

Nosivost lameliranih staklenih elemenata

Vdović, Lovorka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:717718>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**NOSIVOST LAMINIRANIH STAKLENIH
ELEMENTATA**

Lovorka Vdović

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**NOSIVOST LAMINIRANIH STAKLENIH
ELEMENTA**

Lovorka Vdović

izv. prof. dr. sc. Ivan Duvnjak

Zagreb, 2023.

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| <i>Uvod</i> | 1 |
| 1. Povijest proizvodnje stakla | 2 |
| 2. Mehanička svojstva stakla | 5 |
| 2.1. Definicija stakla | 5 |
| 2.1.1. Struktura stakla u tekućem stanju | 6 |
| 2.1.2. Kemijska postojanost stakla u očvrslom stanju | 7 |
| 2.2. Modul elastičnosti stakla | 8 |
| 2.3. Tvrdća stakla | 11 |
| 2.4. Čvrstoća stakla | 12 |
| 2.4.1. Teorijska čvrstoća stakla..... | 12 |
| 2.4.2. Uporabna čvrstoća stakla | 12 |
| 2.4.3. Vlačna čvrstoća..... | 13 |
| 2.4.4. Tlačna čvrstoća | 14 |
| 2.4.5. Čvrstoća na savijanje | 14 |
| 2.5. Umor stakla | 15 |
| 2.6. Viskoznost | 15 |
| 3. Lom stakla | 16 |
| 3.1. Mehanika loma | 16 |
| 3.1.1. Energetski kriterij..... | 17 |
| 3.1.2. Pristup analizom intenziteta napreznja..... | 18 |
| 3.2. Površinski nedostaci stakla | 18 |
| 3.2.1. Različit karakter pukotina na površini stakla..... | 19 |
| 3.2.2. Nestalan karakter pukotina na površini stakla | 19 |
| 3.3. Uzroci oštećenja stakla | 20 |
| 4. Obrada stakla | 22 |
| 4.1. Kaljeno staklo (ESG) | 23 |
| 4.1.1. Proces kaljenja stakla..... | 24 |
| 4.1.2. Prednosti kaljenoga stakla..... | 25 |
| 4.1.3. HST test | 26 |
| 4.1.4. Polukaljeno staklo – toplinski ojačano | 26 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 4.2. | Laminiranje stakla | 27 |
| 4.2.1. | Proizvodnja laminiranog stakla..... | 28 |
| 4.2.2. | PVB folija | 28 |
| 5. | <i>Rješenja za projektiranje sigurnosnog stakla.....</i> | 29 |
| 5.1. | Inovativne i eksperimentalne metode povećanja sigurnosti | 29 |
| 6. | <i>Staklo kao građevinski materijal.....</i> | 31 |
| 6.1. | Opterećenja na konstrukciju | 33 |
| 6.1.1. | Opterećenje vjetrom..... | 33 |
| 6.1.2. | Opterećenje snijegom..... | 33 |
| 6.1.3. | Udarna opterećenja | 33 |
| 6.1.4. | Toplinska naprezanja | 34 |
| 6.2. | Stakleni konstrukcijski elementi..... | 34 |
| 6.2.1. | Stakleni paneli..... | 35 |
| 6.2.2. | Staklene grede i nosači..... | 37 |
| 6.2.3. | Stakleni stupovi..... | 39 |
| 7. | <i>Norme za proračun staklenih konstrukcija</i> | 40 |
| 7.1. | Američka norma ASTM E1300..... | 40 |
| 7.1.1. | GPFM – teorija otpornosti stakla..... | 41 |
| 7.2. | Europska prednorma prEN 13474..... | 41 |
| 8. | <i>Ispitivanje staklenih konstrukcija</i> | 43 |
| 8.1. | Metode ispitivanja | 43 |
| 8.1.1. | Ispitivanje savijanjem u četiri točke | 44 |
| 8.1.2. | Ispitivanje savijanjem u tri točke | 45 |
| 8.1.3. | CDR test..... | 46 |
| 9. | <i>Analiza ispitanog dijela konstrukcije – staklena nadstrešnica</i> | 47 |
| 9.1. | Prikaz staklene nadstrešnice | 48 |
| 9.2. | Ispitivanje laminiranih staklenih elemenata nadstrešnice | 49 |
| 9.2.1. | Stakleni nosač nadstrešnice..... | 50 |
| 9.2.2. | Stakleni pokrovni nosač nadstrešnice | 55 |
| 9.3. | Prikaz elemenata nadstrešnice u programu SJ Mepla | 60 |
| 9.3.1. | Staklene grede nadstrešnice | 61 |
| 9.3.2. | Numerički model s pokusnim opterećenjem..... | 67 |
| 9.3.3. | Stakleni pokrovni nosač nadstrešnice | 70 |
| 9.3.4. | Numerički model s pokusnim opterećenjem..... | 77 |

| | |
|---|-----------|
| 9.4. Usporedba rezultata ispitivanja i numeričkog modela | 79 |
| 9.4.1. Staklena greda nadstrešnice | 79 |
| 9.4.2. Stakleni pokrovni nosač nadstrešnice | 82 |
| <i>Zaključak</i>..... | 84 |
| <i>Literatura</i> | 85 |

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1 Kristalna palača u Londonu, 1851. (3) | 2 |
| Slika 2 Fourcaultov postupak (4)..... | 3 |
| Slika 3 <i>Float Glass</i> proces (4) | 3 |
| Slika 4 Prikaz procesa plutajućeg stakla (1)..... | 4 |
| Slika 5 Raspored atoma stakla (6) | 6 |
| Slika 6 Hookeov zakon za staklo..... | 9 |
| Slika 7 Graf krivulje sile i udaljenosti koji ilustrira podrijetlo modula elastičnosti (7) | 10 |
| Slika 8 Usporedba vlačne sile stakla, čelika, polimernog kompozita i betona (6) | 13 |
| Slika 9 Raspodjela naprežanja u neopterećenom (A i C) i opterećenom (B i D) ravnom sirovom staklu i kaljenom staklu izloženom savijanju (8) | 14 |
| Slika 10 Tradicionalni pristup lomu (gore) i pristup pomoću mehanike loma (dolje) (10) | 17 |
| Slika 11 Predložena područja različitih grešaka na površini stakla (3)..... | 19 |
| Slika 12 Razbijeno kaljeno staklo (lijevo) i sirovo staklo (desno) (14) | 23 |
| Slika 13 Proces kaljenja stakla (1)..... | 24 |
| Slika 14 Raspodjela naprežanja u kaljenom (prednapregnutom) neopterećenom staklu (8) | 25 |
| Slika 15 Usporedba lomova raznih obrada stakla | 27 |
| Slika 16 Primjer jednog kompozitnog sustava grede, staklo-drvo (3) | 30 |
| Slika 17 Sekundarna i glavna konstrukcija (19)..... | 32 |
| Slika 18 Staklena fasada (1) | 35 |
| Slika 19 Djelovanje na gredu ili nosač | 37 |
| Slika 20 Staklene grede (20)..... | 38 |
| Slika 21 Test savijanja u četiri točke (lijevo); koaksijalni dvostruki prsten (desno) (22) ... | 43 |
| Slika 22 Savijanje u četiri točke (4PB test) (25) | 44 |
| Slika 23 Ilustracija testa savijanja u 4 točke (24) | 45 |

| | |
|---|----|
| Slika 24 Test savijanjem u tri točke (26)..... | 45 |
| Slika 25 CDR test (koaksijalni dvostruki prsten) (23) | 46 |
| Slika 26 Staklena nadstrešnica (28)..... | 47 |
| Slika 27 Prikaz staklene nadstrešnice..... | 48 |
| Slika 28 Ispitivanje laminiranog stakla (27)..... | 49 |
| Slika 29 Uzorci laminiranog stakla (27)..... | 49 |
| Slika 30 Shema opterećenja staklenog nosača nadstrešnice (29) | 50 |
| Slika 31 Ispitivanje staklene grede (27) | 50 |
| Slika 32 Mjerna mjesta na staklenom laminiranom nosaču (29)..... | 52 |
| Slika 33 Dijagram sila-pomak | 53 |
| Slika 34 Dijagram sila-relativna deformacija..... | 54 |
| Slika 35 Shema opterećenja staklenog pokrovnog nosača (29) | 55 |
| Slika 36 Mjerna mjesta na staklenom pokrivnom nosaču (29) | 57 |
| Slika 37 Dijagram sila-pomak | 58 |
| Slika 38 Dijagram sila-relativna deformacija..... | 59 |
| Slika 39 Model iz softvera SJ Mepla..... | 62 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 1 Preliminarna opterećenja stakla..... | 36 |
| Tablica 2 Rezultati ispitivanja za šest uzoraka laminiranog stakla | 50 |
| Tablica 3 Rezultati izmjerenih pomaka [mm] | 53 |
| Tablica 4 Rezultati izmjerenih relativnih deformacija [$\mu\text{m}/\text{m}$]..... | 54 |
| Tablica 5 Rezultati izmjerenih pomaka [mm] | 58 |
| Tablica 6 Rezultati izmjerenih relativnih deformacija [$\mu\text{m}/\text{m}$]..... | 59 |
| Tablica 7 Usporedba rezultata pomaka za staklenu gredu [mm]..... | 80 |
| Tablica 8 Usporedba rezultata pomaka za stakleni pokrov [mm] | 82 |

Sažetak:

Tema ovog diplomskog rada je provjera nosivosti laminiranih staklenih elemenata i općenito primjena staklenih konstrukcija u građevinarstvu. Rad pruža pregled staklenih konstrukcija i njihovih svojstava, istražujući njihovu primjenu u građevinskoj industriji te dajući dublje razumijevanje ove komponente u suvremenim arhitektonskim rješenjima. Na početku je dan pregled povijesti proizvodnje stakla koji donosi kontekst razvoja ovog materijala, te su detaljnije obrađena njegova mehanička svojstva kako bi se stvorilo temeljno razumijevanje materijala. U drugom dijelu rada fokus je na lomu stakla, odnosno nesavršenostima stakla te kako ih izbjeći. U svrhu toga analizirane su obrade stakla pri čemu je poseban naglasak na kaljenju i laminiranju stakla. Rad istražuje staklo kao građevinski materijal, analizira opterećenja koja djeluju na staklene elemente te spominje norme za proračun staklenih elemenata, najčešća ispitivanja stakla te konačno analizu provedenog ispitivanja na staklenoj nadstrešnici. Obrađeni su rezultati ispitivanja za staklene grede nadstrešnice te pokrovne staklene panele, a kasnije su elementi i simulirani u softveru.

Ključne riječi:

laminirano staklo, mehanička svojstva, eksperiment, numeričko modeliranje

Summary:

The topic of this master's thesis is the verification of the load-bearing capacity of laminated glass elements and the general application of glass structures in construction. The paper provides an overview of glass structures and their properties, exploring their use in the construction industry and offering a deeper understanding of this component in modern architectural solutions. At the outset, a historical overview of glass production is provided to provide context for the development of this material. The mechanical properties of glass are then examined in detail to establish a fundamental understanding of the material. In the second part of the paper, the focus is on glass fracture, specifically imperfections in glass and how to avoid them. For this purpose, glass treatments are analysed, with a special emphasis on thermally toughened and laminated glass. The paper explores glass as a construction material, analyses the loads acting on glass elements, and mentions standards for calculating glass components, common glass testing methods, and finally, the analysis of conducted testing on the glass canopy. The results of the testing for the glass beams of the canopy and the covering glass panels are discussed, and later these elements are simulated in software.

Key words:

laminated glass, mechanical properties, experiment, numerical modeling

Uvod

Dvije karakteristike stakla koje prate taj materijal su da je ono prozirno i da se lako lomi. Staklo se danas u građevinarstvu sve više koristi, a arhitekti ga posebno favoriziraju pri odabiru materijala radi njegove transparentnosti i elegancije, dok ga inženjeri rijetko primjenjuju u onoj mjeri u kojoj bi arhitekti to željeli.

Iako je materijal dosta star, nije toliko ispitan kao ostali materijali koji se koriste u konstrukcijama. Tek krajem 20. staklo se počinje masovno koristiti na fasadama. Razvoj staklenih konstrukcija bio je usporen zbog nesigurnog ponašanja stakla pri lomu. Zbog činjenice da je lom stakla uvjetovan koncentracijom naprezanja oko površinskih defekata, čvrstoću pojedinačnog komada stakla teško je predvidjeti sa zadovoljavajućim stupnjem sigurnosti. Nadalje, staklo ne daje signal upozorenja prije nego što se razbije i ima tendenciju da se potpuno slomi nakon što nastane pukotina.

Ovaj diplomski rad kroz devet cjelina pokušava približiti staklo kao konstrukcijski element i detaljnije ga objasniti kao građevinski materijal koji se koristi na raznim konstrukcijama. Njegove mehaničke karakteristike čine ga jedinstvenim materijalom u usporedbi s drugim materijalima, a krhkost je možda i njegovo najpoznatije svojstvo. Posebno su objašnjeni principi obrade stakla koji ga čine sigurnijim za korištenje i daju mu nova svojstva te omogućuju uporabu stakla kao raznih konstrukcijskih elemenata, kao što su grede, stupovi ili paneli. Ispitivanja tih elemenata mogu se provesti na više načina, a jedno od njih je posebno analizirano u zadnjem dijelu rada. Na provedenom ispitivanju staklene nadstrešnice, napravljena je analiza rezultata te je napravljen numerički model elemenata nadstrešnice u softveru Mepla SJ koji je specijaliziran za analiziranje stakla te su uspoređeni eksperimentalni rezultati i rezultati numeričkog modela nakon kalibracije.

1. Povijest proizvodnje stakla

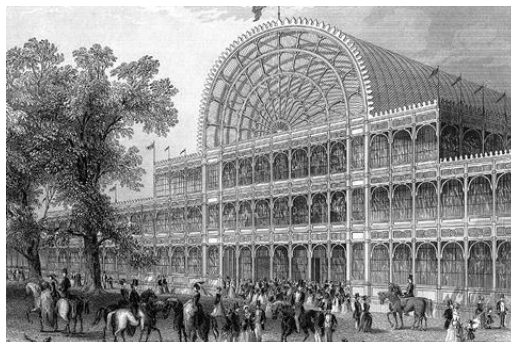
Najstariji pronađeni predmeti izrađeni od materijala sličnog današnjem staklu, potječu iz mlađeg kamenog doba, odnosno prije više od 9000 godina te se radi o prirodno nastalom staklu. (1,2) Nije sasvim sigurno kako je došlo do otkrića tog materijala, ali se pretpostavlja da su morska sol – NaCl, kosti ili školjke koji sadrže vapno – CaO i pijesak (silikat, SiO₂) koji su pod visokim temperaturama pružali pravu mješavinu sastojaka i topline za stvaranje stakla. (3) Tijekom godina, staklo se sve više počinje koristiti za posude poput vaza i čupova, kao i za pločice. To se izrađivalo puhanjem stakla, procesom koji se počeo koristiti u Europi u 1. stoljeću. (2)

Iako ga danas poznajemo kao materijal za čitav niz primjena, isprva se staklo koristilo za nakit, a kasnije je bilo oblikovano u posude. (3)

Uporaba stakla u konstrukcijama se pojavila kasnije, odnosno nakon što je izumljen proces puhanja stakla, otprilike oko 100. godine prije Krista. (3)

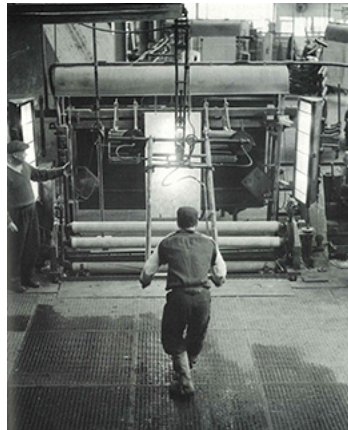
S vremenom, inovacije su dovele do masovne proizvodnje stakla i njegove upotrebe kao dekorativnog elementa u zgradama. Već u antičkom Rimu bilo je moguće pronaći prozore od lijevanog stakla. Kasnije, do 17. stoljeća kada se proizvodnja stakla proširila po cijeloj Europi, počinje se masovno koristiti za prozore sakralnih objekata. (2)

Primjena staklenih konstrukcija bila je olakšana razvojem lijevanog željeza. Tehnika željeznih okvira i staklenih obloga primijenjena je i na nove tipove zgrada koje su proizašle iz industrijske revolucije, poput željezničkih kolodvora i tvorničkih hala. (3) Najpoznatiji primjer ovog novog arhitektonskog tipa je Kristalna palača u Londonu (slika 1).



Slika 1 Kristalna palača u Londonu, 1851. (3)

Početak 20. stoljeća, konačno se razvija strojni postupak izrade stakla. Postupak je razvijen u Belgiji, a razvio ga je inženjer Émile Fourcault. (1) Postupak poznat kao Fourcaultov postupak, uključuje spuštanje ravnog metalnog štapa u kupku rastopljenog stakla te se nakon toga podiže i oblikuje se tanka ravna ploča stakla. Postupak uključuje hlađenje, oblikovanje i upotrebu valjka te rastezanje gotovih tankih ploča stakla za različite svrhe. (4)



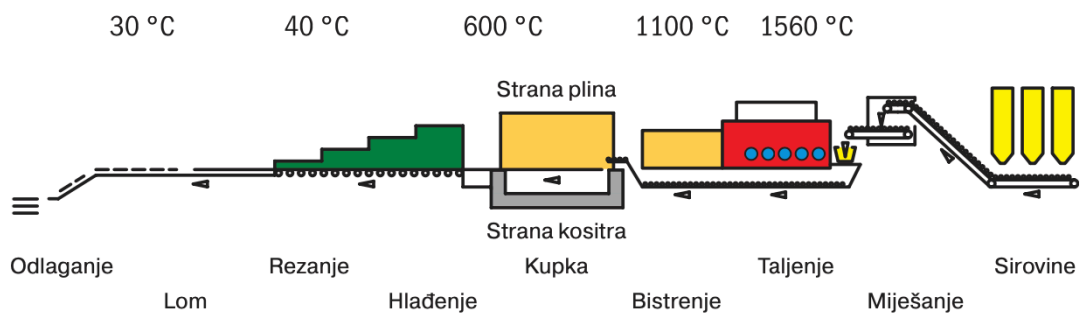
Slika 2 Fourcaultov postupak (4)

Godine 1959. dolazi do novog načina izrade stakla, a to je *Float Glass* proces, ili proces plutajućeg stakla, u tvrtki Pilkington. Razvio ga je Sir Alastair Pilkington i njegov istraživački tim nakon sedam godina eksperimentiranja i ulaganja. Postupak se temelji na ideji o plutajućem staklu, a ta inovacija je promijenila staklarsku industriju te se danas taj proces smatra standardom za visokokvalitetnu proizvodnju stakla (slika 3). (1,4)



Slika 3 *Float Glass* proces (4)

Proces uključuje taljenje mljevenih sirovina u peći, nakon čega se izlijeva tekuća masa na podlogu od rastaljenog kositra. Kositar osigurava formiranje savršeno ravne neprekidne ploče. U idućoj se fazi proizvodnje stakla ploča prenosi na valjcima do iduće stanice, gdje se polako hladi kako ne bi došlo do toplinskog šoka i pucanja. Tim procesom je stvoren osnovni proizvod od stakla koji se naziva žareno ravno staklo (slika 4). Standardne dimenzije ploče su 6,00 x 3,21 m, ali je moguće proizvesti i puno veće duljine stakla, do 18 m. (5)



Slika 4 Prikaz procesa plutajućeg stakla (1)

2. Mehanička svojstva stakla

Gustoća stakla slična je gustoći armiranog betona (2500 kg/m^3 ; 25 kN/m^3), a Youngov modul elastičnosti je jednak aluminiju (70 GPa). Iako mu je tlačna čvrstoća visoka (oko 1000 MPa), staklo pokazuje puno nižu vrijednost vlačne čvrstoće, a to primarno određuje prikladnost stakla za primjene na konstrukcijama. (5)

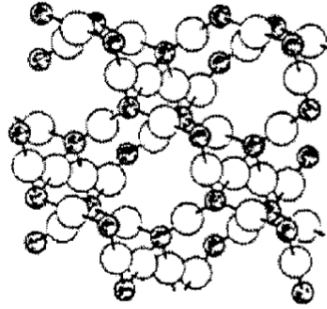
Teorijska vrijednost vlačne čvrstoće stakla iznosi oko $6,5\text{-}8,5 \text{ GPa}$, ali ispitivanja razaranjem su pokazala da je kritično vlačno naprezanje samo jedan mali dio tog iznosa ($30\text{-}60 \text{ MPa}$). Razlog tako velike razlike između teorijske i praktične vlačne čvrstoće je taj što staklo pokazuje površinske nedostatke, a to je karakteristično za krhke materijale. (5)

Dakle, vlačna čvrstoća stakla nije stalna vrijednost već ovisi o puno drugih faktora, a to su stanje površine staklenog elementa, veličina elementa, povijest i trajanje opterećenja, zaostalo naprezanje (radi očvršćivanja stakla) i radni uvjeti elemenata. (5)

Jedan od problema je i taj što staklo korodira, kao i većina građevinskih materijala. Poznata je pojava zamučivanja staklenih ploča u uvjetima velike vlage ili u stalnom kontaktu s vodom. Ako se reakcija silikatne strukture stakla s vodom dogodi na vrhu pukotine, ona se povećava atomskim korakom i smanjuje čvrstoću stakla. Postupnim smanjivanjem čvrstoće stakla dolazi do statičkog zamora. (5)

2.1. Definicija stakla

Uzrok strukturnih problema stakla leži u njegovim svojstvima materijala. Za razumijevanje svojstava stakla neophodno je poznavati njegovu mikrostrukturu i molekularni sastav. (3) U osnovi je staklo napravljeno od tri sirovine: soda, vapno i silicij. Omjeri ovih materijala mogu sadržavati i druge tvari ili ne sadržavati sve tri komponente. Molekule stakla su gotovo nasumično raspoređene (slika 5), što materijalu daje prozirnost te objašnjava izometrijsku kvalitetu materijala. (6)



Slika 5 Raspored atoma stakla (6)

Staklo je krhki materijal. Kao rezultat toga, njegovo ponašanje pri lomu obično je određeno okolišnim čimbenicima, a ne inherentnom snagom veza koje tvore staklenu mrežu. Čvrstoća loma stakala varira ovisno o prethodnoj površinskoj obradi, kemijskom okruženju i metodi koja se koristi za mjerenje čvrstoće. Kao krhki materijali, staklo je također vrlo osjetljivo na lomove uslijed toplinskog udara. (7)

Ostala mehanička svojstva stakla svojstvena su materijalu. Modul elastičnosti – E , određen je pojedinačnim vezama u materijalu i strukturom mreže. Tvrdoća stakla je funkcija čvrstoće pojedinačnih veza i gustoće atoma u strukturi. (7)

2.1.1. Struktura stakla u tekućem stanju

Istraživanja strukture stakla pokazuju kako ono nije uopće amorfna masa već su u njemu mikropodručja gdje su atomi raspoređeni po nekom zakonu, slično kao u kristalima. Atomi su smješteni u čvorovima neke kristalne rešetke, ali je ta rešetka deformirana nakon što su se atomi okupili u submikroskopske kristalne agregate ili kristalite. Stoga je poredak atoma pravilan, ali poredak kristalita međusobno nije. Prema tome, staklo je anorganski proizvod taljenja koji očvršćuje, a da se pri tome ne kristalizira. (8)

Nastanak kristala u staklu je gubitak staklastog stanja, devitrifikacija. U proizvodnji stakla kristalizacija nije dopuštena jer to pogreška u staklu. Budući da je tako, svaki proizvođač stakla mora za svako tehničko staklo poznavati linearne brzine njegove kristalizacije i njegovo praktično ponašanje prema devitrifikaciji. Jednostavnije, mora poznavati granice temperatura unutar kojih staklo kristalizira. (8)

Natrij-kalcij-silikatna stakla imaju najmanju sklonost prema kristalizaciji, ako im je udio kamena 70 %, a zbroj udjela natrijeva i kalcijeva oksida oko 26 %. Na devitrifikaciju stakla utječe se dodavanjem raznih oksida koji smanjuju tu sklonost, ili smanjuju temperaturu taljenja kristala ili smanjuju brzinu kristalizacije. (8)

2.1.2. Kemijska postojanost stakla u očvrslom stanju

Kemijska postojanost stakla je sposobnost stakla da zadrži sva svojstva pri razornom djelovanju vode, rastopljenih soli, vlage iz atmosfere, atmosferskih plinova i kemijskog djelovanja drugih materijala. Kemijska postojanost stakla ovisi o njegovu kemijskom sastavu i o vrsti razarajućih sredstava koja djeluju na staklo. Razaranje stakla očituje se kao irizacija (prelijevanje u duginim bojama) površinskih slojeva ili kao bjeličaste kapljice i mrlje na površini. (8)

Do kemijskog oštećenja ili korozije stakla dolazi kad silikati kao sastavni dio stakla hidroliziraju na površini u reakciji s vodom ili s vlagom iz zraka. Alkalni silikati pri tom stvaraju alkalni hidroksid i kremeni gel. Alkalni hidroksid se može isprati, ali kremeni gel ostaje na površini stakla poput sloja određene gustoće i debljine. (8)

Građevno staklo otporno je na djelovanje kiselina, soli i njihovih otopina. Spojevi na bazi fluora rabe se samo pri obradbi površine stakla nagrizanjem jer je fluorovodična kiselina jedina koja nagriza staklo. Lužine oštećuju staklo onda kada dugo djeluju na staklo, npr. plinovi u industrijskim područjima (amonijak). (8)

Pri izgradnji, često je moguće kemijsko oštećenje stakla. Površina stakla ugrožena je eventualno dospjelim iskrenjem pri varenju kovinskih dijelova konstrukcije oko stakla. Užarene kapljice troske ostavljaju crno-smeđe mrlje na staklu zbog kemijske i toplinske reakcije stakla i prispjelih kapljica troske. (8)

2.2. Modul elastičnosti stakla

Kao što je uobičajeno kod krhkih materijala, staklo prikazuje savršeno Hookeov zakon pri naprezanju (slika 6). Odnos deformacije, ε , koja proizlazi od naprezanja, σ , je konstanta koju znamo pod nazivom modul elastičnosti ili Youngov modul elastičnosti, E , koji je definiran izrazom: (7)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

Modul elastičnosti stakla iznosi oko 70 GPa, ovisno o vrsti stakla i obradi istog. (1)

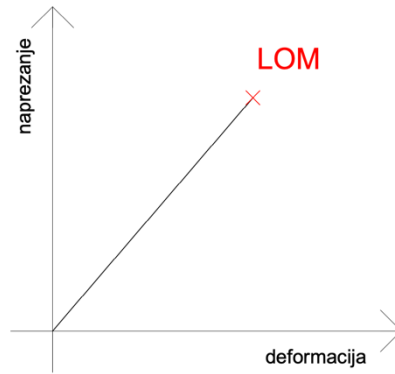
Ako dođe do vlačnog naprezanja po x-osi, uzorak će se u tom smjeru i produžiti. To produljenje se nadomješta skraćanjem u druga dva smjera. Odnos poprečnog naprezanja prema uzdužnom naprezanju naziva se Poissonov omjer. Poissonov omjer za stakla obično se nalazi između 0,2 i 0,3. Modul posmika, G , izražava se na sljedeći način: (7)

$$\tau = G\gamma \quad (2.2)$$

Gdje su τ i γ posmične komponente. Modul elastičnosti, modul posmika i Poissonov omjer su povezani sljedećom formulom, gdje je ν Poissonov omjer: (7)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.3)$$

Modul elastičnosti materijala proizlazi iz veze između primijenjene sile i rezultirane promjene prosječne udaljenosti između atoma koji čine strukturu tog materijala. (7) Može se povećati promjenama u kemijskom sastavu materijala, slično kao što se mijenja gustoća rasporeda atoma unutar tog materijala. To znači da povećanje modula elastičnosti E obično ide zajedno sa smanjenjem vrijednosti ν , koja je Poissonov omjer. Posljedice takvih promjena ne uključuju samo veću čvrstoću materijala, već i bolje ponašanje nakon pucanja. Razlog tome je što čvrsti materijal upija manje energije i može stvarati manje površine pukotina nakon pucanja. (3)



Slika 6 Hookeov zakon za staklo

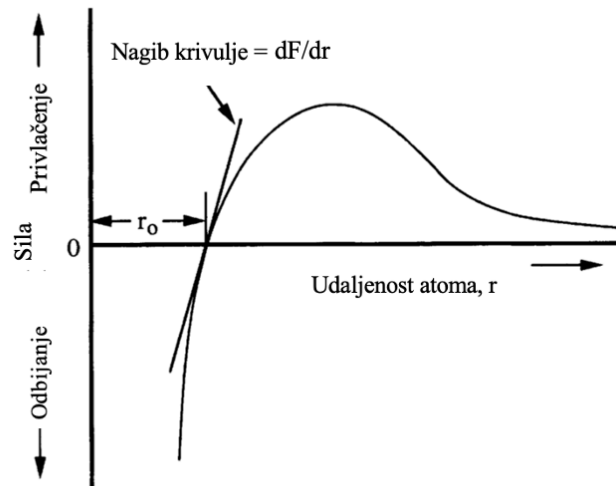
Modul elastičnosti materijala proizlazi iz odnosa između primijenjene sile i rezultirane promjene prosječne udaljenosti između atoma koji čine strukturu tog materijala. Ako razmotrimo Condon-Morse krivulju za silu, F , kao funkciju atomske udaljenosti, r , možemo napisati izraz oblika (7):

$$F = -\frac{a}{r^n} + \frac{b}{r^m} \quad (2.4)$$

gdje su a , b , n i m konstante. Krivulja koja prikazuje varijaciju sile s udaljenošću odvajanja (slika 7) prolazi kroz nulu na udaljenosti r_0 , koja je ravnotežna udaljenost atoma. Primjena makroskopske sile povećat će prosječni razmak za iznos (7):

$$\varepsilon = \frac{(r - r_0)}{r_0} \quad (2.5)$$

gdje je r deformirana udaljenost među atomima. Modul elastičnosti tada mora biti jednak nagibu krivulje sila F na udaljenosti r_0 . (7)



