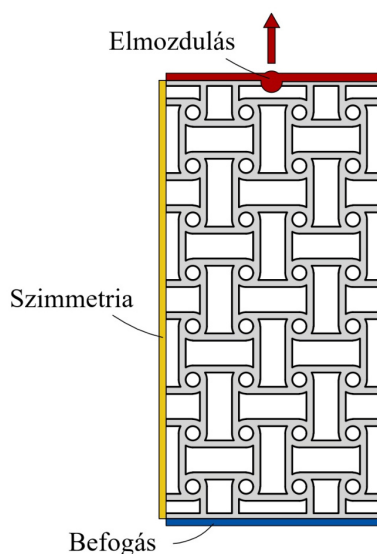


24. ábra. A felvett pontok

A következő modul, amit a szimulációk felépítése kapcsán használtam az "Interaction", azaz érintkezések modul. Itt lehet megadni különféle kontaktokat, kényszereket, hőtani feltételeket, továbbá számos egyéb jellemzőt, jelenséget. Ilyen például az ún. "Coupling", ami egyfajta csatolást, egyes elemek összeillesztését jelenti. Alapvetően egy pont és egy felület között definiálható, kétdimenziós esetben viszont a felület helyett egy élre adhatjuk meg. Dolgozatomban a referencia pont, és a struktúrák felső éle között adtam meg ezt a feltételt, mégpedig az analízisek optimalálás kiértékelhetősége érdekében. Így ugyanis nagyban egyszerűsödik a felső él elmozdulása és a rá ható erő megjelenítése, kezelhetősége. Kinematikus csatolást alkalmaztam, minden szabadsági fokot megkötve, ami azt jelenti, hogy a felső él csomópontjai merevtestszerűen követik a referenciapontot.

A peremfeltételek és a terhelés megadása a következő, amit a "Load module", azaz terhelés modulban adhatunk meg. Ezek a kondíciók ún. "step dependent" feltételek, ami azt jelenti, hogy definiálni kell, hogy egy adott lépésben aktívak vagy sem. A valós tesztek során a próbatestek alsó és felső vége is be volt fogva, majd a felső részen 100 mm-es elmozdulást alkalmazva kaptuk meg a végső alakot. Itt az alsó élen a mérési környezet minél hatékonyabb közelítése érdekében egy "Encastre" peremfeltételt alkalmaztam, ami az adott él teljes megfogását jelenti, minden szabadsági fokot gátolva. A geometria bal oldali éleire egy szimmetriát adtam meg, méghozzá x irányban, ami az x irányú elmozdulást, valamint az y és z tengely körüli elfordulást gátolja. A felső élre a referencia ponton keresztül y irányú, függőleges elmozdulás lett definiálva, a másik két irányú elmozdulást zérus értéken tartva. Az első kettő peremfeltétel a kezdeti és az

első lépésben is aktív, míg utóbbi az első lépésben aktiválódik. Az adott értékű elmozdulást a szoftver 200 részletben adja a testre. A definiált peremfeltételeket a 25. ábra szemlélteti.



25. ábra. Peremfeltételek, terhelés

Az utolsó lépés a szimulációk futtatása előtt a struktúrák hálózása ("Mesh module"). Ahogy azt említettem, a vizsgált területet kis részekre, elemekre bontjuk, melyekkel együtt bizonyos számú csomópontot is kapunk. Ebben a modulban előírható a háló sűrűsége lokálisan és globálisan, a modell hálójának szabályozása (elemtípus, hálózási technika, hálózási algoritmus) és további hasznos funkciók.

5. táblázat. A háló fontosabb jellemzői az egyes próbatestek esetén

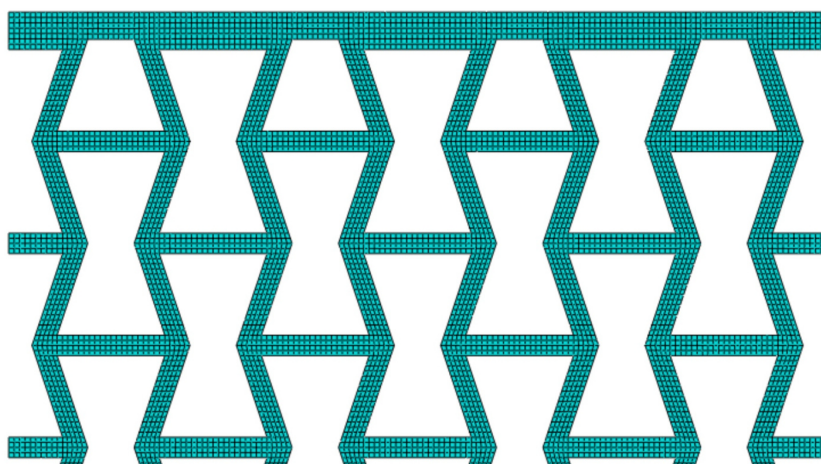
Struktúra	"Seed" méret	Elemtípusok	Elemszám	Csomópont szám
STR1	0,3 mm	CPS4/CPS3	45280 (44662/618)	47137
STR2	0,3 mm	CPS4/CPS3	29280 (28488/792)	31894
STR3	0,3 mm	CPS4	19480	23239
STR4	0,3 mm	CPS4/CPS3	18478 (18134/344)	21254

A cél a jól struktúrált, egyenletes háló kialakítása, a háló minőségéből fakadó hiba minimalizálása érdekében. A létrehozott geometriák kétdimenziós szilárd testek, így a hálózáshoz használt elemek is a kontinuum, szilárd, kétdimenziós könyvtárból kerülnek ki. A háló sűrűségét, a hálóméretet a "Seed" funkcióval tudjuk manipulálni. Ezt az értéket az élre írhatjuk elő, akár konstansan, de lehet változó is az él mentén, ezzel helyileg sűrűsíthetjük a felosztást. Ezután a szoftver a belső területeket is az adott "Seed" érték alapján osztja fel. Munkámban a konzisztencia érdekében minden struktúrára konstans, az 5. táblázatban látható értéket adtam meg. Az elemtípusok is szerepelnek a táblázatban, ezeket a szoftver automatikusan generálja, de mi is tudjuk manipulálni egyes beállításokkal. A "Mesh Control" fülön ún. "Quad-dominated", azaz négyzetes elemek által dominált beállítás az alapértelmezett, ugyanis a geometriák viszonylagos bonyolultsága miatt a tisztán négyzetes elemek alkalmazása nem lehetséges. Ez

alól kivétel a harmadik struktúra, ahol a felület megfelelő felosztása révén sikerült elérni, hogy csak négyzetes elemekből épüljön fel, ahogy az a 26. ábrán is látszik. Ezen túl elmondható, hogy általános, síkfeszültségi, lineáris elemeket használtam a struktúrák hálózásához, amik az 5. táblázat megfelelő oszlopában, és alább is láthatóak.

- **CPS4 ("Continuum"; "Plane-Stress"; "4 node"):** Általános célú, kontinuum, kétdimenziós, bilineáris négyszög elem
- **CPS3 ("Continuum"; "Plane-Stress"; "3 node"):** Általános célú, kontinuum, kétdimenziós, lineáris háromszög elem

Lényeges továbbá, hogy az ún. redukált integrálás, ami kétdimenziós esetben négyszög elemek esetén alkalmazható, és a számításoknál egy elemen belül az eredeti négy integrálási pont helyett csak egyet használ, ebben a dolgozatban nem került beállításra. A végleges hálóméretek, elem és csomópont számok az 5. táblázatban láthatóak. A számokban az eltérést a geometriák különbözősége (az anyag eloszlása), és ezzel együtt az azonos elemméret okozza.



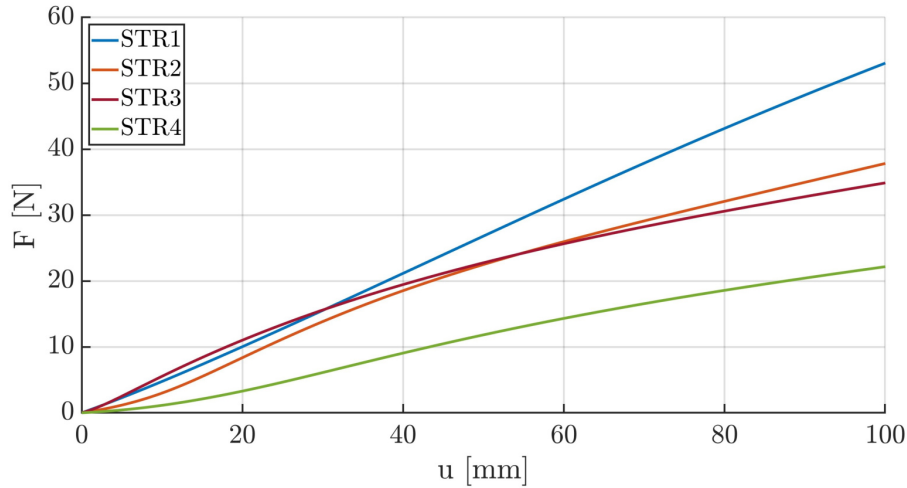
26. ábra. A harmadik struktúra hálójának része

6.2. Szimulációk kiértékelése

A végeselem szimulációk kiértékelése a valós tesztekhez hasonlóan folyt, kisebb eltérésekkel. Itt is az erő-elmozdulás és a Poisson-tényező függvények megalkotása volt a cél.

6.2.1. Erő-elmozdulás (VEM)

Az erő és elmozdulás értékeket a fejezet elején említetteknek megfelelően a megadott referencia-pontban kaptam meg. Ezeket ábrázolni Abaqusban is lehet, azonban a mérési eredményekkel való összehasonlíthatóság, valamint a további manipulálhatóság érdekében Excel formátumban exportáltam az adatsorokat, majd Matlab-ba importálva ezeket folytattam a kiértékelést. Az eredményeket a 27. ábra mutatja.



27. ábra. A végeelem vizsgálatokkal kapott erő-elmozdulás függvények

A végeelem vizsgálatok során kapott görbék jellegre megfigyelhetően hasonlítanak a valós tesztek során kapottakhoz. Az egymással való összehasonlítást a 6.3.1. fejezetben ismertetem, a különbözőséget, eltéréseket pedig a 6.3. fejezetben részletezem.

