

Primljen / Received: 6.5.2020.

Ispravljen / Corrected: 15.7.2020.

Prihvaćen / Accepted: 22.8.2020.

Dostupno online / Available online: 10.11.2020.

# Primjena čelika kod rekonstrukcije zgrada osjetljivih na potres

## Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Davor Skejić**, dipl.ing.građ.Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[davor.skejic@grad.unizg.hr](mailto:davor.skejic@grad.unizg.hr)

Autor za korespondenciju

Doc.dr.sc. **Ivan Lukačević**, dipl.ing.građ.Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[ivan.lukacevic@grad.unizg.hr](mailto:ivan.lukacevic@grad.unizg.hr)Doc.dr.sc. **Ivan Ćurković**, dipl.ing.građ.Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[ivan.curkovic@grad.unizg.hr](mailto:ivan.curkovic@grad.unizg.hr)**Ivan Čudina**, mag. ing. aedif.Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[ivan.cudina@grad.unizg.hr](mailto:ivan.cudina@grad.unizg.hr)

Pregledni rad

**Davor Skejić, Ivan Lukačević, Ivan Ćurković, Ivan Čudina**

## Primjena čelika kod rekonstrukcije zgrada osjetljivih na potres

Rekonstrukcija postojećih zgrada je aktualna tema posljednjih godina. Nedavni potres u Zagrebu senzibilizirao je i javnost na problematiku osjetljivosti starih zgrada na seizmička djelovanja. Čelik ima značajnu ulogu u svim aspektima rekonstrukcije jer pruža pouzdana rješenja za sanacije i ojačanja. U radu je dan pregled metoda rekonstrukcije s naglaskom na postupak ocjenjivanja stanja postojećih zgrada i metode njihovog seizmičkog ojačanja čelikom. Obradena su rješenja koja koriste nove čelične elemente ili poboljšavaju svojstva postojećih te su istaknuti i neki od inovativnih sustava ojačanja.

### Ključne riječi:

rekonstrukcija, čelik, potres, ocjena stanja, ojačanje konstrukcije

Subject review

**Davor Skejić, Ivan Lukačević, Ivan Ćurković, Ivan Čudina**

## Application of steel in refurbishment of earthquake-prone buildings

Refurbishment of existing buildings has become an increasingly topical issue in recent years. The recent Zagreb earthquake has also increased public awareness about the issue of sensitivity of old buildings to seismic loads. Steel plays a significant role in all aspects of refurbishment as it offers reliable rehabilitation and retrofitting solutions. The paper provides an overview of refurbishment methods with an emphasis on the assessment procedure for existing buildings, and methods for their seismic retrofitting using steel. Solutions that use new steel elements or improve the properties of existing ones are discussed, and some innovative retrofitting systems are highlighted.

### Key words:

refurbishment, steel, earthquake, condition assessment, structure retrofitting

Übersichtsarbeit

**Davor Skejić, Ivan Lukačević, Ivan Ćurković, Ivan Čudina**

## Anwendung von Stahl beim Wiederaufbau erdbebenempfindlicher Gebäude

Die Rekonstruktion bestehender Gebäude war in den letzten Jahren ein aktuelles Thema. Das jüngste Erdbeben in Zagreb hat die Öffentlichkeit auch für das Problem der Empfindlichkeit alter Gebäude gegenüber seismischen Einflüssen sensibilisiert. Stahl spielt bei allen Aspekten des Wiederaufbaus eine wichtige Rolle, da er zuverlässige Lösungen für die Sanierung und Bewehrung bietet. Die Arbeit bietet einen Überblick über Rekonstruktionsmethoden mit Schwerpunkt auf dem Prozess der Bewertung des Zustands bestehender Gebäude und Methoden ihrer seismischen Bewehrung mit Stahl. Lösungen, die neue Stahlelemente verwenden oder die Eigenschaften bestehender Elemente verbessern, werden behandelt und einige der innovativen Bewehrungssysteme hervorgehoben.

### Schlüsselwörter:

Wiederaufbau, Stahl, Erdbeben, Bewertung des Zustands, strukturelle Bewehrung

## 1. Uvod

Problematika rekonstrukcije starih zgrada i očuvanja kulturne baštine sve više dobiva na važnosti, a jednako je aktualna kod zidanih, armiranobetonskih ili drvenih konstrukcija. Potreba za rekonstrukcijom, koja obuhvaća i ojačanja, javlja se kod brojnih starijih zgrada, često zbog oštećenja nastalog uslijed atmosferskih djelovanja ili potresa poput onoga koji je 22. ožujka 2020. pogodio Zagreb i ošteti brojne konstrukcije, ponajviše stare zidane zgrade u gradskoj jezgri, pokazujući važnost preventivnih zahvata ojačanja postojećih zgrada.

Također, starije zgrade koje nisu oštećene razornim djelovanjima mogu se rekonstruirati s ciljem prenamjene, proširenja, modernizacije ili pak jednostavno zbog potrebe za ojačanjem. Često je ekonomski isplativije obnoviti postojeću konstrukciju nego graditi novu. Osim toga, rekonstrukcija postojećih konstrukcija čeličnim pridonosi očuvanju kulturne baštine jer se ne zadire u sam izgled građevine, a predstavlja i održivi način gradnje [1-3].

Rekonstrukcija postojećih konstrukcija izuzetno je zahtjevan proces jer je većina takvih konstrukcija stara više od stotinu godina, a potreba za rekonstrukcijom je u rijetkim slučajevima obuhvaćena originalnim projektom. Čak i ako jest, u vrijeme izrade originalnog projekta nije bilo moguće predvidjeti sve zahtjeve za konstrukciju koji su se javili s vremenom kao što je ugradnja sustava klimatizacije, telekomunikacijskih uređaja i raznih drugih instalacija. Također, brojne starije zgrade su dio zaštićene kulturne baštine te bilo kakvi zahvati na tim konstrukcijama zahtijevaju konzultiranje s konzervatorskom strukom.

Prilikom bilo kakvog rekonstrukcijskog zahvata najprije treba ocijeniti stanja postojeće građevine [1] osobito radi očuvanja ljudskih života, a kasnije i radi potrebe izrade kvalitetnog projekta rekonstrukcije. Metode rekonstrukcije starih zgrada razlikuju se ovisno o upotrijebljenom građevnom materijalu, ali i o činjenici radi li se o 'običnoj' zgradi ili o zgradi koja je dio zaštićene kulturne baštine. U svakom slučaju, čelik kao materijal može pružiti brojne prednosti kod rekonstrukcije starih zgrada, bilo kod privremenih radova kojima se primarno osigurava sigurnost konstrukcije, bilo kod radova trajnog karaktera. Budući da se čelični elementi dopremaju kao gotov proizvod na gradilište, a prostorni zahtjevi za ugradnju su izrazito mali, velika je prednost čeličnog materijala i u tome što su gradilišta na postojećim zgradama prostorno vrlo ograničena. Čelik je materijal izrazito velikog omjera čvrstoće i težine pa je ugradnja brza i rijetko zahtijeva primjenu teške opreme za podizanje, a porast vlastite težine konstrukcije uslijed njenog ojačanja je zanemariv. Brzina gradnje naročito je značajna kod prisilno ispražnjenih stambenih zgrada gdje je ponovno useljenje stanara od velike važnosti. Također, čelik može odmah prenositi opterećenje bez podupiranja te eliminira sve postupke mokre ugradnje, a ometanje normalnog života unutar postojeće zgrade svedeno je na minimum. Nadalje, čelik je materijal visoke razine duktilnosti, jednog od najvažnijih svojstava za osiguranje seizmičke otpornosti konstrukcija, što je i dokazano prilikom

brojnih potresa u kojima su čelične konstrukcije pretrpjele znatno manja oštećenja od armiranobetonskih i zidanih konstrukcija.

Treba napomenuti da svaki proizvođač mora ispuniti niz zahtjeva propisanih normama iz skupine HRN EN 1090 prilikom projektiranja, proizvodnje i ispitivanja čeličnih proizvoda radi ishođenja 'Izjave o svojstvima' i CE certifikata. U protivnom, proizvođač ne može staviti svoje proizvode na tržište Europske unije. Samim time je zajamčena visoka razina pouzdanosti temeljnih čeličnih proizvoda za izgradnju čeličnih konstrukcija, odnosno rekonstrukciju postojećih građevina.

