

Primljen / Received: 20.1.2017.
Ispravljen / Corrected: 22.5.2017.
Prihvaćen / Accepted: 25.7.2017.

Dostupno online / Available online: 10.10.2017.

Pregled i ocjena stanja postojećih drvenih konstrukcija

Autori:



Dr.sc. **Mislav Stepinac**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mstepinac@grad.hr



Prof.dr.sc. **Vlatka Rajčić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
vrajcic@grad.hr



Jure Barbalić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
jbarbalic@grad.hr

Pregledni rad

Mislav Stepinac, Vlatka Rajčić, Jure Barbalić

Pregled i ocjena stanja postojećih drvenih konstrukcija

Ocjena stanja i kontinuirano praćenje ponašanja postojećih drvenih konstrukcija u posljednje vrijeme sve više dobivaju na značaju. Globalni cilj održivog razvoja u velikoj mjeri usmjeren je na očuvanje postojećih konstrukcija i zaštitu graditeljske baštine. U radu su prikazane metode ocjenjivanja stanja postojećih drvenih konstrukcija. Glavni naglasak stavljen je na prikaz nedestruktivnih i poludestruktivnih metoda za drvene konstrukcije koje su često u uporabi. U radu su navedene metode na konkretnom primjeru ocjene stanja Tehničkog muzeja Nikole Tesle u Zagrebu.

Ključne riječi:

ocjena stanja, drvene konstrukcije, nedestruktivne metode, graditeljska baština, Tehnički muzej

Subject review

Mislav Stepinac, Vlatka Rajčić, Jure Barbalić

Inspection and condition assessment of existing timber structures

Condition assessment and continuous monitoring of the existing timber structures have been gaining in importance in recent times. The global objective of sustainable development has been greatly directed toward preservation of the existing structures and protection of architectural heritage. Methods used for assessing condition of the existing timber structures are presented in the paper. The main emphasis is placed on the presentation of non-destructive and semi-destructive methods for frequently used timber structures. The methods are presented through the example of condition assessment of the Nikola Tesla Technical Museum in Zagreb.

Key words:

condition assessment, timber structures, non-destructive methods, architectural heritage, technical museum

Übersichtsarbeit

Mislav Stepinac, Vlatka Rajčić, Jure Barbalić

Übersicht und Zustandsbeurteilung bestehender Holzkonstruktionen

Die Zustandsbeurteilung und die kontinuierliche Verfolgung des Verhaltens bestehender Konstruktionen bekommen in der letzten Zeit immer mehr an Bedeutung. Das globale Ziel einer nachhaltigen Entwicklung besteht vorwiegend im Erhalt bestehender Konstruktionen und dem Schutz des Bauerbes sowie in der Zustandsbeurteilung. In der Arbeit werden die Methoden der Zustandsbeurteilung von bestehenden Holzkonstruktionen dargestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung von häufig angewendeten nicht destruktiven und semi-destruktiven Methoden für Holzkonstruktionen. In der Arbeit werden die Methoden am konkreten Beispiel der Zustandsbeurteilung des Technischen Museums Nikola Tesla in Zagreb dargestellt.

Schlüsselwörter:

Zustandsbeurteilung, Holzkonstruktionen, nicht destruktive Methoden, Bauerbe, Technisches Museum

1. Uvod

Metode za ocjenu stanja i kontinuirano praćenje ponašanja (monitoring) konstrukcija važne su teme za očuvanje ne samo postojećih nego i novih konstrukcija, ali u kontekstu drvenih konstrukcija nisu adekvatno zastupljene u strateškim dokumentima vezanim za projektriranje konstrukcija.

Drvo se, kao građevni materijal, često smatra manje trajnim materijalom, a drvene konstrukcije kao privremene ili relativno kratke trajnosti. Ipak, postoje brojni primjeri drvenih konstrukcija koje prkose vremenu i koje su još uvijek u uporabi unatoč agresivnom okolišu i/ili neadekvatnoj uporabi (slika 1.). U posljednjem desetljeću objavljeni su brojni znanstveni radovi koji ističu probleme i dostignuća u monitoringu, ocjenjivanju stanja, ojačanju i sanaciji drvenih konstrukcija.

Dok monitoring pomaže za kontinuirano praćenje stanja konstrukcije, nedestruktivne metode (eng. *Non-Destructive Testing* - NDT) imaju cilj opisati trenutačno stanje konstrukcije i njenih sastavnih dijelova [1]. Postoje dva glavna područja procjenjivanja i praćenja drvenih konstrukcija; praćenje i procjena povijesnih/starih drvenih konstrukcija i praćenje i procjena konstrukcija nedavno izgrađenih kao rezultat značajnog napretka i razvoja u području novih drvenih materijala, drvenih konstrukcija i gradnje drvom u cjelini. Ocjena stanja starih drvenih konstrukcija drugačija je od ocjenjivanja stanja konstrukcija novijeg datuma, npr. drvenih konstrukcija velikih raspona. Dakle, napredak u tehnologiji i zahtjevi održivosti u gradnji za očuvanjem povijesnih građevina (posebice onih s baštinskom vrijednosti) i novih drvenih konstrukcija izazivaju sve veće zanimanje znanstvene i stručne javnosti.

Potreba za ocjenom stanja postojeće konstrukcije može biti temeljena na mnoštvu razloga. Najčešći razlozi su navedeni u [2]: ako su pogreške u periodima planiranja i izgradnje postale poznate; prilikom promjene namjene građevine; u slučaju sumnji u pouzdanost konstrukcije; zbog izvanrednih djelovanja koja su pridonijela oštećenju konstrukcije, vizualnih

oštećenja; zbog neodgovarajuće uporabe konstrukcije; u slučaju uočenih materijalnih i konstrukcijskih nepravilnosti; mozebitnih nestabilnosti sustava te isteku vijeka trajanja građevine. Posljednja desetljeća obilježena su značajnim napretkom materijala na osnovi drva i njihovom uporabom u modernim konstrukcijama, a time se povećala i važnost procjenjivanja stanja drvenih konstrukcija. Vrijeme i troškovi ocjenjivanja stanja opravdani su zadovoljavanjem pouzdanosti, zaštitom kapitalnih ulaganja i zaštite te promocije kulturne i graditeljske baštine. Postoji širok izbor metoda za ocjenu stanja drvene konstrukcije, međutim, njihova učestalost i područje, pristup donošenju odluka glede sigurnosti i potrebnih zahvata daleko su od dogovora u znanstvenoj i stručnoj djelatnosti. COST Akcija FP1101, koja je završila 2015. godine, imala je cilj upozoriti na probleme u drvenim konstrukcijama: ocjenjivanju stanja postojećih konstrukcija, ojačanju, sanacijama i njihovom monitoringu. Materijali proizašli iz Akcije mogu se pronaći na <http://www.costfp1101.eu>, a kao glavni rezultat proizašao iz Akcije je sveobuhvatno i prikupljeno znanje na temu spomenutih problema. Predstavljene su inovativne metode i tehnologije ojačanja i sanacija ostalim građevnim materijalima koje su rijetko u uporabi kod drvenih konstrukcija, uspostavljene su veze između znanstvenih i stručnih pristupa, proširene su i objašnjene metode ocjenjivanja stanja, ojačanja i monitoringa drvenih konstrukcija te je produbljeno znanje putem publikacija i korisnih smjernica [3]. U radu se predstavljaju najvažnije metode ocjenjivanja stanja postojećih drvenih konstrukcija te su prikazane na reprezentativnom primjeru u Hrvatskoj.

2. Vrste konstrukcija i postojeće smjernice

U proteklih nekoliko godina objavljeno je više smjernica kako pristupiti pregledu i održavanju drvenih konstrukcija, međutim, samo je nekoliko europskih država usvojilo dokumente u obliku normativnih obveza [2]. Postoji velik broj metoda i smjernica za ocjenjivanje stanja postojećih drvenih



Slika 1. a) Crkva Borgund Stave (Borgund, Norway) izgrađena između 1180. i 1250. godine (wondermondo.com), b) Unutrašnjost drvene crkve u Jaworu, Poljska, izgrađena 1655. godine

konstrukcija, ali većina ih je usmjerena na točno određene tipove drvenih konstrukcija. Upravo neujednačenost pristupa i smjernica upućuje na hitnu potrebu za usklađivanjem različitih nacionalnih pristupa ocjenjivanju stanja u široko prihvaćen, koherentan i usklađen skup pravila i normi za postojeće drvene konstrukcije koje bi bile dodatak normama za projektiranje novih drvenih konstrukcija. Rad na novim europskim normama za ocjenu stanja i sanaciju postojećih konstrukcija, unutar okvira CEN/TC250 (EC Mandate M/515, 2012) koji će rezultirati novim zasebnim Eurokodom 12, trenutačno je vrlo intenzivan, s posebnim naglaskom na konstrukcije koje imaju baštinsku vrijednost.

