



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Hidak és Szerkezetek Tanszék**

**Építőmérnöki Kar**

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Tudományos Diákköri Konferencia 2021**

**Tartószerkezeti szekció**

**Nagyméretű üveggerenda kísérleti és numerikus vizsgálata**

**Gulyás Gabriella**

**Szerkezet-építőmérnök MSc hallgató**

**Konzulensek:**

**Dr. Kollár Dénes, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék**

**Dr. Horváth László, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék**

**Budapest**

**2021**

---

## Összefoglaló

Az üveg tartószerkezeti alkalmazása Magyarországon is egyre inkább elterjedőben van. A nagyméretű üveg tartószerkezetekhez gyakran kísérleteket végeznek, hogy a választott számítási módot igazolni tudják, illetve, hogy a szerkezet viselkedéséről pontosabb képet kaphassanak.

TDK dolgozatom témáját egy tartószerkezet céljára készült üveggerenda laboratóriumi kísérleti vizsgálata alapozta meg. A kísérletben a kéttámaszú üveggerenda 4000 mm elméleti támaszközű volt. 12 üvegrétegből készült, egy-egy réteg 10 mm vastagságú, közöttük egyenként  $2 \times 0.76$  mm vastagságú ragasztófólia található. A mérés célja egyrészt a tartó lehajlásának, másrészt kitüntetett pontokban a nyúlásoknak – különös tekintettel a felfüggesztési csomópont környezetében – regisztrálása volt egyidejűleg működő függőleges és vízszintes teher hatására.

A kísérlet mellett a tervezők végeselemes modellt készítettek a mérési adatokkal történő összehasonlíthatóság érdekében. Modelljükben az üvegrétegeket egyszerűsített módon, egyetlen héjként modellezték.

A kísérletek során tapasztaltakból, és a mérési eredményekből látható volt, hogy a gyártás és a beépítés során is kerülhetnek a szerkezetbe olyan minimális mértékű imperfekciók, melyek szerepet játszhatnak az egyes rétegek és az egész szerkezet erőjátékában.

Célom, hogy az egyes üvegrétegek és fóliarétegek külön modellezésével egy pontosabb modellt készítsek, majd különböző típusú és mértékű imperfekciók alkalmazásával vizsgáljam az üveggerenda viselkedését. Dolgozatomban összehasonlítom a tervezők által készített héjmodellt, a kísérleti mérési eredményeket, és az általam készített testelemes modell esetén számított eredményeket.

---

## Abstract

Application of glass in structural design is becoming more and more widespread in Hungary as well. For large glass structures, experiments are often performed to verify the chosen calculation methods or to get a more accurate picture of the behaviour of the structure.

The topic of my study is based on the laboratory experimental study of a glass beam prepared for a large-scale structure. In the experiment, the 12-layer glass beam supported at both ends had a theoretical span of 4000 mm. Each adhesive layer is  $2 \times 0.76$  mm thick, between glass layers with thickness of 10 mm. The purpose of the experiment was, on the one hand, to record the deflection of the beam; on the other hand, the strains at specific points, particularly in the vicinity of the suspension node, under the effect of both vertical and horizontal loads acting simultaneously.

In addition to the experiment, the designers created a finite element model for comparison with the measurement data. They modelled the glass layers in a simplified way, as a single shell.

From the experiences during experiments and the measurement results, it was seen that a minimal imperfection in the structure cannot be avoided during manufacturing and installation, which can participate in the structural behaviour of each layer and the whole structure.

My goal is to develop an accurate numerical model by modelling separately each glass and adhesive layer, and then to investigate the behaviour of the glass beam using different types and degrees of imperfections. In my study, a comparison is made between the shell model made by the designers, the experimental measurement results, and the results calculated for the developed advanced solid element model.

## Tartalomjegyzék

<b>1</b>	<b>Bevezetés .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Problémafelvetés.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Szakirodalom-kutatás .....</b>	<b>7</b>
3.1	Az üveg mint építőanyag .....	7
3.2	Méretezési módszerek .....	8
3.2.1	Megengedett feszültségek módszere.....	9
3.2.2	Osztott biztonsági tényezős módszer .....	9
3.2.3	Egyéb módszerek .....	10
3.3	Korábbi kísérletek.....	10
3.3.1	Pontmegfogású üvegek laboratóriumi vizsgálata .....	10
3.3.2	Laminált szerkezeti üveglapok végeelemes vizsgálata PVB réteg esetén .....	12
3.4	Üvegszerkezetek numerikus modellezése .....	14
<b>4</b>	<b>Vizsgált szerkezeti kialakítás.....</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Numerikus modell bemutatása .....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Numerikus modell verifikációja.....</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Numerikus modell validálása .....</b>	<b>24</b>
7.1	Analitikus eredmények .....	24
7.2	Tervezők egyszerűsített numerikus modellje [9].....	25
7.3	Mérési eredmények [8].....	28
7.3.1	ST-01 tehereset .....	28
7.3.2	ST-06 tehereset .....	32
7.3.3	ST-07 tehereset .....	36
<b>8</b>	<b>Numerikus paramétervizsgálat.....</b>	<b>40</b>
8.1	Üvegréteg vastagsága .....	40
8.1.1	Üvegréteg vastagság növelése (+0.3mm/réteg).....	40
8.1.2	Üvegréteg vastagság csökkentése (-0.3mm/réteg).....	41
8.2	Kardosság .....	41
8.3	Csap ferdesége .....	43
<b>9</b>	<b>Konklúziók.....</b>	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>47</b>
<b>11</b>	<b>Hivatkozások.....</b>	<b>48</b>

---

## 1 Bevezetés

Rendkívül esztétikus megjelenése miatt az üveg tartószerkezeti alkalmazása napjainkban világszerte nagy népszerűségnek örvend, Magyarországon is egyre inkább elterjedőben van. A mechanika fejlődésének köszönhetően az üveg felhasználása szinte valamennyi szerkezeti elem esetén lehetséges. Az üveg szilárdsága jelentős, bár a legtöbb vonatkozó építőipari szabvány a rideg viselkedése miatt nagymértékben lekorlátozza azt. [1,2]

Az üveg tartószerkezeti méretezésére egyes országokban különböző módszerek léteznek, mivel közös Eurocode szabvány nincs. A nagyméretű üveg tartószerkezetekhez gyakran kísérleteket végeznek, hogy a választott számítási módot igazolni tudják, illetve, hogy a szerkezet viselkedéséről pontosabb képet kaphassanak.

Dolgozatom témáját egy tartószerkezet céljára készült üveggerenda laboratóriumi kísérleti vizsgálata alapozta meg. A kísérletben a kéttámaszú üveggerenda 4000 mm elméleti támaszközű volt, 12 üvegrétegből készült, egy-egy réteg 10 mm vastagságú, közöttük egyenként  $2 \times 0.76$  mm vastagságú ragasztófólia található. A mérés célja egyrészt a tartó lehajlásának, másrészt kitüntetett pontokban a nyúlásoknak – különös tekintettel a felfüggesztési csomópont környezetében – regisztrálása volt egyidejűleg működő függőleges és vízszintes teher hatására.

A kísérlet mellett a Tervezők végeeselemes modellt készítettek a mérési adatokkal történő összehasonlíthatóság érdekében. Modelljükben az üvegrétegeket egyszerűsített módon, egyetlen héjként modellezték.

A kísérletek során tapasztaltakból, és a mérési eredményekből látható volt, hogy a gyártás és a beépítés során is kerülhetnek a szerkezetbe olyan kismértékű imperfekciók, melyek szerepet játszhatnak az egyes rétegek és az egész szerkezet erőjátékában.

Célom, hogy az egyes üvegrétegek és fóliarétegek külön modellezésével egy pontosabb modellt készítsék, majd háromféle imperfekció (kardosság, rétegvastagság gyártási toleranciája, csapferdeség) alkalmazásával vizsgáljam az üveggerenda viselkedését. Dolgozatomban összehasonlítom a Tervezők által készített héjmodell, a kísérleti mérési eredmények, és az általam készített testelemes modell esetén számított eredményeket.

## 2 Problémafelvetés

Üveg tartószerkezeti elemek laboratóriumi vizsgálatait végezték el a BME Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban, a kísérleteken lehetőségem volt részt venni. A kísérletek egyike során egy nagyméretű üveggerenda viselkedését vizsgálták különböző terhelési esetekben.

A laboratóriumi vizsgálatok során érzékelhető volt, hogy egy ekkora üveggerenda mennyire érzékeny a gyártás és beépítés során keletkező imperfekciókra.

Ha nem megfelelő a támaszok kialakítása, vagy a gerendában elhelyezett acél csap ferdén, esetleg a gerenda keresztirányú imperfekcióval kerül beépítésre, akkor ezek a hatások a mérési eredményekben megmutatkozhatnak, a külső üvegrétegek elrepedhetnek, és megváltozhat az erőjáték. Ebben az esetben (bepedte külső üvegréteg), a terhelés várhatóan a többi üvegrétegre oszlik el, amennyiben a ragasztófólia megfelelően lett kiválasztva, és rendelkezik a szükséges paraméterekkel.

A kísérlet alatt tapasztaltak miatt merült fel a kérdés, hogy vajon mennyire jelentős az egyes imperfekciók hatása a szerkezet erőjátékára, mekkora imperfekciók viselésére képes a szerkezet, illetve, hogy a beépítés során mennyire fontos a precizitás, hiszen még laboratóriumi körülmények között is szemmel látható beépítési imperfekciókkal kell számolni.

Ezek a kérdések adták TDK dolgozatom alapját, melyhez Dr. Horváth László tanár urat – aki a kísérletek vezette az egyetemen – kértem fel konzulensnek a BME Hidak és Szerkezet Tanszékről. A kérdések mentén elkezdtünk többféle lehetséges vonalat felvázolni. A virtuális kísérletekhez tartozó numerikus modellek elkészítésében segítséget nyújtott a tanszékről Dr. Kollár Dénes. Egyeztetéseket követően a következő irányba indultunk el: elkészítjük a tökéletes szerkezet modelljét ANSYS végeeselemes programban, majd a kísérleti tapasztalatok, a gyártás, valamint a beépítés során létrejövő lehetséges pontatlanságok alapján megvizsgáljuk, hogy mekkora hatása van a különböző típusú és mértékű imperfekcióknak a gerenda erőjátékára.

### 3 Szakirodalom-kutatás

#### 3.1 Az üveg mint építőanyag

Az üveg izotróp, nem kristályos szerkezetű, szilárd, amorf építőanyag, mely lineárisan rugalmasan viselkedik a törésig. [1] A szerkezeti üvegeket előállítási módjuk alapján az alábbi három főcsoportba sorolhatjuk: úsztatott (float) üveg, hőkezelt üveg, edzett üveg. Emellett azonban bizonyos szerkezeti megoldásokhoz előállítanak speciális üvegeket is (pl. kémiai úton edzett üveg). [2][7]

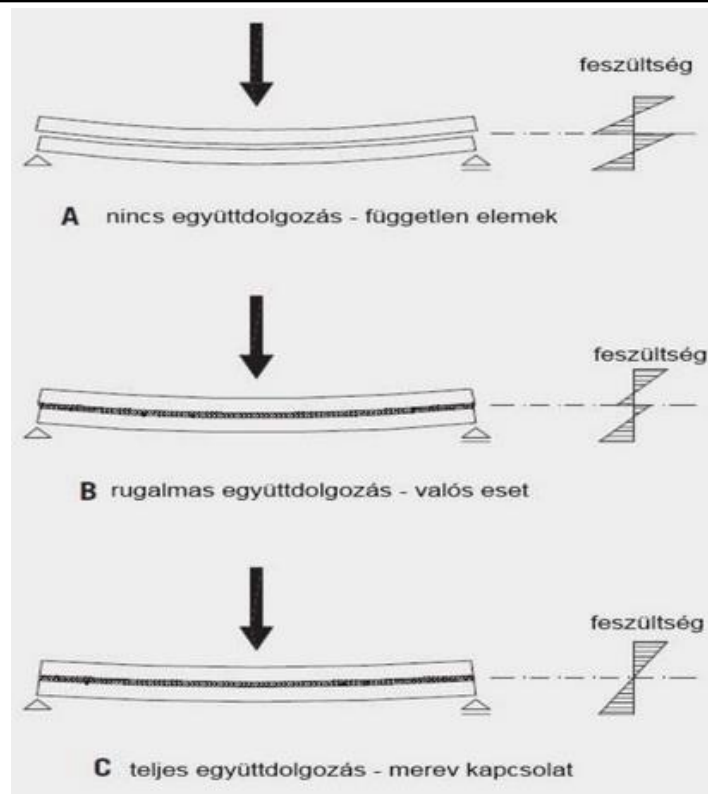
Az üveg nem képes képlékeny alakváltozásra, rideg, legfőbb tönkremeneteli típusa a törés, mely előjel nélkül, hirtelen következik be. Rendkívüli érzékeny a gyártási és beépítési pontatlanságokra, azok jelenléte nagymértékben növelik a törés valószínűségét. A felületi hibák, a túl gyors terhelési sebesség, a nem megfelelő hőmérséklet és a korrozív környezet mind-mind növeli az üveg törési hajlamát. Az üvegszerkezeteken gyártásból és beépítésből származó mikrorepedések találhatók, melyek terhelés hatására a nyomott oldalon bezáródnak, míg a húzott oldalon szétnyílnak, majd repedések keletkeznek belőle. Ezekből a repedésekből pedig a keresztmetszetcsökkenés hatására kialakul a törés. [2]

A szerkezeti üveg rugalmassági modulusa általánosan 70 GPa, Poisson-tényezője 0.23. Felületi nyomószilárdsága a gyártási típustól függően 500-800 MPa. Egyéb szilárdsági értékek az **1. táblázatban** láthatók. [2]

1. táblázat: Üveg szilárdsági értékek [2]

Üveg gyártási típusa	Felületi nyomófeszültség átlagértéke [MPa]	Hajlítószilárdság karakterisztikus értéke [MPa]	Gyártási vastagság [mm]
úsztatott üveg	-	45	2-20
hőkezelt üveg	35-55	70	4-12
edzett üveg	100-150	120	4-19

Az üveg előnytelen tulajdonságainak hatását csökkenthetjük, ha többrétegű üvegszerkezetet alkalmazunk. Ebben az esetben az üvegrétegek között valamilyen lamináló anyag található, amelynek köszönhetően a rétegek együttdolgoznak, növelve ezzel a szerkezet teherbírását. Fontos azonban megjegyezni, hogy a lamináló anyagnak megfelelő nyírószilárdsággal kell rendelkeznie, hogy az együttdolgozást biztosítani tudja. Az **1. ábrán** látható (megfelelő lamináló anyag esetén) a feszültségviszonyok kedvező alakulása. [2]



1. ábra: Többrétegű üvegek teherviselése [2]

Mechanikai szempontból az egyrétegű és laminált többrétegű üveglapokat külön kell kezelni. Az egyrétegű üveg rugalmas viselkedése egy alapvető szilárdsági feladat. Ezzel szemben a többrétegű üveglapok esetén a közbenső laminálólapok által létrehozott többletteherbírás számítása egy bonyolult folyamat. [2][6]

### 3.2 Méretezési módszerek

Az üveg tartószerkezetekre méretezésére általánosan nincs szabvány érvényben, ezért tervezésük során a speciális anyagi tulajdonságait figyelembe véve különböző ajánlásokat, ökölszabályokat, esetleg külföldi szabványokat alkalmaznak. Ezek sokszor táblázatok, melyek az alkalmazható üvegezések paramétereit tartalmazzák. [3]

Gyakran alkalmazzák a német nemzeti szabványokat, melyek külön kötetben foglalkoznak a vonalmentén megtámasztott, a pont megfogású, a kizuhanás elleni és a járható üvegezésekkel: [2]

- DIN 18008-1:2010 Fogalmak és általános szabályok
- DIN 18008-2:2010 Vonalmentén megtámasztott üvegezés (TRLV)
- DIN 18008-3:2013 Pont megfogású üvegezések (TRPV)
- DIN 18008-4:2013 Kizuhanás elleni üvegezések (TRAV)
- DIN 18008-5:2013 Járható üvegfelületek



Emellett a Magyar Mérnöki Kamara kiadott egy szabályzatot, mely nem minősül szabványnak: „Üvegszerkezetek tervezése Műszaki Szabályzat”. [2]

Üvegszerkezetek terhei az MSZ EN 1991 szabványsorozat alapján vehetők fel. A terhek kombinációi a méretezési módszer alapján számítandók. Teherbírasi méretezésnél a feszültségek ellenőrzése a feladat, emellett az alakváltozások ellenőrzését is el kell végezni. A szerkezeti analízishez gyakran készítenek végelelemes modellt. [2]

### 3.2.1 Megengedett feszültségek módszere

A TRPV, TRLV, TRAV német nemzeti szabványok a megengedett feszültségek módszerét használják, ez egy egységes biztonsági tényezős eljárás. Ekkor a terhek karakterisztikus értékéből összeállított legkedvezőtlenebb teherkombinációból származó legnagyobb húzó főfeszültség értéket ( $\sigma_E$ ) hasonlítjuk össze a kísérletből levezetett (globális biztonsági tényező értékével csökkentett) megengedett legnagyobb húzó főfeszültség értékével ( $\sigma_{eng}$ ):  $\sigma_E \leq \sigma_{eng}$  [2]

A megengedett maximális húzó főfeszültségek értékét (a gyártási eljárás függvényében) a **2. táblázat** tartalmazza.