U radu je dan pregled različitih metoda rekonstrukcije postojećih građevina čelikom. Izneseni su primjeri primjene čelika pri rekonstrukciji zidanih, armiranobetonskih i drvenih konstrukcija. Poseban je naglasak stavljen na seizmička ojačanja postojećih konstrukcija dodavanjem novih čeličnih elemenata ili poboljšanjem svojstava postojećih elemenata primjenom čelika. Istaknuti su i neki od inovativnih sustava ojačanja postojećih konstrukcija koji se sve više primjenjuju u praksi. Da bi se naglasila važnost ocjene stanja postojećih konstrukcija prije izrade projekta rekonstrukcije, u radu je dan i pregled suvremenih metoda koje se primjenjuju u ovom postupku.

## 2. Općenito o rekonstrukciji postojećih građevina čelikom

### 2.1. Uvod

Prethodno navedene prednosti primjene čelika kao materijala jedan su od glavnih pokazatelja svestranosti primjene čelika kako u izgradnji novih tako i u rekonstrukcijama postojećih građevina. Osim toga, zbog široke palete čeličnih proizvoda koji postoje na tržištu, mogućnosti su prilagodbe čelika bilo kojem zahtjevu tijekom rekonstrukcija neograničene. Konačno, vrlo bitna je i činjenica da primjena čelika, pogotovo kod povijesnih građevina, predstavlja gotovo jedino rješenje koje omogućava reverzibilnost postupka rekonstrukcije, tj. uklanjanje elemenata bez oštećivanja postojeće građevine.

Općenito, pojam rekonstrukcije podrazumijeva radove na postojećim građevinama, koji se s obzirom na važnost ciljeva koji se njima osiguravaju, mogu podijeliti na [1, 4]:

- radove kojima se primarno osigurava sigurnost,
- radove na sanaciji,
- radove na ojačanju,
- radove vezane uz prenamjene i nadogradnje.

Radovi na osiguravanju sigurnosti podrazumijevaju rješenja privremenog karaktera, čiji je cilj samo kratkoročno omogućiti sigurnost ljudi unutar građevine i u njejoj neposrednoj blizini. Ti se radovi izvode kada je građevina postala nesigurna uslijed oštećenja zbog izvanrednog djelovanja, prevelikog opterećenja, propadanja zbog neodržavanja ili pak prije početka radova dugoročnog karaktera.

Sanacija obuhvaća aktivnosti koje se odnose na popravak oštećenja kako bi se povratilo prethodno stanje građevine, tj.

omogućila ona razina konstrukcijske otpornosti koja je postojala i prije oštećenja.

S druge strane, radovi na ojačanju konstrukcije podrazumijevaju poboljšanje konstrukcijskih svojstava kako bi se udovoljilo novim zahtjevima koji proizlaze iz prenamjene građevine (npr. veća uporabna opterećenja) ili promjene lokacijskih uvjeta građevine (npr. lokacija je svrstana u seizmički aktivno područje). Stoga razlikujemo ojačanja koja ne utječu na seizmičku otpornost građevine (točka 2.2) i ona koja se provode u svrhu povećavanja seizmičke otpornosti građevine (poglavlje 4.).

Radovi vezani uz prenamjene i nadogradnje obuhvaćaju djelomične ili cjelokupne promjene u pogledu funkcionalnosti i prostornih dimenzija (volumena), promjene izvornih svojstava zgrade uključujući djelomičnu ili potpunu izmjenu konstrukcijskog sustava zgrade. Takvi radovi obično obuhvaćaju zamjenu, umetanje, nadogradnje ili rasterećenje dijela ili cijelog konstrukcijskog sustava radi ostvarenja konačno postavljenog cilja rekonstrukcije građevine.

## 2.2. Sanacije i ojačanja građevina

Iako postoji jasna razlika između ciljeva sanacije i ojačanja, postupci njihove provedbe često su vrlo slični, a nekad i potpuno identični. Za razliku od sanacije, ojačanja se provode u svrhu osiguranja više razine pouzdanosti. Ovi radovi provode se na pojedinim konstrukcijskim elementima ili na cjelokupnoj konstrukciji, pri čemu ne bi smjeli imati značajniji utjecaj na sam statički sustav, tj. njegovu koncepciju iz razloga što kod takvog opsega radova ne dolazi do većih promjena u masi ili raspodjeli krutosti građevine. Pri tome valja napomenuti da postupci sanacije i ojačanja koji su navedeni u ovom poglavlju nemaju za primarni cilj povećanje seizmičke otpornosti građevina.

Sanacije oštećenja se kod zidanih i AB građevina mogu izvoditi korištenjem čeličnih prstenova ili čeličnih traka, kutnika i C-profila. Ako se dodatno primijeni odgovarajuće prednapinjanje, može se postići i određeno povećanje nosivosti tj. ojačanje. Ako pak postoji potreba za preuzimanjem značajnijeg vertikalnog opterećenja, zidane se konstrukcije

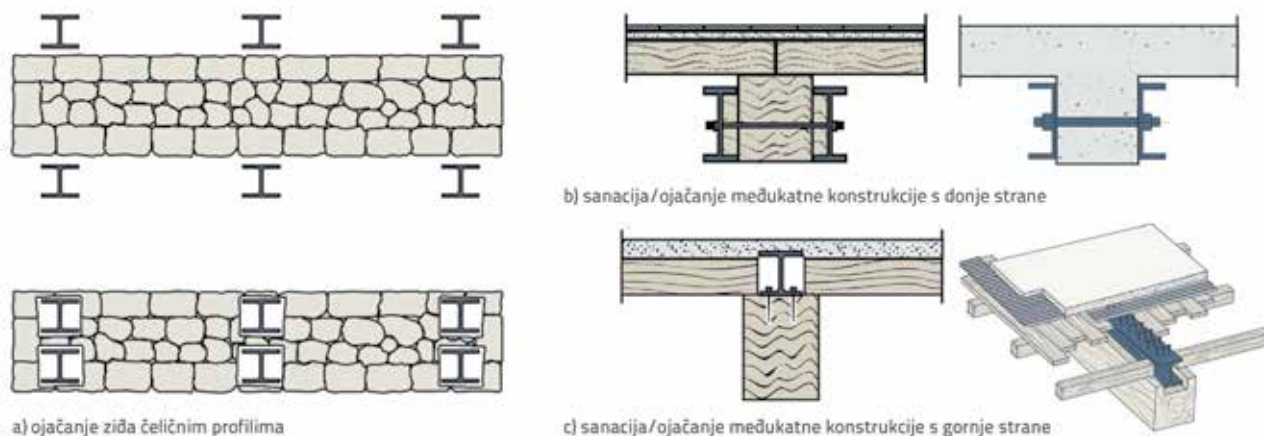
moгу ojačati novim čeličnim stupovima koji se mogu jednostavno povezati s postojećom konstrukcijom ili umetnuti unutar te konstrukcije (slika 1.a).

Kod međukatnih konstrukcija, rješenja sanacije se razlikuju ovisno o tome s koje joj je strane moguće pristupiti. Kod pristupa s donje strane, najčešće se koriste rješenja s dodavanjem različitih čeličnih profila ili ploča koje je s obzirom na njihovu veliku raznolikost moguće prikladno odabrati za svaku pojedinu namjenu (slika 1.b). Kada pristup s donje strane nije moguć ili je nužno zadržati postojeći izgled, ojačanja se izvode s gornje strane koristeći čelične profile (slika 1.c).