Povijesne drvene konstrukcije predstavljaju važan dio svjetske kulturne baštine, a mnoge su od njih još uvijek u uporabi te stoga moraju biti sačuvane kako bi se zaštitila njihova funkcionalnost i očuvala povijesna vrijednost [1]. Najčešća metoda ocjenjivanja stanja postojećih drvenih konstrukcija je kombinacija istraživanja na mjestu gradnje (in-situ) i nerazornih ispitivanja. Vizualni pregled pripomaže u cjelokupnom dojmu stanja konstrukcije, identificira oslabljena i kritična područja i omogućuje informacije o stanju globalne stabilnosti, stanja drvenih elemenata i kritičnih detalja u drvenoj konstrukciji. Mnoge nedestruktivne metode i modeli mogu biti uporabljeni u svrhu ocjenjivanja stanja i mehaničko-fizikalnih svojstava drvene građe, elemenata i detalja, ali sve metode imaju određena ograničenja [1].

Norme za projektiranje i dimenzioniranje postojećih drvenih konstrukcija još uvijek ne postoje, ali se primjenjuju određene smjernice. Sustavni pregled kriterija koji se primjenjuju u ocjenjivanju stanja nosivih drvenih konstrukcija predstavili su Cruz i ostali [4]. Smjernice su rezultat COST Akcije IE0601 i pokrivaju principe i možebitne pristupe za sigurnu ocjenu stanja starih drvenih konstrukcija s povijesnom vrijednosti. Te su smjernice služile pri sastavljanju prijedloga objedinjenog europskog standarda CEN/TC346 (Conservation of Cultural Heritage WG10 Heritage timber) interdisciplinarnе grupe u kojoj sudjeluju osim konstruktora i arhitekti, konzervatori, tehnolozi drva i povjesničari umjetnosti. Suradnja između pojedinih CEN odbora odvija se preko osobe za vezu koja je u oba odbora.

Suautorica članka Prof. V. Rajčić je osoba za vezu, potvrđena od svih zrcalnih Tehničkih odbora EU zemalja, između CEN TC 250/SC5 (Projektiranje drvenih konstrukcija) i CEN TC 346

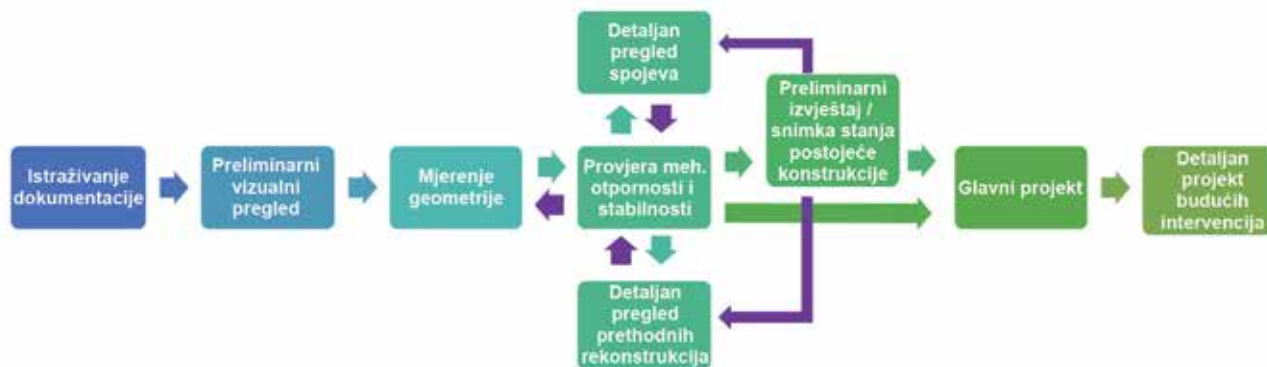
(Očuvanje kulturne baštine) te sudjeluje na izradi prijedloga teksta objedinjenih europskih smjernica pod nazivom "Guidelines for the on-site assessment of historic timber structures" koje su još u fazi izrade. Kad se ocjenjuje stanje drvene konstrukcije, prvi je korak preliminarna procjena stanja (istraživanje povijesne dokumentacije, preliminarni vizualni pregled, mjerenje geometrijskih značajki konstrukcije, provjera mehaničke otpornosti i stabilnosti i preliminarni izvještaj, tj. snimka stanja postojeće konstrukcije), a nakon toga slijedi detaljan pregled materijala (s posebnim naglaskom na vizualnu klasifikaciju građe), konstrukcijskih elemenata i detalja u drvenoj konstrukciji s izradom glavnog projekta i projekta budućih intervencija, slika 2.