2. táblázat: Megengedett húzó főfeszültség értékek [2]

Üveg gyártási típusa	Megengedett húzó főfeszültség $\sigma_{eng}$ [MPa]	
	vízszintes üvegezés	függőleges üvegezés
úsztatott üveg	12	18
edzett üveg	50	50
úsztatott üvegrétegekből laminált üveg	15	22,5

### 3.2.2 Osztott biztonsági tényezős módszer

Ez a módszer a terheket tartósságuk szerint sorolja be, majd annak megfelelő biztonsági tényezőt rendel hozzá. Ezt a módszert alkalmazza többek között a DIN 18008 szabvány. A teherkombinációk meghatározása az Eurocode-ban foglaltakkal azonosan történik. Az állandó terhek a tartós teher, a szélterhek a rövid teher, a hőteher a közepes teher kategóriába esik, míg a klimatikus terhek között vannak közepes (hőmérsékletkülönbség, légnyomás változás) és tartós (magasságkülönbség) terhek is. [2]

Az ellenállás számítása a **3. táblázatban** látható, ahol az  $f_k$  az ellenállás karakterisztikus értéke, mely az üveg gyártási típusától függ.

3. táblázat: Ellenállás számítása [2]

	<b>hőkezelés nélküli üveg</b>	<b>hőkezelt és edzett üveg</b>
<b>ellenállás (<math>R_d</math>)</b>		
<b>szerkezeti tényező (<math>k_c</math>)</b>	$k_c = 1.0^*$	$k_c = 1.0$
<b>biztonsági tényező</b>	1.8	1.5
<b>a terhelés időtartamától függő tényező</b>	$k_{mod.tartós}=0.25$ $k_{mod.közepes}=0.40$ $k_{mod.rövid}=0.70$	-

\* $k_c=1.8$  hőkezelés nélküli üvegek vonalmenti megtámasztással

### 3.2.3 Egyéb módszerek

A fent részletezett módszereken kívül még számos módszert használhatunk üvegszerkezetek méretezésére.

Az egyik ilyen módszer a DELR módszer, mely figyelembe vette az üveg szilárdságát befolyásoló tényezők nagy részét. Ezt a módszert használta többek között a visszavont EC szabvány.

A másik ilyen módszer a törésmechanikai elméleten alapuló módszer. A törésmechanika lényege, hogy a repedések keletkezését és terjedését vizsgálja egészen a törésig. Az üveg, mint rideg anyag kiválóan vizsgálható törésmechanikai elemzéssel. [2]

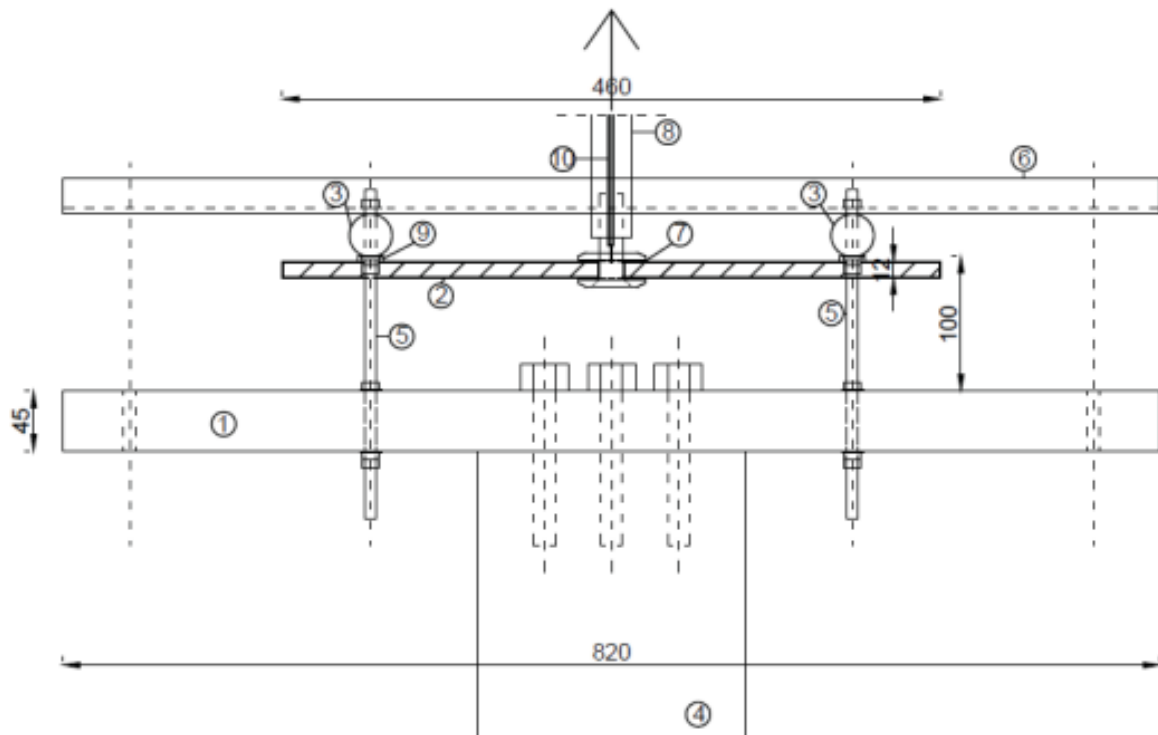
## 3.3 Korábbi kísérletek

Jelen TDK dolgozat alapját egy, a BME Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban végzett üveggerenda kísérlet adja, ezért az alábbiakban néhány üvegekísérlet áttekintése látható, melyet szintén a BME Építőmérnöki Karán végeztek az elmúlt években.

### 3.3.1 Pontmegfogású üvegek laboratóriumi vizsgálata

A BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék laboratóriumában 2015-ben pontmegfogású üveghomlokzatokat vizsgáltak. A kísérlet során a pontmegfogó szerelvény kiszakítását vizsgálták különböző geometriájú, egy-illetve többrétegű furatlyukas üvegszerkezet esetén. Az üveget a felületére merőlegesen terhelték és a kiszakadás környezetében ébredő erőjátékot vizsgálták. A kísérlettel az elmozdulást, a hossz- és keresztirányú megnyúlást (nyúlásmérő bélyegekkel) és az üvegrétegek teherbírását vizsgálták a lyuk környezetében. A kísérlet során állandó volt a terhelési sebesség (0.5 mm/min), az üveglapok szélessége (360 mm), a pontmegfogó szerelvény típusa (R50SSS), a kísérleti berendezés és a lamináló fólia (EVA, 0,38 mm). A vizsgálat során változtatták az üveglapok típusát (úsztatott, TVG, ESG), névleges vastagságát (6 mm, 12 mm, 2×6 mm) és az üveglapok hosszát (460 mm, 860 mm). Az üveglapokat kéttámaszú tartóként építették be. [3]

A kísérleti elrendezés a **2. ábrán** látható.



2. ábra: Kísérleti elrendezés [3]

„Jelmagyarázat: 1- Acéllemez; 2- Üveglap; 3- Acélhenger; 4- Instron keresztfej; 5- Menetes szár; 6- Szögacél; 7. Szilikongyűrű; 8- Menetes acélhenger, 9- Gumi, 10- Relatív elmozdulást mérő úvadó” [forrás]

A kísérlet során a pontmegfogó szerelvény központos felfelé húzásával terhelték a rendszert. Az egyrétegű üveglapoknál azok törése, a kétrétegű üveglapok esetén a második üveglap törése jelentette a tönkremenetelt. Az eredmények értélekor megállapították, hogy az üvegek esetén a hibák környezetében indulnak a repedések, a tönkremenetel. A törésképet szemrevételezésekor arra a következtetésre jutottak, hogy az úsztatott üveglapok két részre, a furatlyuk körüli kisebb, illetve a kifutó repedések mentén nagyobb szilánkokra törtek. Előfeszített TVG üveglapok esetén megfigyeltek egy ún. „pillangó” alakú törési képet. Ezt a pontmegfogó felerősítésekor a szerkezetbe vitt lokális nyomás okozta, illetve a furatlyuk körüli feszültségek eloszlását szemlélteti. Az edzett ESG üveglapok a furatlyuk felől kiinduló repedések mentén törtek el. [3]

Az alakváltozások vizsgálata során megállapították, hogy ha kétszer nagyobb felület mentén terhelik a szerkezetet, akkor a hőerősítés függvényében a teherbírás fele akkorára csökkenthet, míg az alakváltozás akár kétszeresére is nőhet. [3]

A kísérlet mellet az eredmények ellenőrzéséhez és a későbbi modellezés megkönnyítésének érdekében egyszerűsített végesselemes modellt készítettek. A végesselemes modell segítségével szemléltették, hogy a kisebb méretű üvegtáblák esetén a lyuk környezetében és a széleken mért elmozdulás eltér, míg a nagyobb üvegtáblák esetén ez a különbség lecsökken. Ezt a jelenséget a méretből adódó nagyobb alakváltozás és kisebb hajlítási merevség okozza. [3]



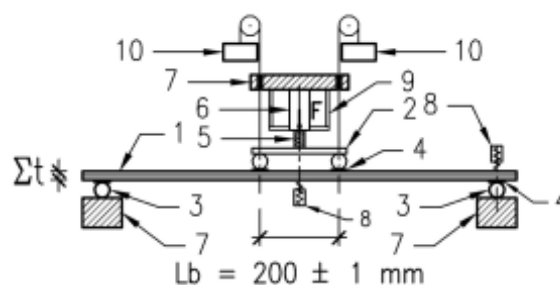
3. ábra: Nagyméretű (balra) és kisméretű (jobbra) üveglapok elmozdulásai [3]

A kísérleti eredmények és a végesesemes modell is azt mutatta, hogy tartószerkezeti célokra az előfeszített, illetve edzett üvegek alkalmazása a legmegfelelőbb, illetve, hogy a nagyméretű üveglapok alakváltozásai egyenletesebbek a keresztmetszet mentén (**3. ábra**), így alkalmazásuk előnyösebb. [3]

### 3.3.2 Laminált szerkezeti üveglapok végesesemes vizsgálata PVB réteg esetén

2011-ben a BME Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban kétrétegű, laminált üveglapokat vizsgáltak kísérleti és numerikus módszerrel. A kísérlet célja volt, hogy az eredmények segítségével egy olyan numerikus modell készítsenek, mely kétrétegű laminált üveg paraméteres vizsgálatára alkalmas biaxiális hajlítás esetén. A kísérlet során az elmozdulásokat hidraulikus terheléssel biztosították, a lehajlást tartóközépen és a megtámasztásoknál mérték. A próbatestet négyponthoz hajlítással terheltek. [4]

A kísérlet összeállítási terve a **4. ábrán** látható.



4. ábra: Kísérleti elrendezés [4]

Jelmagyarázat: 1- Próbatest; 2- Terhelő keret; 3- Acélhenger; 4- Gumilapok; 5-Transzduktor; 6- Hidraulikus sajtó; 7. Megtámasztó keret; 8- Induktív adó, 9- Hidraulikus emelő merevítése, 10- Ellensúly [forrás]

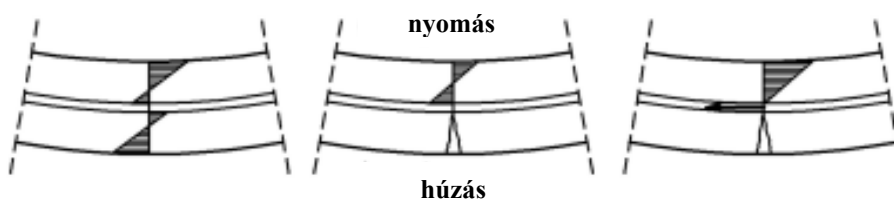
Az üveglapok geometriája minden vizsgálati esetben megegyezett, 1100 mm × 360 mm volt. Az egyes kísérleti esetekben az üveglapok és a laminálóréteg vastagságát változtatták. [4]

A vizsgált esetek a **4. táblázatban** láthatók.

4. táblázat Vizsgált paraméterek [4]

No.	Üvegréteg vastagsága	PVB réteg vastagsága
[-]	[mm]	[mm]
1	6	0.38
2	6	0.76
3	6	1.52
4	8	0.38
5	8	0.76
6	8	1.52
7	10	0.38
8	10	0.76
9	10	1.52

Az üveg nem hajlékony, így tönkremenetel esetén eltörik. Abban az esetben, ha a szerkezeti elem többretegű laminált üvegből áll, akkor a megfelelően választott lamináló rétegek képesek megakadályozni a törést az üvegrézecskek közötti átmenet biztosításával. Ilyenkor a törési tönkremenetelnek három fázisa van, mely az **5. ábrán** látható. [4] [5]



5. ábra: Feszültségeloszlás az egyes tönkremeneteli fázisokban [4]

A kísérleti eredmények alapján látható volt, hogy a szilárdság nagysága nincs összefüggésben a laminált üveglapok merevségével. A szilárdság értékét a numerikus modell segítségével számították. A rögzített lehajlási értékek azt mutatták, hogy az összes üvegréteg eltörése után is van merevsége és teherviselő képessége a szerkezetnek. [4, 5]

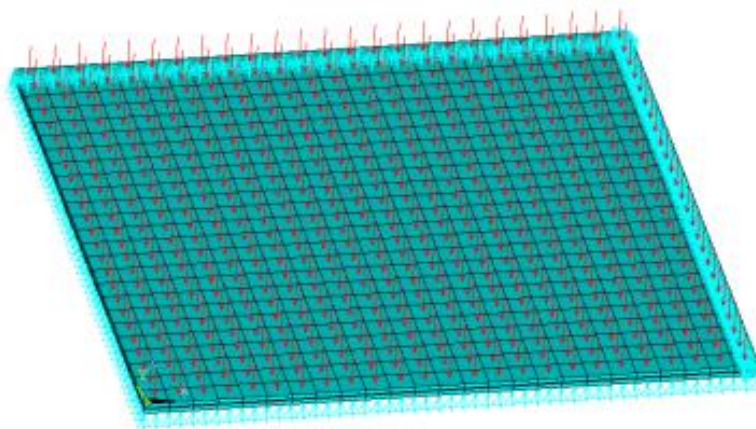
A fenti ábrán látható második fázis akkor kezd kialakulni a szerkezetben, amikor az alsó üveglap eltörik, és a továbbiakban csak egy üvegréteg viseli a terhelést. Ebben a fázisban a szerkezet merevsége csökkent, azonban a PVB laminálóréteg vastagságának változtatása nem volt hatással az merevség mértékére. [4]

A harmadik fázisban az üveglapok már nem bírnak ki számottevő hajlítási terhelést. A lehajlási értékek azt mutatták, hogy a PVB rétegvastagságának növelése a merevség csökkenését eredményezi. [4]

### 3.4 Üvegszerkezetek numerikus modellezése

A 3.3.2 fejezetben részletezett kísérlet célja az volt, hogy egy numerikus modell építéséhez adatokat állítsanak elő. Az alábbiak ennek a numerikus modellnek a rövid ismertetése olvasható. A numerikus modell építéséhez az ANSYS szoftver használták. Az üveget lineárisan rugalmasnak feltételezték, rugalmassági modulusát 70 GPa-ra, Poisson-tényezőjét 0.23-ra vették fel. Az üveg és a PVB rétegeket izotrópnak és homogénnek feltételezték. A numerikus modellt a 20 csomópontú SOLID95 elemekből építették fel. Minden üveg- és PVB réteget egyesével hálózták be egyetlen függőleges elemmel. [4, 5]

A **6. ábrán** látható a numerikus modell.



6. ábra: Numerikus modell ANSYS környezetben [4]

A modell validálásához a kísérleti eredményeket használták fel. Ezután paramétervizsgálatot végeztek, ahol a végelemek szélesség-vastagság arányának, a PVB réteg és az üvegréteg vastagságának megváltoztatásának hatását vizsgálták. [4]

A fenti kísérletek és számítások tapasztalatait felhasználtam a saját numerikus modellem építésénél.



