



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK

**ÜVEGOSZLOPOK STABILITÁSVESZTÉSÉNEK KÍSÉRLETI
EREDMÉNYEKEN ALAPULÓ ÉRTELMEZÉSE RÖVID IDEIG
HATÓ KÖZPONTOS NYOMÁS HATÁSÁRA**

TÉZISFÜZET

Jakab András

okl. szerkezet-építőmérnök

Témavezető:

Dr. Nehme Salem Georges, PhD
egyetemi docens

Budapest, 2018.

Tartalomjegyzék

1. KUTATÁS JELENTŐSÉGE ÉS CÉLKITŰZÉSEI	2
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	3
3. LABORATÓRIUMI KÍSÉRLETEK	5
3.1. LETAPOGATÁSOS FELÜLETMÉRÉS	5
3.2. KÖZPONTOS NYOMÓVIZSGÁLAT.....	6
4. KUTATÁSI MÓDSZEREK	8
4.1. LETAPOGATÁSOS FELÜLETMÉRÉS	8
4.2. KÖZPONTOS TERHELÉS.....	8
4.3. KEZDETI GEOMETRIAI IMPERFEKCIÓ SZÁMÍTÁSA	9
5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	11
6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI	19
7. KITEKINTÉS.....	19
8. PUBLIKÁCIÓS JEGYZÉK.....	21
9. IRODALOMJEGYZÉK.....	23

1. KUTATÁS JELENTŐSÉGE ÉS CÉLKITŰZÉSEI

Az üvegoszlopok tervezésének elemzése az elmúlt 10 évben kiemelt témává vált. Svájci (Luible, 2004), belga (Belis et al., 2009), olasz (Amadio & Bedon, 2010), lengyel (Kalamar et al., 2016) és kínai mérnökök (Qiang et al., 2017) is jelentős kutatásokat végeztek e témában és egyben megalapozták az üvegoszlopok szakirodalmát is. A kutatásokban síklapokból álló téglalap és ettől eltérő zárt négyszög (Kalamar et al., 2016), „T” illetve „X” (Aiello et al., 2011) keresztmetszetű üvegoszlopokat is vizsgáltak.

Doktori kutatásomban az üvegoszlopok tervezése terén alapvető, eddig még nem tisztázott tervezési kérdésekre keresem a választ, mint például milyen rétegtendű üvegekből célszerű üvegoszlopot tervezni? Ezen kívül keresem a tervezést befolyásoló alapvető tényezők hatását pl.: a kezdeti imperfekció. Mivel az Eurocode 10 üveg tervezési szabvány még nem áll a mérnökök rendelkezésére, ezért kutatásomban a JRC Scientific and Policy Reports (Feldmann & Kasper, 2014) dokumentum alapján található üvegoszlopok vízszintes irányú elmozdulását számító módszert vizsgáltam, és a szélsőszerű feszültség számításhoz használatos kezdeti imperfekciókat.

A kutatók a kísérletek során többnyire ideálisan csuklós megtámasztási viszonyokat alkalmaztak, és ezen körülmények között vizsgálták az üvegoszlopok ideális viselkedését (Feldmann & Langosch, 2010) (Pesek et al., 2016). Kutatásomban fő célom az volt, hogy valós, a kivitelezési állapotokhoz hasonló megtámasztási viszonyokat tudjak vizsgálni.

Egyszerűbb modell léptékű, síklapokból álló, téglalap keresztmetszetű, egy- és többretegű üveg próbatesteket rövid ideig ható központos teherre vizsgáltam. A kutatás során vizsgáltam a teherbírást és a stabilitást befolyásoló tényezőket. A befolyásoló tényezők eltérő keresztmetszetű üvegoszlopoknál is jelen vannak, ezért a kutatás alapjaiban érinti az üvegoszlopok tervezését.

A doktori kutatásomban a legfontosabb célkitűzések az alábbiak voltak:

- Az üvegoszlopok kihajlási stabilitási viselkedésének és jellemzőinek osztályozása
- Az üvegoszlopok jellemző tulajdonságainak (pl.: geometriai imperfekciók, rétegfelépítés, üvegtípus) a stabilitásvesztésre és teherbírássra gyakorolt hatásának vizsgálata
- A valóságot jobban közelítő megtámasztást alkalmaztam, melyben változtattam az oldalirányú megtámasztásnak a merevségét, így a merevség változásának hatásait tudtam vizsgálni a teherbíráson és a stabilitásvesztésen
- A gyártásból származó $w_0^{\text{mért}}$ geometriai imperfekciók mérése
- A tervezés során megengedett w_0 kezdeti imperfekció értékének meghatározása és hatásainak mértéke a stabilitásvesztésre

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az üvegyártás során az úsztatókemencéből tökéletesen párhuzamos felületű üveglapok gördülnek ki a hűtő térre. A kis hajlítómerevség következtében az üveg könnyedén vesz fel görbült alakot. A hajlítómerevség növelése érdekében laminálják a kész üvegerterméket. A vágás okozta maradófeszültségek szintén módosítják az üveg alakját, ezért önmagában a hőkezelés nélküli üveglap is a síktól eltérő alakkal rendelkezik (EN 1863-1:2012).

A hőkezelési eljárás következtében az üveg alakja deformálódik. Az úsztatott üvegekhez képest az üvegen lévő kardosság mértéke nő és alakja megváltozik. Az alak megváltozása annak köszönhető, hogy a hőkezelési eljárás során a síklapot görgőkre helyezik fel és az üveglapot a lágyulási hőmérsékletre fűtik fel. Ekkor az üveglap a viszkozitás csökkenésének és a gravitációs erőnek köszönhetően a görgők felé hullámosodik, azonban az üveglapok előre-hátra mozgatása ezt részben akadályozza. Mikor hűtésnél a hőmérséklet eléri a lágyulási hőmérsékletet, az üveg alakja nem változik. A gyártási folyamat szinuszos alakot eredményez, ahol a görgők távolsága a hőkezelt üvegnél mérhető hullámok hullámhossza (EN 1863-1:2012).

Az üvegek kezdeti alakja nagy mértékben befolyásolja az oszlopok stabilitási és teherbírási viselkedését. Az EN 1863-1 szabvány szerint mérni lehet a geometriai imperfekciók közül az üvegek kardosságát, szinuszoságát (hullámosság), azonban csavart kezdeti görbületet nem. A szabványban meghatározott mérési módszerek nem teszik lehetővé automatizáltan a folyamatos mérést és a mérés pontossága is kérdéses. A kardosság mértéke (2-1. ábra 1) és a szinuszos hullámok mélységei (2-1. ábra 2) korlátozottak. Úsztatott üveg esetében a kardosság határértéke 3,0 mm/m, míg a szinuszoság értéke 0,4 mm. A kardossági értékek korlátozására azért is van szükség, mert növekedése csökkenteni tudja a stabilitásvesztéshez tartozó erőszintet. A szinuszos hullám a kardossággal ellentétben akár növelheti is a stabilitásvesztéshez tartozó erőszintet, ha az ideális Euler-i kihajlás elméletét vesszük alapul, azonban ezt még nem sikerült üvegeknél igazolni a gyakorlatban.



