

OBNOVA GRADA ZAGREBA NAKON POTRESA

Ciklus predavanja: **znanjem za Zagreb** (i Hrvatsku)

Metode i rezultati ispitivanja zidanih građevina

**Domagoj Damjanović, Joško Krolo, Ivan Duvnjak &
Marko Bartolac**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet



Sadržaj

- **Uvod**
- **Ispitivanje posmične čvrstoće „in situ”**
- **Ispitivanje tlačne čvrstoće opeke**
- **Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida korištenjem plosnatih preša**
- **Eksperimentalna modalna analiza**
- **Zaključak**

Uvod

- Za izradu projekta **popravka, pojačanja i cjelovite obnove konstrukcije** oštećenih građevina neophodno je **provesti istražne radove** i ispitivanja kojima će se utvrditi mehanička svojstva materijala.
- Veliki broj zidanih građevina koje su građene početkom 20. stoljeća (ili ranije) su i prije potresa bile u lošem stanju:
 - sustavno neodržavanje,
 - nesancija ranijih oštećenja (npr. od ranijih potresa manjih intenziteta),
 - nekontrolirani zahvati zbog prenamjene prostora (probijanje ili zazidavanje otvora, pregrađivanje i sl.).

Uvod – osvrt na propise

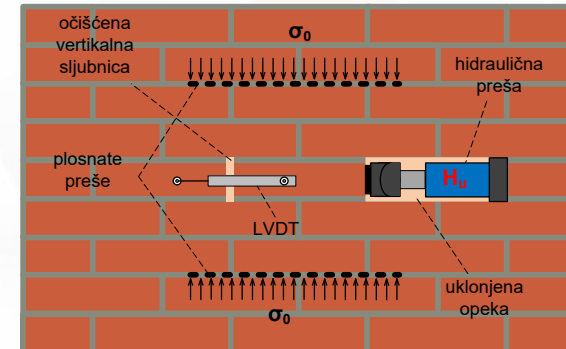
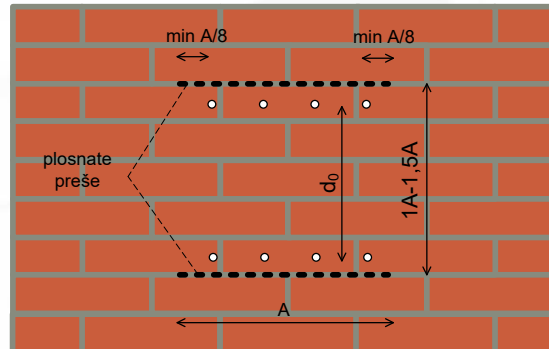
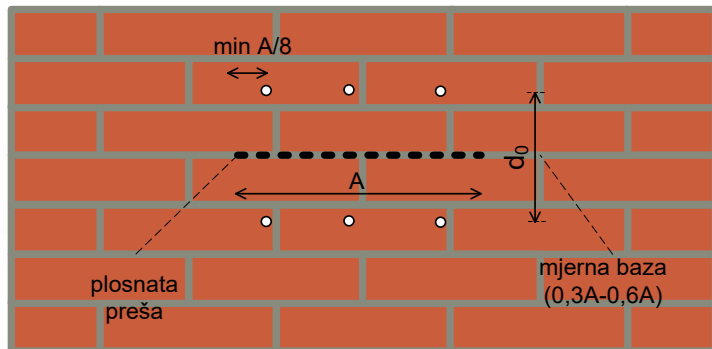
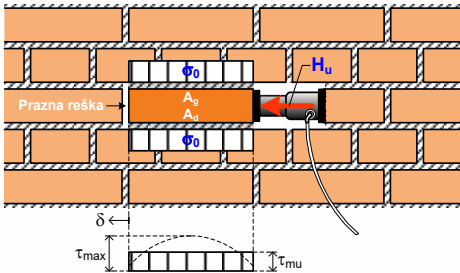
■ HRN EN 1998-3:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada

Razina znanja	Detalji	Materijali	Faktor povjerenja
RZ1 - ograničeno	Simulirani proračun u skladu s odgovarajućom praksom i ograničeni pregled (20 % elemenata)	Uobičajene vrijednosti iz vremena gradnje i ograničena ispitivanja (1 uzorak/katu)	1,35
RZ2 - uobičajeno	Nepotpuni izvorni izvedbeni nacrti uz ograničeni pregled (20 % el.) ili opsežni pregled (50 % el.)	izvorne projektne specifikacije uz ograničeno ispitivanje (1 uzorak/katu) <i>ili</i> opsežna ispitivanja (2 uzorka/katu)	1,20
RZ3 - potpuno	Izvorni izvedbeni nacrti uz ograničeni pregled (20 % el.) <i>ili</i> sveobuhvatni pregled (80 % el.)	Izvorni izvještaji o ispitivanju ili sveobuhvatna ispitivanja (3 uzorka/katu)	1,00

Nije definirano na kakvu se vrstu ispitivanja ili uzetih uzoraka kod zidanih konstrukcija misli!!

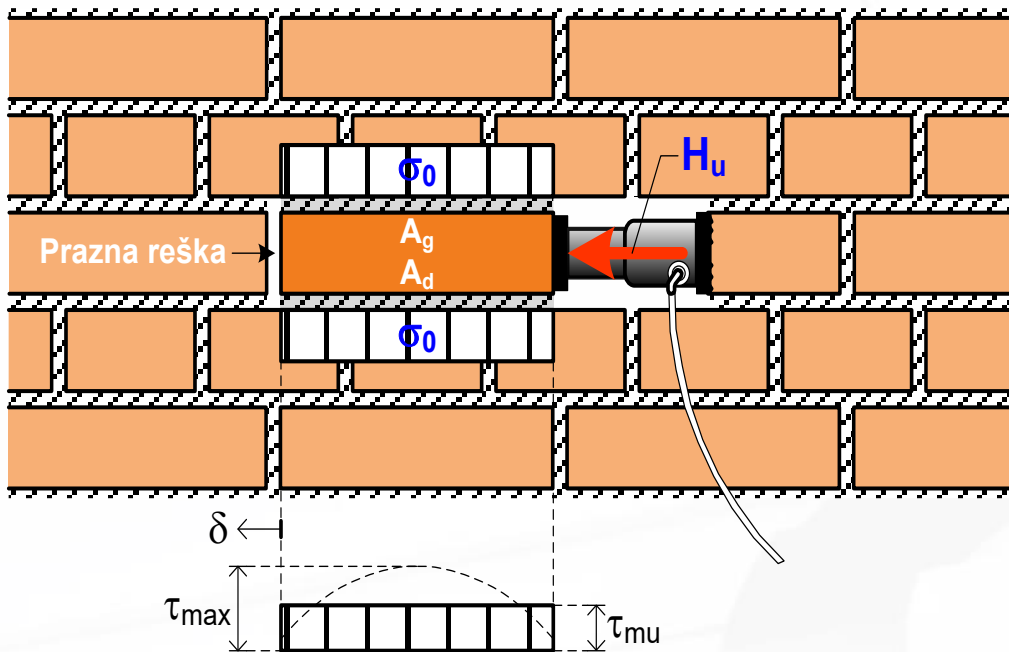
Uvod

- U prezentaciji su opisane pojedine metode i postupci te su prikazani postojeći rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava ziđa od pune opeke.



- Prikazan je i postupak određivanja dinamičkih parametara konstrukcija koji može poslužiti za kontrolu i kalibraciju numeričkih modela, a samim tim i povećanje pouzdanosti proračuna.

Ispitivanje posmične čvrstoće



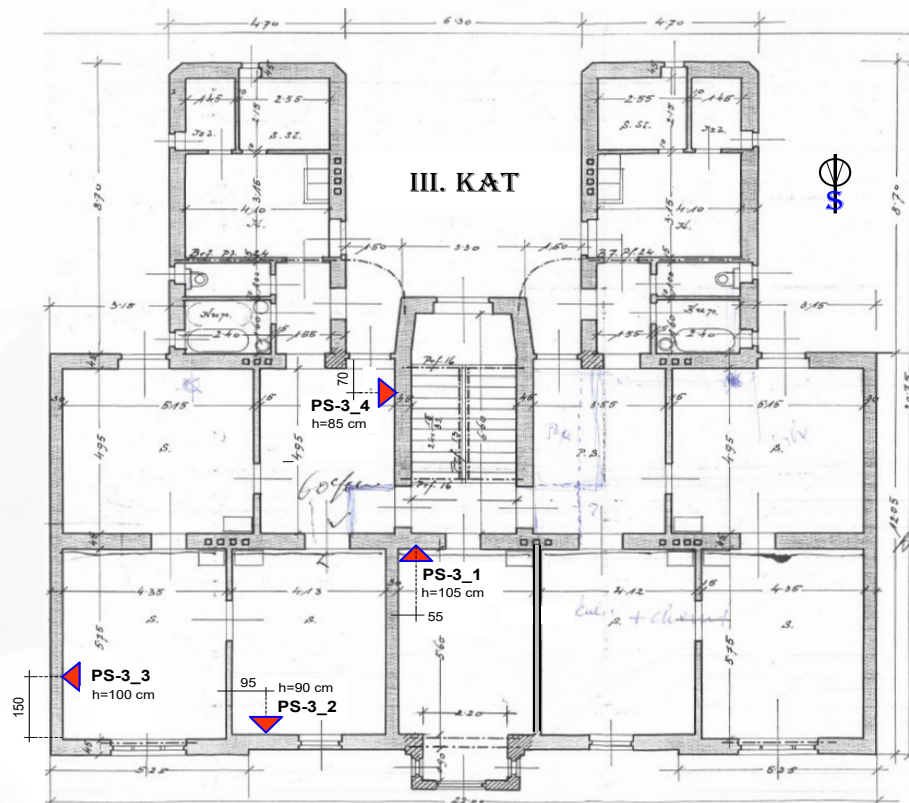
$$\tau_{mu} = f_{vd} = \frac{H_u}{A_g + A_d}$$



- τ_{mu} - prosječno granično posmično naprezanje
- H_u - registrirana granična horizontalna sile
- $A_g + A_h$ - gornja i donja površina ispitivane opeke

