

# Metode određivanja mehaničkih svojstava zida

---

**Krolo, Joško; Damjanović, Domagoj; Duvnjak, Ivan; Frančić Smrkić, Marina; Bartolac, Marko; Koščak, Janko**

Source / Izvornik: **Građevinar, 2021, 73, 127 - 140**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.3063.2020>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:836242>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



Primljen / Received: 20.9.2020.

Ispravljen / Corrected: 8.11.2020.

Prihvaćen / Accepted: 25.11.2020.

Dostupno online / Available online: 10.3.2021.

# Metode određivanja mehaničkih svojstava zida

## Autori:



<sup>1</sup>Dr.sc. **Joško Krolo**  
[krolo@grad.hr](mailto:krolo@grad.hr)



<sup>1</sup>Izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović**  
[domagoj.damjanovic@grad.unizg.hr](mailto:domagoj.damjanovic@grad.unizg.hr)  
Autor za korespondenciju



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Ivan Duvnjak**  
[iduvnjak@grad.hr](mailto:iduvnjak@grad.hr)



<sup>1</sup>Dr.sc. **Marina Frančić Smrkić**  
[marina.francic.smrkic@grad.unizg.hr](mailto:marina.francic.smrkic@grad.unizg.hr)



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Marko Bartolac**  
[marko.bartolac@grad.unizg.hr](mailto:marko.bartolac@grad.unizg.hr)



<sup>1</sup>**Janko Koščak**, mag. ing. aedif.  
[jkoscak@grad.hr](mailto:jkoscak@grad.hr)

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za tehničku mehaniku

Pregledni rad

**Joško Krolo, Domagoj Damjanović, Ivan Duvnjak, Marina Frančić Smrkić, Marko Bartolac, Janko Koščak**

## Metode određivanja mehaničkih svojstava zida

U potresu koji je 22. ožujka 2020. pogodio Zagreb najteže su stradale zidane zgrade s drvenim međukatnim konstrukcijama koje nemaju vertikalne i horizontalne serklaže. Za izradu projekta obnove zidanih zgrada vrlo je važno poznavanje mehaničkih svojstava zida te su u ovom radu detaljno opisane metode za njihovo određivanje. Osim opisa metoda, prikazani su i rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zida koji su provedeni na 20 zidanih građevina na području Zagreba (ukupno 149 mjernih mjesta) te rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće opeke za 14 zgrada (ukupno 62 ispitana uzorka).

### Ključne riječi:

zide, mehanička svojstva, ispitivanje, posmična čvrstoća, tlačna čvrstoća

Subject review

**Joško Krolo, Domagoj Damjanović, Ivan Duvnjak, Marina Frančić Smrkić, Marko Bartolac, Janko Koščak**

## Methods for determining mechanical properties of walls

Masonry buildings with wooden floor structures, not equipped with vertical and horizontal tie beams, suffered the greatest damage in the earthquake that hit Zagreb on 22 March 2020. It is very significant to know mechanical properties of walls during preparation of the masonry buildings renovation design and, consequently, methods for determining such properties are presented in detailed in this paper. In addition to description of these methods, results obtained by testing shear strength of walls of twenty masonry buildings in Zagreb (149 measuring points in total) are also presented, as well as the results obtained by testing compressive strength of bricks on 14 buildings, using a total of 62 samples.

### Key words:

walls, mechanical properties, testing, shear strength, compressive strength

Übersichtsarbeit

**Joško Krolo, Domagoj Damjanović, Ivan Duvnjak, Marina Frančić Smrkić, Marko Bartolac, Janko Koščak**

## Methoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Mauerwerks

Bei dem Erdbeben in Zagreb am 22. März 2020 wurden Mauerwerksgebäude mit Holzkonstruktionen zwischen den Etagen ohne vertikale und horizontale Ringanker am stärksten beschädigt. Die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften von Mauerwerk ist für die Vorbereitung eines Projekts zur Renovierung von Mauerwerksgebäuden von großer Bedeutung. In dieser Arbeit werden die Methoden zu ihrer Bestimmung ausführlich beschrieben. Neben der Beschreibung der Methoden wurden die Ergebnisse der Prüfung der Scherfestigkeit von Mauerwerk an 20 Mauerwerksgebäuden im Raum Zagreb (insgesamt 149 Messpunkte) sowie die Ergebnisse der Prüfung der Druckfestigkeit von Ziegeln bei 14 Gebäuden (insgesamt 62 geprüfte Proben) vorgestellt.

### Schlüsselwörter:

Mauerwerk, mechanische Eigenschaften, Prüfung, Scherfestigkeit, Druckfestigkeit

## 1. Uvod

U potresu koji se 22. ožujka 2020. godine dogodio u Zagrebu mnoge su zidane građevine pretrpjele teška oštećenja. Naročito se to odnosi na građevine izgrađene početkom 20. stoljeća sa zidom od pune opeke i vapnenog morta. Postupak obnove i pojačanja konstrukcije tih građevina vrlo je zahtjevan i podrazumijeva dulje razdoblje [1]. Glavnina je tih zidanih građevina i prije potresa imala oslabljen konstrukcijski sustav, a što je bilo uzrokovano sustavnim neodržavanjem, prijašnjim oštećenjima (npr. od prethodnih potresa manjih intenziteta), nekontroliranim zahvatima zbog prenamjene prostora (probijanje ili zazidavanje otvora, pregrađivanje i sl.). Osim toga, te građevine, s više gledišta, ne udovoljavaju suvremenim zahtjevima za nosivost i uporabljivost, odnosno potresnu otpornost konstrukcija u skladu s odredbama normi Eurokod 6 [2] i Eurokod 8 [3].

Za izradu projekta sanacije i obnove oštećenih građevina nužno je provesti prethodna istraživanja i ispitivanja kojima će se utvrditi mehanička svojstva materijala od kojih su izvedene. U ovom radu opisane su metode ispitivanja mehaničkih svojstava zida od pune opeke te su prikazani odgovarajući rezultati ispitivanja. U skladu s normom [4] pri ispitivanju materijala ugrađenih u zidane konstrukcije mogu se upotrijebiti razorna i nerazorna ispitivanja. Pri tome norma razlikuje:

- ograničena ispitivanja *in situ*,
- opsežna ispitivanja *in situ* i
- sveobuhvatna ispitivanja *in situ*.

Razredba razina pregleda i ispitivanja ovisi o postotku konstrukcijskih elemenata koji se moraju kontrolirati u detaljima i o broju uzoraka materijala po etaži koji se mora uzeti za ispitivanje. Za uobičajene situacije u tablici 1. navedene su najmanje vrijednosti.

Tablica 1. Preporučeni najmanji zahtjevi za različite razine pregleda i ispitivanja [4]

Vrste ispitivanja	Pregledi i ispitivanja	Pregled (detalja)	Ispitivanje (materijala)
	Za svaki tip primarnih elemenata (greda, stup, zid)		
Razina pregleda i ispitivanja		Postotak elemenata za kontrolu detalja	Uzorci materijala po etaži
Ograničena ispitivanja <i>in situ</i>		20 %	1
Opsežna ispitivanja <i>in situ</i>		50 %	2
Sveobuhvatna ispitivanja <i>in situ</i>		80 %	3

Tablica 2. Preporučene vrijednosti faktora povjerenja [4]

Razina znanja		Preporučene vrijednosti faktora povjerenja	
RZ1	Ograničeno znanje - Treba pretpostaviti uobičajene vrijednosti u skladu s normama iz vremena gradnje uz ograničeno ispitivanje <i>in situ</i> najkritičnijih elemenata.	FP <sub>RZ1</sub>	1,35
RZ2	Uobičajeno znanje - Podaci o mehaničkim svojstvima građevnih materijala dostupni su iz opsežnih ispitivanja <i>in situ</i> ili iz izvornih projektnih specifikacija. Tada treba provesti ograničeno ispitivanje <i>in situ</i> .	FP <sub>RZ2</sub>	1,20
RZ3	Potpuno znanje - Podaci o mehaničkim svojstvima građevnih materijala dostupni su iz sveobuhvatnih ispitivanja <i>in situ</i> ili iz izvornih izvještaja o ispitivanju.	FP <sub>RZ3</sub>	1,00

Pri određivanju svojstava postojećih materijala koji će se upotrijebiti u proračunu sposobnosti, kad se sposobnost u provjeri sigurnosti uspoređuje sa zahtjevom, moraju se srednje vrijednosti dobivene ispitivanjima *in situ* i iz dodatnih izvora podataka podijeliti faktorom povjerenja (FP) danim u tablici 2 za odgovarajuću razinu znanja.

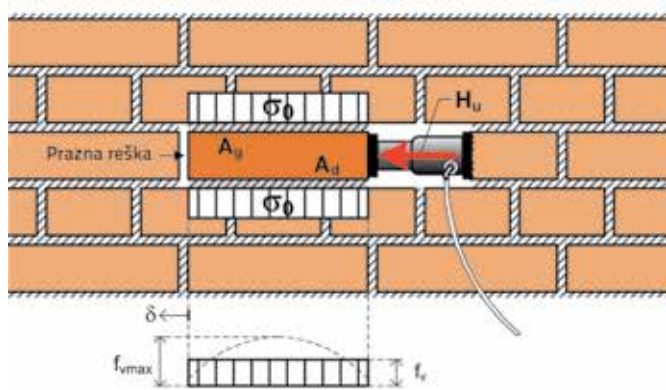
Podatci navedeni u tablicama 1. i 2. kao preporučene vrijednosti u nacionalnom dodatku norme HRN EN 1998-3/NA prihvaćeni su bez izmjene i time su postali obvezni.

