

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko




Vpliv obremenitvenih parametrov na izračunane povese in napetosti steklenih plošč

Partnerji: **Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo**
Laboratorij za numerično modeliranje in simulacije
Center za eksperimentalno mehaniko
Laboratorij za okoljske tehnologije v zgradbah
REFLEX Gornja Radgona d.o.o.
Zavod za gradbeništvo Slovenije
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

Oznaka ARRS projekta: L2-3172

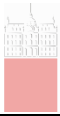
Naslov ARRS projekta: Razvoj tehničnih smernic za štirislojne zasteklitve


izr. prof. dr. Miroslav Halilovič
vodja projekta

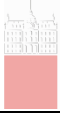



prof. dr. Mihael Sekavčnik
dekan UL FS

Ljubljana, december 2022

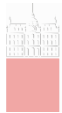


- Partnerji:**
- Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (UL FS)
Laboratorij za numerično modeliranje in simulacije (LNMS)
Center za eksperimentalno mehaniko (CEM)
Laboratorij za okoljske tehnologije v zgradbah (LOTZ)
Aškerčeva 6
SI-1000 Ljubljana
- REFLEX Gornja Radgona d.o.o.
Podgrad 4
SI-9250 Gornja Radgona
- Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG)
Dimičeva ulica 12
SI-1000 Ljubljana
- Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko
Jadranska ulica 19
SI-1000 Ljubljana
- Financiranje:** Projekt je finančno podprt s strani javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ARRS (raziskovalni projekt L2-3172) in podjetja Reflex d.o.o.
- Oznaka ARRS projekta:** L2-3172
- Naslov ARRS projekta:** Razvoj tehničnih smernic za štirislojne zasteklitve
- Vodja projekta:** izr. prof. dr. Miroslav Halilovič
Tel.: (01) 4771 439
E-mail: miroslav.halilovic@fs.uni-lj.si
-
- Naslov poročila:** Vpliv obremenitvenih parametrov na izračunane povese in napetosti steklenih plošč
- Vodja aktivnosti:** izr. prof. dr. Miroslav Halilovič
- Avtorji:**
- izr. prof. dr. Nikolaj Mole**
 - izr. prof. dr. Miroslav Halilovič**
 - doc. dr. Pino Koc**
 - doc. dr. Bojan Starman**
 - asist. dr. Andraž Maček**
 - dr. Primož Rus**



Kazalo

1. Uvod	1
2. Opis izračuna koeficientov	1
3. MKE izračun	2
4. Izračun koeficientov k_1 , k_4 in k_5	6
5. Zaključek.....	9
6. Reference.....	9



1. Uvod

V okviru ARRS projekta z naslovom **Razvoj tehničnih smernic za štirislojne zasteklitve** je bila opravljena primerjava v standardu EN 16612-2019 [1] podanih koeficientov, ki se uporabljajo za izračun povesa stekla, največje natezne napetosti in volumna, in koeficientov določenih na osnovi natančne numerične analize povesa stekla z metodo končnih elementov (MKE). V okviru MKE analize povesa stekla je bila opravljena konvergenčna analiza vpliva števila in oblike mreže KE. V analizi so bili uporabljeni tako volumski, kot lupinski KE. Vse MKE analize so bile izvedene upoštevajoč ravnotežje na deformirani geometriji stekla. Na ta način smo se v numeričnem MKE izračunu najbolj približali realnim razmeram v upogibno obremenjenem steklu.

2. Opis izračuna koeficientov

Da lahko izračunamo koeficiente k_1 , k_4 in k_5 , ki so v standardu [1] podani tabelarično za različna razmerja stranic stekla λ

$$\lambda = \frac{a}{b} ,$$

pri čemer a in b predstavljata širino in dolžino stekla, in v odvisnosti od brezdimenzijske obremenitve p^*

$$p^* = \left(\frac{A}{4 h^2} \right)^2 \frac{q}{E} ,$$

v kateri A predstavlja ploščino stekla, h debelino stekla, q porazdeljeno obremenitev v nasprotni smeri normale na površino stekla ter E modul elastičnosti, moramo predhodno z MKE izračunati največjo natezno napetost σ_{\max} v obremenjenem steklu, kot posledico njenega upogibanja, največji povos w_{\max} v območju stekla ter volumen V , ki ga določa oblika upognjenega stekla.

