

## Procjena stanja postojećih zidanih konstrukcija: Pregled metoda

Ivan Hafner<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Tomislav Kišiček<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, ivan.hafner@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, tomlav.kisicek@grad.unizg.hr

### Sažetak

U Hrvatskoj, a i u čitavoj Europi, opeka i kamen jedan su od najčešće korištenih građevnih materijala. Ako se tome pridoda da su uglavnom građevine s najvećom kulturnom i povijesnom vrijednošću upravo zidane konstrukcije, metode procjene stanja zidanih građevina su iznimno važne. U ovome radu prikazano je trenutačno stanje u području procjene stanja zidanih konstrukcija s posebnim naglaskom na one metode za koje se smatra da se mogu izvesti na najbrži i najjednostavniji način sa željom da se dobije kvalitetan prikaz najvažnijih svojstava materijala te čitavog stanja zidane konstrukcije.

*Ključne riječi: metode procjene stanja, zidane konstrukcije, čvrstoća materijala, nosivost, kulturna baština*

## Assessment of existing masonry structures: State of the art

### Abstract

In Croatia and throughout Europe, stone and brick masonry rank among the most commonly used building materials. Considering that most of the buildings of cultural or historical significance are masonry structures, the assessment methods for masonry buildings are of extreme importance. An overview of currently available assessment methods for masonry structures is given in this paper. The main focus is on the methods that have proven to be the fastest and easiest to apply, the intention being to provide a quality insight into the most important material characteristics and condition of masonry structures.

*Key words: assessment methods, masonry structures, strength of material, load bearing capacity, cultural heritage*

## 1 Uvod

U građevinarstvu su opeka i kamen među prvim materijalima koji su ikada korišteni. Danas, zidane konstrukcije se i dalje grade radi svojih prednosti poput vatrootpornosti, zvučne i toplinske izolacije te ekonomskih aspekata. Stoga ne čudi podatak da je 70 % građevina na svijetu izvedeno kao zidane konstrukcije [1]. Slična procjena vrijedi i za Hrvatsku. U Hrvatskoj je nažalost velika većina takvih građevina izvedena prije razvitka potresnih normi (1960-tih) te su to uglavnom građevine bez ikakvih pojačanja i betonskih elemenata u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Naravno, detaljna potresna procjena stanja te rekonstrukcija potrebne su za gotovo sve takve građevine, na što je upozorio i potres u Zagrebu u ožujku ove godine. Uz to, kao što je već napomenuto, velik broj takvih zgrada u Hrvatskoj (npr. Zagreb, Split, Dubrovnik) građevine su s velikom kulturnom i povijesnom vrijednošću što je dodatni razlog zašto procjena stanja i pojačavanje zidanih konstrukcija moraju biti provedeni na vrlo visokoj razini. Problematika također leži u činjenici da su u prošlom desetljeću velika financijska sredstva izdvojena s ciljem energetske obnove takvih građevina bez pridavanja prevelike pozornosti potresnim procjenama i pojačanjima [2]. S obzirom na to da su oštećenja od potresa identificirana i na zgradama na kojima je provedena energetska obnova, kako u Hrvatskoj tako i u državama Europske unije [2], jasno je da procjena stanja te potresna rekonstrukcija moraju biti na vrhu liste prioriteta kada se govori o rekonstrukciji zidanih konstrukcija. U idućim poglavljima dan je pregled stanja u području procjene stanja postojećih zidanih konstrukcija, s posebnim naglaskom na nešto jednostavnije i brže metode. Bitno je napomenuti da se obrađuju i metode vezane uz obične konstrukcije izvedene u opeci [3] kao i povijesne konstrukcije izvedene u kamenu [4]. Sve te metode uspoređuju se u ovom radu kako bi se uspostavio standardizirani postupak za dobivanje cjelovitog prikaza stanja čitave zidane konstrukcije.