Norma Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada [4], ne definira na kakvu se vrstu ispitivanja ili uzetih uzoraka kod zidanih konstrukcija misli. Moguća ispitivanja koja dolaze u obzir kod zidanih konstrukcija su ispitivanje tlačne, posmične i vlačne čvrstoće zida, modula elastičnosti zida te uzimanje uzoraka opeke i ispitivanje tlačne čvrstoće.

Prema tome, da bi se pri proračunu zidane konstrukcije upotrijebio faktor povjerenja za razinu znanja 3 FP<sub>RZ3</sub> = 1,0, potrebno je pri pregledu obuhvatiti najmanje 80 % elemenata i provesti ispitivanja zida na najmanje tri mjesta po etaži građevine.

## 2. Posmična čvrstoća zida *in situ*

Ispitivanje se obavlja na građevini s pomoću male hidraulične preše čime je minimalno oštećena struktura postojećeg nosivog zida, a ovaj postupak omogućava relativno brzu kontrolu na više lokacija. Kako se najčešće radi o građevinama povijesnog značenja (zaštićeno kulturno dobro ili se zgrada nalazi unutar zone zaštićene kulturno-povijesne cjeline), postavlja se zahtjev da se radovi pri tom ispitivanju izvedu uz minimalno oštećenje postojeće strukture nosivog zida.



Slika 1. Ispitivanje posmične čvrstoće zida: shematski prikaz (lijevo), provedba ispitivanja (desno)

Na nosivom zidu nakon uklanjanja žbuke odabire se uzdužno orijentirana opeka na kojoj će se provesti određivanje posmične čvrstoće morta u sljubnici zida ( $f_v$ ). Prije ispitivanja potrebno je očistiti vertikalne sljubnice morta s obje strane odabrane opeke te osloboditi prostor za postavljanje horizontalno orijentirane hidraulične preše [5]. Posmična čvrstoća zida određuje se na temelju registrirane granične horizontalne sile  $H_u$  koja djeluje na opeku u trenutku posmičnog sloma, te odgovarajuće gornje i donje ploštine ( $A_g + A_d$ ) na koju se prenosi posmik. Pri tome se procjenjuje da je doprinos morta na vertikalnoj sljubnici, iza opeke koja se ispituje, mali i zanemaruje se (ta stražnja sljubnica je često neispunjena mortom i u njoj nema većeg vertikalnog naprezanja). Način ispitivanja posmične čvrstoće zida prikazan je na slici 1. (desno).

$$f_v = \frac{H_u}{A_g + A_d} \quad (1)$$

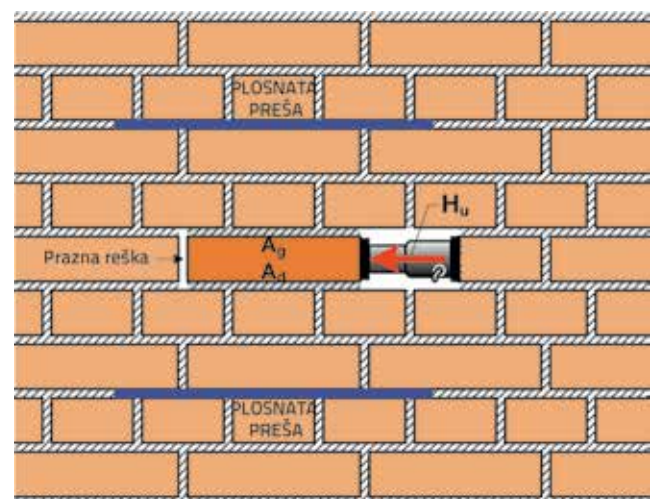
Kod ispitivanja prema slici 1. radi se o posmičnoj čvrstoći  $f_v$  s doprinosom vertikalnog naprezanja  $\sigma_v$ . Zato je pri ispitivanju potrebno točno locirati položaj mjernog mjesta radi proračuna vertikalnog opterećenja  $G_v$  odnosno naprezanja  $\sigma_v$ . Zbog toga se za svako mjesto ispitivanja, uz tlocrtni položaj, zabilježi i podatak o visini mjernog mjesta  $h$  od gornjeg ruba stropne konstrukcije. Posmična čvrstoća zida  $f_v$  ovisi o posmičnoj čvrstoći bez vertikalnog naprezanja  $f_{v0}$  i umnošku tlačnog naprezanja  $\sigma_v$  i koeficijenta trenja  $\mu$ .

$$f_v = f_{v0} + \mu \cdot \sigma_v \quad (2)$$

Ako se želi procijeniti posmična čvrstoća bez vertikalnog naprezanja  $f_{v0}$ , potrebno je pretpostaviti koeficijent trenja  $\mu$  na temelju podataka u literaturi, npr. prema [4] koeficijent trenja iznosi 0,4 dok prema [5] može varirati od 0,3 do 1,6. Vrijednost tlačnog naprezanja  $\sigma_v$  može se procijeniti proračunom ili preuzeti iz odgovarajućeg numeričkog modela konstrukcije.

$$f_{v0} = f_v - \mu \cdot \sigma_v \quad (3)$$

Vrijednost posmične čvrstoće bez vertikalnog naprezanja  $f_{v0}$  može se odrediti i na temelju ispitivanja uz upotrebu plosnatih preša. Navedena metoda podrazumijeva da se pri posmičnom ispitivanju kontrolira vertikalno tlačno naprezanje u zidu pri čemu se određuje i koeficijent trenja, slika 2. Navedena metoda detaljnije je opisana u poglavlju 5.4.



Slika 2. Ispitivanje posmične čvrstoće zida uz ispitivanje plosnatim prešama za određivanje vertikalnog tlačnog naprezanja

## 2.1. Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zida

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zida u zidovima od pune opeke, bez kontrole vertikalnog naprezanja, koji su dobiveni ispitivanjem na području grada Zagreba prikazani su u tablici 3. Prikaz ispitivanja na tri karakteristične zgrade prikazan je na slikama 3. do 8.

Ispitivanja na 20 zidanih građevina proveo je Laboratorij za ispitivanje konstrukcija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće ziđa  $f_v$ 

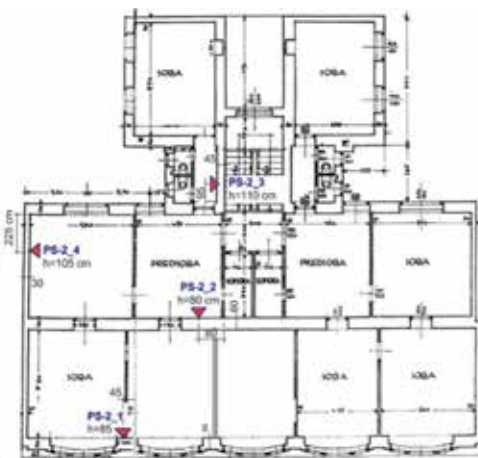
Redni broj	Građevina Katnost, (godina izgradnje)	Broj mjernih mjesta	Srednja vrijednost [MPa]	Standardno odstupanje [MPa]
1.	Stambeno - poslovna građevina, Ulica Ivana Dežmana 9, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1929.)	8	0,291	0,098
2.	PAROMLIN, Zgrada transmisije, Zagreb PR+5K, (1907.)	5	0,544	0,112
3.	PAROMLIN, Zgrada skladišta brašna, Zagreb PR+4K, (1907.)	10	0,626	0,207
4.	CRKVA SV. VINKA i SAMOSTAN, Frankopanska 15 i 17, Zagreb PO+PR+2K+Potkr., (1845.)	6	0,572	0,146
5.	PALMOTIĆEVA 64a, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1920.)	7	0,422	0,135
6.	ĐORĐIĆEVA 8, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1911.)	4	0,403	0,048
7.	GAJDEKOVA 18, Zagreb PO+PR+2K+Potkr., (1935.)	3	0,404	0,044
8.	VINKOVIĆEVA 27, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1932.)	3	0,287	0,067
9.	JURIŠIĆEVA 5, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (građ. dozvola iz 1896.)	3	0,645	0,115
10.	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, Trg RH 14, Zagreb PO+PR+2K+Potkr., (1859.)	5	0,545	0,175
11.	CROATIA OSIG., Trg bana J. Jelačića 12 i 12/1, ZGRADE 2 i 3, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1881.)	3	0,659	0,155
12.	CROATIA OSIG., Praška 5, ZGRADA 4, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1926.)	3	0,678	0,205
13.	BAKAČEVA 3, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1912.-1913.)	9	0,601	0,199
14.	FRANCK – SLADARA, Vodovodna 20, Zagreb PR+3K, (početak 20. stoljeća)	8	0,630	0,238
15.	KUNDEKOVA KUĆA, Kundekova ulica 2, Ivanič Grad PO+PR+1K+Potkr., (kraj 19. stoljeća)	6	0,532	0,087
16.	METALČEVA ULICA 15, Dvorišna zgrada B, Zagreb PR+1K+Potkr., (1939.)	4	0,517	0,041
17.	Bivša TVORNICA DUHANA ZAGREB (TDZ), Jagićeva bb, Zagreb PR+2K+Potkr., (1882.)	7	0,474	0,087
18.	MINISTARSTVO VANJSKIH I EU POSLOVA, Trg N. Š. Zrinjskog 7-8, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1903.)	16	0,637	0,227
19.	HOTEL PALACE, Trg Josipa Jurja Strossmayera 10, Zagreb PO+PR+4K, (1889.)	23	0,593	0,155
20.	MASARYKOVA 10, Zagreb PO+PR+MEZ+4+Potkr., (1925.)	16	0,460	0,081