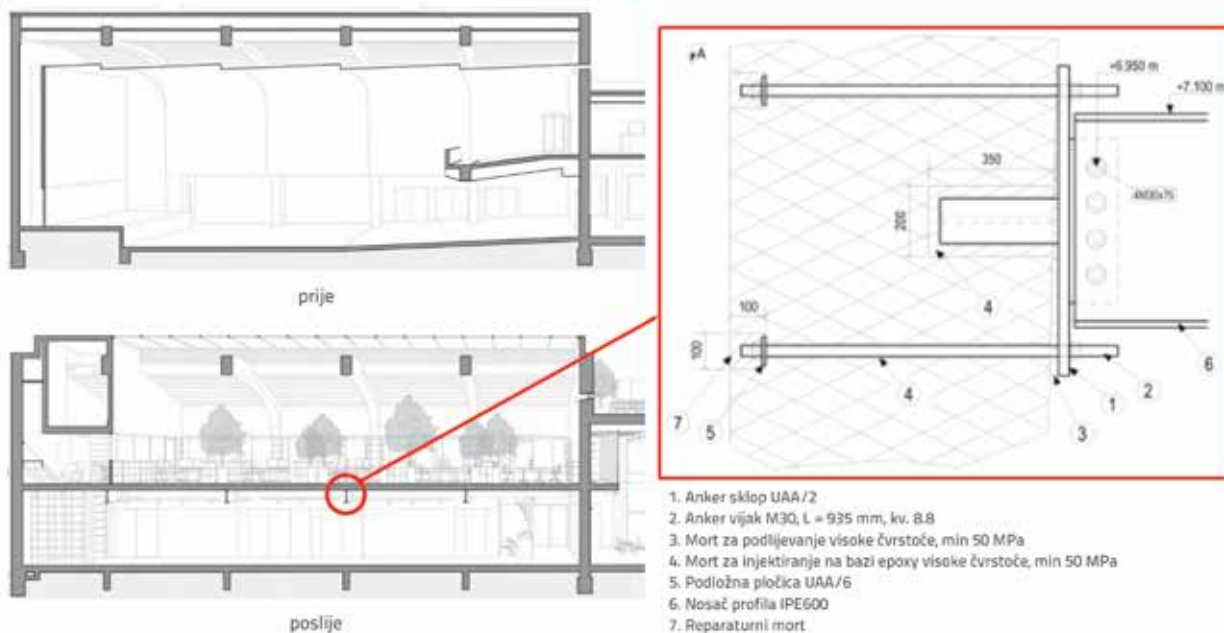
Drvene konstrukcije krovništa moguće je sanirati dodavanjem čeličnih ploča na spojevima ili duž elemenata što je izuzetno složeno, te se stoga rijetko provodi. Bolje rješenje je cjelokupna zamjena drvene rešetke čeličnom te, ako je moguće, izvedba pokriva čeličnim profiliranim limom. Zamjena krovnih konstrukcija česta je kod sakralnih građevina, pri čemu u mnogim slučajevima osim funkcije krova takva konstrukcija može poslužiti i kao horizontalna dijafragma, što je važno u seizmički aktivnim područjima.

## 2.3. Umetanje i nadogradnja nosivog sustava

Trajanje same građevine nije neograničeno, međutim nosivi sustav je za razliku od ostalih sustava koji ju čine ipak dugotrajniji, te je zato potreba njegove prilagodljivosti vrlo bitna ne samo u fazi rekonstrukcija već i u fazi projektiranja. Poželjno je da se već tijekom projektiranja novih građevina vodi računa o tom zahtjevu kako bi se za vrijeme naknadnih rekonstrukcija potrebne promjene mogle izvršiti bez poteškoća. Osim toga, u mnogim europskim gradovima zbog nedostatka prostora postoji potreba za nadogradnjom i prilagodbom postojećih zgrada novim socijalnim i ekonomskim potrebama [2]. Rješenja ovih problema mogu se naći u dva pristupa: umetanju unutar postojećeg nosivog sustava i nadogradnji na postojeći nosivi sustav. S obzirom na to da se takvim pristupima optimizira korištenje zemljišta, oni se svrstavaju u održive tipove gradnje [2].



Slika 1. Primjeri sanacije i ojačanja [4]



Slika 2. Prenamjena dvorane kina Urania u nove uredske prostore Studia 3LHD, Zagreb: a) Umetanje konstrukcije unutar postojećeg volumena - uzdužni presjek prije i poslije rekonstrukcije [5]; b) Rješenje detalja priključka čeličnih nosača na postojeći AB stup [6]

Umetanje konstrukcijskih elemenata ili čitave konstrukcije obuhvaća integraciju unutar postojećeg volumena čime se povećava korisna tlocrtna površina ili omogućavaju dodatne funkcionalnosti (npr. jezgre za dizala ili stubišta). Kako su radovi na umetanju ograničeni postojećim volumenom, oni se obično izvode kod prenamjene starih industrijskih hala u uredske ili stambene jedinice, odnosno u slučajevima kada postoji razmjerno velika katna visina (npr. izvedba potkrovlja unutar krovnog prostora). Nedavno je u Zagrebu izvedena prenamjena postojeće građevine nekadašnjeg kina Urania u uredske prostore Studia za arhitekturu i urbanizam - 3LHD [5, 6]. Centralni volumen kinodvorane podijeljen je u dvije etaže primjenom spregnute (čelik - beton) međukatne konstrukcije, slika 2.a. S obzirom na dostatnu nosivost postojeće konstrukcije (AB okvira promjenjivih dimenzija poprečnog presjeka, raspona 12,4 m, visine 10,8 m) mogli su se novi čelični nosači (IPE 600, S355J2) osloniti izravno na AB stupove. Rješenje detalja prikazano je na slici 2.b.

S druge strane, kod nadogradnji se povećanje korisnog prostora ostvaruje novim volumenom, tj. povećava se izvorni volumen zgrade s horizontalnim ili vertikalnim proširenjima. Kod horizontalnih nadogradnji obično se više pazi o estetskom, a manje konstrukcijskom aspektu. Kod vertikalnih nadogradnji nužno je ocijeniti nosivost postojeće konstrukcije kao i utjecaj nadogradnje na tu konstrukciju, te po potrebi provesti određene radove kako bi se dodatni teret mogao preuzeti. Ovo je posebice značajno u seizmički aktivnim područjima

gdje ponašanje cjelokupne zgrade ovisi o novoj masi koja se dodaje. Najpovoljniji su primjeri izvedbe oni kad se vertikalna nadogradnja može izvesti bez ikakvih ili minimalnih intervencija na postojećoj konstrukciji. Pri tome se najčešće radi o vertikalnoj nadogradnji jednog ili dva kata na postojeću građevinu gdje se koriste tankostijeni čelični profili koji, uz visok omjer otpornosti u odnosu na težinu, omogućavaju jednostavnu i brzu montažu. Vertikalne nadogradnje mogu obuhvaćati i dodavanje znatno većeg broja katova pri čemu je vrlo često potrebno ojačavati postojeću konstrukciju ili čak dodavati potpuno nove oslonce za nadograđeni dio konstrukcije. To je razlog zašto je kod vertikalnih nadogradnji najčešća primjena čeličnih i spregnutih konstrukcija koje osiguravaju najpovoljniji omjer vlastite težine i čvrstoće. Primjerice, vertikalna nadogradnja zgrade u Torontu (Kanada) prvotno je zamišljena u izvedbi s armiranim betonom, od čega se odustalo i prešlo na čelik čime je omogućena dogradnja osam umjesto četiri kata [4]. Na ovom području jedna od poznatijih vertikalnih nadogradnji je nadogradnja zgrade Euroherca u Zagrebu (slika 3.) gdje je dogradnja pet katova izvedena dijelom kao čelična, a dijelom kao spregnuta (čelik-beton) konstrukcija [7].



Slika 3. Vertikalna nadogradnja - zgrada Euroherc, Zagreb

## 2.4. Rasterećenje nosivog sustava

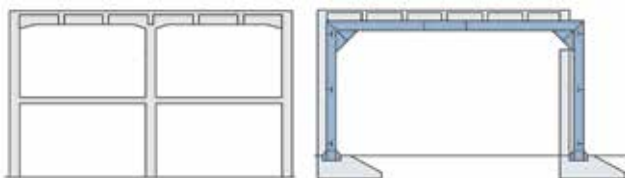
Nasuprot radovima umetanja i nadogradnje su radovi kojima se nastoji smanjiti vlastita težina kako bi se smanjilo opterećenje postojećeg nosivog sustava. To se može ostvariti primjenom novih i lakših materijala prilikom izvedbe međukatnih konstrukcija, konstrukcija krovišta ili drugih konstrukcijskih elemenata. Često se teške drvene međukatne konstrukcije zamjenjuju čeličnim I-profilima na koje se polaže profilirani lim (slika 4.a), ili se, kako je već spomenuto, postojeće krovne konstrukcije zamjenjuju krovnim čeličnim rešetkama (slika 4.b).