Slika 7 Graf krivulje sile i udaljenosti koji ilustrira podrijetlo modula elastičnosti (7)

Jednostavan model temeljen na Condon-Morse krivulji dobro se primjenjuje na visoko ionske strukture. Ako razmotrimo strukturu stakla, primjećujemo da modul također utječe dimenzionalnost i povezanost strukture, s tendencijom povećanja elastičnog modula kako se struktura mijenja od strukture lanca do slojevite strukture do potpuno povezane 3D mreže. (7)

Zaključno, budući da je elastični modul stakla povezan sa čvrstoćom veza, nije iznenađujuće da stakla s visokim temperaturama staklenja obično imaju visoke module. (7)

2.3. Tvrdoća stakla

Tvrdoća stakla je otpornost prema prodoru nekog tijela utiskivanjem. Postoji više metoda određivanja tvrdoće stakla, a najčešća je ona zarezom (paranjem površine). Iako određivanje tvrdoće po Mohsovoj skali nije pogodno za staklo, ipak se primjenjuje. Prema Mohsovoj skali, tvrdoća stakla je između 5 i 7. Određuje se tako što se površina stakla zareže mineralom veće tvrdoće od stakla prema Mohsovoj skali. (8)

Tvrdoća po Vickersu daje bolji uvid u tvrdoću stakla. Određena je prodiranjem dijamantne četverostrane piramide u površinu stakla. Tvrdoći stakla po Mohsu 5 odgovara tvrdoća po Vickersu 5500 N/m^2 . (8)

Prema drugom autoru, budući da ove metode nisu podobne za staklo, koriste se druge. Također, tvrdoća materijala, iako je razuman pokazatelj, ne pokazuje potpuno točno njegovo ponašanje pri oštećenju. Umjesto toga, tvrdoća se određuje putem dva komplementarna procesa, toplinske deformacije i kondenzacije. Ta dva procesa ovise o Poissonovom omjeru, visoka vrijednost Poissonovog omjera odgovara visokoj toplinskoj deformaciji, dok niska vrijednost Poissonovog omjera odgovara visokoj kondenzaciji. (3)

2.4. Čvrstoća stakla

Čvrstoća loma stakla obično je znatno manja od njegove teoretske čvrstoće. Čvrstoću loma stakla je moguće opisati samo pomoću distribucijske funkcije i ne pokazuje niti jednu vrijednost karakterističnu za određeni sastav stakla. Smanjenje čvrstoće povezano je s površinskim nedostacima koji značajno oslabljuju staklo. (7)

To bi značilo da stakla imaju čvrstoću koja varira i da se ta čvrstoća može razlikovati čak i unutar istog sastava stakla. Površinski defekti poput ogrebotina, pukotina ili nepravilnosti mogu djelovati kao inicijalna mjesta loma i uzrokovati smanjenje čvrstoće. Ovisno o proizvodnom procesu i kvaliteti stakla, površinski nedostaci mogu biti prisutni, što rezultira varijabilnom čvrstoćom među različitim uzorcima stakla istog sastava. (6)

Stoga je važno razumjeti da čvrstoća stakla nije konstantna, već je distribuirana, a faktori kao što su površinski nedostaci i mikrostrukturne karakteristike igraju važnu ulogu u određivanju stvarne čvrstoće stakla u praksi. (5) Općenito, čvrstoća materijala je omjer maksimalne sile i početne površine poprečnog presjeka uzorka materijala izrađenog i ispitanog prema usvojenom standardu. (8)

2.4.1. Teorijska čvrstoća stakla

Teorijska čvrstoća materijala određena je silom koja se mora primijeniti da bi se prevladala maksimalna sila predviđena jednadžbom (2.4). Jednom kada udaljenost međuatomskog odvajanja prijeđe udaljenost koja odgovara maksimalnoj sili, kontinuirana primjena sile produžiti će udaljenost veze dok se veza ne prekine i pukotina se može proširiti kroz materijal. Predviđa se da bi stakla trebala imati čvrstoću u rasponu od 1 do 100 GPa, bez obzira na njihov sastav. (7)

2.4.2. Uporabna čvrstoća stakla

Dobivene teorijske čvrstoće su veće od onih koje se nalaze u praktičnoj primjeni stakla. Ovo smanjenje čvrstoće pripisuje se prisutnosti nedostataka na površini stakla. Ti nedostaci djeluju kao koncentracije naprezanja, povećavaju lokalna naprezanja na razine koje premašuju teorijsku čvrstoću i uzrokuju pucanje stakla. (7)

Nedostaci, koji se uvode vanjskim čimbenicima, nisu svojstveni materijalu. Duljine nedostataka određene su prethodnom obradom površine i mogu varirati za nekoliko redova

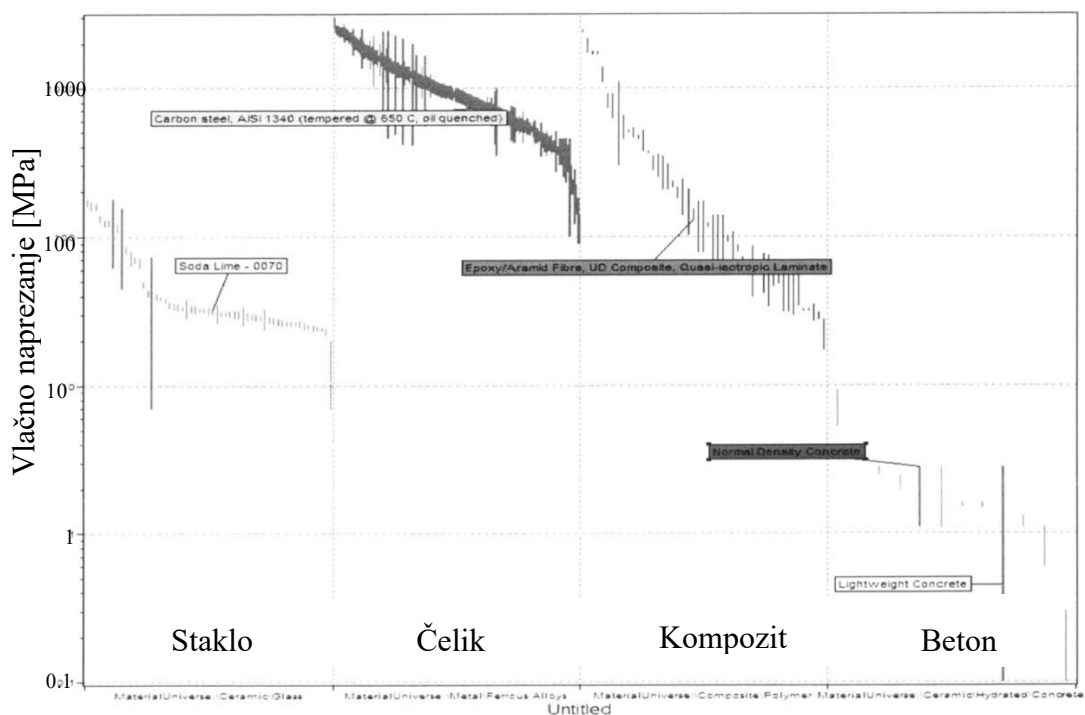
veliĉine. Iz toga slijedi da je stvarna ĉvrstoća stakla obično od malog znaĉaja za odreĊivanje praktiĉne ĉvrstoće. Tvrdoća stakla moţe utjecati na praktiĉnu ĉvrstoću kroz svoj utjecaj na otpornost na stvaranje nedostataka, odnosno otpornost na ogrebotine. (7)

2.4.3. Vlačna ĉvrstoća

Vlačna ĉvrstoća odreĊuje granicu uporabljivosti stakla pri raznim mehaniĉkim naprezanjima i istodobno uvjetuje postojanost stakla pri temperaturnim promjenama. Vlačna ĉvrstoća ovisi o sastavu stakla, toplinskoj obradi pri proizvodnji, stanju površine i o dimenzijama uzorka koji se ispituje. (8)

Vlačna ĉvrstoća je manja od tlačne ĉvrstoće stakla. UsporeĊujući s drugim materijalima, staklo se ističe po manjoj vlačnoj ĉvrstoći. Iako, opet ima veću vlačnu ĉvrstoću od vlačne ĉvrstoće betona, slika 8. (6)

Kako bi se kompenzirala njegova slabost, beton se ojaĉava ĉelikom koji ima bolja svojstva pri vlaku, i ova dva materijala su prikladna jedan za drugog. Tada se moţe razmisliti o sliĉnom postupku ojaĉavanja stakla materijalom koji će nadoknaditi nisku ĉvrstoću pri rastezanju stakla. Ipak, postoji problem, jer sastav tih materijala trebao bi zadržati prozirnost i sprijeĉiti pucanje. (6)



Slika 8 Usporedba vlačne sile stakla, ĉelika, polimernog kompozita i betona (6)

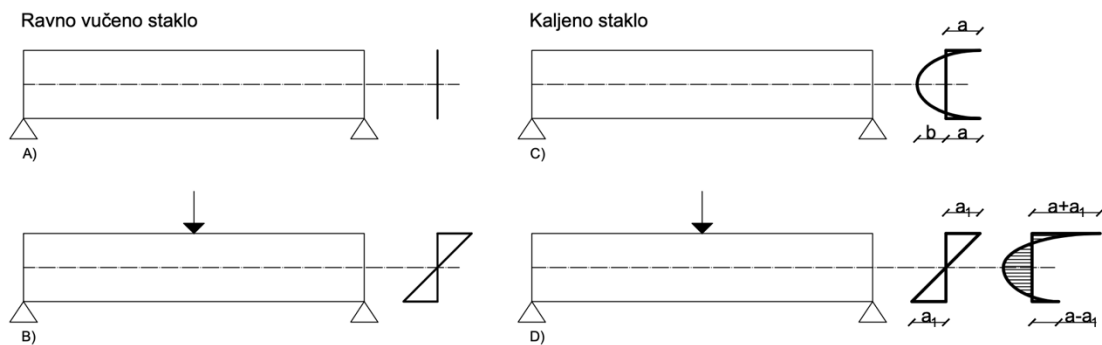
2.4.4. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća stakla je znatno veća od vlačne i iznosi 500 do 1000 N/mm², ovisno o vrsti stakla. (8)

2.4.5. Čvrstoća na savijanje

Čvrstoća na savijanje je uvjetovana vlačnom čvrstoćom stakla i iznosi za obično staklo od 20 do 50 N/mm², a za kaljeno staklo od 100 do 200 N/mm². U proračunu se zbog sigurnosti uzima za obično staklo dopuštena vrijednost vlačnog naprezanja od 20 N/mm², a za kaljeno staklo 100 N/mm² ako neće biti izloženo nikakvoj obradbi (rupe i urezi) i 50 N/mm² ako će biti obrađivano. (8)

Na idućoj slici prikazana je raspodjela naprezanja u ravnom sirovom staklu i u kaljenom staklu za neopterećeno i opterećeno staklo izloženo savijanju. (8)



Slika 9 Raspodjela naprezanja u neopterećenom (A i C) i opterećenom (B i D) ravnom sirovom staklu i kaljenom staklu izloženom savijanju (8)

Izmjerena čvrstoća na savijanje kod stakla ne može predstavljati jedini temelj za procjenu vrijednosti čvrstoće materijala. Čvrstoća stakla, kao i kod svih krutih materijala, u velikoj mjeri ovisi o površinskoj obradi. Sva mikro i makro oštećenja na površini stakla smanjuju njegovu čvrstoću na savijanje. (1)

To znači da se pojam čvrstoće na savijanje može definirati samo statistički; dakle, kao ona minimalna vrijednost pri kojoj je vjerojatnost loma najveća. Vjerojatnost loma ovisi o veličini površine opterećene silama i trajanju opterećenja.

Pri projektiranju nekog ostakljenja (pri izradi statičkog izračuna) moraju se koristiti bitno niže vrijednosti za dopuštenu čvrstoću na savijanje, kao što je prije spomenuto. (1)

2.5. Umor stakla

Čvrstoća stakla obično opada s vremenom u normalnim uvjetima okoliša. Ona se smanjuje s oko 70 MPa za vrlo kratkotrajna opterećenja na približno 10 MPa za trajna opterećenja. (3) Ovaj učinak, poznat kao statički umor, posljedica je interakcije stakla s okolnom atmosferom, što rezultira širenjem pukotina pod stalnim opterećenjem, a pripisan je promjenama površinskih grešaka stakla, koje zauzvrat utječu na polje naprezanja oko vrhova pukotina. (3,7)

2.6. Viskoznost

Viskoznost je svojstvo stakla u tekućem stanju. Velika viskoznost staklene smjese uzrok je nemogućnosti kristaliziranja pojedinih čestica. U procesu taljenja i prerade stakla, viskoznost određuje tijek tehnološkoga postupka. Viskoznost (ili koeficijent unutrašnjeg trenja) izražava se SI jedinicom paskal sekunda (Pa s). (8)

Kinetički model stvaranja stakla pokazuje da temperaturna ovisnost viskoznosti igra glavnu ulogu u određivanju lakoće stvaranja stakla za bilo koju talinu. Staklo se najlakše oblikuje ako je viskoznost vrlo visoka na temperaturi taljenja kristalne faze koja bi nastala iz taline ili ako viskoznost raste vrlo brzo s padom temperature. U oba slučaja, kristalizacija je ometena kinetičkom preprekom preustroju atoma koja je posljedica visoke viskoznosti. (7)

Osim kontrole lakoće stvaranja stakla, viskoznost je također vrlo važna u određivanju uvjeta taljenja potrebnih za formiranje homogene taline bez mjehurića, temperature žarenja za uklanjanje unutarnjih naprezanja i temperaturnog raspona koji se koristi za formiranje komercijalnih proizvoda. Viskoznost također određuje gornju uporabnu temperaturu bilo kojeg staklenog predmeta i uvjete pod kojima može doći do kristalizacije. (7)

3. Lom stakla

Suprotno onome što sugerira jednostavna linearna nominalna krivulja naprezanje-deformacija staklenog uzorka opterećenog do sloma, njegovo ponašanje sloma je prilično složeno. Ovisi o površinskim nedostacima, kojih može biti raznih vrsta. Ove greške nisu konstantne, već mijenjaju karakteristike tijekom vremena, ovisno o temperaturi, vlazi i trenutnim razinama vlačnog naprezanja. (3) Čest uzrok loma je oštećenje ruba stakla. Oštećenje rubova može značajno smanjiti čvrstoću stakla za više od 50%, a time i njegovu sposobnost otpornosti na toplinska i mehanička opterećenja. Staklo s postojećim oštećenjem ruba može biti funkcionalno neko vrijeme dok se ne spoje uvjeti potrebne kombinacije toplinskog naprezanja i/ili mehaničkog opterećenja koji uzrokuju lom. (9)

3.1. Mehanika loma

Unatoč linearno-elastičnom ponašanju naprezanja i deformacija, lom stakla je složena pojava. Proces loma još uvijek je predmet rasprave znanstvenika koji se bave ovim područjem. Postoji nekoliko pristupa tom problemu. (3)

Prema Orowanu, teoretsko naprezanje loma materijala σ_m određeno je energijom potrebnom za stvaranje dvije nove površine (s obje strane pukotine koja se pojavljuje):

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{E \cdot \upsilon_s}{w_o}} \quad (3.1)$$

gdje modul elastičnosti, E , iznosi 70 000 MPa za staklo, površinska energija loma, υ_s iznosi 2-4 J/m², dok je ravnotežni razmak atoma w_o jednak 0,2 nm.

Međutim, s gore navedenim vrijednostima, to rezultira teoretskim naprezanjem sloma od 32000 N/mm², dok je karakteristična vlačna čvrstoća na savijanje *float* stakla dobivena iz praktičnog iskustva i eksperimentalnog ispitivanja samo 45 N/mm². (3)

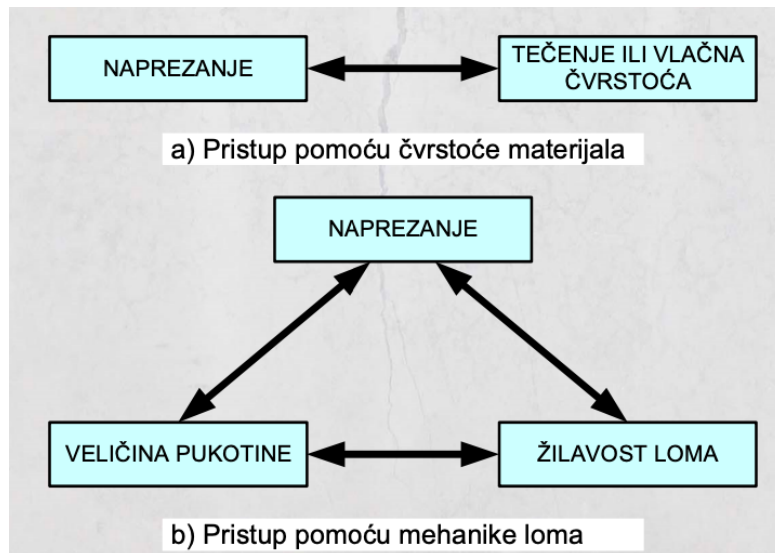
Ovu ekstremnu razliku Griffith je pripisao nasumično raspoređenim mikroskopskim nedostacima na površini stakla, koji su time postali poznati kao Griffithovi nedostaci, djelujući kao koncentratori naprezanja. Ranije, na temelju eksperimenata s čeličnim uzorcima s urezima, Inglis je izveo jednadžbu kao aproksimaciju koncentracije naprezanja

oko vrha pukotine. Omjer dubine pukotine prema vrhu pukotine a/ρ (a je duljina pukotine, a ρ je radijus pukotine) određuje koncentraciju naprezanja σ_{vrh}/σ_E .

$$\sigma_{vrh} = 2\sigma_E \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (3.2)$$

Budući da staklo ne može redistribuirati naprezanja u vrhu pukotine, lom stakla zapravo je uvjetovan ponašanjem pukotine. (3)

Značenje koncentracije naprezanja izazvanih pukotinama pokrenulo je razvoj mehanike loma. Umjesto tradicionalne analize konstrukcije, koja koristi dvije varijable za određivanje sloma (tj. naprezanja i čvrstoće tečenja ili vlačne čvrstoće), u mehanici loma koriste se tri parametra: naprezanje, veličina pukotine i žilavost loma. Lomna žilavost zamjenjuje tečenje ili vlačnu čvrstoću kao svojstvo materijala. (10)



Slika 10 Tradicionalni pristup lomu (gore) i pristup pomoću mehanike loma (dolje) (10)

Žilavost loma materijala može se izraziti pomoću dva alternativna kriterija, oslobađanje energije deformacije (energetski kriterij) i pristup analizom intenziteta naprezanja, oni su ekvivalentni za linearno elastične materijale. Temelje se na dva različita pristupa analizi loma. (3)

3.1.1. Energetski kriterij

U ovom pristupu se pretpostavlja da se lom, odnosno širenje pukotine događa kad je energija dostupna za rast pukotine dovoljna da savlada otpor materijala. Otpor materijala može uključivati površinsku energiju za stvaranje novih površina, plastični rad i neki drugi tip

trošenja energije povezan s razvojem pukotine. Ovaj je kriterij predložio A. A. Griffith, dok ga je G. R. Irwin formulirao: „Brzina oslobađanja energije je brzina promjene potencijalne energije za vrijeme loma po jedinici novostvorene površine pukotine za linearno-elastičan materijal.“ (11)

Ako se promatra beskonačna ploča s pukotinom, brzina oslobađanja energije može se dobiti kao:

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \quad (3.3)$$

3.1.2. Pristup analizom intenziteta naprežanja

U ovom se pristupu promatra stanje naprežanja elementa u blizini vrha pukotine za elastičan materijal te se uvodi koeficijent intenziteta naprežanja K_I , preko kojeg se može proračunati raspodjela naprežanja u okolini vrha pukotine. (11)

Za beskonačnu ploču s pukotinom vrijedi:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (3.4)$$

3.2. Površinski nedostaci stakla

Za linearno-elastične materijale, i energetski kriterij i pristup preko analize intenziteta naprežanja su ekvivalentni. Oba sadržavaju duljinu pukotine kao bitnu varijablu u određivanju kriterija loma. Dakle, da bi se predvidio lom staklene ploče, potrebno je odrediti svojstva njezinih površinskih nedostataka. Iz dva razloga, ovo je uzrokovalo značajne poteškoće u predviđanju čvrstoće pojedinačnih staklenih ploča.

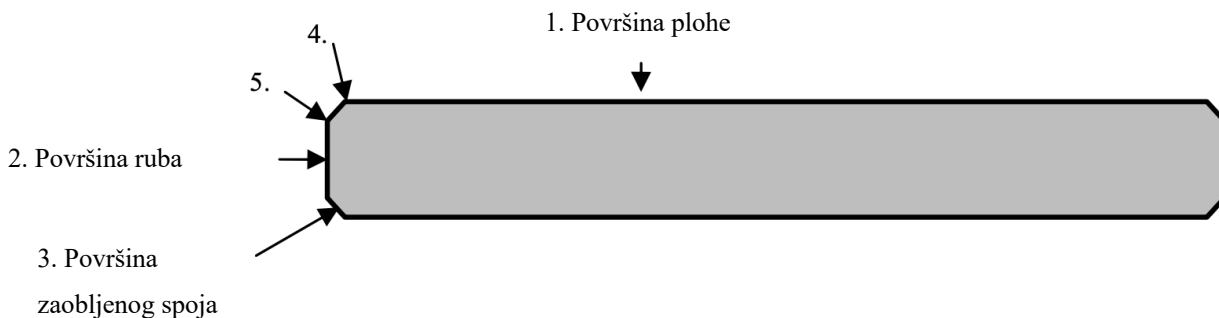
Prvi razlog je taj da postoji određena raspodjela pukotina koje nisu iste po površini stakla. Može se prepoznati više vrsta pukotina, ali ni unutar jedne vrste one nisu identične, ali su slične. Drugi razlog su pukotine u staklu koje nisu stalne. Njihovo se ponašanje i geometrija mijenjaju s temperaturom, vlagom, vremenom i prisutnošću vlačnih naprežanja. (3)

Promjenjivi karakter pukotina na površini stakla čini precizno određivanje čvrstoće stakla izuzetno teškim, skoro nemogućim. (3)

3.2.1. Različit karakter pukotina na površini stakla

Iako je općenito prihvaćeno da je lom stakla gotovo uvijek rezultat koncentracije naprezanja izazvane površinskim greškama, eksperimentalni podaci pokazuju da postoje različite vrste grešaka koje dovode do različite čvrstoće loma. (3)

Predloženo je razlikovanje između 3 i 5 područja loma na površini staklene ploče (slika 11), svako sa svojom tipičnom vrstom pukotine. Ovo gledište podupire opetovano utvrđena razlika u čvrstoći stakla između uzoraka opterećenih na ravnoj površini u odnosu na uzorke opterećene na rubu (tj. ploče ispitane na savijanje dok leže u ravnini u odnosu na ploče ispitane koje su okomite na ravninu). Čvrstoća okomitih ploča može biti samo 0,7 puta veća od čvrstoće ploča koje su horizontalno položene. To se obično pripisuje prisutnosti kritične vrste greške na rubu staklene ploče, različite od one na površini. Uzimajući u obzir različite postupke proizvodnje i obrade kojima su ta različita područja izložena, takva se razlika između područja i njihovih vrsta grešaka čini uvjerljivom. (3)



Slika 11 Predložena područja različitih grešaka na površini stakla (3)

Općenito razlikujemo dvije vrste nedostataka na površinama stakla. Griffinthove greške nastaju tijekom skrućivanja u procesu proizvodnje i raspoređene su po površini staklene ploče. Osim tih, relativno malih i homogeno raspoređenih Griffintovih grešaka, staklo može imati i slučajne nedostatke. Neki se obično pojavljuju već u proizvodnji *float* stakla. Međutim, slučajne greške se mogu dogoditi i tijekom životnog vijeka staklene ploče; krhotine, ogrebotine, udarci i sl. One su veće od Griffinthovih. (3)

3.2.2. Nestalan karakter pukotina na površini stakla

Čvrstoća stakla ovisi o vremenu; smanjuje se sa 70 MPa za kratkotrajna opterećenja na 10 MPa za trajna opterećenja. Ovakvo ponašanje je poznato kao statički zamor koji je pripisan promjenama površinskih grešaka u staklu, koje zauzvrat utječu na polje naprezanja oko vrha

pukotine. (3,9) Prema najprihvaćenijem objašnjenju, površinske pukotine mijenjaju oblik zbog naprezanja koja potiču reakciju između vode (pare) i silicij-oksidne mreže koja čini staklo. Ovaj model ne objašnjava sve aspekte umora stakla, ali objašnjava njegovo osnovno ponašanje. Brzina ove reakcije ovisi o različitim uvjetima poput vlage, temperature, pH vrijednosti, kemijskog sastava stakla, opterećenja i brzine opterećenja. (3)

Važno je napomenuti da je odnos između čvrstoće stakla i vremena također ovisan o okolišnim uvjetima. Tako da, kako bi se dobili pouzdani podaci o površinskim nedostacima iz ispitivanja, testiranje bi se trebalo provoditi u inertnim uvjetima okoline. (3)

Ova kemijska reakcija oštiri vrh pukotine i povećava naprezanja oko nje, a ne povećava njenu duljinu. Također, staklo pokazuje zanimljivo svojstvo da čvrstoća uzorka s nedostacima raste ako nema mehaničkog opterećenja tijekom vremena – zacjeljivanje pukotine, to se događa radi promjena u kemijskom sastavu na vrhu pukotine, uzrokovanom ispiranjem alkalija iz stakla. (3)

3.3. Uzroci oštećenja stakla

Potpuna nesposobnost stakla da redistribuira vršna naprezanja (pomoću lokalne plastične deformacije) ili zaustavi rast pukotine (putem disipacije energije ili diskontinuiteta koji zaustavljaju pukotine), učinila je materijal osjetljivim na mnogo širi raspon uzroka oštećenja. (3)

Neki od uzroka loma i oštećenja stakla su:

- Oštećenja površine. Tijekom životnog vijeka površina staklene ploče može biti izložena mnogim utjecajima koji u većoj ili manjoj mjeri pogoršavaju kvalitetu stakla. To može rezultirati gubitkom vizualne kvalitete, ali i gubitkom čvrstoće jer oštećenje može odmah ili tijekom vremena razviti kritične duljine pukotine (kroz stabilan rast pukotine). Općenito, oštećenje površine može imati mehaničke ili kemijske uzroke. (3)
- Slučajni udarac. Kao i većina građevinskih elemenata, stakleni elementi mogu naići na sudar s ljudima ili predmetima. To može uzrokovati neočekivanu raspodjelu i koncentraciju naprezanja, koje staklo možda neće moći podnijeti. Kodeksima se

često zahtijeva testiranje ostakljenja kako bi se osigurala njihova otpornost na takva opterećenja.

- Toplinska naprezanja. Lom zbog toplinskog naprezanja uzrokovan je kombinacijom niske toplinske vodljivosti i visokog koeficijenta toplinskog širenja. To uzrokuje nepravilno toplinsko širenje i velika naprezanja.
- Nikal sulfid. Kada su prisutni u vlačnoj zoni u termički kaljenom staklu, mogu uzrokovati lom stakla. Ovo je vjerojatno jedini uobičajeni uzrok loma koji potječe iz unutrašnjosti stakla, a ne s površine. Detaljnije je opisano kasnije kod HST testa.
- Ljudska pogreška. U procesu projektiranja, proizvodnje i ugradnje mnoge stvari mogu poći po zlu zbog pogreške, neznanja ili nemara. Neispravan odabir vrste stakla, debljine stakla ili spojeva, pogrešno modeliranje, nepravilna toplinska obrada (nedovoljno prednaprezanje), pogrešno montiranje, nepravilna uporaba alata ili uporaba neprikladnih alata.

S obzirom na sve navedeno, primarni uzrok kvara je ljudska pogreška tijekom procesa projektiranja i izrade staklenog elementa. Većina kvarova potječe od pogrešaka u dizajnu, loše proizvedenog ili naknadno obrađenog stakla ili pogrešaka i nepažnje tijekom rukovanja, transporta ili izgradnje. Nažalost, praktički je nemoguće u potpunosti izbjeći takve pogreške, a obično ih se ne može ni otkriti dok se lom ili oštećenje zapravo ne dogodi. (3)

4. Obrada stakla

Sirovo staklo trenutno je najraširenija vrsta stakla. Korištenjem industrijskih procesa (kao što je postupak *float* stakla), moguće je proizvesti ogromne količine visokokvalitetnog prozirnog stakla s ravnom površinom. Debljina stakla može varirati od 2 mm do 25 mm. (12) Posljedica suvremenih tehnologija velika su poboljšanja karakteristika stakla u smislu zaštite od topline, sunca i zvuka. Time su se otvorile mogućnosti planiranja vrlo velikih ostakljenih površina i korištenja stakla na elementima konstrukcije na kojima su do nedavno prevladavali neki drugi materijali. (1)

Najveću prepreku pri ostvarivanju novih zamisli sa staklom, moglo bi predstavljati njegova nepostojana sigurnosna funkcija. Obično staklo je vrlo krhak materijal. Iznenađujuća promjena temperature dovoljna je da se staklo slomi. (1) Uzrok takvog ponašanja stakla treba tražiti u posebnosti njegove unutarnje strukture. Prijelaz iz tekućeg u čvrsto stanje bez nastanka kristalizacije rezultira neuređenom kristalnom mrežom. Pojedine molekule su stabilne, ali je veza među susjednim molekulama slaba, često i prekinuta. (1,7) Time nastaju mikroskopski mali prijelomi zbog kojih se već pri minimalnom vlačnom opterećenju aktivira lom cijele strukture. Prijelomi se manifestiraju u obliku mikroskopskih rezova i samo u njima se može tražiti uzrok stvarne čvrstoće stakla na savijanje koje je više od sto puta niža od teoretske, kao što je ranije spomenuto. (1)

Zbog svega toga, razvijeno je više načina obrade stakla pri kojima staklo dobiva na svojoj sigurnosti te postaje čvršće. U daljnjem tekstu biti će opisano kaljeno staklo te laminiranje stakla.