Slika 3. Stambeno-poslovna građevina, Ulica Ivana Dežmana 9 u Zagrebu (lijevo), tlocrt 3. kata s označenim mjestima ispitivanja posmične čvrstoće ziđa (desno)



Slika 4. Stambeno-poslovna građevina, Ulica Ivana Dežmana 9 u Zagrebu, ispitivanje posmične čvrstoće ziđa na mjestima Z4 i Z6



Slika 5. Stambena građevina, Palmotićeva ulica 64a u Zagrebu (lijevo), tlocrt 2. kata s označenim mjestima ispitivanja posmične čvrstoće ziđa (desno)



Slika 6. Stambena građevina, Palmotićeva ulica 64a u Zagrebu, ispitivanje posmične čvrstoće ziđa na mjestima PS-1-1 i PS-2-1

Rezultati srednjih vrijednosti posmične čvrstoće ziđa za sve građevine vide se na dijagramu na slici 9.

Na slikama 10.a i 10.b su prikazani rezultati ispitivanja posmične čvrstoće ziđa po etažama za građevine Ministarstva vanjskih i europskih poslova (MVEP) i hotela Palace u Zagrebu na kojima su ispitivanja provedena nakon potresa.

U rezultatima ispitivanja za hotel Palace (slika 10.b) se vidi kako se veličina posmične čvrstoće ziđa smanjuje prema gornjim etažama zbog manjeg opterećenja od vlastite težine, odnosno zbog manjeg vertikalnog napreznjanja na mjestu ispitivanja. Međutim, ispitivanja su pokazala, da zbog velikog rasipanja rezultata ispitivanja to nije uvijek tako. Kao primjer vide se rezultati ispitivanja na građevini MVEP (slika 10.a).

### 3. Vlačna čvrstoća ziđa *in situ*

Vlačna čvrstoća ziđa može se odrediti razornim postupkom na građevini (*in situ*). Najprije se u postojećem zidu pronađe odgovarajuće mjesto s već postojećim otvorima (vrata i prozori) ili se nedaleko od otvora za vrata pažljivo isijeku dva vertikalna otvora ostavljajući oko  $l = 80$  cm neporemećenog ziđa koji dalje prenosi vertikalno opterećenje [6]. Na slici 11. je prikazan način opterećenja ziđa u slučaju pronalaska odgovarajućeg mjesta uz postojeća vrata i prozor.

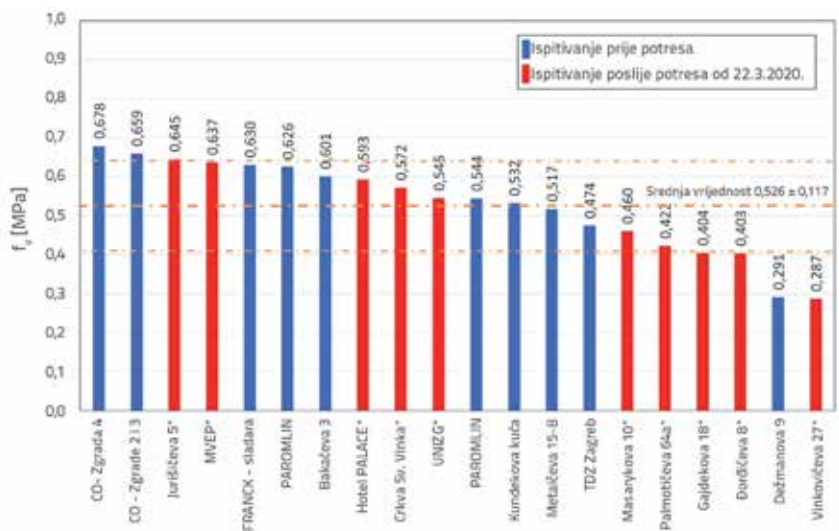
Hidrauličnom prešom se na polovici visine nanosi horizontalna sila u nekoliko koraka opterećenja i rasterećenja, postupno povećavajući silu. Vlačni slom je izražen nastankom kosih pukotina iznad i ispod mjesta djelovanja horizontalne sile. Tlačno napreznjanje u vertikalnom smjeru treba proračunati iz opterećenja ziđa i stropova iznad mjesta ispitivanja. Obično se ovakva ispitivanja na građevini izvode u nižim katovima ili u prizemlju. Ovo ispitivanje je prilično složeno i može se naići na nekoliko problema. Teško je pronaći odgovarajuće mjesto za takvo ispitivanje, naročito ako se prostori koriste. Osim toga, vrlo teško je pažljivo isjeći dva vertikalna otvora ostavljajući pri tome neporemećeni dio ziđa između njih. Zbog preraspodjele opterećenja oko tih otvora teško je precizno proračunati tlačno napreznjanja na mjestu ispitivanja.



Slika 7. Hotel Palace u Zagrebu (lijevo), tlocrt 1. kata s označenim mjestima ispitivanja posmične čvrstoće zida (desno)



Slika 8. Hotel Palace, Ispitivanje posmične čvrstoće zida na 1. katu na mjestima 1-1 i 1-7



Slika 9. Srednje vrijednosti posmične čvrstoće zida  $f_v$  za sve građevine

Iz izmjerene sile  $H$ , pri pojavi kosih pukotina, određuje se prosječno posmično naprezanje zida:

$$\tau = \frac{H}{2 \cdot A} \tag{4}$$

U gornjem izrazu  $A$  je horizontalna ploština zida koji se ispituje,  $t$  je debljina zida (bez žbuke), a  $l$  je duljina zida između otvora:

$$A = t \cdot l \tag{5}$$

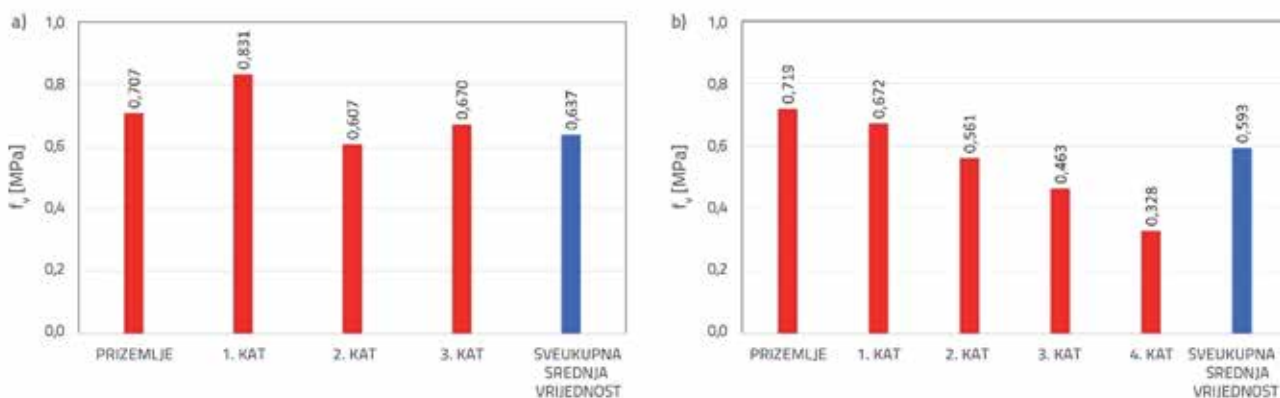
Poznavajući posmično naprezanje  $\tau$ , te iz izračunanog (procijenjenog) tlačnog naprezanja  $\sigma_0$  u vertikalnom smjeru, vlačna čvrstoća zida  $f_t$  može se izračunati prema [7, 8]:

$$f_t = -\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (b \cdot \tau)^2} \tag{6}$$

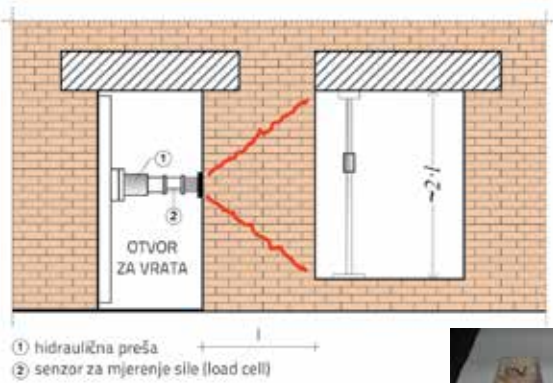
gdje je  $b$  omjer najvećeg i prosječnog posmičnog naprezanja ( $b = 1,50$ ). Kada je poznata vlačna čvrstoća određena opisanim ispitivanjem *in situ*, posmična otpornost pojedinog zida izračuna se iz izraza (7), gdje je  $H_u$  granična posmična otpornost zida:

$$H_u = A \cdot \frac{f_t}{b} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_t} + 1} \tag{7}$$

Važno je napomenuti da se u izraz (7) ne smije umjesto vrijednosti za vlačno naprezanje  $f_t$  uzeti vrijednost  $f_v$  određena ispitivanjem prikazanim na slikama 1. i 21. jer se tada dobiju nerealno visoke vrijednosti nosivosti na horizontalnu silu.