Ob poznani največji natezni napetosti σ_{\max} , koeficient k_1 izračunamo po enačbi

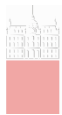
$$k_1 = \frac{h^2}{a^2} \frac{\sigma_{\max}}{q} .$$

Koeficient k_4 izračunamo, upoštevajoč z MKE izračunan največji povos stekla w_{\max} , iz sledeče enačbe

$$k_4 = E \frac{h^3}{a^4} \frac{w_{\max}}{q} .$$

Na osnovi z MKE izračunane oblike upognjenega stekla lahko izračunamo volumen V , ki je potreben za izračun tlaka v posamezni komori večslojne zasteklitve. Izračunani volumen nam omogoča izračun koeficienta k_5 po enačbi

$$k_5 = \frac{E}{A} \frac{h^3}{a^4} \frac{V}{q} .$$



3. MKE izračun

Izračun koeficientov k_1 , k_4 in k_5 za razmerja stranic stekla λ in brezdimenzijske obremenitve p^* podane v standardu [1] bazira na MKE analizi upogibno obremenjenih stekel. V MKE analizi upoštevane vrednosti razmerja stranic in brezdimenzijske obremenitve so podane v tabeli 1.

Tabela 1: V MKE analizi zajeta razmerja stranic stekla in brezdimenzijske obremenitve.

λ [1]	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
p^* [1]	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300

Iz v tabeli 1 podanih podatkov izhaja 100 različnih kombinacij MKE izračunov. Da bi množico MKE izračunov poenostavili, smo za posamezno razmerje stranic stekla λ izbrali dimenzije, ki so nam omogočale s spreminjanjem obremenitve p določiti tudi v tabeli 1 podano brezdimenzijsko obremenitev p^* . Ker samo z variranjem obremenitve q v območju realnih obremenitev ni mogoče določiti vseh brezdimenzijskih obremenitev, podanih v tabeli 1, smo varirali tudi debelino stekla h . V tabelah 2a-2j so podane dimenzije stekla za posamezno razmerje stranic stekla (a , b), njegova debelina h in obremenitev stekla q v nasprotni smeri normale na površino stekla.

Za zajem izračunanih vrednosti za obravnavanih 100 primerov iz baze rezultatov, ki so bili dobljeni z izvedbo MKE izračunov v programskem okolju Abaqus [2], je bil izdelan računalniški program v programskem okolju Wolfran Mathematica [3]. Ta program omogoča iskanje maksimalnega povesa in največje natezne napetosti. Poleg tega je na osnovi izračunanega povesa stekla z numerično integracijo po obravnavanem območju omogočal izračun volumna, ki ga določa oblika upognjenega stekla.

Mehanske lastnosti stekla so bile povzete po standardu [1], pri čemer je bil modul elastičnosti E velikosti 70 GPa, Poissonov koeficient ν pa 0,22.

Tabela 2a: Razmerje stranic stekla $\lambda = 1,0$
($a=2000$ mm, $b=2000$ mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-1_0-1	0,286720	8
T-1_0-2	0,573440	8
T-1_0-3	0,860160	8
T-1_0-5	0,453600	6
T-1_0-10	0,907200	6
T-1_0-20	0,875000	5
T-1_0-50	0,896000	4
T-1_0-100	1,792000	4
T-1_0-200	1,134000	3
T-1_0-300	1,701000	3

Tabela 2b: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,9$
($a=1800$ mm, $b=2000$ mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_9-1	0,353975	8
T-0_9-2	0,707951	8
T-0_9-3	1,061926	8
T-0_9-5	0,560000	6
T-0_9-10	1,120000	6
T-0_9-20	1,080247	5
T-0_9-50	1,106173	4
T-0_9-100	0,700000	3
T-0_9-200	1,400000	3
T-0_9-300	2,100000	3