4.1. Kaljeno staklo (ESG)

Staklo spada u krhke materijale. Procesom kaljenja dolazi do promjene unutarnjih naprezanja u njegovoj strukturi što povećava savojnu čvrstoću stakla. Kaljeno staklo pruža sigurnost. Prilikom razbijanja kaljeno staklo se raspada na male komade neoštarih rubova (slika 10). Zbog toga se kaljeno staklo primjenjuje svugdje gdje postoji velika vjerojatnost loma uslijed udaraca ili na osjetljivim lokacijama gdje postoji opasnost od razbijanja stakla i velika izloženost Sunčevu zračenju. (13)



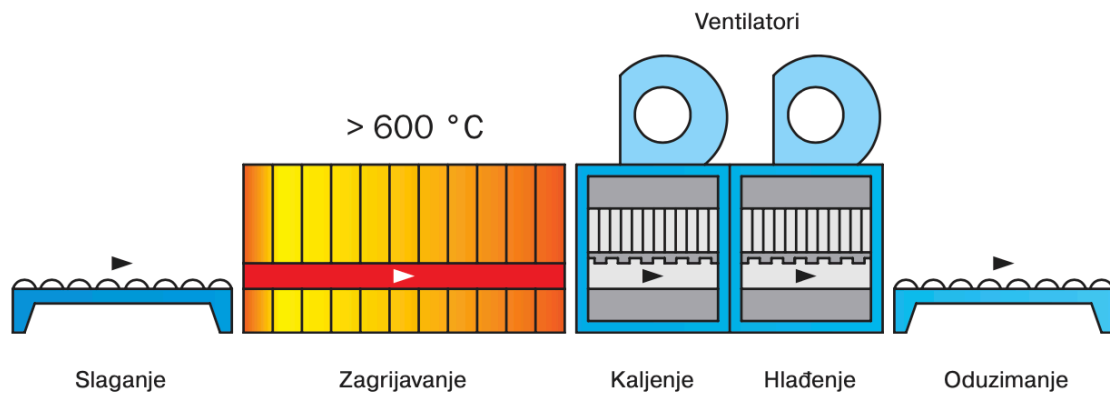
Slika 12 Razbijeno kaljeno staklo (lijevo) i sirovo staklo (desno) (14)

Pod pojmom kaljeno staklo podrazumijeva se toplinski ojačano sigurnosno staklo koje se naziva i prednapregnutim staklom. Kako već i sam naziv govori, prednaprezanje se postiže toplinskom obradom stakla koja se provodi tako da se obje površine stakla najprije zagrijavaju do određene temperature, a zatim se naglo hlade. (1)

Kaljeno staklo je vrsta sigurnosnog stakla koje ima veću čvrstoću zbog zaostalih naprezanja. Na njemu se ne može dalje raditi (rezati ili bušiti) nakon obavljenog procesa kaljenja. Kaljeno staklo postaje sve važnije kako raste njegova primjena. (12)

4.1.1. Proces kaljenja stakla

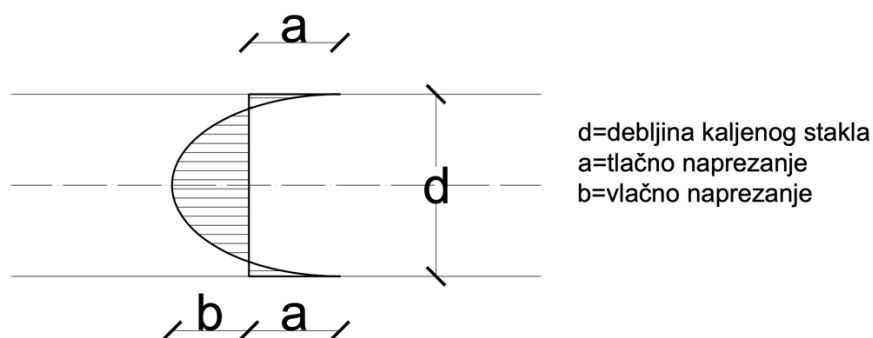
Kakvoća stakla u očvrslom stanju znatno ovisi o tehničkoj obradi u tekućoj fazi ili u procesu kaljenja. (8)



Slika 13 Proces kaljenja stakla (1)

Kaljeno staklo počinje sa sirovim staklom. Zagrijava se na 620°C - 675°C (90-140°C iznad temperature prijelaza) i brzo hladi mlazovima hladnog zraka. U takvim uvjetima nastaje u staklu pravilna raspodjela napreznja i ono je prednapregnuto (slika 14). (8) Sve to uzrokuje skrućivanje vanjske površine stakla prije unutarnjeg dijela. Kako se unutrašnjost hladi, ono dobiva unutrašnja napreznja koja utječu na njegovu kakvoću. Hlađenje unutrašnjih slojeva i njihovo stezanje događa se pod očvrslim vanjskim slojem pa su unutrašnji slojevi izloženi djelovanju vlačnih sila vanjskog sloja, a unutrašnji slojevi djeluju na vanjski sloj tako što je on izložen djelovanju tlačnih sila. Razdioba unutrašnjih napreznja ovisi o debljini staklene ploče, o načinu hlađenja i kemijskom sastavu stakla. U kvalitetnom su staklu unutrašnja napreznja uravnotežena. (1,8)

Raspodjela temperature obično je parabolična, s hladnijom površinom i toplijom unutrašnjošću. Kako bi se dobili najbolji rezultati s maksimalnim temperaturnim napreznjem, površinu treba skrutiti točno u točki kada se javlja najveća temperaturna razlika i otpušta početno vlačno napreznje. U ovoj vrsti stakla, površinske greške se ne šire pod pritiskom tlačnog napreznja pa kaljeno staklo može izdržati veća napreznja od sirovog stakla. (12)



Slika 14 Raspodjela naprezanja u kaljenom (prednapregnutom) neopterećenom staklu (8)

Budući da staklo zbog amorfne strukture nema klasičnu točku taljenja, nije moguće točno odrediti pri kojoj temperaturi staklo više nije u čvrstom stanju, odnosno pri kojoj je već u tekućem stanju. Između ta dva stanja postoji transformacijsko temperaturno područje: staklo najprije omekša, zatim postaje tjestasto i, konačno, tekuće. Za kaljenje pločastog prozorskog stakla u tom su području najprikladnije one temperature pri kojima je staklo u početnoj fazi omekšavanja. Pri tim temperaturama veze između pojedinih molekula se smanjuju, odnosno nisu više krute. Tijekom zagrijavanja pojedine molekule se rastežu. Kada se postigne tražena temperatura, dovođenjem komprimiranog atmosferskog zraka staklo treba što prije ohladiti. Molekule u vanjskim slojevima stakla brzo se hlade. Pri tome se stežu i učvršćuju. Zbog slabe toplinske provodljivosti te molekule zadržavaju hlađenje, a time i stezanje molekula u srednjem sloju. Posljedica toga je da su molekule na površini gušće, a u sredini stakla rjeđe. Rezultat veće gustoće je smanjenje broja, odnosno veličine površinskih mikropukotina. (1)

4.1.2. Prednosti kaljenoga stakla

Postoje tri osnovne prednosti kaljenoga stakla. Prva prednost je zaštita od ozljeda u slučaju razbijanja stakla jer se ono razbija na male komadiće neoštrih rubova. Druga prednost je visoka savojna čvrstoća; u današnje vrijeme arhitekti sve više koriste staklo u projektiranju nosivih elemenata konstrukcija radi njegovog estetskog dojma. Mogućnost staklenih konstrukcija da prenose veća opterećenja dolazi od osmišljavanja metode kaljenog stakla čime staklo dobije veću tlačnu i vlačnu čvrstoću. Treća prednost je otpornost na toplinski šok. Zahvaljujući procesu kaljenja stakla, dolazi do promjene unutarnjih naprezanja u njegovoj strukturi što povećava savojnu čvrstoću stakla i porast toplinskih naprezanja. (13)

4.1.3. HST test

Nakon određenog vremenskog perioda (nakon nekoliko sati ili godina), kaljeno se staklo može slomiti bez primjetnih vanjskih utjecaja. Spomenuta pojava naziva se spontani lom. Razlog je molekula NiS (niklov sulfid) koja ima negativno temperaturno rastezanje. Te molekule se mogu stvoriti tijekom *float* procesa izrade stakla. Dakle, nakon kaljenja, tijekom naglog hlađenja, molekule stakla se stežu, a molekula niklovog sulfida se širi te stvara dodatna naprezanja u staklu. Ako se ta molekula niklovog sulfida nalazi u polju vlačnog naprezanja, velika je vjerojatnost da će razina dopuštenog naprezanja biti prekoračena i da će doći do spontanog loma stakla. (1,15)

Iako je pojava vrlo rijetka, u skladu sa zahtjevima standarda EN14179 se mora spriječiti. To se postiže tako da se stakla izlažu „vrućem“ opterećenju. Taj test se naziva Heat soak test (HST test), a provodi se tako da se stakla u posebnoj komori polako griju do $290\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$. Stakla budu izložena toj temperaturi 4 sata, a tijekom tog vremena stakla koja imaju molekulu niklovog sulfida će vrlo vjerojatno puknuti. (1)

Zaključno, u okviru početnog ispitivanja i unutarnje kontrole proizvodnje kontroliraju se dvije najvažnije značajke kaljenog stakla s toplinskim ispitivanjem prema EN 14179.

Struktura loma kaljenog stakla omogućava smanjenje opasnosti od ozljeda u slučaju rušenja ravnoteže napetosti, odnosno loma, kada se oslobađa sva energija nakupljena tijekom kaljenja. Nastaje fina mreža sitnih dijelova tupih rubova.

Druga značajka je mehanička čvrstoća, odnosno čvrstoća na savijanje. Za kaljeno staklo je izmjerena vrijednost veća od 120 N/mm^2 , dok je za nekaljeno staklo vrijednost čvrstoće 45 N/mm^2 .

Uz te sigurnosne kriterije, kaljeno se staklo odlikuje i većom udarnom čvrstoćom te većom postojanošću na temperaturnim razlikama, do 5 puta veća od običnog *float* stakla. (1)

4.1.4. Polukaljeno staklo – toplinski ojačano

Toplinski ojačano staklo se proizvodi na isti način kao i kaljeno staklo korištenjem iste opreme za obradu. Staklo se zagrijava, a zatim se prisilno hladi kako bi se stvorio površinski sloj. Kontroliranjem brzine na kojoj se hladi, određuje se je li staklo toplinski ojačano ili kaljeno. Za kaljeno staklo je hlađenje puno brže, a za proizvodnju toplinski ojačanog stakla

hlađenje je sporije i konačna tlačna čvrstoća stakla je niža od potpuno kaljenog stakla, ali opet je veća od običnog sirovog stakla. (16)

4.2. Laminiranje stakla

Laminirano staklo je sigurnosno staklo sastavljeno iz dviju ili više staklenih ploča između kojih je sloj PVB folije. Ploče s folijom se u autoklavu pod tlakom i povišenom temperaturom slijepe u jednostruku, prozirnju ploču. (8) Otpornost i ponašanje laminiranog stakla u velikoj mjeri ovisi o vrsti stakla koje se koristi. Ugrubo se mogu razlikovati tri vrste: ljepljive smole koje se mogu lijevati, meke ljepljive folije i krute ljepljive folije. Svi su oni viskoelastični polimeri i njihovo je ponašanje materijala zbog toga složeno, ovisno o trajanju opterećenja, temperaturi, vlazi i drugim utjecajima okoline. (3)

Za razliku od folija, smole mogu ispuniti relativno velike šupljine, koje se posebno mogu pojaviti između ploča kaljenog stakla. Međutim, folije se često preferiraju kad god je to moguće, zbog njihove jednostavne primjene i boljih mehaničkih svojstava (otpornost na trganje). (3)

Za laminirano staklo najčešće se koriste meke folije. U pravilu se koristi polivinil butiral (PVB), ali postoje i neke druge folije, poput etilen vinil acetatne folije (EVA) koja se često koristi za laminirana stakla s fotonaponskim ćelijama. PVB se skladišti u rolama, obično debljine 0,38 mm, a nanosi se u dva ili četiri sloja. (3)



Slika 15 Usporedba lomova raznih obrada stakla

Uvjet da staklo bude sigurnosno laminirano staklo je da se komadići stakla nakon loma drže zajedno i na taj način ne ozlijede ljude u blizini (slika 15). Štoviše, struktura se ne urušava, ali više nije u stanju nositi teret. Često se kaljeno ili toplinski ojačano laminirano staklo koristi tamo gdje je potrebna veća čvrstoća od običnog *float* stakla. (6)

4.2.1. Proizvodnja laminiranog stakla

Postoje dvije osnovne metode proizvodnje laminiranog stakla, a to su suhi i mokri postupak proizvodnje. Suha metoda, koja se uglavnom koristi za proizvodnju laminiranog stakla s PVB folijom, je postupak u kojem se PVB folija stavlja između dva komada stakla, a zatim ga prati visoka temperatura i pritisak. (17)

Za proizvodnju laminiranog stakla ovom metodom, sendvič struktura od dva komada neke vrste stakla iste veličine i komada PVB folije zagrijava se u prostoriji za predgrijavanje i povezuje s vakuumskim ventilom kako bi se uklonio višak zraka, a zatim šalje u autoklav zagrijavanjem do temperaturi od 120–140 °C i dodavanjem naprezanja od 1,1–1,3 MPa oko 40–60 minuta. Nakon što se temperatura u autoklavu ohladi na oko 50 °C, postupno se otpušta pritisak i laminirano staklo se vadi iz autoklava. Međutim, druga metoda je ulijevanje u tekuću smolu u prostor između staklenih, eliminirajući višak zraka, a zatim slijedi toplinska ili UV obrada kako bi se proizveo čvrsti laminat. U ovom postupku ostaje višak vlage, što će štetiti sigurnosti i kvaliteti laminata. Iako ima prednost jer ne zahtijeva skupu opremu i visoku tehnologiju, metoda se koristi samo za nekoliko posebnih primjena. (17)

4.2.2. PVB folija

Laminirano staklo se uglavnom laminira PVB folijom jer ima bolje sigurnosne karakteristike od onog izrađenog s EVA folijom, iako imaju istu primjenu. PVB karakterizira visoki koeficijent elastičnosti i zvučne izolacije, te ima puno veću optičku čistoću u usporedbi s EVA folijom, odnosno otpornost na lom. (18)

PVB folija je izrazito suha i higroskopna. Na rubovima laminiranog stakla, izložena je utjecaju okoliša, radi vlage i kapljica vode koje se zadržavaju koje mogu prodrijeti unutar slojeva, može doći do delaminacije i zamućenosti stakla. Međutim, to ne dovodi do gubitka karakteristika stakla, ono i dalje ima ista svojstva. (18)

5. Rješenja za projektiranje sigurnosnog stakla

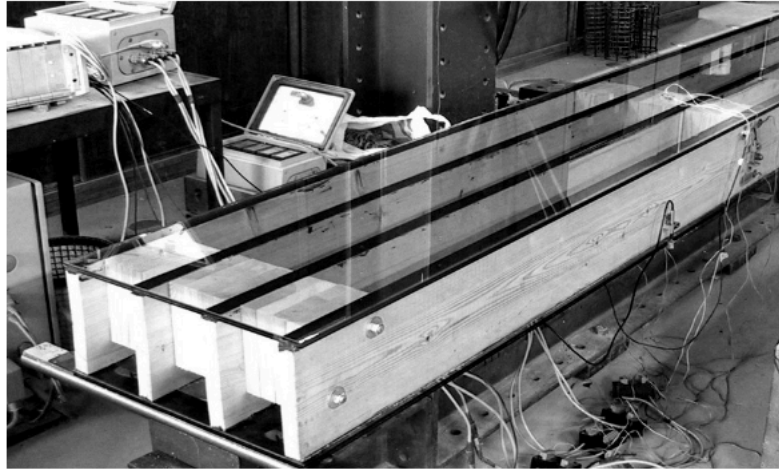
Osim poboljšanja svojstava staklene ploče toplinskom obradom i/ili laminiranjem, primjenjuju se različita rješenja za povećanje sigurnosti staklenih konstrukcija i konstrukcijskih staklenih elemenata u slučaju udarca, a to su:

- uvlačenje unutarnjih slojeva stakla, vanjski izbočeni slojevi štite rub unutarnjeg sloja, čineći oštećenje od slučajnih udara vrlo malo vjerojatnim;
- zaštitno oblaganje ruba staklenog elementa;
- složeni elementi, podjela strukturnog elementa na više dijelova kako bi se ograničila mogućnost oštećenja cijelog elementa;
- alternativni putevi opterećenja, projektiranje strukture tako da opterećenje može biti redistribuirano kada neki dio strukture izgubi svoju nosivost. (3)

5.1. Inovativne i eksperimentalne metode povećanja sigurnosti

Razni istraživački instituti, inženjerski uredi i druge tvrtke uključene su u razvoj novih koncepata projektiranja stakla za povećanje sigurnosti. Ova rješenja su u različitim fazama zrelosti – neka su primijenjena u više projekata, a neka tek trebaju izaći iz laboratorija.

- dodatne folije s većim čvrstoćama i krutostima (PMMA, PC), također i mreže od čeličnih žica koje se umeću između slojeva stakla kako bi se postigla još veća otpornost od otkaza, no to se više ne koristi,
- linearni ojačani elementi, obično čeličnim profilima; mogućnost ojačanja staklene grede čeličnim profilima je također zastarjelo i danas se više ne koristi,
- staklene grede ojačane karbonskim vlaknima, one se i dalje istražuju iako su već korištene,
- kompozitni sustavi, staklo-drvo, staklo-čelik, staklo-beton. (3)



Slika 16 Primjer jednog kompozitnog sustava grede, staklo-drvo (3)

Za sada je vrlo važno primijetiti da se, unatoč trudu uloženom u istraživanje koncepta projektiranja za povećanje sigurnosti staklenih elemenata, ne može pronaći sveobuhvatna analiza s obzirom na specifične mjerljive sigurnosne ciljeve koje je potrebno postići. Često se navodi početni otpor (kada počinje lom) i maksimalni otpor prije kolapsa (obično se utvrđuje iz testova savijanja u četiri točke), pretpostavljajući da je njihov omjer mjera sigurnosti stakla. Dodatno, u praksi se ponekad poduzimaju zaštitne mjere kako bi se smanjila mogućnost loma zbog nerazmotrenih uzroka. To se, međutim, ne pojavljuje dosljedno niti u projektima niti u razvoju koncepta, pa se čini da se primjenjuje prilično nasumično. (3)

6. Staklo kao građevinski materijal

Staklo je, samo po sebi, materijal koji nije siguran za korištenje kao konstrukcijski element. To uvelike koči razvoj staklenih struktura, a sigurnosni problemi su sljedeći:

Čvrstoću pojedinog komada stakla teško je predvidjeti sa zadovoljavajućim stupnjem sigurnosti. Jednake ploče stakla iz iste serije mogu i dalje pokazivati vrijednosti čvrstoće koje variraju. Idući problem je taj što staklo ne daje signal upozorenja prije nego što se razbije i ima tendenciju da se potpuno slomi nakon što počne pucati, ovisno o njegovoj obradi. Nadalje, staklo ne stvara samo strukturalne sigurnosne probleme, krhotine su također izravan rizik za tjelesne ozljede budući da su toliko oštre da mogu uzrokovati opasne posjekotine puno lakše nego komadići drugih materijala. (3)

Također, jedan od problema uz krhkost stakla, je i veliko rasipanje vlačne čvrstoće stakla i činjenica da ta vrijednost nije konstantna tijekom vremena te ovisi o puno drugih čimbenika. (5)

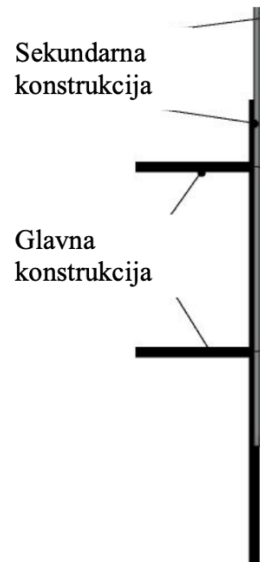
Dva standardna rješenja, preuzeta iz automobilske industrije, obično se primjenjuju kako bi se izbjegle tjelesne ozljede i prekomjerna oštećenja strukture: kaljenje i laminiranje, o čemu će biti riječ kasnije. (3)

Usprkos tome, u posljednjih 10 do 15 godina došlo je do sporog, ali stalnog porasta projekata strukturalnog stakla od strane raznih inženjera i arhitekata. Mogućnosti konstrukcijskog stakla se sve više proširuju. (3)

U građevinarstvu je najraširenije natrij-kalcij-silikatno staklo. Ono se proizvodi od sirovina koje su kvarcni pijesak, otpadci stakla i dodatci, najčešće natrijev i kalcijev karbonat te olovo i bor kao topitelji. Danas se 90 % stakla proizvodi u *Float Glass* procesu koji je opisan ranije. (5)

Što se tiče stakla u konstrukcijama i njegovog ponašanja, ono se značajno razlikuje od ostalih materijala koji su šire zastupljeni u građevinarstvu. Staklo je savršeno elastično, izotropno i krhki materijal. Ono nema plastičnost pa se raspodjelom unutarnjih sila lokalne koncentracije naprezanja ne mogu smanjiti. (5)

Kada se promatraju staklene konstrukcije, potrebno je razlikovati sekundarne elemente (fasadni paneli, pregradni elementi, stakleni pokrov, ograde itd.) i glavne nosive konstrukcijske elemente (staklene grede, stupovi, zidovi itd.), slika 17. (19)



Slika 17 Sekundarna i glavna konstrukcija (19)

Ukoliko dođe do otkazivanja glavnih elemenata, konstrukcija dolazi u krajnje granično stanje. U slučaju otkazivanja sekundarne konstrukcije, dolazi do lokalnog otkazivanja elemenata i tada nema i ne bi smjelo biti utjecaja na glavne konstrukcijske elemente. (19)

Staklo se u nosivim građevinskim konstrukcijama nije koristilo do prije šezdesetak godina. Vanjska djelovanja, ponajviše vjetar, prenosilo je na podkonstrukciju, ali nije nosilo niti jedan dio zgrade osim sebe. (3) To se promijenilo oko 1950. godine.

U osnovi se mogu promatrati dva osnovna primjera u razvoju konstrukcijske uporabe stakla. Prvi primjer su linearni konstrukcijski stakleni elementi opterećeni savijanjem i/ili tlakom, a drugi su staklene ploče koje nose u ravnini (staklene fasade), prvo opterećene na vlak, a kasnije i na tlak. (3)

6.1. Opterećenja na konstrukciju

Proizvođači stakla osiguravaju maksimalna opterećenja koja svaka vrsta stakla može podnijeti. Podrijetlo opterećenja je važan parametar jer se staklo ne ponaša isto za kratkotrajna i dugotrajna opterećenja. (6)

6.1.1. Opterećenje vjetrom

Vjetar stvara pritisak na staklo van njegove ravnine onda kada je staklo dio fasadnog ili krovnog elementa. U svrhu projektiranja, vjetar se smatra kontinuiranim na površini staklenog panela i izaziva kratkotrajna opterećenja stakla. (6)

Maksimalna vrijednost koju treba uzeti u obzir prilikom projektiranja staklenog panela i vremensko razdoblje primjene opterećenja varira sukladno propisima svake zemlje. (6)

6.1.2. Opterećenje snijegom

Opterećenja snijegom primjenjiva su na ravna i nakošena stakla i još su jedno opterećenje izvan ravnine koje treba uzeti u obzir. Mogu trajati danima, tjednima ili čak mjesecima i smatraju se dugim vremenskim opterećenjem. Stoga je maksimalno dopušteno naprezanje u staklu čak niže nego kod opterećenja vjetrom. Opterećenje snijegom na staklo je ravnomjerno, ali snijeg može lako kliziti ili može biti nošen vjetrom, što može dovesti do neravnomjerne raspodjele opterećenja na krovu. Propisi pružaju precizan opis maksimalnih opterećenja koja treba uzeti u obzir. (6)

6.1.3. Udarne opterećenja

Kosi i horizontalni stakleni elementi više su izloženi udarnom opterećenju. U strukturnim sustavima izrađenim od stakla, kao što su podovi, stepenice i ograde, udarci postaju važan faktor. Naime, staklo bi trebalo izdržati različita koncentrirana opterećenja, a potrebno je uzeti u obzir i brzinu udarca. Proizvođači stakla daju smjernice za definirane udare koje staklo može podnijeti i debljinu stakla. (6)

6.1.4. Toplinska naprezanja

Toplinski naprezanja uzrokovana su temperaturnom razlikom unutar staklenog panela. Staklo koje se zagrijava ima tendenciju širenja i potiskivanja hladnijih dijelova. Toplinska naprezanja javljaju se oko rubova stakla, gdje je staklo zaštićeno od sunčevog zračenja okvirom. Također se toplinska naprezanja pojavljuju ako staklo doživi brzu promjenu temperature i dolazi u kontakt s drugim materijalom koji je manje osjetljiv na promjene temperature. Dva staklena panela koja čine izolirani stakleni element nemaju istu temperaturu i pokušavaju se širiti s različitim intenzitetom, stvarajući toplinska naprezanja. Posljednji i glavni uzrok toplinskog naprezanja relevantan za zgrade su elementi za zasjenjivanje koji ne pokrivaju cijelu površinu stakla. (6)

Na primjer, čelik ima koeficijent toplinskog širenja od $12 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$, što je znatno različito od koeficijenta stakla ($9 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$). Toplinska naprezanja mogu uzrokovati lom i ograničavaju ulogu stakla kao glavnog elementa u zgradi. Stoga je važno uzeti u obzir ovaj faktor prilikom projektiranja staklene fasade ili krova. Povećanje kapaciteta stakla za izdržavanje naprezanja bio bi značajan napredak za strukturalnu upotrebu stakla. (6)

6.2. Stakleni konstrukcijski elementi

Staklo je premalo iskorišteno s obzirom na njegova mehanička svojstva, posebice tlačnu čvrstoću. Dizajn staklenog elementa mora biti diktiran time što se lomi bez prethodne najave, a projektanti moraju koristiti princip koji se zove redundancija. Konstrukcija mora moći stajati i ne srušiti se kada jedan stakleni element otkáže, odnosno može privremeno podnijeti situaciju, kako bi ljudi primijetili i izvršili popravke ili poduzeli odgovarajuće sigurnosne mjere. (6)

Važno je razumjeti kako staklo reagira na vanjske čimbenike kako bi se potom izračunale performanse staklenog elementa i konačno, kako bi se optimizirala uporaba stakla kao strukturnog materijala. (6)

6.2.1. Stakleni paneli

Staklo je isprva korišteno u arhitekturi zbog svoje prozirnosti, kao sredstvo za oblaganje, samo za zaštitu unutarnjih prostora od vanjskog okoliša ili za odvajanje unutarnjih prostora, i s time su dimenzije stakala ostale male. No, arhitekti su oduvijek željeli povećati površinu staklene fasade. Najnoviji napredci obrade stakla, montaže i dostupnih veličina proizvodnje omogućili su arhitektonska rješenja s većim površinama ostakljenja. (6)

Primarni cilj staklene ploče nije da bude strukturalni materijal. Međutim, vertikalni elementi (npr. fasada) (slika 18) ili horizontalni/nagnuti elementi (npr. krov ili nadstrešnica) izloženi su različitim opterećenjima koja mogu biti značajna, kao što je ranije navedeno: vjetar, snijeg, udarci, toplinska naprezanja i naprezanja zbog deformacije okvira. Stoga ovi nekonstruktivni dijelovi ovojnice zgrade još uvijek podnose opterećenja koja mogu biti značajna. (6)

Staklo uglavnom mora prenositi teret izvan svoje ravnine. Jedina opterećenja u ravnini su njegova vlastita težina i težina stakla ispod njega (za vertikalne staklene elemente). Tijekom procesa projektiranja, želi se ograničiti opterećenje unutar ravnine, tako da se staklo stavlja na čelične nosače koji dalje prenose opterećenja. (6)



Slika 18 Staklena fasada (1)

6.2.1.1 Teorija velikih deformacija

Staklene ploče nose u dva smjera dok omjer duljina : širina ne prijeđe 1:2. Za mali otklon staklo se ponaša kao ploča te je primjenjiva Kirchoffova linearna teorija. Naprezanja se izračunavaju duž stakla, a također i na njegovim rubovima, koja su kritična u mnogim slučajevima. No, ako predviđeni otklon premašuje vlastitu debljinu stakla, staklena ploča ne može se smatrati pločom prema teoriji linearne deformacije, već kao membrana. Zapravo, staklo nastoji poprimiti oblik viseće membrane, što je učinkovit oblik. Tlačna naprezanja pojavljuju se u staklenoj ploči i čine je krućom: staklo ima tendenciju manjeg otklona. Tada je teorija membrane točnija, učinkovitija i dovodi do tanjih stakala. Staklo je opisano nelinearnom teorijom velikih deformacija. (6)

Razvijeni su različiti modeli za simulaciju staklene ploče koja se odupire vanravnskim opterećenjima prema ovoj nelinearnoj teoriji velikih deformacija. Svi se temelje na Kirchoffovoj teoriji tanke ljuske i koriste analizu konačnih elemenata. (6)

6.2.1.2 Maksimalno naprezanje i deformacija

Izračun nije nužan u većini slučajeva jer proizvođači navode dopuštena naprezanja i deformacije za svaki svoj proizvod. Primjer takve tablice prikazan je u nastavku. Projektanti, nakon što procijene opterećenja koja djeluju na stakleni panel, mogu odabrati proizvod i debljinu iz tih tablica koje su izrađene od strane proizvođača stakla. Budući da su opterećenja izvan ravnine, staklo se odupire savijanju, pa će naprezanja na vlak dovesti do oštećenja panela.