Slika 10. a) Srednje vrijednosti posmične čvrstoće zida po etažama za građevinu MVEP u Zagrebu; b) Srednje vrijednosti posmične čvrstoće zida po etažama za građevinu hotela Palace u Zagrebu



Slika 11. Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa *in situ*

Tablica 4. Brzina opterećenja pri ispitivanju tlačne čvrstoće opeke

Očekivana tlačna čvrstoća opeke $f_b$ [MPa]	Brzina nanošenja opterećenja [MPa/sek]
< 10	0,05
11 do 20	0,15
21 do 40	0,30
41 do 80	0,60
> 80	1,00

#### 4. Tlačna čvrstoća opeke

Ispitivanje tlačne čvrstoće opeke provodi se u skladu s normom HRN EN 772-1:2015, Metode ispitivanja zidnih elemenata - 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće [9]. Prema toj normi, treba uzeti najmanje šest uzoraka za ispitivanje. Uzorci se očiste od morta, navlaže površine i nanese sloj cementnog morta za izravnane minimalne debljine 3 mm, slika 12. Prije ispitivanja uzorci se njeguju sušenjem na zraku u laboratoriju 14 dana na temperaturi < 15° C i relativnoj vlažnosti < 65 %. Brzina opterećenja uzoraka pri ispitivanju prikazana je u tablici 4. Čvrstoća opeke se dobije tako da se maksimalno opterećenje pri slomu podijeli s bruto ploštinom, a rezultat zaokruži na 0,1 MPa, slika 13.



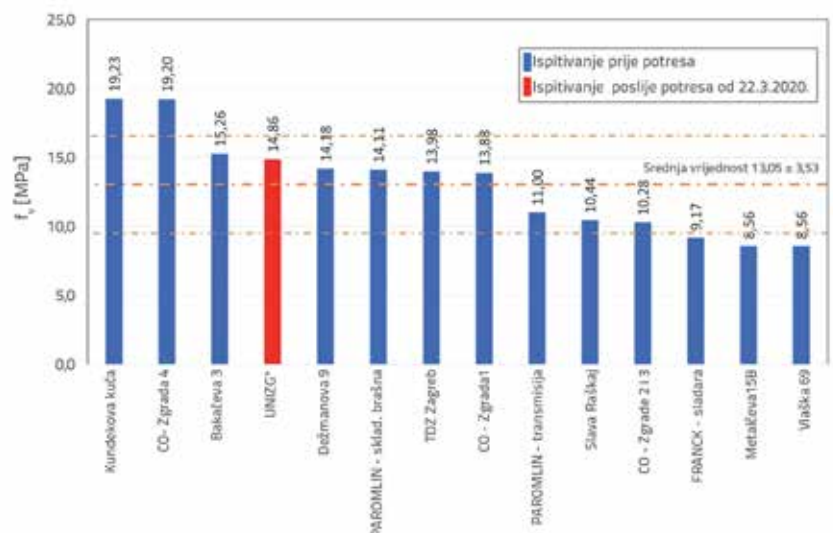
Slika 12. Uzorci opeke uzeti za ispitivanje tlačne čvrstoće i uzorci nakon pripreme za ispitivanje



Slika 13. Ispitivanje tlačne čvrstoće opeke i uzorci nakon sloma

##### 4.1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće opeke

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka opeke uzetih iz zidova građevina na području grada Zagreba prikazani su u tablici 5. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Srednje vrijednosti tlačne čvrstoće opeke za sve građevine prikazane su na slici 14.



Slika 14. Srednje vrijednosti tlačne čvrstoće opeke  $f_b$  za 14 građevina na području Grada Zagreba



Tablica 5. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće opeke,  $f_b$ 

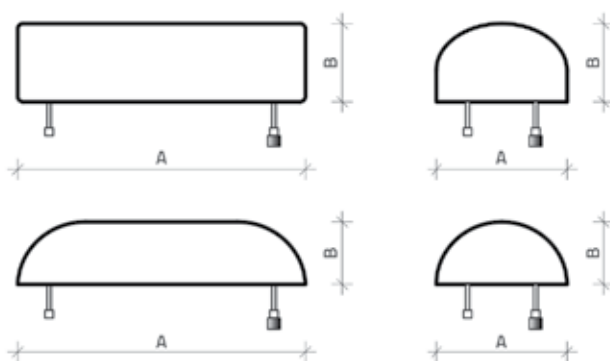
Redni broj	Građevina Katnost, (godina izgradnje)	Broj mjernih mjestâ	Srednja vrijednost [MPa]	Standardno odstupanje [MPa]
1.	Stambeno - poslovna građevina, Ulica Ivana Dežmana 9, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1929.)	8	14,18	1,73
2.	PAROMLIN, Zagreb, Zgrada transmisije PR+5K, (1907.)	4	11,00	1,73
3.	PAROMLIN, Zgrada skladišta brašna, Zagreb PR+4K, (1907.)	9	14,11	2,60
4.	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, Trg RH 14, Zagreb PO+PR+2K+Potkr., (1859.)	3	14,86	4,65
5.	Centar SLAVA RAŠKAJ, Ilica 83, Zagreb PO+PR+2K+Potkr., (oko 1870.)	3	10,44	1,18
6.	CROATIA OSIGURANJE, Trg bana J. Jelačića 13 i Praška ul. 1 i 3, ZGRADA 1 PO+PR+2K+Potkr., Zagreb, (kraj 19. st.)	9	13,88	4,38
7.	CROATIA OSIG., Trg bana J. Jelačića 12 i 12/1, ZGRADE 2 i 3, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1881.)	6	10,28	2,64
8.	CROATIA OSIG., Praška 5, ZGRADA 4, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1926.)	2	19,20	7,07
9.	Bakačeva 3, Zagreb PO+PR+3K+Potkr., (1912.-1913.)	3	15,26	1,68
10.	Franck – sladara, Vodovodna 20, Zagreb PR+3K, (početak 20. stoljeća)	2	9,17	2,12
11.	Vlaška 69, Zagreb PR+5, (1937.)	3	8,56	1,22
12.	Kundekova kuća, Kundekova ulica 2, Ivanić Grad PO+PR+1K+Potkr., (kraj 19. st.)	4	19,23	1,81
13.	Metalčeva ulica 15, Dvorišna zgrada B, Zagreb PR+1K+Potkr., (1939.)	4	8,56	3,48
14.	Bivša TVORNICA DUHANA ZAGREB (TDZ), Jagićeva bb, Zagreb PR+2K+Potkr., (1882.)	2	13,98	1,32

## 5. Metode ispitivanja primjenom plosnatih preša

Poznavanje mehaničkih svojstava zida od presudne je važnosti pri proračunu zidanih konstrukcija, a primjena plosnatih preša omogućuje pouzdanije utvrđivanje tih svojstava. To se u prvom redu odnosi na određivanje vertikalnog naprezanja u zidu te ovisnosti naprezanje - deformacija u tlaku (modul elastičnosti), a mogu se upotrijebiti i za određivanje tlačne i posmične čvrstoće zida.

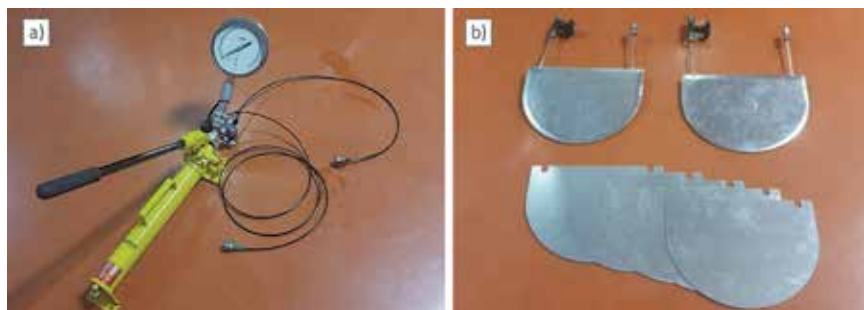
Plosnata preša ima oblik mjehura koji se sastoji od dviju čeličnih ploča zavarenih po obodu. Tlak u plosnatoj preši nanosi se pomoću hidraulične pumpe za što postoje odgovarajući ulazni i izlazni ventili na koje se preša priključuje. Postoje razni oblici plosnatih preša, a neki od njih prikazani su na slici 15. Ispitivanje plosnatim prešama opisano je u normama ASTM-a [5, 10, 11] i preporukama RILEM-a [12, 13].

Prilikom ispitivanja plosnate preše se umeću u horizontalne otvore u zidu te se povećanjem tlaka u preši kontrolirano nanosi naprezanje u zidu.