2-1. ábra a) Kardosság (1-kardosság mérete; 2-üveg) b) Szinuszos hullám (3-hőerősített üveg)
(EN 1863-1:2012)

Nemzetközi kutatásban (Belis et al., 2011) 3 m hosszú üvegekhez tartozó hullámossági és kardossági kezdeti alakot vizsgáltak float, hőerősített és edzett üvegek esetén. Vizsgáltak 120, 150,

200 és 300 mm szélességű üveg próbatesteket. A vizsgálatokat az EN 1863-1 és az EN 12150 szabványok alapján és egyedi vizsgálatokkal végezték, mely során differenciál transzformátoros útmérőt (LVDT) alkalmaztak a folytonos és automatizált kísérletekhez. A statisztikai számítások eredményeképpen Jan Belis és szerző társai 0,0025 mm/mm-es értéket javasolnak hőerősített és edzett üvegek kezdeti geometriai imperfekció fajlagosított határértékének, mely érték 17 %-kal kisebb, az EN 1863-1:2012 szabványban engedélyezett maximálisan kardossági értéknél. Jan Belis és társai által ajánlott kezdeti geometriai imperfekciós határérték az L/400-as határértéknek felel meg. A 2-1. táblázatban foglaltam össze az üvegoszlopok kihajlását befolyásoló imperfekciókat az üveg előállításától a beépítéséig.

2-1. táblázat Üvegoszlopok kihajlását befolyásoló imperfekciók az üveg előállításától a beépítéséig

Alap üveg termék (gyártási)	Üveg feldolgozás	Kivitelezés / beépítés
- Ón okozta anyagszerkezeti változás	Vágás egyenetlenségei (alakosság) Élmegmunkálás	- Ferde beépítés - Ágyazóanyag nem megfelelő merevsége,
- Fuvókák és görgők okozta hullámosság és kardosság	Hőkezelés (felfűtés és a hűtés nem egyenletes, görgők okozta görbületek)	hiánya
- Vágás okozta feszültségek	Laminálás okozta együtt dolgozás, görbületek, egymáson túlnyúló élek	- Beépítésből származó külpontosság
- Méretbeli eltérések		

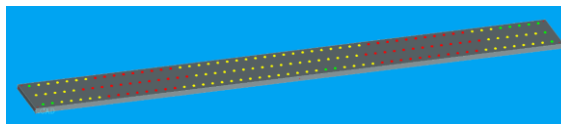
3. LABORATÓRIUMI KÍSÉRLETEK

3.1. Letapogatásos felületmérés

Az üvegek felületi hullámosságát mértem a Salgglas Kft-nél Wenzel LH 108 3D koordinátamérő berendezéssel (3-1. a) ábra), valamint Metrosoft CM szoftver segítségével dolgoztam fel a mért adatokat (3-1. b) ábra). A mérés során 10^{-3} mm-es pontossággal mértem az üveg felületét. Mérési metodikában pedig Referencia Pont Rendszert (RPS, Reference Point System) alkalmaztam. Az üveglapot vízszintesen helyeztem a mérőberendezés mérési felületére, az üveg alakját a felületre merőlegesen 15 mm-es eltolásokkal üvegpróbatestenként három mérősorban mértem, ahol a két oldalsó peremtől 15 mm-re volt két mérendő pontsor. Az üveg közepén helyeztem el a harmadik mérendő pontsört. A mérőgép mérőfeje függőlegesen tapogatja le a mérendő felületet. A mérési eredmény a kezdetben lemért és a „bestfit” értékkel kiáttlagolt sík és a mérési pont közötti különbsége (a pont és a sík közötti legkisebb távolság).



a)



b)

3-1. ábra a) Wenzel LH 108 3D koordinátamérő berendezés a Salgglas Kft. üzemében b) egy hőerősített üveg mérési eredménye

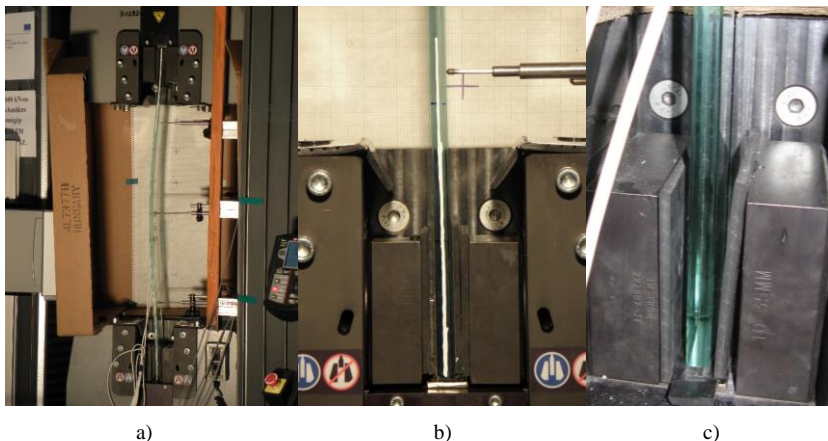
Az alkalmazott mérési rendszerben a próbatesteket térben kellett elhelyezni, ezért összesen 6 bázispontot alkalmaztam. Függőlegesen a letapogatás irányában alkalmaztam az üveg sarkainál 3 bázispontot. Az üveg síkjában további 3 bázispontot, melyből az egyik merőleges volt a másik kettőre. Függőleges irányban az üvegfelület meghatározására egy további ún. „bestfit” pontot alkalmaztam a negyedik saroknál. A korábban felvett sík és a „bestfit” pont közötti eltérést szétosztottam a sarkok között egyenletesen, mellyel felvettem az üvegfelület síkját. Ehhez a síkhoz képest mértem az üveg valós eltérését.

Az adatfeldolgozás során meghatároztam a próbatestek kardossági és szinuszhullám mélység értékeit. A mérésből kapott görbéket párosítottam, így már a vizsgált üveg alakját tanulmányoztam két és háromdimenzióban egyaránt, mely alapján az üvegyártás hatásait vizsgáltam. A mérés kalibrációs időszakában előfordult, hogy csak a próbatestek egyik oldalát mértem, így 35 db üveg próbatesten 68 mérését végeztem el.

3.2. Központos nyomóvizsgálat

A BME Építőanyagok és Magasépítési Tanszék laboratóriumában egy- és többretegű üvegoszlopok kihajlási és teherbírási viselkedését vizsgáltam. A vizsgálatokhoz INSTRON 5989 nyomógépet és elmozdulás vezérelt terhelést alkalmaztam. Minden próbatestet tönkremenetelig terheltem rövid idejű központos nyomással. A rövid idejű terhelés azt jelenti, hogy a vizsgálat során nem volt idő arra, hogy a próbatest viszkoelasztikus anyagmodellje szerinti nagyobb alakváltozás létrejöhessen a fólia kúszása miatt, mely tartós teher esetén mérhető. A vizsgálatok során float (úsztatott) valamint előfeszített (TVG) üvegeket vizsgáltam. Modell üvegeket vizsgáltam, melyeknek a méretaránya megvalósult projektekből származó lizénák méretarányával egyezik meg, ahol a magasság/szélesség aránya $\sim 12,5$. A modell üvegeket a Rákosy Glass Kft. biztosította számomra, ezért a kutatási eredmények az üzemben felhasznált üvegekre és technológiákra vonatkoznak.

Az 3-2. ábrán lehet látni a központos nyomás vizsgálat kísérleti elrendezését. A vizsgálat során mértem a függőleges és vízszintes irányú elmozdulásokat három magasságban, a függőleges terhelő erőt és az üveg alakváltozásait.