Ispitivanje posmične čvrstoće

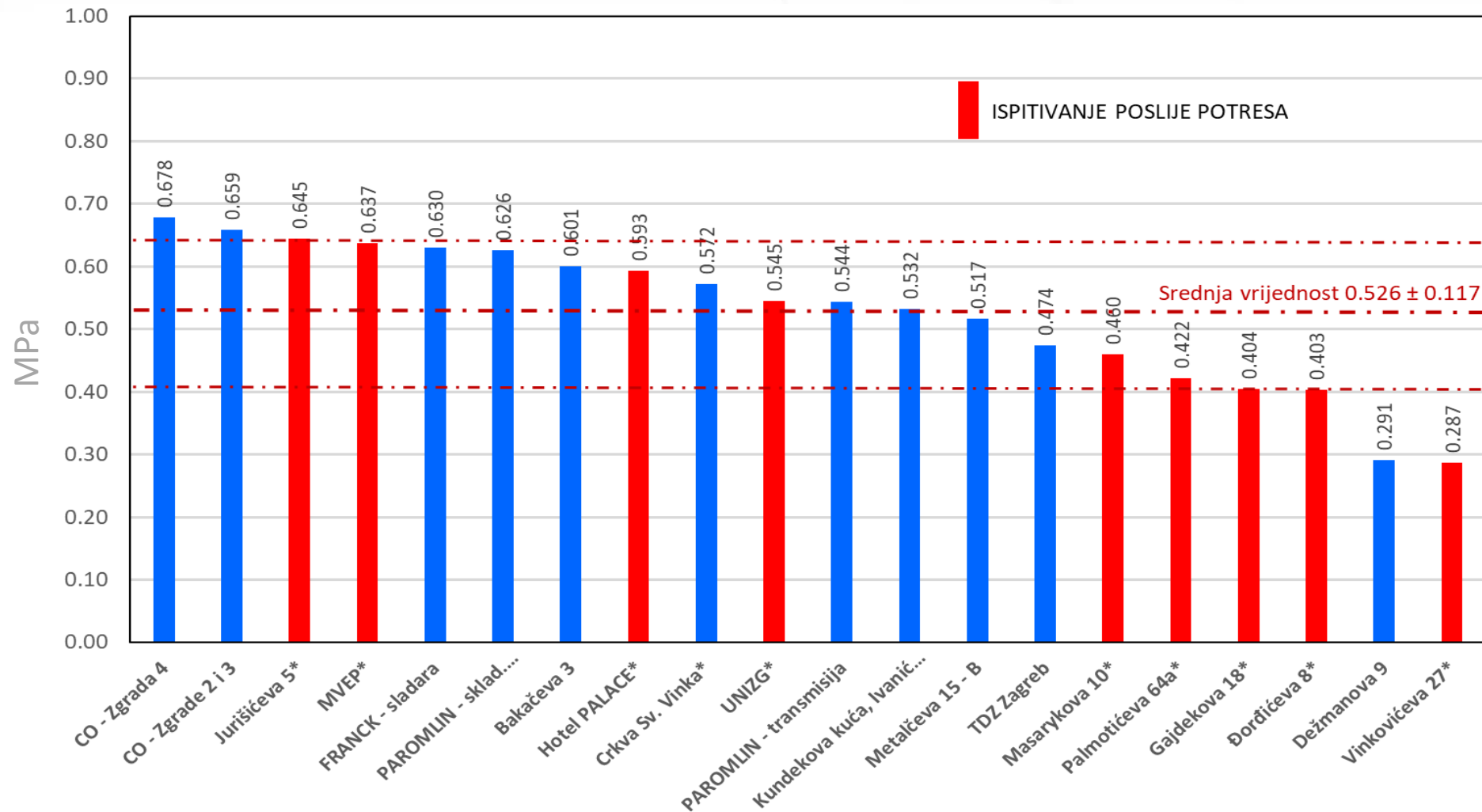
- tlocrtni položaj, kat, podaci o zidu (nosivi, unutarnji, stubišni, zabatni,...), visina od gornjeg ruba stropne konstrukcije.



▶ MJESTA ISPIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE MORTA

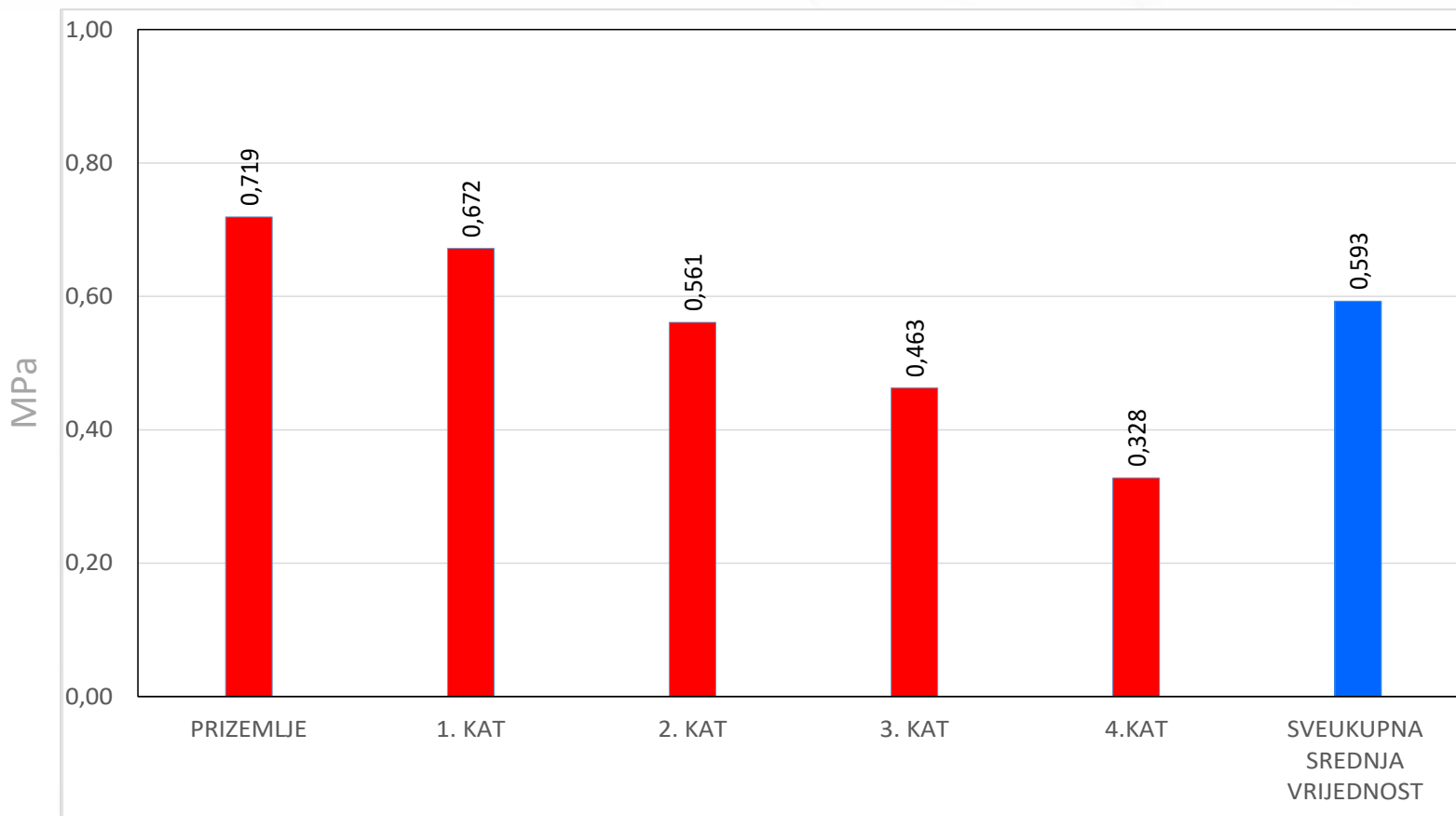
Ispitivanje posmične čvrstoće

- Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zida na 20 zidanih građevina u Zagrebu (cca 150 ispitivanja), prikazane su srednje vrijednosti.



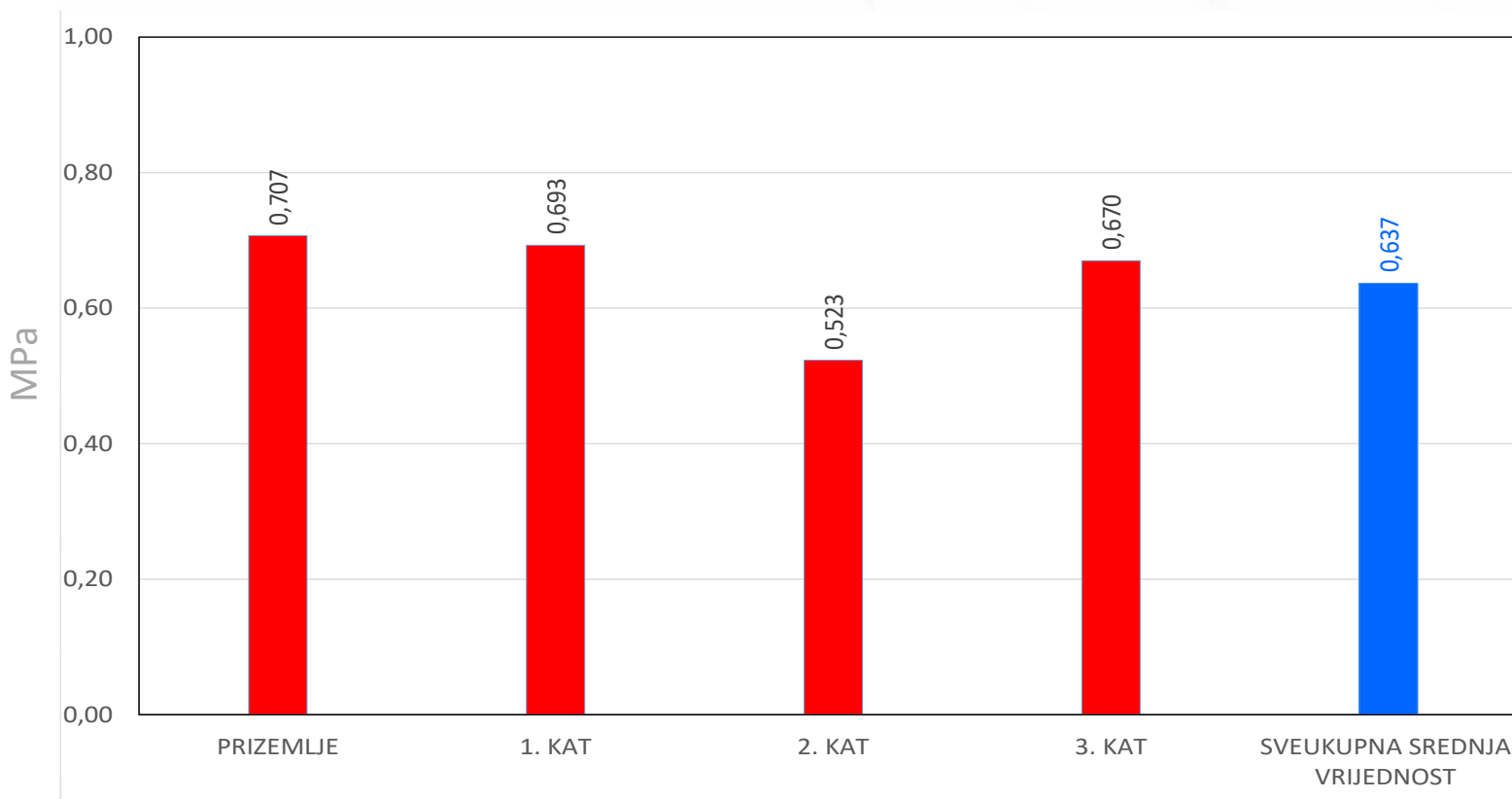
Ispitivanje posmične čvrstoće

- Srednje vrijednosti posmične čvrstoće zida po etažama za zgradu hotela Palace u Zagrebu (5-6 uzoraka po katu)



Ispitivanje posmične čvrstoće

- Srednje vrijednosti posmične čvrstoće ziđa po etažama za zgradu MVEP u Zagrebu (3-5 uzoraka po katu).