3. Metode pregleda i ocjenjivanja stanja drvenih konstrukcija

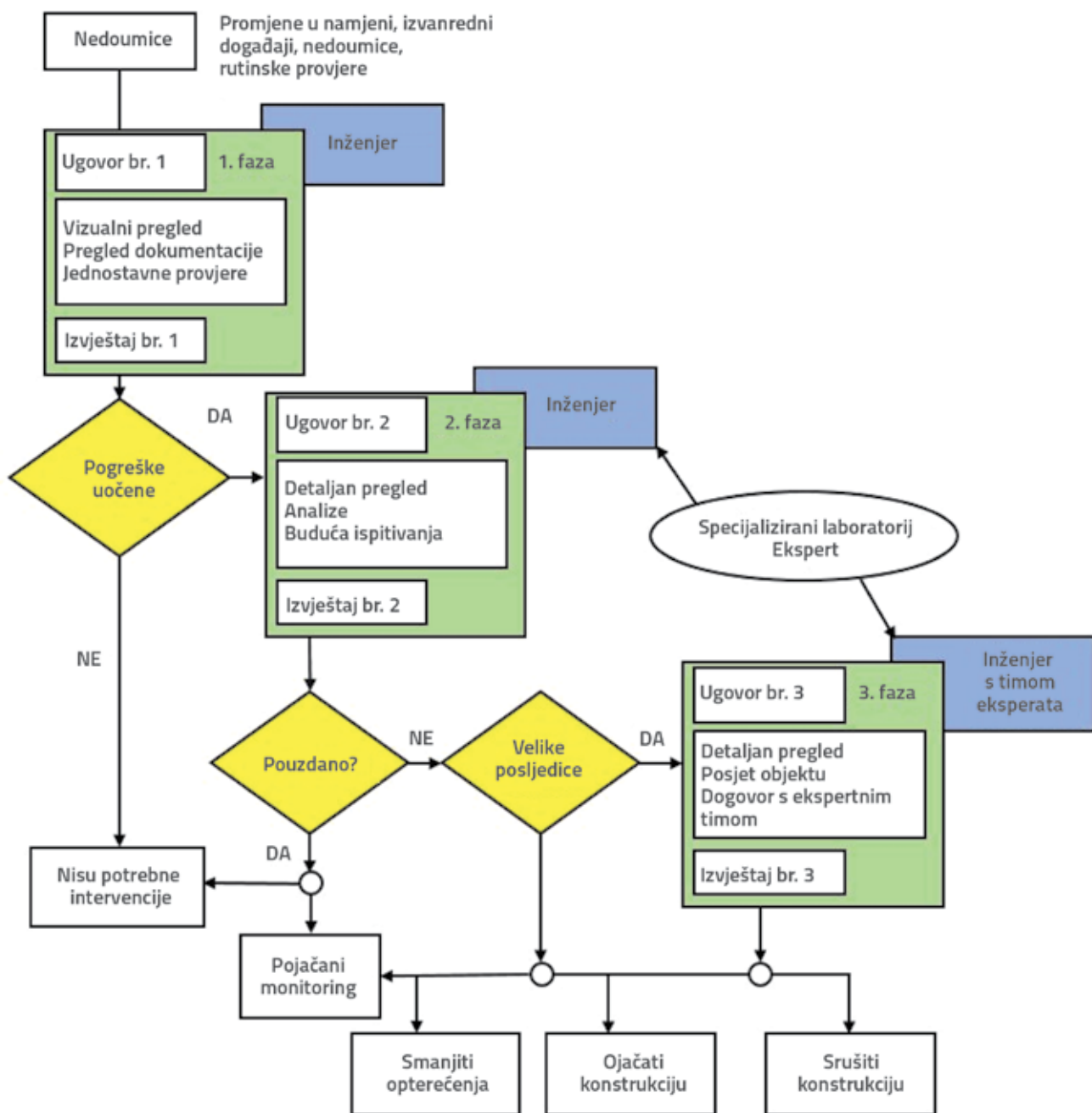
3.1. Općenito

Postoji širok spektar različitih metoda ocjenjivanja stanja postojećih konstrukcija. Metode se razlikuju u načinu pristupa ocjenjivanju stanja i dostupnoj tehnologiji pa tako postoje vibracijske, tehnike propagacije vala inducirane akustičnom pobudom ili udarcem, elektromagnetske, toplinske, radiografske, optičke i metode elektrooptičke i poludestruktivnih metoda za ocjenjivanje stanja drvenih konstrukcija, a najčešće metode i pobliže objasniti. Dietsch i Kreuzinger [2] su prikazali najčešće metode: vizualni pregled, zvučno sondiranje, kartiranje pukotina, mjerenje uvjeta okoliša, mjerenje količine vlage drva, endoskopija, metode otpora prodiranju, metode otpora bušenju, posmični testovi uzoraka, rendgenska i mjerenja ultrazvučnim valovima, dinamički odziv, ispitivanja na inicijalna opterećenja, mjerenje deformacija, pomaka i progiba, mikroskopska i kemijska ispitivanja te ispitivanja u laboratoriju. Tannert i ostali [6, 7] objasnili su nekoliko novih metoda kao što su npr. infracrvena termografija, test ljepila, test otpornosti izvlačenjem vijka za drvo, inicijalna ispitivanja tlačne čvrstoće drva te ispitivanja tvrdoće drva.

Nakon prikupljenih podataka raznim metodama, zadnji korak u ocjenjivanju stanja je uvrstiti prikupljene podatke u probabilističke modele koji se mogu koristiti za procjenu nosivosti i uporabivosti konstrukcije, slika 3.



Slika 2. Koraci potrebni tijekom ocjenjivanja stanja i planiranja zahvata na povijesnim drvenim građevinama [4]



Slika 3. Koraci potrebni za probabilističku ocjenu stanja postojećih konstrukcija [8]

3.2. Vizualni pregled

Najjednostavnija i najčešće upotrebljavana nedestruktivna metoda je naravno vizualni pregled građevine. Prvi korak u ocjenjivanju stanja konstrukcije uvijek bi trebao biti vizualni pregled jer nam daje grube, ali jasne podatke o očiglednim oštećenjima i nepravilnostima kao npr. pukotinama, pretjeranoj truleži, uništenim vlakancima, puzanju i ozbiljnim raspuklinama. Slijede primjeri propadanja i oštećenja drvenih elemenata u drvenim konstrukcijama koji se mogu uočiti vizualnim pregledom:

- a) Loši detalji u konstrukcijskim elementima uzrokovani: lošom odvodnjom, lošim temeljenjem odnosno kontaktom drva sa zemljom ili betonom, uporabom pretankih elemenata koji su skloni propadanju, uporabom tankih drvenih elemenata u kombinaciji sa spojnim sredstvima velikog nominalnog promjera (pucanje drva i pojava raspuklina i pukotina), itd.
- b) Pogreške prilikom izgradnje konstrukcije: izgradnja s građom prevelikog udjela vlage (skupljanje i bubrenje drva), pogrešan izbor spojnih sredstava koja mogu promijeniti statičku shemu konstrukcije, pogreške u lijepljenju elemenata ili korištenje nekompatibilnih ljepila, itd.

- c) Neodgovarajuće promjene originalnog projekta: uklanjanje nosivih elemenata, uklanjanje ili promjena konstrukcije koja je usklađena s potpornom konstrukcijom, modifikacije u temeljima, itd.
- d) Nedostatak održavanja i monitoringa: pukotine, trulež, pojava nestabilnosti, itd.
- e) Fizikalno-kemijske i biološke reakcije uzrokovane uvjetima u okolišu: degradacija i propadanje građe, itd.

Prirodni nedostaci i pogoršanja štetno utječu na mehanička svojstva materijala. Deterioracija prouzročena biološkim napadima uzrokuje smanjenje originalne kvalitete drva, ne samo zbog općenitog smanjenja gustoće već i zbog pojave kemijskih reakcija koje izazivaju truljenje građe [9]. Iako ima brojne prednosti, vizualni pregled ima i dosta ograničenja te se razlikuje zbog pregleda različite detaljnosti, profesionalnosti te osposobljenosti osoblja; problema koji se javljaju zbog teškog pristupa ključnim dijelovima konstrukcije, nasumičnog odabira elemenata te uspostave zaključaka o stanju građe temeljenom na kvaliteti vanjskog sloja drvenog elementa, itd.

3.3. Ultrazvučna ispitivanja

Ultrazvučna ispitivanja i ispitivanja različitim valovima temeljena su na propagaciji ultrazvučnih valova kroz drvo. Testovi se temelje na mjerenju vremena prolaska valova kroz element kako bi se odredila brzina propagacije vala. U ovim istraživanjima koristi se mehanički ili ultrazvučni udar za širenje vala kroz drveni element. Piezoelektrični senzori postavljaju se na dvije karakteristične točke elementa i prikupljaju podatke o prolazećem valu. Vrijeme potrebno za prolazak vala između dva senzora se bilježi i koristi za izračun brzine širenja vala. Dugotrajnije širenje općenito upućuje na prisutnost nedostataka u presjeku, deterioriranom drvu ili drvu manje krutosti ili gustoće. Ispitivanja valovima mogu također biti pod utjecajem drugih čimbenika: udjela vlage u drvu, vrsti drva i orijentaciji godova [9]. Brzina širenja vala je u direktnoj vezi s modulom elastičnosti, ali je primarno u korelaciji s lokalnim nepravilnostima (kvrgama, orijentaciji vlakanca, propadanju presjeka, itd.). Najveća vrijednost mjerene energije predstavlja vrijednost mjenenog akustičnog odgovora drva. Ultrazvučna ispitivanja omogućuju mjerenja dviju ultrazvučnih varijabli u sva tri smjera vlakanca - longitudinalnom, transverzalnog i radijalnog. Nakon izmjerene brzine propagacije longitudinalnog vala vrlo je lako izračunati modul elastičnosti drva ako je poznata njegova gustoća. Dakle, gustoća drva je ključna varijabla koja mora biti poznata ako se koriste ultrazvučna ispitivanja za određivanje dinamičkog modula elastičnosti. Pri projektiranju nam trebaju i točne čvrstoće drva jer se radi o starom drvu koje je s vremenom promijenilo svojstva. Rajčić [11, 12] daje korelacijske izraze između ultrazvučne brzine propagacije u drvenom elementu i ostalih mehaničkih karakteristika, tj. čvrstoća drva dobivenih destruktivnim laboratorijskim ispitivanjima za određene botaničke vrste drva. Korelacijski izrazi u [11 - 13] su dani za prolaz ultrazvučnih valova paralelno i okomito na vlakanca drva, a

proizašli su iz "in situ" ispitivanja vrlo starih drvenih konstrukcija u okviru FP7 projekta "Smart monitoring of historic structures" [13]. U [14] Rajčić daje korelacijske odnose dobivene neuralnom mrežom. Podaci za učenje mreže dobiveni su ispitivanjem na velikom broju uzoraka nedestruktivnim i usporedno destruktivnim metodama u okviru magistarskog rada.

3.4. Mjerenja količine vlage u drvu

Jedan od najvažnijih čimbenika koji utječe na ponašanje i karakteristike drvene građe jest dakako vlažnost same građe. Količina prisutne vode u drvu utječe na težinu, čvrstoću, obradivost, osjetljivost na biološke napade i dimenzijsku stabilnost elemenata. Udio vlage može se odrediti da se masa drva izmjeri u vlažnom stanju i to podijeli s masom drva izmjerenom u suhom stanju te se iskaže u postocima. Dimenzijske promjene uzrokovane promjenama u količini vlage u drvu (skupljanje, bubrenje) različite su za svaku od tri osi (longitudinalna, radijalna i tangencijalna os). Skupljanje i bubrenje su znatno izraženije u radijalnom i tangencijalnom smjeru nego u longitudinalnom smjeru. Procjenjuje se da je više od 80 % problema u drvenim konstrukcijama na neki način povezano s količinom vlage u drvu.