Tablica 1 Preliminarna opterećenja stakla

| Materijal | Kratkotrajna opterećenja [kN/mm ²] | Dugotrajna opterećenja [kN/mm ²] |
|--------------------|---|---|
| Sirovo staklo | 28 | 7 |
| Polukaljeno staklo | 35 | 15 |
| Kaljeno staklo | 59 | 35 |

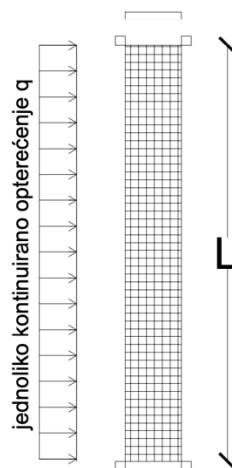
S druge strane, proračun deformacije može se napraviti ručno pomoću linearne teorije ili pomoću tablica. Kada se deformacija mora izračunati pomoću nelinearne teorije, mogu se primijeniti različite aproksimacije, tj. može se koristiti analiza konačnih elemenata. (6)

6.2.2. Staklene grede i nosači

Staklene grede koriste se u građevinarstvu za podupiranje drugih staklenih konstrukcijskih elemenata. Jedan element je ograničen veličinom dostupnog proizvoda. Moguće je sastaviti više elemenata zajedno kako bi se povećala njihova duljina, ali dizajn i ponašanje nosača su tada različiti od inicijalnog. (6)

6.2.2.1 Opterećenje na staklenu gredu ili nosač

Staklene grede i nosači proučavaju se u istom kontekstu jer su izloženi istim vrstama naprezanja. Imaju jednu glavnu os u usporedbi s drugim osima. Grede i nosači uglavnom su podvrgnuti savijanju. Ti su elementi izloženi naprezanjima u svojoj ravnini po glavnoj osi (slika 19), ali i na poprečno savijanje (izvijanje). (6)



Slika 19 Djelovanje na gredu ili nosač

Savijanje uzrokuje naprezanje na rubu. Budući da su rubovi, kako je ranije spomenuto, često izloženi nesavršenostima i ogrebotinama tijekom rezanja i obrade, vjerojatnije je da će se tamo pukotine širiti, stoga tada staklene grede i nosači moraju biti manje opterećeni. (6)

6.2.2.2 Dimenzioniranje

Nosači i grede proračunavaju se po linearnoj teoriji. Vlačna naprezanja u materijalu su najveći limit stakla. Tablice su dostupne prema propisima i proizvođačima kako bi se izrazilo maksimalno opterećenje (kako kratkotrajno, tako i dugotrajno) za projektiranje grede. Projektant bi stoga trebao smanjiti uporabu stakla koje je podložno vlačnoj sili te odabrati kaljeno staklo koje sprječava širenje pukotina. Drugo rješenje je povećati najmanju dimenziju grede kako bi se smanjila veličina vlačnog naprezanja, ali se time povećava rizik od gubljenja stabilnosti u toj manjoj dimenziji. (6)

Budući da se staklo lomi bez upozorenja, projektiranje treba izvesti na način da se konstrukcija koju podupire staklena greda ili nosač ne sruši otkazivanjem jednog elementa. Jedno od rješenja koje su projektanti pronašli za ovaj problem je dopustiti velike progibe konstrukcije prilikom otkazivanja jednog elementa, veće od onih prihvatljivih s estetskog aspekta, ali da ne dovode do urušavanja cijele konstrukcije. (6)



Slika 20 Staklene grede (20)

6.2.3. Stakleni stupovi

Stupovi su izloženi opterećenju duž svoje osi, uglavnom u tlaku. Također, izloženi su i izvijanju (*buckling*), što ograničava projektiranje takvog elementa. Stakleni stupovi su kruti elementi pa je manje vjerojatno da će smicanje (*shear*) utjecati na dimenzioniranje. Međutim, ako je stup dovoljno kratak da izvijanje nije ograničavajući faktor, tada smicanje postaje ograničavajući faktor. (6)

6.2.3.1 Dimenzioniranje

Nosivost stupa uvelike ovisi o ležajevima ili stezaljkama na oba ruba elementa. Dimenzioniranje se provodi na isti način kao i za druge materijale, uz izračun kritičnog opterećenja prema Eulerovoj metodi. Time se znatno smanjuje tlačna čvrstoća stupa. Progibi nisu ključni za stupove, budući da su stupovi kruti i obično su manje opterećeni nego što bi mogli biti. (6)

Glavni problem stupova je što su izloženi ogrebotinama i udarcima pa to uvelike smanjuje njihovu nosivost. Razna rješenja se koriste kako bi se spriječilo otkazivanje nosivosti stupova i urušavanje konstrukcije. Jedno od rješenja je povećati broj stupova u usporedbi s onim potrebnim nakon dimenzioniranja. No, kako je već kod greda i nosača spomenuto, otkazivanje jednog od njih može dovesti do većeg progiba, ali ne i do kolapsa cijele konstrukcije. (6)

7. Norme za proračun staklenih konstrukcija

Staklo je još uvijek neistražen materijal, a njegova nosivost ovisi o puno drugih čimbenika. Stoga, mnoge norme propisane za proračun staklenih konstrukcija nisu dovoljno dobre da bi se optimalno dimenzionirao stakleni element. (21) Osim toga, norme nisu usklađene i razlike koje se nalaze u proračunima prema različitim normama su velike. Kako mnoge zemlje nemaju svoje norme za staklo, često se primjenjuju dopuštena naprezanja iz različitih izvora koja se međusobno previše razlikuju. (3,21)

Europsko povjerenstvo za standardizaciju je osnovalo povjerenstvo za konstrukcijsko staklo 2016. godine, čiji je cilj razviti zajednički standard za projektiranje stakla – Eurocode 10. (5)

7.1. Američka norma ASTM E1300

To je norma koja se danas najviše koristi pri proračunu staklenih ploča koje su opterećene jednoliko kontinuirano i slobodno oslonjene na jednoj, dvije, tri ili sve četiri strane. U normi su obuhvaćeni svi tipovi stakla (obično, kaljeno, toplinski ojačano i laminirano), kao i izolacijska stakla koja u ovom radu nisu spominjana. U izrazima za nosivost su uključeni faktori za površinska oštećenja stakla koje je već godinama u uporabi (abrazija od vanjskih utjecaja). Ova norma se zasniva na teoriji sloma koja uključuje trajanje opterećenja, oštećenja na površini stakla te geometrijsku nelinearnost i veličinu plohe na kojoj je opterećenje. Ta teorija je osnovana za kvaratne jednoliko opterećene staklene ploče i naziva se GFPM – *Glass Failure Prediction Model*. Uglavnom u to ulaze stakleni paneli pročelja opterećeni vjetrom. Za ostale slučajeve opterećenja u toj normi su definirana dopuštena naprezanja koja variraju ovisno o trajanju opterećenja i je li rub opterećen ili unutrašnji dio ploče. (21)

Ova norma je prihvaćena i na europskom tržištu. GFPM teorija daje vezu između vjerojatnosti loma ploče i karakteristikama površinskih oštećenja. (3,21)

7.1.1. GPFM – teorija otpornosti stakla

„GPFM se osniva na teoriji prema kojoj vlačna naprezanja u staklu uzrokuju velike koncentracije naprezanja u mikropukotinama koje se nalaze na površini stakla.“ (21) Pukotine koje su na plohi nastaju u procesu proizvodnje i tijekom uporabe tog stakla radi vanjskih utjecaja. Lom stakla nastaje kada naprezanje u jednoj od pukotina naraste toliko da pukotina počinje rasti, a pukotina koja potiče lom naziva se kritična pukotina. Koncentracije naprezanja u pukotini ovise o geometrijskom obliku i orijentaciji pukotine u odnosu na smjer glavnih vlačnih naprezanja. Radi toga se može zaključiti da mjesto pukotine koja je inicirala lom, ne mora biti na mjestu maksimalnih glavnih vlačnih naprezanja. (21) Naprezanja u pukotini se povećavaju dokle god je pukotina izložena vlačnim silama. Čvrstoća stakla, dakle, ovisi o trajanju opterećenja – što je dulje element opterećen, to su vlačna naprezanja manja. (3,21)

7.2. Europska prednorma prEN 13474

Europska prednorma osniva se na već poznatom proračunu prema parcijalnim koeficijentima sigurnosti;

$$\gamma_F F_k < k_{mod} R_k / \gamma_M \text{ ili } F_{Sd} < R_{Sd}$$

F_k i R_k su karakteristične vrijednosti djelovanja i otpornosti, a γ_F i γ_M su parcijalni faktori za djelovanje i otpornost, dok je k_{mod} koeficijent koji vodi računa o trajanju opterećenja: $k_{mod}=0,663 t^{1/16}$, gdje t označava trajanje opterećenja. F_{Sd} i R_{Sd} su proračunske vrijednosti djelovanja i otpornosti. (21)

Proračunska vrijednost čelika se dobiva na sljedeći način:

- za obično staklo:

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} \quad (7.1)$$

- za toplinski obrađeno staklo:

$$f_{g,d} = \left(\frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,v}} \right) \quad (7.2)$$

$f_{g,k}$ i $f_{b,k}$ su karakteristične vrijednosti vlačne čvrstoće stakla. Za vjetar k_{mod} iznosi 0,74, a za vlastitu težinu 0,29. k_{sp} je koeficijent koji ovisi o obradi stakla, za obično staklo on iznosi 1,0. k_v je koeficijent koji ovisi o načinu kaljenja.

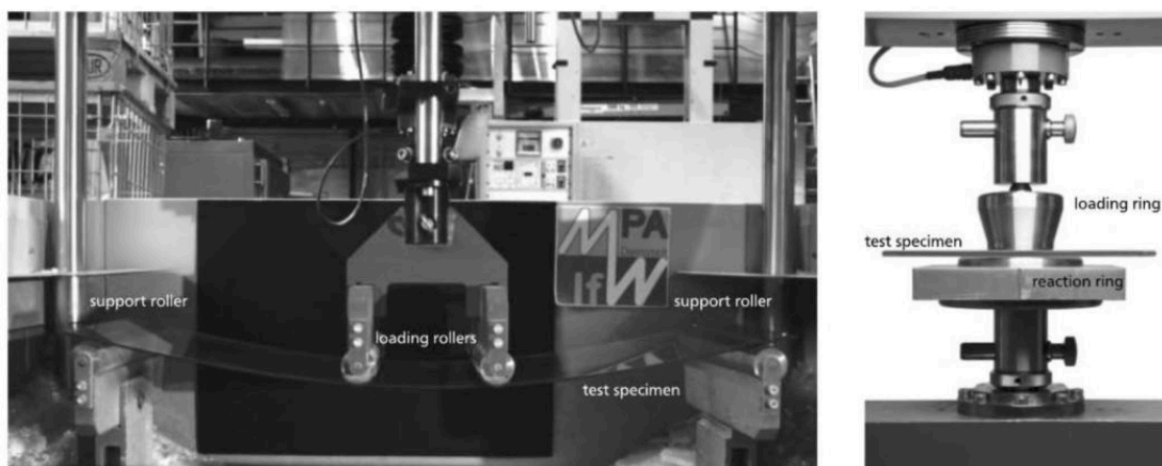
$\gamma_{M,A}$ i $\gamma_{M,v}$ su parcijalni faktori za materijal, prvi se odnosi na obično sirovo staklo i iznosi 1,8, dok je drugi za toplinski ili kemijski obrađeno staklo i iznos mu je 1,2. (21)

8. Ispitivanje staklenih konstrukcija

Procjena vrijednosti čvrstoće obično se temelji na podacima dobivenih ispitivanjem. Površinski ili rubni uvjeti imaju značajan utjecaj na čvrstoću stakla. Stoga se obično pravi razlika u uvjetima stakla, mogu se ispitivati stakla direktno iz proizvodnje ili već rabljena stakla koja su bila podvrgnuta uvjetima okoliša i štetnim utjecajima. (22)

8.1. Metode ispitivanja

Osnovna metoda ispitivanja za staklo je standardizirano savijanje u četiri točke (4PB test) prema DIN EN 1288 – 3 i koaksijalni dvostruki prsten (CDR test) prema DIN EN 1288 – 1 (slika 21). Kod ispitivanja na savijanje, uzorak je izložen jednoosnom polju naprezanja. Stoga je pravokutni ispitni uzorak poduprt s dva potporna valjka i opterećen s dva valjka kao opterećenje. Između oba valjka na uzorak se primjenjuje konstantno i jednoosno polje naprezanja. Lom se može dogoditi s ruba i na površini uzorka. Druga vrsta ispitivanja, CDR test, sastoji se od velikog potpornog, odnosno reakcijskog prstena. U tim testovima dobiva se dvoosno i konstantno polje naprezanja unutar prstena za opterećenje. Zbog osnosimetričnog testa u obzir se uzima samo površina unutar prstenova, bez utjecaja s ruba. (22)

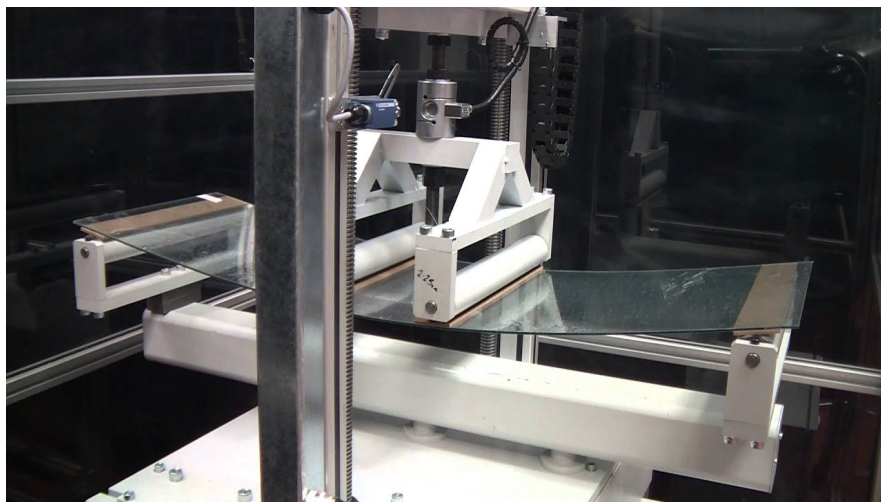


Slika 21 Test savijanja u četiri točke (lijevo); koaksijalni dvostruki prsten (desno) (22)

Kod testa savijanja u 4 točke (4PB) zbog same konfiguracije testa, maksimalno naprezanje se postiže na rubovima ploče (gdje je defektnost veća zbog oštećenja uzrokovanih postupkom završne obrade rubova) i posljedično, odgovarajući eksperimentalni podaci mogu dovesti do krivih rezultata. Zadovoljavajući način prevladavanja ovog nedostatka je korištenje druge vrste ispitivanja (CDR), čiji je cilj proizvesti stanje naprezanja u kružnom području (u središnjem dijelu uzorka) gdje su naprezanja u svim smjerovima jednaka, a dovoljno udaljenom od rubova uzorka. (23)

8.1.1. Ispitivanje savijanjem u četiri točke

Ispitivanje savijanjem u četiri točke je jednoosno ispitivanje koje opterećuje i površinu i rubove ploče. Greške se, općenito govoreći, javljaju na rubovima zbog većih nedostataka koji se dogode tijekom zarezivanja i završne obrade. Stoga je to dobar test za kvantificiranje čvrstoće rubova (slika 22). (24)

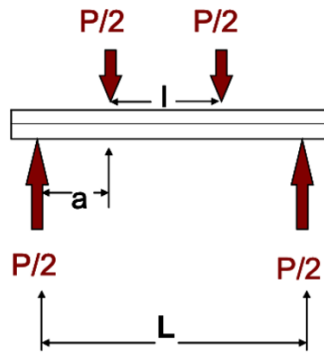


Slika 22 Savijanje u četiri točke (4PB test) (25)

Naprezanje pri lomu, σ_{4PB} , se dobiva iz sile kojom je opterećen uzorak P, dimenzije uzorka te iz momenta kojeg sila radi na uzorku, odnosno njegovoj udaljenosti od ruba uzorka (slika 23).

$$\sigma_{4PB} = \frac{P \cdot a}{b \cdot t^2} \quad (7.1)$$

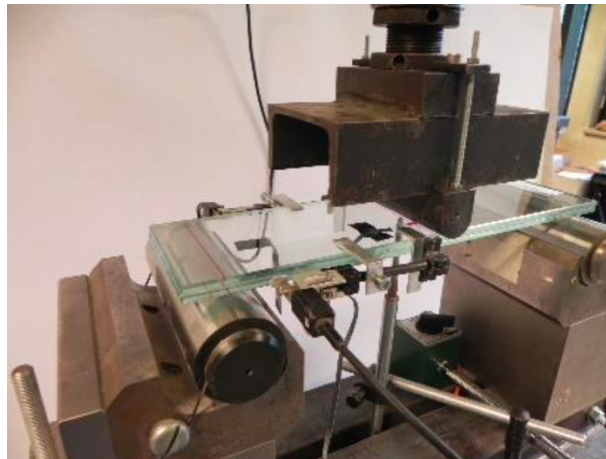
gdje b i t predstavljaju dimenzije uzorka (panela). (23,24)



Slika 23 Ilustracija testa savijanja u 4 točke (24)

8.1.2. Ispitivanje savijanjem u tri točke

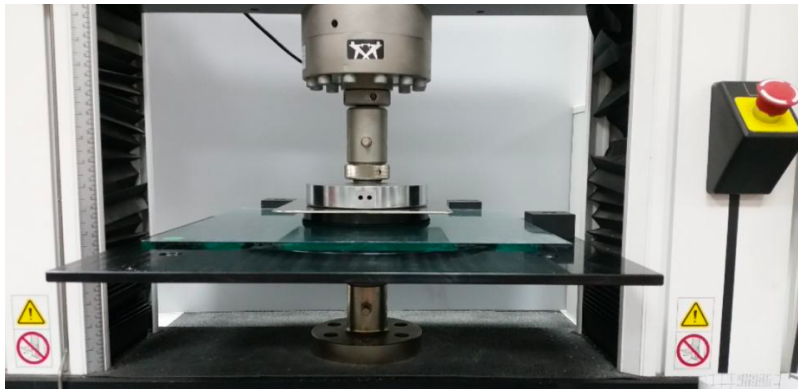
Kako bismo procijenili utjecaj temperature na krutost i čvrstoću savijanja nekih uzoraka laminiranog stakla, provodi se ispitivanje savijanja u tri točke s dimenzijama i opremom prikazanom na slici 24. Progib na sredini uzoraka se bilježi pomoću LVDT osjetila. Okomito opterećenjem F opterećuje se sredina raspona određenom brzinom opterećenja do potpunog sloma uzorka. (26) U principu je test isti kao ispitivanje savijanjem u četiri točke.



Slika 24 Test savijanjem u tri točke (26)

8.1.3. CDR test

Čvrstoću loma *float* stakla općenito je teško predvidjeti budući da njome upravlja niz različitih čimbenika. Kako bi se zaobišao utjecaj ranije spomenutih varijabli, isključivši svaki mogući izvor nesigurnosti, pouzdani postupak ispitivanja trebao bi moći proizvesti ravnomjerno stanje naprezanja u središnjem dijelu uzorka. Testna konfiguracija koaksijalnog dvostrukog prstena (CDR) može postići tako idealne uvjete, ali samo ako su geometrijske nelinearnosti manje važne. (23)



Slika 25 CDR test (koaksijalni dvostruki prsten) (23)

Popularnost ovog testa, na uzorcima koji imaju male progibe, proizlazi iz činjenica da:

- napreže površinu ploče u dva smjera istovremeno i na taj način senzibilizira sve nedostatke bez obzira na njihove orijentacije,
- primjenjuje konstantno dvoosno naprezanje u području koje je zatvoreno prstenom za opterećenje,
- minimizira iniciranje loma na rubovima. (24)

Najveće naprezanje u tankim pločama javlja se pri puno većim opterećenjima i neposredno ispod prstena za opterećenje. Opet, naprezanje u središtu staklene ploče je zanemarivo u usporedbi s onim ispod prstena za opterećenje gdje naprezanje savijanja ima najveću vrijednost. (24)

9. Analiza ispitanog dijela konstrukcije – staklena nadstrešnica

Staklena greda koja je predmet ovog ispitivanja glavni je nosivi element ulazne staklene nadstrešnice. Struktura nadstrešnice je u potpunosti napravljena od stakla. Prikazano je eksperimentalno ispitivanje grede izrađene od laminiranog stakla i određivanje modula elastičnosti i vlačne čvrstoće na savijanje. Laminirano staklo odnosi se na dvije ili više staklenih ploča spojenih elastomernim međuslojem kao što je polivinil butiral (PVB folija) za poboljšanje karakteristika stakla, kao što je prije spomenuto. Ispitivana laminirana staklena greda sastoji se od troslojnog kaljenog stakla debljine 15 mm između kojih je četveroslojna PVB folija (1,52 mm), a staklene pokrovne ploče su izrađene od dvoslojnog kaljenog stakla debljine 10 mm, između kojih je također četveroslojna PVB folija. Statički sustav staklene grede je jednostavna greda s prepustom (2,0 m + 3,0 m). Grede su postavljene na razmaku od 0,8 m i pokrivene pokrovnim pločama. (27)



Slika 26 Staklena nadstrešnica (28)

9.1. Prikaz staklene nadstrešnice

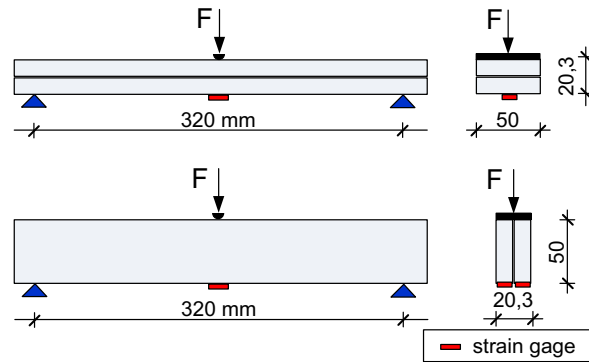
Posebnost ove konstrukcije je što je nadstrešnica u potpunosti napravljena od stakla.



Slika 27 Prikaz staklene nadstrešnice

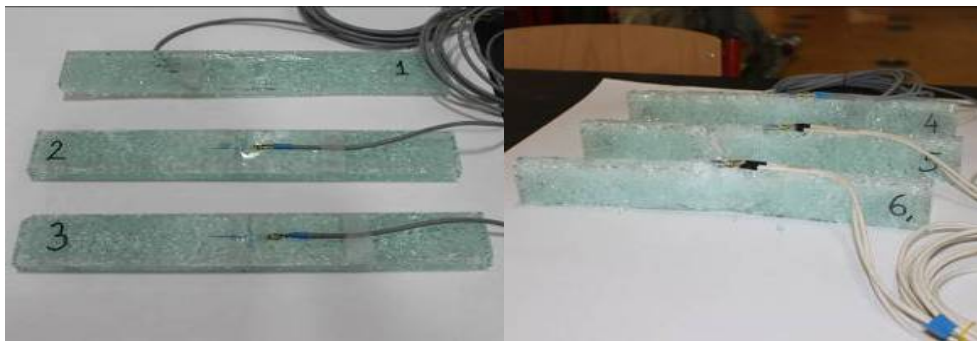
9.2. Ispitivanje laminiranih staklenih elemenata nadstrešnice

Kako bi se odredili mehanički parametri materijala od kojeg su grede izrađene, proveden je test savijanja na malim uzorcima laminiranog stakla. (27)



Slika 28 Ispitivanje laminiranog stakla (27)

Ispitivano je 6 uzoraka pomoću testa savijanja u tri točke, gdje su 3 uzorka ispitivana okomito na slojeve lamela, a ostala 3 paralelno s lamelama (slika 28 i 29).



Slika 29 Uzorci laminiranog stakla (27)

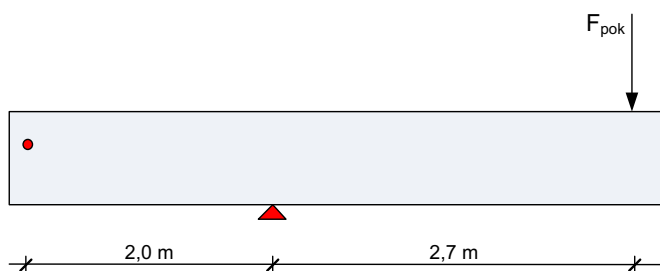
Dobiveni su rezultati za module elastičnosti i vlačno naprezanje za oba slučaja, prikazano u tablici 2.

Tablica 2 Rezultati ispitivanja za šest uzoraka laminiranog stakla

| Smjer savijanja | Uzorak | Modul elastičnosti [GPa] | Vlačna čvrstoća na savijanje [MPa] |
|----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------------|
| Okomito na lamele | 1 | 39,1 | 96,5 |
| | 2 | 37,7 | 90,6 |
| | 3 | 38,6 | 99,0 |
| | $\bar{x} \pm s$ | 38,5±0,7 | 95,3±4,3 |
| Paralelno s lamelama | 4 | 66,8 | 200,2 |
| | 5 | 67,1 | 174,4 |
| | 6 | 67,0 | 190,7 |
| | $\bar{x} \pm s$ | 67,0±0,1 | 188,4±13,1 |

9.2.1. Stakleni nosač nadstrešnice

Nanošeno je pokusno opterećenje koncentriranom silom na konzolnom dijelu nosača.



Slika 30 Shema opterećenja staklenog nosača nadstrešnice (29)

Opterećenje je nanošeno u koracima po 5 kN do maksimalne sile od 20 kN. Kao što je ranije spomenuto, ispitivanje je provedeno na univerzalnom ispitnom stroju Zwick Z600, on ima osjetilo sile klase 1 i osjetilo pomaka klase 1. (29)



Slika 31 Ispitivanje staklene grede (27)

9.2.1.1 Analiza opterećenja

Stalno opterećenje:

$$\text{Stakleni pokrov 2 cm (25 kN/m}^3\text{)} \quad -0,02 \text{ m} \cdot 1,25 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 0,625 \text{ kN/m}$$

$$\text{Vlastita težina (25 kN/m}^3\text{)} \quad -0,045 \text{ m} \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 1,125 \text{ kN/m}$$

Korisno opterećenje:

$$\text{Snijeg 1,5 kN/m}^2 \quad -1,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,25 \text{ m} = 1,875 \text{ kN/m}$$

$$\text{UKUPNO:} \quad \mathbf{3,625 \text{ kN/m}}$$

Za nefaktorizirano stalno i korisno opterećenje, moment savijanja nad osloncem iznosi:

$$M_{rač,nef} = 3,625 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{(3,0 \text{ m})^2}{2} = 16,31 \text{ kNm} \quad (9.1)$$

Moment savijanja nad osloncem od pokusnog opterećenja maksimalnom koncentriranom silom od 20 kN iznosi:

$$M_{pok} = 20 \text{ kN} \cdot 2,7 \text{ m} = 54 \text{ kNm} \quad (9.2)$$

Odnos momenta savijanja dobivenog pri pokusnom opterećenju i momenta savijanja od nefaktoriziranog stalnog i korisnog opterećenja iznosi:

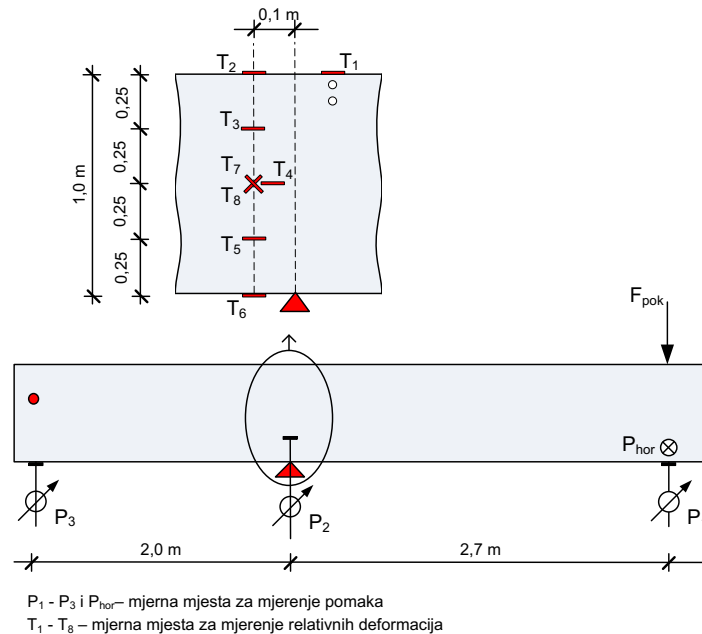
$$k = \frac{M_{pok}}{M_{rač,nef}} = \frac{54,0 \text{ kNm}}{16,31 \text{ kNm}} = 3,31 \quad (9.3)$$

Ukupan iznos nefaktoriziranog opterećenja je 3,625 kN/m, a moment savijanja nad osloncem za tu vrijednost iznosi 16,31 kNm. Testno opterećenje je nanošeno na udaljenosti 2,7 m od oslonca. (27)

Dobiveni momenti savijanja uspoređeni su s proračunskim vrijednostima uzrokovanim nefaktoriziranim opterećenjem kako bi se odredio koeficijent sigurnosti.