Slika 4. Rasterećenje nosivog sustava: a) Zamjena drvene međukatne konstrukcije sa spregnutom; b) Zamjena drvene krovne rešetke čeličnom

## 2.5. Zamjena nosivog sustava

Sve su češći primjeri kada se iz arhitektonskih ili urbanističkih razloga treba zadržati vanjska fasada zgrade a unutrašnjost prilagoditi iz funkcionalnih razloga, zbog čega se pristupa zamjeni dijelova ili čitave unutarnje konstrukcije zgrade. Takvi radovi, osim što su iznimno skupi i vrlo su složeni. Pažljivo se moraju razraditi sve faze gradnje tijekom kojih se mora osigurati pridržavanje fasade privremenom konstrukcijom koja ne smije smetati izvođenju ostalih radova na zgradi. Prednost primjene čelika kod takvih radova je u tome što može odmah nakon postavljanja preuzeti opterećenja. Ujedno nema puzanja i skupljanja koji bi mogli stvarati probleme na spoju novog i starog dijela konstrukcije. Primjena spregnutih međukatnih konstrukcija omogućava manje visine ploča s kojima se lakše može uklopiti u postojeće gabarite visine kata. Velika čvrstoća čelika omogućit će više slobodnog prostora unutar ograničene tlocrtno površine. Primjer prenamjene industrijske AB zgrade u školsku dvoranu izmjenom nosivog sustava prikazan je na slici 5.



Slika 5. Zamjena nosivog sustava [4]

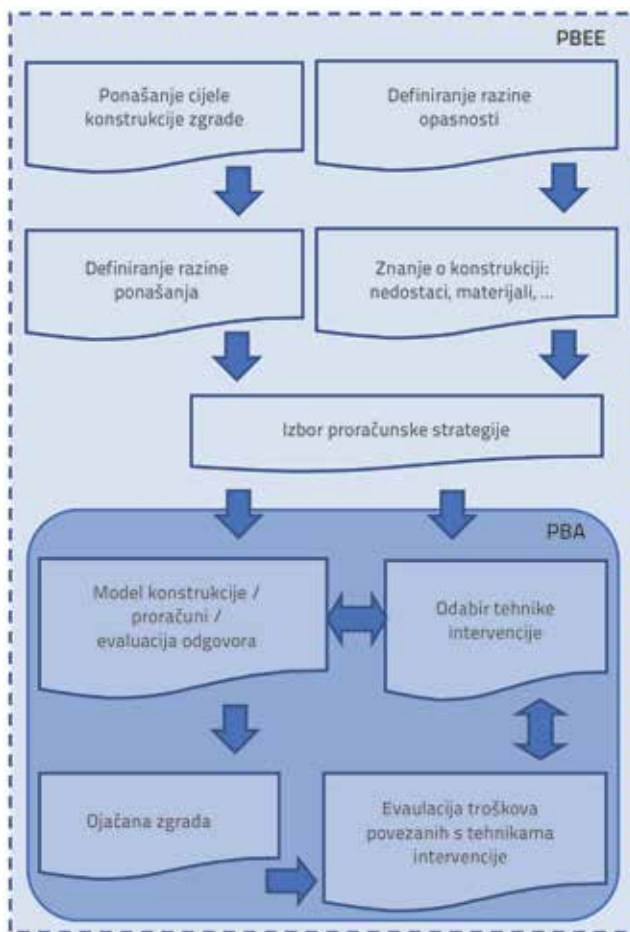
## 3. Seizmička ocjena starih zgrada

### 3.1. Postupci ocjenjivanja

Ocjena seizmičkih svojstava konstrukcije vrlo je važna tema u postupku ojačanja zgrada. Ona u prvom redu ima za cilj

smanjiti rizik od gubitaka ljudskih života, ali i smanjiti socijalne i ekonomske utjecaje u slučaju globalnog ili djelomičnog urušavanja. Kao odgovor na ove potrebe danas su projektantima na raspolaganju različite norme i smjernice u koje su ugrađeni brojni pristupi i alati razvijeni kako bi se ojačanja projektirala i izvela na pravilan način povećavajući ujedno razinu pouzdanosti [8-11]. Bitno je napomenuti da spomenute norme i smjernice često ne pružaju projektantima sve potrebne informacije, pa je često nužno integrirati različite norme u operativni postupak [12].

Pristupi ocjenjivanja općenito se svrstavaju u potresno inženjerstvo zasnovano na ponašanju (engl. *Performance Based Earthquake Engineering* - PBEE) kod kojih se stanje konstrukcije određuje na temelju usporedbe zahtjeva i kapaciteta elementa ili konstrukcije. Zahtjev se može definirati kao maksimalni zahtjev nametnut djelovanjima ili opterećenjima u smislu naprezanja ili pomaka/deformacija. Istovremeno, kapacitet predstavlja parametar zahtjeva koji konstrukcija može zadovoljiti. Na primjer, prema [8], zahtjev je organiziran kao višerazinski okvir kod kojeg je svaka razina povezana s različitim intenzitetom seizmičkog djelovanja, a svaka razina kapaciteta s različitim graničnim stanjem.



Slika 6. PBEE okvir i PBA podokvir

PBEE se općenito temelji na definiranju različitih razina ponašanja konstrukcije, identificiranih kao razina oštećenja glavnih ili sekundarnih elemenata konstrukcije. Te razine su postignute kada je građevina podvrgnuta različitim intenzitetima potresa, tj. vršnog ubrzanja tla. Uzimajući u obzir i operativne aspekte koji se odnose na praktičnu primjenu konceptualnog PBEE okvira, uvodeći procjenu zasnovanu na ponašanju (engl. *Performance Based Assessment - PBA*), moguće je individualizirati opći dijagram tijeka, slika 6. [12, 13].

Dijagram sa slike 6. se odnosi na ojačanja postojećih građevina u slučaju potresnog djelovanja. Kako je vidljivo iz dijagrama, PBA predstavlja operativnu jezgru unutar PBEE u kojoj su tehnike modeliranja, numeričke analize i tehnički aspekti međusobno povezani kako bi se došlo do konačnih tehnika intervencije. Drugi aspekti predstavljaju opću postavku ojačanja koja određuje mogućnosti projektiranja koje dolaze iz razina sigurnosti i minimalnih zahtjeva za ponašanje konstrukcije [12].

U ovom postupku vrlo je bitan odabir strategije projektiranja, slika 6, koja proizlazi iz razmatranih razina opasnosti, ponašanja i znanja o postojećoj konstrukciji. Odabrana strategija se koristi za izradu modela konstrukcije metodom konačnih elemenata kako bi se procijenili statički i seizmički zahtjevi različitih elemenata konstrukcije. Preciznim modeliranjem mehaničkih svojstava materijala, geometrije zgrade i primjenom dostupnih analiza (linearne ili nelinearne) utvrđuju se nedostaci konstrukcije (lokalni i globalni). Neizvjesnosti povezane s potrebnim podacima u ovom postupku se prema [8] vrednuju određenim razinama znanja. Rezultati provedenih analiza simulacije oštećenja mogu se usporediti sa stvarnim oštećenjima na razmatranoj zgradi čime se potvrđuje točnost modela. Sljedeći korak je predlaganje rješenja ojačanja (predstavljeno u poglavlju 4) čija se učinkovitost ocjenjuje u završnom koraku.

konstrukcije u potresu kao što su duktilnost i kapacitet. Također, korišteni propisi i norme nisu definirale rješavanje detalja u pogledu seizmičke otpornosti. Kad se sve navedeno uzme u obzir oštećenja uzrokovana mogućim potresom mogu generirati potrebu za značajnim popravcima, što svjedoči nedavni potres u Zagrebu.