Ispitivanje posmične čvrstoće

■ Što još možemo odrediti??

f_{vm0} - posmična čvrstoća bez vertikalnog opterećenja

$$f_{vm0} = f_{vd} - \mu \cdot \sigma_0$$

- f_{vd} (τ_{mu}) - posmična čvrstoća ziđa (ispitivanjem)
- σ_0 - tlačna čvrstoća (računski)
- μ - koeficijenta trenja (0,4 prema HRN EN 1998-3:2011; 0,3-1,6 prema ASTM C1531-16)

Uz korištenje plosnatih preša možemo eksperimentalno odrediti σ_0 i μ

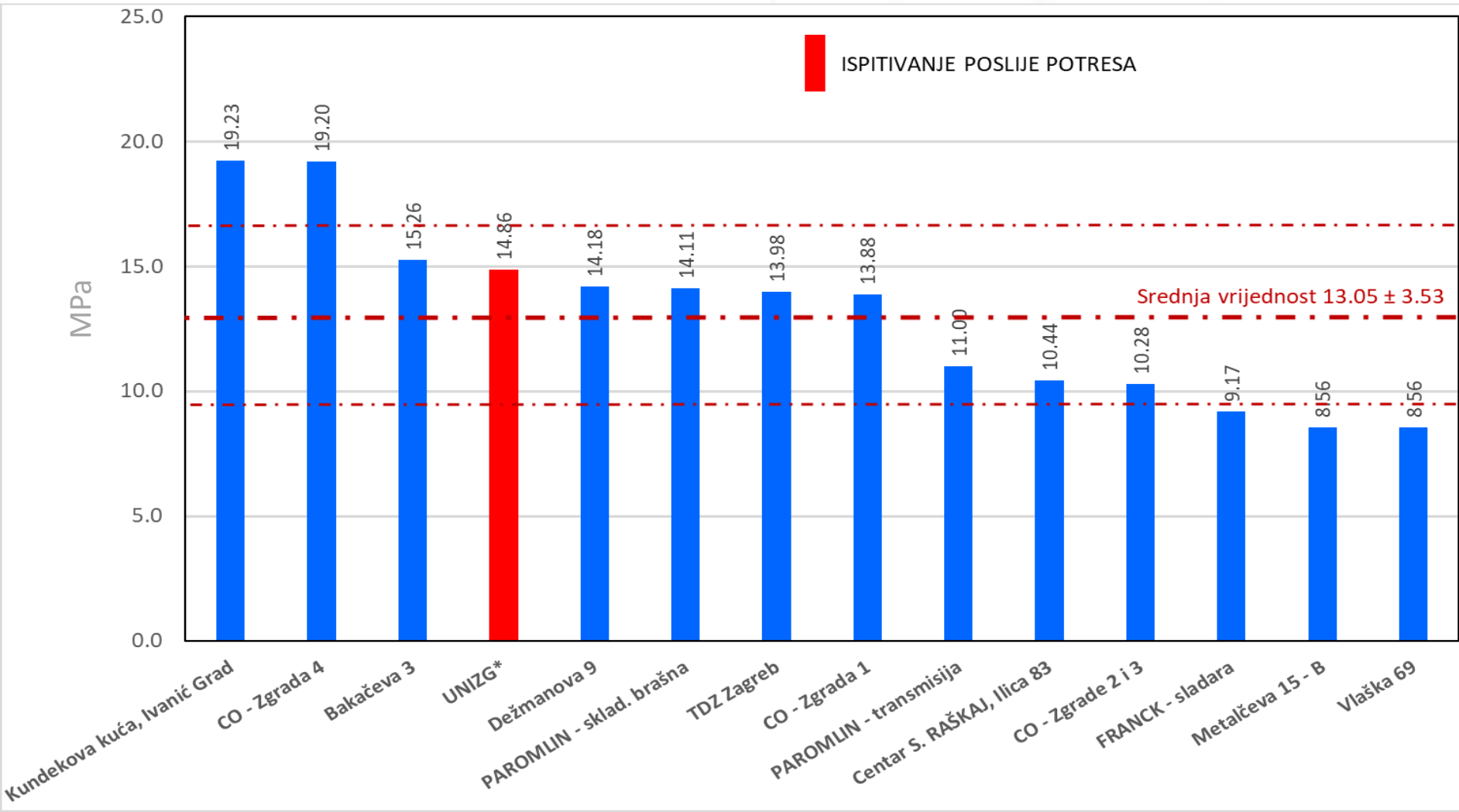
Ispitivanje tlačne čvrstoće opeke

- HRN EN 772-1:2015, *Metode ispitivanja zidnih elemenata - 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće.*
 - šest (6) uzoraka za ispitivanje,
 - uzorci se očiste od morta, navlaže površine i nanese sloj cementnog morta za izravnanje minimalne debljine 3 mm,
 - prije ispitivanja uzorci se njeguju sušenjem na zraku u laboratoriju 14 dana na temperaturi $< 15^{\circ}\text{C}$ i relativnoj vlažnosti $< 65\%$.
- Čvrstoća opeke - opterećenje pri slomu / bruto površina (rezultat se zaokružuje na 0,1 MPa).



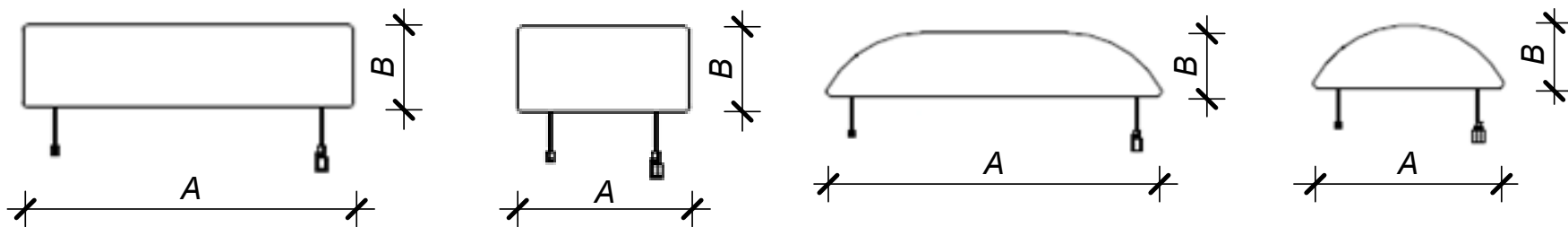
Ispitivanje tlačne čvrstoće opeke

- Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće opeke na 14 zidanih građevina u Zagrebu, prikazane su srednje vrijednosti.



Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida - plosnate preše

- Korištenje plosnatih preša omogućuje pouzdanije utvrđivanje mehaničkih karakteristika zida:
 - *vertikalno naprezanje u zidu (ASTM C1196-14a; RILEM MDT. D. 4)*
 - *naponsko deformacijska svojstva u tlaku (ASTM C1197-14a; RILEM MDT. D.5)*
 - *posmična čvrstoća zida uz kontrolu vertikalnog naprezanja (ASTM C1531-16)*
 - *tlačna čvrstoća zida.*
- Plosnata preša ima oblik mjehura koji se sastoji od dvije čelične ploče zavarene po obodu.



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

Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida - plosnate preše

OPREMA

- Plosnate preše i podložne ploče,
- Hidraulični sustav za nanošenje pritiska,
- Mjerni uređaji za mjerenje pomaka/relativnih deformacija,
- Oprema za izradu otvora.



Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida - plosnate preše

■ Kalibracija plosnate preše

- Dio pritiska hidraulične tekućine troši se na deformaciju same plosnate preše,
- pritisak u sustavu veći je od naprezanja koji plosnata preša prenosi na zide,
- koeficijent K_m daje odnos između pritiska hidraulične tekućine i naprezanja koje se prenosi na zide – ASTM,
- efektivna površina plosnate preše A_{je} - RILEM.

■ Postupak

- u tlačnom ispitnom uređaju plosnata preša opterećuje se preko dvije čelične ploče,
- kalibraciju je potrebno izvršiti kroz cijelo radno područje plosnate preše, s najmanje 10 jednakih inkremenata povećanja opterećenja, kroz 3 ciklusa,
- pritisak se povećava pomoću hidraulične pumpe, a pri svakom koraku potrebno je registrirati pritisak plosnate preše i silu na ispitnom uređaju.

Ispitivanje mehaničkih karakteristika ziđa - plosnate preše

Postupak kalibracije

ASTM

$$K_m = P_{IS} \div P_{PP}$$

P_{pp} – idealizirana sila plosnate preše

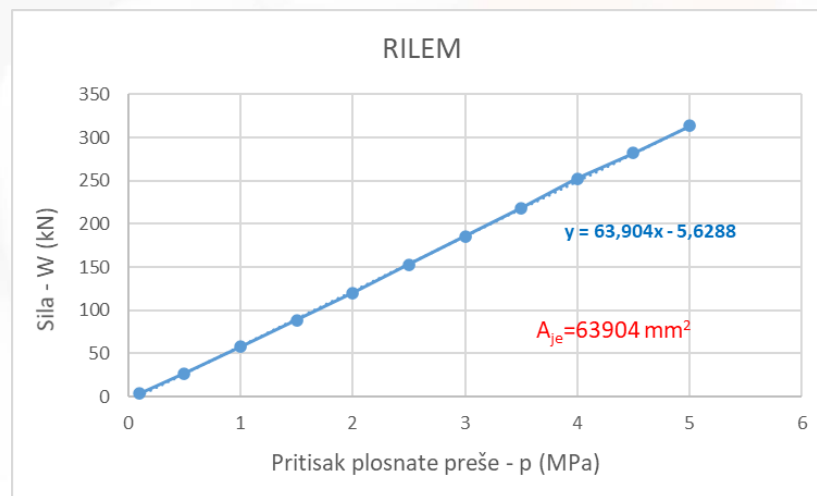
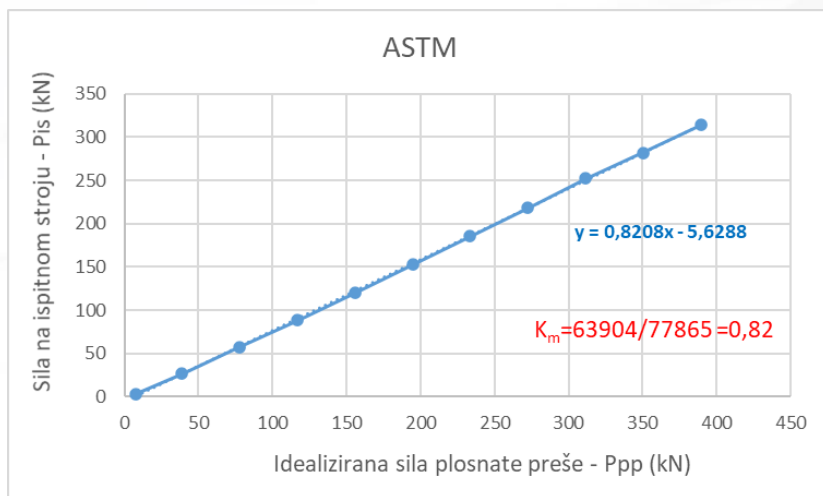
P_{IS} – sila izmjerena ispitnim strojem