Slika 15. Različiti tipovi plosnatih preša

Osim plosnatih preša opremu čine hidraulični sustav za nanošenje tlaka, mjerni uređaji za mjerenje pomaka/relativnih deformacija, podložne ploče, oprema za izradu otvora i pomoćni alati za čišćenje (usisivači, četke i sl.). Hidraulični sustav za



Slika 16. a) Hidraulični sustav za nanošenje tlaka; b) Plosnate preše i čelične podložne ploče

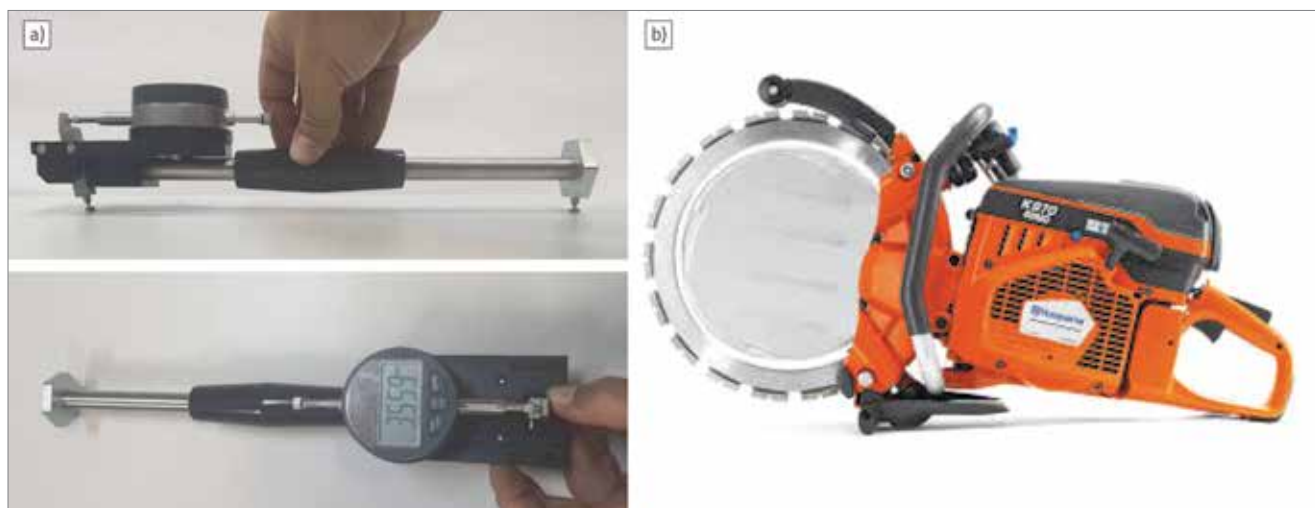
nanošenje tlaka sastoji se od ručne ili električne hidraulične pumpe, manometra i odgovarajućih spojnih crijeva (slika 16.a). Pumpa mora omogućavati održavanje konstantnog tlaka unutar 1 % tijekom najmanje 5 minuta u cijelom radnom području, a manometar mora imati točnost od 1 % u cijelom mjernom području. Da bi se plosnate preše zaštitile od oštećenja uslijed grubih površina i otvorima ziđa i da bi se što bolje ispunio otvor u zidu, upotrebljavaju se čelične podložne ploče čije dimenzije odgovaraju dimenzijama plosnate preše (slika 16.b).

Za mjerenje pomaka/relativnih deformacija obično se upotrebljavaju prijenosni komparatori (slika 17.a). Mjerno područje uređaja mora biti najmanje 5 mm te moraju moći pokriti mjernu bazu koja je definirana dimenzijama plosnate preše (0,3 A - 0,6 A). Prema ASTM normama točnost mjerne opreme mora biti unutar  $\pm 0,005$  % mjerne baze, a RILEM-ove preporuke zahtijevaju osjetljivost od najmanje 0,0025 mm. Pri ispitivanju od velike je važnosti način pripreme otvora za plosnatu prešu u zidu. Naime, dimenzije otvora utječu na točnost ispitivanja i moraju odgovarati dimenzijama plosnate preše. Pri izradi otvora obično se uklanja mort iz sljubnica za što se mogu upotrijebiti razni alati (bušilice, ubodne pile, itd.). Ako se ispituje s plosnatim pločama polukružnih oblika, poželjno je za otvaranje otvora u zidu upotrijebiti ekscentrične prstenaste pile (slika 17.b).

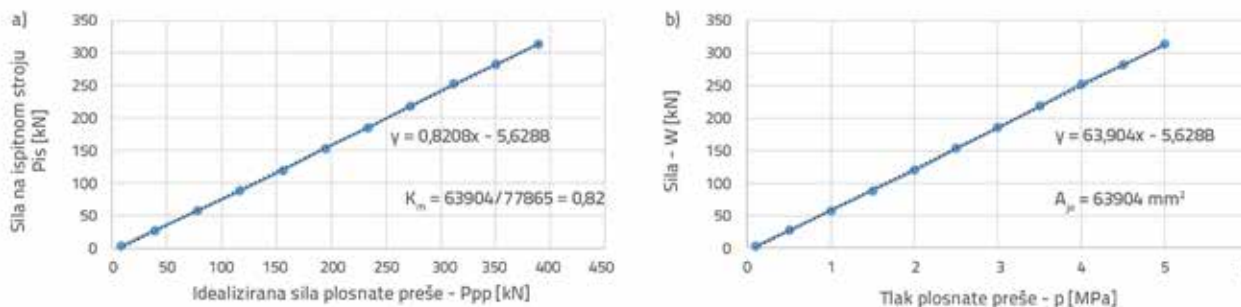
## 5.1. Kalibracija plosnate ploče

Dio tlaka hidraulične tekućine troši se na deformaciju same plosnate preše i iz tog razloga je tlak u sustavu veći od naprezanja koji plosnata preša prenosi na ziđe. Kako bi se odredio taj utjecaj, potrebno je kalibrirati plosnatu prešu i odrediti koeficijent  $K_m$  da bi se odredio odnos između tlaka hidraulične tekućine i naprezanja koje se prenosi na ziđe.

Postupak kalibracije provodi se na način da se u tlačnom ispitnom uređaju plosnata preša opterećuje preko dviju čeličnih ploča debljine 50 mm, pri čemu os djelovanja sile mora biti unutar 6 mm od središta površine plosnate preše, a rub plosnate preše mora biti poravnat s rubom donje i gornje ploče. Čelične ploče moraju biti na razmaku, koji se postiže umetanjem distancera (razmačnika), čija debljina približno odgovara debljini dvaju limova od kojih je proizvedena plosnata preša pomnoženo s 1,33. Kalibraciju je potrebno načiniti kroz cijelo radno područje plosnate preše, s najmanje 10 jednakih inkremenata povećanja opterećenja. Na ploče se nanosi predopterećenje kako bi se osiguralo da su ploče nalegle na distancere (razmačnike), predopterećenje odgovara naprezanju od 0,07 MPa po površini plosnate preše, nakon čega se udaljenost između ploča, odnosno položaj traverze ispitnog uređaja, ne mijenja. Kalibracija se provodi tako da se tlak povećava pomoću hidraulične pumpe s inkrementom od 5 % najvećega radnog tlaka plosnate preše kroz najmanje 10 koraka, a pri svakom koraku potrebno je registrirati tlak plosnate preše i silu na ispitnom uređaju. Provode se tri ciklusa kalibracije. Prema normi [10], potrebno je odrediti idealiziranu silu plosnate preše kao umnožak bruto ploštine i tlaka plosnate preše ( $P_{pp}$ ). Pri iscrtavanju dijagrama na horizontalnu os nanosi se sila  $P_{pp}$  na vertikalnu os nanosi se sila izmjerena ispitnim strojem ( $P_{is}$ ), a koeficijent  $K_m$  je:



Slika 17. a) Prijenosni komparator; b) Prstenasta pila



Slika 18. a) Kalibracija prema ASTM normama; b) Kalibracija prema RILEM preporukama

$$K_m = \frac{P_{IS}}{P_{PP}} \quad (8)$$

Prema preporukama RILEM-a [12], određuje se efektivna ploština plosnate preše  $A_{je}$  kao nagib regresijskog pravca koji je određen iz dijagrama na kojem horizontalna os predstavlja tlak na plosnatoj preši –  $p$  (MPa), a vertikalna os silu na ispitnom uređaju –  $W$  (kN)

$$A_{je} = \frac{W}{p} \quad (9)$$

Kalibraciju je potrebno ponoviti nakon 5 ispitivanja ili nakon pojave značajnije deformacije plosnate preše. Primjer kalibracije prema ASTM-u i prema RILEM-u prikazan je na slici 18.a i 18.b.

## 5.2. Određivanje postojećeg tlačnog naprezanja u zidu

Princip ispitivanja je taj da se u zidu djelomično oslobodi tlačno naprezanje uklanjanjem morta iz horizontalne sljubnice, a zatim se naprezanje kompenzira pomoću plosnate preše umetnute u otvor sve dok se ne uspostavi početno stanje naprezanja i deformacija, što se kontrolira mjerenjem polja pomaka okomito na otvor. Treba naglasiti da je naprezanje određeno ovim ispitivanjem prosječna vrijednost naprezanja zida u okolini otvora, a jedino u slučaju kada je zid potpuno homogen i kada opterećenje nije ekscentrično može se pretpostaviti da je naprezanje reprezentativno za cijeli zid koji se ispituje.

