

Osnovna svojstva stakla kao konstrukcijskog materijala i norme u primjeni

Tatjana Gere, Ivica Kožar

Ključne riječi

staklo,
staklo kao konstrukcijski materijal,
svojstva,
opterećenje,
proračun,
staklena ploča

Key words

glass,
glass as structural material,
properties,
load,
analysis,
glass plate

Mots clés

verre,
verre comme matériau structurel,
propriétés,
charge,
analyse,
plaque de verre

Ключевые слова

стекло,
стекло как конструкционный материал,
свойства,
нагрузка, расчёт,
стеклянная плита

Schlüsselworte

Glas,
Glas als Konstruktionsmaterial,
Eigenschaften,
Belastung,
Berechnung,
Glasplatte

T. Gere, I. Kožar

Pregledni rad

Osnovna svojstva stakla kao konstrukcijskog materijala i norme u primjeni

U članku su navedene osnovne značajke stakla kao konstrukcijskog materijala i norme: američka norma za staklo ASTM E-1300-07, britanska norma BS 6262 te europska prednorma prEN 13474. Američka i britanska norma prilagođene su proračunu staklenih ploča opterećenih kontinuiranim jednoliko raspoređenim opterećenjem. Europska prednorma bazira se na već poznatom proračunu prema parcijalnim faktorima sigurnosti te razlikuje proračun staklenih ispuna i nosivih staklenih elemenata

T. Gere, I. Kožar

Subject review

Basic properties of glass as structural material and application standards

Basic properties of glass as structural material are presented, and relevant standards are given: American standard for glass ASTM E-1300-07, British standard BS 6262, and the European pre-standard prEN 13474. The American and British standards have been adjusted to the analysis of glass plates subjected to the continuous uniformly distributed load. The European pre-standard is based on the already known analysis according to the partial safety factor, and it differentiates the glass fill analysis from the load bearing glass elements.

T. Gere, I. Kožar

Ouvrage de synthèse

Propriétés principales du verre utilisée comme matériau structurel et normes applicables

Les propriétés principales du verre considéré comme matériau structurel sont présentées, et les normes applicables sont fournies: norme américaine pour verre ASTM E-1300-07, norme britannique BS 6262, et projet de norme européenne prEN 13474. La norme américaine et la norme britannique ont été harmonisées pour l'analyse des plaques de verre assujetties à la charge continue et répartie de manière uniforme. Le projet de norme européenne est basé sur l'analyse connue selon le coefficient partiel de sécurité et, dans ce projet de norme, la distinction est faite entre l'analyse de remplissage d'espace par verre et les éléments portants de verre.

И. Кошар

Обзорная работа

Основные свойства стекла как конструкционного материала и нормы в применении

В статье приведены основные свойства стекла как конструкционного материала и нормы: американская норма для стекла ASTM E-1300-07, британская норма BS 6262, а также европейская преднорма prEN 13474. Американская и британская нормы применимы к расчёту стеклянных плит, нагружённых непрерывной равномерно распределённой нагрузкой. Европейская преднорма базируется на уже известном расчёте, согласно парциальным факторам надёжности и различает расчёт стеклянных заполнений и несущих стеклянных элементов.

T. Gere, I. Kožar

Übersichtsarbeit

Grundeigenschaften von Glas als Konstruktionsmaterial und Normen in Anwendung

Im Artikel sind die Grundkennzeichen von Glas als Konstruktionsmaterial und folgende Normen angeführt: die USA-Norm für Glas ASTM E-1300-07, die britische Norm BS 6262 und die europäische Vornorm EN 13474. Die amerikanische und britische Norm sind der Berechnung von Glasplatten unter kontinuierter gleichförmiger Belastung angepasst. Die europäische Vornorm beruht auf der schon bekannten Berechnung nach teilweisen Sicherheitsfaktoren und unterscheidet die Berechnung der Glasausfüllung und der Glastragelemente.

Autori: Mr. sc. **Tatjana Gere**, dipl. ing. građ., RI ISA d.o.o, Rijeka; prof. dr. sc. **Ivica Kožar**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

1 Uvod

Staklo se danas sve više rabi u građevinarstvu, ponekad čak i kao konstrukcijski materijal. U članku su opisane neke karakteristike stakla kao konstrukcijskog materijala i neke specifičnosti proračuna.

Kako se danas u građevinarstvu rabi više vrsta stakala s različitim čvrstoćama i toplinskim svojstvima, u prvom dijelu članka navode se osnovne značajke pojedinih vrsta stakala.

Nakon opisa glavnih vrsta stakala, slijedi pregled odgovarajućih norma za staklo: američka norma ASTM E1300-07, britanske norme BS 6262 te europske prednorme prEN 13474. Dan je primjer proračuna staklene ploče prema nevedenim normama.

U završnom poglavlju uspoređeni su i komentirani rezultati proračuna ploče prema navedenim normama.

2 Staklo kao građevni materijal

2.1 Obično staklo

U konstrukcijskom smislu, obično staklo jest staklo koje nije toplinski obrađeno radi poboljšanja mehaničkih karakteristika. Ono se ponaša idealno krhko, odnosno potpuno elastično sve do trenutka sloma. Krhotine takvog stakla su opasne zbog njihove veličine i oštine. Kod stakla nema popuštanja niti zamora kako je poznato u metalurgiji. Lom ponajprije ovisi o broju površinskih pukotina (površinska oštećenja), nivou naprezanja, veličini napregnute površine i trajanju opterećenja. Pukotine u staklu mogu biti inherentne, ali mogu biti uzrokovane i rezanjem, brušenjem i bušenjem. Isto tako, broj oštećenja ovisi o okolini kojom je staklo okruženo tijekom uporabe. Vlažnost zraka pospješuje rast pukotina. Rezani rubovi stakla obično su slabiji od njegovih unutarnjih površina, zbog čega su dopuštena naprezanja za staklene grede manja od onih za staklene ploče. Na temelju svega navedenog, predviđanje loma stakla podložno je statističkim zakonitostima.

2.2 Kaljeno staklo

Kaljeno se staklo (eng. *toughned glass*, am. *fully tempered glass*) grije na 620 °C i naglo hladi naletima hladnog zraka. Na taj se način najprije hladi i skrućuje površina stakla. Kako se i unutrašnjost hladi, ona se nastoji stisnuti uzrokujući tlačna naprezanja na površini stakla, a vlačna naprezanja u unutrašnjosti.

Kod kaljenog se stakla pukotine ne šire zbog tlačnih naprezanja na površini, pa takvo staklo može podnijeti veća opterećenja od običnog stakla. Staklo može sadržavati i nečistoće. Kod običnog stakla one obično ne uzrokuju

probleme, a kod kaljenog stakla nečistoće su uzrok nenadanog lomljenja bez ikakva vidljivog razloga. Uzrok su tome male količine nikal sulfida koje doživljavaju određenu promjenu faze kod koje one ekspandiraju. Na taj način staklo puca i lomi se na vrlo sitne komade nalik na kišu malih kockica. Postoji proces kontrole kvalitete kaljenog stakla (eng. *heat-soaking*) kojim većina stakla prođe kroz promjenu faze u tvornici.

Komadi razbijenog kaljenog stakla su manji ili jednaki debljini stakla, pa se ono upotrebljava i kao sigurnosno staklo.

2.3 Toplinsko ojačano staklo

Toplinski ojačano staklo (eng. *tempered glass*, am. *heat strengthened glass*) izraz je koji se rabi za kaljeno staklo koje se zagrijava na nižu temperaturu pa je površinska napetost manja. Lom toplinski ojačanog stakla sličniji je lomu običnog nego kaljenog stakla.

2.4 Laminirano staklo

Laminirano se staklo sastoji od dvije ili više staklenih ploha međusobno povezanih prozirnim plastičnim među-slojem. Za povezivanje se rabe dva osnovna materijala: polivinilbutiral (PVB) ili smole kao npr. akrilik. Debljina plastičnog sloja iznosi od 0,4 do 6 mm. Sve tri vrste stakla, obično, kaljeno i toplinski ojačano, mogu se rabiti za povezivanje u laminirano staklo.