6.2.2. Poisson-függvény (VEM)

A Poisson-tényező pillanatnyi értékének meghatározása is hasonlóan zajlik a méréshez. A lényegi különbséget az jelenti, hogy ebben az esetben nem a követett pontok aktuális pozícióját kapjuk kimenetként, hanem azok elmozdulását a kezdeti helyzetükhöz képest, ezzel valamilyen szinten leegyszerűsítve a számítást. További változás, hogy csak az egyik oldalon vannak pontjaink, a 24. ábrának megfelelően, ezeket kiterjesztve, a szimmetriát kihasználva kalkuláljuk a mennyiségeket. A Poisson-tényező számításának részleteit a következőkben ismertetem, egy négy ponttal ellátott struktúra (pl.: negyedik) esetén. A struktúrák kezdeti hossza:

$$L_0 = 90 \text{ mm} . \quad (27)$$

A függőleges elmozdulás a felső referenciapont elmozdulása, u , és ezzel a pillanatnyi hossz:

$$L = L_0 + u . \quad (28)$$

A pillanatnyi axiális megnyúlás, és a pillanatnyi axiális alakváltozás a következőképpen adódnak.

$$\lambda_y = \frac{L}{L_0} , \quad (29)$$

$$\varepsilon_y = \ln(\lambda_y) . \quad (30)$$

A vízszintes (x) irányú mennyiségek meghatározása az alábbi kifejezések szerint történt. A struktúra kezdeti szélessége, valamint az egyoldali vízszintes elmozdulás, és ezekből a struktúra

pillanatnyi szélessége:

$$H_0 = L_0, \quad (31)$$

$$v = (v_1 + v_2 + v_3 + v_4)/4, \quad (32)$$

$$H = H_0 + 2v. \quad (33)$$

A középső képletben szereplő v_i értékek a 24. ábrán szereplő oldalsó pontok aktuális vízszintes elmozdulását jelölik. Ez a mérésnél végzett levezetéssel ellentétben egy olyan struktúra, amely négy ilyen ponttal rendelkezik, eltérés azonban csak az átlag számításában van (32. egyenlet). A dimenziótlan x irányú mennyiségek, azaz a megnyúlás, és az alakváltozás pedig a következő alakban állnak:

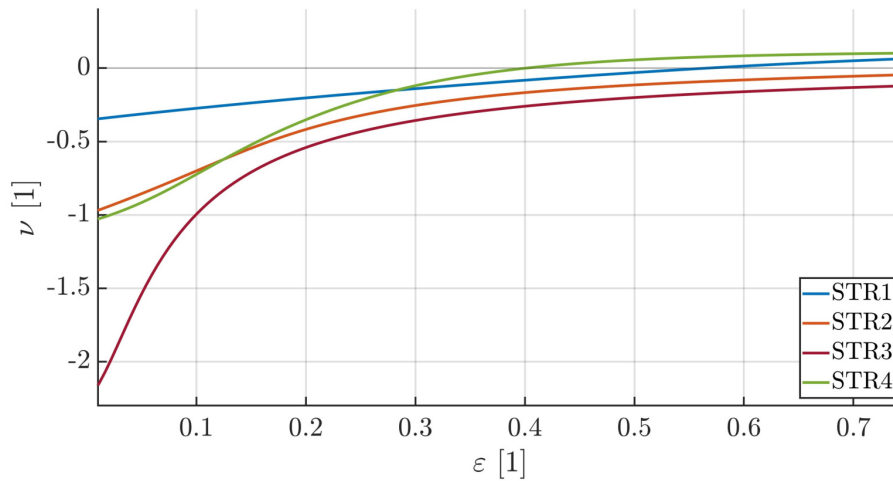
$$\lambda_x = \frac{H}{H_0}, \quad (34)$$

$$\varepsilon_x = \ln(\lambda_x). \quad (35)$$

Végül pedig a Poisson-tényező pillanatnyi értéke:

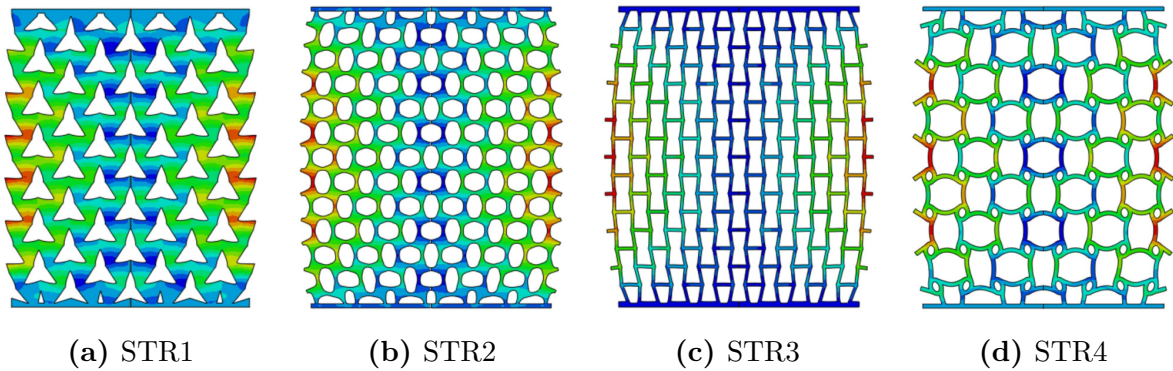
$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}. \quad (36)$$

Az így kapott értékeket ábrázolva kapjuk meg a Poisson-tényezőt a logaritmikus alakváltozás függvényében, ez a 28. ábrán látható.



28. ábra. A végeelem vizsgálatokkal kapott Poisson-függvények

Az végeelem vizsgálatok és a mérés eredményei közötti eltéréseket, azok lehetséges okait és magyarázatát a 6.3. fejezetben fejtem ki. A 29. ábra mutatja a struktúrákat adott axiális megnyúlásnál, a vízszintes irányú elmozdulás szerint színezve. Megfigyelhető, hogy a befogás hatása a struktúrák középső részén már kellően lecsillapodik, a pontok elhelyezése emiatt a megfelelő helyre történt. Ezen túl a különféle geometriák eltérő jellegű viselkedése is érzékelhető.



29. ábra. A struktúrák 15%-os alakváltozásnál

6.2.3. Hálófüggetlenségi vizsgálat

Az ún. diszkretizációs hiba a végelem vizsgálatok esetén a véges felbontással, és a végtelenül sűrű hálóval kapott eredmények közötti eltérés, amit a háló sűrítésével lehet minimalizálni. A nagyobb elemszám azonban nagy mértékben megnövekedett számításgénnel jár, ami gyakorlati szempontból nem optimális. Emiatt szükséges az ún. hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzése, amivel megtalálhatjuk a számunkra megfelelően pontos eredményt adó, és elfogadható számításgénnel járó hálóméretet, vagy validálhatjuk az alkalmazott hálót. Ebben a dolgozatban ezt a második struktúrán végeztem el, mégpedig adott elmozdulásnál vett erőértékek elemzésével, különböző elemméretekkel rendelkező modelleken. Az eredetileg 0,3 mm-es elemméreten túl ennek többszöröseivel építettem fel a modelleket, az ehhez tartozó adatok a 6. táblázatban láthatóak. A legsűrűbb modell esetén megfelezttem az eredeti elemméretet, a két durvább felosztásnál pedig rendre megkétszereztem.

6. táblázat. A hálófüggetlenségi vizsgálat során alkalmazott modellek

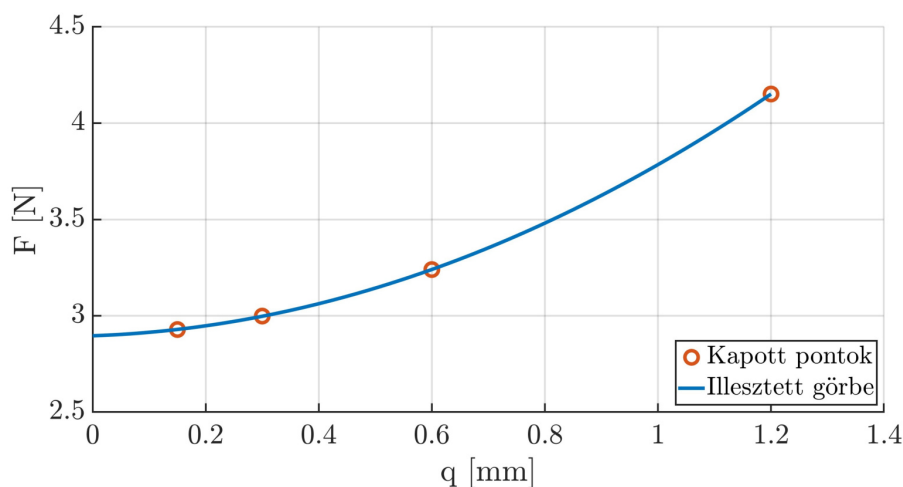
Modell	Elemméret	Elemszám	Csomópont szám
STR2 ^h	0,15 mm	121519	125991
STR2 ^{2h}	0,3 mm	29280	31894
STR2 ^{4h}	0,6 mm	8027	9461
STR2 ^{8h}	1,2 mm	1856	2564

Az elemszámok láthatóan jelentősen eltérnek a különböző elemméretek esetén. A kapott erő-elmozdulás karakterisztikákat Matlab-ba importáltam, majd mindegyik modell esetén a 10 mm-es elmozduláshoz tartozó erőértéket ábrázoltam az elemméret függvényében (30. ábra). Ezen erők számszerűen a 7. táblázatban láthatóak.

7. táblázat. Erőértékek a különféle modellekkel

	STR2 [∞]	STR2 ^h	STR2 ^{2h}	STR2 ^{4h}	STR2 ^{8h}
F [N]	2.896	2.928	2.998	3.24	4.151

Egy másodrendű polinomot is illesztettem a pontokra a jelleg szemléltetésére, amelynek az y tengellyel vett metszéspontjához tartozó érték lenne a végtelen sűrű felbontás esetén fellépő erő, amely ugyancsak szerepel a fenti táblázatban.