Tabela 2c: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,8$
(a=1600 mm, b=2000 mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_8-1	0,448000	8
T-0_8-2	0,896000	8
T-0_8-3	1,344000	8
T-0_8-5	0,708750	6
T-0_8-10	1,417500	6
T-0_8-20	1,367188	5
T-0_8-50	1,400000	4
T-0_8-100	0,885938	3
T-0_8-200	1,771875	3
T-0_8-300	2,657813	3

Tabela 2d: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,7$
(a=1400 mm, b=2000 mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_7-1	0,585143	8
T-0_7-2	1,170286	8
T-0_7-3	1,755429	8
T-0_7-5	0,925714	6
T-0_7-10	1,851429	6
T-0_7-20	1,785714	5
T-0_7-50	1,828571	4
T-0_7-100	1,157143	3
T-0_7-200	2,314286	3
T-0_7-300	3,471429	3

Tabela 2e: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,6$
(a=1500 mm, b=2500 mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_6-1	0,326224	8
T-0_6-2	0,652447	8
T-0_6-3	0,978671	8
T-0_6-5	0,516096	6
T-0_6-10	1,032192	6
T-0_6-20	0,995556	5
T-0_6-50	1,019449	4
T-0_6-100	0,645120	3
T-0_6-200	1,290240	3
T-0_6-300	1,935360	3

Tabela 2f: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,5$
(a=1250 mm, b=2500 mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_5-1	0,469762	8
T-0_5-2	0,939524	8
T-0_5-3	1,409286	8
T-0_5-5	0,743178	6
T-0_5-10	1,486356	6
T-0_5-20	1,433600	5
T-0_5-50	1,468006	4
T-0_5-100	0,928973	3
T-0_5-200	1,857946	3
T-0_5-300	2,786918	3

Tabela 2g: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,4$
(a=1200 mm, b=3000 mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_4-1	0,353975	8
T-0_4-2	0,707951	8
T-0_4-3	1,061926	8
T-0_4-5	0,560000	6
T-0_4-10	1,120000	6
T-0_4-20	1,080247	5
T-0_4-50	1,106173	4
T-0_4-100	0,700000	3
T-0_4-200	1,400000	3
T-0_4-300	2,100000	3

Tabela 2h: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,3$
(a=900 mm, b=3000 mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_3-1	0,629289	8
T-0_3-2	1,258579	8
T-0_3-3	1,887868	8
T-0_3-5	0,995556	6
T-0_3-10	1,991111	6
T-0_3-20	1,920439	5
T-0_3-50	1,966529	4
T-0_3-100	1,244444	3
T-0_3-200	2,488889	3
T-0_3-300	3,733333	3

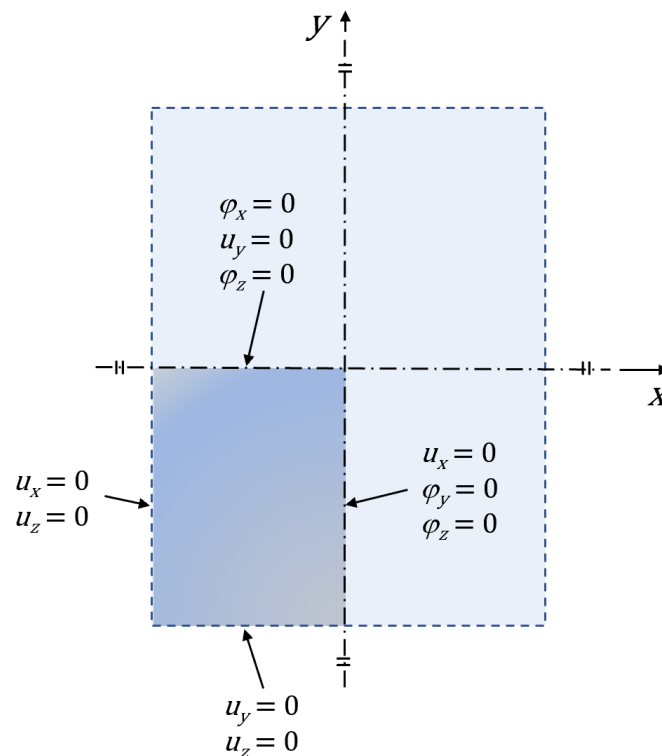
Tabela 2i: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,2$
($a=800$ mm, $b=4000$ mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_2-1	0,448000	8
T-0_2-2	0,896000	8
T-0_2-3	1,344000	8
T-0_2-5	0,708750	6
T-0_2-10	1,417500	6
T-0_2-20	1,367188	5
T-0_2-50	1,400000	4
T-0_2-100	0,885938	3
T-0_2-200	1,771875	3
T-0_2-300	2,657813	3