Prije ispitivanja potrebno je ukloniti žbuku na odabranom mjestu ispitivanja, zatim je potrebno zacrtati mjesto na kojem će se napraviti otvor (horizontalna sljubnica) te postaviti mjerne markice za prijenosni komparator. Mjerna duljina (mjerna baza) mora biti između 0,3 i 0,6 dimenzije  $A$  plosnate preše, a potrebno je najmanje tri para markica koje se postavljaju na površinu opeke. Prije izrade otvora, odnosno uklanjanja morta iz odabrane sljubnice, potrebno je načiniti početno mjerenje mjerne duljine, slika 19.

Kao što je prije spomenuto, najpovoljniji način za izradu otvora je upotrebom prstenaste pile, ali to je moguće samo ako se rabe polukružne plosnate preše. Promjer rezne ploče (prstena) mora biti približno isti kao i promjer plosnate preše (unutar 12 mm), a sljubnicu trebala potpuno očistiti od morta kako bi se tlak nanosio direktno na opeku.

Nakon postavljanja plosnate preše u otvor, uz korištenje podložaka kako bi plosnata preša što bolje popunila otvor, mjeri se promjena mjerne duljine. Zatim se nanosi tlak u plosnatoj preši i to do 50 % tlaka koji odgovara očekivanom naprezanju u zidu, nakon čega se tlak otpusti. Pri ispitivanju tlak se nanosi u inkrementima od 25 % dok se ne dosegne tlačno naprezanje u zidu, odnosno dok se mjerna duljinu ne vrati na početnu (za  $d = d_0$  vrijedi da je  $\sigma = \sigma_0$ ). U završnom koraku ispitivanja odstupanje mjerne duljine od inicijalne mora biti unutar granica od  $\pm 0,013$  mm za srednju vrijednost svih mjernih mjesta ili manje od 1/20 početnog smanjenja mjerne duljine, uz uvjet da pojedino mjesto ne odstupa za više od 0,025 mm ili 1/10 početnog smanjenja mjerne duljine [10]. Prema RILEM-u [12], inicijalni tlak potrebno je ostvariti u približno 8 inkremenata koji nisu manji od 0,05 MPa. Pri svakoj razini mjerna duljina se mjeri po tri puta na svim mjernim mjestima. Zatim se otpušta tlak i ponavlja postupak kako bi se potvrdio konačni tlak u plosnatoj preši. Otvor se nakon ispitivanja zapunjava mortom. Slika 19 prikazuje postavku i osnovne korake postupka ispitivanja. Prema ASTM-u [10], naprezanje u zidu  $f_m$  određuje se prema izrazu:

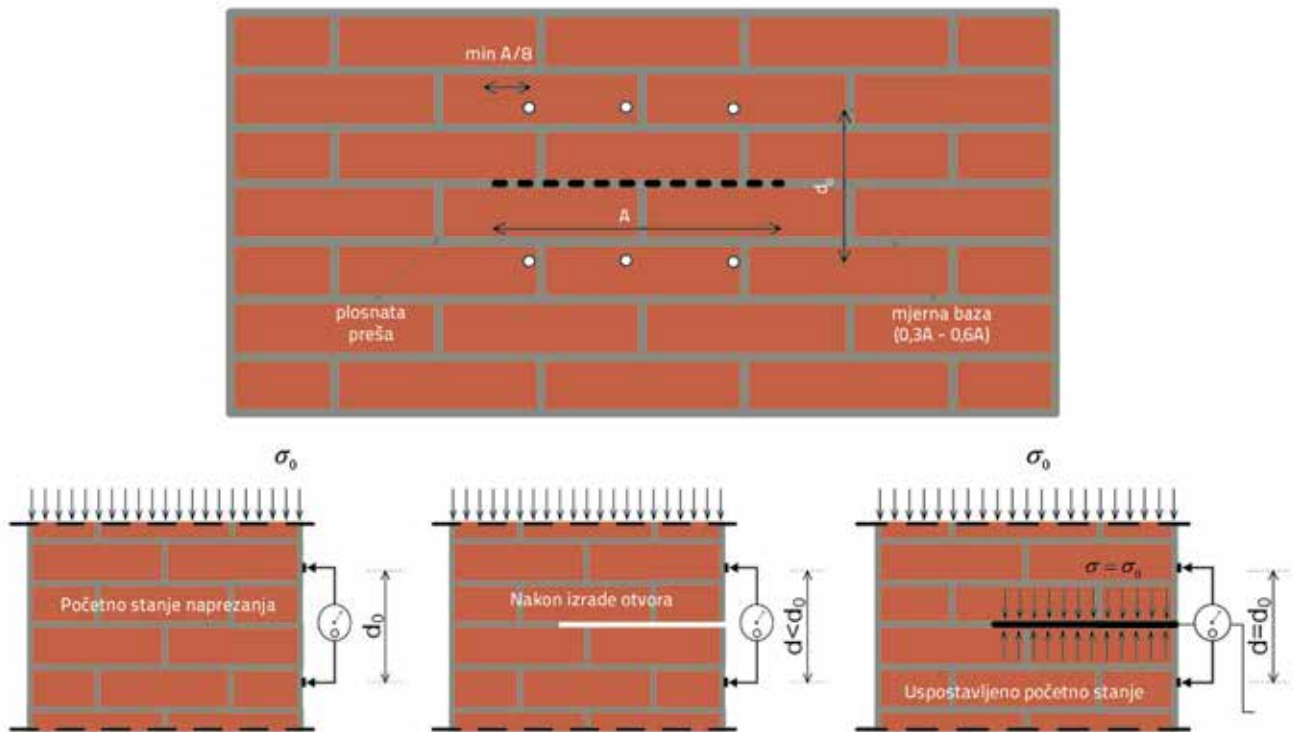
$$f_m = K_m K_a p \quad (10)$$

gdje je  $K_m$  bezdimenzijski koeficijent koji ovisi o geometriji i krutosti plosnate preše i određuje se kalibracijom,  $K_a$  je bezdimenzijski koeficijent koji se određuje kao omjer ploštine plosnate preše i ploštine otvora, a  $p$  je tlak u plosnatoj preši potreban da se mjerna duljina vrati na početnu.

Prema RILEM-u [12], naprezanje u zidu  $S_r$  se određuje prema izrazu:

$$S_r = K_e p A_{slot} / A_{je} \quad (11)$$

gdje je  $K_e$  bezdimenzijski koeficijent koji ovisi o položaju otvora u odnosu na sljubnicu, relativnoj veličini plosnate preše i opeke te geometrijskim značajkama plosnate preše (za karakteristične opeke dimenzije 200 do 300 mm sa 75 do 125 mm, slučaj kada je plosnata preša umetnuta u sljubnicu i dimenzija preše je slična dimenziji opeke, koeficijent  $K_e$  se uzima 0,83, a za druge slučajeve vrijednost se uzima iz literature),  $A_{slot}$  je ploština otvora,



Slika 19. Postupak određivanja napreznja u zidu

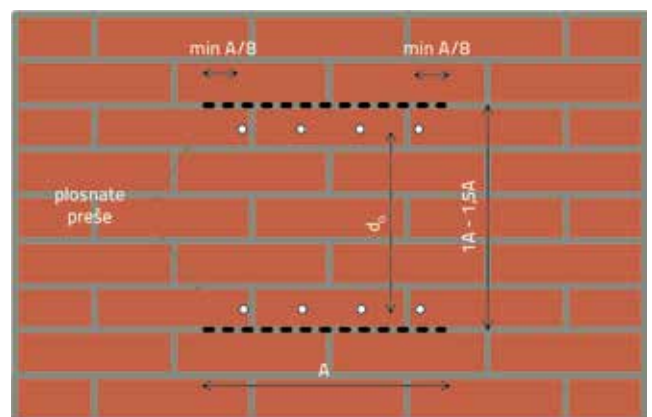
$A_{je}$  je efektivna ploština plosnate preše, a  $p$  je tlak u plosnatoj preši potreban da se mjerna duljina vrati na početnu.

U izvješću o ispitivanju potrebno je navesti opis lokacije, uvjete okoline (npr. temperatura), podatke o građevini (tip, opis,...), godinu izgradnje, ime ispitivača, datum ispitivanja, podatke o lokaciji ispitivanja unutar građevine, podatke o zidu, vizualnu ocjenu stanja zida, skice, način izrade otvora, skice otvora i mjernih mjesta uz sve potrebne dimenzije, fotodokumentaciju, podatke o opremi, podložnim pločama, podatke o  $K_m$ ,  $K_d$ ,  $p$  i proračun  $f_m$  ili podatke o  $A_{je}$ ,  $A_{slo}$ ,  $K_e$  i proračun  $S_r$ . Očekivano odstupanje metode može biti do 20 % te su potrebna najmanje tri ispitivanja na sličnim zidovima.

### 5.3. Određivanje ovisnosti napreznja - deformacija zida

Za određivanje ovisnosti napreznja - deformacija zida potrebno je upotrijebiti dvije plosnate preše koje se spajaju na jednu hidrauličnu pumpu. Plosnate preše se umeću u paralelne horizontalne otvore u zidu te se nanošenjem tlaka u preše lokalno nanosi tlačno napreznje. Između plosnatih preša postavljaju se uređaji za mjerenje relativnih deformacija te se istovremeno mjeri napreznje i relativna deformacija, što omogućuje određivanje modula elastičnosti. Treba imati na umu da je dio zida koji se ispituje i dalje povezan (otvori nisu potpuno odvojili volumen zida koji se ispituje) što predstavlja mjernu nesigurnost koja se ne može otkloniti. No, neovisno o tome vrijednost modula elastičnosti ima zadovoljavajuću točnost [13].