Krutost laminiranog stakla ovisi o posmičnoj otpornosti veze staklene plohe i PVB folije. Faktori koji utječu na ponašanje te veze su sljedeći: trajanje opterećenja, debljina međusloja, temperatura i pozicija međusloja u odnosu na težište presjeka. Primjerice, dugotrajno opterećenje (snijeg, vlastita težina) i povećana temperatura čine vezu između dviju staklenih ploha podatljivijom zbog relaksacije PVB folije.

Laminirano je staklo vrlo pogodno za upotrebu u sigurnosnom smislu. Pri lomu stakla međusloj i dalje povezuje razbijene komade stakla. To smanjuje opasnost od ozljeda uzrokovanih padom staklenih krhotina. Deblji međuslojevi povećavaju sigurnost od prodiranja pri udaru. Laminirana stakla od više slojeva pružaju još veću sigurnost.

2.5 Izolacijsko staklo

Izolacijsko se staklo sastoji od dviju staklenih ploča razdvojenih po obodu šupljim profilom (eng. *spacer*), obično aluminijskim, ali može se upotrijebiti i plastični koji ima bolje toplinske karakteristike. Profil je ispunjen materijalom za isušivanje koji održava suhoću zraka u šupljini između dvaju stakala. Staklene se ploče zajedno sa šupljim profilom brtve po obodu. Pri tome se rabi silikon.

Brtvljenjem se stakla spajaju, omogućuju se mali međusobni pomaci i onemogućuje se prodiranje vode.

Dimenzije šupljina variraju od 6 do 20 mm. Šupljine se mogu puniti zrakom ili drugim inertnim plinom (najčešće argonom). Odabir plina uvjetovan je željenim toplinskim svojstvima stakla.

Glavne prednosti izolacijskog stakla su bolja toplinska i zvučna izolacija.

Temperaturne promjene utječu na ponašanje izolacijskog stakla. Niski atmosferski tlak i povećane temperature uzrokuju ekspanziju unutarnjeg plina. Visoki atmosferski tlak kombiniran s niskom temperaturom uzrokuje kontrakciju plina. Kod takvih atmosferskih promjena može doći do znatnih vrijednosti progiba stakla koji negativno utječu na izgled zgrade.

3 Norme za proračun staklenih konstrukcija

Staklo je složeni materijal čija nosivost ovisi o mnogim čimbenicima i još uvijek nije potpuno istražen. Stoga, mnoge norme za proračun staklenih konstrukcija nisu zadovoljavajuće što se tiče optimalnog dimenzioniranja. Osim toga, norme nisu usklađene i razlike koje proizlaze iz proračuna prema raznim su normama velike. Kako mnoge zemlje nemaju svoje norme za staklo, često se za proračun staklenih konstrukcija primjenjuju dopuštena naprezanja iz različitih izvora koja se međusobno previše razlikuju.

U nastavku su razložene sljedeće norme za proračun staklenih konstrukcija: američka norma ASTM E1300-07, britanska norma BS 6262 te europska prednorma prEN 13474. Američka norma priznata je u zemljama koje nemaju svoje norme za staklo, britanska norma veže se za britansko i irsko tržište u kojem izgradnja stakleno-aluminijskih pročelja ima vrlo velik udio, europska prednorma je pokušaj da se proračun staklenih konstrukcija normira na cjelokupnom europskom tržištu.

3.1 Američka norma ASTM E1300 - 07

ASTM E1300 - 07 je norma koja je danas najviše u upotrebi za proračun staklenih ploča opterećenih jednolikim kontinuiranim opterećenjem i slobodno oslonjenih na jednoj, dvije, tri ili četiri strane. Dvoznamenkasti broj, iza broja 1300, označava godinu izdanja, u ovom slučaju je to 2007. Obuhvaćeni su svi tipovi stakla (obično, kaljeno, toplinski ojačano i laminirano), kao i pojedinačna i izolacijska stakla. U izrazima za nosivost stakla uključeni su faktori površinski oštećenog stakla koje je nekoliko godina u upotrebi (sa sitnim abrazijama na površini izloženoj vanjskim utjecajima).

Američka norma za proračun staklenih konstrukcija, ASTM E1300 osniva se na teoriji sloma koja vodi računa o trajanju opterećenja, o oštećenjima na površini stakla, o

geometrijskoj nelinearnosti te o veličini površine koja je izložena opterećenju. Ta se teorija zove *GFPM – Glass Failure Prediction Model* i razvijena je posebno za kvadratne staklene ploče opterećene jednoliko raspoređenim opterećenjem. To su uglavnom staklene površine suvremenih pročelja opterećene vjetrom. Za ostale slučajeve opterećenja u istoj normi dana su dopuštena naprezanja koja se mijenjaju ovisno o trajanju opterećenja i o tome radi li se o opterećenom rubu ili unutrašnjem dijelu ploče. S obzirom na to da mnoge nacionalne norme nisu potpune, ASTM E1300 prihvaćen je i na europskom tržištu (Velika Britanija, Irska, Italija, itd.) te je uključena u sadržaj International Building Codea.

GFPM povezuje vjerojatnost loma ploče s raspodjelom vlačnih naprezanja i karakteristikama površinskih pukotina. Vlačna se naprezanja određuju nelinearnim proračunom metodom konačnih razlika, dok se površinske pukotine opisuju sa dva parametra, m i k . *GFPM* uključuje sve utjecajne faktore kao što su npr. trajanje opterećenja i geometrijski oblik ploče.

3.1.1 Teorija otpornosti stakla na kojoj se zasniva GFPM

GFPM se osniva na teoriji prema kojoj vlačna naprezanja u staklu uzrokuju velike koncentracije naprezanja u mikropukotinama koje se nalaze na površini stakla. Oštećenja koja se nalaze na površini stakla nastaju u procesu proizvodnje i tijekom upotrebe zbog raznih vanjskih faktora. Lom nastaje kada naprezanje u jednoj od pukotina poraste toliko da inicira rast pukotine. Pukotina zaslužna za početak loma stakla zove se *kritična pukotina*. Koncentracije naprezanja u pukotini ovise o geometrijskom obliku i orijentaciji pukotine u odnosu na smjer glavnih vlačnih naprezanja. Zbog toga lokacija pukotine koja inicira lom stakla nije nužno na mjestu maksimalnih glavnih vlačnih naprezanja.

Naprezanja u pukotini rastu sve dok je ona izložena vlačnim silama. Dakle, čvrstoća stakla ovisi o trajanju opterećenja. Što je dulje trajanje opterećenja, to su manja vlačna naprezanja koja uzrokuju lom. Izraz [7] koji je prihvaćen za opisivanje odnosa čvrstoća stakla – trajanje opterećenja jest:

$$K_f = \int_0^{t_f} [\sigma(t)]^n dt \quad (1)$$

$\sigma(t)$ su vlačna naprezanja u pukotini, t_f je trajanje opterećenja, a n je konstanta za koju je eksperimentalno utvrđena vrijednost 16. Izraz (1) omogućuje nam da utvrdimo konstantno nepreznje trajanja t_d koje ima isti utjecaj na pukotinu kao i proizvoljno naprezanje trajanja t :

$$\tilde{\sigma}_{t_d} = \left[\frac{\int_0^{t_d} \sigma(t)^n dt}{t_d} \right]^{1/n} \quad (2)$$

Kako je norma ASTM E1300 izrađena za proračun otpornosti staklenih ploča za kratkotrajno opterećenje (3 sekunde), prema istoj normi izraz (2) služi za pretvorbu opterećenja različitih duljina trajanja u trosekundno opterećenje:

$$q_3 = \sum_{i=1}^{i=j} q_i \left[\frac{d_i}{3} \right]^{1/n} \quad (3)$$

j je broj različitih opterećenja (npr. $j = 2$ ako je ploča opterećena snijegom i vjetrom), d_i je trajanje svakoga pojedinog opterećenja u sekundama, q_i je intenzitet pojedinog opterećenja.