## 4 Vizsgált szerkezeti kialakítás

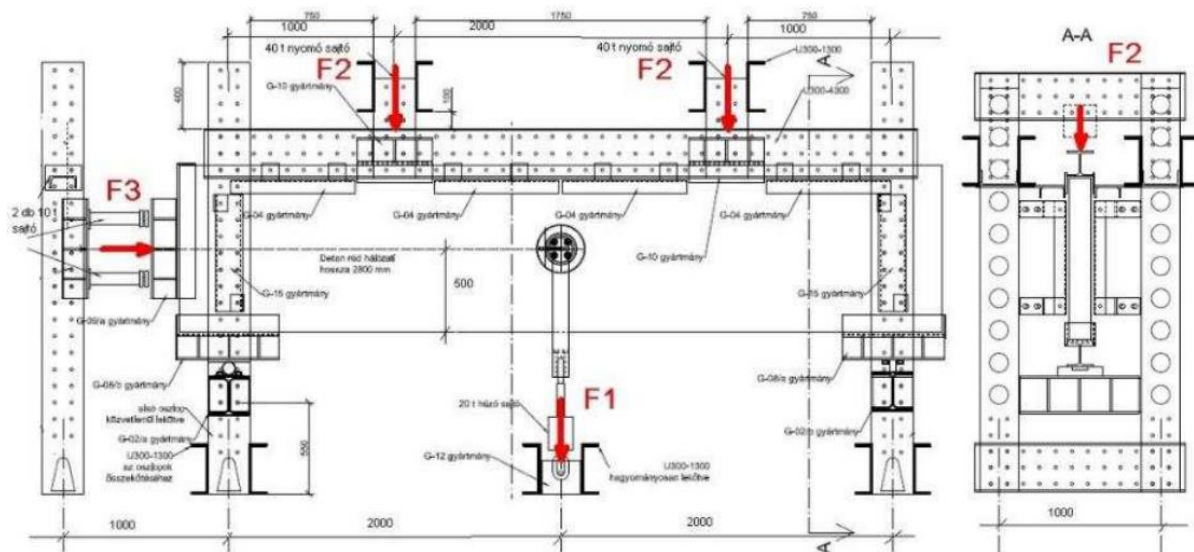
A vizsgált 1000 mm magasságú, kéttámaszú üvegerenda elméleti támaszköze 4000 mm, 12 ragasztott biztonsági üvegrétegből készült, egy-egy réteg 10 mm vastagságú, közöttük egyenként  $2 \times 0.76$  mm vastagságú ionoplast ragasztófolia található. A gerenda közepére – vízszintes és függőleges értelemben is – egy 210 mm átmérőjű furat készült, melyben egy acél csapot helyeztek el (az üveg külső felületein túlnyúló tárcsa átmérője 290 mm). A gerenda megtámasztásai csuklósak, a bal oldalon függőlegesen, míg a jobb oldalon függőlegesen és hosszirányban is meg van támasztva. A bal oldali görgős támaszt egy acélhenger szolgáltatja, míg a jobb oldalon egy billenő kivitelű acélsaru található. [8]

A támaszoknál, és a lentebb részletezett erők bevitelének környezetében teherelosztó elemeket, sarukat helyeztek el, melyek a **7. ábrán** láthatóak. A stabilitás biztosításának érdekében a gerenda felső éle és a támaszok keresztmetszete oldalról acél elemekkel került megtámasztva. Az acél megtámasztó, illetve teherelosztó elemek és az üveg közé kemény gumilapok kerültek. [8]



7. ábra: Gerenda oldalirányú megtámasztásai [8]

Ahogy a **8. ábrán** is látható, a szerkezet háromféle terhet kapott (F1, F2, F3), melyek kombinálásával számos teheresetet vizsgáltak. Az egyes terheket többféle hidraulikus sajtóval biztosították. Az acél csapra függesztett terhet egy 200 kN terhelhetőségű húzósajtó szolgáltatotta (F1 erő). A gerenda tetejére ható függőleges terheket a negyedpontokba elhelyezett, két, egyenként max. 400 kN-os, hidraulikus sajtó juttatta a szerkezetre (F2 erők). Bal oldalon két, egyenként max. 100 kN-os hidraulikus nyomósajtót építettek be (együtt F3 erő), így a gerendavégre nyomás adódott át. Az acél csaphoz rögzített, kétoldali Detan-rudak húzást továbbítottak a csomópontba, ezáltal a gerendában normálerő keletkezett ezen a szakaszon. [8]



8. ábra: Gerenda kísérleti összeállításának terve [8]



9. ábra: Gerenda kísérleti összeállítása [8]



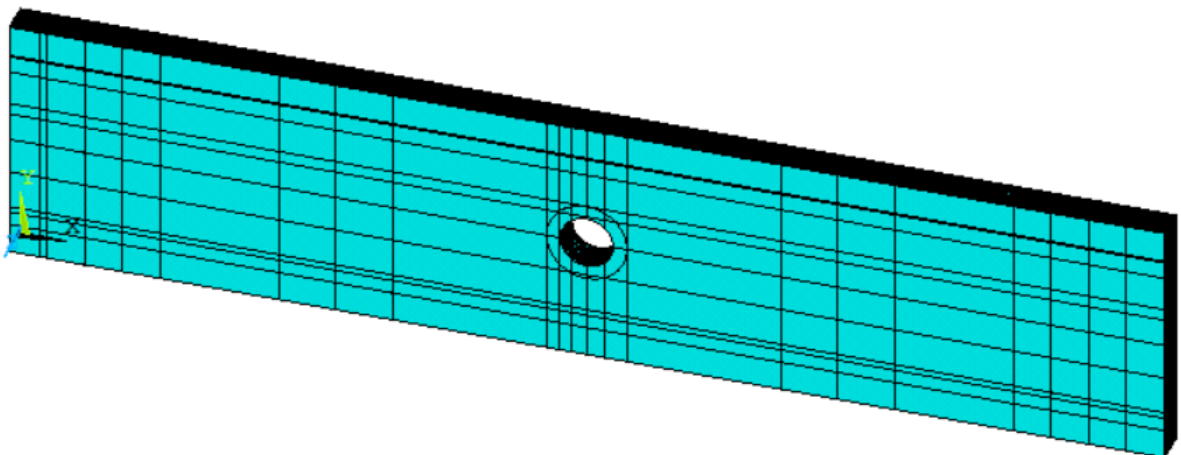
A kísérletek során az adatokat 1 Hz-es mintavételi frekvenciával automatikusan, folyamatosan rögzítette az alkalmazott HBM Catman szoftver. A próbatest éleire és külső felületeire nyúlásmérő bélyeget ragasztottak: 26 db egyirányú nyúlásmérő bélyeg, valamint 14 db rozetta (háromirányú nyúlásmérés) installálását követően volt lehetőség mérni különböző pontokban a megnyúlásokat. A bélyegeket a Tervezőkkel előzetesen egyeztetett pozíciókban, speciális ragasztóval rögzítették a **11. ábrán** (5. fejezet) jelölt helyekre. A lehajlások és oldalirányú elmozdulások időbeli követéséhez elmozdulásmérő szenzorokat alkalmaztak. A **9. ábrán** látható a beépített próbatest.[8]

## 5 Numerikus modell bemutatása

A 4. fejezetben részletezett szerkezeti kialakítás alapján az ANSYS 2021 általános végeselemes szoftver segítségével numerikus modellt készítettem. Célom, hogy az egyes üvegrétegek és közbenső ragasztó fóliarétegek külön modellezésével egy pontosabb modellt készítek, mint a Tervezők, akik egyetlen réteggént modellezték a gerendát és héjelemeket alkalmaztak. A tökéletes, imperfekcióktól mentes szerkezet modellezését követően különböző típusú és mértékű imperfekciók alkalmazásával vizsgálom az üveggerenda viselkedését.

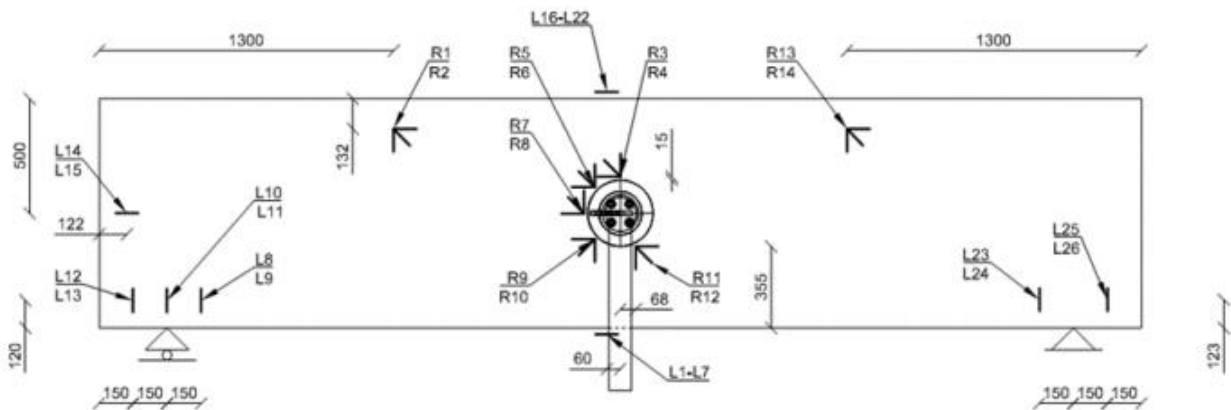
A gerenda alkotóelemeit, az úsztatott üveget és ionoplast közbenső ragasztófóliát lineárisan rugalmas anyagként modelleztem, a viszkoelasztikus viselkedést elhanyagolhatónak ítélttem meg. Az üveg rugalmassági modulusa (a tervezői adatszolgáltatás alapján)  $70000 \text{ N/mm}^2$ , míg Poisson-tényezője 0.24. A SentryGlas Xtra SG6000 klar típusú ragasztófólia rugalmassági modulusa (vonatkozó katalógus [10] alapján)  $700 \text{ N/mm}^2$ , Poisson-tényezője 0.463.

Általánosságban az egyes rétegek sarokpontjainak geometriai megadása (**10. ábra**), valamint a furatok kivágása után testelemekkel hálózttam be az egyes rétegeket – ezek egymáshoz közvetlenül, kontinuumként csatlakoznak –, melyekhez hozzárendeltem a megfelelő anyagmodelleket. A globális bélyegek helyeire (L1-L26) koordinátáik megadásával ún. 'keypoint'-okat definiáltam, ami biztosítja, hogy adott pozíciókban hálómérettől és felosztástól függetlenül kerüljenek végeselemes csomópontok. Ezáltal a nyúlások pontszerű lekérdezésekor pontosan megkaphatók a bélyegek pozíciójában a kívánt eredmények, így közvetlenül összehasonlíthatók lesznek a kísérleti eredményekkel. Emiatt mindegyik üveg- és ragasztóréteg a releváns koordinátáknak megfelelően több térfogati elemből áll. A modellezés során SOLID185 jelű, nyolc csomópontú végeselemeket használtam. Konvergenciavizsgálat eredményét követően (6. fejezet) 50 mm-es átlagos hálóméretet alkalmazom.



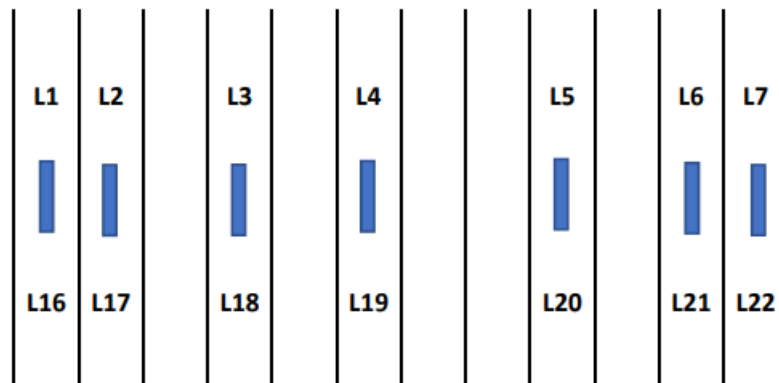
10. ábra: Üveggerenda felépített geometriája térfogati elemekkel

Az alábbi, **11. ábrán** a nyúlásmérő bélyegek elhelyezése látható. Az ábrán adott pozícióban sok esetben két bélyeg is feltüntetésre került: a felső a felőlünk eső külső rétegen, az alsó a tőlünk legtávolabbi üvegréteg külső felületén helyezkedik el.



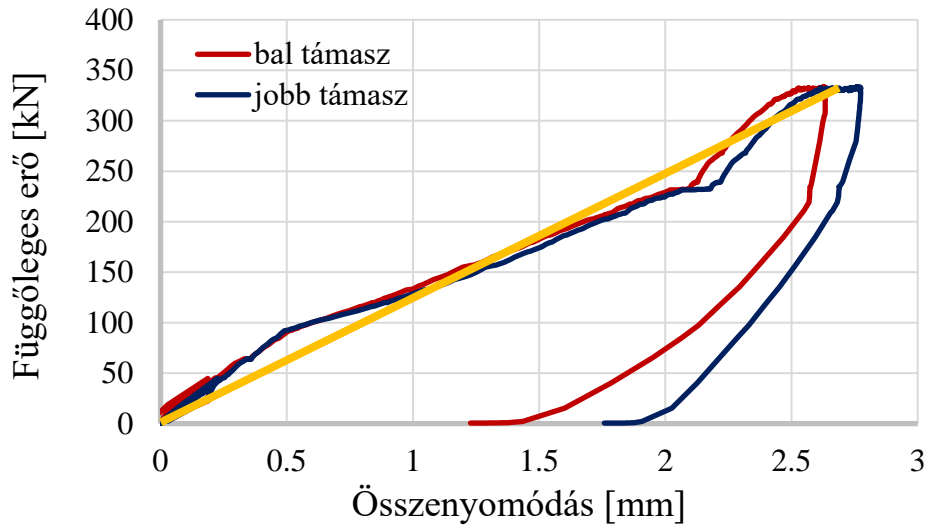
11. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezése a külső rétegek felületén (előlnézet) [8]

A **12. ábrán** látható L1-L7 globális bélyegek a középső keresztmetszetben a gerenda felső síkján, míg az L16-L22 bélyegek a középső keresztmetszetben a gerenda alsó síkján helyezkednek el.

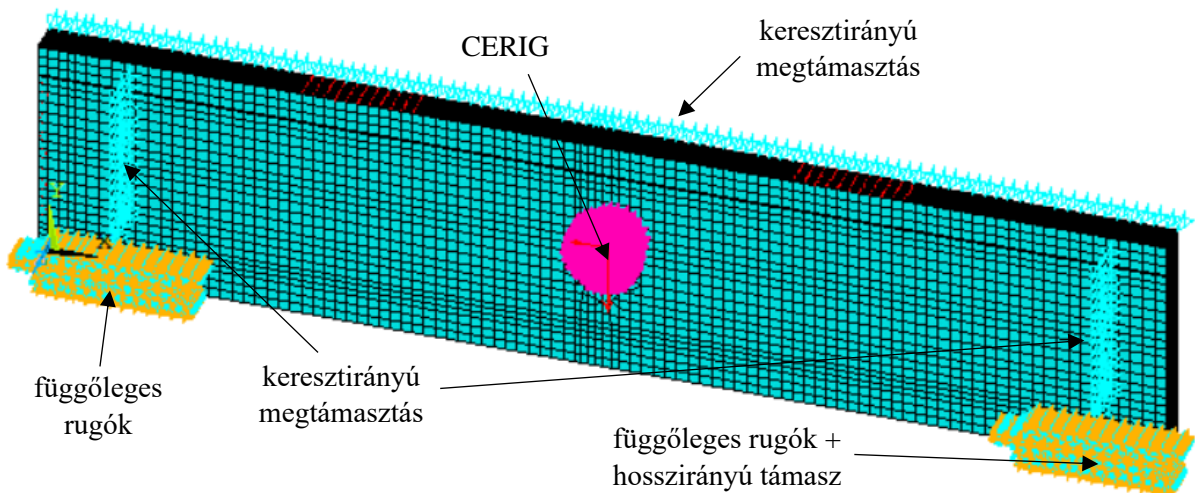


12. ábra: Globális nyúlásmérő bélyegek elhelyezése a gerenda tetején és alján (felül-, illetve alulnézet) [8]

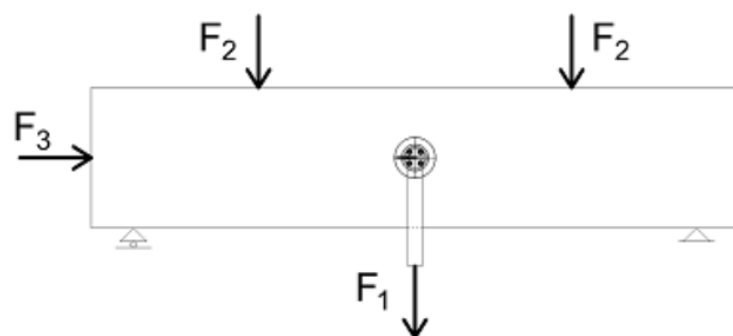
A kísérleti kialakítás alapján a stabilitásvesztés elkerülése érdekében a gerenda felső peremét, illetve a támaszok keresztmetszetét oldalirányban megtámasztották. Ezt a modellben is figyelembe vettem. A tökéletes, imperfekciómentes modellnél – melyet a validációhoz alkalmaztam – az acél csapot a közvetlen modellezése helyett egy MASS21 jelű, elmozdulási és elfordulási szabadságfokkal rendelkező elemmel, valamint merev zóna (CERIG) létrehozásával helyettesítettem. A függőleges támaszokat lineáris karakterisztikájú rugókkal modelleztem 600 mm hosszon a kísérletben kapott támaszerő-támasz összenyomódás görbék alapján (**13. ábra**). A teoretikus rugóállandó értékét a diagramon látható maximális erő és ahhoz tartozó összenyomódás alapján  $k = F_{\max}/U_{\max} = 335 \text{ kN}/2.71 \text{ mm} = 123.6 \text{ kN/mm}$  értékűnek vettem fel, ezt osztottam el a kijelölt csomópontok számával (ez adta egyetlen rugó rugóállandóját). Az alkalmazott peremfeltételeket a **14. ábra** mutatja be.