9.2.1.2 Rezultati ispitivanja

Kao što je već ranije spomenuto, pokusno inkrementalno opterećenje je nanošeno u četiri inkrementa s prirastom opterećenja od 5,0 kN. Mjerenje svakog povećanja opterećenja je ponovljeno dva puta. Mjereni su pomaci i relativne deformacije na mjernim mjestima kao što je prikazano na slici:



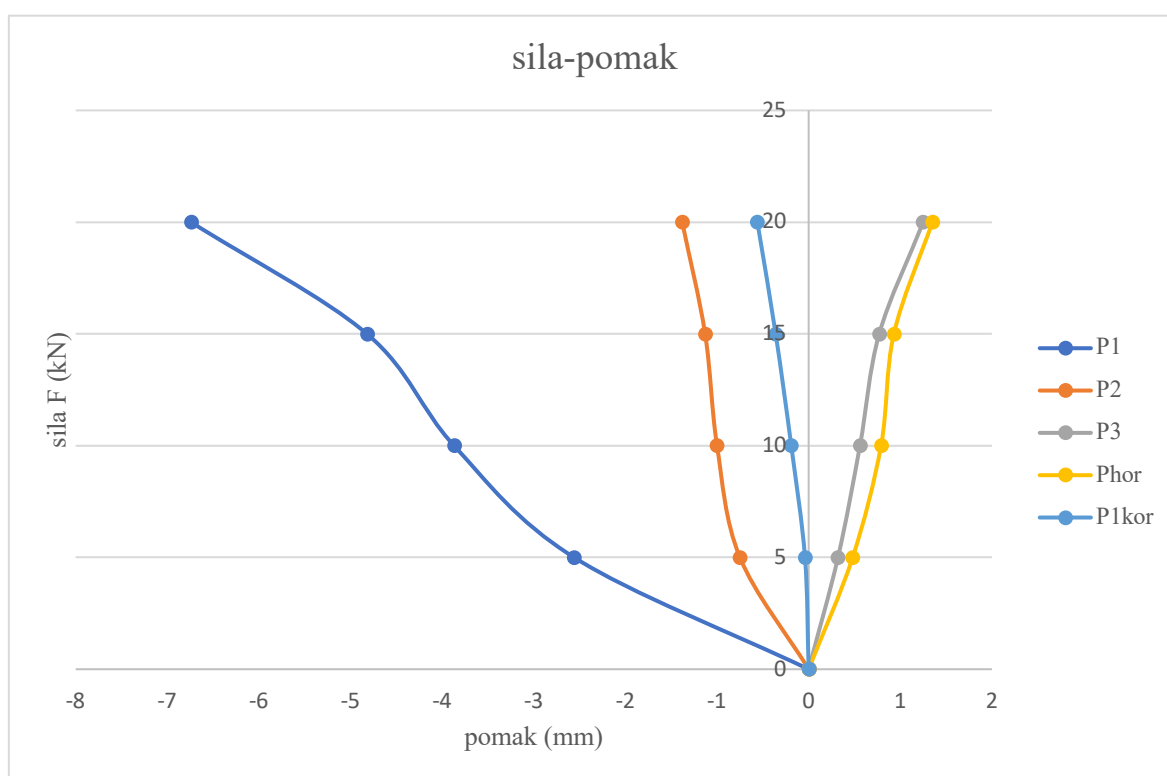
Slika 32 Mjerna mjesta na staklenom laminiranom nosaču (29)

Vertikalni pomaci su mjereni LVDT osjetilima na 3 mjerna mjesta, a na jednom mjestu je mjereno horizontalni pomak. Relativne deformacije su mjerene elektrootpornim tenzometrima (EOT) na 8 mjernih mjesta. (29)

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati ispitivanja, odnosno pomaci pri inkrementalnim opterećenjima, 5, 10, 15 i 20 kN. Mjereni pomaci na mjernom mjestu P₁ korigirani su za ostvareni kut zaokreta na srednjem osloncu.

Tablica 3 Rezultati izmjerenih pomaka [mm]

| Mjerno mjesto | $F_{pok} = 5 \text{ kN}$ ($k = 0,83$) | $F_{pok} = 10 \text{ kN}$ ($k = 1,66$) | $F_{pok} = 15 \text{ kN}$ ($k = 2,48$) | $F_{pok} = 20 \text{ kN}$ ($k = 3,31$) |
|---------------|--|---|---|---|
| P_1 | -2,56 | -3,87 | -4,82 | -6,74 |
| P_2 | -0,75 | -1,00 | -1,13 | -1,38 |
| P_3 | 0,32 | 0,56 | 0,77 | 1,25 |
| P_{hor} | 0,48 | 0,79 | 0,93 | 1,35 |
| P_{Ikor} | -0,04 | -0,19 | -0,36 | -0,56 |



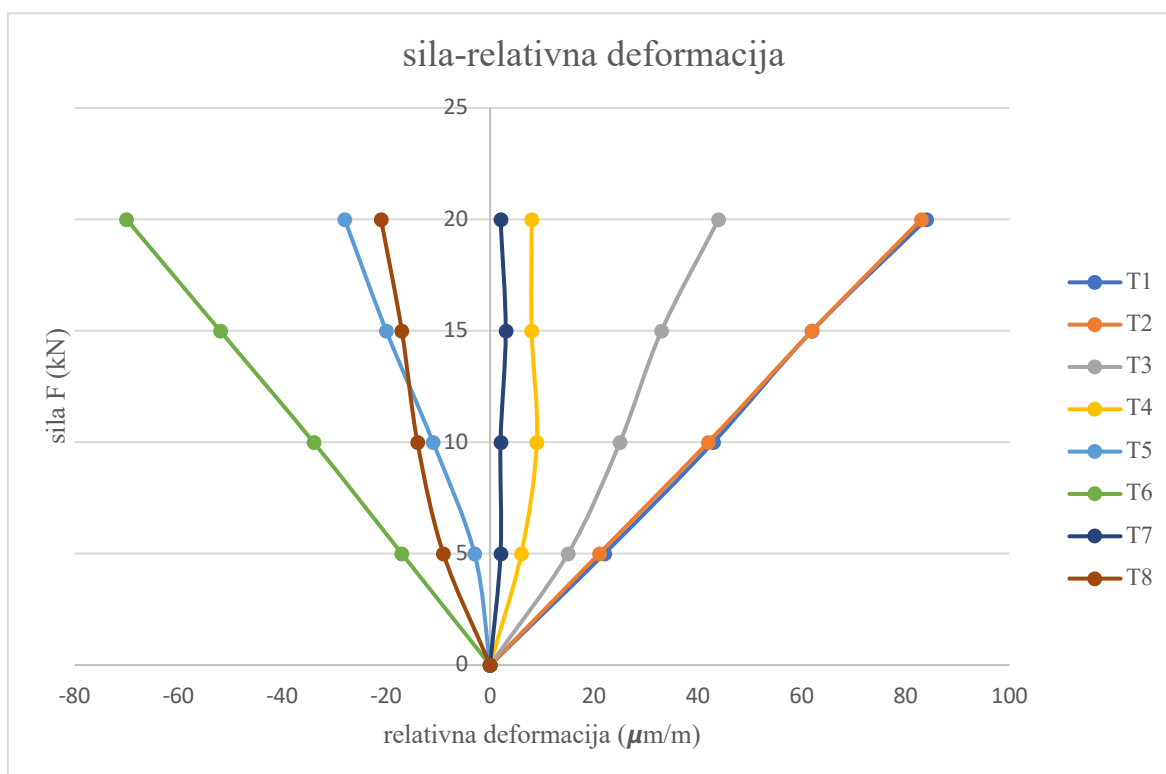
Slika 33 Dijagram sila-pomak

Slika 33 prikazuje dijagram sila – pomak staklenog nosača čiji su rezultati mjereni pomoću LVDT osjetila. Prva linija, P1 je izmjeren pomak ispod pokusnog opterećenja i radi toga ima najveći iznos jer je LVDT senzor osjetljiv na pomake koji se mjere, što upućuje na najveću promjenu pozicije elementa pri tom pokusnom opterećenju.

U tablici 4 prikazani su rezultati izmjerenih relativnih deformacija pri opterećenjima od 5, 10, 15 i 20 kN.

Tablica 4 Rezultati izmjerenih relativnih deformacija [$\mu\text{m/m}$]

| Mjerno mjesto | $F_{\text{pok}} = 5 \text{ kN}$ ($k = 0,83$) | $F_{\text{pok}} = 10 \text{ kN}$ ($k = 1,66$) | $F_{\text{pok}} = 15 \text{ kN}$ ($k = 2,48$) | $F_{\text{pok}} = 20 \text{ kN}$ ($k = 3,31$) |
|----------------------|---|--|--|--|
| T₁ | 22 | 43 | 62 | 84 |
| T₂ | 21 | 42 | 62 | 83 |
| T₃ | 15 | 25 | 33 | 44 |
| T₄ | 6 | 9 | 8 | 8 |
| T₅ | -3 | -11 | -20 | -28 |
| T₆ | -17 | -34 | -52 | -70 |
| T₇ | 2 | 2 | 3 | 2 |
| T₈ | -9 | -14 | -17 | -21 |



Slika 34 Dijagram sila-relativna deformacija

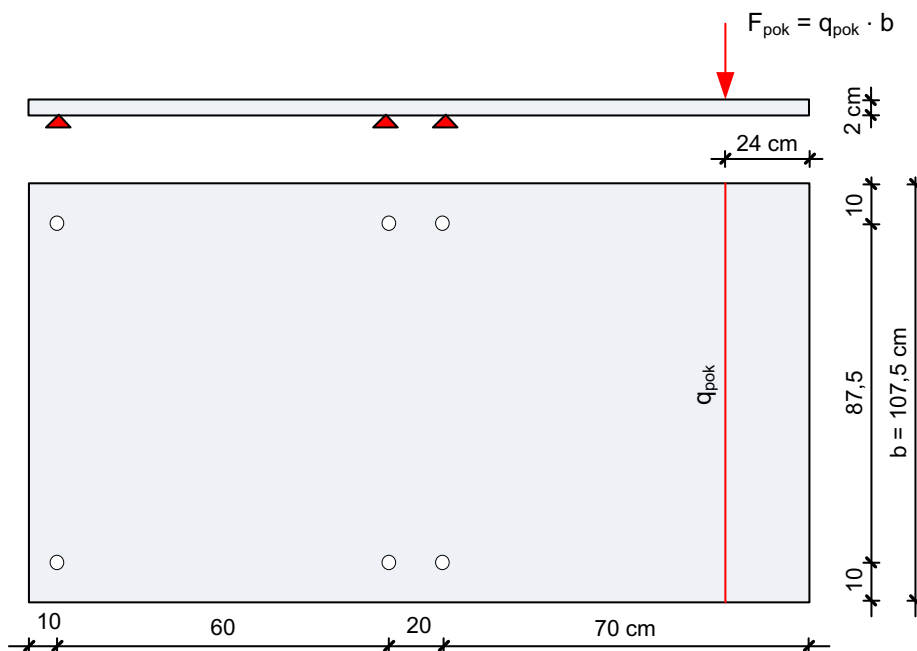
Slika 34 je prikaz dijagrama sila – relativna deformacija čiji su rezultati dobiveni pomoću elektrooptičkih tenzometara.

Na ovom dijagramu je prikazano ponašanje staklenog nosača u 8 točaka. Vidljivo je da točka T1 ima najveće iznose relativne deformacije, kao i točka T6, a obje su mjerene na vrhu, odnosno dnu poprečnog presjeka. Točke T1, T2, T3, T4 i T7 su u vlačnoj zoni, a ostale točke T5, T6 i T8 su u tlačnoj zoni. Ponašanje je potpuno elastično kao što se vidi iz dijagrama te se ne vide nikakva oštećenja.

Staklena greda ispitana je na ispitno opterećenje ($F = 20 \text{ kN}$) koje je ekvivalentno proračunskom opterećenju bez faktora s koeficijentom sigurnosti $k = 3,31$. (27)

9.2.2. Stakleni pokrovni nosač nadstrešnice

Nanošeno je pokusno opterećenje koncentriranom silom na konzolnom dijelu pokrovnog nosača u koracima od po 0,5 kN (0,465 kN/m) do maksimalne sile od 4,0 kN (3,72 kN/m). Ispitivanje je provedeno na univerzalnom ispitnom stroju Zwick Z600, koji ima osjetilo klase 1 i osjetilo pomaka klase 1. (29)



Slika 35 Shema opterećenja staklenog pokrovnog nosača (29)

9.2.2.1 Analiza opterećenja

Stalno opterećenje:

$$\text{Vlastita težina (25 kN/m}^3\text{)} \quad -0,02 \text{ m} \cdot 1,075 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 0,538 \text{ kN/m}$$

Korisno opterećenje:

$$\text{Snijeg 1,5 kN/m}^2 \quad -1,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,075 \text{ m} = 1,613 \text{ kN/m}$$

$$\text{UKUPNO:} \quad \mathbf{2,151 \text{ kN/m}}$$

Za nefaktorizirano stalno i korisno opterećenje, moment savijanja nad osloncem iznosi:

$$M_{rač,nef} = 2,151 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{(0,7 \text{ m})^2}{2} = 0,53 \text{ kNm} \quad (9.4)$$

Moment savijanja nad osloncem od pokusnog opterećenja maksimalnom koncentriranom silom od 4 kN iznosi:

$$M_{pok} = 4 \text{ kN} \cdot (0,7 - 0,24) \text{ m} = 1,84 \text{ kNm} \quad (9.2)$$

Odnos momenta savijanja dobivenog pri pokusnom opterećenju i momenta savijanja od nefaktoriziranog stalnog i korisnog opterećenja iznosi:

$$k = \frac{M_{pok}}{M_{rač,nef}} = \frac{1,84 \text{ kNm}}{0,53 \text{ kNm}} = 3,47 \quad (9.3)$$

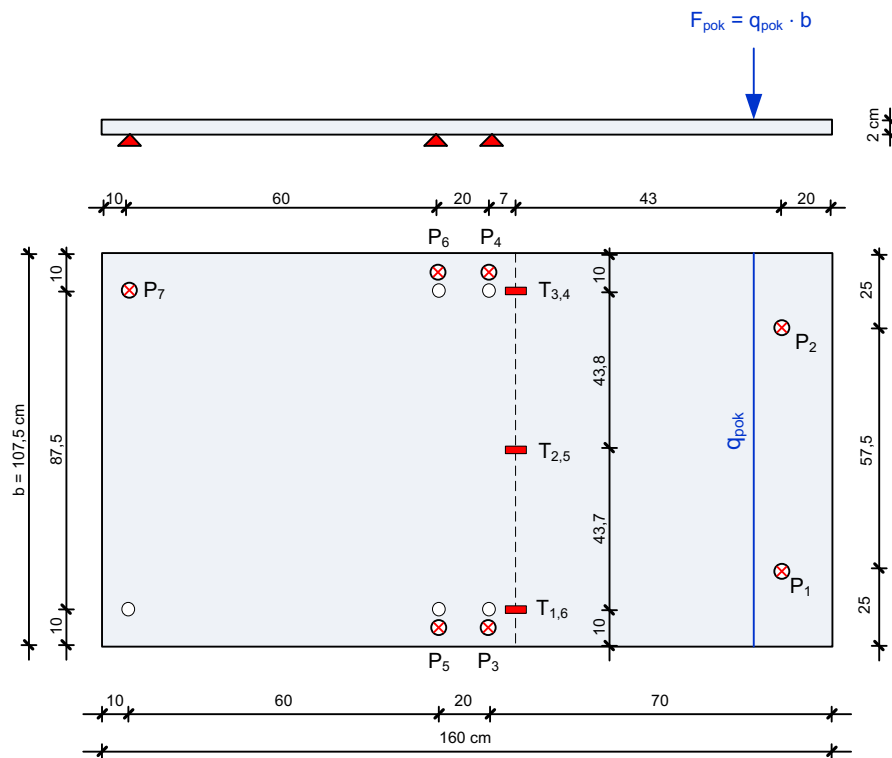
Ukupan iznos nefaktoriziranog opterećenja je 2,151 kN/m, a moment savijanja nad osloncem za tu vrijednost iznosi 0,53 kNm. Testno opterećenje je nanošeno na udaljenosti (0,7-0,24) m, odnosno 0,46 m od oslonca.

Dobiveni momenti savijanja uspoređeni su s proračunskim vrijednostima uzrokovanim nefaktoriziranim opterećenjem kako bi se odredio koeficijent sigurnosti, k.

9.2.2.2 Rezultati ispitivanja

Kao što je već ranije spomenuto, pokusno opterećenje je nanošeno u koracima od po 0,5 kN (0,465 kN/m) do maksimalne sile od 4,0 kN (3,72 kN/m).

Tijekom ispitivanja mjereni su pomaci i relativne deformacije prema sljedećoj slici:

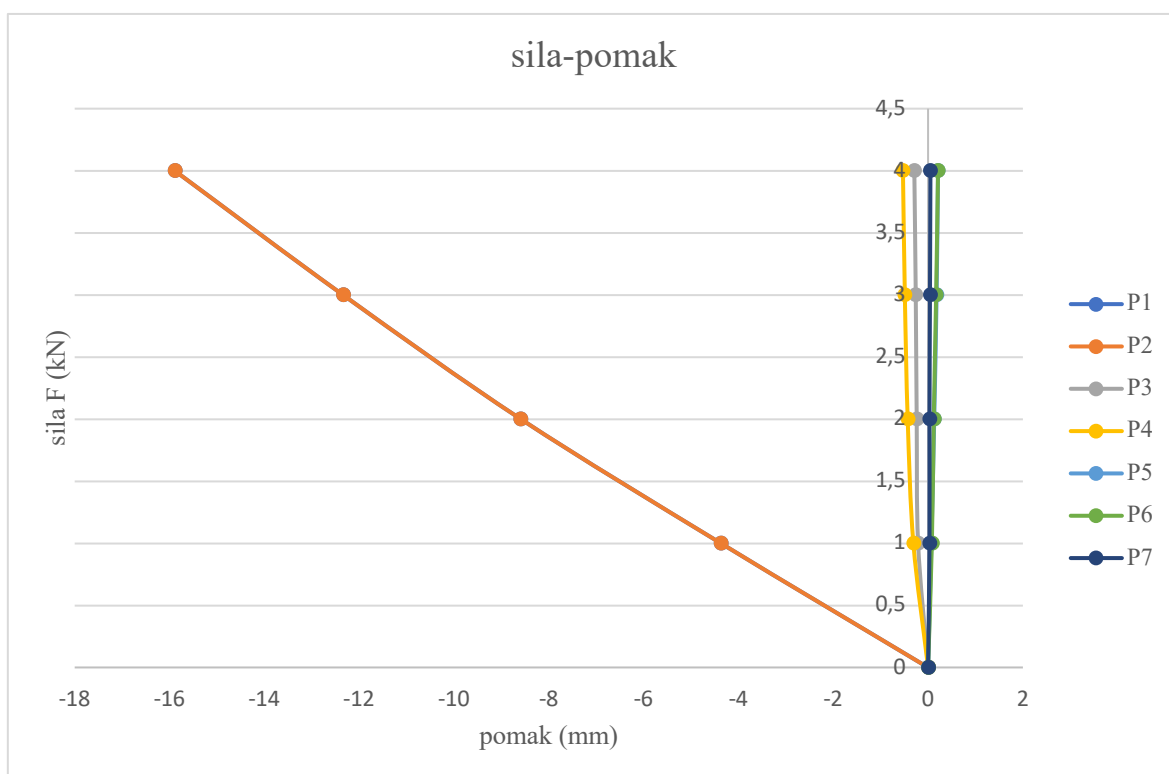


Slika 36 Mjerna mjesta na staklenom pokrivnom nosaču (29)

Vertikalni pomaci su mjereni LVDT osjetilima na 7 mjernih mjesta. Relativne deformacije su mjerene elektrootpornim tenzometrima na 6 mjesta. Rezultati su prikazani u tablicama 5 i 6.

Tablica 5 Rezultati izmjerenih pomaka [mm]

| Mjerno mjesto | $F_{pok} = 1 \text{ kN}$ ($q_{pok} = 0,93 \text{ kN/m}$) ($k = 0,87$) | $F_{pok} = 2 \text{ kN}$ ($q_{pok} = 1,86 \text{ kN/m}$) ($k = 1,73$) | $F_{pok} = 3 \text{ kN}$ ($q_{pok} = 2,79 \text{ kN/m}$) ($k = 2,60$) | $F_{pok} = 4 \text{ kN}$ ($q_{pok} = 3,72 \text{ kN/m}$) ($k = 3,47$) |
|----------------------|---|---|---|---|
| P₁ | -4,37 | -8,59 | -12,34 | -15,89 |
| P₂ | -4,37 | -8,59 | -12,34 | -15,89 |
| P₃ | -0,21 | -0,24 | -0,26 | -0,29 |
| P₄ | -0,31 | -0,43 | -0,49 | -0,53 |
| P₅ | 0,07 | 0,13 | 0,18 | 0,21 |
| P₆ | 0,08 | 0,12 | 0,17 | 0,21 |
| P₇ | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 |

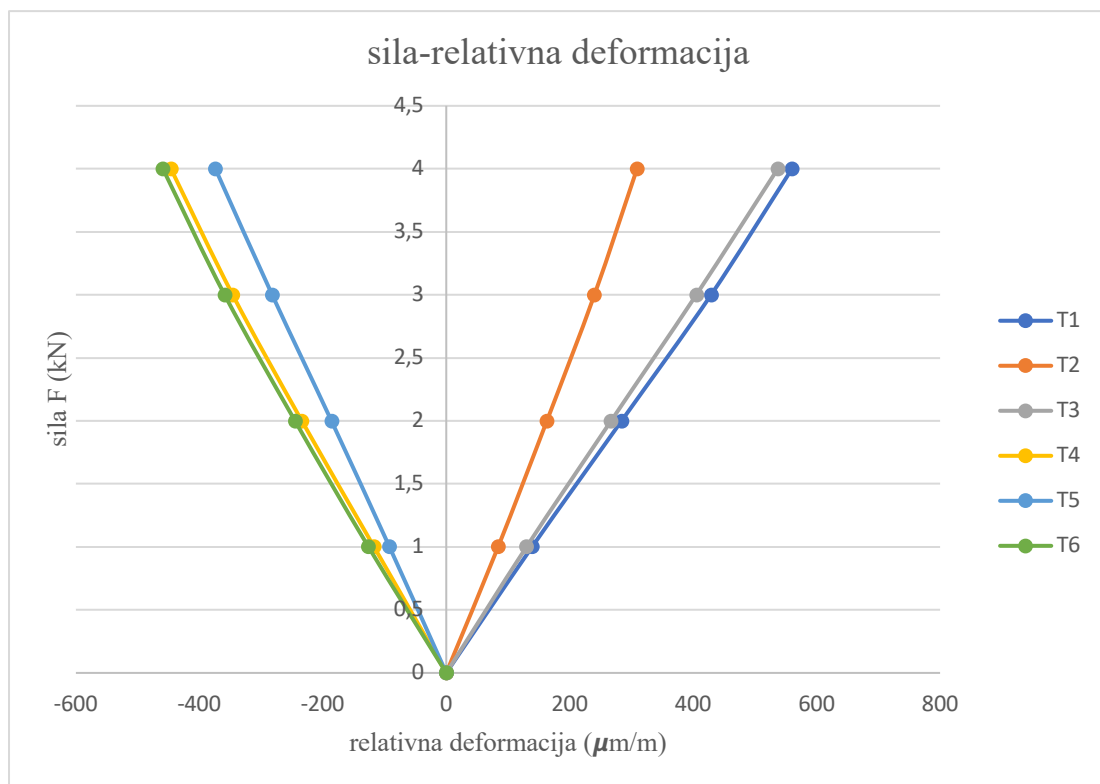


Slika 37 Dijagram sila-pomak

Kao što je iz dijagrama sila – pomak za stakleni pokrov vidljivo, točke koje se nalaze simetrično s obzirom na horizontalnu os panela, ponašaju se skoro pa isto, postoje samo manja odstupanja.

Tablica 6 Rezultati izmjerenih relativnih deformacija [$\mu\text{m}/\text{m}$]

| Mjerno mjesto | $F_{\text{pok}} = 1 \text{ kN}$ ($q_{\text{pok}} = 3,72 \text{ kN/m}$) ($k = 0,87$) | $F_{\text{pok}} = 11 \text{ kN}$ ($q_{\text{pok}} = 3,72 \text{ kN/m}$) ($k = 1,73$) | $F_{\text{pok}} = 3 \text{ kN}$ ($q_{\text{pok}} = 3,72 \text{ kN/m}$) ($k = 2,60$) | $F_{\text{pok}} = 4 \text{ kN}$ ($q_{\text{pok}} = 3,72 \text{ kN/m}$) ($k = 3,47$) |
|----------------------|---|--|---|---|
| T₁ | 139 | 284 | 429 | 560 |
| T₂ | 84 | 163 | 240 | 309 |
| T₃ | 130 | 267 | 405 | 537 |
| T₄ | -117 | -234 | -346 | -446 |
| T₅ | -92 | -186 | -282 | -374 |
| T₆ | -126 | -245 | -359 | -459 |



Slika 38 Dijagram sila-relativna deformacija

Dijagram prikazuje ponašanje staklenog nosača pri proračunskom opterećenju bez faktora s koeficijentom sigurnosti $k = 3,47$. Do te razine opterećenja nosač je djelovao potpuno elastično i nisu uočena nikakva oštećenja. (27)

Slika 38 je prikaz dijagrama sila – relativna deformacija čiji su rezultati dobiveni pomoću elektrootpornih tenzometara. Opet, kao i kod staklenog nosača, rezultati su, ovisno o tlačnoj i vlačnoj zoni presjeka i mjestu na kojem se tenzometar nalazi, vrlo slični za točke koje su suprotnim stranama panela.

9.3. Prikaz elemenata nadstrešnice u programu SJ Mepla

SJ MEPLA je program konačnih elemenata posebno razvijen za izvođenje statičkih i dinamičkih proračuna staklenih konstrukcija. Dimenzioniranje i proračun naprezanja pločastih konstrukcija pod različitim opterećenjima standardni je zadatak svakodnevene inženjerske prakse. Paneli koji variraju od pravokutnog oblika više se ne mogu izračunati tabličnim radom ili ručnom formulom, već se moraju vrednovati metodom konačnih elemenata. U sektoru staklene gradnje sustavi koji se ispituju često su vrlo slični. Ali se rubni uvjeti, pričvršćenja ili debljina moraju mijenjati svaki put kada se stvaraju novi elementi. Stoga je ovaj program prikladan za dimenzioniranje kao i za statičke proračune, za koje nudi cijeli niz mogućnosti proračuna. (30)

Geometrija ploče koja se modelira, definirana je unosom kutnih točaka. Koordinate x i y svake geometrijske točke moraju biti zadane tako da je orijentacija točaka koje grade površinu ploče postavljena suprotno od smjera kazaljke na satu. Sustav izrade uvijek se ažurira i crta tako da je stvarna zadnja linija povezana s prvom danom točkom za zatvaranje sustava. *Mesh* se generira automatski nakon izbora veličine *mesha*, budući da je za izradu ovih modela bila dostupna samo testna verzija softwarea, veličina *mesha* je bila ograničena brojem točaka koju softver može proračunati.

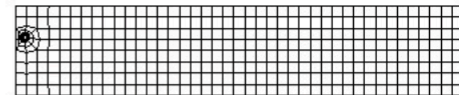
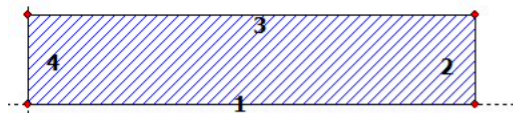
Unutar MEPLA svi proračuni mogu se izvesti pod stvarnijim pristupom velikih deformacija. Ovo geometrijski nelinearno ponašanje može uzeti u obzir učinke ponovnog ukrućenja membrane koji se javljaju unutar ploče. Linearni proračun će dati točne rezultate samo ako su deformacije ploče male u odnosu na debljinu stakla. Kada te deformacije pređu polovicu debljine ploče, učinak membrane postaje važniji. (30)

Teorija primijenjena za implementaciju softvera SJ Mepla sastoji se od diskretizacije u Mindlin-Reissnerove konačne elemente svakog krutog sloja, s neovisnim rotacijama i pomacima u ravnini. Pretpostavlja se da je poprečni pomak jednak za sve slojeve, a kinematika mekih slojeva izvedena je iz varijabli krutih slojeva, uz pretpostavku savršenog spajanja i zanemarive deformacije debljine. Međutim, postoje sljedeća ograničenja: dopuštene su samo ravne geometrije; model nije egzaktno za velike deformacije (samo točnost drugog reda); nelinearna rješenja su samo kontrolirana opterećenjem i stoga nisu prikladna za probleme opće nestabilnosti. (31)

9.3.1. Staklene grede nadstrešnice

Staklena greda je projektirana kao konzolni nosač sa staklenim pokrovom koji opterećuje grede s gornje strane, okomito na lamele. Pri izvijanju je uzeta u obzir kontrola velikih progiba svojstvena za staklo i analiza konačnih elemenata. Veličina *mesha* je 120 mm.