Za mjerenje vlage u drvu najčešće se u uporabi dva osnovna načina: direktni i indirektni. U direktnim mjerenjima količina vlage je određena sušenjem ili izvlačenjem vlage, pri čemu su obje klasificirane kao destruktivne s obzirom na mjerenja *in situ*. Indirektno mjerenje koriste fizičke karakteristike drva koje su u korelaciji s količinom vlage u drvu [5]. Najčešći uređaji za mjerenje vlage temeljeni su na mjerenju električnog otpora. Što je drvo vlažnije, električna otpornost je manja. Takvi vlagomjeri mjere provodljivost između igličastih elektroda koje su utisnute u drveni element i kalibrirane da korisniku osiguraju odgovarajuće vrijednosti udjela vlage. Kod vlagomjera za konstrukcijsko drvo vrlo je bitno da su igličaste elektrode dovoljno dugačke kako bi ušle do polovice poprečnog presjeka drva. Naime, jeftini mjerači vlage za parkete nisu prikladni jer mjere vlagu neposredno uz vanjski sloj elementa, a vrlo se često (pogrešno) koriste u Hrvatskoj.

3.5. Otpornost bušenju (otpornost prolaska igle kroz poprečni presjek)

Za otkrivanje kvalitete poprečnog presjeka i truleži unutar poprečnog presjeka drvenog elementa i određivanje gustoće drva vrlo često se primjenjuju tehnike mjerenja otpora prolaska igle kroz poprečni presjek (eng. *drill-penetration techniques*). Takve metode karakterizirane su kao kvazinedestruktivne jer nakon ispitivanja u drvu ostaje rupa malog promjera (1,5 mm – 3 mm). Uređaji za mjerenje otpora rade pod pretpostavkom da je otpornost na prodiranje u korelaciji s gustoćom materijala. Otpornost se određuje mjerenjem snage koja je potrebna za prodiranje igle kroz materijal. Ispis otpora prodiranju rezultira grafom s kojeg se može očitati kvaliteta poprečnog presjeka drvenog elementa i identificirati lokacije pukotina, raspuklina i propadanja drva unutar poprečnog

presjeka koji nisu oku vidljivi. Zbog kvaziinvazivne prirode ove tehnike i činjenice da ona pruža isključivo lokalno mjerenje gustoće, tu metodu treba primijeniti u kombinaciji s nedestruktivnim metodama primjerice s vizualnom kontrolom i ultrazvučnim ispitivanjima koji daju kvalitativne podatke o drvu.

3.6. Infracrvena termografija

Infracrvena termografija (eng. *Infrared Thermography* - IRT) je nedestruktivna metoda koja je sve češće u uporabi u građevinarstvu, posebice u fazama dijagnostike građevine, preventivnog održavanja ili pri provjerama ishoda intervencija na građevini. Na postojećim konstrukcijama ona omogućuje istraživanje detalja konstrukcije (npr. skrivenih i teško dostupnih dijelova), otkrivanje oštećenja i propadanja materijala (npr. vlage, pukotina, temperature elemenata, mikroklimatskih uvjeta). Prisutnost nevidljivih defekata modificira brzinu difuzije toplinskog širenja. IRT je beskontaktna nedestruktivna metoda koja ima mogućnost snimanja raspodjele površinske temperature i na taj način otkriti detalje o tome što je ispod površine materijala i njihovo toplinsko ponašanje. Iako vizualni pregled površine drva još uvijek ostaje najbolji postupak za detekciju defekata i oštećenja, IRT ima mogućnost daljinskog lociranja područja s visokim rizikom od budućih oštećenja ili za detekciju već oštećenih područja. Aktivni pristup se može primijeniti pri identifikaciji vlažnog drva zbog visoke osjetljivosti na promjene temperature i posljedičnog visokog udjela vode. Općenito govoreći, iako je osjetljivost IRT tehnika zasad lošija od tradicionalnih tehnika, IRT omogućuje lokaliziranje područja s različitim udjelima vlage na brz i apsolutno nedestruktivan način.

3.7. Ostale metode

Kako metode ocjenjivanja stanja i monitoringa dobivaju na popularnosti, novi alati i metode ubrzano se razvijaju i pojavljuju na tržištu. U slučaju drvenih konstrukcija, nekoliko novih nedestruktivnih i poludestruktivnih metoda, različitih po svojoj složenosti i svrsi, pojavilo se na tržištu.

Vizualni pregled je osnovni pristup ocjenjivanju stanja drvenih konstrukcija koji omogućuje identifikaciju vanjskog propadanja drva, mrlja od vlage na vanjskoj površini, vidljivih oštećenja i pogrešaka. Međutim, nedestruktivne optičke metode mogu nadopuniti podatke dobivene vizualnim pregledom [8]. Najčešće optičke metode za uvid u stanje drvenih elemenata su fotogrametrija, termografija, radiografija i rendgenske snimke te mikrovalna tomografija. Tu se ubraja i metoda IRT koja je već objašnjena, a može služiti i za monitoring postojećih konstrukcija uporabom frekvencijskih analiza za određivanje poroznosti drva ili prisutnosti pukotina u prvih nekoliko centimetara poprečnog presjeka [10]. Sažeti prikaz optičkih nedestruktivnih metoda prikladnih za *in situ* mjerenja drvenih konstrukcija, zajedno s prednostima, ograničenjima i preporukama za korištenje dan je u [8].

Za određivanje gustoće drva i povezanih mehaničkih karakteristika te za detekciju truleži osmišljen je novi proizvod Pilodyn 6J Forest. Uređaj prodire u slojeve drva uz pomoć unutrašnje opruge i

baziran je na mjerenjima otpornosti materijala uz mjerenja prodiranja opruge [15]. Yamaguchi i ostali [16] u svojem su radu predstavili metodu za vrednovanje cjelovitosti drvenih elemenata uporabom metode izvlačenja vijka za drvo. Sila izvlačenja vijka za drvo u korelaciji je s nominalnim vrijednostima gustoće i posmične čvrstoće drva sa srednjim odstupanjima od 4,0 do 8,2 %.

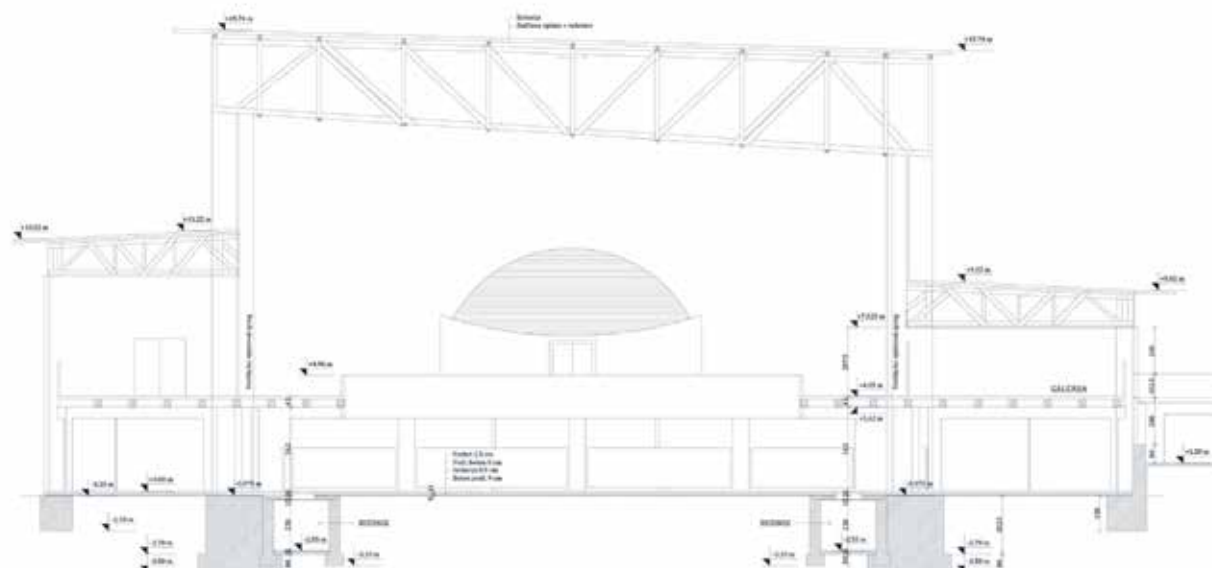
Poznavanje otpornosti loma u drvu je važno za procjenu stvarne nosivosti konstrukcijskih elemenata koji imaju određene nedostatke i/ili geometrijske nepravilnosti. Nekoliko poludestruktivnih metoda je dostupno za procjenu otpornosti loma različitih materijala. Sandak i ostali [17] predložili su novu metodu koja kombinira eksperimentalna rezanja drva za određivanje referentne vrijednosti mehaničkih karakteristika i modernu teoriju mehanike loma koja može imati uporabu u *on line* kontroli konstrukcijskog drva te za ocjenu stanja postojećih drvenih konstrukcija.