3-2. ábra a) Kísérleti elrendezés b) kiékelte megtámasztás c) nem kiékelte megtámasztás

Kísérleti állandók: A megtámasztás típusa; az ágyazó gumi keménysége: Shore A 80; a lamináló anyag típusa: EVA fólia, a lamináló fóliát egy rétegben alkalmaztam, melynek rétegvastagsága 0,38 mm; a vizsgálati hőmérséklet normál szobahőmérséklet, azaz $+23 \pm 5$ °C volt; az élmegmunkálás minden próbatest esetében „K” alakú élciszolás és élpolírozás volt (KP);

a *terhelési sebesség*: a kalibrációs időszakban a próbatesteket 0,5 mm/min terheltem, végül a terhelés során 1,0 mm/min-t alkalmaztam; az *üveg fajtája* (CaONaSiO₂).

Kísérleti változók: az *üveg típusa*, úsztatásos eljárással készült hőkezelés nélküli üvegek (a továbbiakban úsztatott vagy float üvegek) és hőkezelési eljárással előfeszített (a továbbiakban hőerősített vagy előfeszített, TVG); a próbatestek *névleges méretei*: *magasság* szerint 1000 mm, 920 mm, 840 mm; *szélesség* szerint 80 mm, 100 mm, 120 mm; *rétegszám*: egyrétegű (8 mm, 12 mm, 19 mm), kétrétegű (2×4 mm (4.4), 2×6 mm (6.6), 8+4 mm (8.4), 2×8 mm (8.8), 2×10 mm (10.10), háromrétegű (3×4 mm (4.4.4))); a *befogási merevség*, az ún. *nem kiékel*t vizsgálatok esetében (csak egy-egy darab ágyazó gumit alkalmaztam az acél és üveg között) a befogási merevség lecsökkent szabad elfordulás jöhetett létre a támasznál, *kiékel*t (azaz a hézagot teljesen kitöltött állapot esetén 3-2. ábra) az ágyazó anyag rugalmassága miatt nem fix befogás; *beállítási pontosság*: a próbatesteket szögmérő segítségével tökéletesen függőleges irányba helyeztem, kiegészítő vizsgálatoknál 1,0±0,5° fokos dőlést alkalmaztam a függőlegességhez képest.

A kísérleti változók alapján összeállított kísérleti terv látható a 3-1. táblázatban. A táblázat 228 db próbatestet tartalmaz, melyben a kiegészítő vizsgálatokra felhasznált 12 db próbatestet is megtalálható, azonban az azonos próbatesteken végzett további vizsgálatokat nem tartalmazza. A 3-2. táblázat tartalmazza a próbatestek jelölésének magyarázatát.

3-1. táblázat Kísérleti terv

Rétegfel- építés	Névleges magasság [mm]	Szélesség [mm] / Üveg típusa						Összesen
		80		100		120		
		Float	Hőerősített	Float	Hőerősített	Float	Hőerősített	
8	1000	5	10	2	2	3	3	25
	920	3	7	-	-	-	-	10
	840	3	7	-	-	-	-	10
4-4	1000	4	4	-	-	-	-	8
4.4	1000	6	9	2	3	3	3	26
	920	4	8	-	-	-	-	12
	840	4	7	-	-	-	-	11
12	1000	7	4	2	2	3	3	21
6.6	1000	8	6	2	2	3	3	24
4.4.4	1000	5	3	3	2	3	3	19
8.4	1000	-	3	2	2	3	3	13
19	1000	3	3	2	2	3	3	16
8.8	1000	4	3	2	2	3	3	17
10.10	1000	3	3	2	2	3	3	16
Összesen		59	77	19	19	27	27	228

3-2. táblázat F 2(6.6) 2 1000 100 1 jelű próbatest jelmagyarázata

Jel	Magyarázat
F	Üveg típusa: float üveg
2(6.6)	Üveg rétegszáma és egyben felépítése pl.: 2×6 mm-es laminált üveg
2	A próbatest sorszáma az ugyanazon paraméterekkel rendelkező próbatestek közül
1000	A próbatest névleges magassága: 1000 mm
100	A próbatest névleges szélessége: 100 mm
1,0	Az alkalmazott terhelési sebesség [mm/min]

4. KUTATÁSI MÓDSZEREK

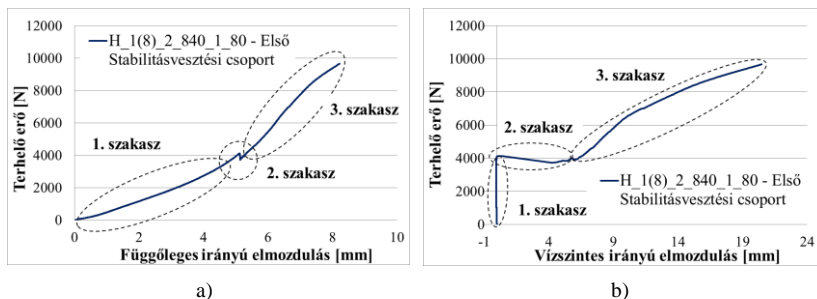
4.1. Letapogatásos felületmérés

Referencia Pont Rendszerrel (RPS) mért üvegek kardossági, szinusz hullám mélységi értékeit és alakjainak jellemzőit hasonlítottam össze Microsoft Excel szoftverben. A mért értékeket próbatest hossz-felületi egyenetlenség diagramokon ábrázoltam, ahol a maximális csúcs jelentette a legnagyobb kardossági értéket. Hőerősített üvegek esetében a próbatest hossz-felületi egyenetlenséget ábrázoló diagramokon a felületen mérhető hullámok mélységeinek átlagát határoztam meg, mely jellemzi az adott próbatestet. Az átlagértékekben mind a három mérősről származó értékek szerepelnek. A kardossági, a szinusz hullám mélységi értékek és az üveg alakjában létrejövő változásokkal mutattam be az üveget érő hőkezelési és laminálási megmunkálások hatásait. A próbatestek mért deformációs értékei a szabványos határérték alatt vannak, ezért a mért eredmények általános érvényűek.

4.2. Központos terhelés

A vizsgálati kiértékelések során a próbatestek terhelő erő-vízszintes irányú elmozdulás görbéi szolgáltatják a kihajlási viselkedésről a legfontosabb információkat. Az összehasonlítások során alapul vettem a terhelő erő-függőleges irányú elmozdulás és terhelő erő-alakváltozás görbéket. Elsődlegesen azonos tulajdonságú (méret, üvegfeldolgozás) üvegeket hasonlítottam össze a stabilitásvesztés, az ahhoz tartozó terhelő erő és a törő erő alapján. A másodlagos összehasonlításban a kísérleti változókat vettem alapul és a különböző tulajdonságú üvegek jellemző eltéréseit hasonlítottam össze pl. a befogási merevség változásának hatásait vizsgáltam a stabilitásvesztés, a törőerő és a maximális elmozdulás alapján.

A próbatestek stabilitásvesztési módja kihajlás (Timoshenko & Gere, 1961). A próbatestek terhelése során az egyensúlyi utak különböző szakaszokból állnak, ezek a következők: 1. szakasz: stabil, 2. szakasz: átugrási jelenség és 3. szakasz: stabil (4-1. a) és b) ábra).