3.1.2 Formulacija vjerojatnosti loma

Mikropukotine na površini stakla mogu znatno varirati, što dovodi do raznih vrijednosti naprezanja loma stakla. Zbog toga se pri određivanju nosivosti pojedine staklene ploče primjenjuje teorija vjerojatnosti. Izraz koji najbolje opisuje vjerojatnost loma stakla [8] P_f jest:

$$P_f = 1 - e^{-B} \quad (4)$$

B je funkcija koja određuje rizik loma. Ona uključuje sve faktore koji utječu na lom stakla kao što su intenzitet i trajanje opterećenja, površina stakla izložena vlačnim naprezanjima, geometrijski oblik i orijentacija površinskih pukotina. Trajanje opterećenja se jednostavno uzme u obzir pretvorbom intenziteta opterećenja proizvoljnog trajanja u trosekundno ekvivalentno opterećenje uporabom izraza (3). Svi ostali faktori sadržani su u funkciji B koja je integral preko ploštine stakla A :

$$B = k \int_A \left[c(x, y) \bar{\sigma}_{\max}(q, x, y) \right]^m dA \quad (5)$$

gdje je $c(x, y)$ dvoosni popravni faktor naprezanja koji uzima u obzir odnos orijentacije pukotine sa smjerom glavnih vlačnih naprezanja:

$$c = \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{\alpha} (\cos^2 \theta + n \sin^2 \theta)^m d\theta \right]^{1/m} \quad (6)$$

$\bar{\sigma}_{\max}(q, x, y)$ je maksimalno ekvivalentno glavno naprezanje, k i m su parametri koji opisuju površinske pukotine, n je odnos najmanjih i najvećih glavnih naprezanja.

Izraz (5) omogućuje nam da odredimo vjerojatnost loma stakla ako su poznata dva parametra površinskih pukotina, m i k . Isto tako, ako znamo da je uobičajena tražena vjerojatnost loma vertikalnih stakala jednaka 0,008 ili 8 stakala na 1000, tada iz istog izraza možemo odrediti nosivost staklene ploče q . Parametri površinskih pukotina m i k određeni su eksperimentalnim putem ispitivanjem na slom novih staklenih ploča te onih koje su u

upotrebi nekoliko godina. Za potrebe norme ASTM E1300 proračunani su parametri m i k za staklo koje je u upotrebi oko 20 godina i iznose: $m = 7$, $k = 2,86 \times 10^{-53} \text{ N}^{-7} \text{ m}^{12}$.

3.2 Britanska norma BS 6262-3

Treći dio britanske norme za staklo, BS 6262-3, daje nam preporuke za odabir debljine četverostrano oslonjene staklene ploče opterećene vjetrom. Vjetar treba biti proračunan prema britanskoj normi za proračun opterećenja vjetrom BS 6399-2, koji nam za rezultat daje jednosekundni maksimalni nalet vjetra. Kako trajanje opterećenja utječe na nosivost stakla, prema normi BS 6262 za odabir stakla koje je opterećeno dugotrajnim opterećenjem potrebno je zatražiti detaljne upute od proizvođača stakla. Norma ne daje nikakve preporuke za proračun staklenih nosivih elemenata.

3.3 Europska prednorma prEN 13474

Europska prednorma za staklo osniva se na poznatom proračunu prema parcijalnim koeficijentima sigurnosti: $\gamma_F F_k < k_{\text{mod}} R_k / \gamma_M$ ili $F_{\text{Sd}} < R_{\text{Sd}}$. F_k i R_k su karakteristične vrijednosti djelovanja i otpornosti, γ_F i γ_M su parcijalni koeficijenti sigurnosti za djelovanje i otpornost, a k_{mod} je faktor koji vodi računa o trajanju opterećenja. F_{Sd} i R_{Sd} nazivamo proračunskim vrijednostima djelovanja i otpornosti (*design value*).

Proračunska vrijednost otpornosti stakla (*design value*) određuje se množenjem vlačne čvrstoće stakla popravnim faktorima odnosno koeficijentima prema sljedećim izrazima:

$$f_{g,d} = \frac{k_{\text{mod}} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} \text{ - obično staklo} \quad (7)$$

$$f_{g,d} = \left(\frac{k_{\text{mod}} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,v}} \right) \text{ - toplinski obrađeno staklo} \quad (8)$$

$f_{g,k}$ i $f_{b,k}$ predstavljaju karakterističnu vrijednost vlačne čvrstoće stakla. Faktor k_{mod} vodi računa o trajanju opterećenja: $k_{\text{mod}} = 0,663 t^{1/16}$, gdje je t trajanje opterećenja. Za vjetar k_{mod} iznosi 0,74, a za vlastitu težinu 0,29. k_{sp} je faktor koji ovisi o površinskoj obradi stakla. Za obično lijevano staklo on iznosi 1,0. Faktor se smanjuje za staklo koje ima površinsku obradu, kao npr. emajl. k_v je faktor koji ovisi od načina kaljenja.

$\gamma_{M,A}$ i $\gamma_{M,v}$ su parcijalni koeficijenti za materijal, $\gamma_{M,A}$ odnosi se na obično staklo i iznosi 1,8, dok se $\gamma_{M,v}$ odnosi na toplinski ili kemijski obrađeno staklo i iznosi 1,2.

Karakteristična je vrijednost vlačne čvrstoće običnog stakla 45 N/mm². Karakteristična je vrijednost vlačne čvrstoće za toplinski ojačano staklo 70 N/mm², a za kaljeno staklo 120 N/mm². U slučaju *emajliranog* stakla nosivost toplinski ojačanog stakla ista je kao ona običnog stakla, 45 N/mm², dok se nosivost kaljenog stakla smanjuje sa 120 na 75 N/mm².

Kada proračunavamo izolacijsko staklo ukupno opterećenje se prenosi na oba stakla, i to razmjerno njihovim krutostima. Pojednostavnjena je formula za proračun izolacijskog stakla opterećenog vjetrom (ispunsko staklo):

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2) \gamma_Q Q_k = (\delta_1 + \phi\delta_2) 1,1 Q_k \text{ - proračunsko opterećenje na vanjsko staklo} \quad (9)$$

$$F_{d,2} = (1 - \phi) \delta_2 \gamma_Q Q_k = (1 - \phi) \delta_2 1,1 Q_k \text{ - proračunsko opterećenje na unutarnje staklo} \quad (10)$$

Kako se radi o ispunskom staklu, prema prEN 13474-3 parcijalni je koeficijent na strani djelovanja $\gamma_Q = 1,1$ (da je riječ o nosivom elementu bilo bi $\gamma_Q = 1,5$). Q_k je karakteristična vrijednost opterećenja vjetrom proračunata prema odgovarajućoj europskoj normi za proračun vjetra; δ_1 i δ_2 su faktori raspodjele opterećenja na pojedina stakla izolacijskog paketa:

$$\delta_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_2^3}, \delta_2 = \frac{h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} = 1 - \delta_1, \quad (11)$$

h_1 i h_2 su debljine pojedinih staklenih ploča, ϕ je faktor izolacijskog stakla koji uzima u obzir stišljivost zračnog sloja između dvaju stakala:

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4}, a^* = 28,9 \left(\frac{s \cdot h_1^3 \cdot h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) k_5} \right)^{0,25} \quad (12)$$

a - jedna od dimenzija ploče, ako se radi o pravokutnoj ploči to je kraća stranica

a^* - karakteristična duljina ploče

s - debljina zračnog prostora između dvaju stakala

k_5 - faktor promjene volumena zračnog prostora koji ovisi o odnosu kraće i duže stranice ploče $\lambda = a/b$. Za $\lambda = 1$ $k_5 = 0,0190$:

4 Primjer proračuna staklene ploče

Odredit će se nosivost za kratkotrajno jednoliko raspoređeno opterećenje četverostrano oslonjene staklene ploče dimenzija 2,0 x 2,0 m. Radi se o izolacijskom staklu sljedeće konfiguracije: 6 mm unutarnje staklo, 8 mm vanjsko staklo. Razmatrat će se obično, toplinski ojačano i kaljeno staklo.