4. Primjer iz prakse – Tehnički muzej Nikola Tesla

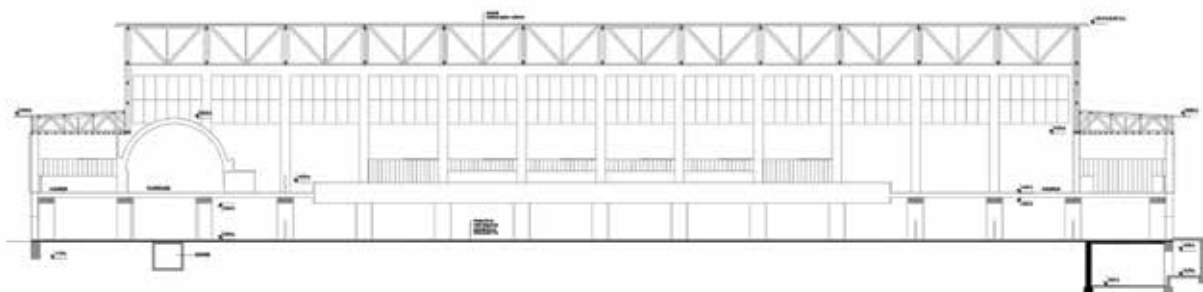
4.1. Konstrukcija i povijest građevine

Tehnički muzej Nikola Tesla jedan je od najposjećenijih muzeja u Zagrebu, ali malo tko zna da je cijela konstrukcija izrađena od drva i kao takva predstavlja rijedak primjer europskog inženjerskog pristupa projektiranju izložbenih hala velikog raspona. Muzej je izgrađen 1949. godine (nakon osam mjeseci gradnje!) kao privremena konstrukcija za namjenu Zagrebačkog velesajma i pod zaštitom je Uprave za zaštitu kulturne baštine Ministarstva kulture Republike Hrvatske. U izgradnju kompleksa utrošeno je: 2800 kubičnih metara tesane građe, 23.000 četvornih metara brodskog poda, 5600 četvornih metara parketa, 1230 tona cementa, 100 tona betonskog željeza, 7000 kubičnih metara šljunka i više od 10.000 raznih spojnih sredstava. Tlocrt glavne zgrade Muzeja koncipiran je kao segment kružnog odsječka. Vanjske dimenzije glavne hale muzeja su 81,27 m (istočna strana) / 87,75 m (zapadna strana) × 25,40 m. Ukupna površina tlocrtne površine prizemlja iznosi 2137 m². Krov glavne hale se sastoji od 13 rešetkastih okvira na razmacima od 6,8 do 7,3 metra. Glavni rešetkasti okviri su povezani s 11 sekundarnih rešetkastih nosača s razmacima od 1,6 do 3 metra (slike 4., 5., 7. i 8.). Najviša točka Muzeja je 19,74 metra. Rešetkasto sastavljeni stupovi glavnih okvira izrađeni su od četiri vertikale međusobno povezane N drvenom ispunom. Uz glavno krovno, Muzej ima i 4 manja kroviša sa svake strane glavne hale. Istočna i zapadna fasada glavne hale djelomično su ostakljene, a južna i sjeverna strana obložene drvenom oblogom. Krov konstrukcije pokriven je krovnom sintetičkom membranom. Globalna stabilizacija krovne konstrukcije riješena je s tri poprečna i četiri uzdužna horizontalna drvena sprega te sa samo dva vertikalna sprega [18].

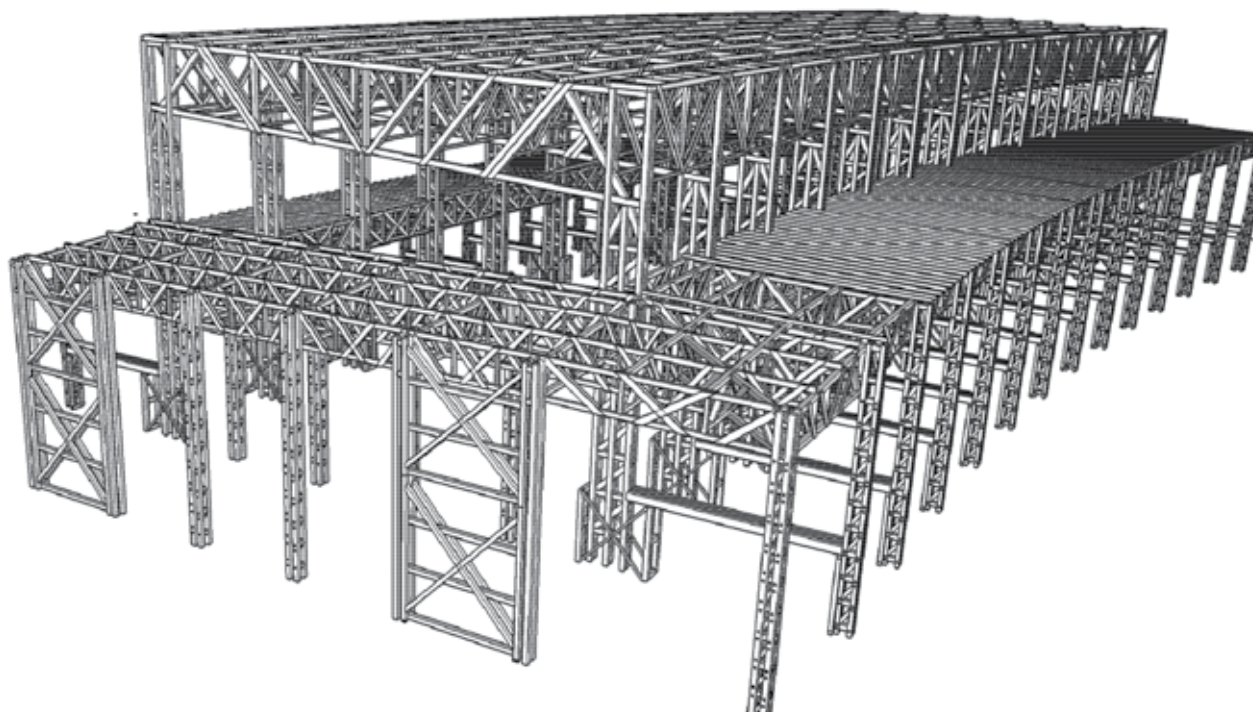
Projekt sanacije Muzeja sastojao se od pregleda i ocjenjivanja stanja postojeće konstrukcije, statičke provjere glavnih nosivih elemenata, popravka i/ili ojačanja konstrukcije i njenih sastavnih dijelova te izrade plana održavanja konstrukcije. Projekt je rađen u razdoblju od 2010. do 2015. godine pod vodstvom prof.dr.sc. Vlatke Rajčić s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i financiran od strane Grada Zagreba.



Slika 4. Poprečni presjek Tehničkog muzeja



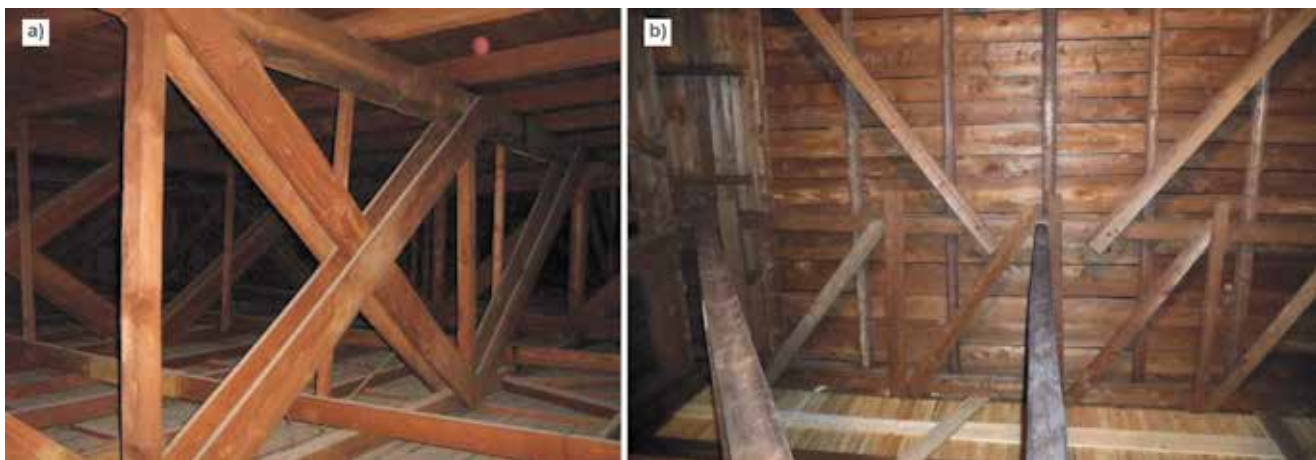
Slika 5. Uzdužni presjek Tehničkog muzeja