## 2 MQI (Masonry Quality Index)

Ponašanje ziđa, kao heterogenog sustava, ovisi o nizu faktora kao što su tlačna i posmična čvrstoća zidnih elemenata i morta, oblik zidnih elemenata te njihova tekstura [5, 6]. S obzirom na velike količine faktora, za određivanje nosivosti ziđa i procjenu njegove kvalitete potrebno je primijeniti destruktivne i poludestruktivne metode koje nisu uvijek prihvatljive osobito kod povijesnih građevina gdje se zahtjevi konzervatora moraju ispuniti [4, 7]. Zbog toga je u Italiji razvijen kvalitativni, tj. vizualni pristup procjeni stanja ziđa i zidanih konstrukcija MQI. Ideja je uspostaviti jednostavan i sustavan pristup analizi, tj. procjeni stanja zidanih konstrukcija temeljen na idealnom ponašanju zida i procjeni mehaničkih svojstava pripadajućih materijala (kamen, opeka i mort). Kako bi se dobila ta mehanička svojstva, koristi se

sedam parametara. Procjena podrazumijeva znanje inženjera u području zidanih i povijesnih građevina čiji je zadatak svaki od sedam parametara smjestiti u jednu od tri kategorije, tj. ocijeniti svaki od sedam parametara. Moguće kategorije su: ispunjen (F-Fulfilled), djelomično ispunjen (PF-Partially Fulfilled) i neispunjen (NF-Not Fulfilled) [5]. Slijedi kraći opis parametara koje treba uzeti u obzir.

## 2.1 Mehanička svojstva zidnih elemenata (SM)

Ovaj parametar u obzir uzima mehanička svojstva samo zidnih elemenata kao i stanje očuvanosti u kojem se nalaze. Primjerice ako je više od 50 % zidnih elemenata u građevini oštećeno, ako je korištena nepečena ili glinena opeka ili ako je opeka šuplja s nedovoljno opečnog materijala, dodjeljuje se ocjena NF. Ako je nešto manje elemenata oštećeno (10 - 50 %) te ako se koristi kvalitetnija šuplja opeka ili opeka napravljena od pješčenjaka, ocjena će biti PF. U slučaju da nema oštećenih elemenata (< 10 %) te da je korištena visoko kvalitetna pečena opeka, šuplje opeke s manjim udjelom šupljina (< 45 %), kameni blokovi te betonski blokovi, ocjena će biti F.

## 2.2 Dimenzije zidnih elemenata (SD)

Ako se koriste elementi manjih dimenzija (< 20 cm) u većinskom dijelu zida ili konstrukcije, dodjeljuje se ocjena NF. Ako su elementi veći (20 – 40 cm) u većinskom dijelu, dodjeljuje se ocjena PF, a ako su im dimenzije veće od 40 cm, dodjeljuje se ocjena F (slika 1.).



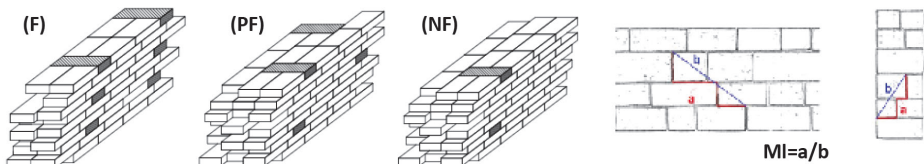
Slika 1. Dimenzije zidnih elemenata (SD) [5]

## 2.3 Oblik zidnih elemenata (SS)

Ocjena NF dodijelit će se zidnim elementima koji su većinom sastavljeni od običnih zaobljenih oblutaka ili šljunčanih elemenata u oba sloja zida. Ako je tih elemenata manje u jednom sloju zida, a da je drugi sloj izveden od savršeno rezanog kamena ili opeke, dodjeljuje se ocjena PF. U konačnici, ako su oba sloja izvedena od fino rezanog kamena ili od kvalitetno posložene opeke, dodjeljuje se ocjena F.