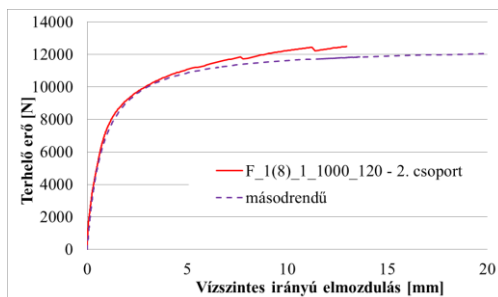


4-1. ábra Jellemző szakaszok bemutatása a) függőleges és b) vízszintes irányú elmozdulások a terhelési erő függvényében az első stabilitásvesztési csoport esetén

A stabil szakaszoknál látható, hogy a terhelő erő szigorúan monoton növekvő, míg az elmozdulás monoton növekvő. A második stabil szakasz esetén az erőfelvétel szintén monoton növekvő a tönkremenetelig. A két stabil szakasz között van egy átugrási jelenség, mely a két stabil egyensúlyi út közötti átmenetet jelenti a kihajlási folyamat során. Az átugrási jeliségnél az elmozdulásokat és a terhelő erőt egy lokális csúcs jellemzi.

4.3. Kezdeti geometriai imperfekció számítása

A másodrendű hatás alapján analitikusan meg lehet határozni az oszlop w_0 kezdeti imperfekcióját. A laboratóriumi vizsgálatok során meghatározott terhelő erő-vízszintes irányú elmozdulás görbét közelítettem a biztonság oldaláról a másodrendű hatás alapján számolt görbével (4-2. ábra).



4-2. ábra A második stabilitásvesztési csoportba tartozó próbatest terhelő erő-vízszintes irányú elmozdulás görbéje, valamint a hozzá alulról közelítő másodrendű elmélet alapján számított elmozdulás görbe

Ezen módszerrel minden próbatestemre megkaptam egy w_0 kezdeti imperfekciót, mely tartalmazza a mért $w_0^{\text{mért}}$ kezdeti geometriai imperfekciókat is. A stabilitási vizsgálatok alapján meghatározott stabilitásvesztési csoportok és az üvegtípusok alapján külön meghatároztam a csoportot jellemző átlagos w_0 értéket. A kísérleti változók alapján összehasonlítottam a w_0 értékek változását és az eredményeket összehasonlítottam a jelenlegi tervezési határértékekkel. A módszert a használhatósági határállapot tervezésére lehet alkalmazni. A görbék kezdőpontján nem látható a w_0 értékkel való eltolás, az útdókkal is csak az elmozdulást lehetett mérni, ezért az alapgörbe sem tartalmazza.

A 4-1. képletben látható a másodrendű hatásból származó eltolódás növekmény számításának módja (Feldmann & Kasper, 2014):

$$w(x) = \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (4-1)$$

, ahol:

- w_0 – kezdeti geometriai imperfekció [mm]
- N – terhelő erő [N]
- N_{cr} – kritikus kihajlási erő [N]

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A vastagon szedett szövegrészek ismertetik az új tudományos megállapításokat, a nem vastagon szedett részek azok bevezetését, illetve értelmezését adják.

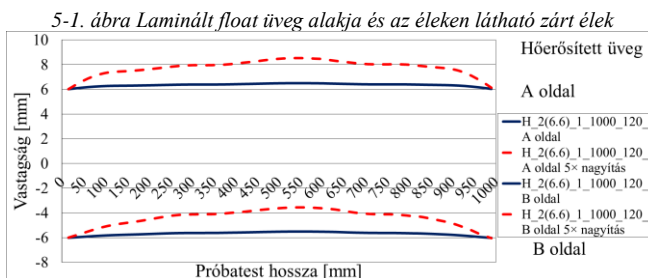
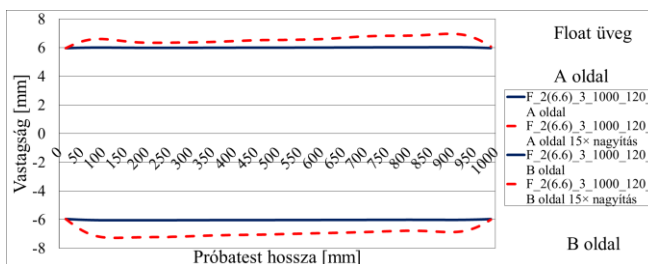
1. Téziscsoport: Referencia Pont Rendszerrel vizsgált üvegek alakí, kardossági és szinuszhullám eredményeihez kapcsolódó tézisek.

1.1 Tézis

A Referencia Pontrendszer (RPS) és koordinátamérő berendezés felhasználásával kidolgoztam az üvegoszlopok kezdeti alakjának, kardossági és szinuszhullám értékeinek ezred mm pontosságú mérését, mely módszer alkalmas az üvegek gyártásából és feldolgozásából származó deformációk meghatározására.

Kapcsolódó publikációk: [15], [16], [18]

Az 5-1. és 5-2. ábrán lehet látni a float és hőerősített üvegek mért alakjait. A mérések alapján határoztam meg a kardossági és szinuszhullám mélységi értékeket, mely tulajdonságokat is jól lehet látni az alábbi ábrákon.



1.2 Tézis

A Referencia Pontrendszer (RPS) alkalmazásával és az általam vizsgált próbatesteknek a mérési eredményeinek kiértékelése alapján megállapítottam, hogy a hőkezelési eljárás egy nagyságrenddel növeli a kardossági értékeket egyrétegű üvegek esetében (0,016-0,028 mm-ről 0,571-1,040 mm-re). A kardossági értékek meghaladhatják a 20-szoros növekedést is. A hőkezelés nélküli úsztatott üvegek esetében az EVA fóliával történő laminálási eljárás 1,5-6,0-szorosára növeli a kardossági értékeket (0,016-0,028 mm-ről 0,044-0,258 mm-re). Hőerősített üvegek esetében az EVA fóliával történő laminálás átlagosan csökkenti a szinus hullám mélységet 40-65 %-kal.

Kapcsolódó publikációk: [18]

A hőerősítési és a laminálási eljárás nagymértékben növeli az üveg kardossági és szinus hullám mélységek értékeit. Float üvegek esetében a laminálás okozta növekedés a mért értékekben jól kimutatható: A float egyrétegű próbatestek kardossága 0,016-0,028 mm terjedelemtől 0,044-0,258 mm-re nőtt, szinus hullám mélysége 0,0044-0,007 mm-ről 0,0015-0,0092 mm-re nőtt. Az egyrétegű üvegek esetében a kardossági értékek (0,016-0,028 mm-ről 0,571-1,040 mm-re) és a szinus hullám mélységek növekedése jól látható (0,0044-0,007 mm-ről 0,0332-0,1024 mm-re) a hőkezelés hatására, azonban a hőerősített egyrétegű és többretegű üvegek között a tendencia változó.

Megállapítottam, hogy a hőkezelés ugrásszerűen növeli a kardossági és szinus hullám mélységi értékeket, azonban a laminálással a kiugró kardossági és szinusossági értékek lecsökkennek. Az 5-1. táblázatban látható a kardossági és szinus hullám mélységi értékek hányadosai, melyben a hőkezelés és laminálás hatására történő változást elemeztem. A hőkezelési eljárás egyrétegű üvegek eredményei alapján 20× növekedést mértem, ami alapján kijelenthető, hogy az eljárás egy nagyságrendű növekedést jelent a kardossági értékekben.