Slika 6. 3D model konstrukcije Tehničkog muzeja



Slika 7. Pogled odozdo na južno krovnište Muzeja



Slika 8. a) Uzdužna rešetka glavnog krovništa, b) Pogled odozdo na postojeću krovnu stabilizaciju

4.2. Ocjena stanja postojeće konstrukcije Muzeja

Ocjenjivanje stanja postojeće konstrukcije započelo je preliminarnim vizualnim pregledom i određivanjem stanja i pozicija glavnih nosivih elemenata, mjerenjem poprečnih presjeka elemenata, udaljenostima između elemenata i identifikacijom oštećenja glavne konstrukcije te je napravljen projekt snimke postojećeg stanja konstrukcije. Osnovni vizualni pregled otkrio je postojanje teških oštećenja velikog broja fasadnih i unutrašnjih nosivih stupova u temeljnom detalju (slika 9.). Stupovi zapadne strane Muzeja imaju direktan kontakt

s betonskim temeljima, a propadanje stupova je uzrokovano starim začepljenim odvodnim sustavom koji je uzrokovao stalno izlivanje vode i kontakt stupova s vodom i/ili zemljom. Preliminarna istraživanja su također otkrila ozbiljna oštećenja velikog broja fasadnih stupova istočne strane te unutrašnjih okvirnih stupova glavne hale Muzeja. Oni su također bili dugotrajno izloženi direktnom kontaktu s temeljima i u kontaktu s vodom zbog loše odvodnje, što je prouzročilo značajno propadanje donjeg dijela stupova.

Nakon preliminarnog vizualnog pregleda izrađena je statička analiza konstrukcije kako bi se dobile vrijednosti najopterećenijih



Slika 9. Ozbiljna oštećenja i gubitak nosivosti stupova

elemenata te provjerila stabilnost konstrukcije. Analiza je dokazala da je postojeća stabilizacija sustava neodgovarajuća i nedostatna; npr. u originalnoj konstrukciji stabilizacija krovne konstrukcije uopće nije postojala nego je dodana tek 50 godina kasnije u prvoj sanaciji Muzeja. Stabilizacije vitkih stupova su također bile nedostatne te su kasnijim projektom sanacije dodane na osnovnu konstrukciju. U preliminarnom izvještaju završeni su nacrti konstrukcije, djelomično iz povijesne dokumentacije, a djelomično mjerenjem na samom Muzeju. Identificirani su prioritetni i nužni postupci sanacije te su predložene metode za očuvanje konstrukcije Muzeja. U izvještaju su nabrojani glavni problemi i nedostaci nosive konstrukcije: mjesta bioloških napada drva, izložena i oštećena područja, nestabilnosti sustava, područja velikih naprezanja i lokacije prevelikih deformacija i pomaka. Također, procjena preliminarnih troškova sanacije dana je kao dodatak izvještaju. Idući korak bila je detaljna geometrijska analiza Tehničkog muzeja, detaljni vizualni pregled i nedestruktivna mjerenja mehaničkih karakteristika i količine vlage drvenih elemenata kako bi se dobila ocjena stanja konstrukcije i kvalitete drvenih elemenata, klasifikacija drvene građe te iscrpni pregled tesarskih detalja drvene konstrukcije. Drveni elementi izrađeni su od mekog drva, smreke i jele. Klase uporabljivosti i klase trajanja opterećenja određene su prema HRN EN 1995-1-1 [19] i HRN EN 335 [20]. Različiti dijelovi konstrukcije izloženi su različito relativnoj vlažnosti zraka te su različito opterećeni u smislu trajanja opterećenja. Većina elemenata svrstana je u drugu klasu uporabivosti (relativna vlažnost zraka samo nekoliko tjedana u godini prelazi vrijednost od 85 %, ujednačen udio vlage u drvu ne prelazi 20 % pri temperaturi od 20 °C). Mjerenje udjela vlage u drvenim elementima izrađeno je u karakterističnim elementima. Mjerenja su izrađena posebno za sve elemente za koje se pretpostavilo da imaju rizik od biološkog napada (osim elemenata koji su već bili potpuno truli i izgubili nosivost). Drvena konstrukcija je podijeljena u karakteristične zone/područja i mjerenja količine vlage su izrađena za svaki drveni element koji ima različitu funkciju u nosivosti cijele konstrukcije. Mjerenja su obavljena vlagomjerom tipa VANICEK VIVA 12, digitalnim igličastim mjeračem s ugrađenim elektrodama za precizno mjerenje količine vlage u drvu, u koracima od 0,1 % (slika 10.a). Kao što se i očekivalo, elementi koji su bili bliže razini tla imali su veći udio vlage (od 16 % do 22 %). Krovna konstrukcija prirodno je

provjetravana i elementi su bili vrlo suhi (od 6 % do 12 %). Cijela konstrukcija izrađena je od drva te su različiti elementi svrstani u različite klase trajanja opterećenja u skladu s normama [19]. Tijekom detaljnog pregleda zabilježeni su i mapirani svi biološki napadi, defekti i nedostaci konstrukcije i njenih elemenata, mehanička oštećenja te promjene originalne konstrukcije. Uočena su mnoga oštećenja koja možda nisu ključna za globalnu nosivost, uporabivost i stabilnost sustava, ali koja mogu voditi do lokalnih otkazivanja i oštećenja. U velikom broju elemenata uočene su velike uzdužne pukotine, ali i pukotine u spojevima drvenih elemenata uzrokovane sušenjem drva i/ili uporabom spojnih sredstava prevelikog nominalnog promjera u odnosu na debljinu elemenata koji su se spajali. Vizualni pregled otkrio je i nedopuštenu primarnu torziju velikog broja horizontalnih greda međukatne konstrukcije (slike 11.a i 12.a). Torzija i rotacija elemenata uzrokovana je dugotrajnim deformacijama drvenih elemenata, nepostojanjem sustava za stabilizaciju na svim razinama konstrukcije, imperfekcijama pri izgradnji, gradnjom s drvenim elementima prevelikog udjela vlage, smanjenom krutosti elemenata, itd. Ocjena stanja konstrukcije, međutim, nije pokazala da su opisane imperfekcije toliko razmjera da bi mogle prijetiti mehaničkoj otpornosti i stabilnosti konstrukcije. Klasifikacija drvene građe temeljena je na vizualnom pregledu (vizualna klasifikacija) te na nedestruktivnim mjerenjima fizičkih i mehaničkih karakteristika ultrazvukom i mjerenjem otpora prodiranju igle. Kako je građevina izgrađena 1948. godine, drveni elementi tijekom vremena zbog reoloških fenomena, najviše puzanja, imaju smanjene vrijednosti modula elastičnosti i čvrstoća. Postojeća norma HRN EN 338 [21] za određivanje razreda čvrstoće drva ne odnosi se na određivanje razreda postojećih građevina određenih starosti. Međutim, kako zasad ne postoji norma za postojeće konstrukcije, ti su razredi određeni prema izmjenom modulu elastičnosti i pridruženi su odgovarajućem razredu upravo prema navedenoj normi i [22]. Ultrazvučna ispitivanja rađena su kako bi se dobio modul elastičnosti drvenih elemenata za paralelni i za okomiti smjer u odnosu na smjer pružanja vlaknaca drva. Mjerenja su obavljena uz pomoć ultrazvučnog uređaja Sylvatest DUO (slika 10.c) koji je opremljen sustavom za bilježenje podataka i ima dva pretvornika signala (ujedno i piezoelektrnična senzora). Pretvornici su postavljeni na suprotne strane drvenih elemenata i brzina prolaska ultrazvučnog vala je određena na temelju udaljenosti



Slika 10. a) Mjerenja količine vlage; b) bušenje i mjerenje otpora prodiranja rezistografom; c) ultrazvučna mjerenja



Slika 11. a) Uzdužne raspukline vertikalne rešetke zbog prekoračenja opterećenja; b) Raspukline uzrokovane skupljanjem i bubrenjem drva; c) Detalj s upitnom nosivosti zbog nepravilnog načina oblikovanja ili manjka spojnih sredstava



Slika 12. a) Torzijska rotacija greda međukatne konstrukcije; b) Nepravilna ugradnja čavala

pretvornika. Mjereni modul elastičnosti paralelno s vlakancima varirao je od 5400 do 8220 N/mm², a modul elastičnosti okomito na vlakanca varirao je od 320 do 500 N/mm².