13. ábra: Kísérleti támaszerő-támasz összenyomódás görbék – helyettesítő rugó karakterisztikája sárga félegyenessel jelölve



14. ábra: Alkalmazott peremfeltételek és alkalmazott hálóméret



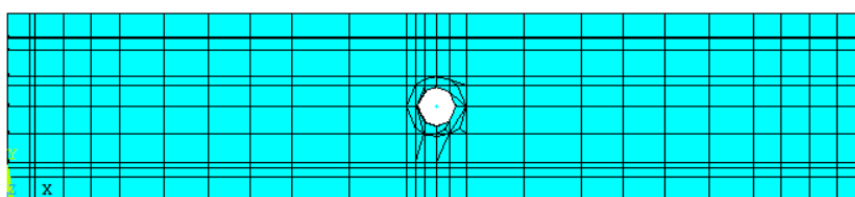
15. ábra: Terhek jelölése [8]

A szerkezet háromféle terhet kapott ( $F_1$ ,  $F_2$  és  $F_3$  a **15. ábrán**). Az  $F_1$  erő az acél csapra függesztett függőleges teher, melyet a MASS21 jelű elemmel kialakított csomóponton

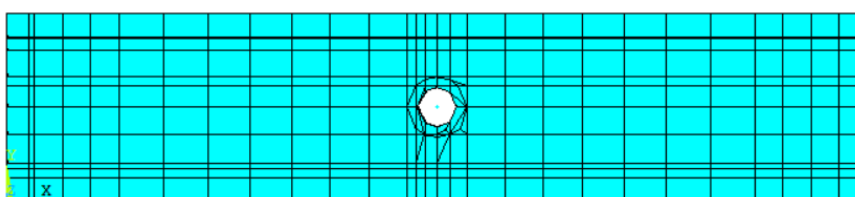
működtettem. Az F2 erő (melyből kettő működik egyszerre) a gerenda felső élének negyedelőpontjaiban hat. A kísérleti kialakítás pontos lekövetésének érdekében ezt a teherelosztó acél elemek 450 mm-es hosszával és a gerenda vastagságával leosztva megoszló teherként modelleztem. Az F3 vízszintes terhet a gerenda szélén megoszló teherként, illetve az acél csapon ellentétes irányú koncentrált erőként, mintegy normálerő párral helyettesítettem. A konkrét teherértékeket az adott vizsgálatnál terhelési esettől függően mutatom be

## 6 Numerikus modell verifikációja

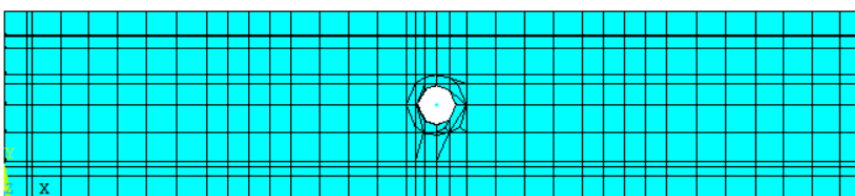
A megépített modell matematikai értelemben vett verifikálásához konvergenciavizsgálatot végzek. Az alkalmazott legnagyobb átlagos hálóméret 400 mm. Ezzel futtatva a számítást az ST-06 teheresetben (7. fejezetben részletezve a terheket) vizsgálom a középső keresztmetszetben, a gerenda alján elhelyezett L4-es bélyegnél a gerenda lehajlását, illetve a nyúlásokat. A vizsgálat során a hálóméretet lépcsőzetesen csökkentve öt különböző átlagos hálóméretet alkalmazok, ezek rendre 400 mm, 300 mm, 200 mm, 100 mm, illetve 50 mm. A **16-20. ábrák** mutatják be a végeleemes hálót a választott átlagos hálóméretetek esetén.



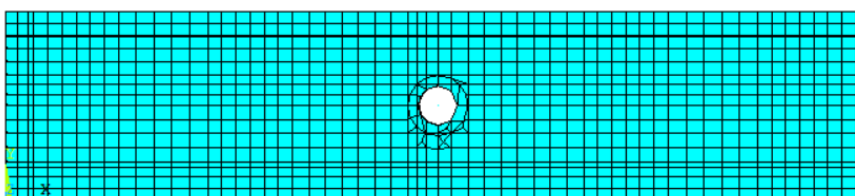
16. ábra: Gerenda hálózása 400 mm-es átlagos hálóméret esetén



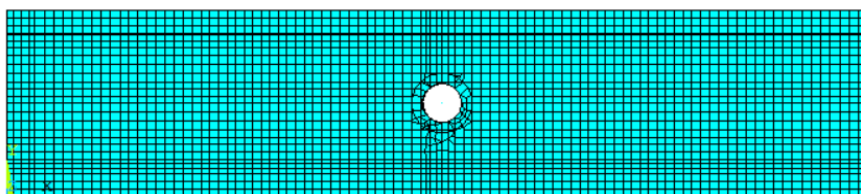
17. ábra: Gerenda hálózása 300 mm-es átlagos hálóméret esetén



18. ábra: Gerenda hálózása 200 mm-es átlagos hálóméret esetén



19. ábra: Gerenda hálózása 100 mm-es átlagos hálóméret esetén



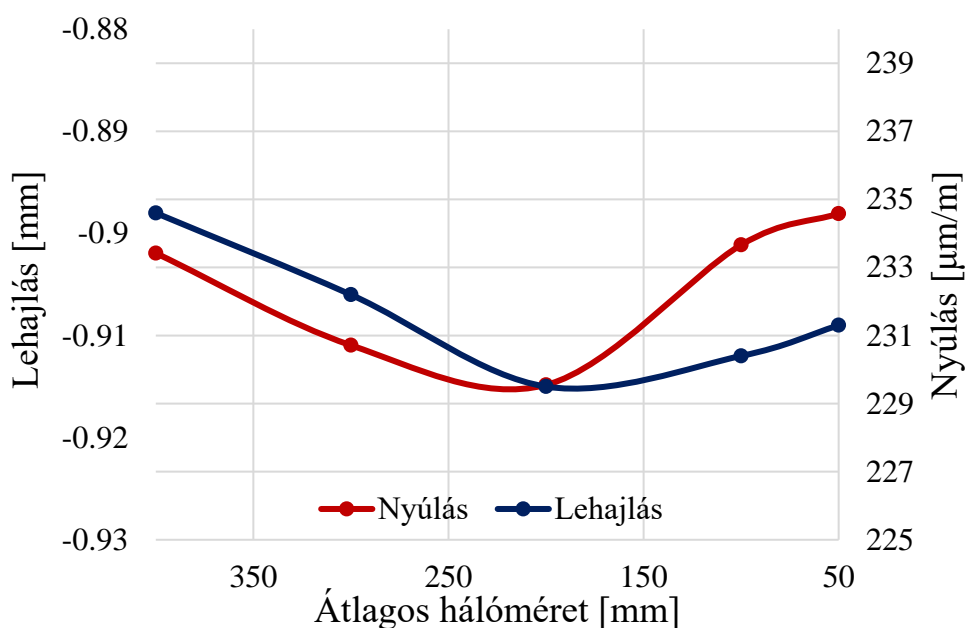
20. ábra: Gerenda hálózása 50 mm-es átlagos hálóméret esetén

A kiértékelt lehajlásokat és nyúlásokat az **5. táblázatban** gyűjtöttem össze. A táblázatban a gerenda középső keresztmetszetében alul keresztirányban elhelyezett L1-L7 bélyegek közül a középső, az L4 bélyegnél kialakult nyúlásokat, valamint ebben a pontban számolt lehajlásokat foglaltam össze.

5. táblázat: Nyúlás és lehajlás értékek az egyes hálóméretek esetén

Hálóméret	Nyúlás	Lehajlás
[mm]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[mm]
400	233.4	-0.898
300	230.7	-0.906
200	229.5	-0.915
100	233.7	-0.912
50	234.6	-0.909

Ezeket az adatokat egy diagramon is ábrázoltam (**21. ábra**). A vízszintes tengelyen az átlagos hálóméret látható [mm]-ben, míg a függőlegesen tengelyeken a kialakult lehajlások [mm]-ben, a nyúlások pedig [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]-ben láthatók. A diagramra tekintve láthatjuk, hogy a két görbe a hálóméret csökkentésével egyre összetart. A vizsgálat során azt az eredményt kaptam, hogy a 100 mm-es és 50 mm-es hálóméret esetén már nagyon kis különbség van az eredmények között, ezért a további csökkentés nagyobb mértékben bonyolítaná a számítást, mint amilyen mértékben pontosítaná azt, így a későbbiekben az 50 mm-es átlagos hálóméretet használom.



21. ábra: Konvergenciavizsgálat eredményei

## 7 Numerikus modell validálása

Az általam készített végeleemes modellt háromféle módon is validálom. Először az eredmények validálásának érdekében kézi ellenőrző számítást végzek analitikus módszerrel. Az egyetemen végzett kísérlet mellett a Tervezők készítettek egy egyszerűsített végeleemes modellt AxisVM szoftver segítségével. Modelljükben az összes üveg- és ragasztóréteg egyetlen réteggént, héjelemekkel került modellezésre. Ez a modell adja a validálás és összehasonlítás második lépcsőjét, legvégül a laboratóriumban végzett kísérletek mérési eredményei adják a validálás alapját. Az alábbi fejezetben az egyes módszerek, az ezekkel kapott eredmények és azok összehasonlítása látható.

A modell validálásához a kísérlet során vizsgált teheresetekből hármat ragadok ki, és ezen esetekben ellenőrzöm az egyes módszerekkel kapott eredmények azonosságát. A három tehereset a kísérleti programban ST-01, ST-06 és ST-07 néven futott, és az alább részletezett terheket tartalmazzák. Az ST-01 és ST-07 tehereset tiszta esetek, csak függőleges teher hat a gerendára. Az 5. fejezetben a **15. ábrán** láthatók az egyes terhek jelölései és helyei.

Az ST-01 teheresetben  $F_1 = 70 \text{ kN}$ ,  $F_2 = 0 \text{ kN}$ ,  $F_3 = 0 \text{ kN}$ .

Az ST-06 teheresetben  $F_1 = 100 \text{ kN}$ ,  $F_2 = 235 \text{ kN}$ ,  $F_3 = 70 \text{ kN}$ .

Az ST-07 teheresetben  $F_1 = 0 \text{ kN}$ ,  $F_2 = 335 \text{ kN}$ ,  $F_3 = 0 \text{ kN}$ .

### 7.1 Analitikus eredmények

Az analitikus számítás ellenőrzési céllal készült, abban a ragasztófóliák vastagságát és szilárdsági jellemzőit az egyszerűsítés érdekében elhanyagoljuk. A számításhoz a fentiekben túl szükséges adatok a következők.

A gerenda közepén található furat sugara:	$R_{\text{furat}} = 105 \text{ mm}$
A gerenda magassága:	$H = 1000 \text{ mm}$
Furat alatti és feletti km.-i magasság:	$H_{\text{half}} = H/2 - R_{\text{furat}} = 395 \text{ mm}$
A gerenda vastagsága:	$B = 12 \times 10 \text{ mm} = 120 \text{ mm}$
Üveg rugalmassági modulusa:	$E = 70 \text{ GPa}$
Gerenda elméleti támaszköze:	$L = 4000 \text{ mm}$
$F_2$ és támasz közötti távolság:	$L_1 = 1000 \text{ mm}$
Gerenda inerciája:	

Ezeket az adatokat felhasználva kiszámíthatók az egyes teheresetekben a nyomatékok, majd abból az alakváltozások a szélső szálakban a nyúlásmérő bélyegek helyén. Ezeket a **6. táblázatban** foglaltam össze. Az összehasonlítás alapja a végeleemes modellben (ANSYS) a középső



keresztmetszetben az alsó és felső síkon elhelyezett bélyegeken (L1-L7, L16-L22) mért relatív nyúlások értékei.

6. táblázat Analitikus és VEM eredmények összehasonlítása

Tehereset	Nyomaték	Alakváltozás - analitikus	Alakváltozás - ANSYS	Eltérés
	[kNm]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
<b>ST-01</b>	67.9	48.9	50-53	2.0÷8.1
<b>ST-06</b>	332	239.3	234-236	-(2.2÷1.4)
<b>ST-07</b>	335	241.5	234-235	-(2.9÷2.4)

A **6. táblázatban** is látható, hogy az analitikus és VEM eredmények között mindhárom teheresetben kevesebb, mint 10% az eltérés (jellemzően 1-3%), tehát a modell megfelelően pontosnak mondható a kézi számítással való összevetés alapján.

## 7.2 Tervezők egyszerűsített numerikus modellje [9]

A Tervezők a kísérleti eredményekkel történő összehasonlíthatóság érdekében egy egyszerűsített végeleemes modellt készítettek AxisVM szoftver segítségével. A modellben a ragasztófólia rétegek vastagságát és szilárdsági paramétereit elhanyagolták.

Először – a geometria ismeretében – egy, a 12 üvegrétegnek megfelelő vastagságú héjelemet definiáltak. Az üveg rugalmassági modulusát 70 GPa-nak, Poisson-tényezőjét 0.23-nak feltételezték. A héjelem hat csomópontú Lagrange-típusú elem. A Detan-rudakat rúdelemmel modellezték.

A gerenda alsó peremén található támaszok kialakítása a következőképpen történt: a támasz teljes hosszán (600 mm) definiáltak külpontosan egy acél elemet, majd ennek közepét egy rugós támasszal látták el. A rugós támasz rugókarakterisztikájának beállításakor a hat szabadságfok közül a gerenda hosszirányában az eltolódást  $k_x=0$  kN/m merevségűre, a többi öt szabadságfokot  $k_y = k_z = 10^{10}$  kN/m, illetve  $k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = 10^{10}$  kNm/rad értékűre állították. Ezután az acél elemeket a két támasznál vonalmenti kapcsolati elemet használva csatlakoztatták a szerkezethez. A kapcsolati elemek eltolódási merevségei a következők: a gerenda hosszirányában  $k_x = 10$  kN/m/m, a gerenda keresztirányában  $k_y = 10^5$  kN/m/m, a gerenda magasságának irányában  $k_z = 10^7$  kN/m/m, az elfordulási merevségek pedig rendre  $k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = 10$  kNm/rad/m.

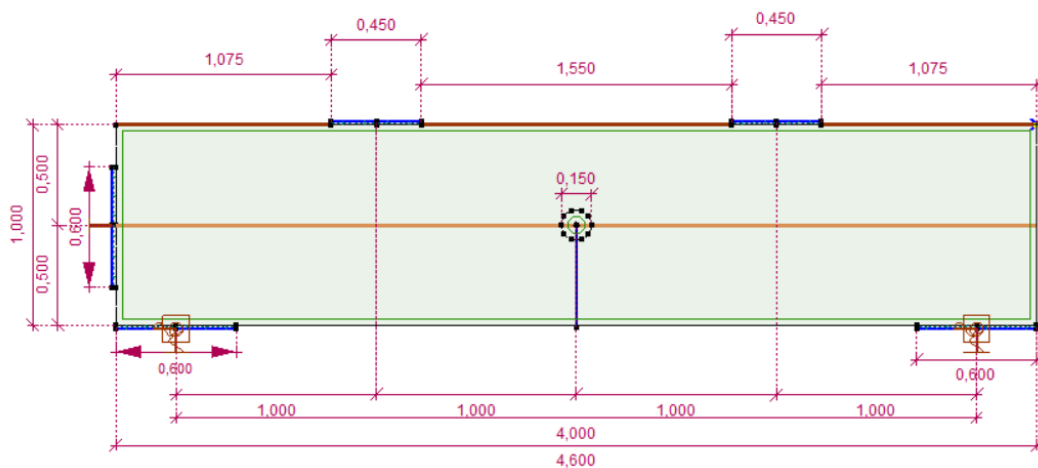
A gerenda bal szélén acél teherelosztó elemet definiáltak 600 mm hosszon, azt vonalmenti kapcsolati elemekkel kapcsolták a szerkezethez. Az acél elem közepén található pontszerű támasznak egyedül a gerenda hosszirányában van merevsége, értéke  $k_x = 10^{10}$  kN/m. A vonalmenti

kapcsolati elem rugókarakterisztikája megegyezik az alsó támaszoknál lévő kapcsolati elemekével.

A gerenda tetején található erőbevezetési pontoknál 450 mm szélességű acél teherelosztó elemeket definiáltak, ezeket szintén a fenti rugókarakterisztikájú vonalmenti kapcsolati elemekkel kapcsolták a szerkezethez.

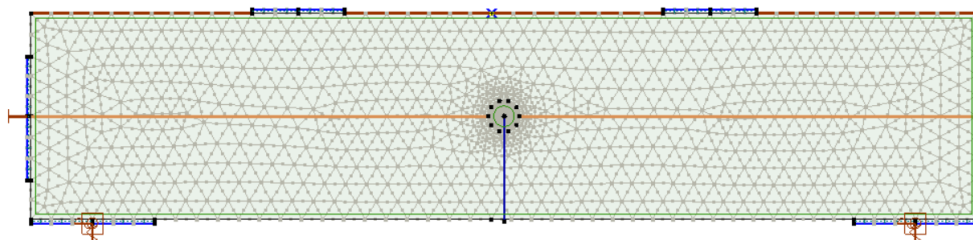
A gerenda közepén található furatot a tartomány kimetszésével, majd a csapot acél anyaggal történő újradefiniálással hozták létre. A terhek felfüggesztése két acél profilra történik, melyek felül merev test elemmel lettek a héj tartományhoz kapcsolva, alul pedig a gerenda alatt 10 mm-rel szintén merev test elemmel kapcsolódnak egymáshoz. A csapra függesztett terhet az alsó merev test középpontjában működtették.

A stabilitásvesztés megakadályozásának érdekében a héjelem felső peremét vonalmenti támasszal látták el, melynek eltolódási merevsége keresztirányban  $k_y = 5 \times 10^2$  kN/m/m.



22. ábra: Tervezők AxisVM modellje, elől- és oldalnézet [9]

A hálózás során 100 mm-es átlagos hálóméretet használtak (23. ábra).