RILEM

$$A_{je} = W \div p$$

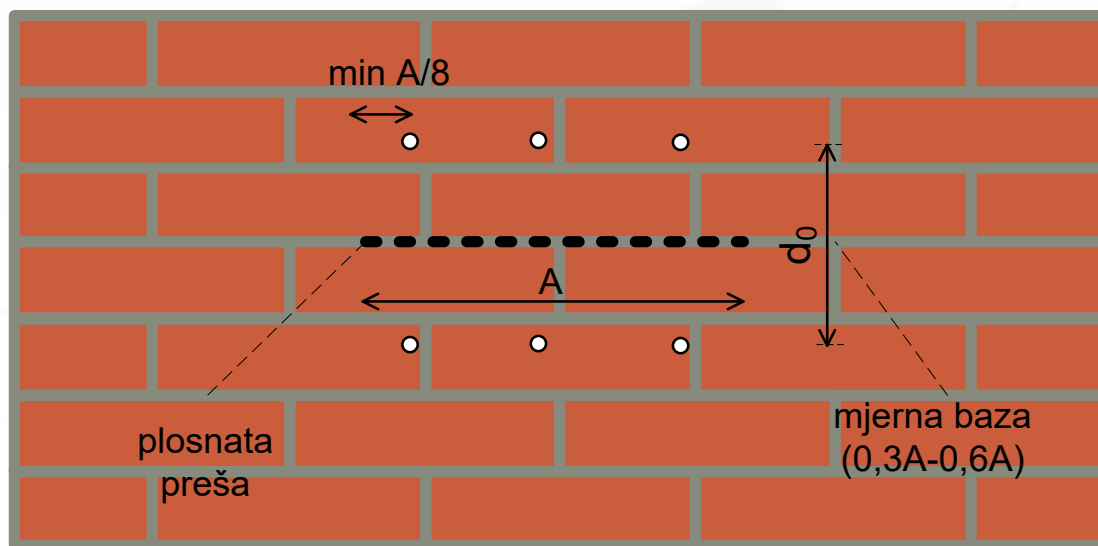
p – pritisak na preši

W – sila izmjerena ispitnim strojem



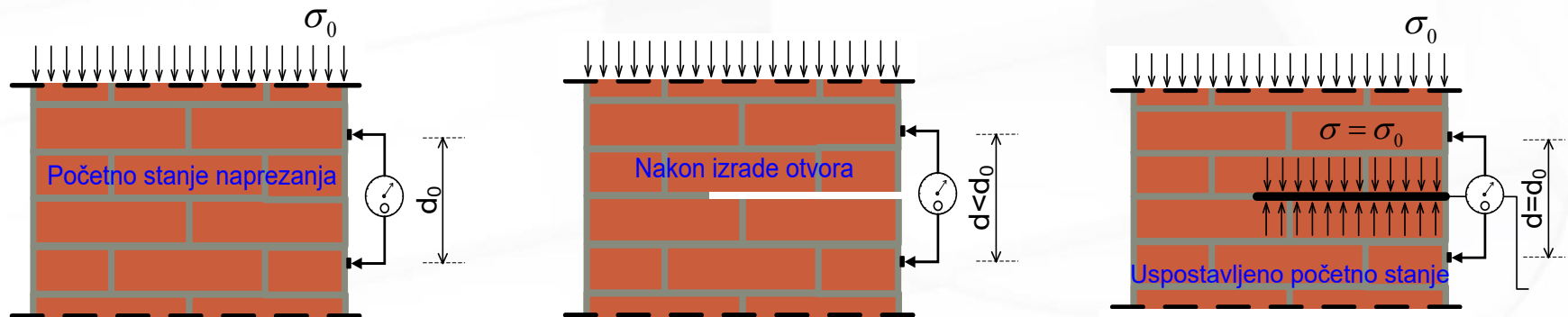
Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida - plosnate preše

- **Određivanje postojećeg tlačnog naprezanja u zidu**
 - u zidu se djelomično oslobodi tlačno naprezanje uklanjanjem morta iz horizontalne sljubnice,
 - Naprezanje se kompenzira pomoću plosnate preše umetnute u otvor dok se ne uspostavi početno stanje naprezanja i deformacija što se kontrolira mjerenjem polja pomaka okomito na otvor



Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida - plosnate preše

- **Određivanje postojećeg tlačnog naprezanja u zidu – postupak**
 - ukloniti žbuku i zacrtati mjesto na kojem će se napraviti otvor
 - postaviti najmanje 3 para markica za prijenosni komparator i izvršiti početno mjerenje mjerne duljine,
 - izrada otvora (uklanjanje morta iz horizontalne sljubnice), ako se koriste polukružne plosnate preše pomoću ekscentrične prstenaste pile,
 - postavljanje plosnate preše u otvor, uz korištenje podložaka kako bi plosnata preša što bolje popunila otvor, mjerenje promjene mjerne duljine,
 - Predopterećenje do 50 % očekivanog naprezanja u zidu i rasterećenje
 - Nanošenje pritiska u inkrementima od 25 %, dok se mjerna duljina ne vrati na početnu



Ispitivanje mehaničkih karakteristika ziđa - plosnate preše

- Određivanje postojećeg tlačnog naprezanja u ziđu – postupak

ASTM C1196

$$f_m = K_m K_a p$$

K_m – bezdimenzionalni koeficijent
 K_a – bezdimenzionalni koeficijent, omjer površine plosnate preše i površine otvora
 p – pritisak u plosnatoj preši potreban da se mjerna duljina vrati na inicijalnu

RILEM MDT. D. 4

$$S_r = K_e p A_{slot} / A_{je}$$

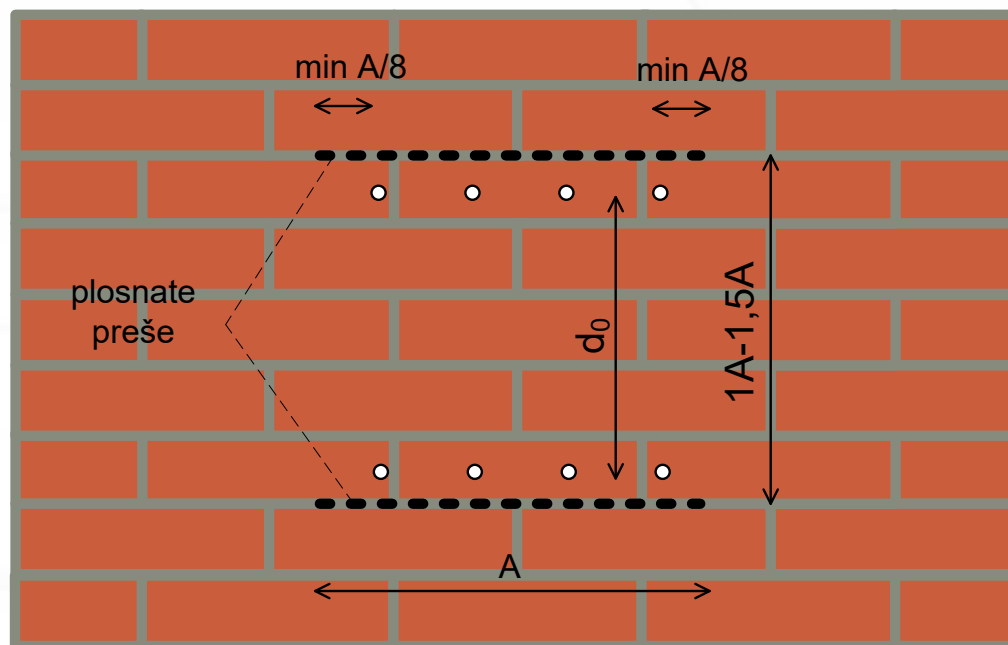
K_e – bezdimenzionalni koeficijent koji ovisi o položaju otvora u odnosu na sljubnice, relativnoj veličini plosnate preše i opeke te geometrijskim značajkama plosnate preše
 A_{slot} – površina otvora
 A_{je} – efektivna površina plosnate preše
 p – pritisak u plosnatoj preši potreban da se mjernu duljina vrati na početnu

Očekivano odstupanje metode može biti do 20 %!!

Naponsko deformacijska svojstva zida - plosnate preše

■ Određivanje modula elastičnosti

- Dvije plosnate preše se umeću u paralelne horizontalne otvore u zidu na razmaku od najmanje 5 opeka,
- između plosnatih preša postavljaju se uređaji za mjerenje relativnih deformacija (komparatori ili LVDT) te se istovremeno mjeri naprezanje i relativna deformacija,
- u slučaju da se koriste polukružne plosnate preše za izradu otvoru je najprikladnije koristiti ekscentrične prstenaste pile.



Naponsko deformacijska svojstva ziđa - plosnate preše

- **Određivanje modula elastičnosti - postupak**
 - Nanijeti **predopterećenje od cca 50 % tlačne čvrstoće ziđa** i rasteretiti (pravilno i ravnomjerno nalijeganje plosnatih preša i čeličnih podložnih ploča na površine otvora),
 - prije početka samog ispitivanja obavlja se nulto mjerenje i zatim se pritisak povećava u inkrementima od približno 10 % očekivanog maksimalnog naprezanja,
 - pri svakom koraku pritisak se zadržava najmanje jednu minutu ili dok se ne stabilizira, a zatim se očitavaju relativne deformacije,
 - metoda se može koristiti i za određivanje tlačne čvrstoće ziđa, međutim takvo ispitivanje može uzrokovati značajnija oštećenja u zoni ispitivanja te se općenito ne preporuča kao pouzdana metoda određivanja tlačne čvrstoće.