Rezistografska mjerenja (mjerenja otpora prodora igle) provedena su uređajem IML RESI F500-S (slika 10.b), sustavom mjerenja torzijskog otpora i potrebnoj energiji za prodor igle. Istraživanja su provedena i na mjestima gdje cijeli poprečni presjeci nisu bili lako dostupni ili vidljivi, a pokazala su relativno dobro stanje poprečnih presjeka drvenih elemenata na mjestima gdje biološki učinci nisu oštetili poprečni presjek.

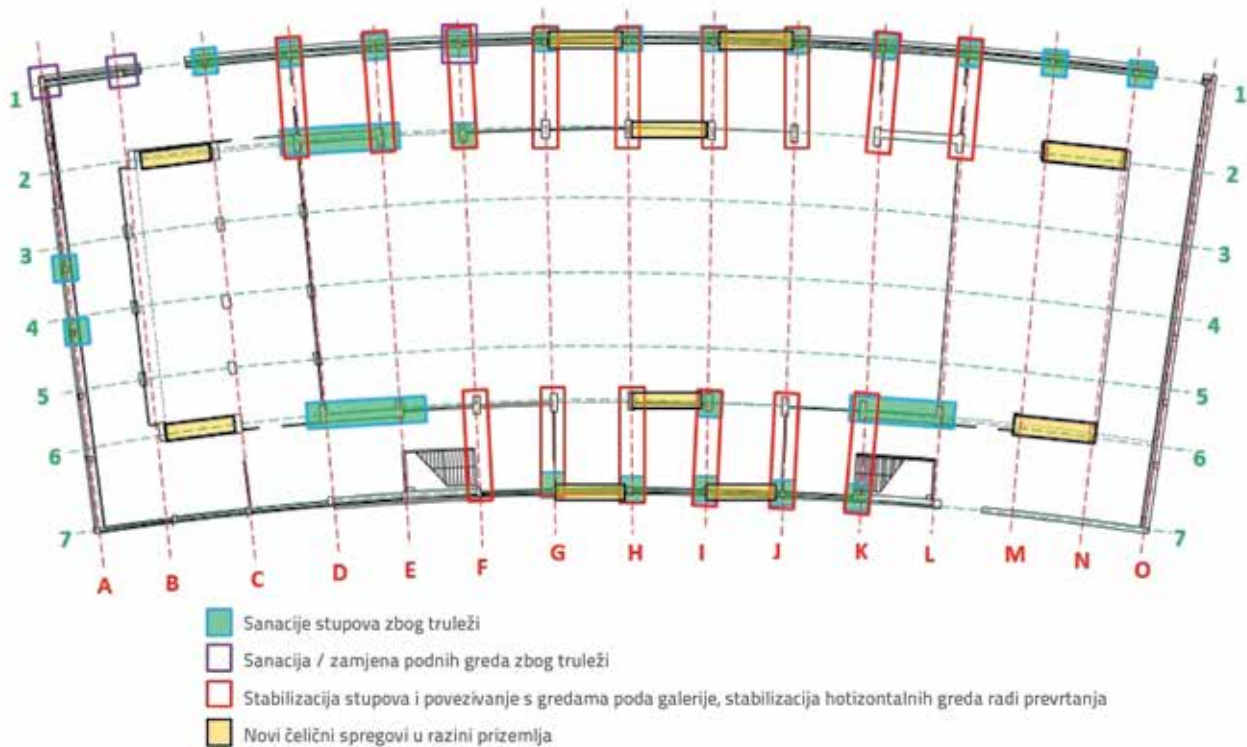
Sukladno vizualnom pregledu, mjerenjima modula elastičnosti ultrazvučnim ispitivanjima, kvaliteti poprečnog presjeka postignutom rezistografom, udjeli vlage i općenitom stanju elemenata, drvo je svrstano u razrede od C16 do C27. Donji dijelovi građevine su većinom svrstani u razred C16, dok je većina ostalih elemenata svrstana u klasu C24, s ponekom iznimkom i klasom C27. Ono što se mora napomenuti, a objašnjeno je i prije u tekstu, razredi čvrstoća za postojeće konstrukcije određene starosti ne postoje u sadašnjim europskim normama.

Zadnji korak u ocjenjivanju stanja konstrukcije odnosio se na iscrpan pregled tesarskih spojeva i detalja spajanja drvenih elemenata. Najčešće uočene pogreške su sljedeće: velik broj spojeva konstrukcije je ili loše prvotno izveden ili je oštećen

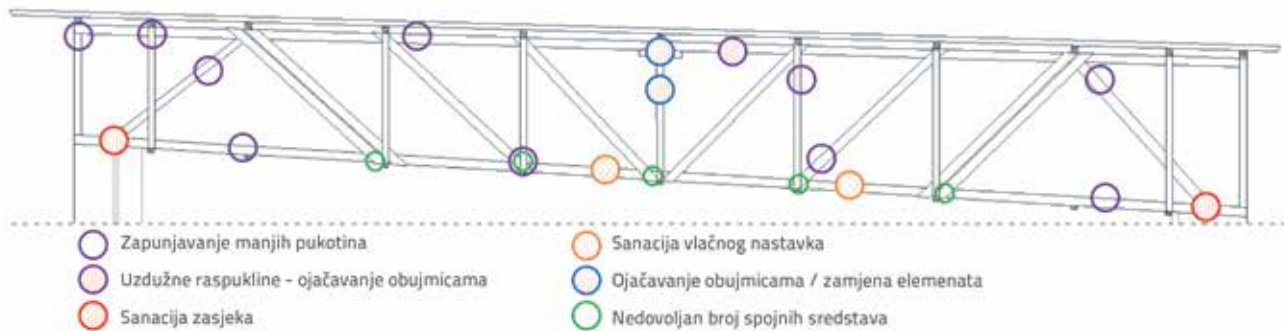
tijekom vremena (slika 11.); određen broj spojeva izrađen je s nepravilnim rasporedom i promjerima spojnih čeličnih sredstava te je njihova nosivost upitna; tesarski spojevi su općenito u dobrom stanju, ali nekima nije dobro predviđen tip opterećenja te ne prenose sile u skladu s predviđenim konceptom; određeni spojevi u vlažnoj zoni rešetkastih nosača imaju premali broj spojnih sredstava; itd. Gotovo sve nepravilnosti uzrokovane su ili nepravilnom prvotnom gradnjom ili promjenama tijekom vremena.

Uočen je i velik broj ostalih pogrešaka kao na primjer neadekvatna montaža i posljedično loš kontakt drvenih elemenata u spojevima, nedovoljan broj štapastih spojnih sredstava (čavli) i/ili nedovoljni razmaci spojnih sredstava u spojevima, pojava ekscentričnosti, korozija spojnih sredstava, gnječenje drva i biološki napadi, itd.

Nakon cjelokupne ocjene stanja postojeće konstrukcije Muzeja dani su prijedlozi i preporuke za sanaciju, rekonstrukciju i/ili ojačanja drvene konstrukcije. Izrađen je detaljni plan i dane smjernice za održavanje i upravljanje Muzejom u pogledu očuvanja konstrukcije. U ovom radu dan je samo kratki osvrt na kompleksnu ocjenu stanja Tehničkog muzeja. Prikazan je i pregled u vezi s primjenom nedestruktivnih metoda za ocjenu rezidualnih mehaničkih karakteristika građe i odabira razreda



Slika 13. Rekonstrukcija dijelova drvene konstrukcije u prizemlju



Slika 14. Rekonstrukcija dijelova krovne drvene konstrukcije glavnog poprečnog nosača

čvrstoće građe koja približno odgovara staroj drvenoj građi za statički proračun. Svi radovi na projektu izvodili su se od 2010. do 2015. godine. Glavni radovi rekonstrukcije i zamjene oštećenih dijelova prizemlja ukratko su prikazani na slici 13., a radovi na krovnoj konstrukciji na slici 14.

5. Zaključak

U radu su predstavljene najčešće upotrebljavane nedestruktivne i poludestruktivne metode pregleda i ocjenjivanja stanja drvenih konstrukcija s posebnim naglaskom na građevinsku baštinu u drvu. Za bolje razumijevanje detaljno je obrađen i primjer ocjenjivanja stanja drvene konstrukcije Tehničkog muzeja Nikola Tesla u Zagrebu.