4.1 ASTM E1300-07

Prema normi ASTM E1300-07 određuje se nosivost pojedine staklene ploče određene debljine:

$$LR = GTF \cdot LS \cdot NFL$$

LR - load resistance, nosivost u kPa

GTF - glass type factor, faktor tipa stakla

LS - load share factor, faktor raspodjele opterećenja (samo za izolacijsko staklo)

NFL - non-factored load, nefaktorirano opterećenje u kPa

Faktor tipa stakla (GTF) je koeficijent koji uzima u obzir toplinsku obradu stakla te služi za pretvorbu nosivosti stakla koje nije toplinski obrađeno u ono koje to jest.

Faktor raspodjele opterećenja (LS) je koeficijent za raspodjelu opterećenja razmjerno krutostima. Odnosi se na izolacijsko staklo koje je sastavljeno od dvije staklene ploče koje dijeli zrak. Za svako pojedino staklo izolacijskog paketa faktor raspodjele opterećenja iznosi: $LS1 = (t_1^3 + t_2^3)/t_1^3$, $LS2 = (t_1^3 + t_2^3)/t_2^3$, gdje su t_1 i t_2 debljine pojedinih staklenih ploha. Može se primijetiti da je za raspodjelu opterećenja uzeta u obzir samo krutost stakla na savijanje, iako se kod većih dimenzija stakla i određenih uvjeta oslanjanja uz krutost na savijanje u staklu pojavljuje i membranska krutost koja je izražena pojavom uzdužnih sila u staklu (geometrijska nelinearnost).

Nefaktorirano opterećenje (NFL) predstavlja nosivost pojedine ploče za staklo koje nije kaljeno. Dijagrami prema kojima se određuje nosivost stakla, a koji se nalaze u normi, napravljeni su prema izrazu (5) iz teorije *GFPM*. Vjerojatnost loma jest 0,008.

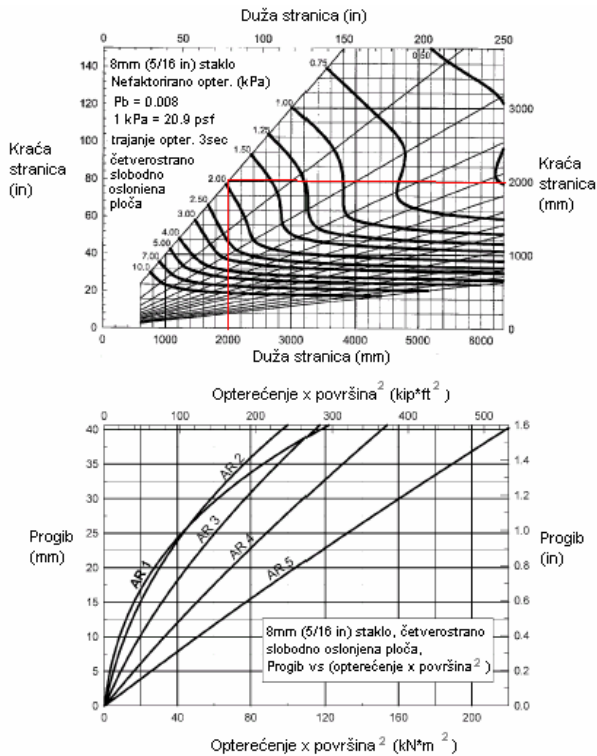
Tablica 1. Određivanje faktora tipa stakla (GTF) izolacijskog paketa za kratkotrajno opterećenje (ASTM E1300-07)

Staklo br.1	Staklo br.2					
Monolitno ili laminirano staklo	Monolitno ili laminirano staklo					
	AN		HS		FT	
	GTF1	GTF2	GTF1	GTF2	GTF1	GTF2
AN	0,9	0,9	1,0	1,9	1,0	3,8
HS	1,9	1,0	1,8	1,8	1,9	3,8
FT	3,8	1,0	3,8	1,9	3,6	3,6
GTF1 = GTF2 = 0,9 - za obično staklo GTF1 = GTF2 = 1,8 - za toplinski ojačano staklo GTF1 = GTF2 = 3,6 - za kaljeno staklo						

Tablica 2. Određivanje faktora raspodjele opterećenja (LS) izolacijskog paketa (ASTM E1300-07)

Staklo br.1	Staklo br.2																					
Monolitno staklo	Monolitno staklo - kratkotrajno ili dugotrajno opterećenje ili laminirano staklo - samo kratkotrajno opterećenje																					
Nominalna debljina	2.5		2.7		3		4		5		6		8		10		12		16		19	
	(3/32)		(lami)		(1/8)		(5/32)		(3/16)		(1/4)		(5/16)		(3/8)		(1/2)		(5/8)		(3/4)	
mm (in.)	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2	LS1	LS2
2.5 (3/32)	2.00	2.00	2.73	1.58	3.48	1.40	6.39	1.19	10.5	1.11	18.1	1.06	41.5	1.02	73.8	1.01	169	1.01	344	1.00	606	1.00
2.7 (lami)	1.58	2.73	2.00	2.00	2.43	1.70	4.12	1.32	6.50	1.18	10.9	1.10	24.5	1.04	43.2	1.02	98.2	1.01	199	1.01	351	1.00
3 (1/8)	1.40	3.48	1.70	2.43	2.00	3.18	1.46	4.83	1.26	7.91	1.14	17.4	1.06	30.4	1.03	68.8	1.01	140	1.01	245	1.00	415
4 (5/32)	1.19	6.39	1.32	4.12	1.46	3.18	2.00	2.76	1.57	4.18	1.31	8.53	1.13	14.5	1.07	32.2	1.03	64.7	1.02	113	1.01	200
5 (3/16)	1.11	10.5	1.18	6.50	1.26	4.83	1.57	2.76	2.00	2.00	2.80	1.56	5.27	1.23	8.67	1.13	18.7	1.06	37.1	1.03	64.7	1.02
6 (1/4)	1.06	18.1	1.10	10.9	1.14	7.91	1.31	4.18	1.56	2.80	2.00	2.00	3.37	1.42	5.26	1.23	10.8	1.10	21.1	1.05	36.4	1.03
8 (5/16)	1.02	41.5	1.04	24.5	1.06	17.4	1.13	8.53	1.23	5.27	1.42	3.37	2.00	2.00	2.80	1.56	5.14	1.24	9.46	1.12	15.9	1.07
10 (3/8)	1.01	73.8	1.02	43.2	1.03	30.4	1.07	14.5	1.13	8.67	1.23	5.26	1.56	2.80	2.00	2.00	3.31	1.43	5.71	1.21	9.31	1.12
12 (1/2)	1.01	169	1.01	98.2	1.01	68.8	1.03	32.2	1.06	18.7	1.10	10.8	1.24	5.14	1.43	3.31	2.00	2.00	3.04	1.49	4.60	1.28
16 (5/8)	1.00	344	1.01	199	1.01	140	1.02	64.7	1.03	37.1	1.05	21.1	1.12	9.46	1.21	5.71	1.49	3.04	2.00	2.76	1.57	1.57
19 (3/4)	1.00	606	1.00	351	1.00	245	1.01	113	1.02	64.7	1.03	36.4	1.07	15.9	1.12	9.31	1.28	4.60	1.57	2.76	2.00	2.00

LS1 = 1,42 - vanjsko staklo, 8 mm
 LS2 = 3,37 - unutarnje staklo, 6 mm



NFL1 = 1,95 - vanjsko staklo, 8 mm

Slika 1. Dijagrami za određivanje nosivosti i progiba četverostrano slobodno oslonjene staklene ploče debljine 8 mm (ASTM E1300-07)