30. ábra. Hálófüggetlenségi vizsgálat

A háló minőségének számszerűsítésére a végtelen sűrű felbontáshoz képesti relatív hibákat számoltam, a következő formula segítségével:

$$Error^i = \left(\frac{F^{ih} - F^\infty}{F^\infty} \right) \cdot 100. \quad (37)$$

Az így kapott eredmények a 8. táblázatban láthatóak.

8. táblázat. A hálófüggetlenségi vizsgálat eredménye

	STR2 ^h	STR2 ^{2h}	STR2 ^{4h}	STR2 ^{8h}
Error	1,12 [%]	3,53 [%]	11,87 [%]	43,34 [%]

A hiba még elfogadható értékét 5 %-nak tekintem. A várakozásoknak megfelelően a durva hálóval kapott eredmény nagyban eltér a referenciától, de az eggyel sűrűbb esetén is viszonylag jelentős az eltérés. A legsűrűbb hálóval felépülő modell a legpontosabb, viszont számításigénye miatt nem ideális. Az optimális választás az analízis alapján a 0,3 mm-es hálóméret, ami a hibahatáron belül van, továbbá számításigény szempontjából is megfelelő.

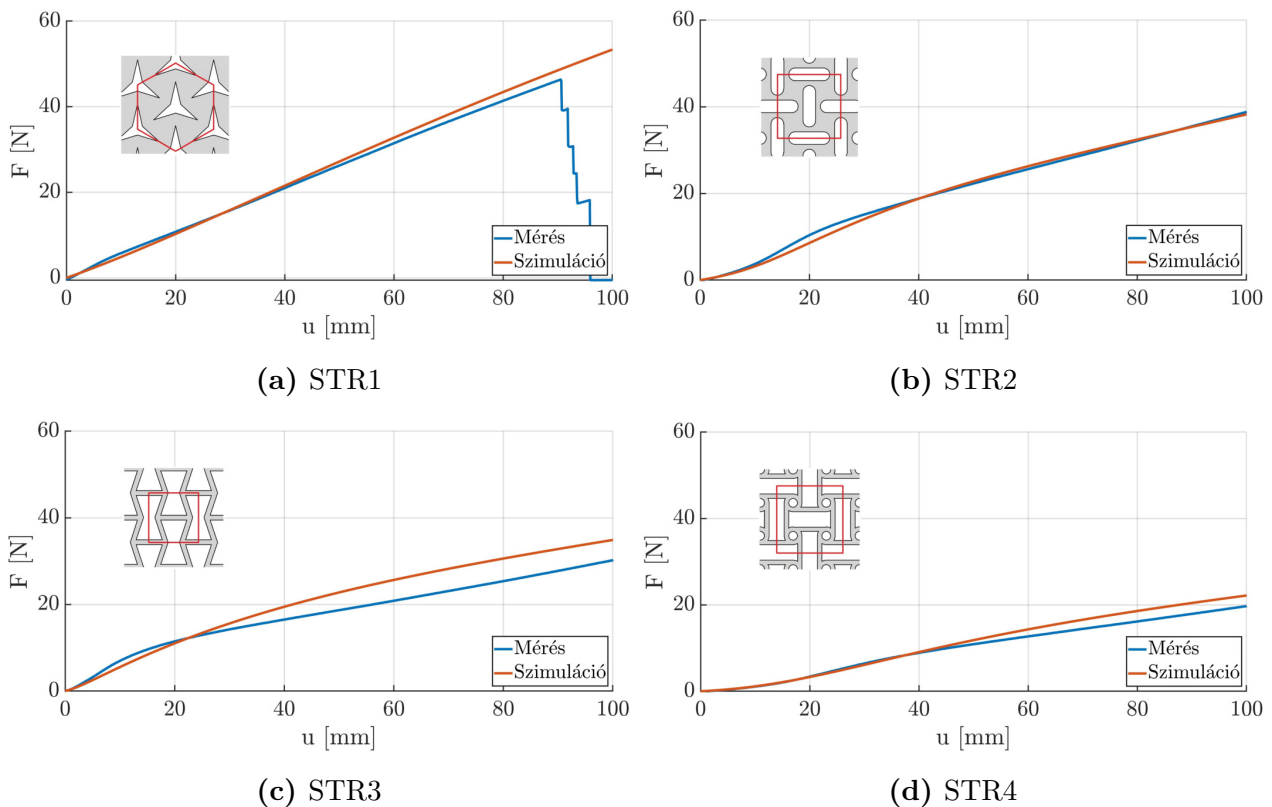
6.3. Eredmények összehasonlítása

A témakör, és általánosságban az auxetikus struktúrák alkalmazhatóságának szempontjából elengedhetetlen a tervezhetőségük fejlesztése. Az ebben a dolgozatban ismertetett módszertan is ezt a célt szolgálja, ennek fontos lépése a valós tesztek, valamint a végelem szimulációk eredményeinek összehasonlítása. Ha ezek jó egyezést mutatnak, akkor minden valószínűség

szerint helytálló a megalkotott módszer, a mérési és a numerikus környezet is eleget tesz a követelményeknek, és a későbbiekben is használható. Az se jelenti a módszer helytelenségét vagy használhatatlanságát, ha eltéréseket tapasztalunk, azonban ebben az esetben lényeges megtalálni azok forrását, hogy eliminálva őket fejlesszük a koncepciót.

6.3.1. Erő-elmozdulás függvények

A vizsgált mechanikai jellemzők, karakterisztikák közül az elmozdulás függvényében feltüntetett erőértékek jelentős tartalommal bírnak a struktúrák és próbatestek merevsége kapcsán. Az alábbi, 31. ábrán ezeket a karakterisztikákat láthatja az olvasó.

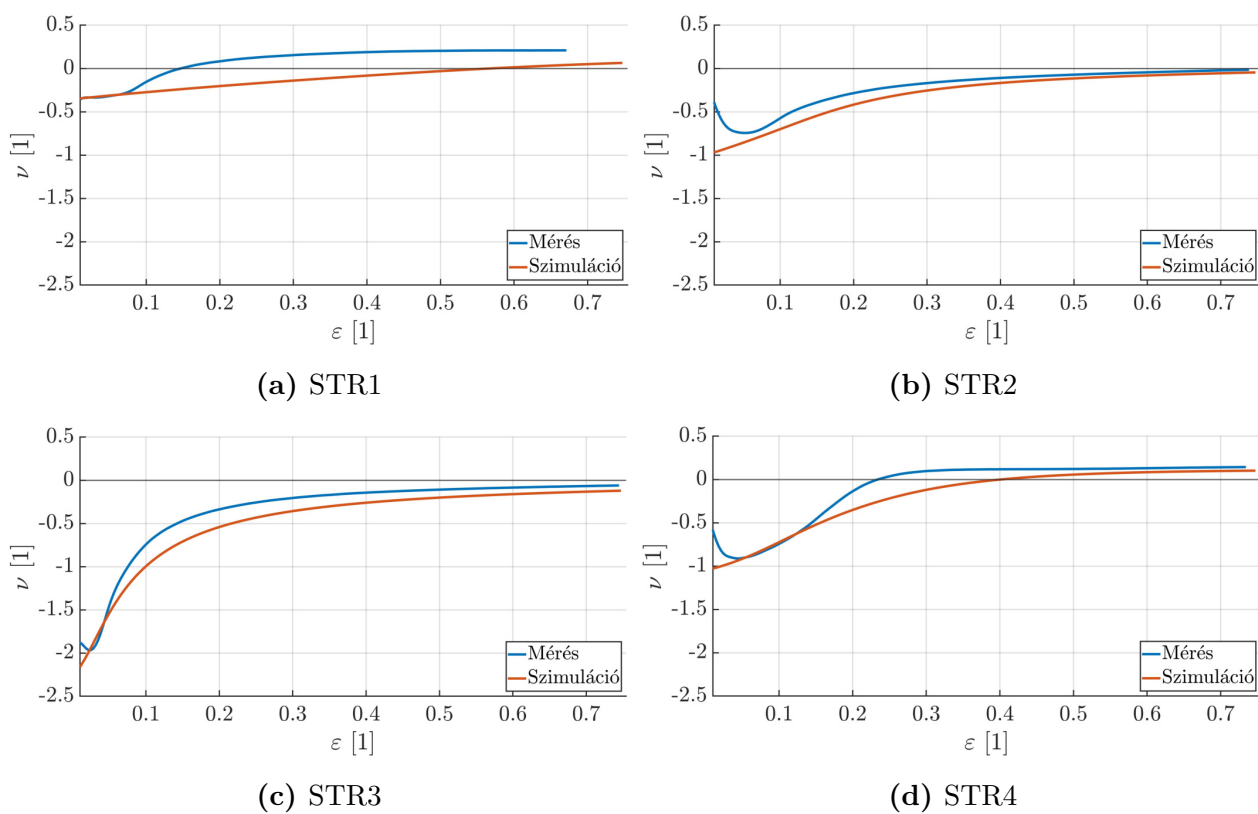


31. ábra. Erő-elmozdulás karakterisztikák (VEM)

Az első és a második struktúra erő-elmozdulás karakterisztikái szinte tökéletesen illeszkednek. Ez egy bizonyos elmozdulás értékig a másik két próbatestnél is elmondható, utána kezdenek kisebb mértékben eltérni a görbék.