Staklene grede nadstrešnice se sastoje od troslojnog laminiranog stakla su stakla kaljena debljine 15 mm, a PVB folija je četveroslojna, između ploča stakla, odnosno ukupne debljine 1,52 mm. Prikaz kalkulacije numeričkog modela iz softvera:



Geometry:

| Edge | Borderpoint | | Arccenter | | Direction of rotation |
|------|-------------|---------|-----------|----|-----------------------|
| | mm | mm | mm | mm | +/- |
| 1 | 0.00 | 0.00 | | | |
| 2 | 5000.00 | 0.00 | | | |
| 3 | 5000.00 | 1000.00 | | | |
| 4 | 0.00 | 1000.00 | | | |

Supports:

Edge supports:

| Edge | Type of supports |
|------|--|
| 4 | w,u,v,φ,θ: fixed (all d.o.f supported and clamped) |

Spring supports:

| Package | Layer | x | y | z | C_x | C_y | C_z | C_φ | C_θ |
|---------|-------|--------|-----|-----|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | | mm | mm | mm | N/mm | N/mm | N/mm | Nmm | Nmm |
| 1 | 1 | 2000.0 | 0.0 | 0.0 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 1.00e+00 | 1.00e+00 |

Point fixings:

Position of point fixings:

| Reference | Position | | | Anchor point of bar | | | E-modul | Section |
|-----------|----------|--------|------|---------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------|
| | x | y | z | x | y | z | E | A |
| | mm | mm | mm | mm | mm | mm | N/mm ² | mm ² |
| 1 | 100.00 | 650.00 | 0.00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 |

Kind of point fixing:

| Reference | Type | Radius Sleeve | Radius Disk | E-modul Shim | E-modul Sleeve | Thickn. Shim | Thickn. Sleeve | Height Cone | Radius Cone |
|-----------|------|---------------|-------------|--------------|----------------|--------------|----------------|-------------|-------------|
| | | | | | | | | | |

| | mm | mm | N/mm ² | N/mm ² | mm | mm | mm | mm |
|---|----|-------|-------------------|-------------------|---------|------|------|----|
| 1 | 2 | 20.00 | 31.50 | 60.00 | 3000.00 | 5.00 | 1.50 | - |

Point fixing reference:

| Reference | Manufacturer/Name |
|-----------|------------------------------------|
| 1 | Felasto V270K, Zh:0mm, CM:29700Nmm |

Force transmittance mechanisms at the bore hole rim:

Point fixing type 2,10: Only the glass package 1, layer 3 is lying in contact to the sleeve

Contact settings:

Without contact approaches between sleeve resp. edgeprotection and glass
Without contact approaches between shim and glass

Layers:

Layer order:

| Package | Layer | Description |
|---------|-------|------------------------|
| 1 | 5 | Glass, fully toughened |
| 1 | 4 | PVB long time loading |
| 1 | 3 | Glass, fully toughened |
| 1 | 2 | PVB long time loading |
| 1 | 1 | Glass, fully toughened |

Mechanical properties:

| Package | Layer | E-mod. N/mm ² | ν | Thickness mm | Density kg/m ³ | αt 1/K | ΔT K |
|---------|-------|-----------------------------|-------|-----------------|------------------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 5 | 70000.00 | 0.23 | 15.00 | 2550.00 | 1.0000e-05 | 0.00 |
| 1 | 4 | 0.03 | 0.50 | 1.52 | 1070.00 | 8.0000e-05 | 0.00 |
| 1 | 3 | 70000.00 | 0.23 | 15.00 | 2550.00 | 1.0000e-05 | 0.00 |
| 1 | 2 | 0.03 | 0.50 | 1.52 | 1070.00 | 8.0000e-05 | 0.00 |
| 1 | 1 | 70000.00 | 0.23 | 15.00 | 2550.00 | 1.0000e-05 | 0.00 |

Loads:

Line loads:

| Package | -- from -- | | --- to --- | | qx | qy | qz |
|---------|------------|---------|------------|---------|------|-------|------|
| | x | y | x | y | N/mm | N/mm | N/mm |
| 1 | 0.00 | 1000.00 | 5000.00 | 1000.00 | 0.00 | -0.63 | 0.00 |

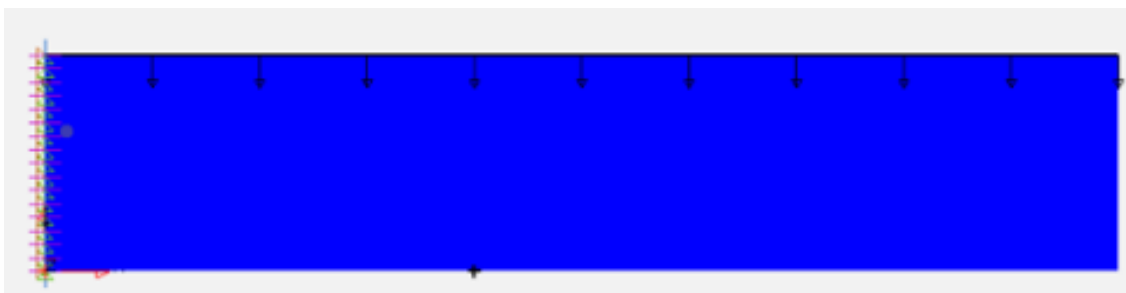
Constant and linear increasing faceloads: see loadcase

Dead weight:

Inclination of pane: 90.00° degree

Direction vector of gravity acceleration [g = 9.81 m/s²]:

| ex | ey | ez |
|---------|----------|---------|
| 0.00000 | -1.00000 | 0.00000 |



Slika 39 Model iz softvera SJ Mepla

Zadano je 5 kombinacija opterećenja prema normi:

Loadcase: 1 (+1.00g+1·E_Foil)

Coefficients / Safety factors:

| Dead weight | Wind | Snow | Line | Point | -- Climate -- | | Shear |
|-------------|------|------|------|-------|----------------------|------------|-------|
| | | | | | $\Delta p, \Delta T$ | ΔH | |
| 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Loadcase: 2 (+1.00g+1.00s(1)+1·E_Foil)

Coefficients / Safety factors:

| Dead weight | Wind | Snow | Line | Point | -- Climate -- | | Shear |
|-------------|------|------|------|-------|----------------------|------------|-------|
| | | | | | $\Delta p, \Delta T$ | ΔH | |
| 1.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Loadcase: 3 (+1.00g+1.00s(1)+0.70q(1)+1·E_Foil)

Coefficients / Safety factors:

| Dead weight | Wind | Snow | Line | Point | -- Climate -- | | Shear |
|-------------|------|------|------|-------|----------------------|------------|-------|
| | | | | | $\Delta p, \Delta T$ | ΔH | |
| 1.00 | 0.00 | 1.00 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Loadcase: 4 (+1.00g+1.00q(1)+1·E_Foil)

Coefficients / Safety factors:

| Dead weight | Wind | Snow | Line | Point | -- Climate -- | | Shear |
|-------------|------|------|------|-------|----------------------|------------|-------|
| | | | | | $\Delta p, \Delta T$ | ΔH | |
| 1.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Loadcase: 5 (+1.00g+0.50s(1)+1.00q(1)+1·E_Foil)

Coefficients / Safety factors:

| Dead weight | Wind | Snow | Line | Point | -- Climate -- | | Shear |
|-------------|------|------|------|-------|----------------------|------------|-------|
| | | | | | $\Delta p, \Delta T$ | ΔH | |
| 1.00 | 0.00 | 0.50 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Kalkulacija je provedena u softveru i dobiveni su rezultati:

- Serviceability limit state, SLS

| Package | Loadcase | x | y | mm | % | OK/NOK |
|---------|----------|---------|------|--------|-------|--------|
| 1 | 1 (max) | 5000.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | ✓ |
| | 3 (min) | 5000.00 | 0.00 | -44.90 | 89.90 | ✓ |

- Loadcase result

- [1] +1.00g+1·E_Foil

| Package | w | < wd | OK/NOK |
|---------|------|-------|--------|
| 1 (max) | 0.00 | 50.00 | ✓ |

| | | | | | | | |
|--|-------|--|------|--|-------|--|---|
| | (min) | | 0.00 | | 50.00 | | ✓ |
|--|-------|--|------|--|-------|--|---|

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|------------------|------|---|-----|-------|-----|--------|-----|
| Package | _____ | Chord shortening | ___ | < | ___ | Limit | ___ | OK/NOK | ___ |
| 1 | | | 0.00 | | | 10.00 | | ✓ | |

• [2] +1.00g+1.00s (1)+1 ·E_Foil

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|---|--------|---|-----|-------|-------|--------|-----|
| Package | _____ | w | _____ | < | ___ | wd | _____ | OK/NOK | ___ |
| 1 | (max) | | 0.00 | | | 50.00 | | ✓ | |
| | (min) | | -44.90 | | | 50.00 | | ✓ | |

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|------------------|------|---|-----|-------|-----|--------|-----|
| Package | _____ | Chord shortening | ___ | < | ___ | Limit | ___ | OK/NOK | ___ |
| 1 | | | 0.00 | | | 10.00 | | ✓ | |

• [3] +1.00g+1.00s (1)+0.70q(1)+1 ·E_Foil

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|---|--------|---|-----|-------|-------|--------|-----|
| Package | _____ | w | _____ | < | ___ | wd | _____ | OK/NOK | ___ |
| 1 | (max) | | 0.00 | | | 50.00 | | ✓ | |
| | (min) | | -44.90 | | | 50.00 | | ✓ | |

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|------------------|------|---|-----|-------|-----|--------|-----|
| Package | _____ | Chord shortening | ___ | < | ___ | Limit | ___ | OK/NOK | ___ |
| 1 | | | 0.00 | | | 10.00 | | ✓ | |

• [4] +1.00g+1.00q(1)+1 ·E_Foil

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|---|-------|---|-----|-------|-------|--------|-----|
| Package | _____ | w | _____ | < | ___ | wd | _____ | OK/NOK | ___ |
| 1 | (max) | | 0.00 | | | 50.00 | | ✓ | |
| | (min) | | 0.00 | | | 50.00 | | ✓ | |

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|------------------|------|---|-----|-------|-----|--------|-----|
| Package | _____ | Chord shortening | ___ | < | ___ | Limit | ___ | OK/NOK | ___ |
| 1 | | | 0.00 | | | 10.00 | | ✓ | |

• [5] +1.00g+0.50s (1)+1.00q(1)+1 ·E_Foil

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|---|--------|---|-----|-------|-------|--------|-----|
| Package | _____ | w | _____ | < | ___ | wd | _____ | OK/NOK | ___ |
| 1 | (max) | | 0.00 | | | 50.00 | | ✓ | |
| | (min) | | -37.45 | | | 50.00 | | ✓ | |

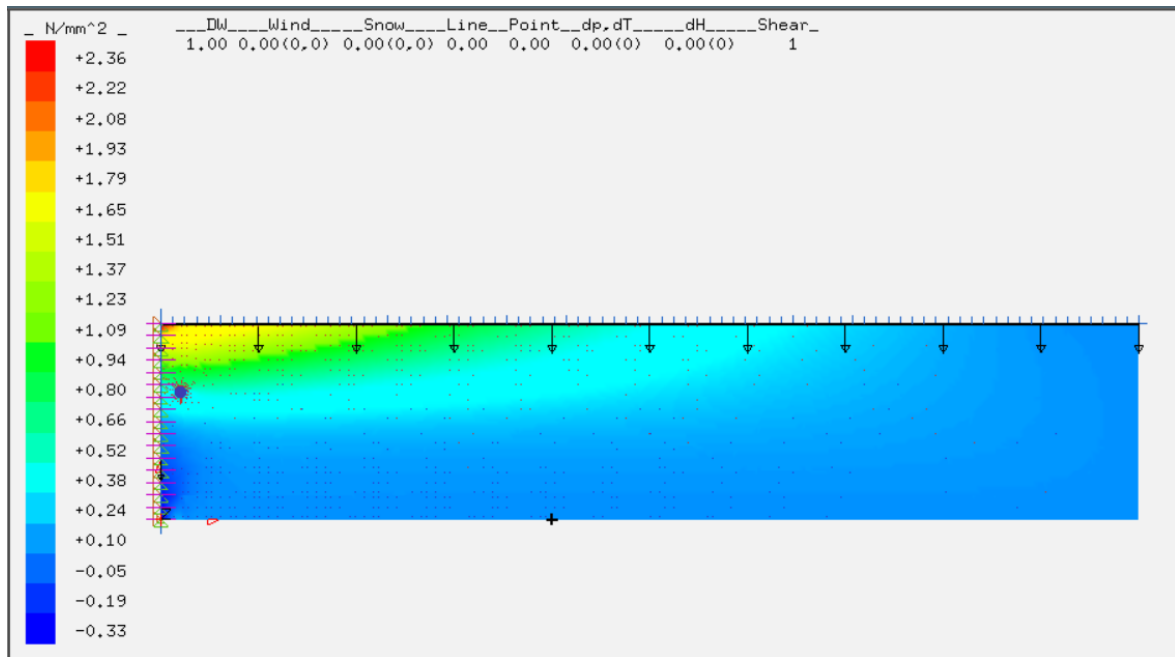
| | | | | | | | | | |
|---------|-------|------------------|------|---|-----|-------|-----|--------|-----|
| Package | _____ | Chord shortening | ___ | < | ___ | Limit | ___ | OK/NOK | ___ |
| 1 | | | 0.00 | | | 10.00 | | ✓ | |

Iz ovih rezultata proizlazi da stakleni nosač zadovoljava uvjete za svaku kombinaciju opterećenja.

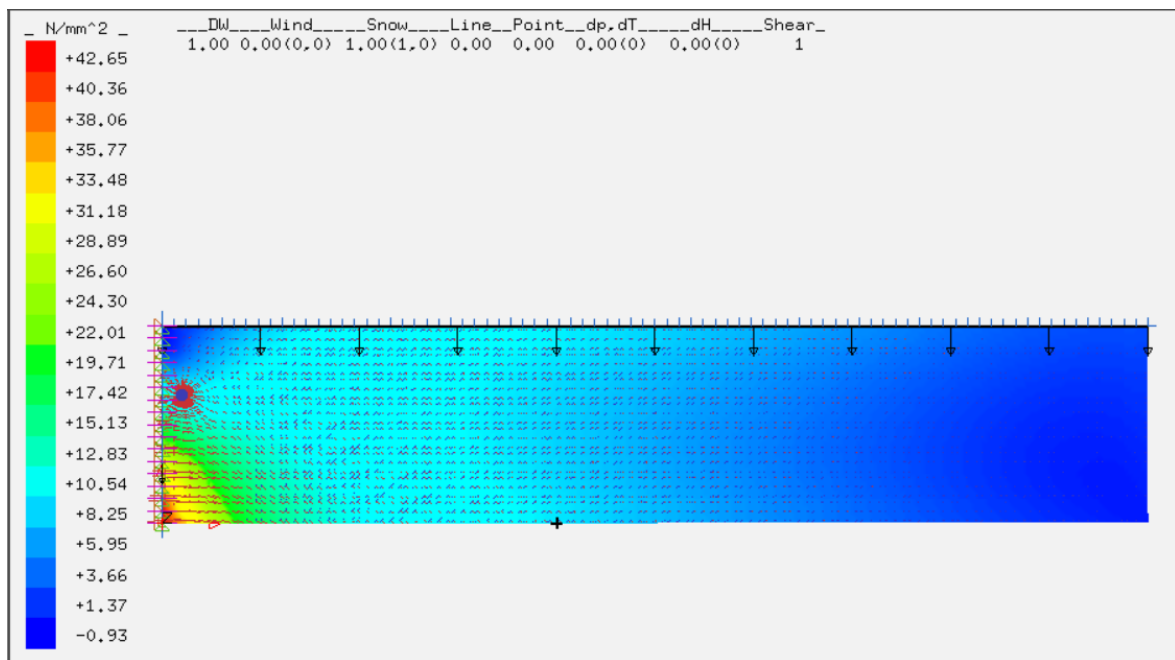
Pomaci dobiveni u softveru se razlikuju ovisno o mjestu mjerenja. Dakle, ako je u vlačnoj zoni ili tlačnoj taj presjek stakla, takav je i iznos pomaka.

Maksimalna naprezanja za svaku kombinaciju opterećenja su prikazana na idućim slikama. Ovisno na kojoj strani se „mjere“ deformacije, kao što je već potvrđeno i u eksperimentalnom dijelu, one su pozitivne ili negativne s obzirom na to gdje se mjere, odnosno je li vlačna ili tlačna zona:

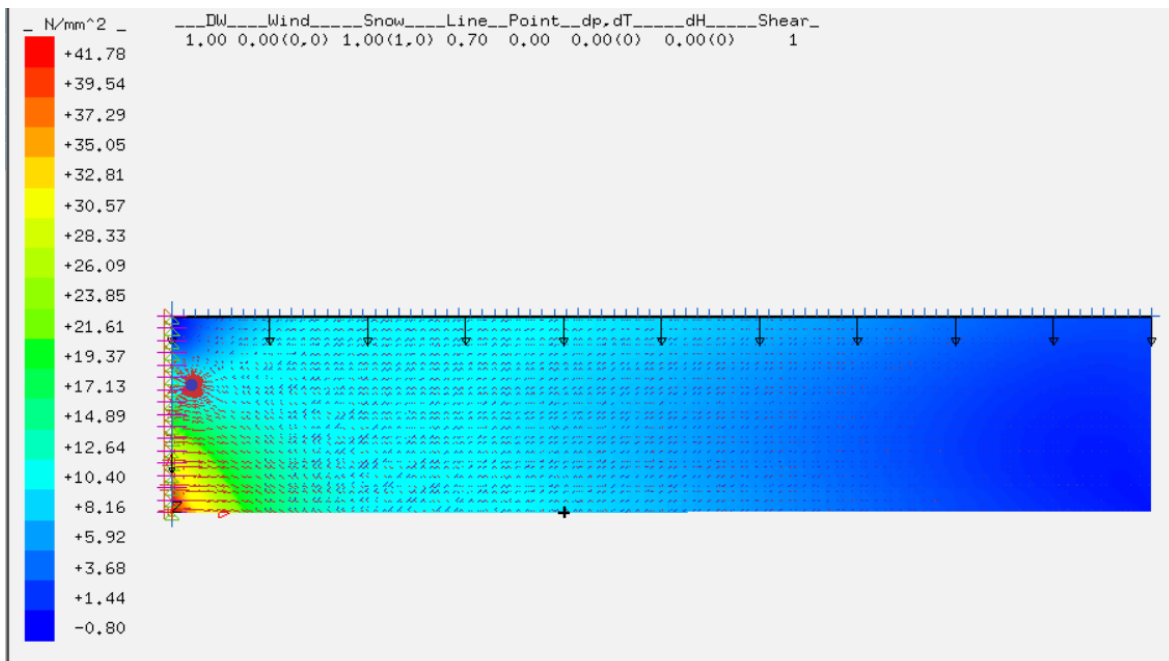
- Kombinacija 1:



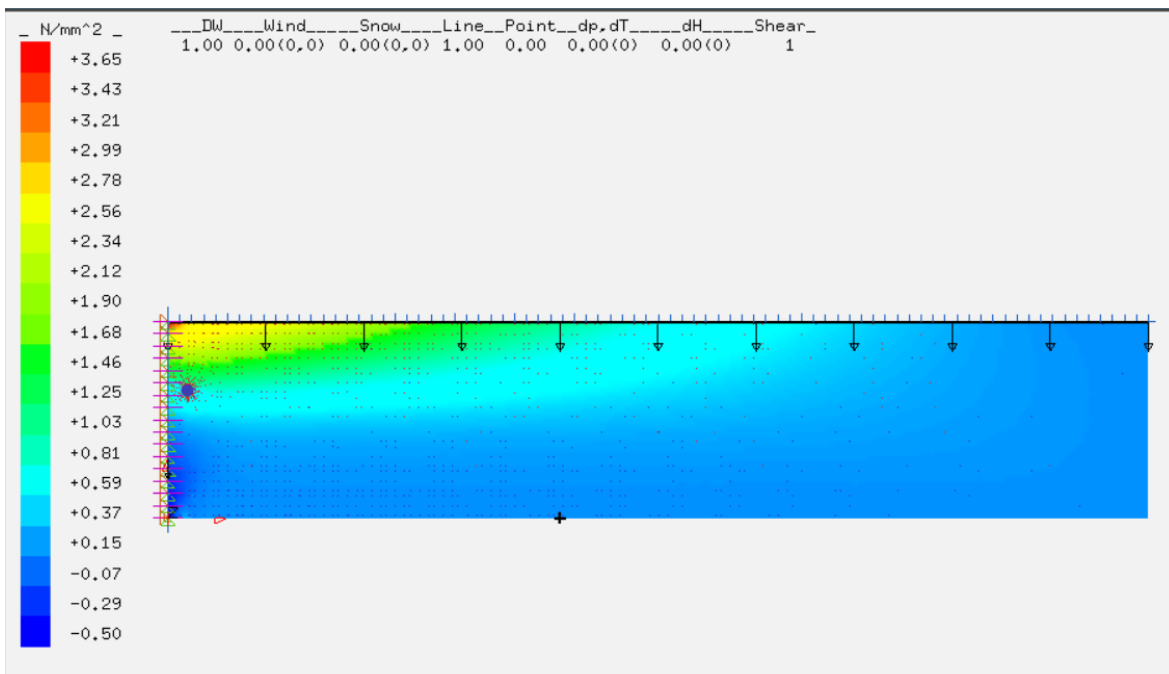
- Kombinacija 2:



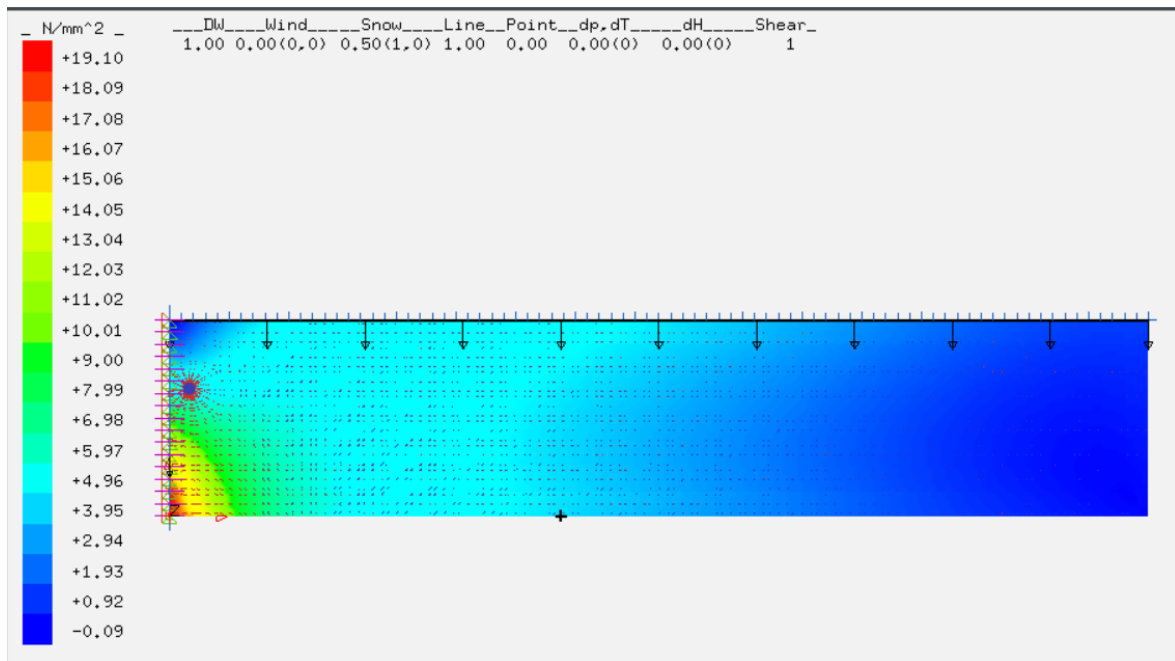
- Kombinacija 3:



- Kombinacija 4:



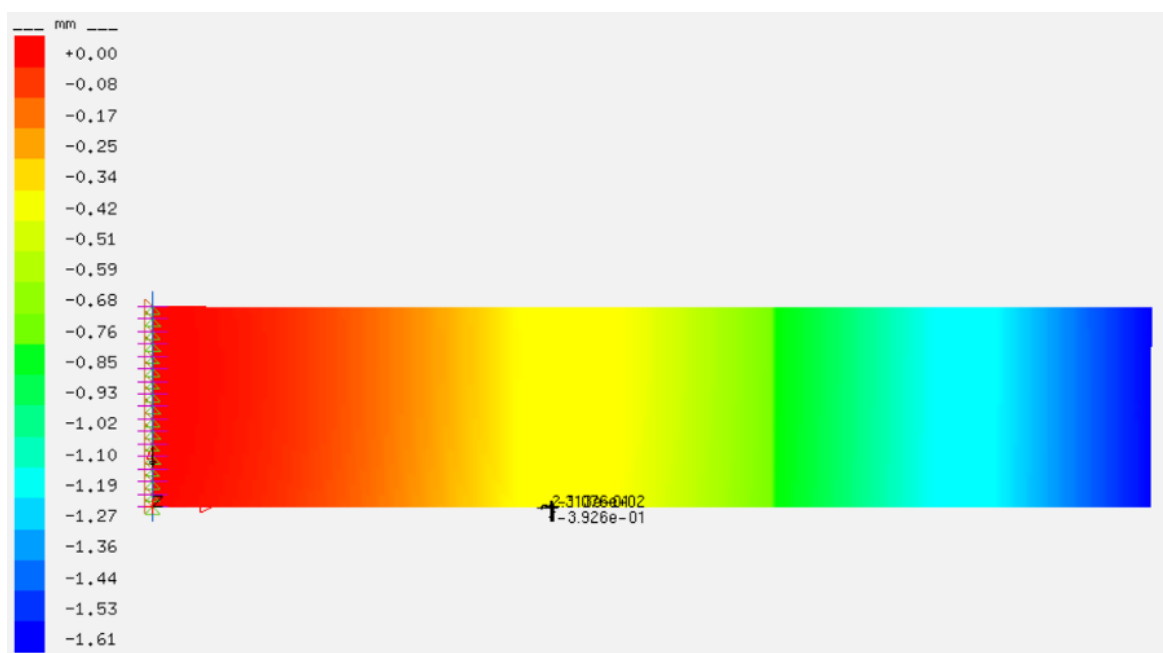
- Kombinacija 5:



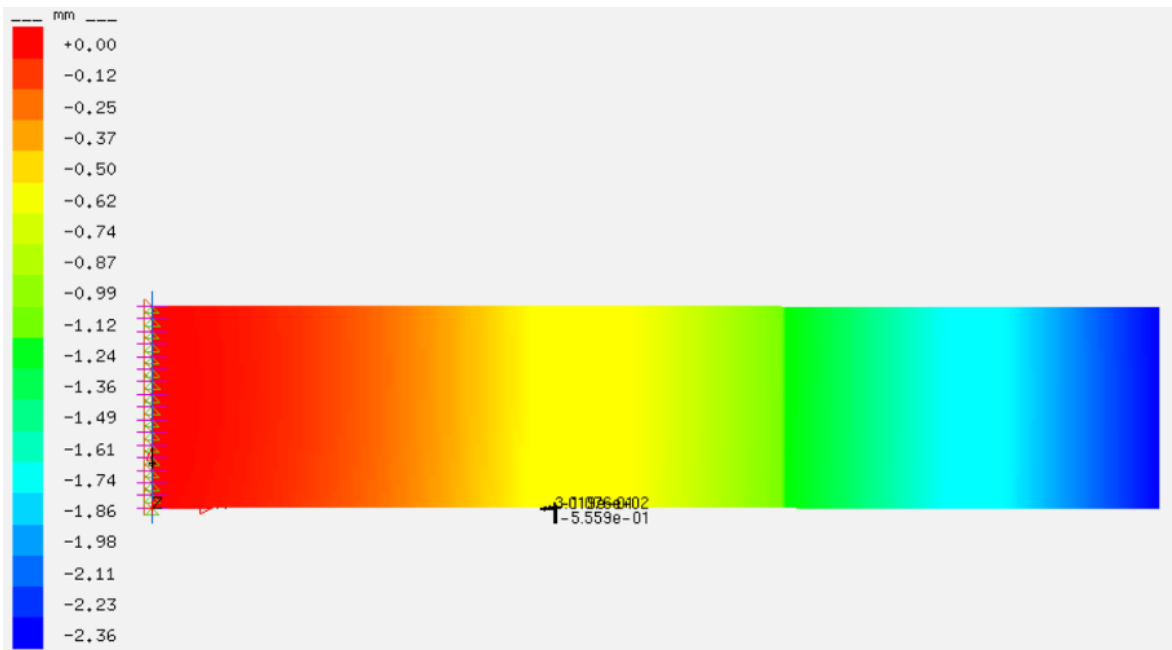
9.3.2. Numerički model s pokusnim opterećenjem

Kao što je ispitivano u laboratoriju, tako je i ovdje u softveru proračunato na isti način, pokusnim opterećenjem od 5, 10, 15 i 20 kN, za to se dobiju sljedeći rezultati pomaka izraženi u mm.