Obično staklo

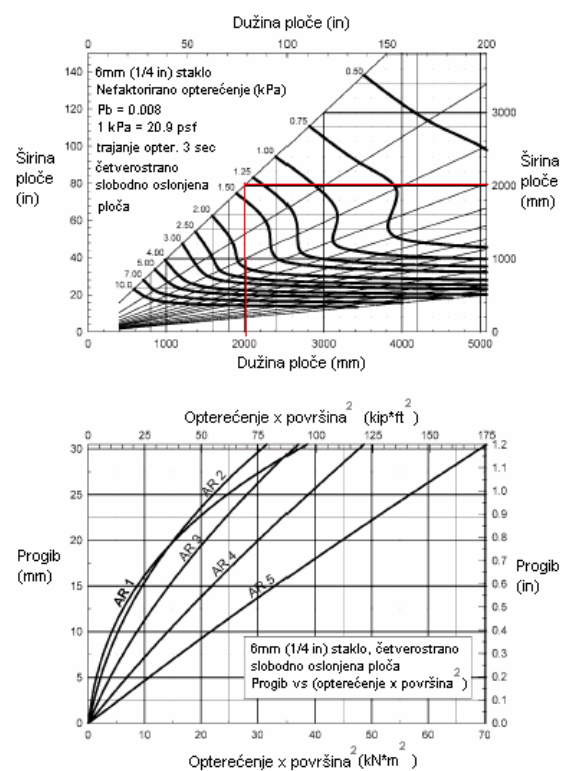
Nosivost vanjskog stakla, 8 mm:

$$LR1 = 0,9 \times 1,42 \times 1,95 = 2,49 \text{ kPa}$$

Nosivost unutarnjeg stakla, 6 mm:

$$LR2 = 0,9 \times 3,37 \times 1,38 = 4,18 \text{ kPa}$$

Nosivost ploče je manja od dviju dobivenih vrijednosti, dakle: **LR = 2,49 kPa.**



NFL2 = 1,38 - unutarnje staklo, 6 mm

Slika 2. Dijagrami za određivanje nosivosti i progiba četverostrano slobodno oslonjene staklene ploče debljine 6 mm (ASTM E1300-07)

Toplinski ojačano staklo

Nosivost vanjskog stakla, 8 mm:

$$LR1 = 1,8 \times 1,42 \times 1,95 = 4,98 \text{ kPa}$$

Nosivost unutarnjeg stakla, 6 mm:

$$LR2 = 1,8 \times 3,37 \times 1,38 = 8,37 \text{ kPa}$$

Nosivost ploče je manja od dviju dobivenih vrijednosti, dakle: **LR = 4,98 kPa.**

Kaljeno staklo

Nosivost vanjskog stakla, 8 mm:

$$LR1 = 3,6 \times 1,42 \times 1,95 = 9,97 \text{ kPa}$$

Nosivost unutarnjeg stakla, 6 mm:

$$LR2 = 3,6 \times 3,37 \times 1,38 = 16,74 \text{ kPa}$$

Nosivost ploče je manja od dviju dobivenih vrijednosti, dakle: **LR = 9,97 kPa**.

4.2 BS 6262

BS 6262-3 sadrži dijagrame za utvrđivanje nosivosti staklene ploče na osnovi nekih geometrijskih podataka:

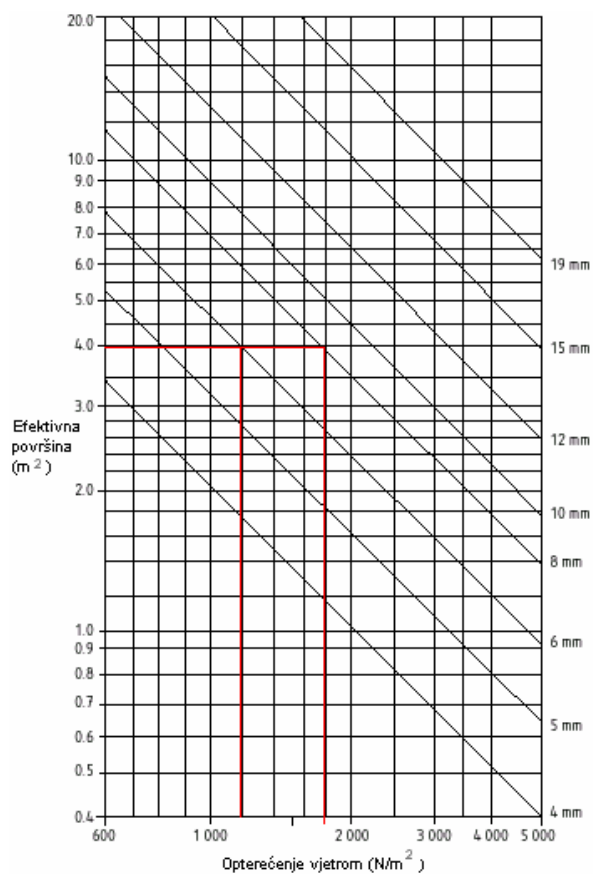
$$A = a \times b = 2,0 \times 2,0 = 4,0 \text{ m}^2 \quad - \quad \text{ploština ploče}$$

$$r = a / b = 2,0 / 2,0 = 1,0 \quad - \quad \text{odnos između dulje i kraće stranice ploče (aspect ratio)}$$

$$F = 4r / (r+1)^2 = 4 \times 1,0 / (1,0+1)^2 = 1,0 \quad - \quad \text{koeficijent oblika ploče (shape factor)}$$

$$A_e = F \times A = 1,0 \times 4,0 = 4,0 \text{ m}^2 \quad - \quad \text{efektivna ploština ploče (effective area)}$$

Smisao proračuna efektivne ploštine jest utvrđivanje



Slika 3. Dijagram za određivanje nosivosti pri opterećenju vjetrom četverostrano slobodno oslonjene staklene ploče od običnog stakla (BS 6262)

ploštine ploče koja je izložena vlačnim naprezanjima, a koja je uzrok loma stakla.

Raspodjela opterećenja:

$$- \text{ vanjsko staklo, 8 mm} \quad \frac{8^3}{8^3 + 6^3} = 0,703,$$

vanjsko staklo preuzima 70,3 % od ukupnog opterećenja

$$- \text{ unutarnje staklo, 6 mm} \quad \frac{6^3}{8^3 + 6^3} = 0,297,$$

unutarnje staklo preuzima 29,7 % od ukupnog opterećenja

Obično staklo

Nosivost ploče debljine 8 mm (prema slici 3.): 1,75 kPa

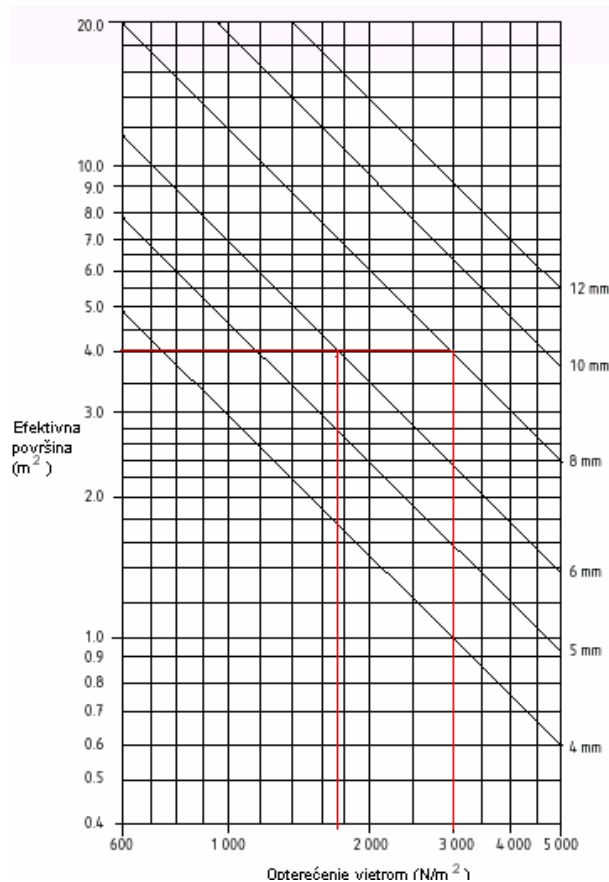
Nosivost ploče debljine 6 mm (prema slici 3.): 1,20 kPa

Nosivost izolacijskog paketa 6 + 8 mm, ploče 2,0 x 2,0 m od običnog stakla, prema normi BS 6262-3 je manja od sljedećih dviju vrijednosti:

$$LR1 = 1/0,703 \times 1,75 = 2,49 \text{ kPa} \quad - \text{ staklo debljine 8 mm}$$

$$LR2 = 1/0,297 \times 1,20 = 4,04 \text{ kPa} \quad - \text{ staklo debljine 6 mm}$$