Float üvegek esetében kimutattam, hogy a laminálás hatására a kardossági eredmények 1,89-6,36 arányban növekedtek. A hőerősített üvegek esetében azt láthatjuk, hogy a laminált üvegek kardossági és szinusossági értékei gyakran kisebbek, mint az egyrétegű üvegeké. Míg a hőkezelési eljárás jelentősen megnövelte a kardossági és szinus hullám mélységeket, addig a laminálás a kiugró értékeket lecsökkentette 39-67 %-kal, az eltérő amplitúdójú üvegek hullám mélységei az autokláv eljárás hatására csökkentek.

5-1. táblázat Megmunkálási hatások miatti növekedés aránya a kardosság és szinusz hullám értékekben

Megmunkálás hatása		Névleges vastagságok és rétegtrendi felépítés szerinti arányok								
		8	4,4	12	6,6	8,4	4,4,4	19	8,8	10,10
Hőkezelés	Kardosság	21,91	1,27	35,65	5,80	5,86	5,47	24,46	3,59	19,67
	Szinuszosság	8,62				3,30	3,54	12,09		5,42
Laminálás	Float	Kardosság	6,36		2,42	4,82	6,28	4,54		1,89
		Szinuszosság	0,82							
	TVG	Kardosság	0,41		0,47	1,00	1,54	0,97		2,12
		Szinuszosság	0,49		0,40	0,42	0,39	0,61		0,33

1.3 Tézis

RPS mérési módszerrel kimutattam, hogy az EVA fóliával laminált, nem hőerősített üvegek élei a laminálási eljárás hatására záródnak. Az élek záródása befolyásolja az üveg peremek együtt dolgozó képességét, tartósságát.

Kapcsolódó publikáció: [18]

Az üveg peremek záródását jól lehet látni az 5-1. ábrán, míg az 5-2. ábrán nincs ilyen jelenség. A laminálási eljárás hatásaként a kezdetben két különböző alakkal rendelkező üveg az autokláv eljárás hatására egymás alakjához közelítve új alakot vesznek fel. Float laminált üvegek esetében az egyes üveglapok élei – a közel azonos alak ellenére – függetlenül a párhuzamos haladási ívektől, egymásra szimmetrikus ívekben záródnak. Float üvegeknél 6 db üveg záródó, míg 1 db nyíló peremmel rendelkezett, míg ez az arány hőerősített üvegek esetében fordított (1:7) volt.

1.4 Tézis

Az RPS módszerrel igazoltam azt a tapasztalatokon alapuló feltételezést, hogy a laminálás hatására a szimmetrikus rétegtrendű laminált üvegek rétegei azonos méretű és helyzetű lokális görbületeket vesznek fel.

Kapcsolódó publikáció: [18]

A 16 db laminált üveg felületi geometriai imperfekciós üveg alak méréséből megállapítottam, hogy a laminálás hasonló görbületet hoz létre a laminált üvegek mindkét felületén. A vizsgált próbatestekből 12 esetben nagy hasonlóságot lehetett megállapítani a két üveglap felületei között, 3 db üveg esetében kisebb eltérésekre lehetett figyelni, míg 1 db aszimmetrikus rétegtrendű próbatest esetében a hasonlóság csekély mértékű volt. Az eredmények alapján a laminálási eljárás különböző alakokkal és geometriai imperfekciókkal, görbülettel rendelkező üvegek esetében 90 %-ban hasonló felületi egyenlőtlenségeket eredményezett.

1.5 Tézis

Az oldalirányban megtámasztott sík üvegoszlopok gyengetengely körüli kihajlási iránya közelítően 85 %-os pontossággal meghatározható a teljes kezdeti alak, a kardossági értékek és a hullám mélységek ismeretében.

Kapcsolódó publikáció: [18]

A vizsgált próbatesteknél a kardossági és szinusz hullám mélységek értékei alapján előre megbecsültem, hogy melyik irányba fog kihajolni a próbatest. Feltételeztem, hogy a nagyobb különpontossággal rendelkező, azaz nagyobb geometriai imperfekcióval rendelkező oldal irányában indulnak meg az elmozdulások terhelés hatására. A mért értékek alapján 64 %-os eredménnyel tudtam megmondani előre a kihajlási irányt. Amennyiben az üvegek alakját is figyelembe veszem a mért értékek mellett, 22 db próbatestből 19 esetén előre meg tudtam határozni a kihajlási irányt. Az alakméréssel kiegészített becslés 86 %-ban bizonyult sikeresnek.

2. Téziscsoport: Az egyensúlyi elágazások eredményeihez kapcsolódó tézisek

2.1 Tézis

Laboratóriumi kísérleteim alapján megállapítottam, hogy a síklapokból álló - 0,95-4,45 közötti viszonyított karcsúsági értékkel rendelkező - üvegoszlopokat egyensúlyi elágazásuk alapján 3 különböző stabilitásvesztési csoportba lehet sorolni. Az első stabilitásvesztési csoportnál átugrási jelenséggel kezdődik a kihajlás, az átugrás két stabil egyensúlyi út között jön létre. A második stabilitásvesztési csoportnál nincs átugrási jelenség, azonban megfigyelhető határ van a két stabil szakasz között. A harmadik stabilitásvesztési csoport esetében a terhelés kezdetekor elkezdődik a kihajlás jelensége és a terhelés során mindvégig stabil szakasz jellemző.

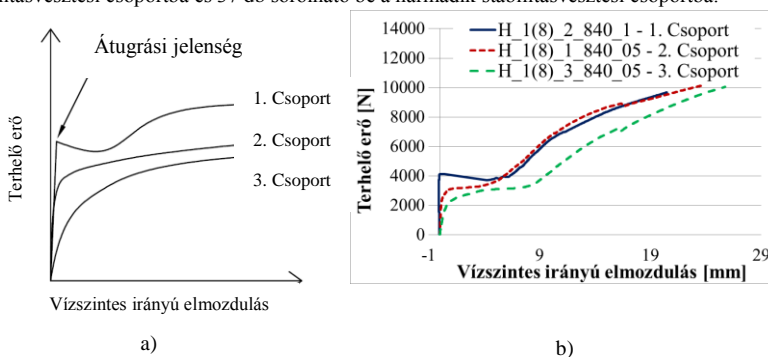
Kapcsolódó publikációk: [1], [2], [4], [6], [9]

A próbatesteket a jellemző görbék elemzése és a kihajlás létrejötte alapján három stabilitásvesztési csoportba soroltam. Kivételem nélkül minden vizsgált próbatest besorolható volt a csoportokba. Az egyes stabilitásvesztési csoportok elágazását mutatja be a 5-3. a) és b) ábra.

Az első stabilitásvesztési csoportba sorolt üvegeknél a stabilitásvesztést befolyásoló tényezők oly módon tudják növelni a stabilitásvesztés kezdetéhez tartozó terhelő erőt, hogy az a törőerőt vagy a tönkremenetelhez tartozó erőszintet is meghaladhatja. A második stabilitásvesztési csoportba sorolható üvegek esetében hiányzik a két egyensúlyi út közötti átugrás jelensége, továbbá a hirtelen végbemenő dinamikus elmozdulás és a terhelőerő-visszaesés az első és a

harmadik szakasz között. A harmadik stabilitásvesztési csoportba tartozó üvegek esetében a terhelés során egy stabil szakasz figyelhető meg a próbatest tönkremeneteléig.