Tangentni modul elastičnosti

$$E_t = df_m / de_m$$

df_m – inkrement naprezanja

de_m – inkrement relativne deformacije

Sekantni modul elastičnosti

$$E_s = f_m / e_m$$

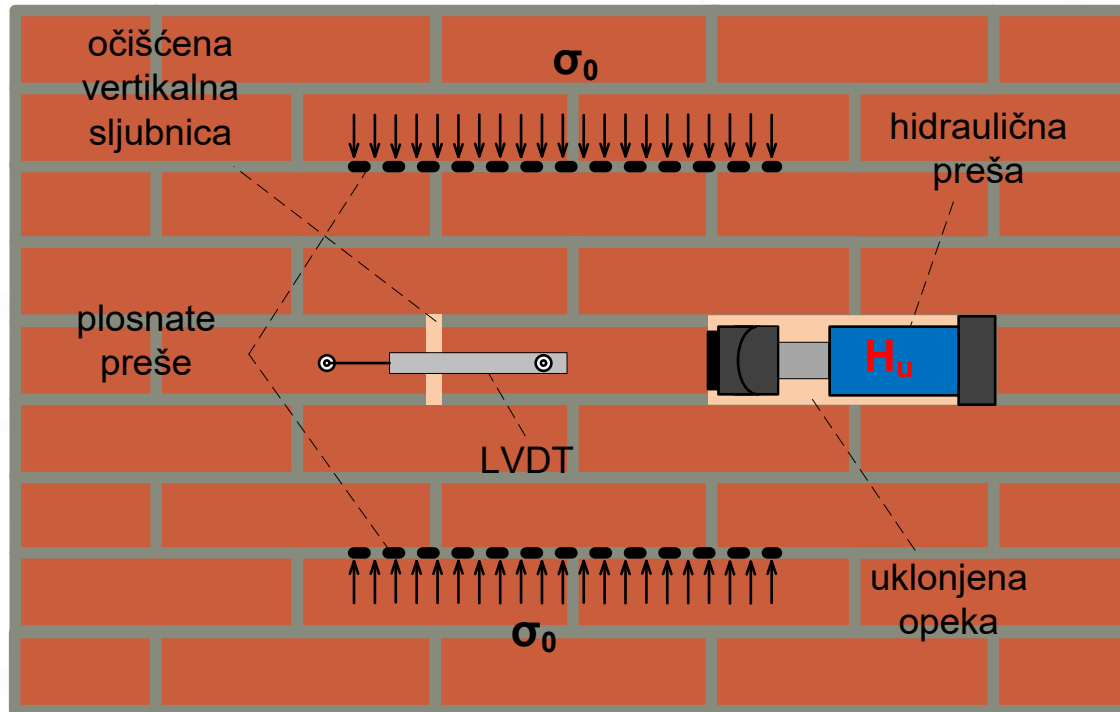
f_m – naprezanje pri odabranoj razini

e_m – relativna deformacije pri odabranoj razini

Posmična čvrstoće ziđa uz kontrolu vertikalnog naprezanja

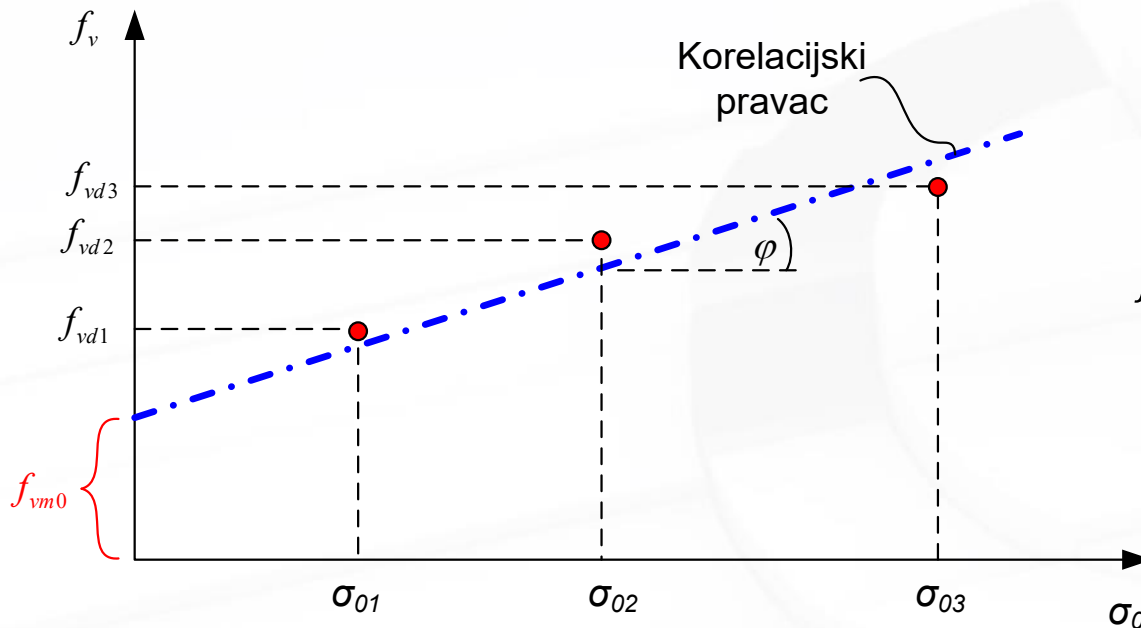
- Prednost metode je što se pri posmičnom ispitivanju ziđa kontrolira vertikalno naprezanje što omogućuje određivanje posmične čvrstoće bez vertikalnog pritiska (f_{vm0}).
- Posmična čvrstoća ziđa (f_{vd}) ovisi o posmičnoj čvrstoći bez vertikalnog pritiska (f_{vm0}) i umnošku tlačnog naprezanja (σ_0) i koeficijenta trenja (μ).

$$f_{vd} = f_{vm0} + \mu \cdot \sigma_0$$



Posmična čvrstoće ziđa uz kontrolu vertikalnog naprezanja

- Postupak se provodi za najmanje tri nivoa vertikalnog tlačnog naprezanja.
- Određuju se posmične čvrstoće ($f_{vd1}, f_{vd2}, f_{vd3}$) pri kontroliranim razinama vertikalnog tlačnog naprezanja ($\sigma_{01}, \sigma_{02}, \sigma_{03}$) te imamo tri točke u KS kojem je na horizontalnoj osi σ_0 , a na vertikalnoj f_{vd} .
- Sada možemo odrediti korelacijski pravac koji sa horizontalnom osi zatvara kut (φ), a tangens tog kuta predstavlja koeficijent trenja.



$$f_{vm0i} = f_{vdi} - tg\varphi \cdot \sigma_{0i}$$

Izvori nesigurnosti kod metoda s plosnatim prešama

- lokalne nepravilnosti i nehomogenosti zida, pronalaženje adekvatnog mjesta za ispitivanje (puno otvora, instalacija, zazidanih otvora, dimnjaka),
- otvori za umetanje plosnatih preša se režu ekscentričnim pilama uz korištenje vode kojom se zasiti mort,
- nepravilnosti u otvorima za plosnate preše (nejednolika debljina otvora koja značajno utječe na raspodjelu naprezanja koje se nanosi plosnatim prešama),
- kod određivanja posmične čvrstoće uz kontrolu tlačnog naprezanja 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, može biti čak 1,7).



Prednosti metoda s plosnatim prešama

- vrijedni podaci o tlačnim naprezanjima, koeficijentima trenja i naponsko deformacijskim odnosima zida,
- prije intenziviranja radova na obnovi potresom oštećenih građevina bilo bi vrlo važno napraviti određeni broj ovakvih ispitivanja na karakterističnim zgradama,
- uložena sredstva vratila bi se kroz uštede na troškovima obnove, jer bi projektanti u proračun ulazili s realnim vrijednostima posmične čvrstoće bez vertikalnog opterećenja, a složena i skupa ispitivanja se ne bi provodila na svakoj zgradi.

PRIMJER:

- Određivanje posmične čvrstoće bez vertikalnog pritiska iz rezultata jednostavnog posmičnog ispitivanja:

$$f_{vm0} = f_{vd} - tg\varphi \cdot \sigma_0 = 0,409 - 0,6 \cdot 0,4 = 0,169 \text{ MPa}$$

$f_{vd} = 0,526 - 0,117 = 0,409 \text{ MPa}$ - sr. vrijednost jednostavnih posmičnih ispitivanja provedenih na 20 zgrada umanjena za standardno odstupanje

$\mu = 0,6$ - 1,5 puta veća vrijednost od one iz propisa (HRN EN 1998-3:2011)

$\sigma_0 = 0,4 \text{ MPa}$

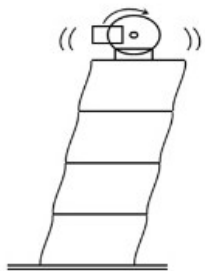
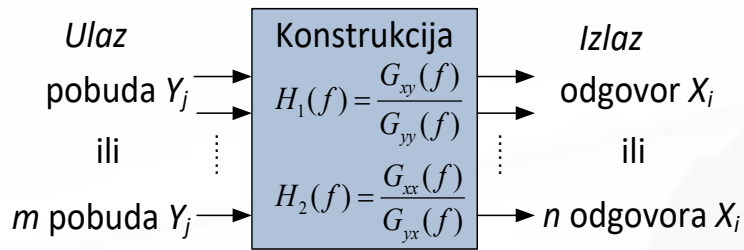
- Dobivena posmična čvrstoća bez vertikalnog pritiska je veća od one koju predviđaju propisi za slučaj kada ne postoje nikakva ispitivanja.

Eksperimentalna modalna analiza

- Postupak određivanja dinamičkih parametara konstrukcije.

KLASIČNA EMA

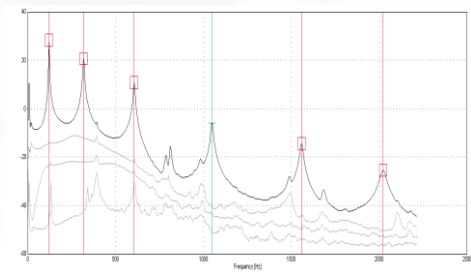
- mjerenje pobude (Y_j) i odziva konstrukcije (X_i)
- potrebno je kontrolirano nanositi i mjeriti pobudu konstrukcije,
- zahtjevno i skupo.**