LR = 2,49 kPa



Slika 4. Dijagram za određivanje nosivosti pri opterećenju vjetrom četverostrano slobodno oslonjene staklene ploče od kaljenog stakla (BS 6262)

Kaljeno staklo

Nosivost ploče debljine 8 mm (prema slici 4.): 3,00 kPa

Nosivost ploče debljine 6 mm (prema slici 4.): 1,80 kPa

Nosivost izolacijskog paketa 6+8 mm, ploče 2,0 x 2,0 m od kaljenog stakla, prema normi BS 6262-3 manja je od sljedećih dviju vrijednosti:

LR1 = 1 / 0,703 x 3,00 = 4,27 kPa - staklo debljine 8 mm

LR2 = 1 / 0,297 x 1,80 = 6,06 kPa - staklo debljine 6 mm

LR = 4,27 kPa

4.3 prEN 13474

Proračunske vrijednosti čvrstoće stakla za opterećenje vjetrom:

$$f_{g,d} \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} = \frac{0,74 \cdot 1,0 \cdot 45,0}{1,8} = 18,5 \text{ N/mm}^2$$

- obično staklo

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

$$\left(\frac{0,74 \cdot 1,0 \cdot 45}{1,8} + \frac{1,0(70 - 45)}{1,2} \right) = 39,3 \text{ N/mm}^2$$

- toplinski ojačano staklo

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

$$\left(\frac{0,74 \cdot 1,0 \cdot 45}{1,8} + \frac{1,0(120 - 45)}{1,2} \right) = 81,0 \text{ N/mm}^2$$

- kaljeno staklo

Proračun prema prEN 13474 inače se provodi tako što se proračunska naprezanja uspoređuju s proračunskom vrijednošću čvrstoće. Radi lakše usporedbe s ostalim normama, ovdje će se proračunati opterećenje koje pojedina staklena ploča može preuzeti.

Faktori raspodjele opterećenja:

$$\delta_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{8^3}{8^3 + 6^3} = 0,703$$

- vanjsko staklo, 8 mm

$$\delta_2 = \frac{h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} = \frac{6^3}{8^3 + 6^3} = 0,297$$

- unutarnje staklo, 6 mm

$$a^* = 28,9 \left(\frac{s \cdot h_1^3 \cdot h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) k_5} \right)^{0,25} = 28,9$$

$$\left(\frac{16 \cdot 8^3 \cdot 6^3}{(8^3 + 6^3) 0,0169} \right)^{0,25} = 562,8$$

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*} \right)^4} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2000}{562,8} \right)^4} = 0,0062$$

$$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi \delta_2) \gamma_Q$$

$$Q_k = (0,703 + 0,0062 \times 0,297) 1,1 Q_k = 0,775 Q_k - \text{proračunsko opterećenje na vanjsko staklo} \quad (13)$$

$$F_{d,2} = (1 - \phi) \delta_2 \gamma_Q Q_k = (1 - 0,0062) 0,297 \times 1,1 Q_k$$

$$= 0,325 Q_k - \text{proračunsko opterećenje na unutarnje staklo} \quad (14)$$

prEN 13474 daje nam mogućnost proračuna staklene ploče prema maksimalnim i efektivnim naprezanjima. Efektivna naprezanja povezuju vjerojatnost loma stakla i veličinu opterećene površine, dakle *što je veća opterećena površina to je veća vjerojatnost da će se kritična pukotina nalaziti na toj površini.*

Maksimalno naprezanje u vanjskom staklu četverostrano oslonjene ploče:

$$\sigma_{1max} = k_1 \frac{a^2}{h_1^2} F_{d1} \Rightarrow F_{d1} = f_{g,d} \frac{h_1^2}{k_1 \cdot a^2} -$$

proračunsko opterećenje za staklo debljine 8 mm (15)

Maksimalno naprezanje u unutarnjem staklu:

$$\sigma_{2max} = k_1 \frac{a^2}{h_2^2} F_{d2} \Rightarrow F_{d2} = f_{g,d} \frac{h_2^2}{k_1 \cdot a^2} -$$

proračunsko opterećenje za staklo debljine 6 mm (16)

Efektivno naprezanje u vanjskom staklu i nosivost vanjskog stakla:

$$\sigma_{1ef} = k_2 \frac{a^2}{h_1^2} F_{d1} \Rightarrow F_{d1} = f_{g,d} \frac{h_1^2}{k_2 \cdot a^2} -$$

proračunsko opterećenje za staklo debljine 8 mm (17)

Efektivno naprezanje u unutarnjem staklu i nosivost vanjskog stakla:

$$\sigma_{2ef} = k_2 \frac{a^2}{h_2^2} F_{d2} \Rightarrow F_{d2} = f_{g,d} \frac{h_2^2}{k_2 \cdot a^2} -$$

proračunsko opterećenje za staklo debljine 6 mm (18)

k_1 i k_2 su faktori za nelinearni proračun maksimalnih odnosno efektivnih naprezanja četverostrano slobodno oslonjene ploče.

a) Proračun stakla prema maksimalnim naprezanjima

Obično staklo

$$p_1^* = \frac{a^4 F_{d1}}{h_1^4 E} = 76 \Rightarrow k_1 = 0,217$$

$$p_2^* = \frac{a^4 F_{d2}}{h_2^4 E} = 148 \Rightarrow k_1 = 0,198$$

$$F_{d1} = f_{g,d} \frac{h_1^2}{k_1 \cdot a^2} = 18,5 \frac{8^2}{0,217 \cdot 2000^2} = 1,36 \times 10^{-3}$$

$$\text{N/mm}^2 = 1,36 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{d2} = f_{g,d} \frac{h_2^2}{k_1 \cdot a^2} = 18,5 \frac{6^2}{0,198 \cdot 2000^2} = 0,84 \times 10^{-3}$$

$$\text{N/mm}^2 = 0,84 \text{ kN/m}^2$$

Karakteristična vrijednost otpornosti izolacijskog paketa 6+8 mm, ploče 2,0 x 2,0 m od običnog stakla, prema izrazima (13) i (14) manja je od sljedećih dviju vrijednosti:

$$Q_{k1} = R_{k1} = 1/0,775 \times 1,36 = 1,75 \text{ kPa} \quad - \quad \text{staklo debljine 8 mm}$$

$$Q_{k2} = R_{k2} = 1/0,325 \times 0,84 = 2,58 \text{ kPa} \quad - \quad \text{staklo debljine 6 mm}$$

$R_k = 1,75 \text{ kPa}$

Toplinski ojačano staklo:

$$p_1^* = \frac{a^4 F_{d1}}{h_1^4 E} = 184 \Rightarrow k_2 = 0,191$$

$$p_2^* = \frac{a^4 F_{d2}}{h_2^4 E} = 360 \Rightarrow k_2 = 0,174$$

$$F_{d1} = f_{g,d} \frac{h_1^2}{k_2 \cdot a^2} = 39,3 \frac{8^2}{0,191 \cdot 2000^2} = 3,29 \times 10^{-3}$$

$$\text{N/mm}^2 = 3,29 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{d2} = f_{g,d} \frac{h_2^2}{k_2 \cdot a^2} = 39,3 \frac{6^2}{0,174 \cdot 2000^2} = 2,03 \times 10^{-3}$$

$$\text{N/mm}^2 = 2,03 \text{ kN/m}^2$$

Karakteristična vrijednost otpornosti izolacijskog paketa 6+8 mm, ploče 2,0 x 2,0 m od toplinski ojačanog stakla, prema izrazima (13) i (14) manja je od sljedećih dviju vrijednosti:

$$Q_{k1} = R_{k1} = 1/0,775 \times 3,29 = 4,25 \text{ kPa} \quad - \quad \text{staklo debljine 8 mm}$$

$$Q_{k2} = R_{k2} = 1/0,325 \times 2,03 = 6,25 \text{ kPa} \quad - \quad \text{staklo debljine 6 mm}$$