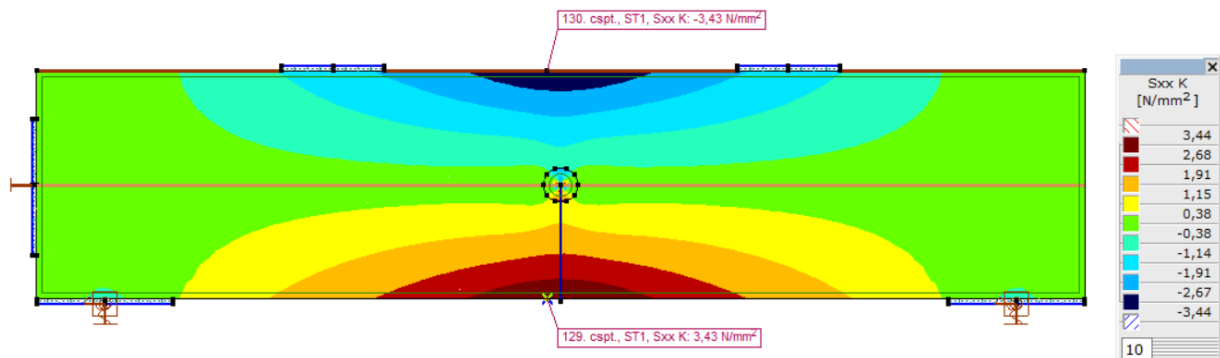


23. ábra Gerenda hálózása 100 mm-es átlagos hálóméret, AxisVM modell [9]

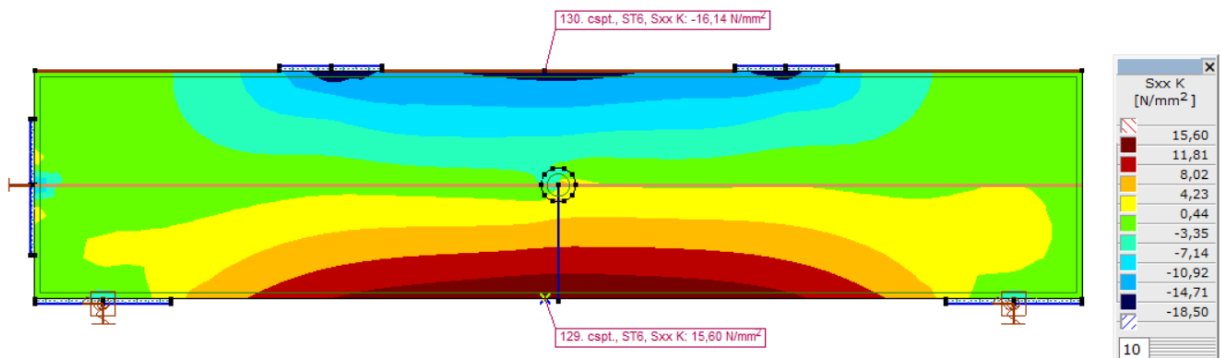
A Tervezők a korábban részletezett három terhesetet (ST-01, ST-06 és ST-07) megvizsgálva és lineáris statikai számítást futtatva megkapták a feszültség mezőket. A nyúlásmérő bélyegek

koordinátaiban elhelyezett csomópontokkal az eredmények a bélyegek helyein kinyerhetők. Mivel a nyúlások közvetlenül nem olvashatók ki a szoftverből, ezért a feszültségértékekből a rugalmassági modulus felhasználásával egyszerűsítve kiszámolhatók a globális hajlításból adódó nyúlások a felső és alsó peremnél, és így összehasonlíthatók az ANSYS modell eredményeivel (melyek az L1-L7 és L16-L22 bélyegek átlagolásával lettek figyelembe véve).

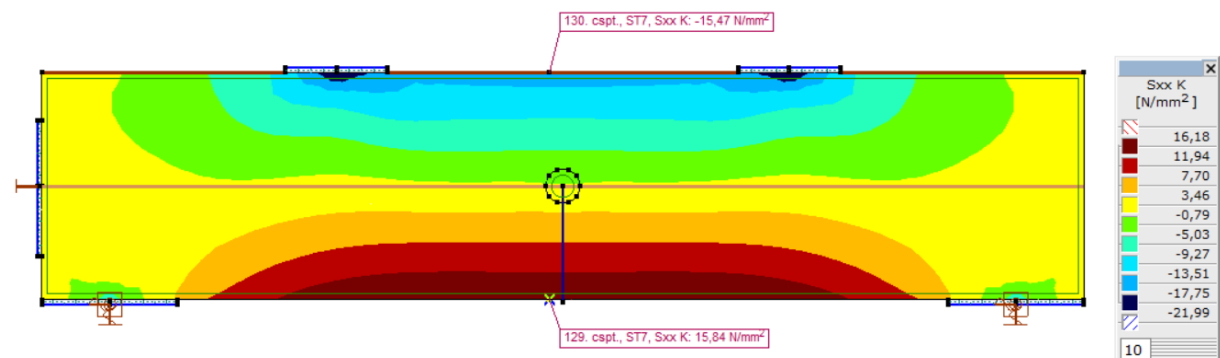
Az alábbi **24-26. ábrákon** a kiragadott teheresetekben, a gerendában létrejövő főfeszültségek láthatók.



24. ábra: Hosszirányú feszültség [MPa], ST-01 tehereset, AxisVM modell [9]



25. ábra: Hosszirányú feszültség [MPa], ST-06 tehereset, AxisVM modell [9]



26. ábra: Hosszirányú feszültség [MPa], ST-07 tehereset, AxisVM modell [9]

Az eredmények és eltérések nagysága a **7. táblázatban** láthatók.

7. táblázat: Tervezők AxisVM és saját ANSYS modell eredményeinek összehasonlítása

Tehereset	Bélyeg helye	Alakváltozás – AxisVM	Alakváltozás – ANSYS	Eltérés
		[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
ST-01	felső perem	49.0	50.7	3.7
ST-01	alsó perem	-49.0	-53.3	8.8
ST-06	felső perem	230.6	234.5	1.7
ST-06	alsó perem	-222.9	-236.5	6.1
ST-07	felső perem	221.0	234.5	6.1
ST-07	alsó perem	-226.3	-236.4	4.5

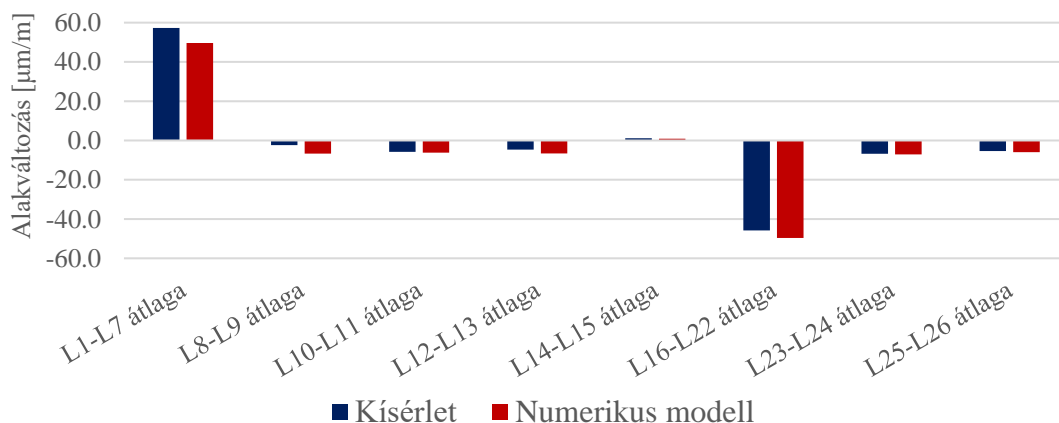
Látható, hogy a Tervezők AxisVM modellje és az ANSYS modell eredményei között mindhárom teheresetben kevesebb, mint 10% az eltérés (átlagosan 5.2%), tehát a modell megfelelően pontosnak mondható a Tervezők egyszerűsített végeelemes modelljével történő összevetés alapján. Mindazonáltal fontos kiemelni, hogy az egyszerűsített modellel a dolgozatban bemutatásra kerülő imperfekciók jelentős része nem vehető figyelembe.

### 7.3 Mérési eredmények [8]

A 4. fejezetben részletezett kísérleti kialakítással számos teheresetben vizsgálták az üveggerenda viselkedését a BME Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban 2021.06.28-án. A következőkben az ST-01, ST-06 és ST-07 jelű teheresetek mérési eredményeit hasonlítom össze az ANSYS modell eredményeivel, a lineáris (nyúlások) és rozetta bélyegek (von Mises feszültségek) helyein (L1-L26; R1-R14) oly módon, hogy az adott bélyegpárok átlagait veszem referenciaként a mérési eredményeknél. Ezáltal az imperfekciókból adódó eltéréseket keresztirányban minimalizálom a kiértékelés során.

#### 7.3.1 ST-01 tehereset

Az ST-01 tiszta tehereset eredményeit a **27-31. ábrákon** és a **8-9. táblázatokban** foglalom össze.



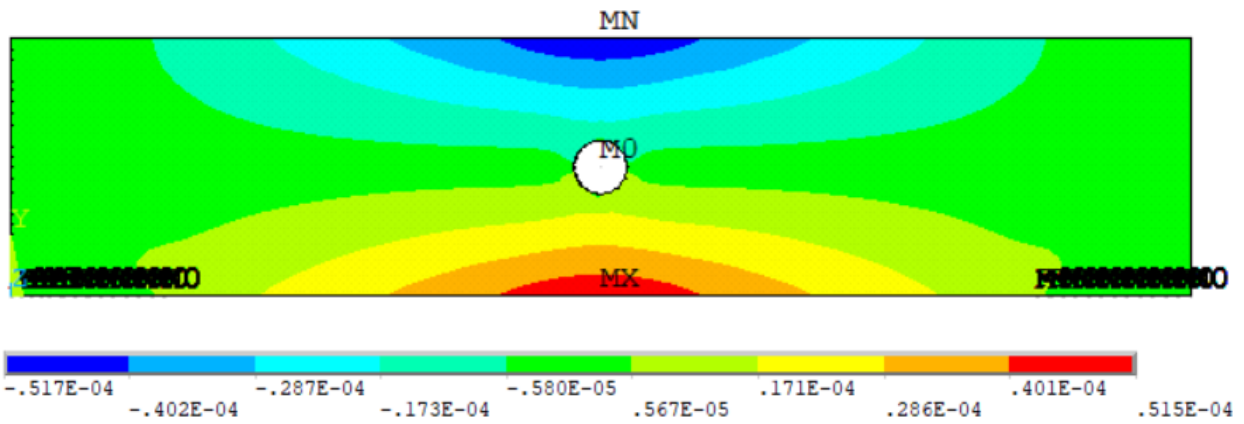
27. ábra: Kísérleti és ANSYS modell eredményei ST-01 teheresetben L1-L26 bélyegeknél

8. táblázat: Kísérleti és saját ANSYS modell eredményeinek összehasonlítása L1-L26 bélyegek helyein

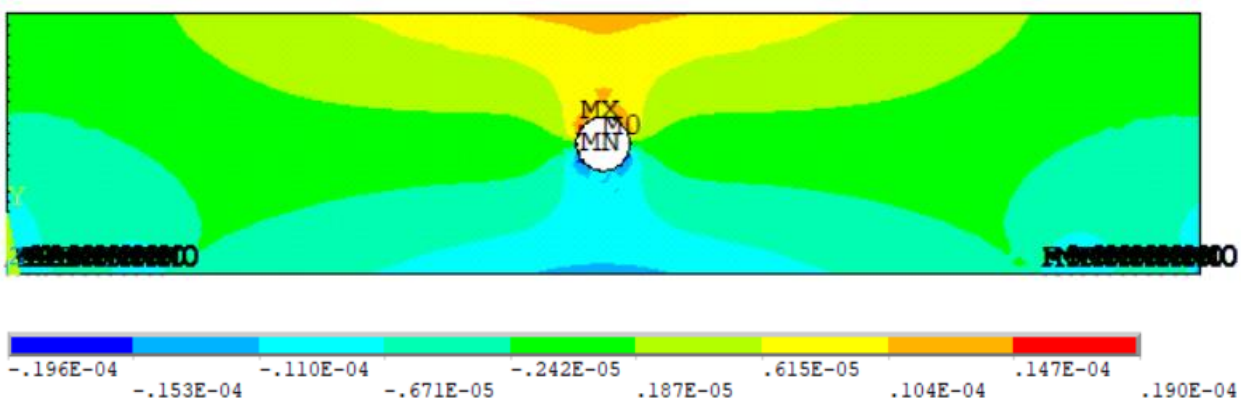
Tehereset	Bélyeg helye	Alakváltozás – Kísérlet	Alakváltozás – ANSYS	Eltérés
		[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
ST-01	L1	62.9	49.6	-
	L2	75.5	49.6	-
	L3	58.5	49.7	-
	L4*	-	49.7	-
	L5	51.8	49.7	-
	L6	48.9	49.7	-
	L7	46.1	49.7	-
	<b>L1-L7 átlaga</b>	<b>57.3</b>	<b>49.7</b>	<b>-13.3</b>
	L8	-1.8	-6.7	-
	L9	-3.0	-6.7	-
	<b>L8-L9 átlaga**</b>	<b>-2.4</b>	<b>-6.7</b>	<b>179.6</b>
	L10	-1.4	-6.2	-
	L11	-10.2	-6.2	-
	<b>L10-L11 átlaga**</b>	<b>-5.8</b>	<b>-6.2</b>	<b>6.5</b>
	L12	-1.3	-6.6	-
	L13	-8.0	-6.6	-
	<b>L12-L13 átlaga**</b>	<b>-4.7</b>	<b>-6.6</b>	<b>41.5</b>
	L14	0.8	0.9	-
	L15	1.5	0.9	-
	<b>L14-L15 átlaga**</b>	<b>1.2</b>	<b>0.9</b>	<b>-19.9</b>
	L16	-37.4	-49.6	-
	L17	-39.2	-49.6	-
	L18	-42.5	-49.6	-
	L19	-45.0	-49.6	-
	L20	-49.7	-49.6	-
	L21	-52.6	-49.6	-
L22	-54.3	-49.5	-	
<b>L16-L22 átlaga</b>	<b>-45.8</b>	<b>-49.6</b>	<b>8.3</b>	
L23	-13.0	-7.1	-	
L24	-0.6	-7.1	-	
<b>L23-L24 átlaga**</b>	<b>-6.8</b>	<b>-7.1</b>	<b>4.6</b>	
<b>L25</b>	<b>-10.7</b>	<b>-5.9</b>	<b>-</b>	
<b>L26</b>	<b>-0.1</b>	<b>-5.9</b>	<b>-</b>	
<b>L25-L26 átlaga**</b>	<b>-5.4</b>	<b>-5.9</b>	<b>9.9</b>	

\*a kísérlet során az L4 jelű bélyeg nem működött megfelelően, ezért a mérési eredmények nem vehetők figyelembe

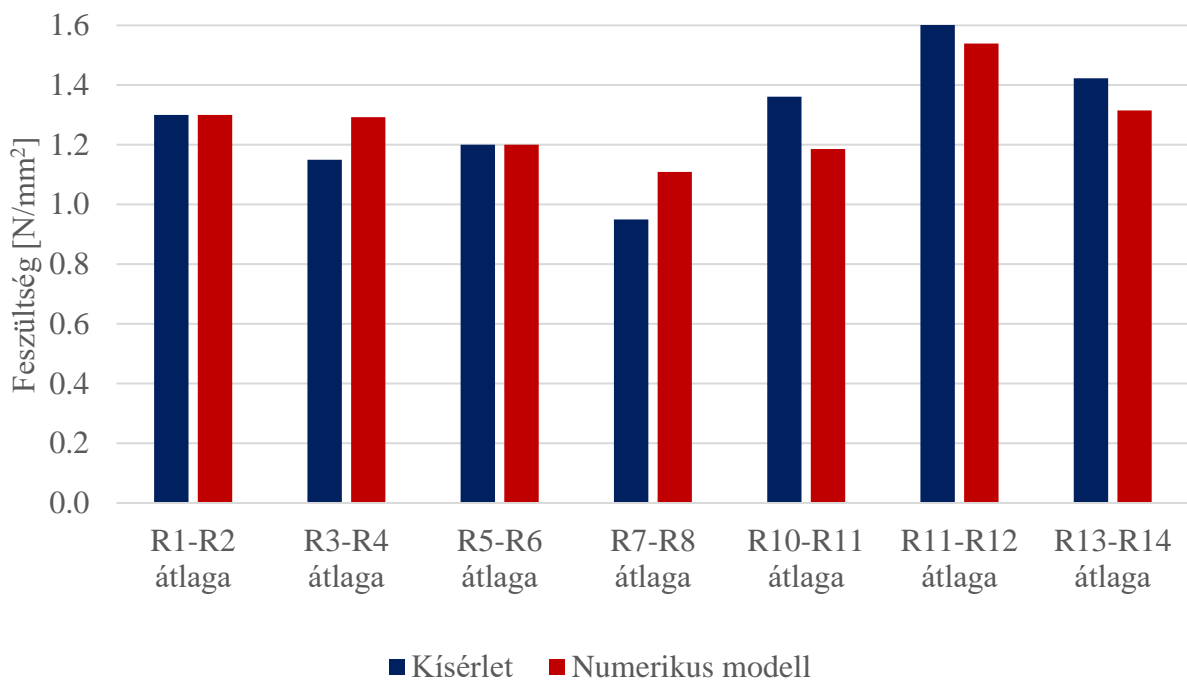
\*\*+/-10  $\mu\text{m}/\text{m}$ -nél kisebb mért értékek esetén az eredmények nem relevánsak a bélyegek hibahatára miatt



28. ábra: Hosszirányú alakváltozások [-], ST-01 tehereset, ANSYS modell



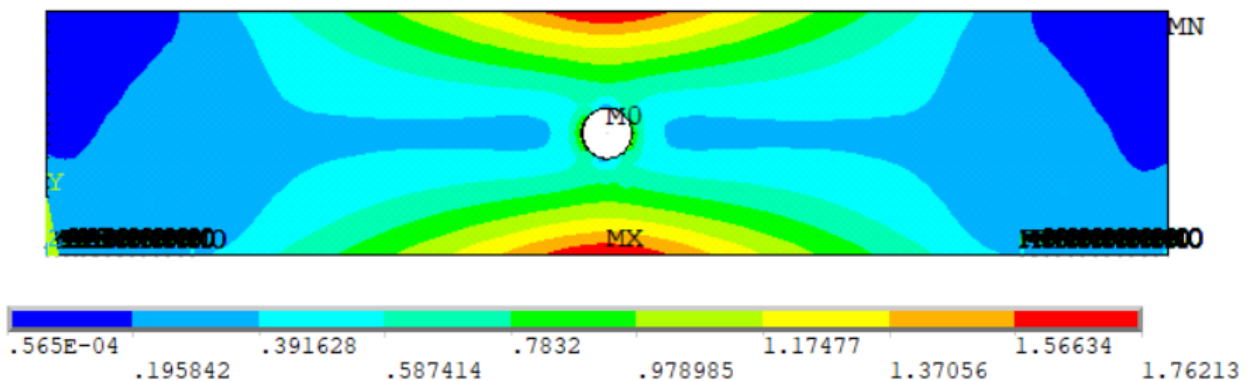
29. ábra: Függőleges alakváltozások [-], ST-01 tehereset, ANSYS modell