Prije provođenja ispitivanja odabire se dio zida na kojem nema značajnijih oštećenja niti nepravilnosti. Na odabranom dijelu zida uklanja se žbuka i označavaju se mjesta na kojima će se izraditi otvori, slika 20. Otvore u zidu je potrebno izvesti uz minimalno oštećivanje okolnog zida. Otvore je potrebno izvesti paralelno, jedan iznad drugog, na razmaku od najmanje pet opeka, a ako se radi o kamenom zidu, između otvora moraju biti najmanje tri kamena elementa. U svakom slučaju razmak otvora mora biti veći od dimenzije  $A$  plosnate preše, ali ne smije biti veći od  $1,5A$ . Za optimalnu točnost metode dimenzija  $A$  plosnate preše mora biti jednaka ili veća od  $1,5$  duljine opeke ako je duljina opeke veća od 200 mm, a dvostruko veća ako je duljina opeke manja od 200 mm.



Slika 20. Postupak određivanja ovisnosti napreznja - deformacija zida

Za mjerenje relativnih deformacija osim prijenosnih komparatora mogu se upotrijebiti i LVDT osjetila, što omogućuje dobivanje kontinuiranog zapisa naprezanje – relativna deformacija. Da bi se mogao dobiti kontinuirani zapis za mjerenje tlaka hidraulične pumpe, upotrebljava se senzor s analognim naponskim izlazom i odgovarajući sustav za prikupljanje podataka. Preporuka je da se mjerenje relativnih deformacija provodi na najmanje četiri mjerna mjesta u području između plosnatih preša, uz određivanje srednje vrijednosti. Mjerna baza mora pokriti 75 do 90 % razmaka plosnatih preša.

Kao što je prije navedeno, u slučaju da se upotrebljavaju polukružne plosnate preše, za izradu otvora je najprikladnije upotrijebiti ekscentrične prstenaste pile. Plosnate preše umeću se u otvore uz upotrebu čeličnih podložnih ploča. Prije samog ispitivanja preporučljivo je nanijeti naprezanje od približno 50 % tlačne čvrstoće zida kako bi se ostvarilo pravilno i ravnomjerno nalijeganje plosnatih preša i čeličnih podložnih ploča na površine otvora. Nakon inicijalnog opterećenja tlak u preši se otpušta. Prije početka samog ispitivanja obavlja se nulto mjerenje i zatim se tlak povećava u inkrementima od približno 10 % očekivanog maksimalnog naprezanja. Pri svakom koraku tlak se zadržava najmanje jednu minutu ili dok se ne stabilizira, a zatim se očitavaju relativne deformacije. Prilikom ispitivanja potrebno je pratiti prirast tlaka  $dp$  ovisno o prirastu deformacije  $de_m$  i u slučaju pada tog odnosa ispitivanje treba prekinuti kako bi se izbjeglo značajnije oštećenje zida. Nakon ispitivanja otvore treba zapuniti mortom. Slika 20. prikazuje postupak ispitivanja. Naprezanje u zidu određuje se prema izrazima (10) i (11). Tangentni modul elastičnosti određuje se pri bilo kojoj razini naprezanja prema izrazu (12):

$$E_t = df_m / de_m \quad (12)$$

gdje je  $df_m$  prirast naprezanja pri odabranoj razini naprezanja, a  $de_m$  prirast relativne deformacije pri odabranoj razini naprezanja.

Sekantni modul elastičnosti za bilo koju razinu naprezanja određuje se prema izrazu (13):

$$E_s = f_m / e_m \quad (13)$$

gdje je  $f_m$  naprezanje pri odabranoj razini, a  $e_m$  relativna deformacija pri odabranoj razini.

U izvješću o ispitivanju potrebno je navesti opis lokacije, uvjete okoline (npr. temperatura), podatke o građevini (tip, opis,..), godinu izgradnje, ime ispitivača, datum ispitivanja, podatke o lokaciji ispitivanja unutar građevine, podatke o zidu, vizualnu ocjenu stanja zida, skice, način izrade otvora, skice otvora i mjernih mjesta, uz sve potrebne dimenzije, fotodokumentaciju, podatke o opremi, podložnim pločama, podatke o  $K_m$ ,  $K_d$ ,  $p$  i proračun  $f_m$  ili podatke o  $A_{je}$ ,  $A_{slot}$ ,  $K_e$  i proračun  $S_r$ , dijagram naprezanje – relativna deformacija te vrijednosti tangentnog ili sekantnog modula elastičnosti. Ova metoda se može upotrijebiti za određivanje

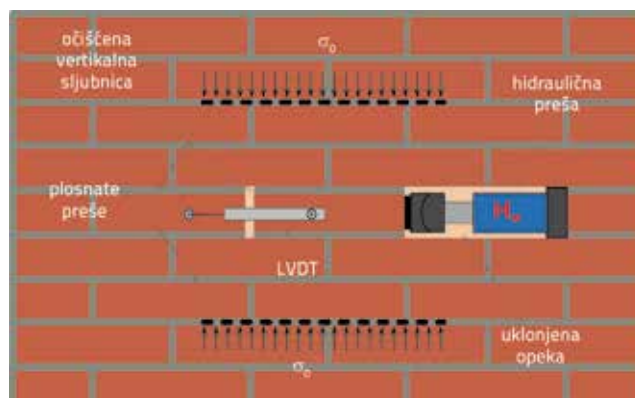
tlačne čvrstoće zida u slučaju da se radi o starijem zidu male tlačne čvrstoće. Međutim, takvo ispitivanje može uzrokovati značajnija oštećenja u zoni ispitivanja te se općenito ne preporuča kao pouzdana metoda određivanja tlačne čvrstoće [13].

#### 5.4. Ispitivanje posmične čvrstoće zida *in situ* uz kontrolu vertikalnog naprezanja plosnatim prešama

U ovom poglavlju opisana je metoda određivanja posmične čvrstoće zida uz kontrolu vertikalnog tlačnog naprezanja plosnatim prešama. Ispitivanje se provodi na način opisan u poglavlju 2, a nanošenje i kontrola tlačnog naprezanja provodi se prema metodi opisanoj u poglavlju 5.2. Prednost ove metode je što se pri posmičnom ispitivanju zida kontrolira vertikalno naprezanje, što omogućuje određivanje posmične čvrstoće bez vertikalnog naprezanja  $f_{vo}$ . Posmična čvrstoća zida  $f_v$  ovisi o posmičnoj čvrstoći bez vertikalnog naprezanja  $f_{vo}$  i umnošku tlačnog naprezanja  $\sigma_0$  te koeficijentu trenja  $\mu$ .

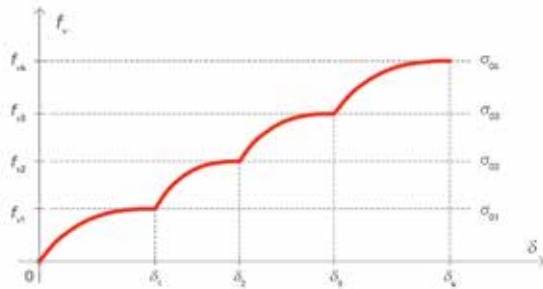
$$f_v = f_{vo} + \mu \cdot \sigma_0 \quad (14)$$

Postupci ispitivanja prikazani su na slici 21. Horizontalni otvori za plosnate preše izvode se u sljubnicama tako da između otvora bude pet redova opeke. U srednjem redu uklanja se opeka do one na kojoj se provodi ispitivanje, a s druge strane ispitivane opeke uklanja se mort iz vertikalne sljubnice kako bi se oslobodio prostor za horizontalni pomak. U prostor koji je oslobođen vađenjem opeke umeće se hidraulična preša te odgovarajuće čelične ploče za prijenos opterećenja. Nakon nanošenja tlačnog naprezanja plosnatim prešama, nanosi se horizontalno opterećenje. Tlačno naprezanje određuje se prema izrazima (10) ili (11) definiranim u poglavlju 5.2. U trenutku kada popusti veza između opeke i morta opeka će se pomicati pri konstantnoj sili koja predstavlja maksimalnu silu za vertikalno tlačno naprezanje pri kojem je provedeno ispitivanje. Isti postupak provodi se za još najmanje dva nivoa vertikalnog tlačnog naprezanja.

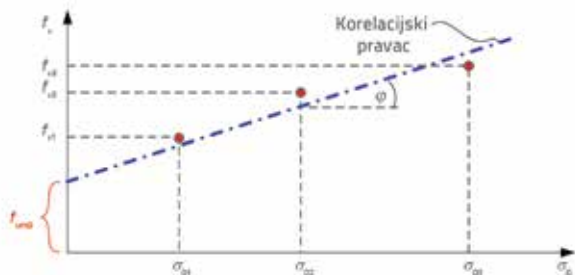


Slika 21. Postupak određivanja posmične čvrstoće zida *in situ* uz kontrolu vertikalnog naprezanja plosnatim prešama

Opisanim postupkom može se odrediti dijagram zavisnosti pomaka  $\delta$  i posmične čvrstoće zida prikazan na slici 22.