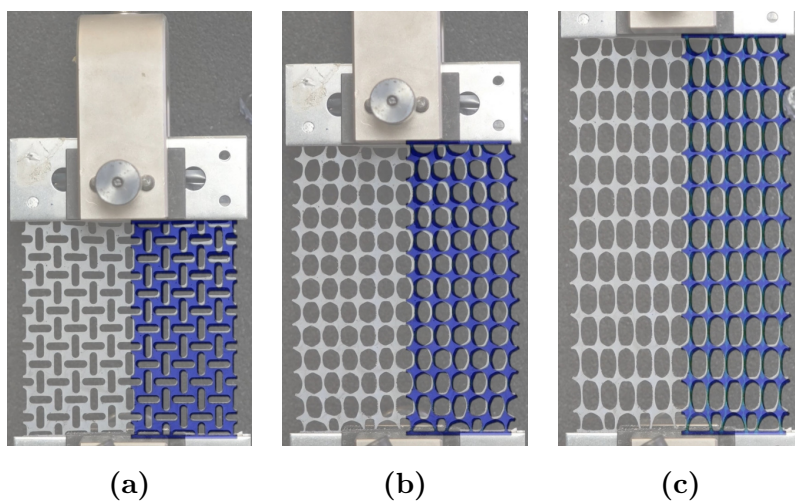
6.3.2. Poisson-függvények

Ebben a dolgozatban talán a leginkább a Poisson-tényező vizsgálata van előtérbe helyezve. Ezen jellemző különleges, a hétköznapokban nem megszokott viselkedése egy nehezen modellezhető probléma. Az alábbiakban a mérési és a végelem analízisből származó eredmények láthatóak egy diagramon az adott geometriára vonatkozóan (32. ábra).



32. ábra. Poisson-tényező karakterisztikák (VEM)

Ebben az esetben a második és a harmadik struktúra esetén kaptuk a legjobb illeszkedést, de a négyes struktúra karakterisztikái is jól egyeznek a tartomány nagy részén. Az első struktúra esetén azonban nagy eltéréseket tapasztalhatunk. A 33. ábrán a második struktúra esetén a mérésekből és a szimulációból adott pontokban kiragadott képeket egymásra helyezve egy vizuális összehasonlítást láthat az olvasó.



33. ábra. Mérési és szimulációs eredmények vizuális összehasonlítása

6.3.3. Eltérések lehetséges okai

Kijelenthető, hogy az vizsgált karakterisztikák nagy részénél a mérési és szimulációs eredmények meglehetősen jól illeszkednek, azonban megfigyelhetünk eltéréseket is. Ez leginkább az első struktúra Poisson-tényező, logaritmikus alakváltozás kapcsolatára igaz, ahol a függvények jellegre hasonlítanak, viszont nagy számértékbeli eltérések jelentkeznek. Ebben a fejezetben összegyűjtöm az eltérések lehetséges okait, azok megoldási, vagy csökkentési lehetőségeit.

- **Megtervezett és legyártott struktúrák közötti eltérések.**
 - **Geometriai eltérések.** A megtervezett, pontos méretekkel ellátott modellek méretei nem tökéletesen egyeznek a lézervágó által gyártott próbatestekkel, a gép bizonytalansága miatt. Ez a hiba kevésbé jelentős a berendezés nagy pontosságának köszönhetően, javítani például nagyobb próbatestek gyártásával lehetne, ahol a relatív hiba még kisebbre csökkenne.
 - **Gyártás során jelentkező anyagtulajdonság változások.** Amint említettem, a lézervágó gép működése közben fontos a hőhatásterület mérete. Ezt lehet csökkenteni például kisebb teljesítmény beállításával, de ebben az esetben sem biztos hogy jó irányba térünk el, hiszen ha tovább éri hő az anyagot, akkor is változhatnak az anyagtulajdonságok. Ezt tehát nehéz kiküszöbölni lézerrel történő gyártás esetén. Vizsgálni lehetne a hatását esetleg egy vízsugárral vágott próbatesttel összehasonlítva az eredményeket.
- **Anyagmodell pontatlanságából származó hiba.**
 - **Szabványos próbatest mérése során fellépő.** A mérési összeállítást nem lehet tökéletesen felépíteni, mindig lesznek eltérések az elképzelésekhez képest. Ilyen a próbatest ferde behelyezése a szakítógépbbe, a nem teljesen precíz befogás, amiből valamilyen szinten elkezdhet kicsúszni a próbadarab. Ezen túl az anyagmodell felállításához végül csak egy mérés értékét használtam fel, ami újabb hibát jelent, mivel ebben az esetben szerepet játszik egyfajta ingadozás az eredményekben, amit több mérés átlagával lehetne kiküszöbölni. Végül a viszkoelasztikus és egyéb hatások megjelenése, amit, bár egy speciális módszerrel csökkentettem minimálisra, valamekkora eltérés mindenképpen lesz a végtelenül lassú tesztekhez képest.
 - **Axiális alakváltozás számításából származó.** Eltérések forrása lehet az anyagmodell illesztése során definiált hosszirányú alakváltozás is, amihez a befogások távolságát vettem alapul, ami nem tökéletesen az egytengelyű feszültségi állapot tartományára esik, azonban így nagyban egyszerűsödött a kiértékelés, és a hiba valószínűleg nem túl számottevő, így ezt alkalmaztam. Minimalizálni a próbatest középső részén definiált pontokkal lehetne.

- **A kéttengelyű adatsor közelítéséből, és a tiszta nyírás elhagyásából származó hiba.** Ez a tétel a hibák egyik jelentősebb forrása lehet, ugyanis hiperelasztikus anyagok esetén lényeges a több feszültségi állapotra vonatkozó adatsorokra történő szimultán illesztés, az azoknál jelentkező különbségek miatt. Ezt a dolgot keretein belül egy virtuális kéttengelyű adatsor létrehozásával tudtam kezelni, továbbá a tiszta nyíró igénybevételt nem vettem bele az illesztésbe, így az anyag viselkedése, és az illesztett modell között eltérés jelentkezhet. Orvosolni pontos, kéttengelyű és sík helyzetű mérésekkel lehetne.
- **Anyagmodell illesztéséből.** Az alkalmazott harmadrendű, Ogden-féle modell a 4. fejezetben láthatóan egy bizonyos értékű hiba jelenléte mellett illeszkedik a mért adatsorokra, ami ugyancsak hibaforrás. Minimalizálni jobban illeszkedő modellek implementálásával lehetne, a dolgozat keretein belül azonban a felhasznált modell teljesen megfelelő.
- **Auxetikus próbatestek mérése során fellépő hibák.**
 - **Mérési környezet.** A szabványos, anyagmodellhez szükséges próbatest mérése esetén fellépő jelenségeket itt is számításba kell venni, ezeken túli plusz faktor a kamera beállításából fakadó bizonytalanság, hiba.
 - **Kiértékelés.** A Motion Tracker Beta nem tökéletes követése. A mozgáskövető szoftver a beállított pontok pozícióját igyekszik lekövetni minden képkockán, azonban ebben a numerikus módszer, a videó esetleges tökéletlenségei, valamint a beállítások nem teljesen optimális megválasztása okozhat bizonytalanságot. Minimalizálása a szoftver átfogó ismeretével, a videó minél jobb minőségével érhető el.
- **Végeselem vizsgálatok hibái.**
 - **Peremfeltételek.** A végeselem vizsgálatok egyik legjelentősebb hibaforrása a megadott peremfeltételek, egyszerűsítések, és a valós mérések közötti eltéréséből, különbözőségeiből adódhat.
 - **Diszkretizációs hiba.** A diszkrét közelítés, azaz a hálózás is valamilyen mértékű hibát jelenthet, azonban ennek mértéke jól felépített modell esetén minimális, elhanyagolható.
 - **További, numerikus vizsgálatok esetén fellépő bizonytalanságok, hibák.**

Vannak jelenségek, amikkel előzetesen nehéz kalkulálni. Ilyen az ún. "wrinkling", ami egyfajta stabilitásvesztés vékony lemezek húzása esetén. Szó szerint lefordítva ráncosodást jelent, ami jól leírja a jelenséget. Előfeszített membránok, vagy lemezek esetén számottevő ez a típusú kihajlás, ami a szerkezetben indukálódó nyomófeszültség következménye, és rendszerint a fő terhelési irányra merőlegesen jelentkezik hullámok, ráncok formájában. Ez egy, a membrán síkján kívüli deformáció, ami az ilyen struktúrák elhanyagolható hajlítómerevsége miatt jön

létre, kis tökéletlenségek hatására. Két típusa létezik. Az egyik az ún. anyagi ráncok, ezek plasztikus, azaz irreverzibilis deformációt okoznak. A másik, ami esetünkben is számottevő mértékű, az ún. szerkezeti ráncok. Ezek elasztikus deformációt okoznak, az "out-of-plane" hullámok jól meghatározható hullámhosszal, amplitúdóval jellemezhetőek, ezek a membrán geometriájának függvényei. Jelentőségüket napjainkban leginkább az úriparnak köszönhetik, ahol egyre elterjedtebbek a napvitorlák, nagy területű, rugalmas tükrök, és további eszközök, amik valójában előfeszített membránok. Ezek kapcsán fontos a ráncosodás megakadályozása annak negatív hatásai elkerülése érdekében. [29]

Dolgozatomnak nem célja a jelenség mélyebb kutatása, azonban a mérések során megfigyelhető és az első struktúra esetén egyenesen számottevő volt a síkon kívüli deformáció, ami a Poisson-függvények eltérésének egyik fő oka lehet. A jelenség modellezésére egy végeselem szimulációt végeztem, ami lényegében egy kihajlás analízis elvégzését jelenti, melynek lépéseit és eredményeit a következőkben mutatom be. A módszer két fő lépésből tevődik össze.

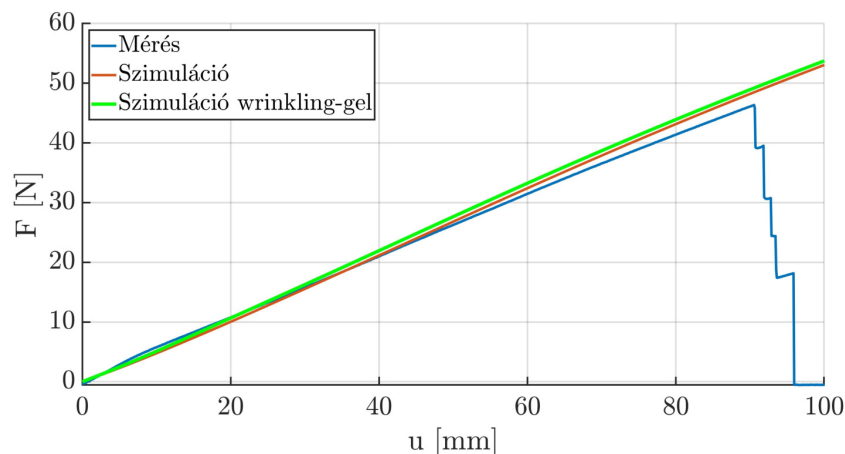
1. **Kihajlás analízis.** Ebben a lépésben a jelenség sajátértékeit és sajátvektorait határozom meg, más szavakkal élve a kihajlott alakokat és a stabilitásvesztéshez szükséges kritikus húzóerőt.