30. ábra: Kísérleti és ANSYS modell eredményei ST-01 teheresetben R1-R14 bélyegeknél

9. táblázat: Kísérleti és saját ANSYS modell eredményeinek összehasonlítása R1-R14 bélyegek helyein

Tehereset	Bélyeg helye	Feszültség – Kísérlet	Feszültség - ANSYS	Eltérés
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
ST-01	R1	0.9	1.3	
	R2	1.7	1.3	
	<b>R1-R2 átlaga</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>0.0</b>
	R3	0.3	1.3	
	R4	2.0	1.3	
	<b>R3-R4 átlaga</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>12.4</b>
	R5	0.3	1.2	
	R6	2.0	1.2	
	<b>R5-R6 átlaga</b>	<b>1.2</b>	<b>1.2</b>	<b>0.0</b>
	R7	0.6	1.1	
	R8	1.3	1.1	
	<b>R7-R8 átlaga</b>	<b>1.0</b>	<b>1.1</b>	<b>16.7</b>
	R9	1.3	1.2	
	R10	1.4	1.2	
	<b>R9-R10 átlaga</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>	<b>-12.9</b>
	R11	2.1	1.5	
	R12	2.4	1.5	
	<b>R11-R12 átlaga</b>	<b>2.2</b>	<b>1.5</b>	<b>-30.8</b>
R13	1.2	1.3		
R14	1.7	1.3		
<b>R13-R14 átlaga</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>	<b>-7.6</b>	



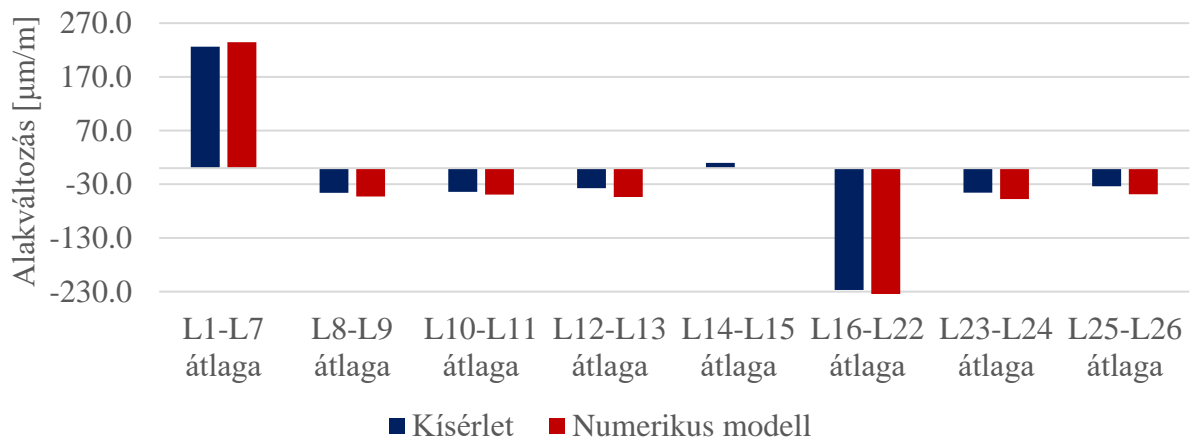
31. ábra: von Mises feszültségek [MPa], ST-01 tehereset, ANSYS modell

Látható, hogy L1-L26 bélyegeknél a +/-10 µm/m-nél nagyobb nyúlások esetén a kísérleti eredmények átlaga és az ANSYS modell eredményei között ST-01 teheresetben átlagosan ~10% eltérés tapasztalható. Az R1-R14 rozetta bélyegek összehasonlított feszültségértékei átlagosan

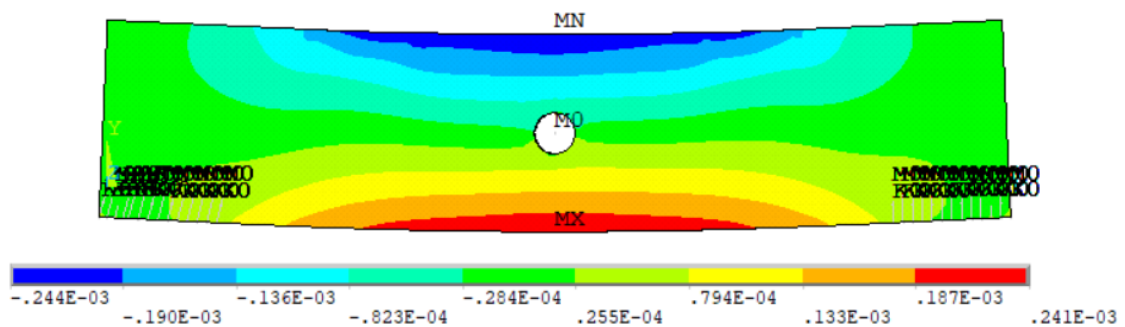
~11.5%-kal térnek el. Kiugró értéket mutat az R11-R12 átlaga, mely bélyegek a csap mellett helyezkednek el. A kiugró eltérés oka lehet, hogy a terhelés hatására az acél csap megmozdul, ezzel többletfeszültséget generál a környező bélyegeknél. A bélyegeket külön-külön értékelve is átlagosan relatíve kis különbség adódik. Az eredmények alapján ettől függetlenül az ANSYS modell megfelelően pontosnak mondható a kísérleti eredményekkel történő összevetés alapján.

### 7.3.2 ST-06 tehereset

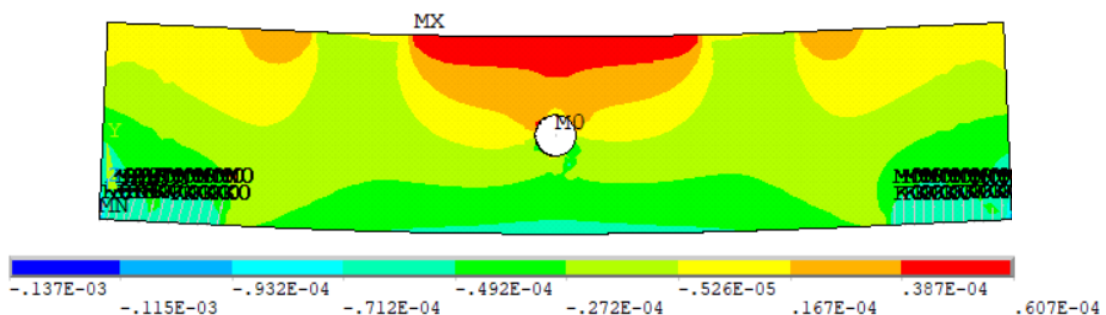
Az ST-06 összetett tehereset eredményeit a **32-36. ábrákon** és a **10-11. táblázatokban** foglalom össze.



32. ábra: Kísérleti és ANSYS modell eredményei ST-06 teheresetben L1-L26 bélyegeknél



33. ábra: Hosszirányú alakváltozások [-], ST-06 tehereset, ANSYS modell



34. ábra: Függőleges alakváltozások [-], ST-06 tehereset, ANSYS modell

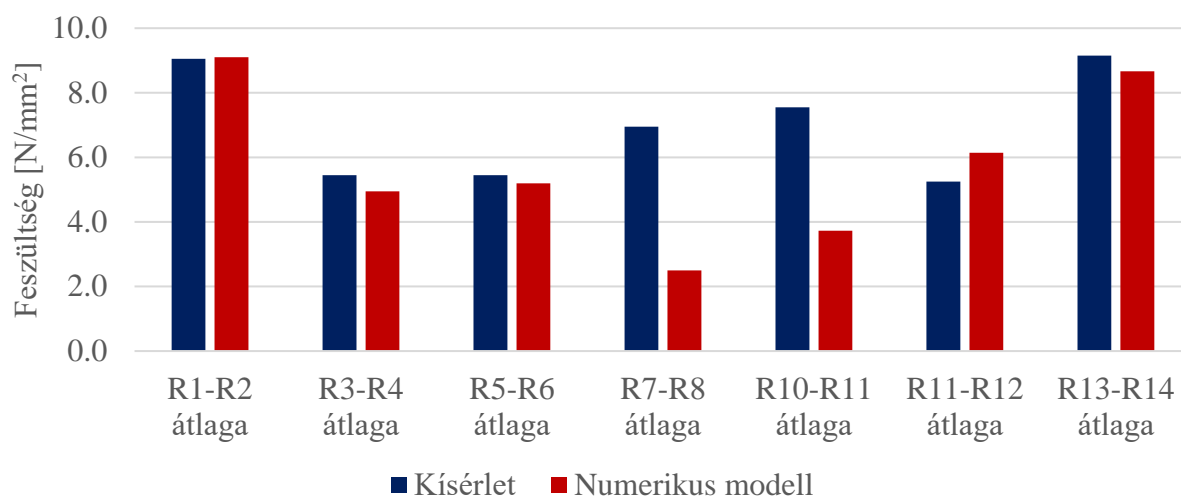


10. táblázat: Kísérleti és saját ANSYS modell eredményeinek összehasonlítása L1-L26 bélyegek helyein

Tehereset	Bélyeg helye	Alakváltozás – Kísérlet	Alakváltozás – ANSYS	Eltérés
		[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
ST-06	L1	242.5	234.4	-
	L2	230.1	234.5	-
	L3	234.5	234.5	-
	L4*	-	234.6	-
	L5	221.0	234.6	-
	L6	216.4	234.6	-
	L7	212.7	234.6	-
	<b>L1-L7 átlaga</b>	<b>226.2</b>	<b>234.5</b>	<b>3.7</b>
	L8	-26.2	-52.9	-
	L9	-65.8	-52.9	-
	<b>L8-L9 átlaga</b>	<b>-46.0</b>	<b>-52.9</b>	<b>15.1</b>
	L10	-27.4	-49.2	-
	L11	-61.2	-49.1	-
	<b>L10-L11 átlaga</b>	<b>-44.3</b>	<b>-49.2</b>	<b>11.0</b>
	L12	-12.8	-53.8	-
	L13	-61.8	-53.8	-
	<b>L12-L13 átlaga</b>	<b>-37.3</b>	<b>-53.8</b>	<b>44.2</b>
	L14	-6.5	-1.6	-
	L15	26.3	-1.6	-
	<b>L14-L15 átlaga**</b>	<b>9.9</b>	<b>-1.6</b>	<b>-115.8</b>
	L16	-214.8	-236.4	-
	L17	-218.1	-236.4	-
	L18	-221.2	-236.4	-
	L19	-226.1	-236.4	-
	L20	-234.4	-236.4	-
	L21	-237.7	-236.3	-
L22	-235.2	-236.2	-	
<b>L16-L22 átlaga</b>	<b>-226.8</b>	<b>-236.4</b>	<b>4.2</b>	
L23	-52.6	-57.6	-	
L24	-38.5	-57.6	-	
<b>L23-L24 átlaga</b>	<b>-45.6</b>	<b>-57.6</b>	<b>26.4</b>	
<b>L25</b>	<b>-44.6</b>	<b>-48.8</b>	<b>-</b>	
<b>L26</b>	<b>-22.9</b>	<b>-48.7</b>	<b>-</b>	
<b>L25-L26 átlaga</b>	<b>-33.8</b>	<b>-48.7</b>	<b>44.4</b>	

\*a kísérlet során az L4 jelű bélyeg nem működött megfelelően, ezért a mérési eredmények nem vehetők figyelembe

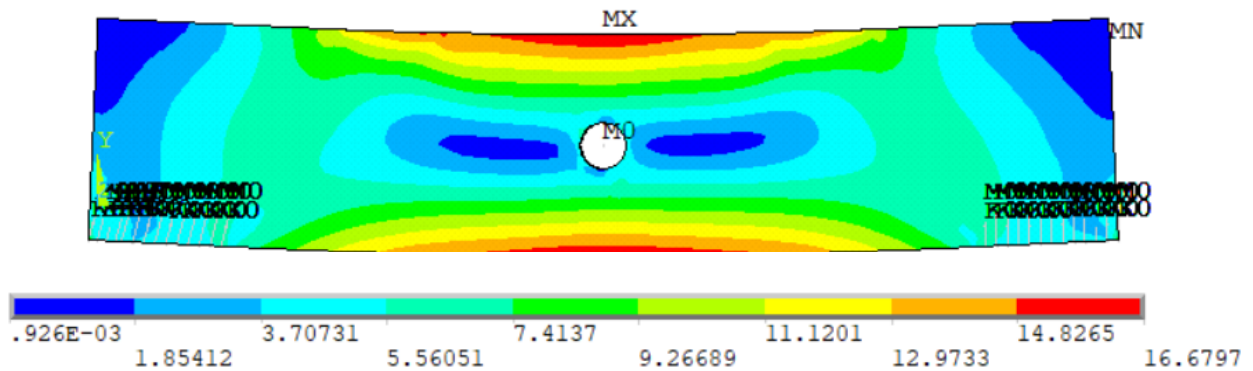
\*\*+/-10  $\mu\text{m}/\text{m}$ -nél kisebb mért értékek esetén az eredmények nem relevánsak a bélyegek hibahatára miatt



35. ábra: Kísérleti és ANSYS modell eredményei ST-06 teheresetben R1-R14 bélyegeknél

11. táblázat: Kísérleti és saját ANSYS modell eredményeinek összehasonlítása R1-R14 bélyegek helyein

Tehereset	Bélyeg helye	Feszültség – Kísérlet	Feszültség - ANSYS	Eltérés
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
ST-06	R1	8.3	9.1	
	R2	9.8	9.1	
	<b>R1-R2 átlaga</b>	<b>9.1</b>	<b>9.1</b>	<b>0.0</b>
	R3	4.2	4.9	
	R4	6.7	5.0	
	<b>R3-R4 átlaga</b>	<b>5.5</b>	<b>4.9</b>	<b>-9.2</b>
	R5	4.7	5.2	
	R6	6.2	5.2	
	<b>R5-R6 átlaga</b>	<b>5.5</b>	<b>5.2</b>	<b>-4.7</b>
	R7	5.9	2.5	
	R8	8.0	2.5	
	<b>R7-R8 átlaga</b>	<b>7.0</b>	<b>2.5</b>	<b>-64.1</b>
	R9	7.6	3.7	
	R10	7.5	3.7	
	<b>R9-R10 átlaga</b>	<b>7.6</b>	<b>3.7</b>	<b>-50.6</b>
	R11	6.5	6.1	
	R12	4.0	6.1	
	<b>R11-R12 átlaga</b>	<b>5.3</b>	<b>6.1</b>	<b>17.0</b>
	R13	9.7	8.7	
R14	8.6	8.6		
<b>R13-R14 átlaga</b>	<b>9.2</b>	<b>8.7</b>	<b>-5.3</b>	



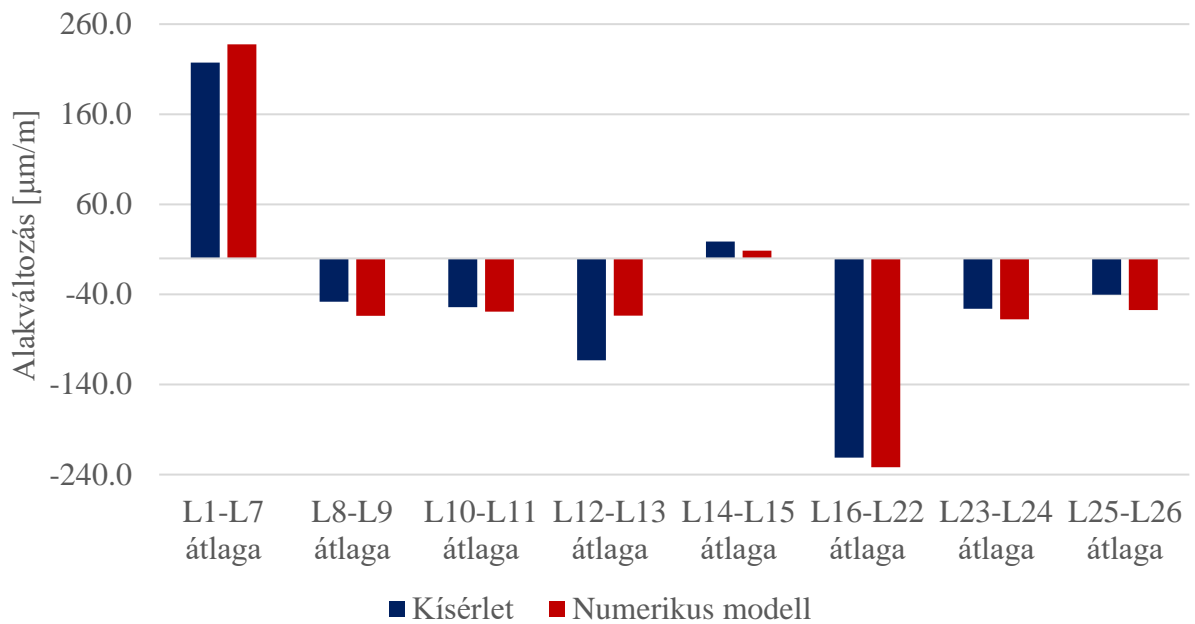
36. ábra: von Mises feszültségek [MPa], ST-06 tehereset, ANSYS modell

Látható, hogy a globális bélyegek (L1-L7 és L16-L22) esetén az eltérés mindössze 4% körül mozog. ST-06 tehereset a gerenda tetején és az acél csapon függőleges terhet, míg a gerenda magasságának felében a bal felén vízszintes terhet tartalmaz, így ez egy összetett tehereset. A támaszoknál lévő bélyegek (L8-L13 és L23-L26) esetén mért nagyobb eltérést a támasz méretéből adódó bizonytalan kialakítás modellezése okozhatja. A 600 mm-es feltámaszkodás paramétereit nagyban befolyásolja a beépített ütköző gumiréteg és a görgő kialakítása is, mely valószínűleg egyenetlenül került kialakításra, ami nagyobb eltéréseket okoz az ANSYS modellhez képest.