Ocjena stanja i potencijalna ojačanja izloženi su brojnim neizvjesnostima koje se prema normi HRN EN 1998-3 [8] iskazuju već spomenutim razinama znanja. Ovisno o razini znanja, ova norma neizvjesnosti obuhvaća različitim faktorima sigurnosti za materijale i konstrukcijske čimbenike, kao i različite postupke analize, ovisno o cjelovitosti i pouzdanosti dostupnih informacija.

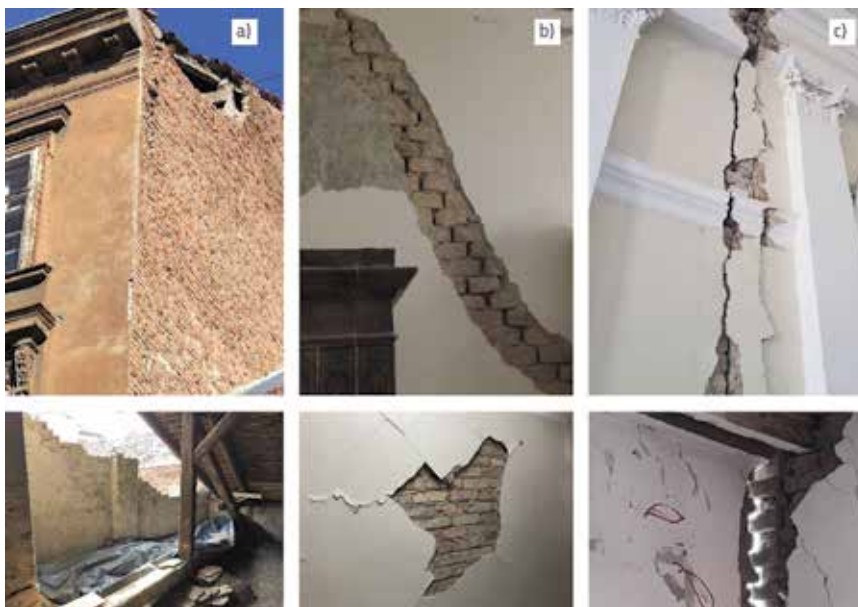
Kako bi se moglo odabrati prikladno rješenje ojačanja, preliminarno je potrebno procijeniti nedostatke povezane s razmatranom zgradom. Tako se na primjer prema [12] nedostaci konstrukcije zgrade mogu procijeniti na temelju ponašanja:

- konstrukcijskih elemenata od kojih se konstrukcija sastoji (točkasti nedostatak).
- podsustava konstrukcije koji se sastoje od konstrukcijskih elemenata ovisno o njihovoj ulozi u prijenosu opterećenja unutar konstrukcije (lokalni nedostatak).
- topologije konstrukcije u koju su ugrađeni podsustavi (globalni nedostatak).

Kad se procjenjuju nedostaci pojedine zgrade, konstrukcijske podsustave je prikladno podijeliti na: sustave krovišta i međukatne sustave, sustave za prijenos vertikalnog opterećenja, koji uključuju sve konstrukcijske elemente koji nose krov i međukatne konstrukcije, te sustav temeljenja koji uključuje sve konstrukcijske elemente koji prenose opterećenja u tlo i samo tlo. Na slici 7. prikazana su tipična oštećenja vertikalnih sustava

### 3.2. Nedostaci starih zgrada

Konstrukcijski sustavi mnogih starih zgrada nisu adekvatno projektirani i sadrže brojne nepravilnosti u smislu geometrije, čvrstoće gradiva ili krutosti i to s obzirom na njihov tlocrt ili po visini. U mnogim slučajevima te su zgrade bile izložene prethodnim potresima ili drugim slučajnim događajima s nepoznatim učincima. Osim toga, prilikom njihovog projektiranja i izgradnje usvojene su brojne pretpostavke i pojednostavljenja, a seizmička otpornost gotovo uopće nije bila razmatrana, dok su ne-seizmička djelovanja obuhvaćena tradicionalnim pravilima gradnje. Nisu korištena računala i prostorni modeli, a većina elemenata je razmatrana neovisno o sustavu. U tom smislu ignorirani su parametri koji su nužni za ponašanje



Slika 7. Tipična oštećenja na primjerima zgrada u Zagrebu nakon potresa: a) Oštećenja zabatnih zidova; b) Dijagonalne pukotine u zidovima; c) Vertikalne pukotine u zidovima

na primjerima zgrada nakon potresa u Zagrebu. Od navedenih sustava, prema [12], mogu se izdvojiti nedostaci i tipični problemi kod postojećih zgrada koji su opisani u nastavku.

Kako se svaki konstrukcijski sustav sastoji od različitih konstrukcijskih elemenata, moguće je identificirati kritična područja u konstrukciji. S obzirom na ulogu elemenata u konstrukciji prikladno ih je svrstati u grupu elemenata koji prikupljaju opterećenja i podupiruće elemente. S tim u vezi razlikujemo područja prikupljanja i područja prijenosa opterećenja. Ona se mogu klasificirati u površinska područja, linearna područja i točkasta područja, a konstrukcijski elementi u 1D (grede, stupovi, lukovi, šipke, ...), 2D (zidovi, ploče, svodovi, ...) i 3D elemente (nepopustljivi priključci, kratke konzole, temelji, sidreni blokovi, temeljno tlo...).

Kako bi se identificiralo kritična područja u konstrukcijskom elementu i klasificiralo moguće probleme, potrebno je utvrditi zahtjeve i kapacitet elementa. Zahtjevi predstavljaju maksimalna naprezanja i deformacije koje proizlaze iz potresnog djelovanja, a kapacitet maksimalna naprezanja i deformacije koje element može podnijeti. U slučaju kada odnos između zahtjeva i kapaciteta teži prema 1, područje se može smatrati kritičnim. Kada se takva područja utvrde metodama ojačanja, moguće je smanjiti zahtjeve ili povećati kapacitet tih područja.

Ako se oštećenja pojavljuju na više mjesta, moguća su lokalna ili globalna otkazivanja. U tom je slučaju tijekom ocjenjivanja nužno utvrditi potencijalne putanje koje od oštećenja elemenata vode do lokalnih ili globalnih otkazivanja.

Prepoznavanje nedostataka u konstrukciji zahtijeva detaljno proučavanje podataka o geometriji, detaljima i mehaničkim svojstvima materijala, o čemu slijedi kratak pregled.

### 3.3. Geometrija, detalji, svojstva materijala i ispitivanja

Kao što je slučaj s većinom postojećih građevina, ograničena je dostupnost podataka o geometriji, detaljima i svojstvima materijala. Zato je potrebno prikupiti podatke iz različitih izvora poput dostupne dokumentacije koja se odnosi na konkretnu zgradu te odgovarajućih norma i propisa. Osim toga, treba provesti detaljne preglede i terenska ispitivanja te po potrebi i laboratorijska ispitivanja na uzorcima koji su uzeti s različitih mjesta zgrade radi što pouzdanije procjene. Prilikom razmatranja globalnog ponašanja konstrukcije, vrlo su korisni podaci kojima se mogu značajno reducirati svojstvene neizvjesnosti. U tu svrhu posebno su značajne nerazorne metode ispitivanja. Primjerice na ovaj način prikupljeni dinamički parametri konstrukcije pružaju osnovu za provjeru točnosti numeričkog modela konstrukcije i određivanje neizvjesnih parametara konstrukcije poput modula elastičnosti i karakteristika temeljnog tla. Detalji tih postupaka mogu se naći u normi [8], a konkretni primjeri u literaturi [14-17]. Postupci ispitivanja, liste pregleda i drugi prikupljeni podaci moraju biti dokumentirani i na njih se treba pozvati u projektu ojačanja [8].

Na temelju pouzdanosti dobivenih podataka, norma HRN EN 1998-3 [8] definira već spomenute razine znanja u svrhu

dopuštene vrste proračuna i odgovarajućih vrijednosti faktora povjerenja. Faktori na temelju kojih se određuju razine znanja su: geometrijski faktori, detalji i materijali. Geometrijski faktori su vezani za geometrijske karakteristike konstrukcijskih elemenata i onih nekonstrukcijskih koji mogu utjecati na ponašanje konstrukcije. Detalji su vezani na postotak i oblikovanje armature u armiranom betonu te spojeve i priključke između elemenata i međukatnih konstrukcija na elemente koji preuzimaju horizontalne sile, prionjivost i detalji sljubnica u zidu te detalji armiranja zida ako postoji. Materijali su vezani na njihova mehanička svojstva. Pojediniosti vezane za određivanje razine znanja mogu se pronaći u normi HRN EN 1998-3 [8].