OPERACIONALNA MODALNA ANALIZA

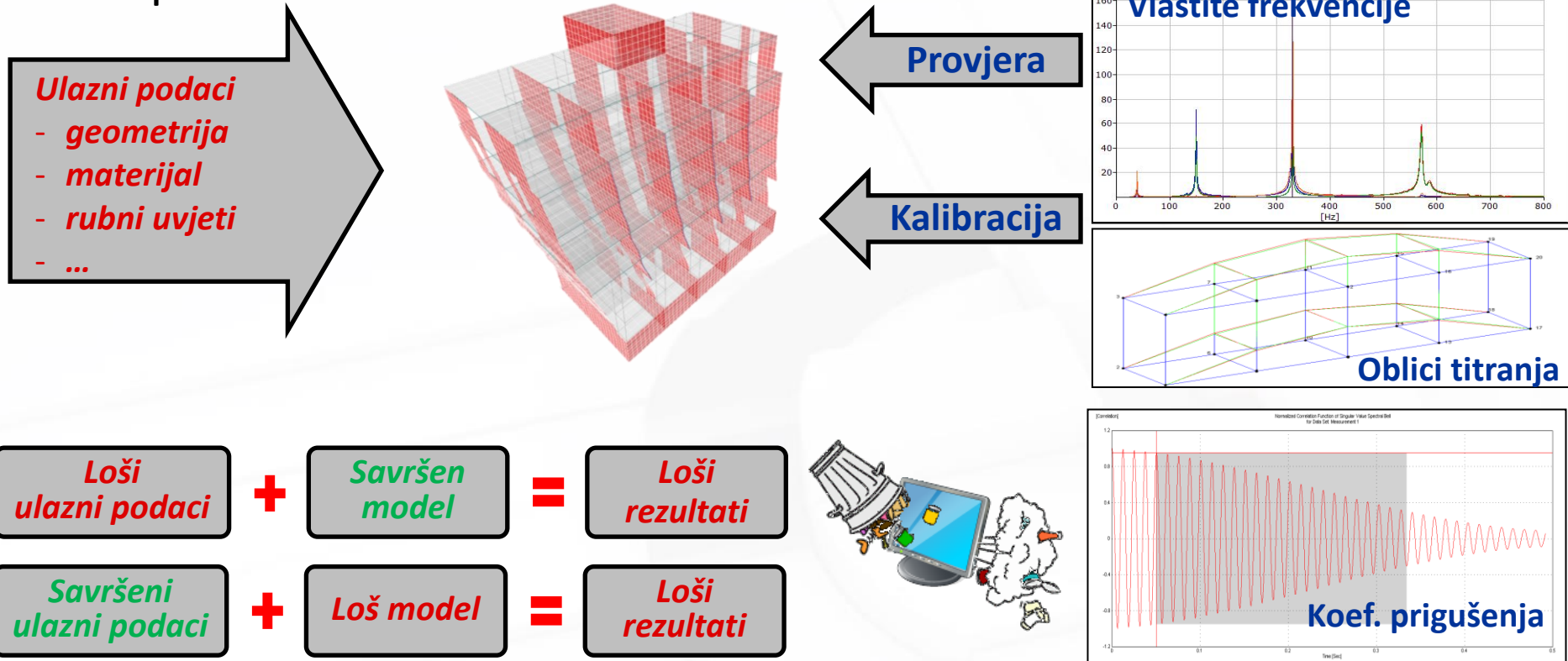
- mjerenje **samo odziva konstrukcije** (X_i),
- pri ambijentalnim vibracijama koje imaju stohastički karakter sličan bijelom šumu (prometno opterećenje, ljudska pobuda, vjetar, seizmička mikro podrhtavanja,...).
- FDD metode - temelje na singularnoj dekompoziciji matrice funkcija odziva konstrukcije

$$G_{XX}(\omega_i) = U_i S_i U_i^H$$



Eksperimentalna modalna analiza

Pouzdanost numeričkih analiza ovisi o načinu modeliranja nosivih elemenata i primijenjenoj metodi proračuna, ali presudnu ulogu imaju ulazni podaci.

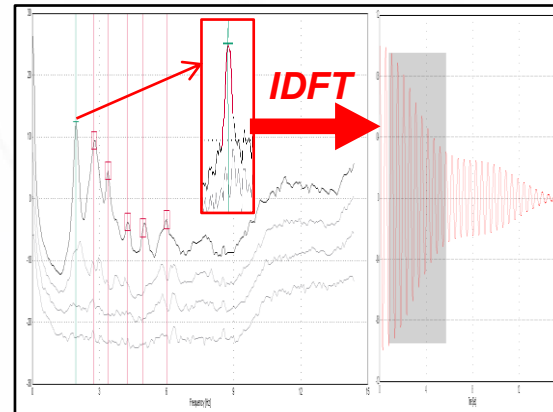


Eksperimentalna modalna analiza

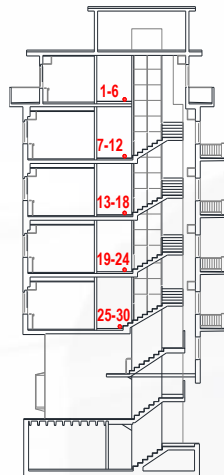
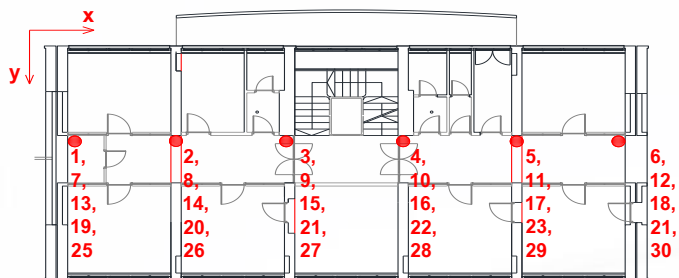
- Jedan od načina da se provjeri pouzdanost numeričkog modela je svakako usporedba numeričkih vrijednosti dinamičkih parametara s odgovarajućim eksperimentalno određenim vrijednostima, a eksperimentalno određeni dinamički parametri mogu se iskoristiti i za kalibraciju numeričkog modela.
- Dinamički parametri konstrukcije (vlastite frekvencije, modalni oblici i koeficijenti prigušenja) funkcije su krutosti, mase i prigušenja.
- Ukoliko postoje podaci o eksperimentalno određenim dinamičkim parametrima prije potresa, ispitivanje se može ponoviti i usporedbom utvrditi da li je došlo do gubitka krutosti.
- Isto tako ako se eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara provede na oštećenoj zgradi, ponovljenim ispitivanjem nakon sanacije može se procijeniti učinkovitost radova na sanaciji.

Eksperimentalna modalna analiza

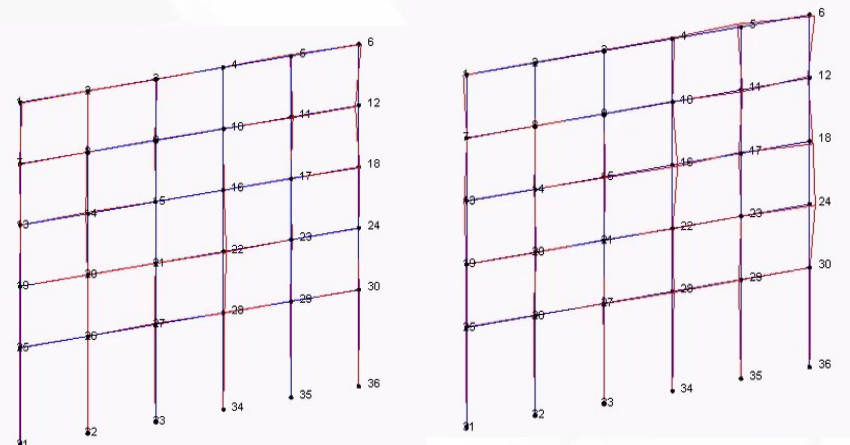
Zgrada područnog ureda gradske uprave, Ulica Grada Vukovara.



Vlastita frekvencija (Hz)	Koeficijent prigušenja (%)
1,96 ± 0,03	2,37 ± 1,91
2,77 ± 0,05	2,47 ± 0,75
3,32 ± 0,02	2,17 ± 2,07
4,24 ± 0,04	0,79 ± 0,54
4,97 ± 0,08	0,72 ± 0,38
5,99 ± 0,04	0,30 ± 0,12

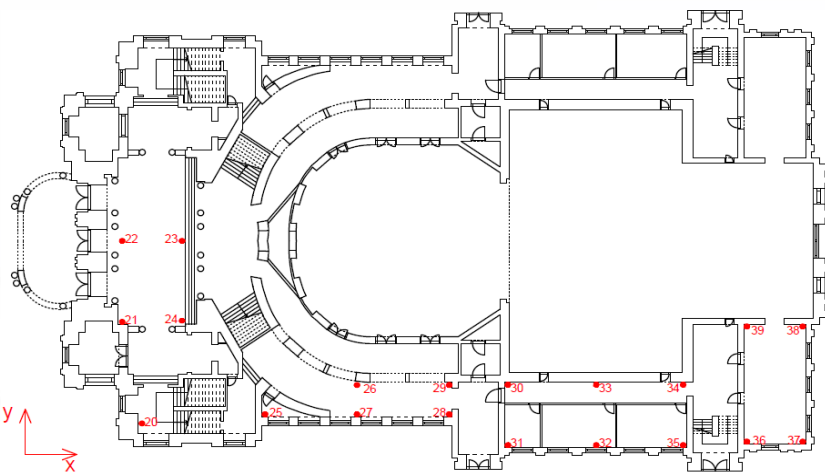


- 30 mjernih mjesta, 60 mjerenih stupnjeva slobode,
- dva referentna akcelerometra, dva se sele,
- formiranje matrice spektralnih gustoća snaga odziva $G_{XX} \rightarrow \mathbf{SVD} \rightarrow$ spektralna funkcija singularnih vrijednosti.

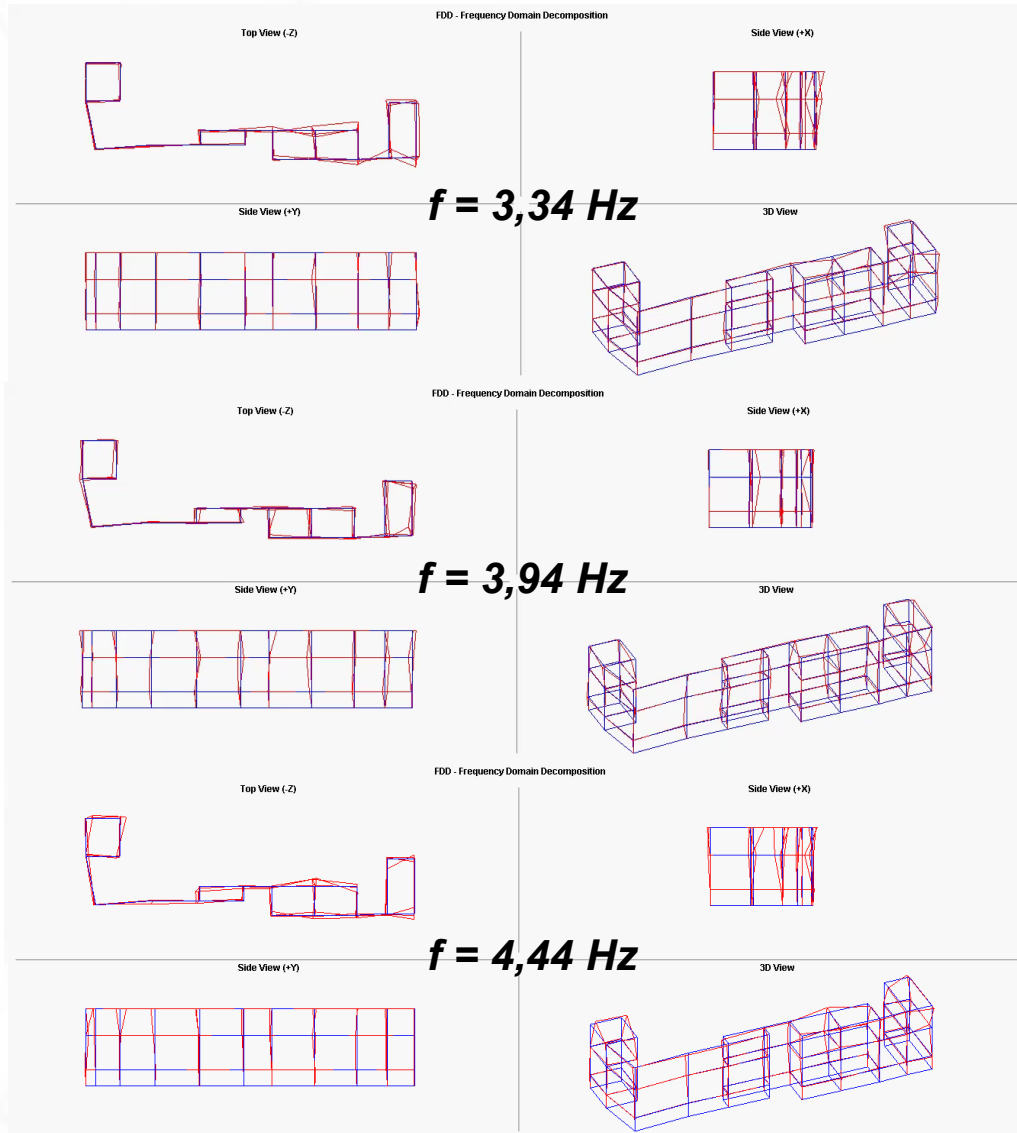


Eksperimentalna modalna analiza

Zgrada HNK, Zagreb



Prosinac 2015.,
broj mjerenih stupnjeva slobode: 120.