Tabela 2j: Razmerje stranic stekla $\lambda = 0,1$
($a=500$ mm, $b=5000$ mm) .

oznaka primera	q [kPa]	h [mm]
T-0_1-1	0,734003	8
T-0_1-2	1,468006	8
T-0_1-3	2,202010	8
T-0_1-5	1,161216	6
T-0_1-10	2,322432	6
T-0_1-20	2,240000	5
T-0_1-50	2,293760	4
T-0_1-100	1,451520	3
T-0_1-200	2,903040	3
T-0_1-300	4,354560	3

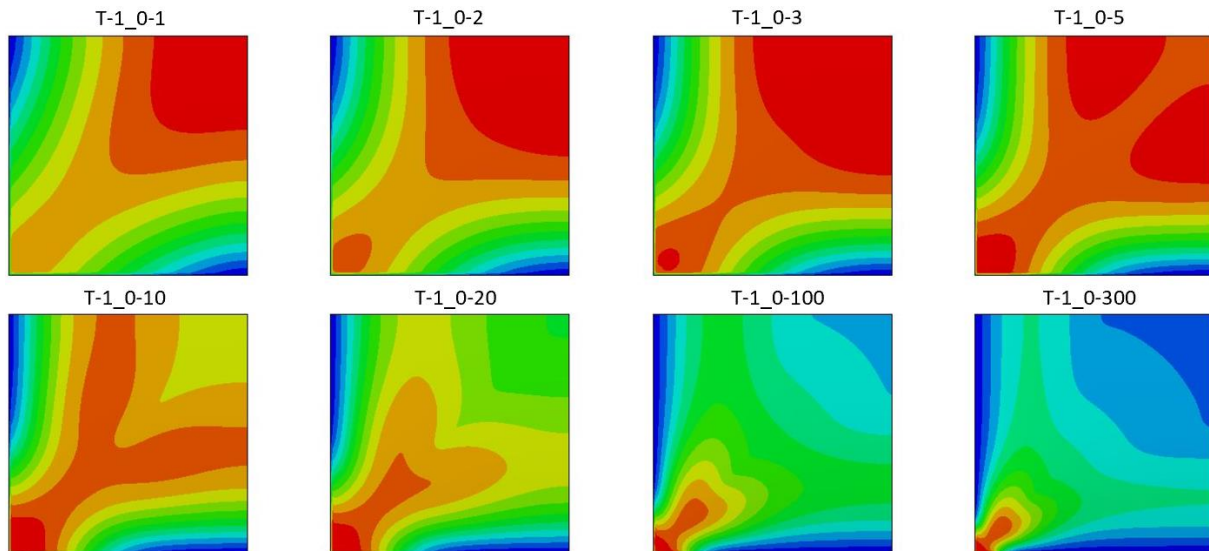
V numeričnem modelu je bilo zaradi izkazane simetričnosti analiziranega območja (slika 1) zajeto četrtinsko območje stekla. V izračunu je bilo upoštevano členkasto podprtje zunanjih robov stekla ter simetrijski robni pogoji na simetrijskih ravninah.