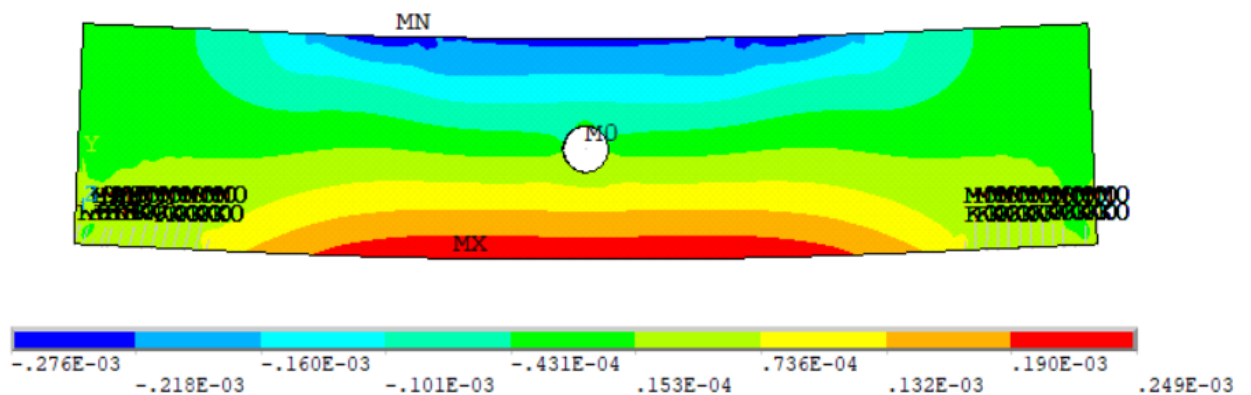
Megfigyelhető, hogy a felső peremen (L1-L7) a távolabb eső rétegen lévő bélyegeknél (L5-L7), míg az alsó peremen (L16-L22) a közelebb eső bélyegek (L16-L18) esetén nagyobb az eltérés a kísérleti eredmények és a végesesemes modell eredményei között. Ez utalhat arra, hogy a beépítés során imperfekció terhelte a szerkezetet, a gerenda nem tökéletesen függőlegesen állt. Az R1-R7 és R12-R14 rozetta bélyegek összehasonlított feszültségértékei átlagosan ~10%-kal térnek el, azonban az R8-R11 rozettáknál jelentős eltérést tapasztalunk. A kiugró eltérés oka lehet, hogy a terhelés hatására az acél csap megmozdul, ezzel többletfeszültséget generál a környező bélyegeknél. A bélyegeket külön-külön értékelve is átlagosan relatíve kis különbség adódik. Az eredmények alapján ettől függetlenül az ANSYS modell megfelelően pontosnak mondható a kísérleti eredményekkel történő összevetés alapján.

### 7.3.3 ST-07 tehereset

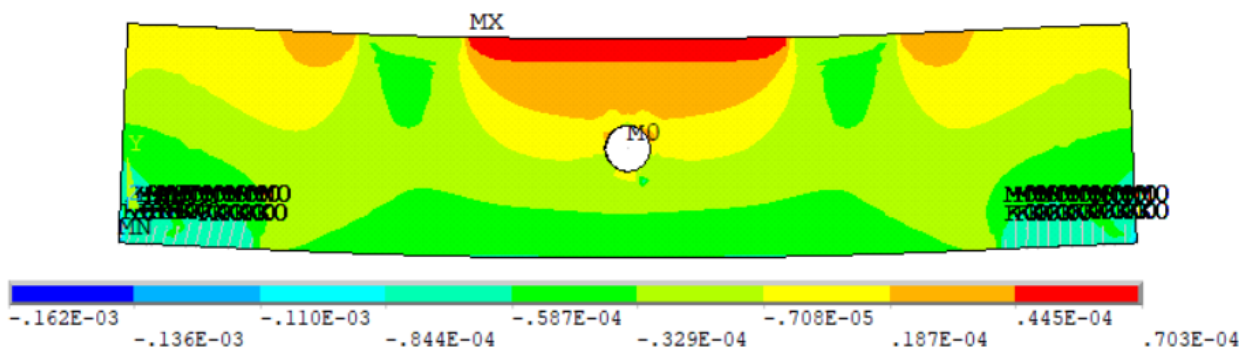
Az ST-07 tiszta tehereset eredményeit a **37-41. ábrákon** és a **12-13. táblázatokban** foglalom össze.



37. ábra: Kísérleti és ANSYS modell eredményei ST-07 teheresetben L1-L26 bélyegeknél



38. ábra: Hosszirányú alakváltozások [-], ST-07 tehereset, ANSYS modell



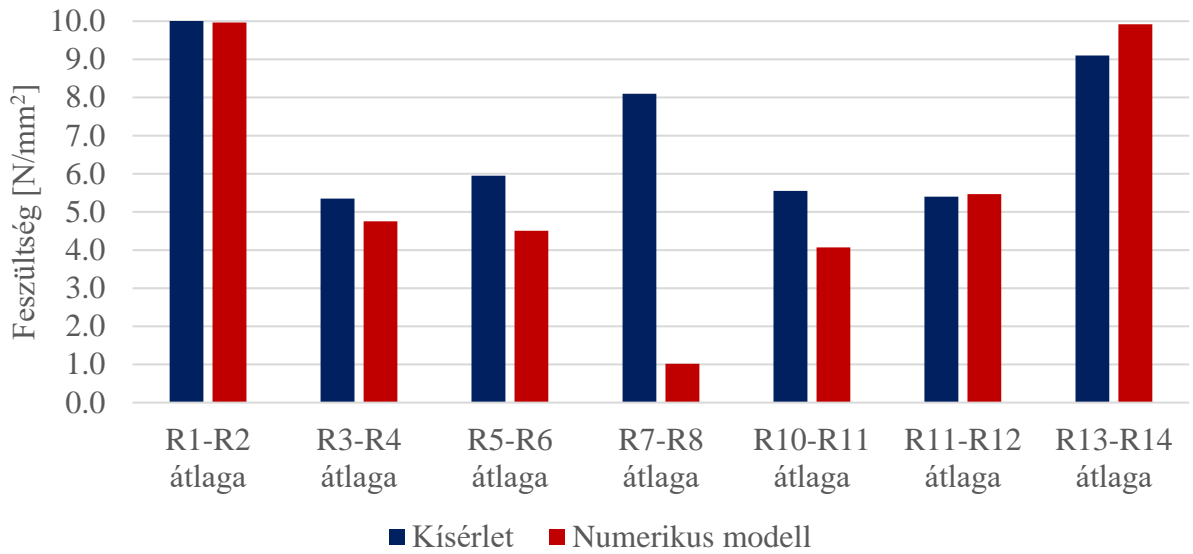
39. ábra: Függőleges alakváltozások [-], ST-07 tehereset, ANSYS modell

12. táblázat: Kísérleti és saját ANSYS modell eredményeinek összehasonlítása L1-L26 bélyegek helyein

Tehereset	Bélyeg helye	Alakváltozás – Kísérlet	Alakváltozás – ANSYS	Eltérés
		[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
ST-07	L1	224.7	237.5	-
	L2	205.1	237.5	-
	L3	223.7	237.6	-
	L4*	-	237.6	-
	L5	217.4	237.6	-
	L6	217.2	237.6	-
	L7	215.8	237.6	-
	<b>L1-L7 átlaga</b>	217.3	237.6	9.3
	L8	-35.6	-63.8	-
	L9	-60.7	-63.7	-
	<b>L8-L9 átlaga</b>	-48.2	-63.8	32.4
	L10	-35.9	-59.2	-
	L11	-72.4	-59.1	-
	<b>L10-L11 átlaga</b>	-54.2	-59.1	9.2
	L12	-17.9	-63.6	-
	L13	-208.5	-63.6	-
	<b>L12-L13 átlaga</b>	-113.2	-63.6	-43.8
	L14	6.1	8.5	-
	L15	31.4	8.5	-
	<b>L14-L15 átlaga**</b>	18.8	8.5	-54.7
	L16	-213.6	-231.9	-
	L17	-215.2	-231.9	-
	L18	-215.3	-231.9	-
	L19	-216.3	-231.9	-
	L20	-220.0	-231.9	-
	L21	-220.2	-231.9	-
L22	-222.2	-231.9	-	
<b>L16-L22 átlaga</b>	-221.2	-231.9	4.8	
L23	-65.6	-67.6	-	
L24	-46.2	-67.6	-	
<b>L23-L24 átlaga</b>	-55.9	-67.6	21.0	
<b>L25</b>	-50.8	-57.5	-	
<b>L26</b>	-29.9	-57.351	-	
<b>L25-L26 átlaga</b>	-40.4	-57.4	42.3	

\*a kísérlet során az L4 jelű bélyeg nem működött megfelelően, ezért a mérési eredmények nem vehetők figyelembe

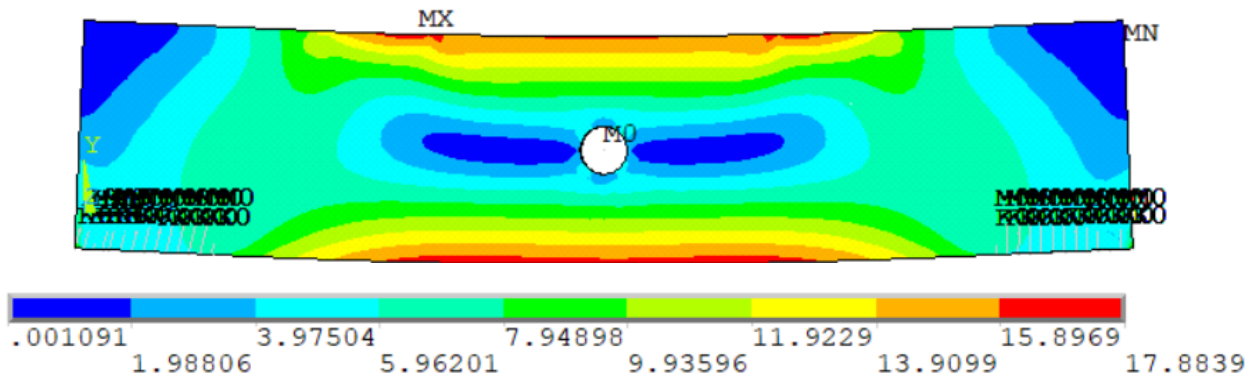
\*\*+/-10  $\mu\text{m}/\text{m}$ -nél kisebb mért értékek esetén az eredmények nem relevánsak a bélyegek hibahatára miatt



40. ábra: Kísérleti és ANSYS modell eredményei ST-07 teheresetben R1-R14 bélyegeknél

13. táblázat: Kísérleti és saját ANSYS modell eredményeinek összehasonlítása R1-R14 bélyegek helyein

Tehereset	Bélyeg helye	Feszültség – Kísérlet	Feszültség - ANSYS	Eltérés
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
ST-07	R1	10.0	10.0	-
	R2	11.3	9.9	-
	<b>R1-R2 átlaga</b>	<b>10.7</b>	<b>10.0</b>	<b>-6.4</b>
	R3	5.2	4.8	-
	R4	5.5	4.8	-
	<b>R3-R4 átlaga</b>	<b>5.4</b>	<b>4.8</b>	<b>-11.1</b>
	R5	8.1	4.5	-
	R6	3.8	4.5	-
	<b>R5-R6 átlaga</b>	<b>6.0</b>	<b>4.5</b>	<b>-24.3</b>
	R7	8.8	1.0	-
	R8	7.4	1.0	-
	<b>R7-R8 átlaga</b>	<b>8.1</b>	<b>1.0</b>	<b>-87.4</b>
	R9	5.0	4.1	-
	R10	6.1	4.1	-
	<b>R9-R10 átlaga</b>	<b>5.6</b>	<b>4.1</b>	<b>-26.7</b>
	R11	5.6	5.5	-
	R12	5.2	5.4	-
	<b>R11-R12 átlaga</b>	<b>5.4</b>	<b>5.5</b>	<b>1.3</b>
	R13	8.6	10.0	-
R14	9.6	9.9	-	
<b>R13-R14 átlaga</b>	<b>9.1</b>	<b>9.9</b>	<b>9.0</b>	



41. ábra: von Mises feszültségek [MPa], ST-07 tehereset, ANSYS modell

Látható, hogy a globális bélyegek (L1-L7 és L16-L22) esetén az eltérés 5-10% körül mozog. L8-15 és L23-L26 esetén az eltérés értékek kicsit magasabbak, melyet szintén a támaszok bizonytalan kialakítása okozhat. Az R1-R7 és R12-R14 rozetta bélyegek összehasonlított feszültségértékei átlagosan ~10%-kal térnek el, azonban az R8-R11 rozettáknál jelentős eltérést tapasztalunk. Ennek oka az ST-06 teheresetnél már említett acél csap elmozdulás által generált többletfeszültség lehet. Az eredmények alapján ettől függetlenül az ANSYS modell megfelelően pontosnak mondható a kísérleti eredményekkel történő összevetés alapján.

## 8 Numerikus paramétervizsgálat

Az alábbi fejezetben háromféle, a gyártás és beépítés során esetlegesen a szerkezetet terhelő imperfekció hatásának vizsgálata történik. A vizsgált tehereset az üvegréteg vastagság és kardosság esetében az ST-06 jelű, míg csapferdeség esetén az ST-01 jelű, az értékelt bélyegek az L1-L7 és L16-L22 globális hatást mérő nyúlásmérő bélyegek. Az egyes imperfekciók mértéke – amennyiben rendelkezik róla szabvány – a szabványok által meghatározott tűréshatárok szerint, egyéb esetben pedig az esetlegesen a szerkezetbe kerülő imperfekciók ésszerű keretei szerint kerül kijelölésre.

### 8.1 Üvegréteg vastagsága

Gyártás során előfordulhat, hogy az üvegrétegek vastagsága nem pontosan az előírt vastagságú lesz, ezzel imperfekciót okozva. Az MSZ EN 12150-1:2015-A1 szabvány alapján a vizsgált üveggerenda kategóriájában  $[-0.3 \div +0.3]$  mm gyártási tolerancia a megengedett érték üvegrétegenként. Az alábbiakban látható az üveggerenda határértékekre történő vizsgálata látható.

#### 8.1.1 Üvegréteg vastagság növelése (+0.3mm/réteg)

Először az összes üvegréteg vastagságát +0.3 mm-rel megnövelve futtattam a modellt. Ebben a paramétervizsgálatban a ragasztófólia rétegeket tökéletesnek feltételezem.

14. táblázat: Perfekt és imperfekt modell eredményeinek összehasonlítása

Bélyeg helye	Perfekt geometria Alakváltozás	0.3 mm/réteg vastagnövelés Alakváltozás	Eltérés
	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
L1	234.4	227.6	-2.9
L2	234.5	227.7	-2.9
L3	234.5	227.8	-2.9
L4	234.6	227.8	-2.9
L5	234.6	227.8	-2.9
L6	234.6	227.8	-2.9
L7	234.6	227.8	-2.9
L16	-236.4	-229.6	-2.9
L17	-236.4	-229.6	-2.9
L18	-236.4	-229.6	-2.9
L19	-236.4	-229.6	-2.9
L20	-236.4	-229.6	-2.9
L21	-236.3	-229.5	-2.9
L22	-236.2	-229.4	-2.9

A perfekt geometriával rendelkező modell eredményeihez képest a +0.3 mm/réteg vastagságtöbblettel rendelkező modell eredményei mindössze 2.9%-kal térnek el, ez alapján



kijelenthetjük, hogy a szabvány által szabott felső határon belül a gyártás során a szerkezetbe kerülő vastagság jellegű imperfekciónak nincs jelentős hatása.

### 8.1.2 Üvegréteg vastagság csökkentése (-0.3mm/réteg)

Ebben az esetben az összes üvegréteg vastagságát -0.3 mm-rel csökkentve futtattam a modellt. Ebben a paramétervizsgálatban a ragasztófólia rétegeket tökéletesnek feltételezem.

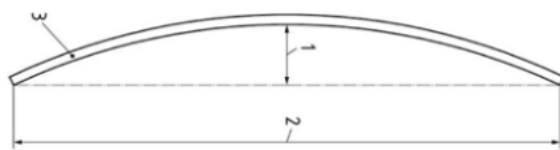
15. táblázat: Perfekt és imperfekt modell eredményeinek összehasonlítása

Bélyeg helye	Perfekt geometria Alakváltozás	0.3 mm/réteg vastagsárcsökkenés Alakváltozás	Eltérés
	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
L1	234.4	241.6	3.1
L2	234.5	241.7	3.0
L3	234.5	241.7	3.1
L4	234.6	241.8	3.1
L5	234.6	241.8	3.1
L6	234.6	241.8	3.1
L7	234.6	241.7	3.0
L16	-236.4	-243.6	3.1
L17	-236.4	-243.7	3.1
L18	-236.4	-243.7	3.1
L19	-236.4	-243.7	3.1
L20	-236.4	-243.6	3.1
L21	-236.3	-243.6	3.1
L22	-236.2	-243.5	3.1

A perfekt geometriával rendelkező modell eredményeihez képest a -0.3 mm/réteg vastagsággal rendelkező modell eredményei mindössze 3.0-3.1%-kal térnek el, ez alapján kijelenthetjük, hogy a szabvány által szabott alsó határon belül a gyártás során a szerkezetbe kerülő vastagság jellegű imperfekciónak nincs jelentős hatása.