## 2.4 Povezanost slojeva zida (WC)

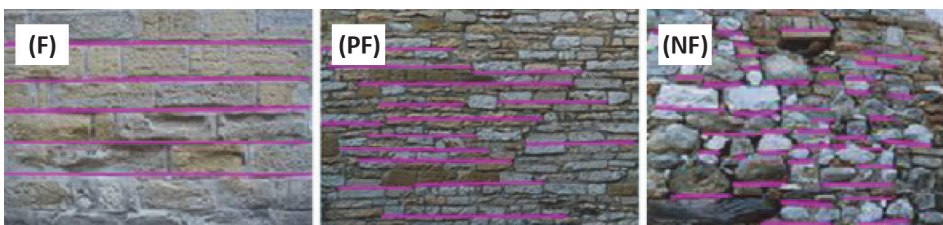
Povezanost slojeva zida (prisutnost vezne opeke) ima vrlo velik utjecaj na njegovo ponašanje izvan ravnine. Kvalitativni postupak se provodi kada presjek zida nije vidljiv. U tom slučaju ocjena NF se dodjeljuje ako nema vezne opeke ili ako ih je manje od 2 kom./m<sup>2</sup>. Ako je debljina zida veća od veće dimenzije zidnog elementa te ako postoji određeni broj veznih opeka (2 - 5 kom./m<sup>2</sup>), dodjeljuje se ocjena PF. Ocjena F podrazumijeva sistematični raspored veznih opeka (> 5 kom./m<sup>2</sup>) i debljinu zida sličnu većoj dimenziji zidnog elementa (slika 2.a). Ako je površina zida pak vidljiva, primjenjuje se kvantitativni kriterij preko minimalne bezdimenzijske vrijednosti  $M_1$ . Ta vrijednost predstavlja omjer između minimalne duljine potrebne da se povežu dvije nasumice odabrane točke zida koristeći se samo horizontalnim i vertikalnim sljubnicama morta i pravocrtne udaljenosti tih dviju dijagonalnih točaka (slika 2.b). Pravocrtna udaljenost odgovara 1 m, s mogućnošću korištenja nešto manjih duljina. Ako je taj odnos manji od 1,25 smatra se da je povezanost slojeva slaba i dodjeljuje se ocjena NF. Ako je vrijednost veća od 1,55, dodjeljuje se ocjena F.



Slika 2. a) Kvalitativna analiza povezanosti slojeva zida [5]; b) Dobivanje faktora  $M_1$  [5]

## 2.5 Svojstva horizontalnih sljubnica (HJ)

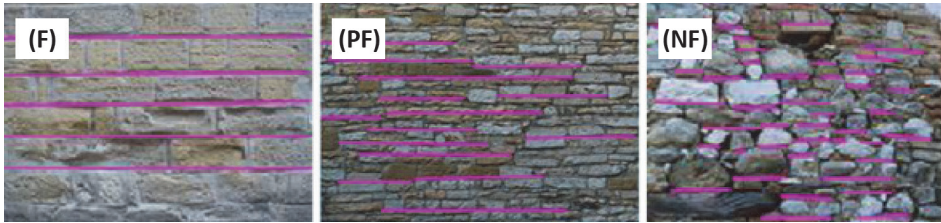
Ovisno o načinu izvedbe i vrsti zida, horizontalne sljubnice su nekada nekontinuirane što može utjecati na tlačnu i posmičnu nosivost čitavog zida (slika 3.).



Slika 3. Kontinuiranost horizontalnih sljubnica [5]

## 2.6 Svojstva vertikalnih sljubnica (VJ)

Kao i kod povezanosti slojeva zida, vertikalnost sljubnica se može ocijeniti na kvalitativan i kvantitativan način. Kvalitativni pristup je vezan uz raspored vertikalnih sljubnica gdje se ocjena NF dodjeljuje zidovima kad su sve sljubnice na istoj razini u vertikalnom smjeru. Ako su djelomično kvalitetno raspoređene dodjeljuje se ocjena PF, dok će ocjena F biti dodijeljena onome zidu gdje je vertikalna sljubnica između dva zidna elementa praktički na polovici samog zidnog elementa u redu iznad i ispod promatranog reda (slika 4.). Što se kvantitativnog pristupa tiče, opet će se koristiti vrijednost  $M_1$  pojašnjena iznad, no u ovom slučaju broje se samo vertikalne sljubnice. Ako je ta vrijednost manja od 1,4, dodjeljuje se ocjena NF, a ako je veća od 1,6 dodjeljuje se ocjena F.