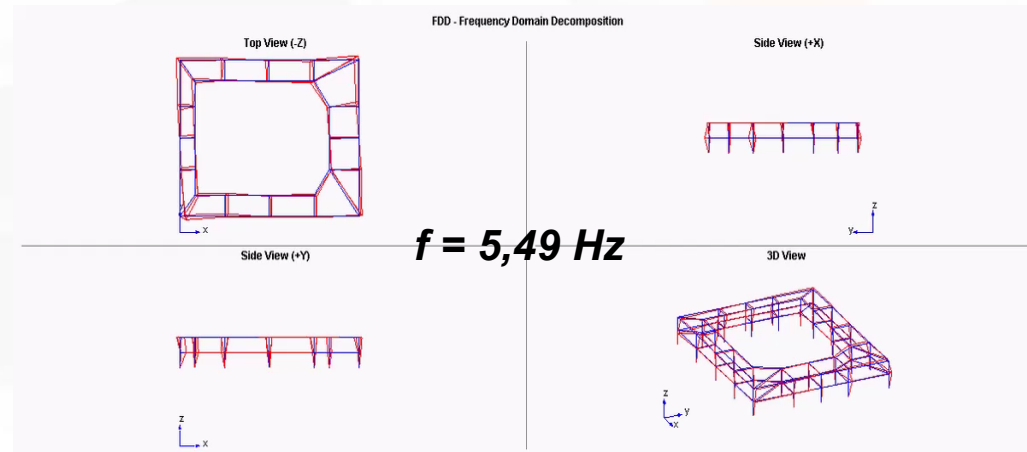
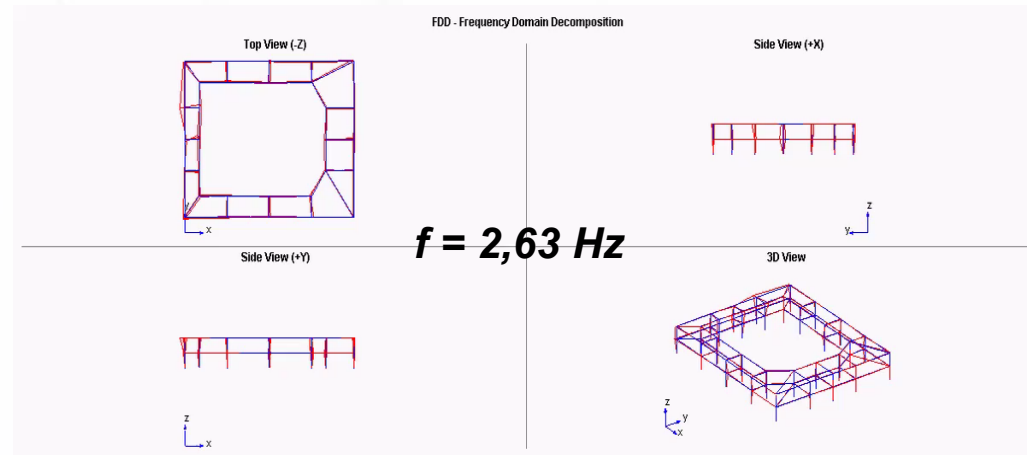


Eksperimentalna modalna analiza

Koncertna dvorana Lisinski



Rujan 2016.,
broj mjenjenih stupnjeva slobode: 120.



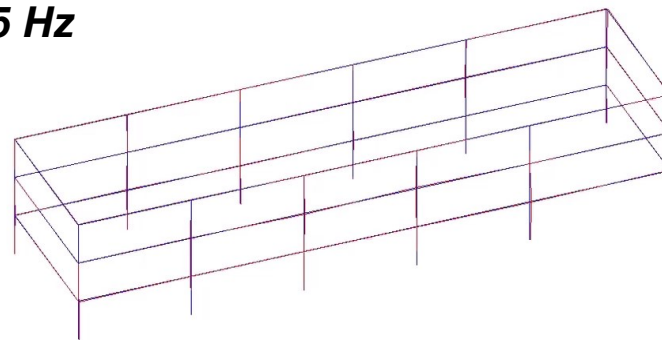
Eksperimentalna modalna analiza

Zgrada Geofizičkog odsjeka PMF-a



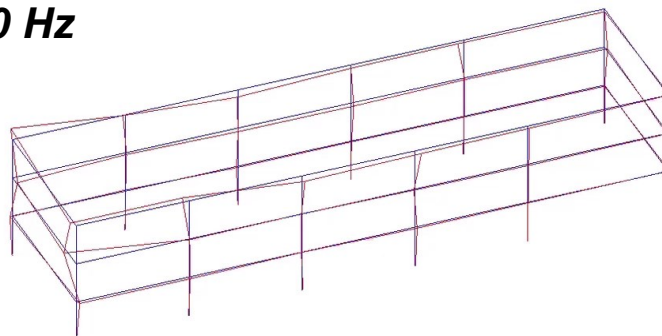
$f = 4,25 \text{ Hz}$

FDD - Frequency Domain Decomposition



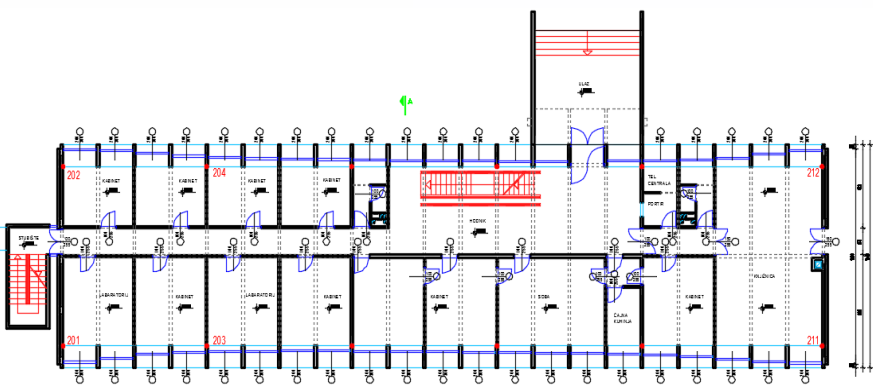
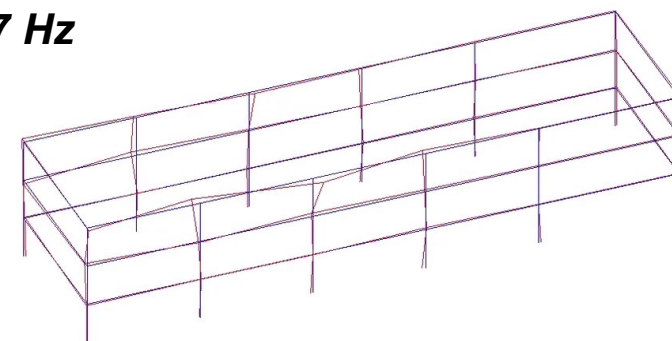
$f = 5,50 \text{ Hz}$

FDD - Frequency Domain Decomposition



$f = 6,37 \text{ Hz}$

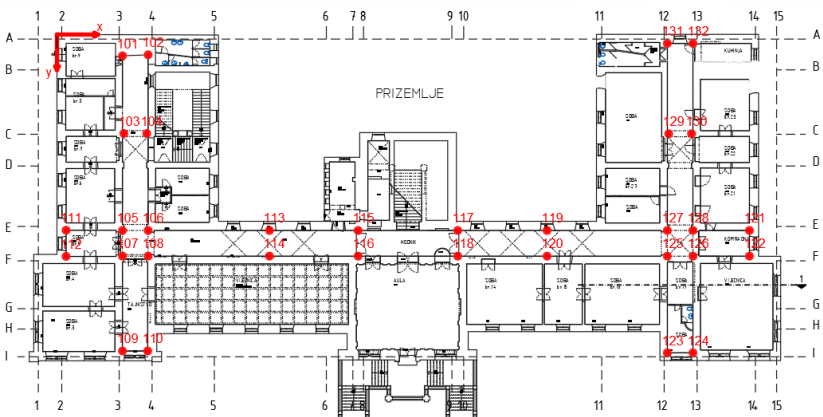
FDD - Frequency Domain Decomposition



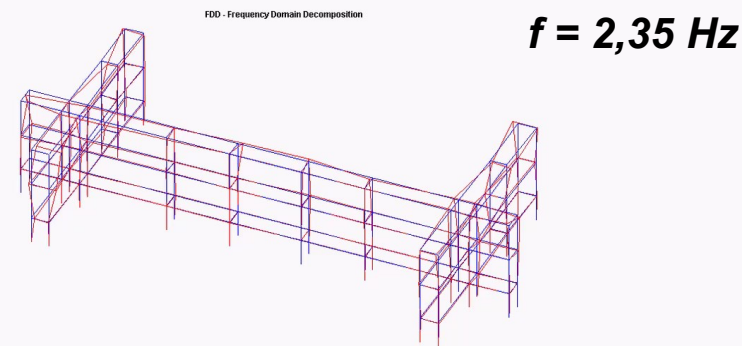
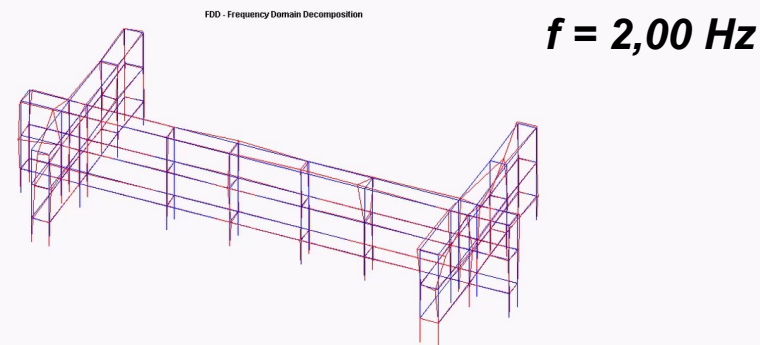
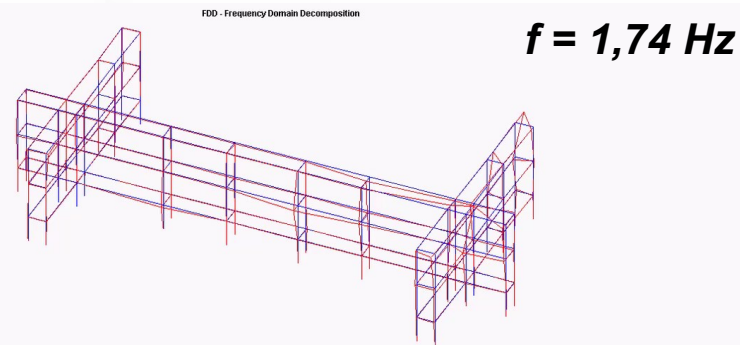
Travanj 2018.,
broj mjerenih stupnjeva slobode: 72.