Az egyensúlyi elágazások alapján megállapított csoportoknak tervezésre gyakorolt hatása is van, mivel kihatással vannak az üvegoszloptervezés során alkalmazott w_0 kezdeti geometriai imperfekciós tényezők határértékeire. Az elvégzett kísérletek alapján 237 db mérési eredményből 30 db sorolható be az első stabilitásvesztési csoportba, 170 db sorolható be a második stabilitásvesztési csoportba és 37 db sorolható be a harmadik stabilitásvesztési csoportba.



5-3. ábra A stabilitásvesztési csoportok szerinti terhelő erő-vízszintes irányú elmozdulás ábrák a) elméleti görbéi és b) valós próbatesteken mért eredményei

2.2 Tézis

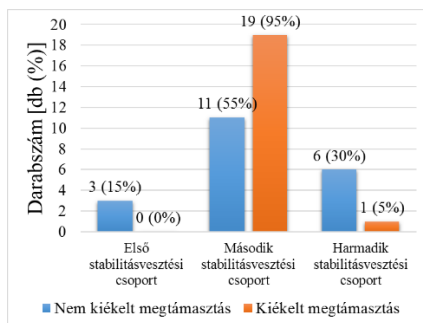
A megtámasztásoknál alkalmazott kiékelés – a megtámasztás oldalirányú merevítése – jelentősen befolyásolja az üvegoszlopok egyensúlyi elágazását. A kiékelte próbatestek közelítően 80 %-a a második stabilitásvesztési csoportba tartozott. A nem kiékelte próbatestek megközelítően 20 %-a tartozott az első és 25 %-a a harmadik stabilitásvesztési csoportba. Ezek alapján a kiékelés 20 %-kal emelte a második stabilitásvesztési csoport mennyiségét.

Kapcsolódó publikáció: [15]

A befogási merevség növelésével – kiékeléssel – szabályozni lehet az egyensúlyi elágazást. Kiékelés alkalmazásával, nagyobb valószínűséggel osztható a próbatest a második stabilitásvesztési csoportba, mint az első vagy a harmadikba. Az összes próbatest vizsgálati eredményét alapul véve, kiékelte megtámasztás hatására az első stabilitásvesztési csoportba tartozó üvegek aránya 23 %-ról 7 %-ra csökkent a nem kiékelte megtámasztású üvegekhez képest, a második stabilitásvesztési csoport esetén 56 %-ról 81 %-ra nőtt az üvegek aránya. A harmadik

stabilitásvesztési csoportba tartozó üvegeknél a százalékos aránya 21 %-ról 12 %-ra csökkent a kiékelés hatására.

Azonos próbatesteken (20 db) végeztem kiékelte és nem kiékelte (20-20 db) megtámasztással központos nyomóvizsgálatot. A „nem kiékelte” elrendezéssel kezdtem és megismételtem a vizsgálatot kiékelte megtámasztással, ekkor már törésig terheltem az üveglapokat. Az eredmények alapján a második stabilitásvesztési csoport volt jellemző a kikelés hatására.



5-4. ábra Azonos próbatesteken elvégzett nem kiékelte majd kiékelte megtámasztással vizsgált próbatestek és a stabilitásvesztési csoportok szerinti beosztás változása

3. Téziscsoport: A w_0 kezdeti imperfekció meghatározásához kapcsolódó tézisek

3.1 Tézis

Az oldalirányban kiékelte megtámasztás alkalmazásával sík üvegoszlopok másodrendű számításában szereplő w_0 kezdeti imperfekció értékét ($w_0=1,13-1,17$ mm közötti átlag értékek) a negyedére is lehet csökkenteni a nem kiékelte megtámasztásból származó eredményekhez képest ($w_0=5,45-8,34$ mm közötti átlag értékek).

Kapcsolódó publikáció: [17]

A kiékeléssel, azaz a megtámasztás merevségének növelésével, csökken a w_0 kezdeti geometriai imperfekció értéke, mint látható a 5-3. táblázatban. Kiékelte üveg esetén, legfeljebb 4,5 mm-es kezdeti geometriai imperfekciót kell figyelembe venni a vizsgált üvegeknél, ahol az osztó tényező 201-es értéket vesz fel. A minimum értékekhez tartozó átlag érték 1,13 mm és az ahhoz tartozó osztó tényező 798 (905-mm-es hossz esetén). A maximum értékekhez tartozó átlag érték 1,72 mm 528-as osztó tényezőt figyelembe véve (905 mm-es hossz esetén). Nem kiékelte megtámasztás esetén w_0 értéke jelentősen nő, míg az osztó tényezők csökkennek. A maximális kezdeti geometriai imperfekció 16 mm, melyhez 53 az osztó tényező (840 mm-es hossz esetén).

A nem kiékelte minimum értékek átlaga 5,45 mm, melyhez 183-as osztó tényező tartozik (1000 mm-es üveg hossz esetén). A legnagyobb értékek esetében a $w_0=8,34$ mm, melyhez 120-as osztó tényező tartozik (1000 mm-es üveg hossz esetén).

5-2. táblázat A kiékelte és nem kiékelte megtámasztás okozta különbségek a kezdeti geometriai imperfekció és az osztótényezők között

Megtámasztás	Tényezők	Átlagértékek alapján		Legnagyobb
		Legkisebb	Legnagyobb	
Kiékelte	$w_0=L/z$ [mm]	1,13	1,17	4,50
	$z=$ Osztó t.	798	528	201
Nem kiékelte	$w_0=L/z$ [mm]	5,45	8,34	16,00
	$z=$ Osztó t.	183	120	53

3.2 Tézis

Laboratóriumi kísérleti eredmények és statisztikai analízis alapján megállapítottam, hogy a w_0 kezdeti imperfekció értéke úsztatott üvegek esetében 87 %-a nem felelt meg az irodalomban meghatározott $w_0=L/2000$ határértéknek, melyre $w_0=L/500$ értéket ajánlok alkalmazni. Hőerősített üvegek esetében 55 %-a nem felelt meg az irodalomban meghatározott $w_0=L/400$ határértéknek, melyre $w_0=L/300$ értéket ajánlok alkalmazni. Megállapítottam, hogy az egyensúlyi elágazás befolyásolja a w_0 kezdeti imperfekció értékét. Üvegoszlopok tervezésénél a harmadik stabilitásvesztési csoporthoz tartozó kardossági értékek alapján javasolt meghatározni a kezdeti imperfekciót értékét.

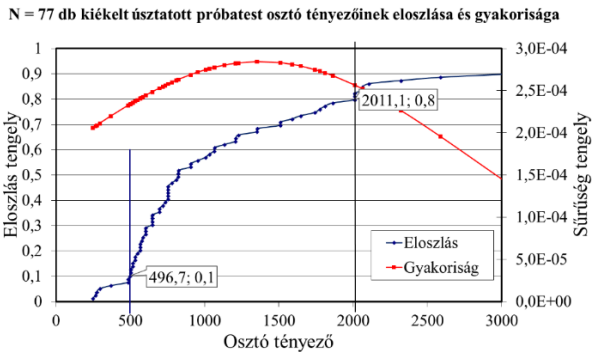
Kapcsolódó publikáció: [17]

A kísérleti vizsgálataim alapján a 5-4. táblázatban foglalom össze a határérték feletti és az összes kiékelte megtámasztású próbatest arányait külön az úsztatott, valamint a hőerősített üvegek esetében. A határértékek az irodalomban ajánlott $w_0^{\text{float}}=L/2000$ és a $w_0^{\text{TVG}}=L/400$ értékeket jelentik. Megállapítottam, hogy a kezdeti imperfekció (w_0) értékét a harmadik stabilitásvesztési csoportba tartozó próbatestek alapján javasolt megállapítani.