Slika 4. Raspored vertikalnih sljubnica [5]

## 2.7 Mehanička svojstva morta (MM)

Ovisno o vrsti materijala koji se koristi za mort te kvaliteti veze između morta i zidnih elemenata dodjeljuje se jedna od tri ocjene. Ocjena NF dodjeljuje se mortovima koji se lako mogu ukloniti, prašini te situacijama gdje morta više niti nema. Ocjena PF dodjeljuje se mortovima srednje visoke kvalitete, a F mortovima s visokokvalitetnim svojstvima.

Ovisno o ocjeni koja se dodijeli pojedinom parametru te smjeru djelovanja, vrijednosti od 0 do 1 se daju za svaki pojedini parametar (tablica 1.).

Tablica 1. Numeričke vrijednosti za pojedini parametar [5]

|    | Vertikalno djelovanje |     |   | Horizontalno djelovanje u ravnini zida |     |   | Horizontalno djelovanje izvan ravnine zida |     |   |
|----|-----------------------|-----|---|--|-----|---|--|-----|---|
|    | NF                    | PF  | F | NF                                     | PF  | F | NF   | PF  | F |
| HJ | 0                     | 1   | 2 | 0                                      | 0,5 | 1 | 0  | 1   | 2 |
| WC | 0                     | 1   | 1 | 0                                      | 1   | 2 | 0  | 1,5 | 3 |
| SS | 0                     | 1,5 | 3 | 0                                      | 1   | 2 | 0  | 1   | 2 |
| VJ | 0                     | 0,5 | 1 | 0                                      | 1   | 2 | 0  | 0,5 | 1 |
| SD | 0                     | 0,5 | 1 | 0                                      | 0,5 | 1 | 0  | 0,5 | 1 |
| MM | 0                     | 0,5 | 2 | 0                                      | 1   | 2 | 0  | 0,5 | 1 |
| SM | 0,3                   | 0,7 | 1 | 0,3                                    | 0,7 | 1 | 0,5  | 0,7 | 1 |

Na temelju vrijednosti iz tablice određuje se numerička vrijednost MQI prema idućoj formuli:

$$MQI = SM \times (SD+SS+WC+HJ+VJ+MM) \quad (1)$$

Na temelju te vrijednosti moguće je dobiti mehanička svojstva zida poput tlačne čvrstoće, posmične čvrstoće i modula elastičnosti, što je detaljnije opisano u [5], [8]. Uz to, zid se smješta u jednu od tri kategorije kvalitete, što je i primarni cilj ove metode (tablica 2). Uz MQI postoje naravno i neke slične metode [9], no MQI je općeprihvaćen kao najkvalitetniji način procjene kvalitete zida i njegovih mehaničkih svojstava na brz i jednostavan način.

**Tablica 2. Kategorije kvalitete zida prema MQI [5]**

| Kategorija                            | A (izvršno ponašanje) | B (prosječna kvaliteta zida) | C (neodgovarajuće ponašanje zida) |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Vertikalna djelovanja                 | 0 < MQI < 2,5         | 2,5 < MQI < 5,0              | 5,0 < MQI < 10,0                  |
| Horizontalna djelovanja izvan ravnine | 0 < MQI < 4,0         | 4,0 < MQI < 7,0              | 7,0 < MQI < 10,0                  |
| Horizontalna djelovanja u ravnini     | 0 < MQI < 3,0         | 3,0 < MQI < 5,0              | 5,0 < MQI < 10,0                  |

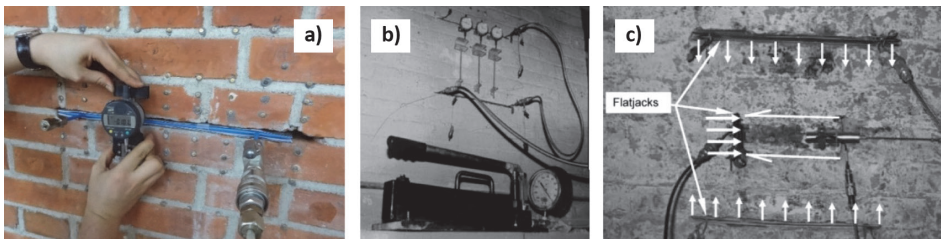
### 3 Plosnate preše (flat jacks)