## 8.2 Kardosság

A kardosság a gerenda keresztirányú, gyártásból adódó imperfekciója (42. ábra). Ebben az esetben a gerenda középső keresztmetszetét adott mértékben keresztirányban kimozdítva vizsgáljuk a szerkezet viselkedését, erőjátékát. Ehhez egy lineáris stabilitásvizsgálatot végeztem (LBA), majd az első sajátalakot (43. ábra) felhasználva felskáláztam az alak amplitúdóját oly módon, hogy a kívánt kardosságot figyelembe tudjam venni a kiindulási geometriában, mintegy felülírva a csomópontok térbeli pozícióját.



42. ábra: Kardosság MSZ EN 12150-1:2015-A1 szabvány [11] alapján, 1-középső keresztmetszet keresztirányú kitérítése, 2-a gerenda hossza, 3-a gerenda vastagsága

A szerkezetre vonatkozó MSZ EN 12150-1:2015-A1 szabvány [11] alapján a megengedett kardosság az üveggerenda osztályában 3 mm/m, ami a 4000 mm támaszköz esetén 12 mm. A továbbiakban háromféle kardosságot vizsgálók: 1 mm, 2 mm, 12 mm.



43. ábra: Sajátalak LBA alapján kardosság figyelembevételéhez

16. táblázat: Kardosság hatása (\*eltérés a tökéletes szerkezet alakváltozásaihoz képest)

Bélyeg helye	Perfekt geometria	Kardosság = 1 mm		Kardosság = 2 mm		Kardosság = 12 mm	
	Alakváltozás	Alakváltozás	Eltérés*	Alakváltozás	Eltérés*	Alakváltozás	Eltérés*
	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
L1	234.4	234.8	0.2	235.3	0.4	240.4	2.6
L2	234.5	234.8	0.1	235.2	0.3	239.8	2.2
L3	234.5	234.7	0.1	234.9	0.2	237.5	1.3
L4	234.6	234.6	0.0	234.7	0.0	235.8	0.5
L5	234.6	234.4	-0.1	234.3	-0.1	233.3	-0.5
L6	234.6	234.3	-0.1	233.9	-0.3	231.5	-1.3
L7	234.6	234.1	-0.2	233.7	-0.4	230.4	-1.8
L16	-236.4	-236.3	0.0	-236.1	-0.1	-234.6	-0.8
L17	-236.4	-236.3	0.0	-236.1	-0.1	-234.5	-0.8
L18	-236.4	-236.3	0.0	-236.2	-0.1	-234.9	-0.6
L19	-236.4	-236.4	0.0	-236.4	0.0	-235.8	-0.3
L20	-236.4	-236.5	0.0	-236.6	0.1	-237.2	0.3
L21	-236.3	-236.5	0.1	-236.7	0.1	-238.0	0.7
L22	-236.2	-236.4	0.1	-236.6	0.2	-238.3	0.9

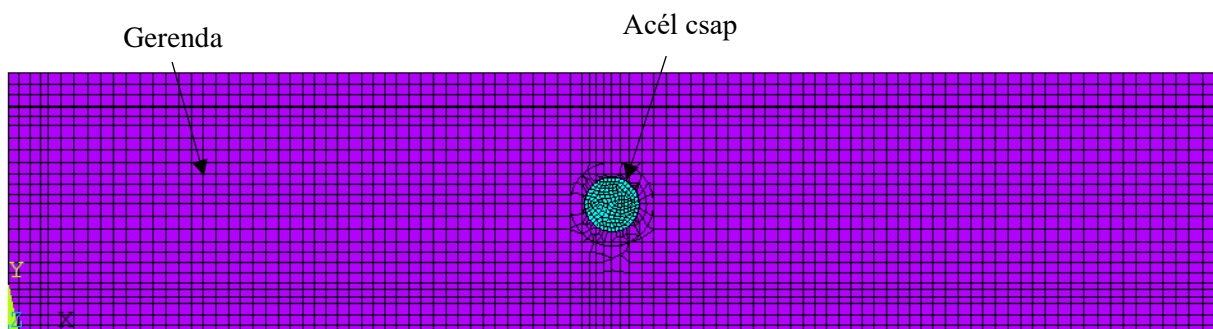
Az eredményekből látható, hogy 1 mm és 2 mm esetén gyakorlatilag nem érzékelhető a kardosság hatása. A szabvány által megadott határérték (ebben az esetben 12 mm) esetén az előbbieknél kissé nagyobb különbség érzékelhető az alakváltozásokban, azonban a maximum mindössze 2.6%. Ezen eredmények alapján kijelenthető, hogy a szabvány által engedélyezett határokon belül a kardosság jelenlétének nincs számottevő hatása a szerkezetben keletkező alakváltozásokra.

### 8.3 Csap ferdesége

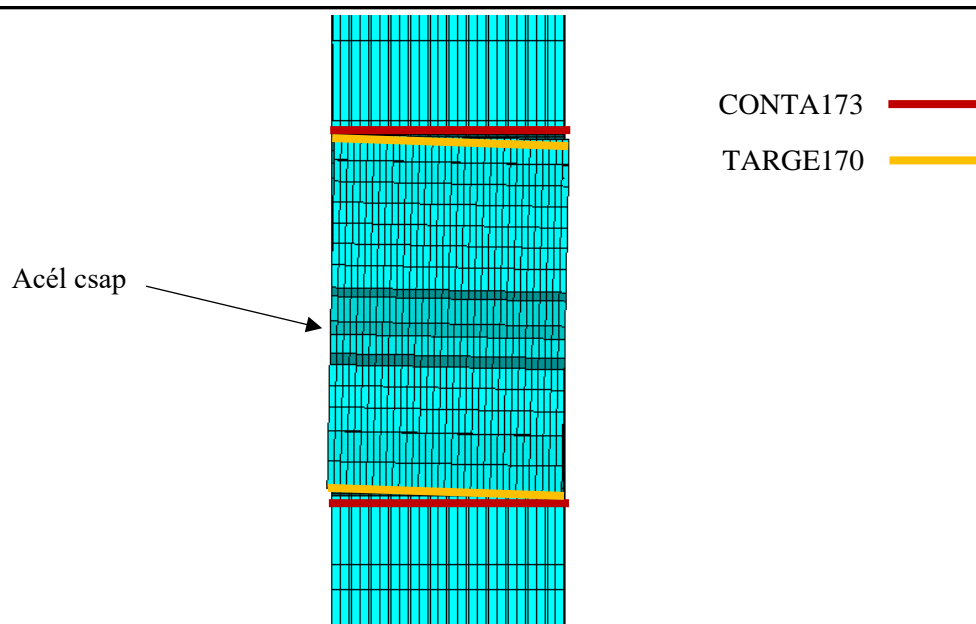
Előfordulhat, hogy a gyártás és beépítés során a csap ferdén kerül kialakításra. Ennek különösen az ST-01 tiszta teheresetben van jelentősége, amikor csak a csapra felfüggesztett terhet működtettek. Látható a 7. fejezetben részletezett kísérleti eredményeknél, hogy az azonos oldalon lévő szélső bélyegek (L1 és L7, illetve L16 és L22) összehasonlításánál az ST-01 teheresetben van arányaiban a legnagyobb eltérés. Arra lehet következtetni, hogy az eltérést (részben) a csapferdeség okozhatja, mert az ST-06 teheresetben (gerenda tetején függőleges teher, csapra függesztett függőleges teher és vízszintes teher) már kisebb az eltérés, mivel feltehetően a gerenda tetején működő függőleges terhek dominálnak, míg az ST-07 tiszta teheresetben (csak a gerenda tetején van függőleges teher) már egészen kicsi a különbség a szélek között, ekkor a csapon keresztül nem vittek be erőt.

Eszerint az alábbiakban a numerikus modellel vizsgálom a ferdeség hatását a szerkezet erőjátékára. A kísérleti összeállításban a csap mért ferdesége a gerenda teljes vastagságára (136.72 mm) 3 mm volt, ezért a paramétervizsgálat során is ezt az értéket veszem fel.

A tökéletes geometriával rendelkező numerikus modellben a csap modellezése egyszerűsítve, CERIG segítségével történt (5. fejezet). A csap imperfekciójának vizsgálatához a csap testelemekkel történő, pontosabb modellezése is szükséges. Az acél csap a vége-selemes modellben (**44. ábra**) rugalmasan viselkedik, rugalmassági modulusát 210 GPa-ra, Poisson-tényezőjét 0.2-re vettem fel. A furat és az acél csap felülete közötti teherátmenet modellezéséhez 'contact' és 'target' elemeket használtam ( $\mu = 0.5$ ). A 'contact' elem típusa CONTA173, a 'target' elem típusa TARGE170.



44. ábra: Acél csap modellezése és terhelése ST-01 teheresetben



45. ábra: Ferde csap részlete

17. táblázat: Csapferdeség hatása

Bélyeg helye	Perfekt geometria Alakváltozás	3 mm csapferdeség Alakváltozás	Eltérés
	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[%]
L1	49.6	55.4	11.6
L2	49.6	53.5	7.8
L3	49.7	52.1	4.9
L4	49.7	52.3	5.3
L5	49.7	53.8	8.2
L6	49.7	53.5	7.8
L7	49.7	52.0	4.6
L16	-49.6	-45.4	-8.6
L17	-49.6	-45.4	-8.5
L18	-49.6	-45.9	-7.6
L19	-49.6	-46.5	-6.4
L20	-49.6	-47.4	-4.5
L21	-49.6	-47.8	-3.6
L22	-49.5	-47.9	-3.2

Az eredmények alapján látható, hogy a csap ferdeségének van hatása, de 3 mm (a teljes vastagságra) csapferdeség esetén ez nem olyan nagymértékű, azonban keresztirányban itt is megjelenik a lineáris trend.

Emellett érdemes megjegyezni, hogy ha a kísérleti eredményeket, a tökéletes modellt (melyben a csap egyszerűsítve, CERIG-gel volt modellezve) és a csapferdeséget tartalmazó modellt (csap modellezése pontosabban) összehasonlítjuk (**18. táblázat**), látható, hogy a kísérletben és a csapot testelemekkel figyelembe vevő modellben a húzott oldalon (L1-L7) abszolút értékben véve nagyobb a nyúlások átlaga, mint a nyomott oldalon (L16-L22), míg az egyszerűsített (tökéletes geometriával rendelkező) modell esetén ezek szinte azonosak.

18. táblázat: Bélyegek átlagai kísérlet, tökéletes modell és csapferdeség esetén

Bélyeg helye	Kísérlet Alakváltozás	Perfekt geometria Alakváltozás	3 mm csapferdeség Alakváltozás
	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
L1	62.9	49.6	55.4
L2	75.5	49.6	53.5
L3	58.5	49.7	52.1
L4	-	49.7	52.3
L5	51.8	49.7	53.8
L6	48.9	49.7	53.5
L7	46.1	49.7	52.0
<b>L1-L7 átlaga</b>	57.3	49.7	53.2
L16	-37.4	-49.6	-45.4
L17	-39.2	-49.6	-45.4
L18	-42.5	-49.6	-45.9
L19	-45.0	-49.6	-46.5
L20	-49.7	-49.6	-47.4
L21	-52.6	-49.6	-47.8
L22	-54.3	-49.5	-47.9
<b>L16-L22 átlaga</b>	-45.8	-49.6	-46.6

---

## 9 Konklúziók

Jelen TDK dolgozatomban témáját egy tartószerkezet céljára készült nagyméretű üveggerenda laboratóriumi kísérleti vizsgálata alapozta meg. A mérés célja egyrészt a tartó lehajlásának, másrészt kitüntetett pontokban a nyúlásoknak – különös tekintettel a felfüggesztési csomópont környezetében – regisztrálása volt egyidejűleg működő függőleges és vízszintes teher hatására.

Céлом volt, hogy az egyes üvegrétegek és fóliarétegek külön modellezésével egy pontosabb modellt készítssek, majd ezen a modellen háromféle imperfekció alkalmazásával vizsgáljam az üveggerenda viselkedését.

Dolgozatomban az ANSYS-ben felépített tökéletes geometriával rendelkező modell validálása során összehasonlítottam azt a Tervezők által készített héjmodellel, a kísérleti mérési -és az analitikus eredményekkel is.

A numerikus paramétervizsgálatok során háromféle imperfekció hatását vizsgáltam. Az első az üvegrétegek vastagságának imperfekciója. A szabvány által engedélyezett  $-0.3$  mm/réteg és  $+0.3$ mm/réteg esetén is azt az eredményt kaptam, hogy ez a jellegű és mértékű imperfekció nincs jelentős hatással az üveggerenda viselkedésére. A második a kardosság jellegű imperfekció vizsgálata volt, mely a gerenda gyártásból adódó keresztirányú imperfekciója. A szabvány által szabott határértékre ( $+12$  mm) vizsgálva azt az eredményt kaptam, hogy a kardosság (a szabvány keretei között) nincs jelentős hatással a gerenda viselkedésére. A harmadik a csap ferdesége volt, mely a gyártásból és beépítésből adódó imperfekció. Az acél csap pontos modellezésével, a kísérletben mért  $3$  mm-es csapferdeséget vizsgáltam (a gerenda vastagságára nézve). Az eredmények alapján látható, hogy a csapferdeségnek van hatása, azonban  $3$  mm esetén ez nem jelentős.

Sajnos a rendelkezésre álló idő már nem tette lehetővé, hogy megvizsgáljam, a fenti hatások mely kombinációja adná az egyes terhelési esetekben a legjobban megközelítő eredményeket. Erre a továbbiak során lehet kitérni.

A fentiekén túl, további kutatásban lehetne vizsgálni az egyes rétegek egymáshoz viszonyított relatív függőleges pozíciójának hatását – mely egy gyártás során elkerülhetetlen imperfekció típus –, ez akár jelentősebben is befolyásolhatja a teherviselést az egyes rétegek között. Ezzel egyidőben érdemes lehet vizsgálni a felfekvés zóna egyenetlenségeinek hatását, illetve a gerenda erőjátékának átrendeződését (és a ragasztórétegek paramétereinek hatását) a külső üvegrétegek szándékos megrongálása esetén.

## 10 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani a kísérletet finanszírozó OROSházaGLAS Kft-nek, hogy az általuk elvégzett széleskörű laboratóriumi vizsgálatokból néhány kísérlet eredményeit a TDK dolgozatom elkészítésének céljából rendelkezésemre bocsátották.

Köszönöm az ARC-S Group-nak, hogy az általuk elkészített tervezői modellt a numerikus modell validálásának céljából átadták.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni konzulenseimnek, Dr. Kollár Dénesnek (egyetemi adjunktus, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék) és Dr. Horváth Lászlónak (egyetemi docens, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék), hogy szakmai segítségükkel támogatták dolgozatom létrejöttét.

---

## 11 Hivatkozások

- [1] Dr. Kausay Tibor, Üveg és fény, egyetemi előadás, Építőanyagok I., 2017.
- [2] Dr. Horváth László, Általános méretezési elvek, Síküvegek méretezése, egyetemi előadás, Üveg épületszerkezetek tervezése c. tárgy, 2021.
- [3] Rénes Máté, Jakab András, Nehme Kinga, Nehme Salem Georges „Pontmegfogású üvegek laboratóriumi vizsgálata”, Műszaki Tudomány az Észak – Kelet Magyarországi Régióban, 2015 [https://www.researchgate.net/publication/281442549\\_LABORATORY\\_EXPERIMENTS\\_OF\\_POINT\\_FIXED\\_GLASSES\\_PONTMEGFOGASU\\_UVEGEK\\_LABORATORIUMI\\_VIZSGALATA](https://www.researchgate.net/publication/281442549_LABORATORY_EXPERIMENTS_OF_POINT_FIXED_GLASSES_PONTMEGFOGASU_UVEGEK_LABORATORIUMI_VIZSGALATA), elérve: 2021.10.15.
- [4] Molnár Gergely, Vigh László Gergely, Stocker Gyögy, Dunai László „Finite element analysis of laminated structural glass plates with polyvinyl butyral (PVB) interlayer”, Periodica Politechnica, Civil Engineering 56/1 Pages 35–42, 2012., DOI: 10.3311/pp.ci.2012-1.04
- [5] Molnár Gergely, Szerkezeti üveg többszintű modellezése, BME Építőmérnöki Kar, 2013.
- [6] C. Martineta,\*, M. Heilia, V. Martineza, G. Kermoucheb, G. Molnarc, N. Shcheblanovc,d, E. Barthele, A. Tanguyc „Highlighting the impact of shear strain on the SiO<sub>2</sub> glass structure: From experiments to atomistic simulations”, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 533, 119898, April 2020., DOI: 10.1088/1757-899X/399/1/012045
- [7] Fatemeh Pariafsai „A review of design considerations in glass buildings”, Frontiers of Architectural Research, Volume 5, Issue 2, Pages 171-193, June 2016. DOI: 10.1016/j.foar.2016.01.006
- [8] Üveg tartószerkezet laboratóriumi kísérletei, Vizsgálati jelentés, BME Építőmérnöki Kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2021.
- [9] Tervezők AxisVM modellje
- [10] TROSIFOL SentryGlas Product Datasheet, 2019, <https://www.trosifol.com/salessupport/downloads/product-brochures/>, elérve: 2021.10.19
- [11] MSZ EN 12150-1:2015+A1. Építési üveg. Termikusan edzett, biztonsági nátrium-kalcium-szilikát-üveg. 1. rész: Fogalommeghatározás és leírás, 2019.