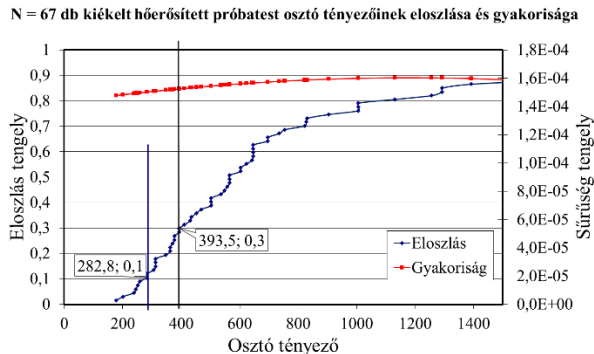
5-3. táblázat A w_0 kezdeti imperfekció határértékek feletti és az összes kiékelte próbatesteket tartalmazó üvegcsoporthoz tartozó darabszáma és százalékos aránya

	1. csoport		2. csoport		3. csoport		Összesen	
	Felette	Összes	Felette	Összes	Felette	Összes	Felette	Összes
Úsztatott [db]	4	7	29	32	8	8	41	47
Hőerősített [db]	4	10	12	28	14	17	30	55
Úsztatott [%]		57 %		91 %		100 %		87 %
Hőerősített [%]		40 %		43 %		82 %		55 %
Összes [db]	8	17	41	60	22	25	71	102
Arány [%]		47 %		68 %		88 %		70 %

A 5-5. és az 5-6. ábrákon ábrázoltam az úsztatott és a hőerősített üvegek (z) osztó tényezőinek természetes alapú eloszlás és sűrűség függvényét ($w_0^{float} = L/14900 - L/245$ terjedelem; $w_0^{TVG} = L/1444 - L/221$ terjedelem). A sűrűség és eloszlás függvények alapján float üvegekre $L/500$, míg a hőerősített üvegekre $L/300$ -as határértéket ajánlok a számításban alkalmazandó w_0 kezdeti geometriai imperfekciónak. A függvényeket az úsztatott és hőerősített üvegekre külön készítettem. A természetes eloszláson alapuló értékek esetén a float és hőerősített üvegek esetén is ~10 %-os alulmaradáshoz tartozó osztó tényező értékeket ajánlottam a teljes minta alapján. Az 5 %-os kvantilishez tartozó értékek gazdaságtalanul lecsökkentik az osztótényezőt, melynek hatása az üvegoszlopok aránytalan túltervezéséhez vezet.



5-5. ábra Kiékelte úsztatott üvegek w_0 kezdeti imperfekcióhoz tartozó osztó tényezőinek eloszlás és sűrűség függvénye



5-6. ábra Kiékelte hőerősített üvegek w_0 kezdeti imperfekcióhoz tartozó osztó tényezőinek eloszlás és sűrűség függvénye

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

A kutatásban sikeresen alkalmaztam az RPS mérési eljárást, így javasoltam az üvegek széleskörű geometriai imperfekció mérésének alkalmazására. Az értekezésben bemutattam, hogyan célszerű megválasztani a biztonságot is szem előtt tartva a w_0 kezdeti imperfekció határértékét. Emellett bemutattam, hogy a $w_0^{\text{mért}}$ mért és a terhelési történet alapján meghatározott w_0 imperfekciók lényegesen eltérnek egymástól. A kutatásban rámutattam, hogy a Pilkington fivérek által kifejlesztett üvegúsztatásos technológia során az üveg oldalával érintkező folyékony ón nem befolyásolja makroszkopikus szinten a kardosságot és a szinuszoszágat. Befogási merevség változtatásával befolyásolni lehet a stabilitásvesztést, így akár a második stabilitásvesztési csoportot is el lehet érni, ez által növelhető az üvegoszlop tervezési biztonsága és a kihajlási ellenállása.

Laboratóriumi kutatási eredményeim elősegítik a megfelelő rétegrendi felépítés kiválasztását az üvegoszlopok esetén. A float üveg kezdeti geometriai imperfekciója kisebb, mint a hőerősített üvegé. A hőerősítési eljárás hatására a tönkremenetelhez tartozó a vízszintes irányú elmozdulások 82,67 %-ban (22 % szórással) növekedtek, a növekvő teher hatására a látványos alakváltozást hamarabb észre lehet venni és több idő marad menekülésre. A maradó teherbírása a float üvegeknek nagyobb, mint a hőerősített (TVG) üvegeknek, melyeknek kevésbé apró töreteres a törésképük, így az edzett üvegekhez képest kedvezőbb a maradó teherbírásuk. Újabb generációs lamináló anyagok alkalmazásával tovább növelhető az üvegek teherbírása.

Értekezésemben a w_0 kezdeti imperfekció határértékének meghatározásához a harmadik stabilitásvesztési csoport értékeit vettem alapul, ahol a legkisebbnek bizonyult a kihajlással szembeni ellenállás. Rámutattam, hogy a gyártásból, üvegfeldolgozásból és a beépítési pontatlanságokból származó imperfekciókat csökkenteni kell pl.: új gyártási eljárásokkal, ahol a görgők helyett folytonos megtámasztást lehet alkalmazni.

7. KITEKINTÉS

Az eddigi vizsgálataim során, az üveg gyártásából, feldolgozásából és a beépítéséből származó és az üvegoszlop tervezésére ható jelentősebb tényezők hatásait külön-külön meg tudtam vizsgálni (ferdeség, azaz beépítési pontatlanság, üveg alak, hőerősítés, kiékelés), e tényezők egymásra hatása és interakciójának a vizsgálata a jövőbeni kutatási feladatok közé tartozik (kiegészítve a pontmegfogás hatásával, más megtámasztási merevségekkel, eltérő megtámasztási hossz alkalmazásával, új lamináló anyagokkal, kémiailag edzett üveggel).

A kutatásban alkalmazott megtámasztás pl. a kiékelés is befolyásolhatja a stabilitásvesztési csoportok százalékos megoszlását. Ez a kérdéskör felveti a nagyméretű üvegezek megtámasztási kérdéseit is. A kutatásban modell léptékű próbatestek vizsgálatára nyílt lehetőségem. Tervezem a valós 1:1 léptékű kísérlet végrehajtását a jövőben. A Katasztrófa elméletben a kezdeti imperfekciókat ún. tökéletlenség érzékenységgel is lehet követni. Ezzel a módszerrel a kísérleti eredmények alapján létrehozott stabilitásvesztési csoportok jelentőségét lehet alátámasztani. Továbbá tervezem a kísérleti eredmények számítógépes szoftveres számítással való összevetését, valamint a léptékhatás vizsgálatát.

A tervezéshez elengedhetetlenül fontos az α_0 anyagállandó és az α_{imp} imperfekciós tényező meghatározása, a kutatás ezen része még nem befejezett, a mért adatok és a számítások kapcsán is a biztonság oldalára kell törekedni, így az eredményközlés a jövőbeni publikálás részét képezi. A kapcsolati tényezőt egyelőre kisszámú vizsgálat alapján határoztam meg, azonban a hajlítómerevség változására érzékenyen reagál, ezért további vizsgálatokat tervezek. Újabb lamináló anyagok bevonásával az üvegek maradóteherbírását, és az üvegoszlopok jellemző keresztmetszet típusainak és toldásainak a stabilitásvesztésre kifejtett hatásait is tervezem vizsgálni.