Osim vizualnih metoda, u području nedestruktivnih ispitivanja postoji niz metoda koje podrazumijevaju korištenje uređaja. Među najpoznatijim metodama takvog tipa nalazi se i sustav testova s plosnatim prešama (engl. flat jack). Ova ispitivanja su vrlo jednostavna te podrazumijevaju korištenje samo plosnatih preša, hidraulične pumpe i uređaja za mjerenje deformacija. Princip korištenja je takav da se u mortu naprave očišćeni otvori u koje se postavljaju plosnate preše koje su vrlo tanke. U njima se nakon toga pomoću hidraulične pumpe izaziva stanje pritiska, pa one dijeluju tlačno na ostatak zida prilikom čega je moguće mjeriti površinske deformacije i time dobiti informacije o postojećem stanju naprezanja u zidu, kao i informacije o krutosti i čvrstoći zida [10]. Postoje različite vrste plosnatih preša podijeljene prema njihovom obliku i materijalu, pa se tako razlikuju konvencionalne metalne i niz deformabilnih plosnatih preša. Treba napomenuti da se upotreba aluminija za njihovu izradu pokazala korisnom pri ispitivanju povijesnih građevina [3]. Što se tiče ispitivanja koja je moguće provoditi pomoću ovih uređaja, najprije treba spomenuti dobivanje tlačnog naprezanja u zidu. Prije formiranja otvora u mortu, mjeri se udaljenost između referentnih točaka koje se nalaze sa suprotnih strana budućeg otvora. Prilikom uklanjanja morta, tlačna naprezanja unutar zida malo zatvore otvor. Potom se u otvor postavlja jedna plosnata preša kojom se unosi pritisak

kako bi se otvor vratio u originalnu poziciju (slika 5.a) [10]. Pritisak ( $p$ ) potreban da se referentne točke vrata u početnu poziciju te konstanta kalibracije plosnate preše ( $K_e$ ) i odnos između nosive površine plosnate preše i površine otvora ( $K_c$ ) daju vrijednost tlačnih naprezanja ( $f_m$ ) u zidu [11].