- **Geometria.** A különbség az eredeti geometriához képest az, hogy ebben az esetben a teljes háromdimenziós test modelljét alkalmazom. Ennek oka az, hogy a kétdimenziós síkfeszültségi közelítés nem engedi a csomópontok síkból való elmozdulását, és ez az egyik lehetőség ilyen deformációk modellezésére is.
- **Anyagtulajdonságok.** Az alkalmazott hiperelasztikus anyagparaméterek megegyeznek az eddigiekkel, azonban itt is változásokat eszközöltem a jelenség modellezhetősége érdekében. Ennek háttere az, hogy pozitív sajátértékeket szeretnénk kapni, ami egyet jelent azzal, hogy a struktúra valóban húzásra veszi el a stabilitását. Negatív sajátértékek esetén az eredeti, nyomóerő hatására kialakuló kihajlás problémáját kapnánk. Ahhoz, hogy pozitív sajátértékeket kapjunk, egy megszorítást kell alkalmaznunk, mégpedig az ún. Lánczos-módszert, ami kihajlásanalízisek esetén az egyik lehetséges megoldó algoritmus. Abaqusban összenyomhatatlan anyag kihajlásanalízise esetén ún. hybrid elemeket kell alkalmazni, ami azonban nem kompatibilis a Lánczos-módszerrel. Ezt a problémát úgy orvosoltam, hogy megadtam egy kis mértékű térfogati összenyomhatóságot ($D_1 = 0,016$), ezzel bizonyos mértékben hibát vezetve a rendszerbe, de lehetővé téve az analízis elvégzését. D_1 értékét a kezdeti csúsztató rugalmassági modulus, valamint az alkalmazott Ogden-féle modelltől számítható ún. bulk modulus kapcsolatának figyelembevételével, a szoftver által megengedett legkisebb értéknek választottam.
- **Step.** A kezdeti lépésen kívül két lépés megadása szükséges. Az első egy általános, nemlineáris, statikus lépés, ahol előfeszítjük a "membránt", a második pedig egy "Buckle", azaz kihajlás lépés, ahol alkalmaztam a fent említett Lánczos-módszert, az első 10 db pozitív sajátértéket lekérdezve.

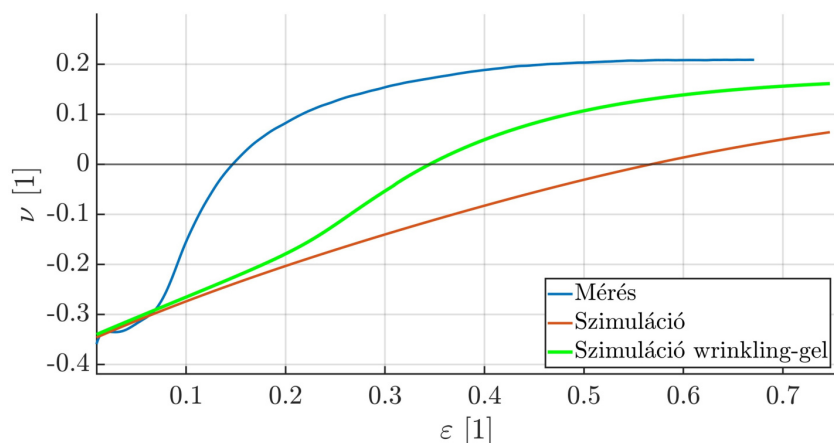
- **Peremfeltételek.** Az alsó felület befogása, valamint a középső felület (bal oldali) szimmetriaként definiálása konzisztens az eredeti szimulációkkal, a felső élre megadott elmozdulás azonban a két valós lépésben különböző beállítást igényel. Az előfeszítés során 1 mm-es elmozdulást, a második, kihajlás lépés során pedig ugyanennyit, viszont a "Buckle" opciót alkalmazva adtam meg.
- **Hálózás.** Az analízis helyessége szempontjából lényeges a hálózás, az elemtípus. Az elemméretet 0.5 mm-re állítottam be, ezzel legalább 3 elem lesz a vastagság mentén is. Az elemek típusa C3D8, ami egy kontinuum, szilárd, háromdimenziós, 8 csomópontos elem, ún. "hourglass control"-lal, ami az elemek túlzott torzulását akadályozza meg. Redukált integrálást nem alkalmaztam.
- **Sajátértékek, sajátvektorok kinyerése.** Az ezzel a lépéssel kapott eredmények a deformáció alakját, formáját jellemzik, a nagyságáról nem kapunk információt, azt a következő lépésben modellezem. A sajátvektorokat, amit majd implementálni kell, a modell kódjának manipulálásával exportáltam.

2. **Nemlineáris analízis.** Ehhez egy külön Abaqus modellt hoztam létre, amely esetében a geometria megegyezett az előbbivel, az anyagot azonban újra összenyomhatatlannak tekintettem. Ennél az analízisnél egy, nemlineáris, statikus lépést alkalmaztam, amely alatt 100 mm elmozdulást adtam rá a felső felületre, az eredeti vizsgálatokhoz hasonlóan. Az elemméret megegyezik a kihajlás modellben alkalmazottal, az elemtípus azonban más, C3D8H, tehát hybrid elemet alkalmaztam az összenyomhatatlanság kezelésére. A stabilitásvesztés eléréséhez meg kellett adni ún. tökéletlenségeket, amit ugyancsak a modell bemeneti kódjában lehetett előírni. Ebben az esetben több sajátvektort különféle súllyal adtam meg zavarásnak. Az eredményül kapott adatokat exportáltam, majd Matlab-ban dolgoztam fel.

Az imént ismertetett módszerrel kapott karakterisztikákat összehasonlítottam az eredeti, kétdimenziós analízis során kapottakkal, ezek a 34. és a 35. ábrán láthatóak.

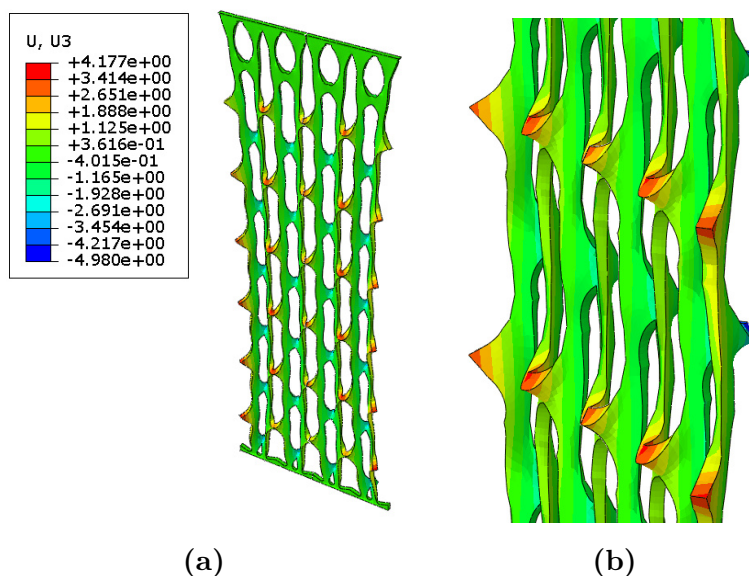


34. ábra. Erő-elmozdulás karakterisztika "wrinkling" figyelembevételével



35. ábra. Poisson-függvény "wrinkling" figyelembevételével

A fenti ábrákon látható, hogy az erőértékek szinte egyáltalán nem térnek el az eredetitől, ami megfelel a várakozásainknak, ebben nem is volt várható változás. Ami a Poisson-függvényt illeti, bár még mindig viszonylag nagyok az eltérések, lényegesen jobban közelíti a mért értékeket, mint kétdimenziós esetben, ami ebből a szempontból a modell hatékonyságát mutatja. Megjegyzendő, hogy az efféle kihajlás nagy precizitású elemzése komoly energia ráfordítást igényel, dolgozatomban a jelenség fontosságát szerettem volna kiemelni. A jelenséget vizuálisan a 36. ábra szemlélteti.



36. ábra. Ráncosodás (A síkon kívüli elmozdulás szerint színezve)

Összességében, az eredmények alapján elmondható, hogy sikerült megfelelő gyártási eljárást találni, valamint megbízható mérési, és numerikus környezetet kialakítani, így a módszer eddigi része későbbi, specifikusabb vizsgálatok alapjául szolgálhat.

7. Optimalizáció

Eddig a pontig bezárólag különböző auxetikus struktúrákat, azok kapcsán viszont csak egy-egy geometriai kialakítást vizsgáltam. Ez lényeges volt a metódus helyességének validálására, azonban az igazán jó tervezhetőség érdekében érdemes további elemzéseket végezni. Ezen dolgozat utolsó lépése egy geometriai optimalizáció, amit egy paramétersöprés formájában végeztem el, melynek eredményeként adott követelményekkel rendelkező alkalmazásra a kívánt jellegű struktúra optimális geometriával megtervezhető. A célom egy olyan rendszer megalkotása, amelyben könnyedén lehet a tulajdonságok előre definiált értéke alapján (adott Poisson-tényező adott axiális alakváltozásnál, stb.) meghatározni a geometriai felépítést. Erre a célra is Abaqus-t használtam, melyben precízen lehet parametrikus modelleket felépíteni, és kiértékelni. A szoftverben lehetőség van létrehozni, futtatni és kiértékelni olyan modelleket, melyek csupán a meghatározott paraméterek értékében térnek el egymástól, tehát információt biztosítanak a struktúrák viselkedéséről a tervezési tér egy adott pontjában. Ezek a pontok az egyes paraméterek lehetséges értékének változtatásával adódnak, úgy, hogy minden lehetséges variáció figyelembe van véve. A paramétersöprés az Abaqus modell forráskódjának Python [28] környezetben való ún. szkriptelésével, a kód megfelelő manipulálásával kivitelezhető.