$R_k = 4,25 \text{ kPa}$

Kaljeno staklo

$$p_1^* = \frac{a^4 F_{d1}}{h_1^4 E} = 425 \Rightarrow k_2 = 0,170$$

$$p_2^* = \frac{a^4 F_{d2}}{h_2^4 E} = 739 > 500 \Rightarrow k_2 = 0,165$$

$$F_{d1} = f_{g,d} \frac{h_1^2}{k_2 \cdot a^2} = 81,0 \frac{8^2}{0,170 \cdot 2000^2} = 7,62 \times 10^{-3}$$

$$\text{N/mm}^2 = 7,62 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{d2} = f_{g,d} \frac{h_2^2}{k_2 \cdot a^2} = 81,0 \frac{6^2}{0,165 \cdot 2000^2} = 4,42 \times 10^{-3}$$

$$\text{N/mm}^2 = 4,42 \text{ kN/m}^2$$

Karakteristična vrijednost otpornosti izolacijskog paketa

Tablica 3. Faktori k_1 za nelinearni proračun maksimalnih naprezanja četverostrano slobodno oslonjene ploče (prEN 13474)

$\lambda=a/b$	p^*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1,0	0,272	0,271	0,268	0,258	0,245	0,227	0,207	0,188	0,178	0,165
0,9	0,323	0,320	0,314	0,293	0,269	0,243	0,222	0,203	0,193	0,180
0,8	0,383	0,378	0,365	0,329	0,294	0,262	0,240	0,221	0,210	0,198
0,7	0,451	0,442	0,421	0,368	0,322	0,282	0,261	0,241	0,230	0,217
0,6	0,526	0,514	0,485	0,417	0,362	0,305	0,284	0,263	0,252	0,239
0,5	0,603	0,590	0,560	0,485	0,424	0,342	0,309	0,289	0,277	0,264
0,4	0,673	0,665	0,643	0,580	0,519	0,429	0,337	0,317	0,306	0,292
0,3	0,725	0,722	0,714	0,687	0,650	0,575	0,444	0,349	0,337	0,323
0,2	0,748	0,747	0,746	0,744	0,739	0,724	0,671	0,561	0,481	0,384
0,1	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,748	0,746	0,739
0,0	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750

6+8 mm, ploče 2,0 x 2,0 m od kaljenog stakla, prema izrazima (13) i (14) manja je od sljedećih dviju vrijednosti:

$$Q_{k1} = R_{k1} = 1/0,775 \times 7,62 = 9,83 \text{ kPa} \quad - \quad \text{staklo debljine 8 mm}$$

$$Q_{k2} = R_{k2} = 1/0,325 \times 4,42 = 13,60 \text{ kPa} \quad - \quad \text{staklo debljine 6 mm}$$

$$R_k = 9,83 \text{ kPa}$$

b) Proračun stakla prema efektivnim naprezanjima

Proračun prema efektivnim naprezanjima analogan je onome prema maksimalnim naprezanjima. Razlikuju se samo faktori za proračun efektivnih naprezanja četverostrano oslonjene ploče p^* iz tablice 4. Iz tog razloga prikazat ćemo samo rezultate proračuna.

Obično staklo

$$R_k = 2,32 \text{ kPa}$$

Toplinski ojačano staklo

$$R_k = 5,72 \text{ kPa}$$

Kaljeno staklo

$$R_k = 13,29 \text{ kPa}$$

maksimalnim (1) odnosno efektivnim (2) naprezanjima europske prednorme.

- U drugom stupcu istih tablica nalaze se nosivosti izolacijskog stakla iz točaka 4.1, 4.2 i 4.3.
- U trećem i četvrtom stupcu prikazan je dio opterećenja (nosivosti) koji otpada na pojedinu staklenu ploču. $O_{8\text{mm},1}$ i $O_{6\text{mm},1}$ dio su opterećenja (nosivosti) raspoređenog razmjerno krutosti na savijanje, kako to i preporučuje norma. $O_{8\text{mm},2}$ i $O_{6\text{mm},2}$ dio su opterećenja (nosivosti) raspoređenog uključujući membransku krutost ploče. Korekcija raspodjele opterećenja za nelinearni proračun napravljena je iterativno izjednačavanjem progiba pojedinih staklenih ploha izolacijskog paketa (zbog očuvanja volumena zraka u prostoru između dvaju stakala progib mora biti isti).
- U stupcima 5 – 8 istih tablica prikazani su rezultati linearnog i nelinearnog proračuna metodom konačnih elemenata za stakla debljine 8 i 6 mm. U zagradi je naznačeno opterećenje za koje je proveden proračun.
- U devetom i desetom stupcu prikazana je pogreška u dimenzioniranju, u smislu predimenzioniranja ili poddimenzioniranja, do kojeg dolazi zbog pogrešne raspodjele opterećenja.

Tablica 4. Faktori k_2 za nelinearni proračun efektivnih naprezanja četverostrano slobodno oslonjene ploče (prEN 13474)

$\lambda=a/b$	p^*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1,0	0,251	0,250	0,246	0,235	0,221	0,193	0,164	0,146	0,137	0,126
0,9	0,288	0,285	0,279	0,259	0,237	0,210	0,174	0,156	0,147	0,135
0,8	0,338	0,334	0,323	0,292	0,261	0,216	0,186	0,168	0,159	0,147
0,7	0,398	0,392	0,375	0,330	0,291	0,237	0,202	0,183	0,173	0,161
0,6	0,463	0,454	0,432	0,377	0,330	0,267	0,220	0,201	0,191	0,179
0,5	0,527	0,518	0,495	0,436	0,383	0,312	0,241	0,222	0,212	0,199
0,4	0,588	0,581	0,564	0,512	0,461	0,383	0,281	0,247	0,236	0,223
0,3	0,639	0,637	0,629	0,602	0,568	0,500	0,384	0,278	0,265	0,251
0,2	0,678	0,677	0,676	0,672	0,665	0,644	0,577	0,463	0,390	0,308
0,1	0,699	0,699	0,699	0,699	0,699	0,698	0,697	0,692	0,683	0,660
0,0	0,699	0,699	0,699	0,699	0,699	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698

4.4 Analiza rezultata proračuna

Radi analize rezultata proračuna prema navedenim normama ista je ploča proračunana metodom konačnih elemenata, a kao opterećenje upotrijebljene su nosivosti dobivene u točkama 4.1, 4.2 i 4.3. Rezultati su prikazani u tablici 5.

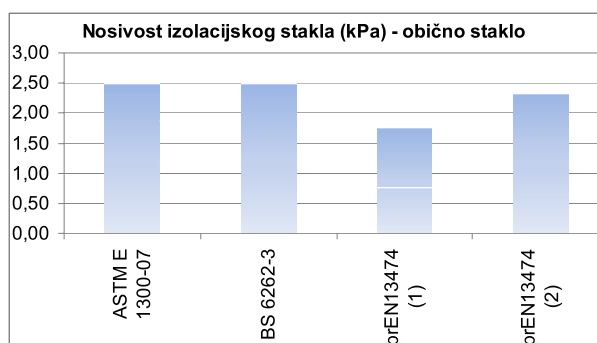
- Kratice uporabljene u prvom stupcu, prEN 13474 (1) i prEN 13474 (2), odnose se na proračun prema

Na osnovi tablice 5. izrađeni su dijagrami koji prikazuju nosivosti izolacijskog stakla proračunane prema raznim normama (slike 5., 6. i 7.).