Ovisno o razini znanja, uz pomoć faktora povjerenja izmjerene se srednje vrijednosti svojstava materijala dijele ili množe. U slučaju kad se provjerava kapacitet sustava u odnosu na zahtjeve, svojstva materijala se dijele. S druge strane, pri određivanju kapaciteta duktilnih komponenti koje učinke djelovanja predaju krtnim komponentama ili mehanizmima, svojstva materijala se množe.

### 3.4. Zahtjevi za ponašanje konstrukcije i kriteriji usklađenosti

Ocjenjivanje je kvalitativan postupak kontrole činjenice hoće li postojeća neoštećena ili oštećena zgrada ispuniti zahtjev graničnog stanja koje odgovara razmatranom potresnom djelovanju. Pri ovom postupku potresno djelovanje odgovara prethodno definiranim zahtjevima za ponašanje konstrukcije. Sam postupak ocjenjivanja se provodi metodama definiranim u HRN EN 1998-1 [18] koje su prilagođene određenim zahtjevima u postupku ocjenjivanja prema HRN EN 1998-3 [8]. Norma HRN EN 1998-3 definira zahtjeve u obliku tri granična stanja ponašanja građevine, a to su:

- ograničeno oštećenje (engl. *Damage Limitation* - DL)
- znatno oštećenje (engl. *Significant Damage* - SD)
- blizu rušenja (engl. *Near Collapse* - NC).

Navedena granična stanja su povezana srednjim povratnim periodima (MRP) kojima odgovaraju određene vjerojatnosti prekoračenja. U slučaju DL, MRP iznosi 225 godina s vjerojatnošću prekoračenja od 20 % u 50 godina, kod SD MRP iznosi 475 godina s vjerojatnošću prekoračenja od 10 % u 50 godina i kod NC MRP iznosi 2475 godina s vjerojatnošću prekoračenja od 2 % u 50 godina.

Usklađenost sa zahtjevima postiže se prihvaćanjem potresnog djelovanja, metode proračuna te postupcima provjere i razrade detalja u skladu s različitim materijalima (beton, žiđe) [8]. U ovom postupku se, prema [19, 20], preporučuje uvođenje probabilističkih analiza na temelju logičkog stabla kako bi projektant lakše prepoznao i definirao moguće situacije koje vode do kolapsa.

Za proračun konstrukcije mogu se koristiti linearne i nelinearne metode, od kojih je primjena linearnih definirana određenim uvjetima. Primjerice u slučaju zidanih konstrukcija, a koje

predstavljaju većinu oštećenih nakon potresa u Zagrebu, primjena linearnih metoda, statičkih i višemodalnih, ograničena je sa brojnim uvjetima prema [8, 13, 20]. Ako se ti uvjeti uzmu u obzir, može se pretpostaviti da se linearne metode u većini slučajeva neće smjeti primijeniti.

Usklađenost se kontrolira primjenom elastičnog potresnog djelovanja u skladu s definiranim povratnim periodima za pojedino granično stanje. Moguća je i primjena postupka s faktorom ponašanja uz određena ograničenja koja su definirana u normi HRN EN 1998-3 [8]. U ovom postupku je nužno razlikovati duktilne i krte konstrukcijske elemente, pa se duktilni provjeravaju s obzirom na njihovu sposobnost deformiranja, a krte s obzirom na doseganje njihove čvrstoće. Detalji o zahtjevima usklađenosti s obzirom na pojedino granično stanje definirani su u poglavlju 2 norme HRN EN 1998-3 [8].

## 4. Mogućnosti seizmičkih ojačanja starih zgrada čelikom

### 4.1. Općenito

Općenito, postupak projektiranja ojačanja uključuje sljedeće korake: konceptualno projektiranje, analizu i provjere [8]. Ovo poglavlje je usmjereno na opisivanje pojedinih tehnika izvedbe čelikom koje se koriste u seizmičkom ojačanju, a ne na davanje cjelovitih smjernica o znatno suptilnijem procesu razvoja i projektiranja cjelovitih shema ojačanja. Iako ovo potonje može biti korisno inženjerima neiskusnim u seizmičkom ojačanju ili seizmičkom projektiranju općenito, shematski postupak projektiranja za seizmičko ojačanje je složen i često uključuje više umjetnosti nego znanosti [21].

Da bi se unaprijedile postojeće konstrukcije, kontinuirano se razvijaju različite tehnike poboljšanja. Rješenja s čelikom čine se konkurentnijima u pogledu svojstava, primjenjivosti i reverzibilnosti [12]. Ta rješenja su usmjerena ili na poboljšanje svojstava postojećih elemenata poput nosača i stupova u pogledu otpornosti, krutosti ili duktilnosti, ili na oblikovanje potpuno novog sustava koji je otporan na bočno (horizontalno) opterećenje ili pak na ojačanje postojećih zidova ispunjena tako da se ponašaju kao pouzdani podupirući sustavi. Osim toga, u posebnim se slučajevima mogu koristiti tehnike koje uključuju izolaciju oslonaca ili prigušivače, ali njihova je primjena u uobičajenim stambenim zgradama malo vjerojatna [22].

### 4.2. Razredi mjera ojačanja

Kako bi se projektirala učinkovita shema ojačanja, nužno je temeljito razumijevanje očekivanog seizmičkog odziva postojeće zgrade i svih njenih nedostataka. U većini slučajeva je pozornost za određivanje izvedive sheme ojačanja usmjeren na vertikalno orijentirane komponente (npr. stupove, zidove, stabilizacije, itd.) zbog njihovog značenja u pružanju bočne stabilnosti i/ili otpornosti na gravitacijsko opterećenje. Nedostatci vertikalnih elemenata uzrokovani su pretjeranim međukatnim

deformacijama koje stvaraju neprihvatljive zahtjeve vezane uz sile ili deformacije. Međutim, ovisno o tipu zgrade, zidovi i stupovi mogu biti primjereni za seizmička i gravitacijska opterećenja, no ako su komponente zgrade neprikladno povezane, može doći od djelomičnog ili potpunog kolapsa u potresu. Nadalje, kao što je zabilježeno tijekom posljednjeg snažnijeg potresa koji je 22. ožujka 2020. pogodio Zagreb, još jedna slaba točka građevine primarno vezana za stare zidane zgrade, jest nedovoljna krutost horizontalnih dijafragmi (najčešće su to drvene međukatne konstrukcije).

U tradicionalnom smislu poboljšanja svojstava (performansi) postojeće građevine postoje tri osnovna razreda mjera koja se poduzimaju za ojačanje zgrade:

- dodavanje elemenata - obično povećava otpornost ili krutost
- poboljšanje svojstava postojećih elemenata - povećava otpornost ili sposobnost deformacije
- poboljšanje priključaka između komponenata - osigurava da se pojedini elementi ne odvoje i otkazu, uspostavlja se potpuni put prijenosa opterećenja i osigurava da može doći do raspodjele sila koju je projektant pretpostavio.

Razredi mjera ojačanja često se međusobno uravnotežuju jer će veće aktiviranje jednog razreda značiti da je potrebno manje drugoga. Očito je da će osiguravanje dodatne globalne krutosti zahtijevati manju sposobnost deformacije lokalnih elemenata (npr. pojedinih stupova), ali često je manje očito da pažljivo postavljanje novih bočnih elemenata može umanjiti problem povezanosti, poput nedostatne dijafragme. Važna pitanja koja se odnose na povezanost, poput veza između zida i međukatne konstrukcije, često su neovisna i moraju se na odgovarajući način tretirati. Poblize o razredima mjera ojačanja slijedi.