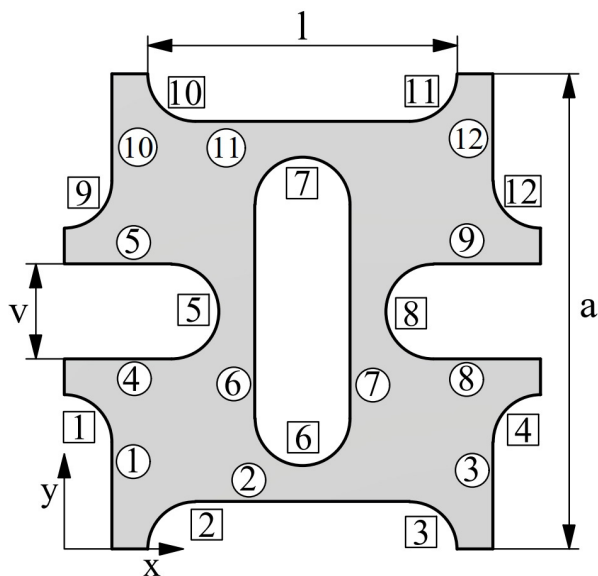
7.1. Geometria paraméterezése

Dolgozatomban a negyedik struktúrán végeztem parametrikus vizsgálatot, mivel a vizsgált karakterisztikákat együttesen tekintve ezen struktúra esetén voltak egymáshoz a legközelebb a mérési és a végeelem vizsgálat eredményei, így elmondható, hogy ez a legbiztosabban, leghatékonyabban tervezhető a négy közül. Az analízis létrehozásának lépési a következők:

1. "Bázis" modell megalkotása.
2. Forráskód generálása, majd manipulálása Python-ban.
3. Paraméterezett forráskód importálása, futtatása Abaqus-ban.
4. Eredmények exportálása, kiértékelése.

Az ún. "bázis" modell annyit takar, hogy a szoftver grafikus felhasználói felületén (GUI), az eddigiekhez hasonlóan felépítettem egy modellt, definiálva a geometriát, anyagtulajdonságokat, peremfeltételeket, stb. . Ezt a 6.1. fejezetnek megfelelően tettem meg, azzal az alapvető különbséggel, hogy ebben a fejezetben egy, az eddigiektől eltérő geometriájú struktúrát hoztam létre. Ennek oka az optimálisabb paraméterezhetőség volt, és hatása végülis csupán annyi, hogy az eredeti struktúra karakterisztikái nem szerepelnek az eredményekben. Az elemi cellák elosztása megegyezik az eredeti próbatestével (6 x 6), méretük azonban más, oldalanként $a = 8$ mm. Így a végső modell 48 mm x 48 mm lett. Változtatandó paramétereknek a kivágások hosszát és szélességét választottam, amit a 37. ábrán láthat az olvasó. A bázis modell geometriájának

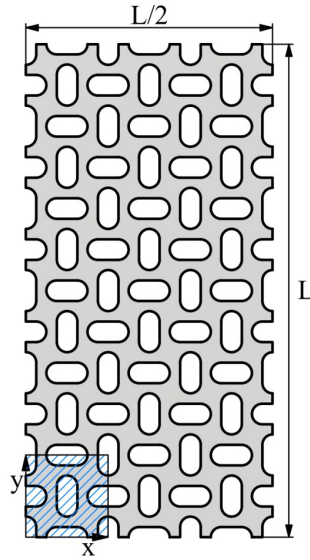
létrehozása (megrajzolása) evidensnek tűnik, azonban az ezzel kapcsolatos megfontolások is lényegesek az optimális modellezés szempontjából. A későbbi forrásfájl ugyanis úgy generálódik, ahogy a modellben változtatásokat végzünk, tehát a geometria megrajzolása során felvett vonalak, élek abban a sorrendben jelennek majd meg, ahogy mi felvettük őket, továbbá az esetleges törléseknek, változtatásoknak is saját része van a kódban. A későbbi munka megkönnyítése miatt tehát fontos a vázlat jól átgondolt megalkotása.



37. ábra. Elemi cella

Ennek érdekében először a bal alsó egységcellát alkottam meg, amin belül is az egyeneseket, meghatározott és dokumentált sorrendben, majd a köríveket vettem fel, ugyanilyen szisztema szerint. Mindez a 37. ábrán látható. Az egyenesek kör alapon, a körívek pedig négyzet alapon számozottak. A következő lépés egy lineáris kiosztás ("Linear Pattern") volt, amivel lényegében sokszorozom a létrehozott geometriát. Ezt vízszintes irányban háromszorosra (a szimmetria miatt), függőleges irányban pedig hatszorosra állítottam be. Azért is nagyon fontos ez a lépés, mert így csak az első cella pontjait kell majd paraméterekkel ellátni, a szoftver automatikusan változtatni fogja a minta további celláit is. Végül a geometriát lezáró egyeneseket vettem fel, a koordináta rendszer kezdőpontjától az óramutató járásával ellentétesen körbe haladva. Így végül megkaptam a 38. ábrán látható geometriát, amit a végeselem szimulációk során alkalmaztam, mint referencia modell.

További eltérés az eredeti szimulációkhoz képest a peremfeltételek megadása volt. Először is az alsó többlet anyag elhagyása miatt, ez azonban csak kis változtatásokat követelt meg, a tartományok definiálásában. További változtatás az elmozdulás nagysága, ezt 100 mm helyett 80 mm-ben állapítottam meg, a túl nagy megnyúlások elkerülése miatt. Végül pedig a hálózás kapcsán kell megemlíteni, hogy az általános hálóméretet 0,15 mm-nek választottam, hogy minden generált geometria esetén legyen elég elem az élek között.



38. ábra. A "bázis" modell teljes geometriája

A modell megalkotása után létrehoztam a forráskódját, majd azt Python környezetben paramétereztem. Fontos megemlíteni, hogy a szoftver az egyeneseket, köríveket a két szélső pontjukkal definiálja, így a tényleges paraméterezésnél ezeket tudjuk manipulálni. Emiatt az objektumok irányítottsága is jelentőséggel bír. A paraméterezést végre kellett hajtani az elemi cella összes egyenesére, körívére, valamint a lineáris kiosztás után felvett szélső egyenesekre. Ez alapvetően úgy zajlott, hogy felvettem két paramétert, pm_l -t és pm_v -t, amik ebben a sorrendben a kivágások hosszát, valamint szélességét változtatják. Fontos megemlíteni, hogy pm_l növeli a hosszt, pm_v pedig csökkenti a szélességet. Létrehoztam egy olyan hurkot a programkódban, ahol ezen paramétereket léptetem, méghozzá egyenként 5 db diszkrét értékkel ($pm_l = 1 \dots 6$, $pm_v = 1 \dots 6$). Ezt a diszkrét elemi állandót k -val jelöltem ($k = 0, 1$). A paraméterezést a 37. ábrán szereplő hatos egyenesen és kettős köríven mutatom be, ebben a sorrendben. A többi objektum definiálása ezekhez hasonlóan zajlott. A hatos egyenes két végpontja:

$$L_6^1 = (3 + (pm_v - 1)k; 3 - (pm_l - 1)k), \quad (38)$$

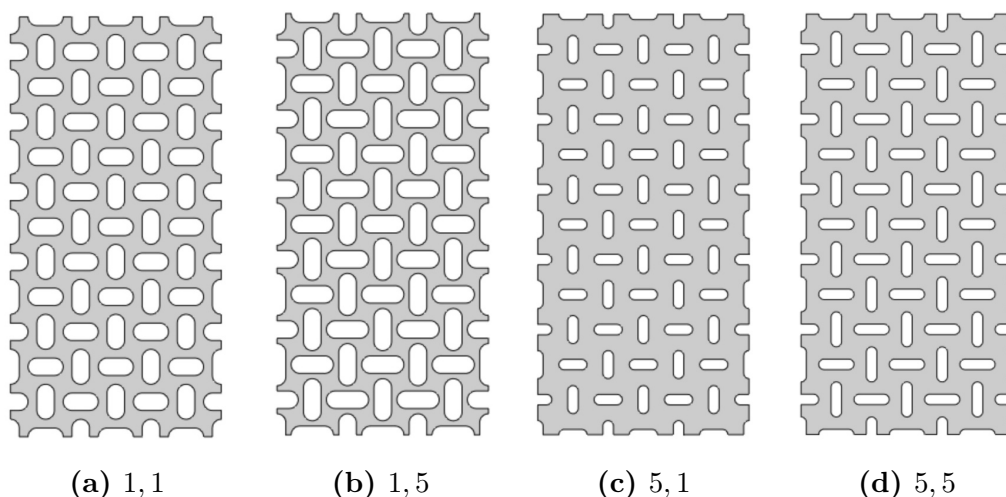
$$L_6^2 = (3 + (pm_v - 1)k; 5 + (pm_l - 1)k), \quad (39)$$

ahol a számértékek a pontok eredeti pozíciói, az egyenes kezdőpontja pedig a vízszintes irányban lejjebb elhelyezkedő. A kettős körív paraméterezése valamivel bonyolultabban valósult meg.

$$A_2^1 = (3 - (pm_l - 1)k; 1 - (pm_v - 1)k), \quad (40)$$

$$A_2^2 = (2 - (pm_l - 1)k + (pm_v - 1)k; 0). \quad (41)$$

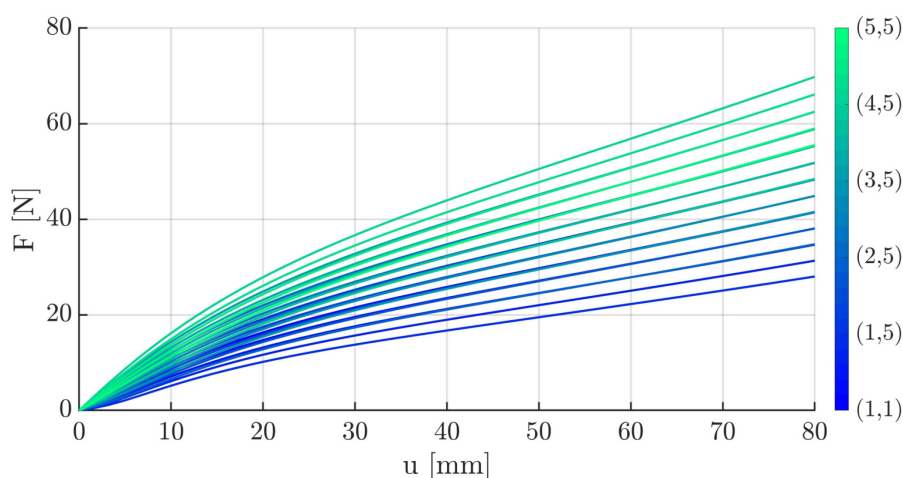
Ebben az esetben a felső pont a kiindulás, az alsó pedig a körív végén helyezkedik el. Végül 25 db különféle geometriájú modellt kaptam, melyekre példákat a 39. ábrán láthat az olvasó.