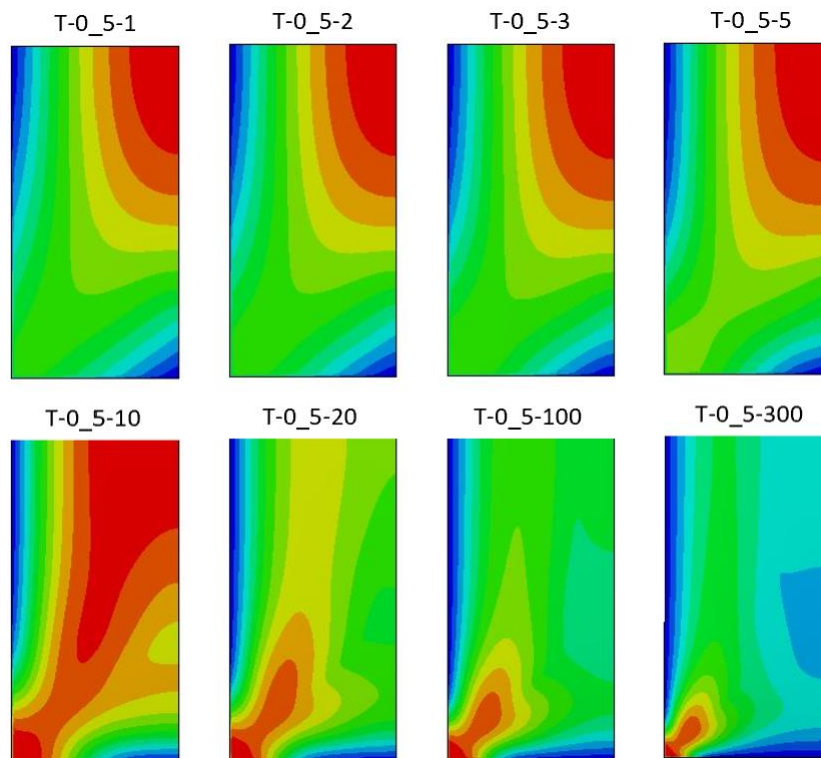
Slika 1: Obravnavano četrtinsko območje stekla in upoštevani robni pogoji.

Za popis območja stekla so bili uporabljeni tako volumski kot lupinski KE. Iz primerjave rezultatov izračunanih z volumskimi in lupinskimi KE smo se odločili, da bo izračun, ob enaki natančnosti rešitve, izveden s štirivozliščnimi lupinskimi KE. Lupinske KE smo uporabili tudi zato, da smo lahko zadostili pogoju razmerja med karakteristično dolžino KE in debelino stekla, ki naj bil velikostnega reda 1. Mreža KE je bila enakomerno zgoščena, pri čemer je bila

karakteristična velikost KE 5 mm. Tako smo lahko v največji možni meri določili lokacijo največje natezne napetosti, ki se nahaja pri povasih velikostnega reda debeline stekla v sredini območja, pri izrazito velikih povasih, večjih od petkratnika debeline stekla, pa v vogalu območja. Prehajanje največje natezne napetosti iz sredinskega območja v vogalno je prikazano na slikah 2 in 3. Na slikah prikazano območje predstavlja četrtinsko območje, ki je prikazano na sliki 1. Pri izrazito velikih povasih je območje največje natezne napetosti lokalizirano v bližino vogala, ne glede na razmerje λ .



Slika 2: Prikaz lokacije največje natezne napetosti (rdeče obarvano območje) za primer $\lambda = 1,0$ in osem različnih obremenitvenih primerov ($p^* = 1, 2, 3, 5, 10, 20, 100, 300$).



Slika 3: Prikaz lokacije največje natezne napetosti (rdeče obarvano območje) za primer $\lambda = 0,5$ in osem različnih obremenitvenih primerov ($p^* = 1, 2, 3, 5, 10, 20, 100, 300$).



4. Izračun koeficientov k_1 , k_4 in k_5

Upoštevajoč rezultate iz MKE analize obravnavanih primerov, je bil izveden izračun koeficientov k_1 , k_4 in k_5 za podana razmerja stranic stekla λ in brezdimenzijske obremenitve p^* (tabela 1). Izračunane vrednosti koeficientov k_1 , k_4 in k_5 so tabelarično podane v tabelah 3, 4 in 5.