### 4.3. Dodavanje novih elemenata

Ovo je najočigledniji i najopćenitiji razred mjera ojačanja. U mnogim slučajevima se postojećoj zgradi dodaju novi čelični i/ili spregnuti posmični zidovi [23, 24], vezni sustavi, okviri ili njihove kombinacije [25], kako bi se ublažili nedostaci u globalnoj otpornosti, globalnoj krutosti, konfiguraciji ili smanjili rasponi dijafragmi. Novi elementi se također mogu dodati kao kolektori za ublažavanje nedostataka na putu prijenosa opterećenja.

Sheme ojačanja razvijene su u balansu između dodavanja novih i poboljšanja postojećih elemenata koji najbolje odgovara društveno-ekonomskim zahtjevima. Dodavanje novih elemenata ili povećanje otpornosti postojećih elemenata može stvoriti problem pri prijenosu opterećenja. Projektant mora osigurati da nova opterećenja koja se preraspodjeljuju na ove elemente mogu biti prenesena do njih preko drugih postojećih komponenti. Stoga, rješavanje problema nedostatne globalne otpornosti ili globalne krutosti može uzrokovati nedostatak na putu prijenosa opterećenja koji prvotno nije postojao.

Upotreba čeličnih veznih sustava vrlo je učinkovita u ojačanju zidanih i armirano-betonskih konstrukcija protiv potresa [4]. Posmični zidovi s rešetkastom ispunom imaju dvije svrhe:





Slika 8. Zgrade ojačane vanjskim čeličnim vezovima



Slika 9. Čelične zatege: a) Primjer starih i nedavno ugrađenih zatega (iznad starih); b) Detalj sidrenja zatega; c) Tipični način otkazivanja

povećavaju otpornost konstrukcije na horizontalne sile i uravnotežuju raspodjelu unutarnje krutosti u odnosu na centar posmika kako bi se umanjili opasni torzijski učinci. Što se tiče zidanih konstrukcija, čelični vezni sustavi se mogu nalaziti unutar ili pokraj ziđa i moraju biti povezani s međukatnim konstrukcijama. S druge strane, kod armiranobetonskih konstrukcija, čelični profili se spajaju po obodu mreže armiranobetonskog okvira, unutar kojih se raspoređuju križne dijagonale. Primjeri ojačanja zgrada s vanjskim čeličnim vezovima dani su na slici 8.

Relativne krutosti neojačane konstrukcije i novog čeličnog veza važan su faktor koji treba uzeti u obzir. U potresu se očekuje raspucavanje

prvobitne zidane konstrukcije, a nakon što je došlo do dovoljnog raspucavanja, novi čelični sustav imat će usporedivu krutost i bit će učinkovit [26]. Općenito, vertikalni dijagonalni vez poboljšava bočnu otpornost u ravni ojačanog zida za 4,5 puta [27], dok u slučaju panelne ispune, sustav povećava bočnu otpornost u ravni ojačanog zida za 10 puta.

Čelične zatege mogu se koristiti u nekoliko primjena kod ojačanja starih zidanih zgrada [28]. Na primjer, one mogu spriječiti ili barem smanjiti vjerojatnost otkazivanja izvan ravnine. Zatege se mogu koristiti i kod lukova za preuzimanje horizontalnih sila, slika 9.a. Slika 9.b prikazuje detalj sidrenja horizontalnih zatega za povezivanje paralelnih zidova na razini kata. Na slici 9.c može se vidjeti otkazivanje sidrišta zatege nakon potresa do kojeg je došlo zbog premale površine sidrene ploče.

#### 4.4. Unapređenje svojstava postojećih elemenata i priključka

Umjesto primjene mjera ojačanja koje utječu na čitavu konstrukciju, nedostaci se mogu otkloniti i na lokalnoj razini na

postojećim komponentama. To se može postići povećanjem postojeće posmične ili fleksijske otpornosti elemenata ili jednostavno preinakom elementa na način koji omogućuje dodatnu deformaciju bez narušavanja vertikalne nosivosti.

S obzirom na to da će se određene komponente konstrukcije plastificirati kad je konstrukcija izložena snažnom pokretu tla, važno je prepoznati da se uvijek preferira određeni redoslijed plastifikacije: grede popuštaju prije stupova, vezni elementi popuštaju prije spojeva, plastifikacija uslijed savijanja prije posmičnog otkazivanja u stupovima i zidovima. Navedeni se odnosi mogu utvrditi analizom i kontrolirati lokalnim ojačanjem na različite načine (slika 10.).



Slika 10. Ojačanje armiranobetonskih elemenata čeličnim pločama



Slika 11. Ojačanje drvene međukatne konstrukcije čelikom: a) Ojačanje pomoću križno raspoređenim čeličnih zatega; b) Spoj između međukatne konstrukcije i zida

Stupovi u okvirima i spojevi u vezovima mogu se ojačati, a posmična otpornost stupova i zidova može se poboljšati kako bi bila veća od posmičnog djelovanja koje se može pojaviti uslijed dosezanja otpornosti na savijanje. Betonski stupovi mogu se omotati čelikom kako bi se osiguralo ovijanje i posmična čvrstoća. Tradicionalno zidane zgrade imaju drvene međukatne konstrukcije koje su obično fleksibilne. Povećanje krutosti u ravnini međukatne konstrukcije očita je i najučinkovitija metoda poboljšanja seizmičkog ponašanja starih zidanih konstrukcija [4]. To je uglavnom zato što povećavanje krutosti u ravnini međukatne konstrukcije omogućuje konstrukciji da se ponaša kao kutija. Na taj način se omogućava preraspodjela horizontalnih sila između vertikalnih konstrukcijskih elemenata, a ujedno se i horizontalne sile sa zidova i stupova koji otkazuju mogu preraspodijeliti na preostale susjedne vertikalne elemente. Stoga se ojačanjem međukatne konstrukcije pruža mogućnost poboljšanja ponašanja i učinkovitosti čitave građevine.

Jedna od mogućih tehnika odnosi se na međukatnu konstrukciju ugradi horizontalni vez koji se sastoji od čeličnih zatega raspoređenih u križevu, slika 11.a. Pri tome je potrebno paziti na poboljšanje spoja između međukatne konstrukcije i zida, što se može izvesti čeličnim L-profilima, slika 11.b. Za razliku od tehnike spregnute ploče od drva i betona, ovo rješenje značajno ne povećava masu međukatnih konstrukcija a ujedno je i reverzibilno. Razred tehnike sanacije gotovo je isključivo usmjeren na ublažavanje nedostataka na putu prijenosa opterećenja. Uz iznimku kolektora, nedostatak na putu prijenosa opterećenja najčešće nastaje slabim spojem, a ne potpuno nestalom vezom. Međutim, neki slabi spojevi, posebno između grede i stupa koji ju podupire, nisu izravno na glavnom putu prijenosa seizmičkog opterećenja, ali još uvijek zahtijevaju ojačanje kako bi se osiguralo pouzdano preuzimanje gravitacijskog opterećenja tijekom i nakon snažnog potresa.

Dodavanjem ukrućujućih elemenata mogu se primijeniti odgovarajući sustavi za ojačanje dviju klasičnih vrsta priključaka (upeti i zglobovi). U slučaju nepopustljivih priključaka, povećava se otpornost na savijanje. U slučaju zglobovnih priključaka, dodavanje ukrućujućih elemenata se projektira tako da se unese zadani kapacitet otpornosti na savijanje, koji u originalnom priključku zapravo nije postojao. Konačno, deformacijski kapacitet se može povećati lokalno odvajanjem krutih elemenata od deformirane konstrukcije, ili njihovim potpunim uklanjanjem.

#### 4.5. Pasivni sustavi kontrole odgovora konstrukcije

Kontrola odgovora konstrukcije uzrokovanog potresima može se provesti pomoću različitih sustava koji se temelje na različitim konceptima kao što su modificiranje masa ili prigušivanje, ali i proizvodnja pasivnih ili aktivnih kontrasila [4]. Kod pasivnih sustava koji ne zahtijevaju vanjski izvor napajanja, svojstva se konstrukcije (period i/ili kapacitet prigušivanja) ne mijenjaju ovisno o seizmičkom kretanju tla.