39. ábra. Minta konfigurációk (pm_v és pm_l értékekkel)

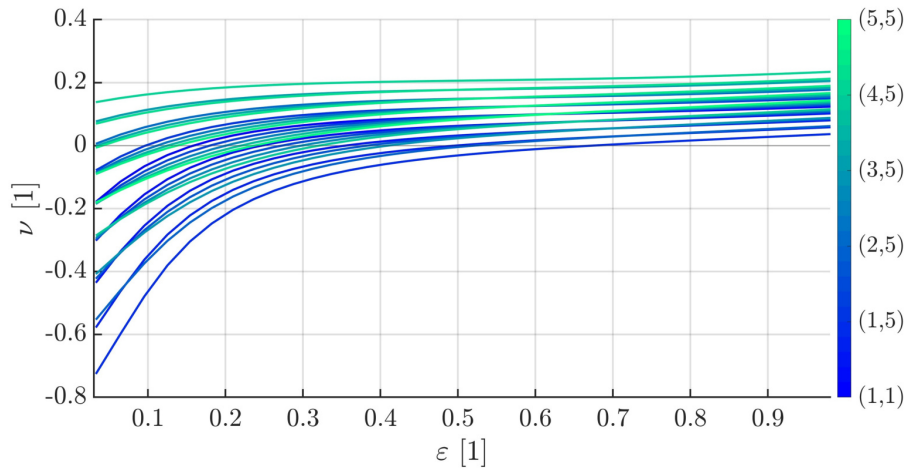
7.2. Kiértékelés, eredmények

Az eredményül kapott adatsorokat ebben az esetben is Excel munkafüzetekbe exportáltam, majd Matlab-ban értékeltem ki. A 25 db erő-elmozdulás és a 25 db Poisson-tényező, hosszirányú megnyúlás karakterisztikát egy-egy diagramon ábrázoltam, melyek alább láthatóak (40., 41. ábra).



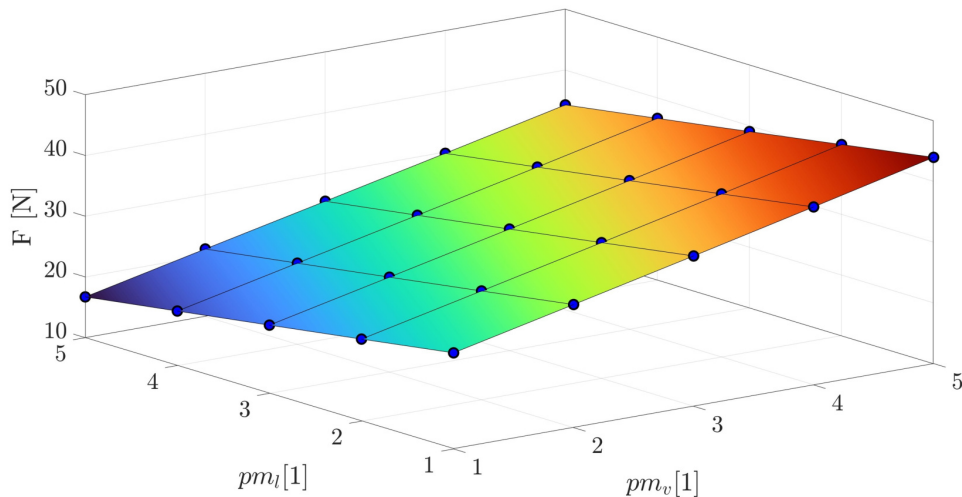
40. ábra. Erő-elmozdulás karakterisztikák (pm_v , pm_l)

A jobb oldali színskála mellett a paraméterek értékei láthatóak, ez alapján beazonosíthatóak az egyes görbék. Az erőértékek nagyban eltérnek a különböző struktúrák esetén, ebből is látható, hogy milyen jelentős szerepe van a kivágások formájának, nagyságának. A karakterisztikákból következtethetünk a geometriai kialakítás próbatestek merevségi tulajdonságaira gyakorolt hatására. A jelleg minden esetben hasonló, vagy akár azonosnak is lehet mondani (szigorúan monoton nő), az értékek eltéréseiből pedig láthatjuk az egyébként várt tendenciát, miszerint a kisebb területű, és minél inkább kört formázó perforációk esetén a legmerevebb a struktúra.



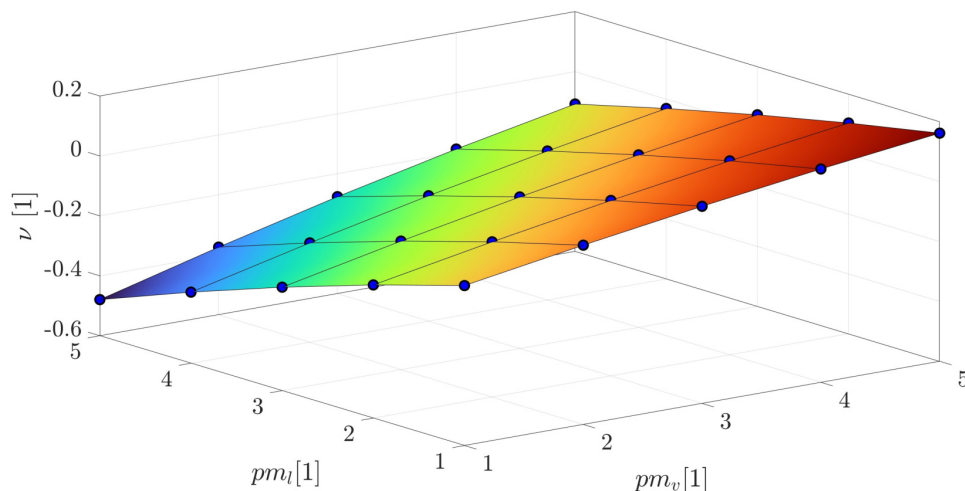
41. ábra. Poisson-tényező karakterisztikák (pm_v, pm_l)

A hosszirányú alakváltozás láthatóan nagyobb, mint eredeti esetben, ezen kívül megfigyelhető, hogy sok geometriai kialakítás esetén a Poisson-tényező egyáltalán nem, vagy csak nagyon kis tartományon vesz fel negatív értékeket, azaz a struktúra nem auxetikus. Ezt a viselkedést a struktúra húzás esetén kialakuló mechanizmus-szerű alakváltozásának tudhatjuk be, ami a szerkezetek kis elemi szegmenseinek egyfajta forgó mozgásából adódik. A 39. ábra (b.) részén szereplő struktúra esetén például a kivágások közti anyagrészek könnyebben elfordulnak saját tengelyük körül, mint az ettől jobbra (c.) elhelyezkedő darabnál, ezzel előbbi esetében meghatározóbb az auxetikus jelleg. Ez is jól illusztrálja a megfelelő kialakítás fontosságát. A következő két ábrán (42., 43.) az adatokat felület formájában jelenítettem meg. Ábrázoltam a húzóerőt a paraméterek értékeinek függvényében, adott elmozdulásnál, minden kialakítás esetén. Összesen tehát 25 pontot kaptam, melyekre illesztettem egy felületet, ami gyakorlatilag egy síkot eredményezett, továbbá magukat a pontokat is megjelenítettem a diagramokon. Jól megfigyelhető, hogy az erő akkor a legnagyobb, ha pm_v értéke maximális (5), pm_l értéke pedig minimális (1), azaz a kivágások a lehető legkisebbek. Ugyanezen logika alapján a minimum pont a paraméterek pontosan ellenkező állapotában található.



42. ábra. Az erő értéke a paraméterek függvényében ($u = 40$ mm)

Az adott hosszirányú alakváltozásnál vett Poisson-tényező értékek a 43. ábrán láthatóak, az illesztett felülettel együtt. Jól látszik, hogy egyes kialakítások esetén pozitív, míg mások esetén negatív értékek adódtak. A felület maga ebben az esetben már nem sík, bizonyos mértékben domború. Érdekes megfigyelni, hogy a legkisebb erőértékhez a leginkább auxetikus, a legnagyobbhoz pedig a legkevésbé auxetikus, egy teljesen hagyományos jelleg tartozik a Poisson-tényező alapján.



43. ábra. Az Poisson-tényező értéke a paraméterek függvényében ($\varepsilon = 0, 1$ [1])

Az előzőekben bemutatott diagramok alapján megvalósítható egy ún. inverz tervezési eljárás, azaz a tulajdonságokból meghatározható egy adott struktúra geometriája. Összességében elmondható, hogy a paramétersöprés is lényeges és hasznos információkkal bír, a tervezési folyamat és a megalkotott metódus fontos eleme. Több struktúrán lefolytatva megalkotható lenne akár egy adatbázis is, tetszőleges számú paraméter variálásával.