Tabela 3: Na osnovi MKE analize izračunani koeficienti k_1 .

koeficient k1 (MKE izračun)										
p^*										
λ	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0,267	0,232	0,205	0,177	0,161	0,148	0,137	0,132	0,128	0,127
0,9	0,313	0,272	0,237	0,197	0,178	0,164	0,152	0,146	0,142	0,140
0,8	0,370	0,324	0,282	0,229	0,199	0,184	0,170	0,164	0,159	0,157
0,7	0,438	0,392	0,347	0,280	0,225	0,208	0,192	0,185	0,179	0,177
0,6	0,516	0,478	0,436	0,366	0,266	0,236	0,219	0,211	0,205	0,203
0,5	0,597	0,575	0,546	0,487	0,380	0,273	0,252	0,244	0,238	0,235
0,4	0,671	0,664	0,654	0,626	0,549	0,431	0,290	0,285	0,281	0,279
0,3	0,725	0,724	0,723	0,721	0,708	0,653	0,495	0,357	0,330	0,331
0,2	0,748	0,748	0,748	0,748	0,750	0,756	0,755	0,693	0,563	0,473
0,1	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,751	0,754	0,757	0,757

Tabela 4: Na osnovi MKE analize izračunani koeficienti k_4 .

koeficient k4 (MKE izračun)										
p^*										
λ	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0,0427	0,0369	0,0324	0,0264	0,0191	0,0134	0,0082	0,0056	0,0037	0,0029
0,9	0,0523	0,0454	0,0399	0,0326	0,0236	0,0166	0,0102	0,0069	0,0046	0,0036
0,8	0,0643	0,0565	0,0501	0,0412	0,0301	0,0212	0,0130	0,0089	0,0059	0,0047
0,7	0,0791	0,0711	0,0639	0,0535	0,0396	0,0282	0,0174	0,0118	0,0079	0,0062
0,6	0,0962	0,0895	0,0825	0,0710	0,0542	0,0392	0,0245	0,0167	0,0112	0,0088
0,5	0,1144	0,1104	0,1053	0,0952	0,0766	0,0573	0,0365	0,0252	0,0170	0,0134
0,4	0,1311	0,1298	0,1279	0,1228	0,1087	0,0875	0,0588	0,0414	0,0284	0,0225
0,3	0,1431	0,1431	0,1430	0,1425	0,1397	0,1293	0,1004	0,0753	0,0535	0,0431
0,2	0,1482	0,1482	0,1482	0,1483	0,1487	0,1499	0,1492	0,1377	0,1134	0,0968
0,1	0,1488	0,1488	0,1488	0,1487	0,1487	0,1487	0,1488	0,1495	0,1499	0,1496

Tabela 5: Na osnovi MKE analize izračunani koeficienti k_5 .

koeficient k5 (MKE izračun)										
p^*										
λ	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0,0182	0,0161	0,0144	0,0121	0,0093	0,0069	0,0045	0,0032	0,0022	0,0018
0,9	0,0222	0,0197	0,0177	0,0150	0,0114	0,0085	0,0055	0,0039	0,0027	0,0022
0,8	0,0274	0,0246	0,0222	0,0189	0,0145	0,0108	0,0070	0,0050	0,0035	0,0028
0,7	0,0338	0,0309	0,0283	0,0244	0,0189	0,0141	0,0092	0,0065	0,0045	0,0037
0,6	0,0414	0,0390	0,0365	0,0322	0,0255	0,0192	0,0126	0,0090	0,0063	0,0051
0,5	0,0499	0,0485	0,0467	0,0429	0,0355	0,0274	0,0183	0,0131	0,0092	0,0074
0,4	0,0589	0,0585	0,0577	0,0556	0,0499	0,0410	0,0285	0,0207	0,0147	0,0119
0,3	0,0681	0,0680	0,0678	0,0673	0,0653	0,0602	0,0474	0,0363	0,0264	0,0215
0,2	0,0771	0,0771	0,0771	0,0770	0,0767	0,0758	0,0721	0,0653	0,0538	0,0462
0,1	0,0862	0,0862	0,0862	0,0862	0,0862	0,0861	0,0858	0,0851	0,0833	0,0812