Primjena pasivnih tehnika kontrole odgovora konstrukcije u obnovi postojećih zgrada relativno je novo pitanje. Iako postoji niz različitih pasivnih sustava kontrole odgovora konstrukcije, prve značajnije primjene u zgradama realizirane su u Italiji 1990-ih godina primjenom oleodinamičkih prigušivača [4].

Inovativni čelični priključci nosač-stup s prigušivačima trenja radi razgradnje ulazne energije potresa nedavno su proučavani u sklopu europskog istraživačkog projekta FREEDAM [29]. Priključci su zamišljeni tako da pokazuju široke i stabilne petlje histereze bez ikakvih oštećenja na čeličnim pločastim elementima i ekonomski su isplativiji u odnosu na upotrebu oleodinamičkih prigušivača.

### 5. Zaključak

U svrhu održive gradnje, ali i očuvanja kulturne baštine, rekonstrukcija postojećih zgrada postaje sve aktualnija tema. Nedavni potres u gradu Zagrebu ugrozio je lokalno stanovništvo i uzrokovao velike materijalne štete upozoravajući na važnost sanacija i ojačanja starih zgrada. U skladu s tim opisani su različiti načini rekonstrukcije starih zgrada uporabom čelika, a poseban naglasak je stavljen na seizmičko ojačanje postojećih konstrukcija. Kako je ocjena stanja starih zgrada prije ili nakon potresa nužan korak u postupcima ojačanja, u radu je dan i kratak pregled suvremenih metoda koje se primjenjuju u tom postupku. Na temelju izloženoga mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Različite međunarodne preporuke za rekonstrukciju ističu da upotreba tradicionalnih građevinskih metoda i materijala više nije prikladna, a često nije niti moguća. Kao alternativa tradicionalnim metodama preporučuju se metode rekonstrukcije čeličnim konstrukcijskim elementima koje, između ostalog, omogućavaju reverzibilnost postupka rekonstrukcije.

- Čelik kao materijal pruža brojne prednosti nad tradicionalnim metodama sanacije i ojačanja kao što su korištenje predgotovljenih elemenata, brzina i jednostavnost ugradnje te eliminiranje mokrih postupaka ugradnje. Također, zbog izrazito velikog omjera čvrstoće i vlastite težine čelika, utjecaj na povećanje težine postojeće konstrukcije je zanemariv, a to je ključna prednost naročito s aspekta seizmičke otpornosti.
- Čelik nudi i mogućnost prenamjene i proširenja konstrukcija umetanjem novih konstrukcijskih elemenata ili čitave konstrukcije unutar postojećeg volumena ili nadogradnjom

na postojeći nosivi sustav. Na taj način se optimizira korištenje zemljišta čime se takvi pristupi svrstavaju u održivi tip gradnje.

Osim navedenih prednosti, uporaba izrazito pouzdanog i duktilnog konstrukcijskog materijala kao što je čelik predstavlja jedan od djelotvornijih načina minimiziranja materijalnih šteta uslijed nastupanja potresa u budućnosti, ali još važnije i spašavanja ljudskih života. Naravno, optimum se može postići jedino ako rekonstrukciju projektiraju inženjeri koji vladaju znanjem suvremenog projektiranja čeličnih konstrukcija.

## LITERATURA

- [1] ESDEP, European Steel Design Education Program, The Steel Construction Institute, London, 1994.
- [2] Renovation of buildings using steel technologies (ROBUST), Final report, Research Fund for Coal and Steel, Brussels, 2011.
- [3] Alba-Rodríguez, M.D., Martínez-Rocamora, A., González-Vallejo, P., Ferreira-Sánchez A., Marrero, M.: Building rehabilitation versus demolition and new construction: Economic and environmental assessment, *Environmental Impact Assessment Review*, 66 (2017), pp. 115-126, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.06.002>
- [4] Mazzolani, F.M.: Refurbishment by steelwork, Arcelor Mittal, 2014.
- [5] VIZKULTURA, [www.vizkultura.hr/prostor-aktivacije/](http://www.vizkultura.hr/prostor-aktivacije/), 05.05.2020.
- [6] Rekonstrukcija postojeće građevine nekadašnjeg kina Urania, Zagreb, Studio 3LHD d.o.o., Građevinski projekt - projekt konstrukcije, Palijan d.o.o., Zagreb, 2017.
- [7] Lazarević, D., Anđelić, M., Atalić, J.: Projekt konstrukcije nadogradnje zgrade Euroherca u Zagrebu, *Građevinar*, 63 (2011) 12, pp. 1021-1032.
- [8] EN 1998-3, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, CEN - European Committee for Standardization, 2005.
- [9] Federal Emergency Management Agency (FEMA): Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356, Washington (DC), 2000.
- [10] SEAOC: Performance based seismic engineering of buildings: vision 2000. Structural Engineers Association of California, Sacramento, 1995.
- [11] ASCE: Seismic rehabilitation of existing buildings. ASCE/SEI Standard no. 41-06, American Society of Civil Engineers, Reston, 2007.
- [12] Steel solutions for seismic retrofit and upgrade of existing constructions (STEELRETRO), Final report, Research Fund for Coal and Steel, Brussels, 2013.
- [13] Bisch et al.: Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples, European Commission, Joint Research Centre EUR 25204 EN-2012, 2012
- [14] Maraveas, C.: Assessment and Restoration of an Earthquake-Damaged Historical Masonry Building, *Frontiers in Built Environment*, 5 (2019), Article 112, pp. 1-16, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00112>.
- [15] Maraveas, C., Tasiouli, K.: Assessment and restoration of the first Greek power plant - registered monument of industrial heritage, *Case Studies in Structural Engineering* 3 (2015), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.csse.2014.12.001>.
- [16] D'Amato, M., Gigliotti, R., Laguardia, R.: Comparative Seismic Assessment of Ancient Masonry Churches, *Frontiers in Built Environment* 5 (2019), 56, pp. 1-17, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00056>.
- [17] Caprili, S., Puncello, I.: Knowledge-Based Approach for the Structural Assessment of Monumental Buildings: Application to Case Studies, *Frontiers in Built Environment*, 5 (2019), Article 52, pp. 1-16 <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00052>.
- [18] EN 1998-1, 2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN - European Committee for Standardization.
- [19] Pinto, P.E., Franchin, P.: Assessing existing buildings with Eurocode 8 Part 3: A discussion with some proposals, Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Rome La Sapienza, 2008.
- [20] Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology - Volume 1, Editor: Atilla, A., Springer, 2014.
- [21] Federal Emergency Management Agency (FEMA), Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, FEMA 547, October 2006.
- [22] Gkournelos, D.P., Bournas, D.A., Triantafyllou, T.C.: Combined seismic and energy upgrading of existing buildings using advanced materials, EUR 29172 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-79-81824-0, doi:10.2760/17376, JRC111303.
- [23] Ćurković, I., Skejić, D., Džeba, I.: Seismic performance of steel plate shear walls with variable column flexural stiffness, *Steel and Composite Structures*, 33 (2019) H. 1, S., pp. 1-18.
- [24] Ćurković, I., Skejić, D., Džeba, I., De Matteis, G.: Seismic performance of composite plate shear walls with variable column flexural stiffness, *Steel and Composite Structures*, 33 (2019) H. 1, S., pp. 19-36.
- [25] Lukačević, I., Maleta, T., Dujmović, D.: Behaviour of dual eccentrically braced steel frames with short and long seismic links, 20th IABSE Congress, New York City, 2019 The Evolving Metropolis, (Eds. McGormley, J., Tortorella, J.), New York : ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich, Switzerland, pp. 1674-1681, 2019.

- [26] ElGawady, M., Lestuzzi, P., Badoux, M.: A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM, 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, The Netherlands, Paper No. 89, 2004.
- [27] Taghdi, M.: Seismic retrofit of low-rise masonry and concrete walls by steel strips, PhD dissertation, Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Canada, 2000.
- [28] Meireles, H., Bento, R.: Rehabilitation and strengthening of old masonry buildings, Relatório ICIST, DTC n° 02/2013, ISSN: 0871-7869, Março de 2013.
- [29] FREE from DAMAge Steel Connections (FREEDAM), Agreement No. RFSR-CT-2015-00022, Final report, Research Fund for Coal and Steel, Brussels, 2018.