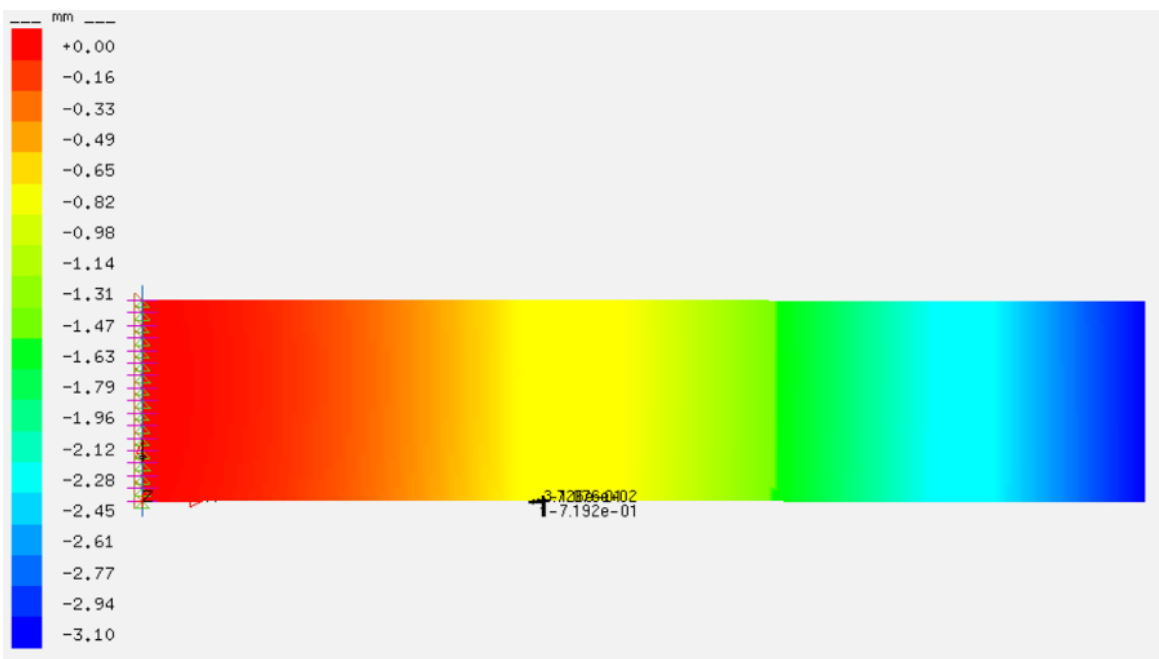
- $F = 5 \text{ kN}$



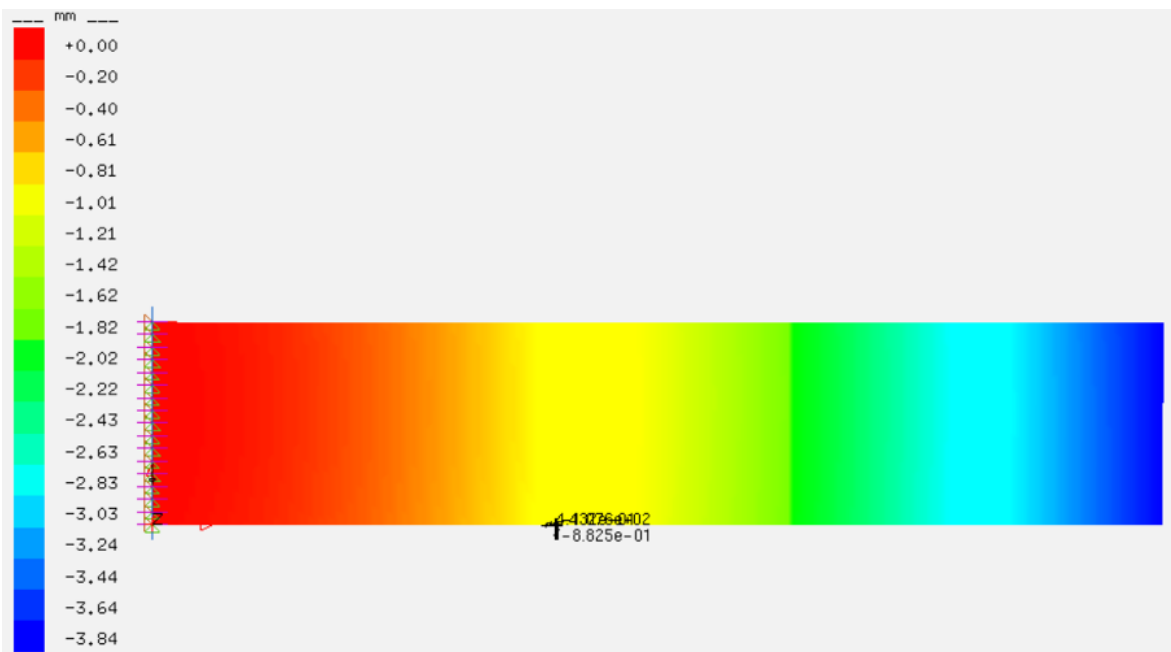
- $F = 10 \text{ kN}$



- $F = 15 \text{ kN}$



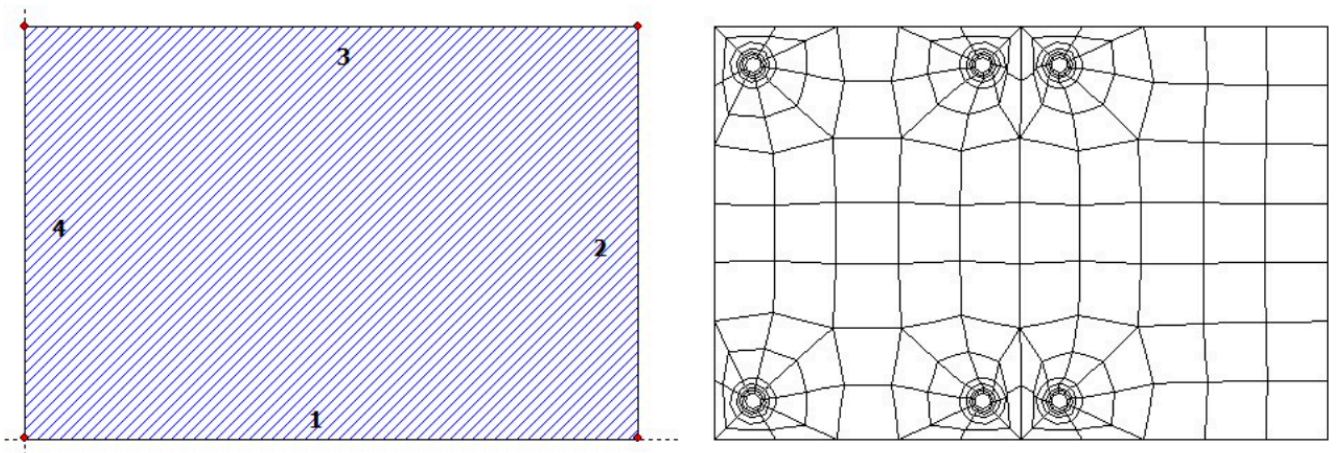
- $F = 20 \text{ kN}$



9.3.3. Stakleni pokrovni nosač nadstrešnice

Stakleni pokrovni nosač je projektiran kao nosač oslonjen na staklene grede. Pri izvijanju je uzeta u obzir kontrola velikih progiba svojstvena za staklo i analiza konačnih elemenata. Veličina mesha je 150 mm.

Stakleni pokrov nadstrešnice sastoji se od dvoslojnog laminiranog stakla su stakla kaljena debljine 10 mm, a PVB folija je četveroslojna, između ploča stakla, odnosno ukupne debljine 1,52 mm. Prikaz kalkulacije numeričkog modela iz softvera:



Geometry:

| Edge | Borderpoint | | Arccenter | | Direction of rotation +/- |
|------|-------------|---------|-----------|----|------------------------------|
| | mm | mm | mm | mm | |
| 1 | 0.00 | 0.00 | | | |
| 2 | 1600.00 | 0.00 | | | |
| 3 | 1600.00 | 1075.00 | | | |
| 4 | 0.00 | 1075.00 | | | |

Supports:

Edge supports:

| Edge | Type of supports | |
|------|------------------|---|
| 1 | w | : fixed - u,v,φ,θ : free (simply supported) |
| 3 | w | : fixed - u,v,φ,θ : free (simply supported) |

Point fixings:

Position of point fixings:

| Reference | Position | | | Spring rigidities at base point of the point fixing | | | | |
|-----------|----------|---------|---------|---|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | x mm | y mm | z mm | C _x N/mm | C _y N/mm | C _z N/mm | C _φ Nmm/rad | C _θ Nmm/rad |
| 1 | 900.00 | 975.00 | 0.00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 |
| 1 | 700.00 | 975.00 | 0.00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 |
| 1 | 100.00 | 975.00 | 0.00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 |
| 1 | 900.00 | 100.00 | 0.00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 |
| 1 | 700.00 | 100.00 | 0.00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 |
| 1 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 |

Kind of point fixing:

| Reference | Type | Radius | Radius | E-modul | E-modul | Thickn. | Thickn. | Height | Radius |
|-----------|--------|--------|-------------------|-------------------|---------|---------|---------|--------|--------|
| | Sleeve | Disk | Shim | Sleeve | Shim | Sleeve | Cone | Cone | |
| | mm | mm | N/mm ² | N/mm ² | mm | mm | mm | mm | |
| 1 | 2 | 20.00 | 33.25 | 40.00 | 40.00 | 2.00 | 2.25 | - | - |

Point fixing reference:

| Reference | Manufacturer/Name |
|-----------|-------------------|
| 1 | SWS 17 001 |

Layers:

Layer order:

| Package | Layer | Description |
|---------|-------|------------------------|
| 1 | 3 | Glass, fully toughened |
| 1 | 2 | PVB long time loading |
| 1 | 1 | Glass, fully toughened |

Mechanical properties:

| Package | Layer | E-mod. | v | Thickness | Density | α _t | ΔT |
|---------|-------|-------------------|------|-----------|-------------------|----------------|------|
| | | N/mm ² | | mm | kg/m ³ | 1/K | K |
| 1 | 3 | 70000.00 | 0.23 | 10.00 | 2550.00 | 1.0000e-05 | 0.00 |
| 1 | 2 | 0.03 | 0.50 | 1.52 | 1070.00 | 8.0000e-05 | 0.00 |
| 1 | 1 | 70000.00 | 0.23 | 10.00 | 2550.00 | 1.0000e-05 | 0.00 |

Loads:

Constant and linear increasing faceloads: see loadcase

Dead weight:

Inclination of pane: 0.00° degree

Direction vector of gravity acceleration [$g = 9.81 \text{ m/s}^2$]:

| | | |
|---------|---------|----------|
| e_x | e_y | e_z |
| 0.00000 | 0.00000 | -1.00000 |

Options

Chord shortening:

| | | |
|--------------|---------------|------|
| (x_0, y_0) | (x_1, y_1) | mm |
| (0.0, 0.0) | (10.0, 10.0) | 14.1 |

Calculation approaches:

small deflections, linear
static calculation

Budući da su u ovom slučaju jedina opterećenja koja se uzimaju snijeg i vlastita težina (kako je i u eksperimentalnom dijelu), postoje samo dvije kombinacije opterećenja za ovaj nosač prema normi:

Loadcase: 1 (+1.00g+1·E_Foil)

Coefficients / Safety factors:

| | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|-------|----------------------|------------|-------|
| -- Climate -- | | | | | | | |
| Dead weight | Wind | Snow | Line | Point | $\Delta p, \Delta T$ | ΔH | Shear |
| 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Loadcase: 2 (+1.00g+1.00s(1)+1·E_Foil)

Coefficients / Safety factors:

| | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|-------|----------------------|------------|-------|
| -- Climate -- | | | | | | | |
| Dead weight | Wind | Snow | Line | Point | $\Delta p, \Delta T$ | ΔH | Shear |
| 1.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Loadcase combination:

| | | | |
|---------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| | Wind | Snow | Climate |
| | N/mm ² | N/mm ² | |
| outside | 0.00000 | -0.00150 | without climate loads |

Naprezanja su veća za kombinaciju opterećenja 2:

Maximum principal stress:

| Package | Layer | σ | Loadcase |
|---------|----------|-------------------|----------|
| | | N/mm ² | |
| 1 | 3 (top) | 1.02 | 2 |
| | (bottom) | 8.98 | 2 |
| 1 | 1 (top) | 1.02 | 2 |
| | (bottom) | 9.02 | 2 |

Kalkulacija je provedena u softveru i dobiveni su rezultati:

• Glass structure and strength, DIN18008 - Height < 1000m, high damage scenario

Package__Glass type_____

1 Glass, fully toughened

----- k_mod (K) -----

Package__g__w__s__l__q__ΔpΔT__ΔH__

1 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

(A) (C) (D) (E) (F) (G) (H) (I) (J)

Package__fk__Y_M__D__E__F__G__k_z__k_c__LSG__k_lsg__

1 120.00 1.50 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 ✓ 1.10

Design formula:
 $R_d = A \cdot K \cdot I \cdot J \cdot H / C$

• Loadcase combination

Description_____outside/top_____inside/bottom_____

s(1) = Snow -1.500 [kN/m²]

g = Dead weight α = 0.0°

LC Description_____

1 +1.00g+1·E_Foil

2 +1.00g+1.00s(1)+1·E_Foil

| LC | DW | Wind | Snow | Line | Point | Climate | Shear | Proof |
|----|------|------|------|------|-------|---------|-------|-------|
| 1 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | SLS |
| 2 | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | SLS |

• **Calculation results - utilization - until loadcase 2**

• **Serviceability limit state, SLS**

Package__Loadcase__x__y__mm__%__OK/NOK__

| | | | | | | | |
|---|---|-------|--------|--------|-------|-------|---|
| 1 | 2 | (max) | 320.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | ✓ |
| | 2 | (min) | 0.00 | 537.50 | -3.13 | 19.58 | ✓ |

| | | | |
|---------------|------------------|------|--------|
| Package__LC__ | Chord shortening | % | OK/NOK |
| 1 | 2 | 0.00 | 0.00 ✓ |

• **Loadcase result**

• **[1] +1.00g+1·E_Foil**

| | | | |
|---------|-------|--------------|--------|
| Package | w | < wd | OK/NOK |
| 1 | (max) | 0.00 16.00 | ✓ |
| | (min) | -0.80 16.00 | ✓ |

| | | | |
|---------|------------------|---------|--------|
| Package | Chord shortening | < Limit | OK/NOK |
| 1 | 0.00 | 10.00 | ✓ |

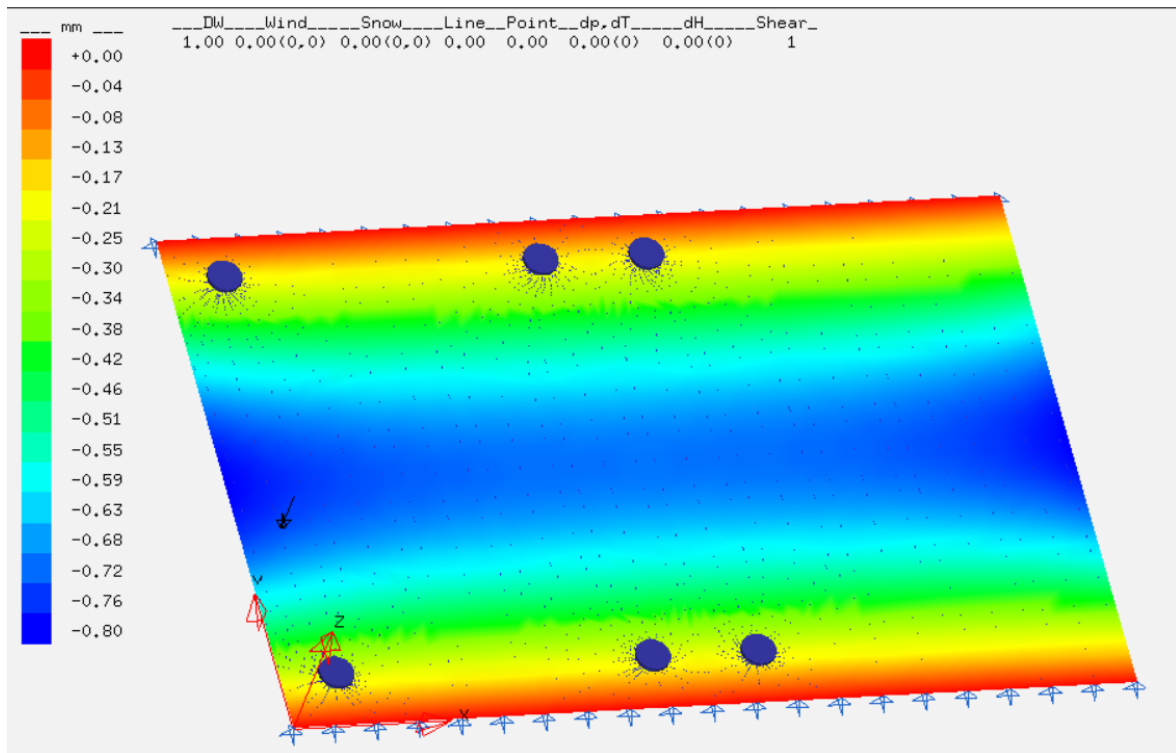
• **[2] +1.00g+1.00s(1)+1·E_Foil**

| | | | |
|---------|-------|--------------|--------|
| Package | w | < wd | OK/NOK |
| 1 | (max) | 0.00 16.00 | ✓ |
| | (min) | -3.13 16.00 | ✓ |

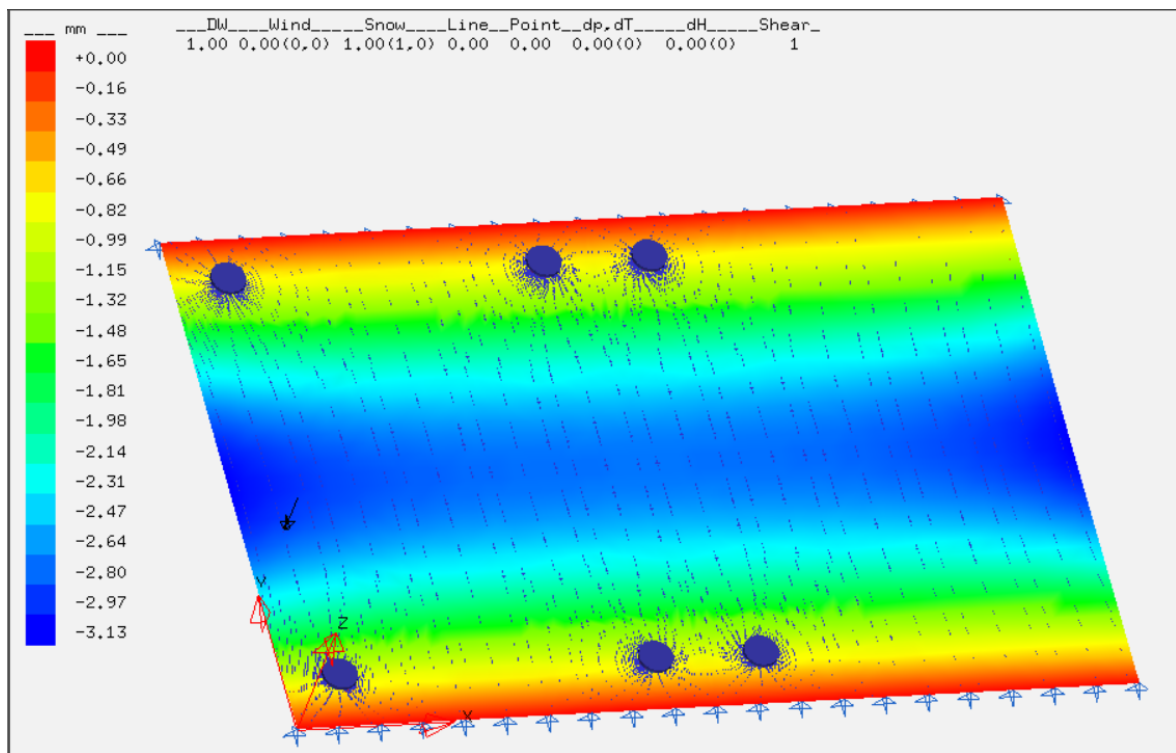
| | | | |
|---------|------------------|---------|--------|
| Package | Chord shortening | < Limit | OK/NOK |
| 1 | 0.00 | 10.00 | ✓ |

Iz ovih rezultata proizlazi da stakleni pokrov zadovoljava uvjete nosivosti za svaku kombinaciju opterećenja.

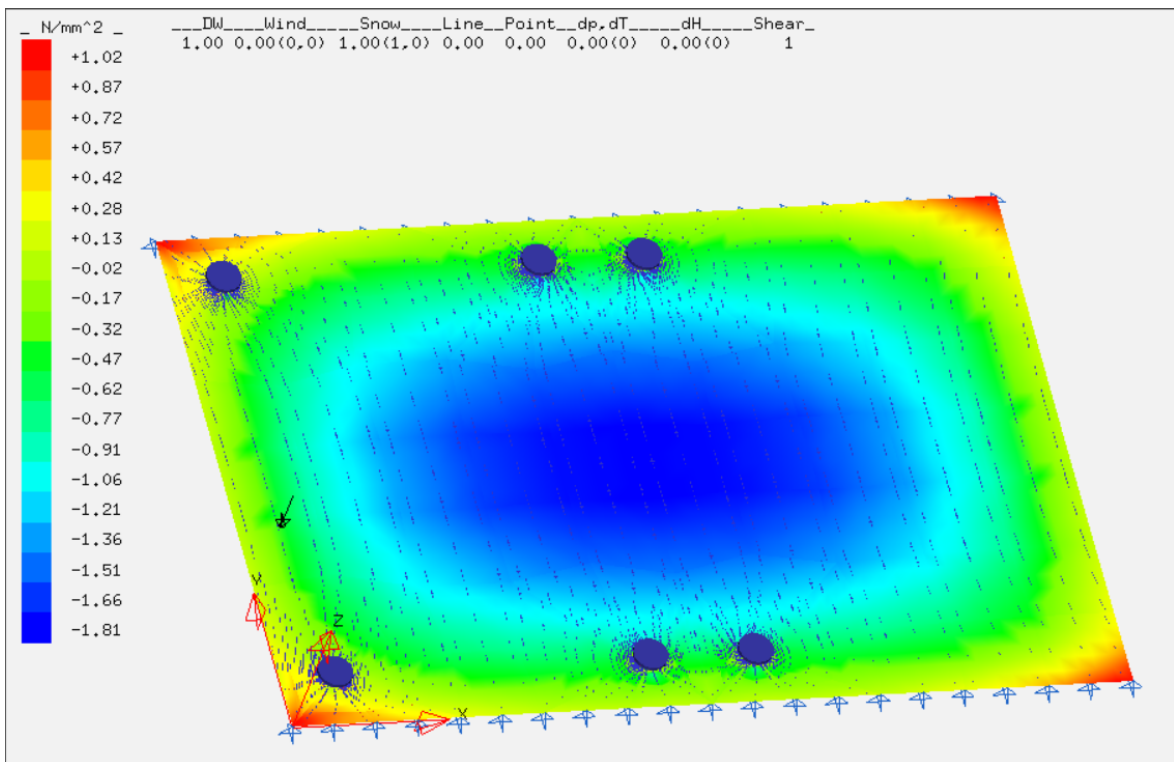
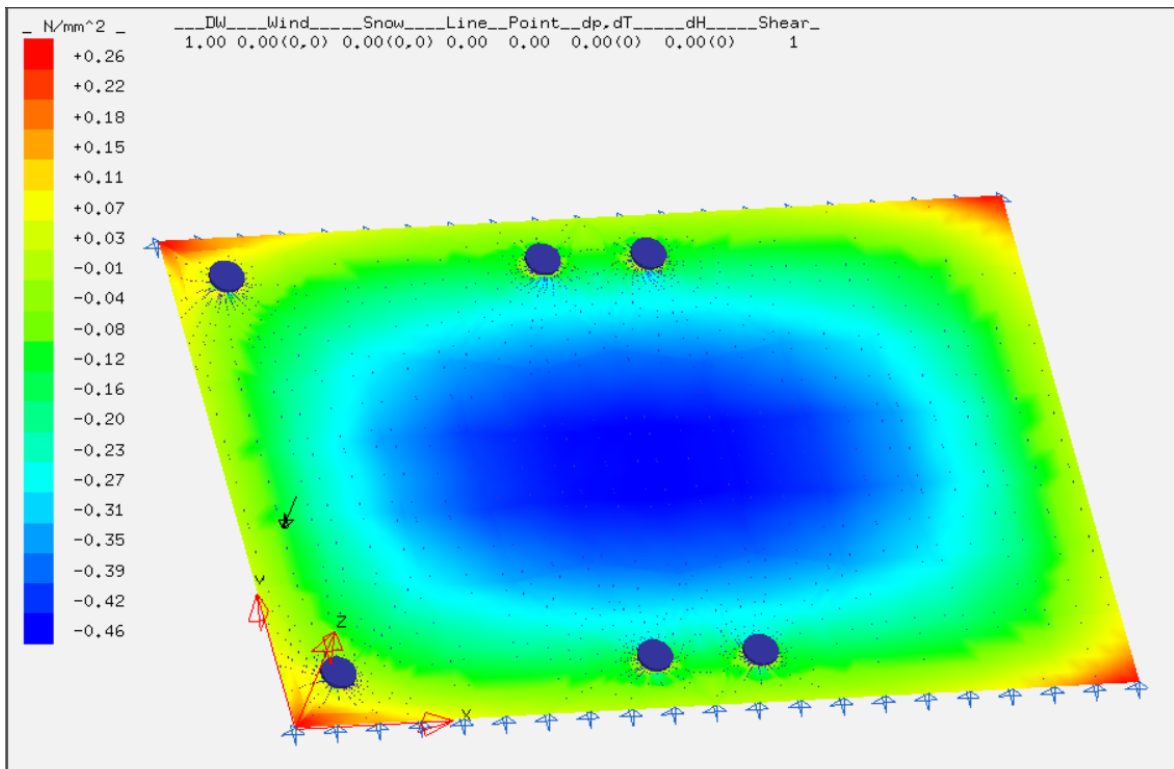
Rezultati pomaka za kombinaciju opterećenja 1:



Rezultati pomaka za kombinaciju opterećenja 2:



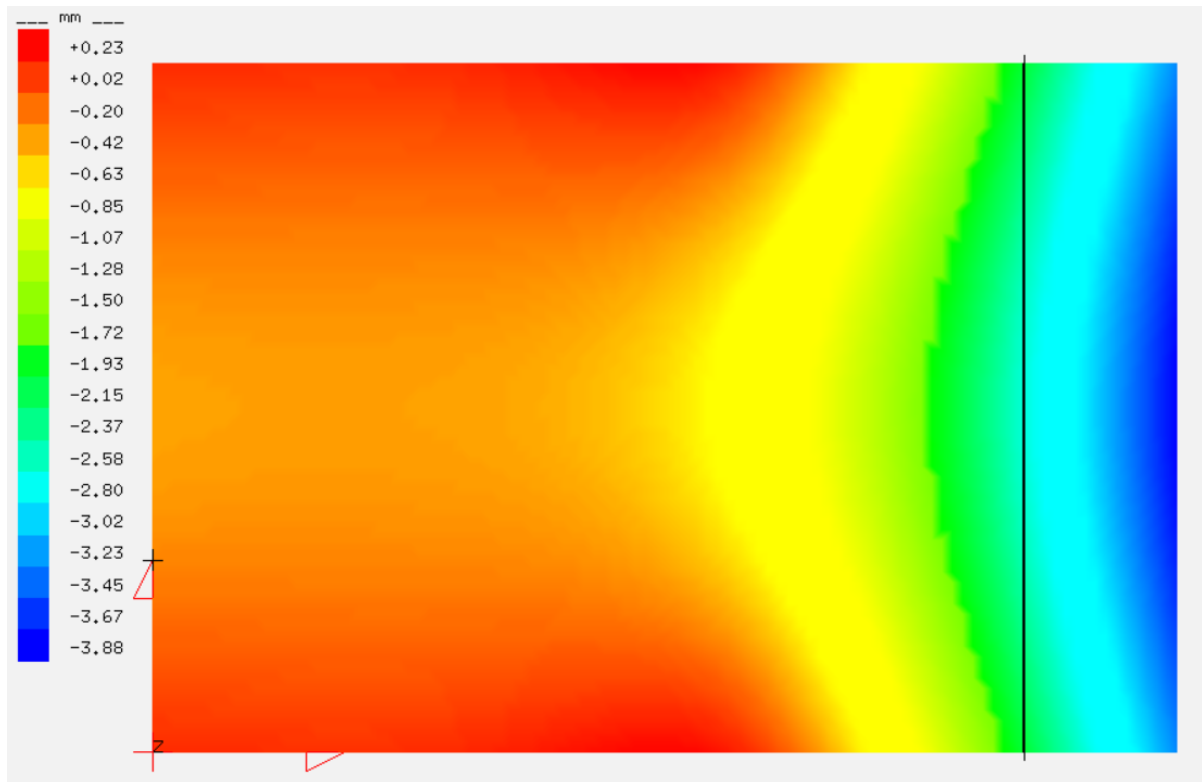
Maksimalna naprezanja u staklenom elementu su sljedeća za kombinacije 1 i 2:



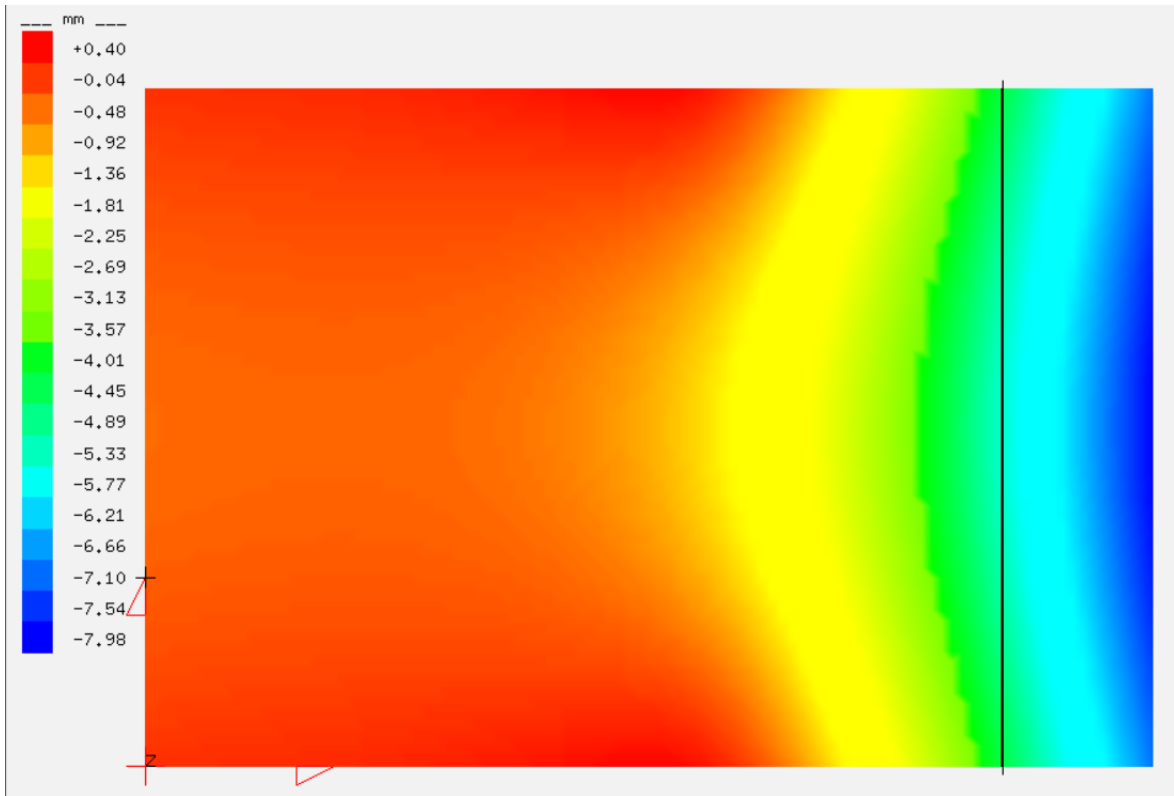
9.3.4. Numerički model s pokusnim opterećenjem

Kao što je ispitivano u laboratoriju, tako je i u softveru proračunato i opterećeno na isti način, pokusnim opterećenjem od 1, 2, 3, i 4 kN, za to se dobiju sljedeći rezultati pomaka izraženi u mm.