Az RPS rendszerrel további kísérletekre van szükség, hogy a laminált üveg peremének környezetében lévő együtt dolgozást vizsgálhassam.

8. PUBLIKÁCIÓS JEGYZÉK

- [1] Jakab A., Nehme K., Nehme G.S. (2016). Fracture behaviour of glass columns. Experimental study of axial loaded glass columns. 3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC-CMTP3) *IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 123 (2016) 012056 doi: [10.1088/1757-899X/123/1/012056](https://doi.org/10.1088/1757-899X/123/1/012056)
- [2] Nehme K., Jakab A., Nehme G. S. (2013) Experiments on the buckling behavior of glass columns. Part 1. *Építőanyag*, 65. Volume 3. (2013), pp. 62–66. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.13>
- [3] Nehme K., Jakab A., Nehme G. S. (2013) Experiments on the buckling behavior of glass columns. Part 2. *Építőanyag*, 65. Volume 4. (2013), pp. 112–117. doi: [10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.21](https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.21)
- [4] Jakab A., Nehme K., Nehme G. S. (2015). Laboratory Experiments of Centrally Loaded Glass Columns, *GPD – Glass Performances Days*. Tampere, Finnország, ISBN: 978-952-5836-03-5, pp. 117-121.
- [5] Jakab A., Nehme K., Nehme G. S. (2015). Stability of Centrally Loaded Glass Columns, *METNET Annual Seminar in Budapest*, Magyarország, ISBN: 978-951-784-762-9, pp. 8-17.
- [6] Jakab A., Nehme G. S. (2017). Analysis of plate glass columns: The influence of fixing and the coupling parameter, *Pollack Periodica*, Vol. 12, No. 3. doi: 10.1556/606.2017.12.3.6, pp. 55-68.
- [7] Jakab A., Nehme K., Nehme G. S. (2016). Classification of “I” – shaped glass columns, *CCC2016 Proceedings*. ISBN: 978-615-5270-24-6, pp. 78-83.
- [8] Nehme K., Nehme S. G., Jakab A. (2013). Üvegoszlopok kihajlása, *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban*, Debrecen, ISBN: 978-963-7064-30-2, pp. 378-388.
- [9] Jakab A., Nehme K., Nehme S. G. (2014). Fracture behaviour of glass columns, *Engineered transparency: Glass facade energy*. Darmstadt, Németország, ISBN:978-3-86780-402-8, pp.103-113.
- [10] Jakab A., Nehme K., Nehme S. G. (2014). Üvegoszlopok viselkedése központos terhelésre: Central Loading of Glass Columns, *XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2014*. Csíksomlyó, Románia, pp. 118-121.
- [11] Rénes M., Jakab A., Nehme K., Salem G. N. (2015). Pontmegfogású Üvegek Laboratóriumi Vizsgálata, *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban*, Debrecen, Magyarország, ISBN:978-963-7064-32-6, pp. 489-494.
- [12] Jakab A., Nehme K., Salem G. N. (2015). Üveglizénák Laboratóriumi Vizsgálata, *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban*, Debrecen, Magyarország, ISBN:978-963-7064-32-6, pp. 554-560.
- [13] Nehme K., Nehme S. G., Jakab A. (2015). Impact Behaviour of Glass Balustrades, *Glass Performance Days*, Tampere, Finnország, ISBN:978-952-5836-03-5, pp. 350-355.
- [14] Rénes M., Jakab A., Nehme K., Nehme S. G. (2015). Laboratory experiments of point fixed glasses, *Építőanyag* 67:(2) pp. 62-65. doi: [10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.10](https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.10).
- [15] Jakab A., Nehme K., Nehme S. G. (2016). Síklapokból álló üvegoszlopok osztályozása, *XX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2016*, Csíksomlyó, Románia, ISSN 1843-2123, pp. 105-108.
- [16] Jakab A., Nehme K., Nehme Sa. G. (2016). Classification of “I”-shaped Glass Columns, *Procedia Engineering* 164, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.608>, pp. 180-187.

- [17] Jakab A., Nehme S. G. (2018). The effect of the setting accuracy on the load bearing capacity of plate glass columns, *The 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering Prague*. pp. 79-88. ISBN 978-80-01-06401-6.
- [18] Jakab A., Nehme S. G. (2018). Influencing factors of the plate glass columns in the load bearing capacity. *Építőanyag*, 70. Volume 2., pp. 62-69. doi: [10.14382_epitoanyag-jsbcm.2018.12](https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.12)
- [19] Jakab A., Nehme K., Molnár P., Nehme G. S. (2014) Beszámoló a 2014. évi düsseldorfi Glasstec kiállításról. *Építőanyag*, 66. Volume 4., pp. 131–135. doi: [10.14382epitoanyag-jsbcm.2014.24](https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2014.24)
- [20] Jakab A., Nehme K., Nehme G. S. (2015) Beszámoló a finnországi GPD2015 nemzetközi üveg konferenciáról. *Építőanyag*, 67. Volume 3., pp. 102–109. doi: [10.14382epitoanyag-jsbcm.2015.17](https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.17)

9. IRODALOMJEGYZÉK

- Aiello, S., Campione, G., Minafo, G., & Scibilia, N. (2011). *Compressive behaviour of laminated structural glass members*. Engineering Structures, Palermo, Italy: Elsevier
doi:10.1016/j.engstruct.2011.07.004.
- Amadio, C., & Bedon, C. (2010). *An Analytical model for buckling evaluation of laminated glass beams in bending and compression*. Proceedings of XXV A.T.I.V. International conference: Glass, when Technology Meets Design, Parma, Italy.
- Belis, J., Mocibob, D., Luible, A., & Vandebroek, M. (2011). *On the size and shape of initial out-of-plane curvatures in structural glass components*. Construction and Building Materials: 25, pp. 2700-2712.
- Blaauwendraad, J. (2007). *Buckling of laminated glass columns*. Heron, Structural glass: Vol. 52, Special No. 1-2, pp. 147-164.
- EN 1863-1:2012, *Glass in Building - Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description*. (2012).
- Feldmann, M., & Kasper, R. (2014). *Guidance for European Structural Design of Glass Components; Support to the Implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Italy, ISSN, 1831-9424: European Comission, Joint Research Centre.
- Feldmann, M., & Langosch, K. (2010). *Buckling resistance and buckling curves of pane-like glass columns with monolithic sections of heat strengthened and tempered glass*. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft, Netherland: Challenging Glass 2, pp. 319-330.
- Kalamar, R., Bedon, C., & Eliasova, M. (2016). *Experimental investigation for the structural performance assessment of square hollow glass columns*. Engineering Structures: Vol. 113, pp. 1-15.
- Pesek, O., Horacek, M., & Melcher, J. (2016). *Experimenta verification of the buckling strength of structural glass columns*. Procedia Engineering: Vol. 161, pp. 556-562.
- prEN 13474-1:1999 *Glass in Building - Design of glass panes*. (dátum nélkül.) *General basis design*.
- Qiang, L., Xiaokun, H., Gang, L., Zhen, Z., & Gang, L. (2017). *Investigation on flexural buckling of laminated glass columns under axial compression*. Engineering Structures 133, pp. 14-23:
doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.006.
- Timoshenko, S., & Gere, J. (1961). *Theory of Elastic Stability*. New York: McGraw-Hill.