$$f_m = p \cdot K_e \cdot K_c \quad (2)$$

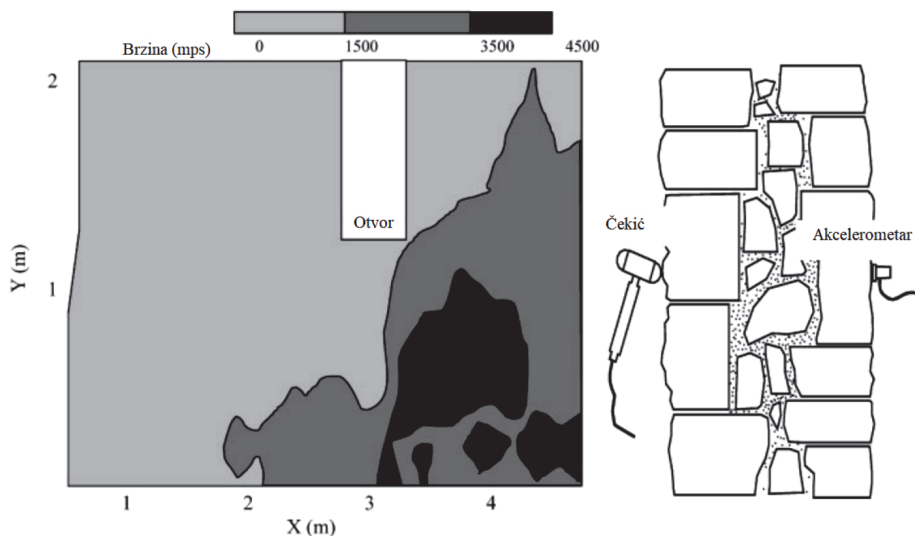
Uz određivanje tlačnog naprezanja, postoji i test za određivanje deformabilnosti zida. Test podrazumijeva korištenje dvije plosnate preše, jedne iznad druge. Prilikom istovremenog pritiska formira se stanje tlačnog naprezanja u segmentu zida između njih. Površinske deformacije mjere se pomoću mjerača pomaka raspoređenih po licu zida (slika 5.b). Rezultati ovog ispitivanja obično se prikazuju u obliku dijagrama naprezanje – relativna deformacije prema kojem je moguće dobiti i modul elastičnosti [10]. Pomoću plosnatih preša moguće je dobiti i posmičnu čvrstoću zida [10] i modul posmika [12]. Za dobivanje posmične čvrstoće koristi se tzv. “push test”. Taj test podrazumijeva uklanjanje jednog zidnog elementa (opeka, kamen) te postavljanja hidraulične preše u taj otvor. Sa svake strane promatranog zidnog elementa koji se sada nalazi pored preše uklanja se mort. Guranjem, tj. pritiskom pomoću preše dolazi do smicanja sljubnica morta neposredno iznad i ispod promatranog elementa te se na temelju posmične čvrstoće morta dobiva posmična čvrstoća zida. Ova metoda se nažalost može primjenjivati samo kod sustava gdje su mortovi vrlo slabi, a zidni elementi vrlo čvrsti te se u modernijim sustavima s kvalitetnijim mortom ne može koristiti. Postoje tri varijante opisane u [10] od kojih je najkvalitetnija metoda koja podrazumijeva upotrebu tri plosnate preše. Iznad i ispod promatranog područja ispitivanja se postavljaju dvije plosnate preše kako bi se osiguralo konstantno vertikalno tlačno naprezanje testnog uzorka. Treća se postavlja s jedne od strana promatranog elementa te njezinim djelovanjem dolazi do smicanja i time određivanja posmične čvrstoće (slika 5.c).



Slika 5. a) Mjerenje tlačnog naprezanja zida (jedna plosnata preša) [3]; b) Određivanje površinskih deformacija (dvije plosnate preše) [10]; c) Određivanje posmične čvrstoće zida (tri plosnate preše) [10]

## 4 Ispitivanja pomoću mjerenja brzine zvuka ili ultrazvuka

Ispitivanja pomoću mjerenja brzine zvuka ili ultrazvuka imaju vrlo široku primjenu u području zidanih konstrukcija. Ultrazvučna metoda podrazumijeva korištenje dva pretvornika, sa svake strane zida. Oba pretvornika se za površinu zida spajaju pomoću gela ili gumenih pločica kako bi se ostvario maksimalni prijenos energije. Pomoću jednog pretvornika odašilje se val koji putuje kroz poprečni presjek zida do pretvornika koji taj val prihvaća i pretvara ga natrag u električnu energiju. Vrijeme prolaska vala očitava se u mikrosekundama. Ako se govori o zvučnoj metodi, valovi niske frekvencije se generiraju pomoću gumenog čekića. Njegova masa i čvrstoća, tj. materijal od kojeg je izrađen, definiraju energiju i frekvenciju inicijalnog vala. S druge strane zida nalazi se akcelerometar koji prihvaća valove (slika 6.). Njegov zadatak je da mjeri brzinu prolaska vala. Kako bi ova metoda bila valjana, sve mora biti provedeno s vrlo velikom preciznošću [10, 13]. Na temelju brzine prolaska vala moguće je dobiti niz informacija o materijalu od kojega je zid napravljen kao i o šupljinama unutar samog zida [13, 14]. Izuzev rasporeda šupljina unutar zida, moguće je dobiti vrijednost modula elastičnosti, faktora prigušenja kao i procjenu čvrstoće zida [15]. Najveća je prednost ove metode ta da je relativno jeftina [15] te da se može primjenjivati i kod zida od betonskih elemenata [15], kamenog zida [16], a i kod obične opeke [17]. Na kraju, bitno je napomenuti da iako se često koriste kod zidanih konstrukcija, ove metode nisu najprikladnije kod povijesnih građevina, pa se često se primjenjuju u kombinaciji s nekim drugim metodama.