Trenutačno na tržištu postoje brojne tehnike ocjenjivanja stanja drvenih konstrukcija i predstavljaju obećavajuće metode za

kvantitativnim opisom sadašnjeg stanja elemenata u drvenoj konstrukciji. Spomenuto se odnosi na utvrđivanje vrijednosti kao modula elastičnosti, udjele vlage u drvu i gustoće, lokalizacije nepravilnosti, pukotina i bioloških napada, ali i konstrukcijskih karakteristika poput dinamičkih parametara (mjerenje vlastitih frekvencija i slično).

Iako su se neke metode i uređaji pokazali kao vrlo kvalitetni i potrebni za ocjenu stanja konstrukcije, ima i onih uređaja koji nisu dovoljno pouzdani. Primjer su uređaji koji mjerenjem otpora prodiranja igle za izlazni rezultat trebaju dati kvalitetu poprečnog presjeka i gustoću drvenog elementa. Dok je kvalitativna slika raspodjele gustoće poprečnog presjeka vrlo jasna već pri prvoj uporabi uređaja, točnu brojčanu vrijednost gustoće drvenog elementa vrlo je teško ili nemoguće odrediti iako ju proizvođač jamči kao rezultat mjerenja. Na tržištu postoji širok spektar vlagomjera i ultrazvučnih uređaja za drvo koji

su vrlo svrhoviti. Osnovni problem ultrazvučnih ispitivanja je pregled teško dostupnih elemenata te mogućnost pogrešnih mjerenja modula elastičnosti. Vrlo često se zbog jednostavnosti mjeri samo modul elastičnosti okomito na vlakanca pa se iz dobivenih vrijednosti izračunava modul elastičnosti paralelno na vlakanca prema približnim formulama koje vrijede za novo drvo. To za posljedicu može imati potpuno krive rezultate "važnijeg" modula elastičnosti paralelno s vlaknima, a razlog je ili pogrešan proračun ili lokalizirano mjerenje modula ili degradacija svojstava drva tijekom vremena.

Idući problem ocjenjivanja stanja konstrukcija jest dakako i nedostatak standardiziranih postupaka i europskih normi, što za posljedicu ima i smanjen opseg rekonstrukcija i ojačanja postojećih drvenih konstrukcija [23]. Nove su metode ocjenjivanja stanja i ojačanja drvenih konstrukcija u usponu i predmet su velikog broja istraživanja kako bi se na jednostavniji i precizniji način dobile bitne karakteristike. Novi materijali i

metode su u uporabi u stručnoj praksi te se dobivaju i podaci o kvaliteti i mogućnostima novih uređaja na tržištu. Međutim, sustavne, ujednačene i sveobuhvatne europske norme još uvijek ne postoje [24].

Sustavno opisane smjernice i kriteriji načina ocjenjivanja stanja postojećih drvenih konstrukcija s baštinskom vrijednosti dani su u radu Cruz i ostalih [4]. Cjelovita ocjena postojećeg stanja drvene konstrukcije morala bi sadržavati preliminarnu ocjenu stanja (istraživanje originalne dokumentacije, preliminarne vizualni pregled, osnovno mjerenje geometrije građevine i elemenata, dokaz mehaničke otpornosti i stabilnosti i preliminarne izvještaj, tj. projekt snimke postojećeg stanja) te detaljno istraživanje i pregled drvenih elemenata (s posebnim osvrtom na vizualnu klasifikaciju) i spojeva u drvenoj konstrukciji koji su dio glavnog projekta. Autori ovog članka preporučuju predložene korake pregleda konstrukcije i ocjenjivanja stanja i za sve ostale drvene konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Krause, M., Kurz, J., Lanata, F., Krstevska, L., Cavalli, A.: Needs for further developing monitoring and NDT-methods fir timber structures, *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wroclaw, Poland, pp. 89-99, 2015.
- [2] Dietsch, P., Kreuzinger H.: Guideline on the assessment of timber structures: Summary, *Engineering Structures*, 33 (2011), pp. 2983-2986, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.027>
- [3] D'Ayala, D., Tsakanika, E., Descamps, T., Lanata, F., Kurz, J., Harte, A., Branco, J., Quinn, N.: Interdisciplinary knowledge transfer and technological applications for assessment, strengthening and monitoring of timber structures, *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wroclaw, Poland, pp. 49-60, 2015.
- [4] Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., Lourenco, P.B.: Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures, *International Journal of Architectural Heritage*, 9 (2015), pp. 277-289, <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.774070>
- [5] Franke, B., Widmann, R., Muller, A., Tannert, T.: Assessment and monitoring of the moisture content of timber bridges, *International Conference on Timber Bridges*, Las Vegas, Nevada USA, pp. 1-10, 2013.
- [6] Tannert, T., Anthony, R., Kasal, B., Kloiber, M., Piazza, M., Riggio, M., Rinn, F., Widmann, R., Yamaguchi, N.: In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques, *Materials and Structures*, 47 (2014), pp. 767-785, <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>
- [7] Tannert, T., Kasal, B., Anthony, R.: RILEM TC 215 In-situ assessment of structural timber: Report on activities and application of assessment methods, *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, Trentino, Italy, pp. 642-648, 2010.
- [8] Diamantidis, D.: Probabilistic Assessment of Existing Structures – A publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS), RILEM Publications S.A.R.L., The publishing Company of RILEM 2001
- [9] Piazza, M., Riggio, M.: Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures, *Journal of Building Appraisal*, 3 (2008), pp. 267-296, <https://doi.org/10.1057/jba.2008.4>
- [10] Carpentier, O., Chartier, O., Antczak, E., Descamp, T., van Parys, L.: Active and quantitative infrared thermography using frequential analysis applied to the monitoring of historic timber structures, *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wroclaw, Poland, pp. 61-70, 2015.
- [11] Rajčić, V. et al.: Smart Monitoring of Historic Structures Case study 3: Palazzo Malvezzi, Report of SMooHS European FP7 project, available from <http://www.smoohs.eu/tiki-index.php?page=project%20results:2012-02-14>
- [12] Rajčić, V., Cola, C.: Correlation between destructive and four NDT techniques tests on historic timber elements, *Proceedings of the 1st European Conference of Cultural Heritage Protection*, Berlin, Germany, pp. 148-155, 2012.
- [13] Colla, C. et al.: Laboratory and on-site testing activities part 3 - Historical timber elements, Report of SMooHS European FP7 project, available from <http://www.smoohs.eu/tiki-index.php?page=project%20results:2012-02-14>
- [14] Rajčić, V.: Neural network for wood member classification based on the results from nondestructive testings of wood samples, *Proceedings of the 4th International Conference of Slovenian Society for Nondestructive Testing*, Ljubljana, Slovenija, pp. 59-66, 1997.
- [15] Hasnikova, H., Vidensky, J., Kuklik, P.: Influence of the device structure on the outputs of semi-destructive testing of wood by Pilodyn GJ, *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wroclaw, Poland, pp. 504-513, 2015.
- [16] Yamaguchi, N., Nakao, M.: In-situ Assessment method for timber based on shear strength predicted with screw withdrawals, *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wroclaw, Poland, pp. 569-578, 2015.

- [17] Sandak, J., Orłowski, K., Ochrymiuk, T., Sandak, A., Riggio, M.: An alternative way of determining mechanical properties of wood by measuring cutting force, *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wrocław, Poland, pp. 543-552, 2015.
- [18] Rajčić, V., Čizmar, D., Stepinac, M.: Reconstruction of the Technical Museum in Zagreb, *Advanced material Research*, 778, pp. 919-926, 2013.
- [19] HRN EN 1995-1-1, Projektiranje drvenih konstrukcija, Dio 1-1: Općenito – Opća pravila i pravila za zgrade, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [20] HRN EN 335, Trajnost drva i proizvoda na osnovi drva - Upotreba razreda: definicije, primjena na cjelovito drvo i ploče na osnovi drva, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2013.
- [21] HRN EN 338, Konstrukcijsko drvo - Razredi čvrstoće, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2009.
- [22] Rajčić, V., Bjelanović, A.: Razredba drvne građe, *GRAĐEVINAR*, 57 (2005) 10, pp. 779-784.
- [23] Steiger, R., Kohler, J.: Development of new Swiss standards for the assessment of existing load-bearing structures, *Proceedings of the 4th meeting of CIB-W18*, Andrews, Canada, pp. 1-15, 2008.
- [24] Harte, A., Jockwer, R., Stepinac, M., Descamps, T., Rajčić, V., Dietsch, P.: Reinforcement of timber structures – the route to standardisation, *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wrocław, Poland, pp. 78-89, 2015.