Ključni namen MKE analize 100 različnih primerov, določenih v standardu [1], je bila verifikacija v standardu podanih koeficientov k_1 , k_4 in k_5 . V tabeli 6 je podano odstopanje za koeficient k_1 , ki se uporablja za izračun največje natezne napetosti. Vrednosti odstopanja ležijo v intervalu $[(-13,1), (+10,9)]$ %. Pri analizi odstopanj je bilo ugotovljeno, da je odstopanje pri določenem razmerju stranic stekla λ pri različnih vrednostih brezdimenzijske obremenitve p^* enakega velikostnega razreda tako v »+«, kot v »-«. Glede na to, da smo v MKE analizi uporabili enak pristop v vseh obravnavanih primerih, ta ugotovitev nakazuje, da so v standardu [1] podani koeficienti izračunani na drugačen način. Ne glede na ugotovljeno, so vrednosti za koeficient k_1 primerljive s standardom.

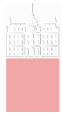
Tabela 6: Odstopanje z MKE analizo izračunanih koeficientov k_1 in v standardu [1] podanih koeficientov.

koeficient k_1 (MKE izračun) [% odstopnja od v standardu podanih koeficientov]										
p^*										
λ	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	-2,2	+4,7	+8,0	+7,0	-5,6	-9,8	-5,3	-2,0	-0,3	+1,1
0,9	-1,4	+4,8	+8,9	+9,7	-3,6	-8,2	-4,7	-1,6	+1,2	+2,6
0,8	-0,3	+5,0	+8,7	+10,9	-0,2	-6,3	-3,5	-0,9	+1,9	+3,3
0,7	-0,2	+3,9	+6,7	+9,9	+4,6	-4,4	-3,0	-0,3	+2,6	+4,1
0,6	-0,1	+2,4	+4,6	+6,5	+9,6	+0,6	-1,6	+0,5	+2,6	+4,0
0,5	-0,4	+0,8	+2,3	+3,7	+3,8	+9,7	+1,3	+1,2	+2,8	+4,1
0,4	-0,4	-0,1	+0,2	+0,8	+0,4	-0,5	+9,8	+4,0	+3,0	+3,5
0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,7	-2,0	-3,8	-5,1	+8,0	+7,3	+5,2
0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,7	-2,5	-8,0	-13,1	-12,1	-3,6
0,1	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	-0,2	-0,9	-2,3	-3,8

V tabeli 7 je podano odstopanje za koeficient k_4 , ki se uporablja za izračun največjega povesa stekla. Vrednosti odstopanja ležijo v intervalu $[(-17,9), (+18,3)]$ %. Pri tem lahko ugotovimo, da so večja odstopanja prisotna za vrednosti brezdimenzijske obremenitve p^* večja od 5. Do vrednosti 5 je odstopanje v intervalu $[(-7,1), (-0,5)]$ %. To nakazuje, da je v standardu [1] ravnotežje na deformirani geometriji stekla drugače upoštevano, kot v izvedeni MKE analizi. Razlika se pojavi pri velikih poveseh, ko je razmerje debeline stekla proti povesu večje od pet. Primerjava vrednosti pokaže, da so v tem območju obremenjevanja povese, izračunani s standardom, manjši od izračunanih z MKE, kar nakazuje na neustrezno upoštevanje membranskega stanja v steklu.

Tabela 7: Odstopanje z MKE analizo izračunanih koeficientov k_4 in v standardu [1] podanih koeficientov.