Slika 6. Prikaz brzina zvuka gdje su tamnije označena područja s većim brzinama, tj. "zdravom" strukturom zida [10]



## 5 Ostale metode – Kratki osvrt

Osim tri obrađene metode, postoji i niz drugih koje se mogu koristiti za određivanje svojstava zidanih konstrukcija. Iako se češće koristi kod betonskih konstrukcija za određivanje položaja armature i debljine elemenata, Ground Penetrating Radar (GPR, “radar koji prodire u tlo”) može se koristiti i kod zidanih konstrukcija za određivanje mjesta gdje se nalaze šupljine unutar zida [18]. Rad tog uređaja zasnovan je na emitiranju radiovalova u konstrukciju i detektiranju njihova odjeka kao pokazatelja materijalnih parametara zida tj. građevine (slika 7.a) [19]. Za određivanje defekata i nekonzistentnosti kod zidanih konstrukcija moguće je koristiti i infracrvenu termografiju (slika 7.b). Ova nedestruktivna metoda podrazumijeva termalnu simulaciju nekog objekta ili elementa. Pomoću infracrvene kamere prate se varijacije u površinskoj temperaturi primjerice zida prilikom faza grijanja i hlađenja [20]. Promjene u temperaturi su pokazatelji određene nehomogenosti u materijalu. Izuzev defekata u strukturi, ova metoda je korisna i za određivanje vlage unutar konstrukcije [21]. U konačnici, za određivanje tlačne čvrstoće morta i zidnih elemenata uz potrebne kalibracije moguće je koristiti i sklerometar (slika 7.c) [22]. Ova metoda je vrlo korisna, jednostavna i brza te ima vrlo široku primjenu kod raznih vrsta materijala. Vrlo je bitno napomenuti da se često koristi kod građevina kulturne i povijesne baštine [23, 24].



Slika 7. a) GPR [25]; b) Infracrvena termografija [20]; c) Sklerometar (Rebound hammer) [23]

## 6 Zaključak

Potres koji je zadesio Zagreb 22. ožujka 2020. bio je samo podsjetnik na količinu neodržanih zidanih građevina koje postoje u gradu Zagrebu. S tim u vezi podsjetio nas je na važnost održavanja takvih građevina te na njihovu procjenu stanja i ispitivanje. Iako postoji izniman broj visokokvalitetnih metoda ispitivanja poput MQI-a, plosnatih preša, ultrazvuka, GPR-a, infracrvene termografije i sklerometra, i premda sve imaju svoje prednosti i nedostatke, nije potrebno sve njih koristiti da bi bila kvalitetna procjena stanja jedne konstrukcije. Razloga je za ovo mnogo, a cijena, kvaliteta podataka i brzina su najvažniji od njih. Vizualni pregled (MQI) vrlo je bitan kod procjene stanja postojećih zidanih konstrukcija kako bi se dobila gruba procjena niza svojstava ziđa kao i podataka vezanih uz vrstu ziđa te opće stanje konstrukcije. Što se tiče dobivanja podataka poput tlačne i posmične čvrstoće ziđa te modula elastičnosti, sustav plosnatih preša smatra se najboljim pristupom, iako se mora ukloniti mort za njegovu uporabu. Podaci koji se dobiju su vrlo visoke kvalitete i pokrivaju vrlo veliki broj materijalnih svojstava, što uređaji poput sklerometra ne mogu. Na kraju, metode temeljene na brzinama zvuka ili ultrazvuka vrlo su bitne za dobivanje stanja u kojem se nalazi neki zid te za dobivanje podataka o nehomogenostima unutar zida. Kombinacijom tih triju metoda može se dobiti vrlo jasna slika stanja neke konstrukcije i na temelju toga donijeti odluka o mogućim metodama sanacije, ako za njih bude potrebe.