Slika 22. Dijagram zavisnosti pomaka  $\delta$  i posmične čvrstoće zida  $f_v$  [6]



Slika 23. Dijagram tlačno naprezanje - posmična čvrstoća

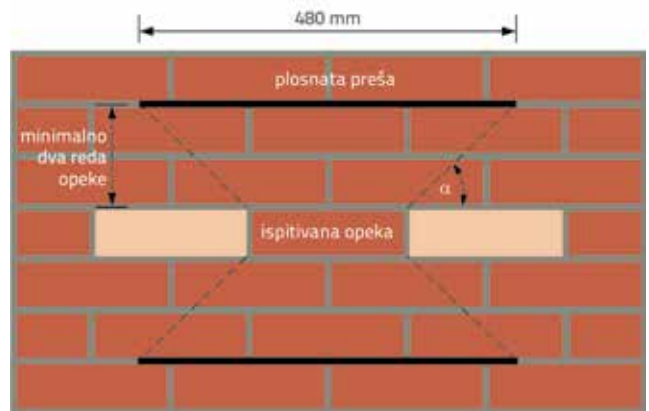
Nakon što su na prethodno opisani način određene posmične čvrstoće ( $f_{v1}$ ,  $f_{v2}$ ,  $f_{v3}$ ) pri kontroliranim razinama vertikalnog tlačnog naprezanja ( $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_{03}$ ), definirane su tri točke u koordinatnom sustavu kojem je na horizontalnoj osi vertikalno tlačno naprezanje, a na vertikalnoj posmična čvrstoća. Sada možemo odrediti korelacijski pravac (Coulombov kriterij loma) koji s horizontalnom osi zatvara kut ( $\varphi$  - kut unutarnjeg trenja), a tangens tog kuta predstavlja koeficijent trenja (slika 23.).

Posmična čvrstoća bez vertikalnog naprezanja može se zatim odrediti prema izrazu (14), a sjecište korelacijskog pravca s vertikalnom osi predstavlja srednju vrijednost posmične čvrstoće bez vertikalnog naprezanja ( $f_{vm0}$ ) za tri ispitivanja:

$$f_{vm0} = f_{vi} - \mu \cdot \sigma_{0i} = f_{vi} - \text{tg}\varphi \cdot \sigma_{0i} \quad (15)$$

Na eksperimentalno određivanje posmične čvrstoće i koeficijenta trenja mogu utjecati lokalne nepravilnosti i nehomogenosti zida, vertikalne sljubnice i netočnost određivanja vertikalnog tlačnog naprezanja [14].

Zbog uklanjanja susjedne opeke, tlačno naprezanje koje djeluje na ispitivanu opeku je veće od onog koje se nanosi plosnatim prešama i potrebno ga je korigirati. Faktor korekcije je jedinstven i ovisi o konfiguraciji ispitivanja, dimenzijama plosnate preše i ispitivane opeke te u literaturi ne postoje podaci za različite konfiguracije. Za konfiguraciju ispitivanja prikazanu na slici 24 tlačno naprezanje ispitivane opeke može biti čak 1,7 puta veće od onog koje se nanosi plosnatim prešama [14].



Slika 24. Konfiguracija ispitivanja kod kojeg faktor korekcije iznosi 1,7



Slika 25. Karakteristični zidovi s otvorima i instalacijama

Osim navedenih poteškoća, problemi se pojavljuju i pri pronalaženju adekvatnog mjesta za takvo ispitivanje u realnim građevinama, naročito ako se one upotrebljavaju za vrijeme ispitivanja. Pri tome je potrebno pronaći adekvatnu površinu zida, što je vrlo teško jer u zidovima ima puno otvora, instalacija, zazidanih otvora, dimnjaka, a često se pronađe i način zidanja punom opekom koji onemogućava to ispitivanje (slika 25.). Nadalje, otvori za umetanje plosnatih preša se režu dijamantnom pločom uz upotrebu vode kojom se zasiti zid, a onda treba pričekati dok se zid ne isuši. Rezultat toga je dugotrajno i skupo ispitivanje.

## 6. Zaključak

Usprkos svim navedenim poteškoćama, rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zida *in situ*, uz kontrolu vertikalnog naprezanja plosnatim prešama dali bi vrijedne podatke o koeficijentima trenja i tlačnim naprezanjima u zidovima. Koeficijenti trenja u suprotnom se preuzimaju iz literature ili norme, a tlačna naprezanja mogu se pretpostaviti iz proračunskog modela. Prije intenziviranja radova na obnovi potresom oštećenih građevina bilo bi vrlo važno napraviti određeni broj ovakvih ispitivanja na karakterističnim zgradama za što bi trebalo osigurati sredstva. Uložena sredstva vratila bi se kroz uštede na troškovima obnove,

jer bi projektanti u proračun ulazili s realnim kriterijem loma, a složena i skupa ispitivanja ne bi se provodila na svakoj zgradi. Rezultati dobiveni jednostavnim posmičnim ispitivanjem također predstavljaju vrlo upotrebljivu informaciju projektantu konstrukcije o stanju ziđa. Ako u izraz (15) uvrstimo:

- srednju vrijednost posmične čvrstoće jednostavnih posmičnih ispitivanja prikazanih u točki 2.1 umanjenu za standardno odstupanje,  $f_{vm} = 0,526 - 0,117 = 0,409$  MPa
- koeficijent trenja  $\mu = 0,6$ , što je 1,5 puta veća vrijednost od one iz norme [4]
- tlačno naprezanje  $\sigma_0 = 0,4$  MPa, za vrijednost posmične čvrstoće bez vertikalnog naprezanja dobivamo 0,169 MPa ( $f_{vm0} = f_{vm} - \mu \cdot \sigma_0 = 0,409 - 0,6 \cdot 0,4 = 0,169$  MPa).

Dobivena posmična čvrstoća bez vertikalnog naprezanja čak je i uz visoke vrijednosti  $\mu$  i  $\sigma_0$  veća od one koju predviđaju norme za slučaj kada ne postoje nikakva ispitivanja. Kada bi postojali relevantni podaci o koeficijentima trenja i tlačnim naprezanjima, dobiveni na reprezentativnom uzorku, proračun prikazan u jednadžbi (16) bio bi znatno pouzdaniji. U tom slučaju bi se rezultati dobiveni jednostavnim posmičnim ispitivanjima mogli upotrijebiti s većom pouzdanošću.

Ovdje je nužno ponovno naglasiti da se proračunom posmične čvrstoće ziđa (čak i s ovako ustanovljenim vrijednostima *in situ*) neće dobiti mjerodavna vrijednost otpornosti koja se mora usporediti s proračunskim djelovanjem ( $Ed < Rd$ ). Nužno je provjeriti i druga dva načina sloma ziđa (slom dostizanjem vlačne čvrstoće ziđa uz pojavu kose pukotine i slom drobljenjem tlačnog područja ziđa izloženog djelovanju vertikalne sile, horizontalne sile i momenta savijanja).

## LITERATURA

- [1] Šavor Novak, M., Uroš M., Atalić J., Herak M., Demšić M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorčić, M.: Potres u Zagrebu od 22. ožujka 2020. - preliminarni izvještaj o seizmološkim istraživanjima i oštećenjima zgrada, Građevinar, 72 (2020) 10, pp. 843-867, <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>
- [2] HRN EN 1996-1-1: Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije, HZN, Zagreb, 2012
- [3] HRN EN 1998-1:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, HZN, Zagreb, 2011.
- [4] HRN EN 1998-3:2011 + NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada, HZN, Zagreb, 2011.
- [5] ASTM C1531-16.. Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index, ASTM International, 2016.
- [6] Sorić, Z.: Zidane konstrukcije, Zagreb, 2016.
- [7] Turnšek, V., Čačovič, F.: Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls, Proceedings of the 2nd International Brick Masonry Conference, Stoke-on-Trent, pp. 149-156, 1971.
- [8] Kišiček T., Stepinac M., Renić T., Hafner I., Lulić L.: Pojačanje ziđa na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a, Građevinar, 72 (2020) 10, pp. 937-953, <https://doi.org/10.14256/JCE.2983.2020>
- [9] HRN EN 772-1:2015: Metode ispitivanja zidnih elemenata - 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće, HZN, Zagreb, 2015.
- [10] ASTM C1196-14a: Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements, ASTM International, 2014.
- [11] ASTM C1197-14a: Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method, ASTM International, 2014.
- [12] RILEM TC 177-MDT: Test method recommendations of RILEM TC 177-MDT 'Masonry durability and on-site testing' - D.4: In-situ stress tests based on the flat jack, Materials and Structures, 37 (271), pp. 491-496, 2004.
- [13] RILEM TC 177-MDT: Test method recommendations of RILEM TC 177-MDT 'Masonry durability and on-site testing' - D.5: In-situ stress - strain behaviour tests based on the flat jack, Materials and Structures, 37 (271), pp. 497-501, 2004.
- [14] RILEM TC 127-MS: Recommendations of RILEM TC 127-MS: Tests for masonry materials and structures, Materials and Structures, 29 (192), pp. 459-475, 1996.