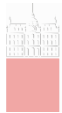
koeficient k_4 (MKE izračun) [% odstopnja od v standardu podanih koeficientov]										
p^*										
λ	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	-3,2	-4,3	-4,5	-3,5	-1,1	+2,0	+6,7	+10,1	+15,1	+18,3
0,9	-3,6	-4,6	-4,8	-3,8	-1,4	+1,0	+5,8	+10,3	+14,3	+17,2
0,8	-3,1	-4,7	-5,0	-4,3	-2,6	+0,3	+4,9	+8,8	+14,1	+16,7
0,7	-2,8	-4,6	-5,3	-5,4	-4,2	-1,8	+2,2	+6,8	+11,9	+14,5
0,6	-2,2	-4,3	-5,6	-6,7	-6,6	-5,1	-1,0	+2,9	+8,1	+11,7
0,5	-1,7	-3,3	-4,8	-7,1	-9,0	-8,8	-5,9	-2,0	+3,3	+6,7
0,4	-1,2	-2,0	-3,0	-5,3	-9,3	-12,0	-11,3	-8,4	-4,0	-0,6
0,3	-0,9	-1,0	-1,4	-2,4	-5,5	-10,5	-15,1	-15,1	-12,1	-9,6
0,2	-0,5	-0,5	-0,6	-0,8	-1,3	-3,2	-9,5	-15,2	-17,9	-17,7
0,1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-1,2	-1,9	-2,4



V tabeli 8 je podano odstopanje za koeficient k_5 , ki se uporablja za izračun volumna, ki ga določa upognjena površina stekla. Vrednosti odstopanja ležijo v intervalu $[(-16,9), (+24,8)]$ %. Pri tem lahko ugotovimo, da so večja odstopanja prisotna za vrednosti brezdimenzijske obremenitve p^* večja od 10. Do vrednosti 10 je odstopanje v intervalu $[(-9,6), (+1,9)]$ %. To potrjuje ugotovitev pri izračunu koeficienta k_4 , da je v standardu [1] ravnotežje na deformirani geometriji stekla drugače upoštevano kot v izvedeni MKE analizi. Ta razlika se pojavi pri velikih povesih, ko je razmerje debeline stekla proti povesu večje od pet. Primerjava vrednosti pokaže, da so v tem območju obremenjevanja volumni, izračunani s standardom, manjši od izračunanih z MKE.

Tabela 8: Odstopanje z MKE analizo izračunanih koeficientov k_5 in v standardu [1] podanih koeficientov.

koeficient k_5 (MKE izračun) [% odstopnja od v standardu podanih koeficientov]										
p^*										
λ	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	-3,7	-5,6	-4,2	-3,6	-1,7	+1,9	+13,9	+18,9	+26,6	+19,5
0,9	-3,9	-6,1	-4,8	-3,8	-2,0	+1,4	+15,0	+18,5	+24,4	+19,0
0,8	-3,7	-5,9	-5,2	-4,8	-2,6	+0,4	+13,4	+17,2	+24,8	+18,3
0,7	-3,3	-5,6	-5,7	-5,5	-4,3	-2,0	+11,5	+15,2	+22,9	+14,9
0,6	-2,6	-5,2	-5,8	-6,9	-6,6	-4,9	+7,9	+12,0	+19,6	+11,4
0,5	-1,9	-3,7	-5,0	-7,3	-8,9	-8,8	+3,7	+7,2	+15,0	+6,3
0,4	-1,3	-2,2	-3,2	-5,4	-9,6	-11,9	-1,5	+1,4	+8,4	-0,5
0,3	-1,0	-1,2	-1,5	-2,6	-5,7	-10,6	-6,4	-5,1	+1,3	-9,2
0,2	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-1,5	-3,3	-5,8	-9,0	-6,8	-16,9
0,1	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,6	-0,3	-0,1	+0,5	-2,4



5. Zaključek

Na osnovi opravljene MKE analize povesa stekla, ki je členkasto podprt po robovih, lahko zaključimo, da so v standardu [1] podani koeficienti k_1 , k_4 in k_5 enakega velikostnega reda, kot smo jih dobili na osnovi MKE analize. Glede na to, da so absolutna odstopanja med vrednostmi v določenih obremenitvenih primeri velikostnega reda 13-24 %, lahko sklepamo, da so z MKE analizo izračunani koeficienti bolj natančni. Razlog za to lahko tiči v zmogljivejši računalniški in programski opremi, ki je bila uporabljena v naši MKE analizi, ter v uporabljeni bolj gosti mreži KE.

6. Reference

- [1] European Standard EN 16612 – Glass in building – Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation, oktober 2019
- [2] Simulia Abaqus 2021, Dassault Systemes, 2021
- [3] Wolfram Mathematica 13.1, 2022