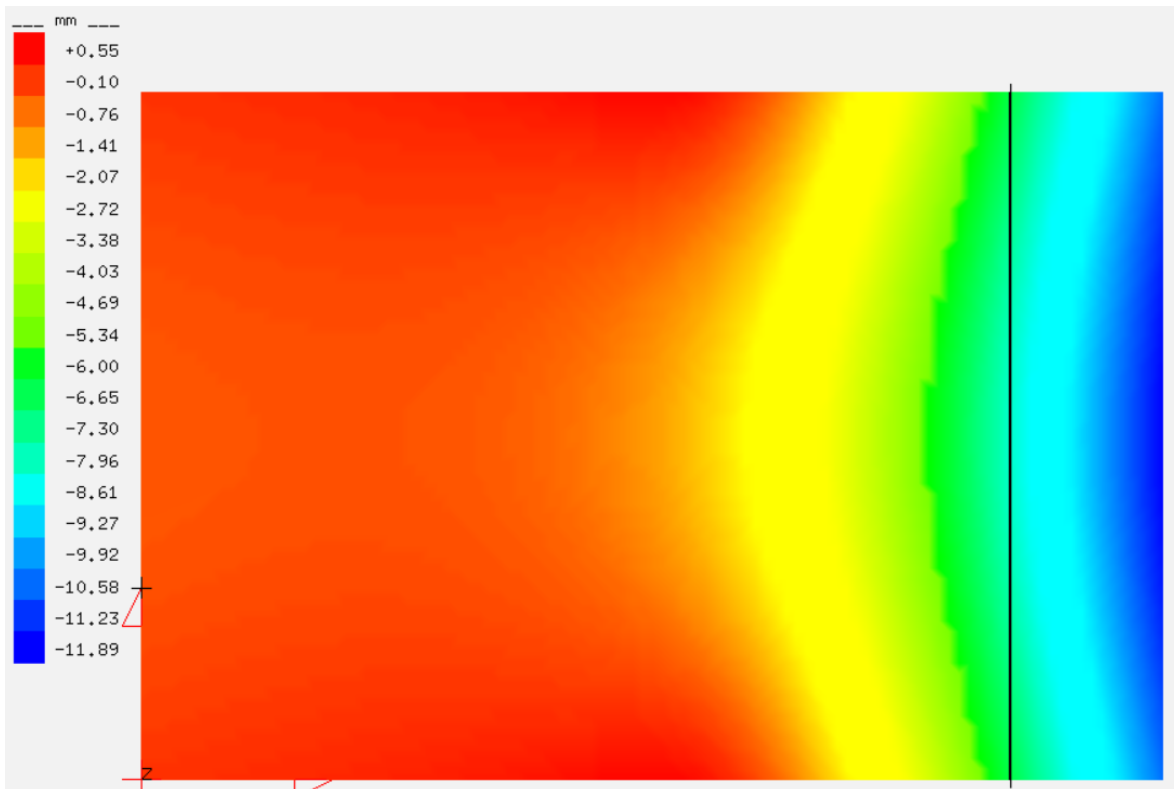
- $q = 0,93 \text{ kN/m}$ ($F = 1 \text{ kN}$)



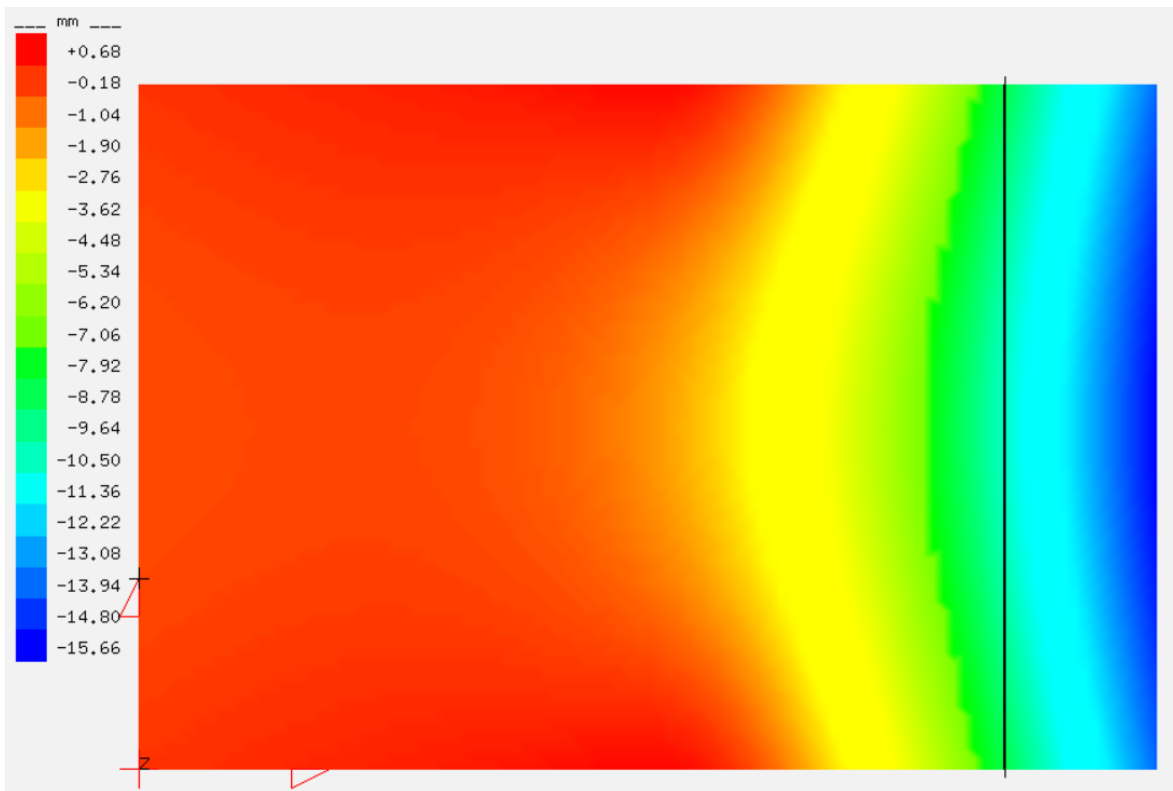
- $q = 1,86 \text{ kN/m}$ ($F = 2 \text{ kN}$)



- $q = 2,79 \text{ kN/m}$ ($F = 3 \text{ kN}$)



- $q = 3,72 \text{ kN/m}$ ($F = 4 \text{ kN}$)



9.4. Usporedba rezultata ispitivanja i numeričkog modela

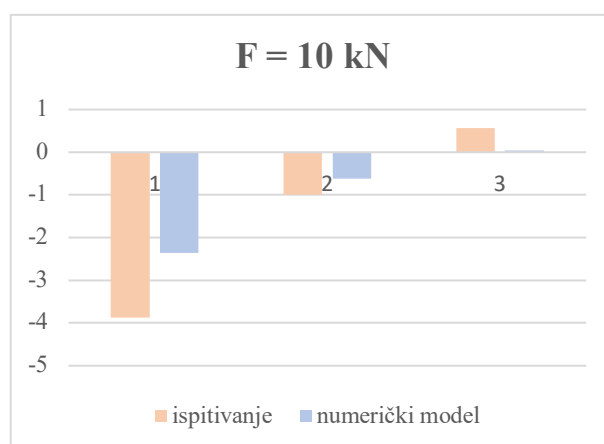
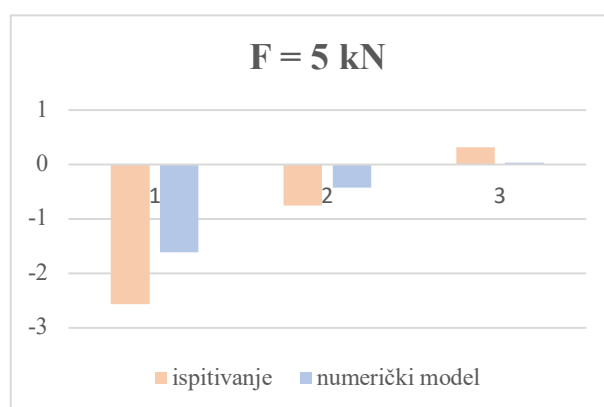
Numerički model je kalibriran po rezultatima ispitivanja u laboratoriju kako bi se dobili što sličniji rezultati i ponašanje elemenata. Kalibrirano je tako da su, osim svojstva materijala, korigirane i krutosti ležajeva u smjerovima x, y i z. Krutost se mjeri u silama po jedinici pomaka (u ovom slučaju N/mm) te određuje koliko je ležaj krut u kojem smjeru. Veće vrijednosti tih koeficijenata daju čvršći ležaj u određenim smjerovima. Također, i momenti krutosti su korigirani. Model je izrađen u programu Mepla SJ.

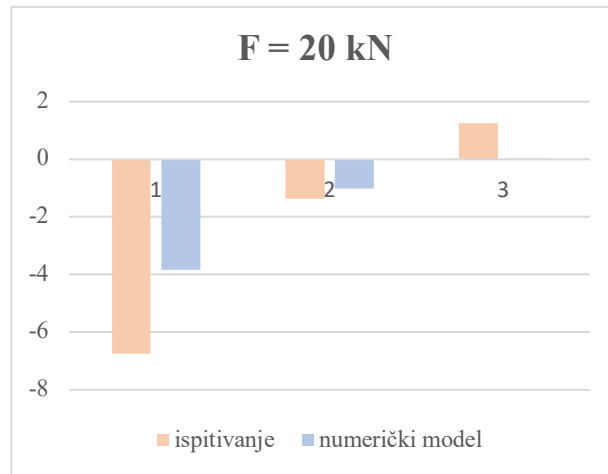
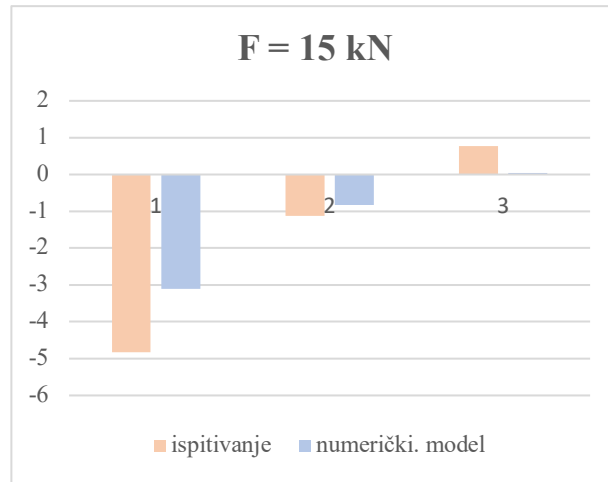
9.4.1. Staklena greda nadstrešnice

Za pokusno opterećenje 5, 10, 15 i 20 kN izmjereni su pomaci na mjestima P1, P2 i P3, slijedi usporedba rezultata iz softvera i iz laboratorijskog ispitivanja.

Tablica 7 Usporedba rezultata pomaka za staklenu gredu [mm]

| Mjerno mjesto | F = 5 kN | | F = 10 kN | | F = 15 kN | | F = 20 kN | |
|---------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | ispitivanje | numerički model | ispitivanje | numerički model | ispitivanje | numerički model | ispitivanje | numerički model |
| P1 | -2,56 | -1,61 | -3,87 | -2,36 | -4,82 | -3,10 | -6,74 | -3,84 |
| P2 | -0,75 | -0,42 | -1,00 | -0,62 | -1,13 | -0,82 | -1,38 | -1,01 |
| P3 | 0,32 | 0,04 | 0,56 | 0,04 | 0,77 | 0,04 | 1,25 | 0,04 |



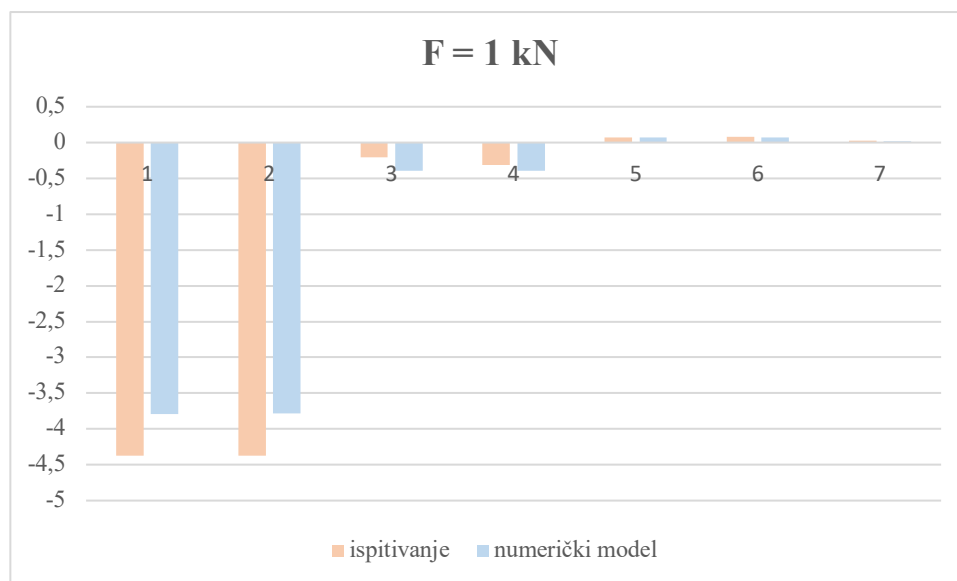


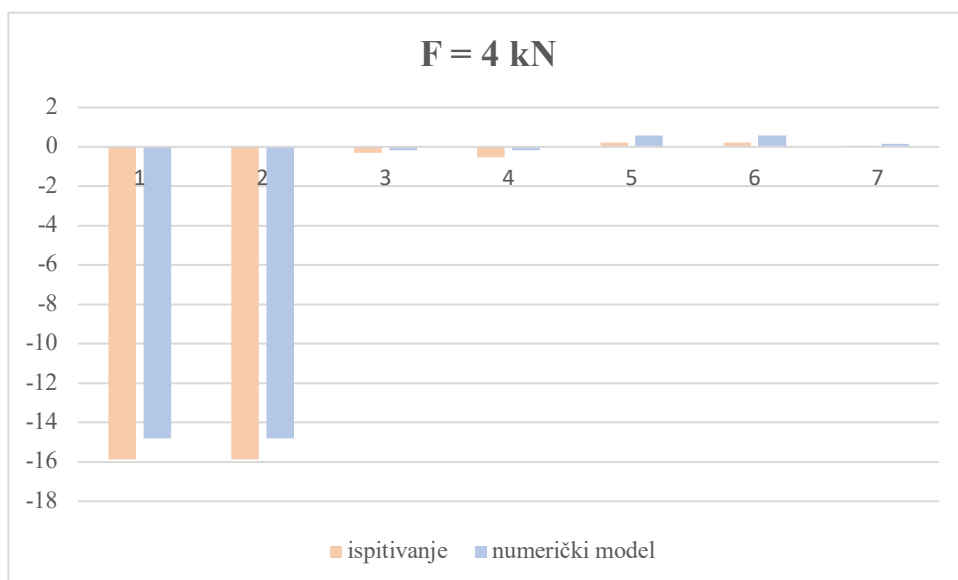
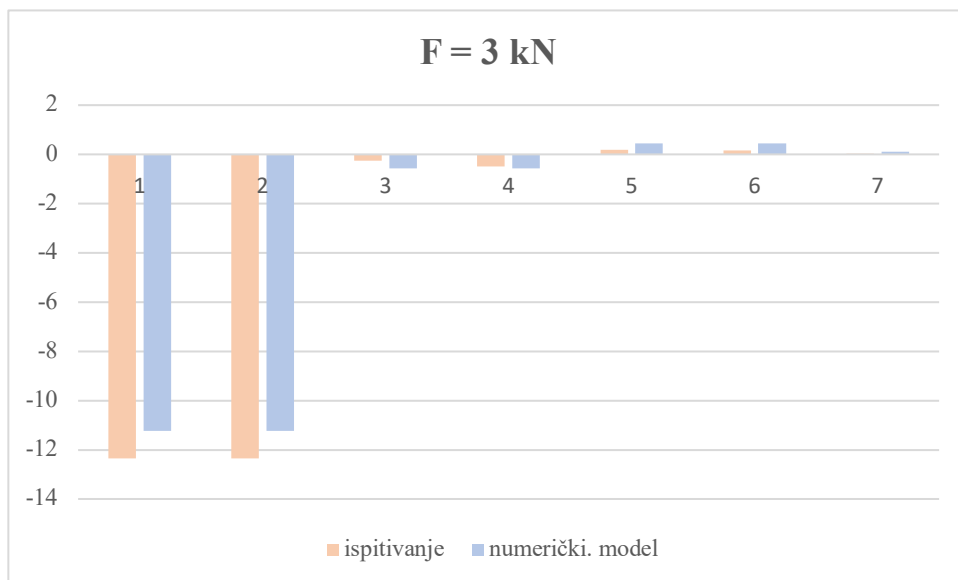
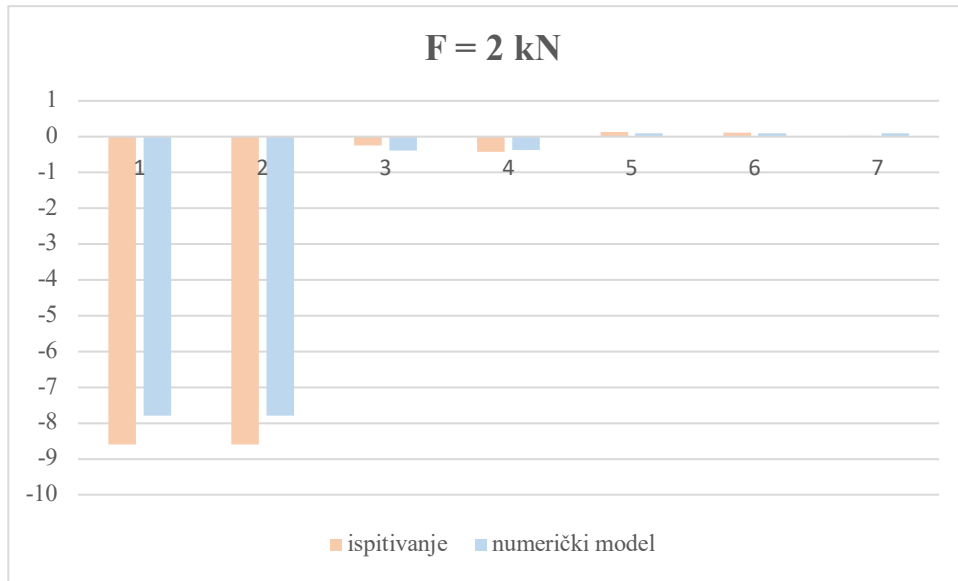
9.4.2. Stakleni pokrovni nosač nadstrešnice

Za pokusno opterećenje 1, 2, 3 i 4 kN izmjereni su pomaci na mjestima P1, P2, P3, P4, P5, P6 i P7, slijedi usporedba rezultata iz softvera i iz laboratorijskog ispitivanja.

Tablica 8 Usporedba rezultata pomaka za stakleni pokrov [mm]

| Mjerno mjesto | F = 1 kN | | F = 2 kN | | F = 3 kN | | F = 4 kN | |
|---------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | ispitivanje | numerički model | ispitivanje | numerički model | ispitivanje | numerički model | ispitivanje | numerički model |
| P1 | -4,37 | -3,79 | -8,59 | -7,80 | -12,34 | -11,23 | -15,89 | -14,80 |
| P2 | -4,37 | -3,78 | -8,59 | -7,80 | -12,34 | -11,23 | -15,89 | -14,80 |
| P3 | -0,21 | -0,39 | -0,24 | -0,38 | -0,26 | -0,56 | -0,29 | -0,18 |
| P4 | -0,31 | -0,39 | -0,43 | -0,37 | -0,49 | -0,56 | -0,53 | -0,18 |
| P5 | 0,07 | 0,07 | 0,13 | 0,10 | 0,18 | 0,45 | 0,21 | 0,58 |
| P6 | 0,08 | 0,07 | 0,12 | 0,10 | 0,17 | 0,45 | 0,21 | 0,58 |
| P7 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,10 | 0,04 | 0,12 | 0,05 | 0,15 |





Zaključak

Staklo možda nije najbolji izbor pri građenju nosivih elemenata konstrukcije jer nema dovoljno čvrstoće i otpornosti na opterećenja kao što imaju čelik, beton ili drvo, no ono se često koristi za prozore, fasade, pregradne stijene jer je izuzetno estetski atraktivno. Staklo je važan materijal u građevinskoj industriji, ali se primjenjuje na mjestima gdje su njegova čvrstoća i izdržljivost manje bitne.

U ovom radu prikazana je povijest stakla i kako je ono prije bilo izrađivano, ali i kako se danas radi. Također, objašnjene su mehaničke karakteristike stakla kao građevinskog materijala. Važno svojstvo materijala i njegov nedostatak je lom. Lom je često rezultat stalnog naprezanja, udaraca ili temperaturnog šoka. Opisuju se površinski nedostaci stakla te uzroci oštećenja i kako izbjeći lom stakla izradom sigurnosnog stakla. Da bi se to postiglo, važan dio u tome su obrade stakla, odnosno kaljenje i laminiranje.

Staklo kao građevinski materijal se sve češće koristi, a kako bi se to postiglo potrebno je slijediti norme i zahtjeve za staklene konstrukcije. Iako norme nisu u potpunosti razvijene i svaki komad stakla ima drugačija svojstva radi njegove izotropne strukture, određivanjem kriterija izvedbe za različite stupnjeve loma stakla, kao i određivanjem pravila za eksperimentalno ispitivanje, može se postići prihvatljiva i prilično konstantna razina sigurnosti u svakom projektu sa staklom.

Na kraju je analizirano ispitivanje elemenata stakla nadstrešnice gdje su obrađeni rezultati te je izrađen numerički model elemenata u softveru SJ Mepla koji je napravljen u svrhu proračuna staklenih dijelova konstrukcije te je napravljena kalibracija modela prema dobivenim eksperimentalnim rezultatima. Staklena nadstrešnica predstavlja dosta neobičan izbor materijala za konstrukciju zbog potencijalnih sigurnosnih razloga u slučaju loma stakla. Zato je izvedena sa sigurnosnim staklom, vrlo velike debljine, obrađeno kaljenjem te laminirano četveroslojnom PVB folijom. Ovaj primjer ukazuje na raznovrsnost primjene stakla, ono ostaje nezamjenjiv materijal koji kombinira estetiku i funkcionalnost na jedinstven način.

Literatura

1. Hajdinjak R. Gradimo staklom. Gornja Radgona, Slovenija: Reflex d.o.o.; 372 str.
2. <https://mtcopeland.com/blog/how-is-glass-used-for-construction/> [Internet]. Dostupno na: <https://mtcopeland.com/blog/how-is-glass-used-for-construction/>
3. Bos FP. Safety Concepts in Structural Glass Engineering. Toward an Integrated Approach. 2009.;592.
4. www.pilkington.com [Internet]. Dostupno na: <https://www.pilkington.com/>
5. Kozłowski M, Malewski A, Akmadžić V, Vrdoljak A. Glass in Structural Applications Primjena Stakla Kao Nosivog Elementa. 2019.;47:44–52. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/338608864>
6. Bon E. Structural Opportunities for Glass Signature of the author. 2003.;
7. Nursalam, 2016 metode penelitian, Fallis A. Shelby Introduction To Glass Science and Technology. Sv. 53, Journal of Chemical Information and Modeling. 2013. 1689–1699 str.
8. Stanuga G. Staklo na fasadama. Dražen Aničić, urednik. Zagreb: Institut građevinarstva Hrvatske; 134 str.
9. Vitro. Glass Breakage - Failure Mode and Stress Estimation. Glas Tech Doc. 2016.;1–12.
10. Bartolac M. Osnove mehanike loma, Uvod. 2022.
11. Bartolac M. Osnove mehanike loma, LEFM. 2022.
12. Berenjian A, Berenjian A, Whittleston G. History and manufacturing of glass Title History and manufacturing of glass History and Manufacturing of Glass. Am J Mater Sci [Internet]. 2017.;2017(1):18–24. Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.5923/j.materials.20170701.03><http://usir.salford.ac.uk/id/eprint/41631/>
13. www.pressglass.hr [Internet]. Dostupno na:

- <https://www.pressglass.hr/ponuda/specijalno-staklo/kaljeno-staklo-esg/>
14. toughened-glass-safety @ in.saint-gobain-glass.com [Internet]. Dostupno na: <https://in.saint-gobain-glass.com/toughened-glass-safety#no-back>
 15. www.pressglass.hr [Internet]. Dostupno na: <https://www.pressglass.hr/ponuda/specijalno-staklo/postupak-toplinskog-prozimanja-hst/>
 16. the-difference-between-heat-strengthened-and-t-76659004 @ ba.migoglass.org [Internet]. Dostupno na: <https://ba.migoglass.org/info/the-difference-between-heat-strengthened-and-t-76659004.html>
 17. Zang MY, Chen SH. Laminated Glass. Wiley Encycl Compos. 2011.;(September).
 18. Oktobar I. SMJERNICE ZA OCJENJIVANJE VIZUALNE KVALITETE , TOLERANCIJE I DIMENZIONIRANJE. 2017.;1–132. Dostupno na: <https://kristal.eu/wp-content/uploads/Smjernice-i-tolerancije-za-ocjenjivanje-vizualne-kvalitete-stakla.pdf>
 19. Rajčić V, Stepinac M. Lagane konstrukcije. 2008.
 20. www.glasscon.com [Internet]. Dostupno na: <https://www.glasscon.com/projects/structural-glass-roof-with-glass-fins/>
 21. Gere T, Kožar I. Osnovna svojstva stakla kao konstrukcijskog materijala i norme u primjeni. 2008.
 22. Belis J, Louter C, Mocibob D. COST Action TU0905 Mid-term Conference on Structural Glass. 2013. 600 str.
 23. Castori G, Speranzini E. Fracture strength prediction of float glass: The Coaxial Double Ring test method. Constr Build Mater. 2019.;225(December):1064–76.
 24. Westbrook JT, Bayne JF, Roe TA, Kim JS, Su PH, Ono T, i ostali. 72.2: Strength measurements of thin AMLCD panels. 48th Annu SID Symp Semin Exhib 2010, Disp Week 2010. 2010.;2(May 2010):1073–6.
 25. 4 Point Bending Test Machine [Internet]. 2020. Dostupno na: <https://www.universalgripco.com/astm-c158>

26. Antolinc D, Engineering G. Three-Point Bending Test of Laminated Glass With PVB and EVA Interlayers at Elevated Temperature. 2020.;(September).
27. Damjanović D, Krolo J, Skender A, Brkić Z, Pavlinić S. Bearnig capacity of laminated glass beam. Zagreb;
28. www.hrs.com [Internet]. Dostupno na: <https://www.hrs.com/en/hotel/dubrovnik/a-40986/>
29. Rak M, Damjanović D. Izvješće o ispitivanju. Zagreb; 2013.
30. sj_mepla @ www.mepla.net [Internet]. Dostupno na: https://www.mepla.net/en/sj_mepla
31. Magisano D, Leonetti L, Garcea G, Royer-Carfagni G. A constrained solid-shell model for the geometric nonlinear finite-element analysis of laminates with alternating stiff/soft layers. Applications to laminated glass. Int J Solids Struct [Internet]. 2023.;274(May):112287. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112287>