## Literatura

- [1] Babatunde, S. A.: Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers, *Compos. Struct.*, 161 (2017), pp. 246–255.
- [2] Bournas, D. A.: Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept, *Compos. Part B Eng.*, 148 (2018), pp. 166–179.
- [3] Łatka, D.; Matysek, P.: The Estimation of Compressive Stress Level in Brick Masonry Using the Flat-jack Method, *Procedia Eng.*, 193 (2017), pp. 266–272.
- [4] Foti, D.: Non-destructive techniques and monitoring for the evolutive damage detection of an ancient masonry structure, *Key Eng. Mater.*, 628 (2014) August 2014, pp. 168–177.
- [5] Borri, A. et al.: A method for the analysis and classification of historic masonry, *Bull. Earthq. Eng.*, 13 (2015) 9, pp. 2647–2665.
- [6] Marino, M. et al.: Experimental Data of Friction Coefficients for some Types of Masonry and its Correlation with an Index of Quality Masonry (IQM), *Second Eur. Conf. Earthq. Eng. Seismol.*, (2014), pp. 1–12.

- [7] Boschi, S. et al.: Mechanical characterization of particular masonry panels in tuscany, Brick Block Mason. Trends, Innov. Challenges - Proc. 16<sup>th</sup> Int. Brick Block Mason. Conf. IBMAC 2016, 1 (2016), pp. 1447–1456.
- [8] Borri, A. et al.: Calibration of a visual method for the analysis of the mechanical properties of historic masonry, Procedia Struct. Integr., 11 (2018), pp. 418–427.
- [9] Su, Q. et al.: Seismic Damage Assessment Indexes for Masonry Structures, J. Struct. Eng. (United States), 145 (2019) 7.
- [10] Schuller, M. Pp.: Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures, Prog. Struct. Eng. Mater., 5 (2003) 4, pp. 239–251.
- [11] Simões, A. et al.: Flat-Jack Tests on Old Masonry Buildings, 15<sup>th</sup> Int. Conf. Expp. Mech., 1 (2012) i, pp. 3056.
- [12] Croce, Pp. et al.: Shear modulus of masonry walls: A critical review, Procedia Struct. Integr., 11 (2018), pp. 339–346.
- [13] De Paepe, A. E. et al.: Non-destructive test methods for masonry structures, J. Chem. Inf. Model., 53 (2019) 9, pp. 1689–1699.
- [14] Mesquita, E. et al.: Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements, J. Build. Eng., 19 (2018), pp. 172–180.
- [15] Sajid, S. H. et al.: Strength estimation of concrete masonry units using stress-wave methods, Constr. Build. Mater., 163 (2018), pp. 518–528.
- [16] Martini, R. et al.: Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests, Procedia Struct. Integr., 5 (2017), pp. 1108–1115.
- [17] Valluzzi, M. R. et al.: Calibration of sonic pulse velocity tests for detection of variable conditions in masonry walls, Constr. Build. Mater., 192 (2018), pp. 272–286.
- [18] Agred, K. et al.: Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna, Constr. Build. Mater., 188 (2018), pp. 1119–1127.
- [19] Wai-Lok Lai, W. et al.: A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis, NDT E Int., 96 (2018) January, pp. 58–78.
- [20] Meola, C.: Infrared thermography of masonry structures, Infrared Phys. Technol., 49 (2007) 3 SPEC. ISS., pp. 228–233.
- [21] Geister, A.: Structural teSting Evaluating Existing Masonry Construction, Struct. Test., (2013) March, pp. 34–37.

- [22] Sýkora, M. et al.: Assessment of compressive strength of historic masonry using non-destructive and destructive techniques, *Constr. Build. Mater.*, 193 (2018), pp. 196–210.
- [23] Vasanelli, E. et al.: Combining non-invasive techniques for reliable prediction of soft stone strength in historic masonries, *Constr. Build. Mater.*, 146 (2017), pp. 744–754.
- [24] Vasanelli, E. et al.: Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units, *Constr. Build. Mater.*, 124 (2016), pp. 575–581.
- [25] Alani, A. M. et al.: An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies, *NDT E Int.*, (2020), May, pp. 102288.