Vidimo da se proračun prema trima navedenim normama za obično staklo ne razlikuje mnogo ako izuzmemo proračun prema maksimalnim naprezanjima iz prEN 13474. Razlike se povećavaju pri proračunu toplinski ojačanog i kaljenog stakla. Velika razlika koju uočava

Tablica 5. Prikaz rezultata proračuna za obično staklo, za toplinski ojačano staklo i za kaljeno staklo

Standard	Nosivost izo. stakla (kPa)	Opterećenje na vanjsko staklo 8 mm (kPa)		Opterećenje na unutarnje staklo 6 mm (kPa)		Maks. naprezanje u staklu debljine 8 mm prema FEM proračunu (MPa)			Maks. naprezanje u staklu debljine 6 mm prema FEM proračunu (MPa)			Maks. progib stakla debljine 8 mm prema FEM proračunu (mm)			Maks. progib stakla debljine 6 mm prema FEM proračunu (mm)			predst. skl. deblj. 8 mm (%)	pod. stakla deblj. 6 mm (%)
		8mm, 1	8mm, 2	6mm, 1	6mm, 2	nel. 8mm, 1	lin. 8mm, 1	nel. 8mm, 2	nel. 6mm, 1	lin. 6mm, 1	nel. 6mm, 2	nel. 8mm, 1	lin. 8mm, 1	nel. 8mm, 2	nel. 6mm, 1	lin. 6mm, 1	nel. 6mm, 2		
OBIČNO STAKLO																			
ASTM E 1300-07	2,49	1,75	1,61	0,74	0,88	18,8	29,3	17,5	13,6	22,0	15,7	18,9	36,4	18,0	16,5	36,4	18,0	7,4	13,4
BS 6262-3	2,49	1,75	1,61	0,74	0,88	18,8	29,3	17,5	13,6	22,0	15,7	18,9	36,4	18,0	16,5	36,4	18,0	7,4	13,4
prEN13474 (1)	1,75	1,23	1,14	0,52	0,61	14,0	20,6	13,3	9,9	15,2	11,5	15,5	25,6	14,9	13,6	25,2	14,9	5,3	13,9
prEN13474 (2)	2,32	1,63	1,50	0,69	0,82	17,7	27,3	16,4	12,7	20,4	14,9	18,2	33,9	17,4	15,8	33,8	17,4	7,9	14,8
TOPLINSKI OJAČANO STAKLO																			
ASTM E 1300-07	4,98	3,50	3,20	1,48	1,78	34,5	58,6	30,0	25,3	43,9	31,9	27,0	72,8	25,7	23,3	72,9	25,7	15,0	20,7
BS 6262-3	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\
prEN13474 (1)	4,25	2,99	2,71	1,26	1,54	30,0	50,0	27,5	21,9	37,5	26,2	25,0	62,2	23,8	21,6	62,2	23,8	9,1	16,4
prEN13474 (2)	5,72	4,02	3,65	1,70	2,07	39,1	67,3	35,8	28,8	50,6	34,5	28,9	83,7	27,5	25,0	83,9	27,5	9,2	16,5
KALJENO STAKLO																			
ASTM E 1300-07	9,97	7,01	6,30	2,96	3,67	65,3	117,2	59,1	48,3	87,9	59,3	37,7	145,9	35,8	32,3	145,9	35,8	10,5	18,5
BS 6262-3	4,27	3,00	2,70	1,27	1,57	30,1	50,2	27,4	21,9	37,7	26,7	25,0	62,5	23,8	21,6	62,5	23,8	9,9	18,0
prEN13474 (1)	9,83	6,90	6,20	2,92	3,62	64,4	115,6	58,2	47,6	86,7	58,5	37,5	143,8	35,6	32,1	143,8	35,6	10,7	18,6
prEN13474 (2)	13,29	9,34	8,50	3,95	4,99	85,5	156,3	76,5	63,6	117,2	79,8	43,1	194,4	40,9	36,9	194,4	40,9	11,8	20,3



Slika 5. Prikaz nosivosti izolacijskog paketa od običnog stakla prema normama: ASTM E1300-07, BS 6262-3, prEN 13474



Slika 6. Prikaz nosivosti izolacijskog paketa od toplinski ojačanog stakla prema normama: ASTM E1300-07, BS 6262-3, prEN 13474

mo kod stakla proračunanog prema britanskoj normi uvjetovana je ograničenjem progiba stakla koji je sadržan u dijagramima za proračun nosivosti prema BS 6262. Ono što je indikativno iz gornjeg proračuna jest raspodjela opterećenja. Naime američka i europska norma propisuju raspodjelu ukupnog opterećenja na stakla izolacijskog paketa razmjerno krutostima na savijanje (izraz (11) iz prEN 13474). Točno je to za ploče kod kojih nije izražena geometrijska nelinearnost.



Slika 7. Prikaz nosivosti izolacijskog paketa od kaljenog stakla prema normama: ASTM E1300-07, BS 6262-3, prEN 13474

Kod većih ploča, kao što je ova koju smo mi razmatrali, osim krutosti na savijanje, raspodjela opterećenja treba uključivati i membransku krutost ploče. Vidi se to iz progiba prikazanih u gornjim tablicama. Ako se zane-

mari stišljivost zraka, progib unutarnje i vanjske ploče trebao bi biti isti. Dakle, kod ploča velikih dimenzija tanje ploče preuzimaju više opterećenja nego što je to predviđeno raspodjelom opterećenja razmjerno krutostima na savijanje, što je i pokazala korekcija raspodjele opterećenja za nelinearni proračun. Kod linearnog proračuna, iz tablice 5. vidimo da je raspodjela razmjerno krutostima na savijanje korektna jer su i dobiveni progibi jednaki.

S obzirom na razlike koje proizlaze iz proračuna prema raznim normama, u članku se upozorava na oprez pri dimenzioniranju staklenih konstrukcija i na „konzervativniji“ pristup pri proračunu nosivih elemenata.

5 Zaključak

Staklo se danas osim kao ispunski materijal upotrebljava i kao konstrukcijski materijal. Osim toga ispunska su stakla sve većih dimenzija pa njihov proračun zahtijeva složeniji pristup: proračun uz uzimanje u obzir geometrijske nelinearnosti. Isto tako, vrlo se često rade stakleni podovi koji zatijevaju posebnu pozornost što se tiče sigurnosti.

Pri proračunu staklenih konstrukcija treba imati na umu da je staklo krhki materijal i da statički neodređeni sus

tavi ne povećavaju sigurnost konstrukcije kao što je to slučaj kod čelika. Takvi sustavi obično uzrokuju koncentracije naprezanja koje mogu biti uzrokom nenadanom lomu. Osim toga, treba znati koji su faktori koji utječu na čvrstoću stakla: trajanje opterećenja, površinska oštećenja i način obrade stakla. Poznavanje ovih specifičnosti stakla kao konstrukcijskog materijala omogućava razvijanje ispravnih konstrukcijskih detalja i određivanje najpovoljnijih dimenzija.

Iz postojećih norma za proračun stakla možemo izdvojiti ASTM E1300 jer je to jedina norma koja uzima u obzir sve faktore koji utječu na nosivost stakla. Iako je njezina upotreba limitirana na pojedine statičke sustave, teorijske postavke temelj su shvaćanja stakla kao konstrukcijskog materijala.

Europska prednorma prEN 13474 definira vlačnu čvrstoću stakla i parcijalne koeficijente sigurnosti. Iako je njezina upotreba moguća za sve vrste staklenih konstrukcija, još uvijek u nju nije uključena međusobna povezanost vjerojatnosti loma s površinskim oštećenjima stakla.

Istraživanja stakla i razvoj standarda za proračun staklenih konstrukcija još uvijek su u tijeku, a članak daje uvid u sadašnje stanje na tom području.

LITERATURA

- [1] Beasson, W. L.; Morgan J. R.: *Glass Failure Prediction Model*, Journal of Structural Engineering, Vol 111, No. 9 2058-2059, 1985.
- [2] ASTM International E1300 – 04, West Conshohocken, USA, 2004.
- [3] prEN 13474-1, *Glass in building - Design of glass panes – Part 1: General basis of design*, European Committee for Standardization, January 1999
- [4] prEN 13474-2, *Glass in building - Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed loads*, European Committee for Standardization, February 2000
- [5] prEN 13474-3, *Glass in building – Determination of the strength of glass panes – Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing*, European Committee for Standardization, January 2007
- [6] BS 6262-3, *Glazing for buildings – Part 3: Code of practice for fire, security and wind loading*, 2005
- [7] *Structural use of glass in buildings*, The Institution of Structural Engineers, London 1999.
- [8] GANA Glazing Manual, 1997.
- [9] Brown, W. G.: *A Practicable Formulation for the Strength of Glass and its Special Application to Large Plates*, izdanje br. NRC 14372, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 1974.
- [10] Weibull, W.: *A Statistical Theory of the Strength of Materials*, Ingeniorsvetenskapsakademiens, Handlingar NR151, Stockholm, Sweden, 1939.
- [11] Potočnik (Gere), T.: *Metoda konačnih traka i njena primjena na proračun staklene ploče*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2005.