Eksperimentalna modalna analiza

Zgrada Sveučilišta u Zagrebu i Pravnog fakulteta



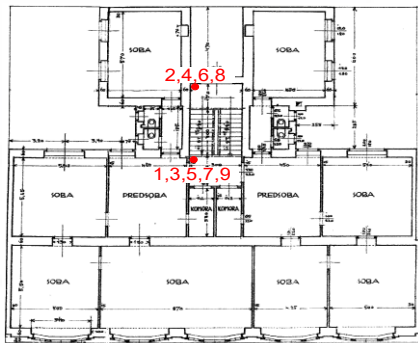
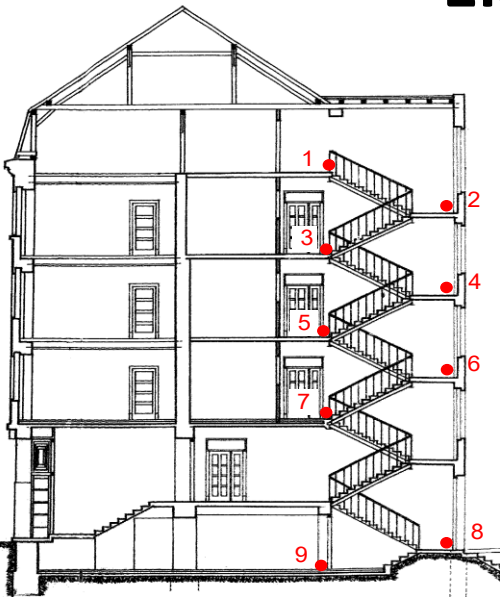
Srpanj 2020.,
broj mjerenih stupnjeva slobode: 192.



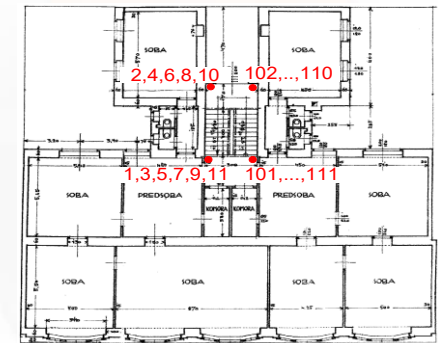
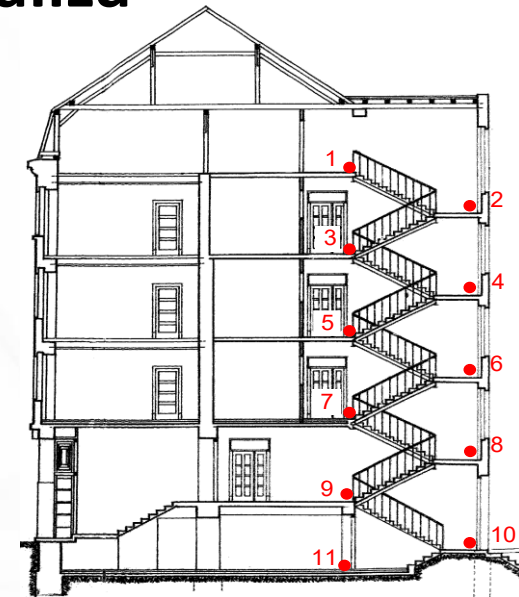
Eksperimentalna modalna analiza

Zgrada u Palmotićevoj 64a

Vlastita frekvencija (Hz)		Koeficijent prig. (%)	
10/2014	9/2020	10/2014	9/2020
2,55	1,98	1,46	2,87
3,10	2,63	2,84	2,76



1-9 mjerna mjesta mjerjenja akceleracija



1-11 i 101-111 mjerna mjesta mjerjenja akceleracija



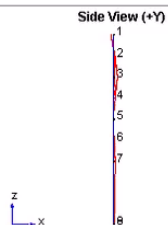
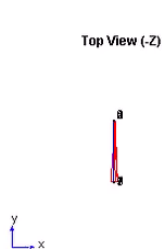
Listopad 2014.,
broj mjenjenih stupnjeva slobode: 18

Rujan 2020.,
broj mjenjenih stupnjeva slobode: 44

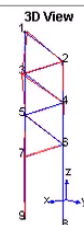
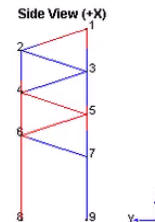
Eksperimentalna modalna analiza

Zgrada u Palmotićevoj 64a

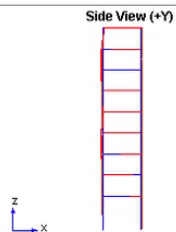
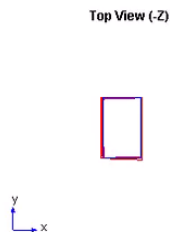
2014.
 $f = 2,55 \text{ Hz}$



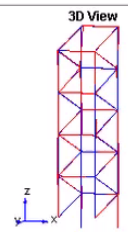
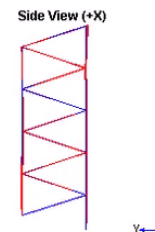
FDD - Frequency Domain Decomposition



2020.
 $f = 1,98 \text{ Hz}$



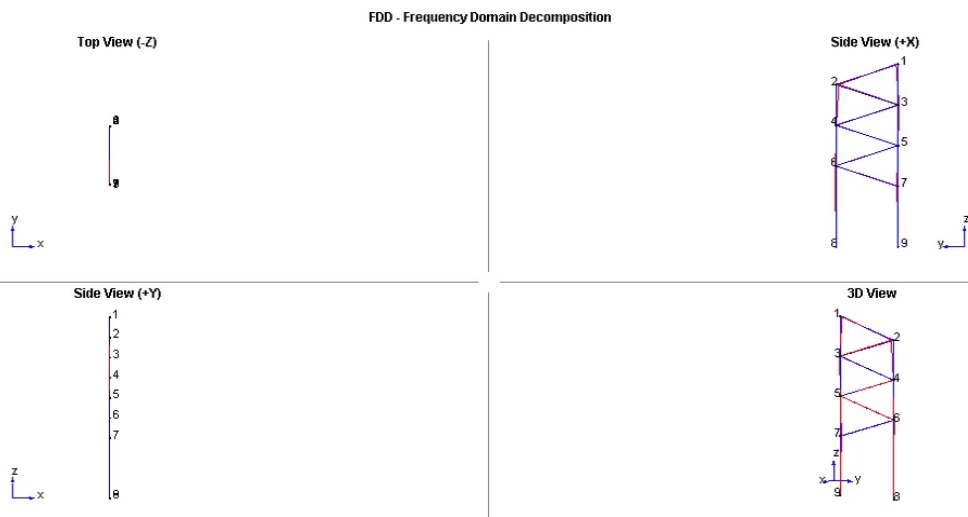
FDD - Frequency Domain Decomposition



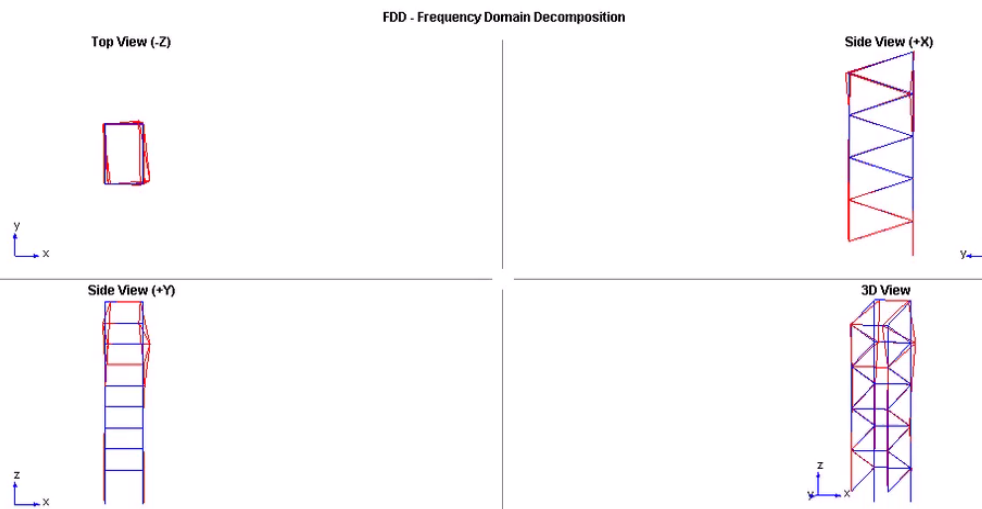
Eksperimentalna modalna analiza

Zgrada u Palmotićevoj 64a

2014.
 $f = 3,10 \text{ Hz}$



2020.
 $f = 2,63 \text{ Hz}$



Zaključak

- **Rezultati istražnih radova omogućuju projektantima korištenje realnih ulaznih parametara materijala u proračunu.**
- **Rezultati dobiveni jednostavnim posmičnim ispitivanjem predstavljaju vrlo korisnu informaciju projektantu konstrukcije o stanju zida.**
- **Metode ispitivanja plosnatim prešama omogućuju određivanje vrijednih podataka o tlačnim naprezanjima, koeficijentima trenja i naponsko deformacijskim odnosima zida.**
- **Ulaganje u sustavno provođenje takvih ispitivanja na karakterističnim zgradama omogućilo bi uspostavu baze podataka koja bi se mogla koristiti i za druge slične zgrade uz provođenje istražnih radova u manjem obimu čime bi se u konačnici ostvarile značajne uštede.**
- **Eksperimentalno određeni dinamički parametri mogu se iskoristiti za provjeru pouzdanosti numeričkog modela i za kalibraciju numeričkog modela, a usporedbom rezultata prije i poslije potresa ili nakon sanacije može se utvrditi promjena krutosti.**

Hvala na pažnji

ddomagoj@grad.hr