8. Összefoglalás

8.1. Eredmények

A dolgozat szempontjából releváns szakirodalom áttekintése után a struktúrák kiválasztása és modellezése következett, majd a lézervágó géppel megfelelő pontossággal és gyorsasággal sikeresen legyártásra kerültek az auxetikus, valamint az anyagmodell illesztéséhez szükséges szabványos szilikon próbatestek. Utóbbiakon húzóvizsgálatokat végeztem három különböző húzási sebességgel, ezeket felhasználva közvetett módon vettem figyelembe a viszkoelasztikus hatást. Végül egy harmadrendű, összenyomhatatlan, Ogden-féle hiperelasztikus anyagmodellt illesztettem a mérési eredményekre, a későbbi végeselem vizsgálatok során ezzel modelleztem az alapanyag viselkedését. Az auxetikus próbatesteken is egytengelyű húzókísérleteket végeztem, melynek eredményeként erő-elmozdulás, és Poisson-függvényeket kaptam. Ezek igazolják a struktúrák kiválasztásának helyességét, mivel jellegben és számértékekben is eltérő karakterisztikák adódtak. A végeselem vizsgálatoknál is ugyanezekre a jellemzőkre voltam kíváncsi. Az eredményeket összehasonlítva megállapítható, hogy azok a módszer összetettsége ellenére jól illeszkednek, így elmondható, hogy sikerült megbízható mérési és szimulációs környezetet kialakítani, melyre támaszkodhatunk a későbbi tervezési folyamatok során. Végül a geometria változásának vizsgálatára elvégeztem egy ún. paramétersöprést, ami lényeges információkkal szolgál egy bizonyos tulajdonságokat megkövetelő probléma esetén, lehetővé tesz egyfajta inverz tervezési eljárást. Összességében elmondható, hogy egy összeszedett, jól használható és megbízható módszert sikerült kialakítani, ami alapul szolgálhat konkrét auxetikus elemek fejlesztéséhez. A dolgozat új tudományos eredményeit bemutattam a 39. DAS Konferencián ("39th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics"), melynek fő profilja a szilárd testek mechanikája, azok mérésekkel történő vizsgálata. Az előadás címe Auxetikus Struktúrák Mechanikai Modellezése és Analízise ("Mechanical Modelling and Analysis of Auxetic Structures") volt.

8.2. Javaslatok

A témakör és a módszer újszerűsége miatt számos fejlesztési lehetőség merülhet fel. A metódus lépéseinek akármelyikét kicserélve értékes információkkal gazdagodhatunk. Az egyik fontos irányvonal a háromdimenziós struktúrák vizsgálata, ezzel új technikákat is bevezetve, az eljárás alapvető felvetéseit megtartva. Ezen túl más alapanyag választása is új dimenziókat hozhat a kutatásba. A dolgozat nem érinti az auxetikus anyagok másik fontos terhelési esetét, érdemes lehet nyomó igénybevételnek alávetve is elemezni ezen metaanyagokat. Végül, de nem utolsó sorban akár a meglévő dolgozatot, akár magát a módszertant is színesítené egy valós alkalmazási példa elemzése mérésekkel, vagy numerikus analízissel. Ez azonban mind csak a jéghegy csúcsa, reményeim szerint már az olvasó is látja, hogy mekkora potenciál és mennyi lehetőség rejlik ezekben a struktúrákban, és miért érdemes időt és energiát fektetni a kutatásukba.

Summary

The primary goal of this study was to develop a methodology for better designability and to further extend the potential application areas of auxetic materials and structures.

After a detailed overview of the relevant literature, the first step of the study was designing the geometry of the structures in a CAD system. Then, the four auxetic, and some standardized specimens (for the fitting of the material model) were manufactured from silicone plates by a special laser cutting machine. Uniaxial extension was performed on the recent ones, with three various rates of deformation, and then I took the so-called viscoelastic effects into consideration in an indirect way, with the help of the results of the measurements. As the final step of this part, I implemented a third-order incompressible Ogden hyperelastic constitutive model to characterize the mechanical behavior of the base material. I performed uniaxial tensile tests on the auxetic specimens as well, where the force-displacement, and the Poisson-ratio functions were the investigated characteristics. It can be said that the designed geometries were properly chosen based on the differences in the nature and numerical values of the functions. After performing the corresponding finite element simulations, I evaluated and compared the results of the two analysis types. Despite the complex nature of the methodology, the results show a good agreement, hence it can be established that a reliable experimental and numerical environment were successfully developed. The last step was developing a method with which the proper geometry can be designed for a given application. A parametric study was carried out for one of the designed structures, changing two geometrical parameters of the second structure. A high variation in the results can be observed, therefore the parametric study provides important and useful information, it enables a kind of an inverse development strategy.

As a consequence of the novelty and complexity of the methodology, it comes with a huge development potential. To mention some of the possible paths, choosing different structure type (3D), manufacturing process (additive technologies), type of loading (uniaxial compression), evaluation technique, can bring new dimensions to the research. Moreover, showing the operation and benefits of the methodology by the creation of an actual application example could also enhance the significance of the study. The overall conclusion is that a highly exploitable and reliable design methodology was developed in this study, which could be utilized in the design of real auxetic parts, and also shows the massive potential and possibilities these kind of materials have.

Keywords: Auxetic Structures, Constitutive Model, Experiments, Finite Element Analysis

Irodalomjegyzék

- [1] Simulia Abaqus 2022. Dassault Systèmes Simulia Corp., Vélizy-Villacoublay, Franciaország, 2022. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>.
- [2] A. Kossa. *Szilárdságtan Jegyzet*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék, 2018.
- [3] Madhu Balan P; Johnney Mertens A; M. V. A. Raju Bahubalendruni. Auxetic mechanical metamaterials and their futuristic developments: A state-of-art review. *Elsevier BV*, 2023.
- [4] Zhengyang Zhanga; Hanxing Zhua; Ru Yuanb; Sanmin Wangb; Tongxiang Fanc; Yacine Rezguia; Di Zhangc. Auxetic interpenetrating composites: A new approach to non-porous materials with a negative or zero poisson's ratio. *Elsevier BV*, 2020.
- [5] Chuanwei Huang; Lang Chen. Negative poisson's ratio in modern functional materials. *Advances Materials*, 2016.
- [6] M. Abbaslou; R. Hashemi; E. Etemadi. Novel hybrid 3d-printed auxetic vascular stent based on re-entrant and meta-trichiral unit cells: Finite element simulation with experimental verifications. *Elsevier BV*, 2023.
- [7] Érelzáródás. <https://www.tromboziskozpont.hu> (Látogatás dátuma: 2023.10.07.).
- [8] Yulin Jiang; Kun Shi; Luonan Zhou; Miaomiao He; Ce Zhu; Jingcheng Wang a; Jianhua Li; Yubao Li; Limin Liu; Dan Sun; Ganjun Feng; Yong Yi; Li Zhang a. 3d-printed auxetic-structured intervertebral disc implant for potential treatment of lumbar herniated disc. *Elsevier BV*, 2023.
- [9] Xin Ren; Dong Han; Long Sun; Xue Gang Zhang; Wei Jiang; Zhi Tao; Yi Min Xie; Fan Yang; Guo Xing Lu. Experimental and numerical investigations of aluminum foam-filled auxetic circular tubular metamaterials with elliptical cells. *Elsevier BV*, 2023.
- [10] Dong Han; Yi Zhang; Xiang Yu Zhang; Yi Min Xie; Xin Ren; Fan Yang; Guo Xing Lu. Lightweight auxetic tubular metamaterials: Design and mechanical characteristics. *Elsevier BV*, 2022.
- [11] Qingsong Wang; Zhenyu Yang; Zixing Lu; Xiang Li c. Mechanical responses of 3d cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression. *Elsevier BV*, 2020.
- [12] C. Comi D. Faraci, L. Driemeier. Bending-dominated auxetic materials for wearable protective devices against impact. *Springer International Publishing*, 2020.
- [13] Yafeng Chang; Hui Wang; Qinxi Dong. Machine learning-based inverse design of auxetic metamaterial with zero poisson's ratio. *Elsevier BV*, 2022.

- [14] B. Grossi; H. Palza; J. C. Zagal; C. Falcón; G. During. Metarpillar: Soft robotic locomotion based on buckling-driven elastomeric metamaterials. *Elsevier BV*, 2021.
- [15] Pan Q.; Chen S.; Chen F.; Zhu X. Programmable soft bending actuators with auxetic metamaterials. *Sci. China Technol. Sci*, 2020.
- [16] Ahmad Rafsanjani; Damiano Pasinib. Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs. *Elsevier BV*, 2016.
- [17] Autodesk Inventor 2023. Autodesk Inc., San Francisco, California, Amerikai Egyesült Államok, 2023. <https://www.autodesk.com/>.
- [18] Lézervágás. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Lézervágás> (Látogatás dátuma: 2023.10.11.).
- [19] Lézer. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Lézer> (Látogatás dátuma: 2023.10.11.).
- [20] Lézervágó berendezés. Unisonic Kft., Alfalaser. <https://www.alfalaser.hu/>.
- [21] A. Kossa. *Continuum Mechanics Jegyzetek*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék, 2022.
- [22] Instron 3345 univerzális mechanikai anyagvizsgáló berendezés. Instron. <https://www.instron.com/en-us/service-and-support/resources/serial-number-locator/3345-machine>.
- [23] Ayoub Ouardi; Adnane Boukamel; Nouredine Damil. A model for hyperelastic rubber-like materials based on micro-mechanical elements. *Elsevier BV*, 2023.
- [24] Matlab R2022a (version: 9.12.0). The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, Amerikai Egyesült Államok, 2022. <https://www.mathworks.com>.
- [25] Matlab, fminsearch. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html> (Látogatás dátuma: 2023.10.15.).
- [26] Microsoft Excel. Microsoft Corp., Redmond, Washington, Amerikai Egyesült Államok, 2023. <https://www.microsoft.com/hu-hu>.
- [27] K. Floch; A. Kossa. Motion tracker beta: A gui based open-source motion tracking application. *SoftwareX* 23, 2023.
- [28] Lutz M.; D. Ascher. Learning python. *O'Reilly and Associates, Inc.*, 1999.
- [29] Rita Valente de Carvalho. *Wrinkling of thin sheets under tension*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015. Mesterképzés, Diplomamunka.