Nedestruktivne metode ispitivanja i procjene stanja drva

Maglić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:117394

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU – FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE

DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ DRVNA TEHNOLOGIJA

LUKA MAGLIĆ

NEDESTRUKTIVNE METODE ISPITIVANJA I PROCJENE STANJA DRVA

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB 2022

Podaci o završnom radu

AUTOR	Luka Maglić 06.07.1996., Zagreb JMBAG: 0068227242
NASLOV	NEDESTRUKTIVNE METODE ISPITIVANJA I PROCJENE STANJA DRVA
PREDMET	TEHNOLOŠKA SVOJSTVA DRVA
MENTOR	doc.dr.sc. Tomislav Sedlar
KOMENTOR	doc.dr.sc. Kristijan Radmanović
RAD JE IZRAĐEN	Sveučilište u Zagrebu – Šumarski fakultet Zavod za znanost o drvu
AKADEMSKA GODINA	2021./2022.
DATUM OBRANE	09.09.2022.
RAD SADRŽI	28 stranica 20 slika 8 grafičkih prikaza 5 navoda literature
SAŽETAK	U području ispitivanja svojstava drva sve češće se koriste nedestruktivne metode. Za razliku od normiranih, najčešće potpuno destruktivnih metoda, kojima se drvo izlaže velikim i totalnim opterećenjima do loma, nedestruktivne metode omogućuju ispitivanje drva bez velikog narušavanja njegove strukture. Takve metode koriste se, kako u dubećim stablima, tako i u različitim proizvodima, odnosno građevnim elementima od drva. U ovome radu će se dati presjek nedestruktivnih metoda koje su danas dostupne, te mjernih uređaja kojima se drvo ispituje i procijenjuje njegovo stanje.

	IZJAVA **O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**	**OB FŠDT 05 07**
		Revizija: 2
		Datum: 29.04.2021.

„Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.“

U Zagrebu, 09.09.2022. godine

_____

vlastoručni potpis

Luka Maglić

Sadržaj

1. UVOD 1
2. CILJ RADA 3
3. METODA VIZUALNE PROCJENE STANJA POSTOJEĆIH DRVENIH KONSTRUKCIJA 4
4. DENDROKRONOLOGIJA I ISPITIVANJE STANJA DRVA 6
5. TOMOGRAFIJA 7
5.1. Princip metode 7
6. RADIOGRAFIJA 10
6.1. Princip metode 10
7. OTPOR NA BUŠENJE 11
7.1. Opis uređaja 11
8. MALO DESTRUKTIVNA METODA ISPITIVANJA TLAČNOG I VLAČNOG NAPREZANJA KOD POVIJESNIH GRAĐEVINA 13
9. BUŠENJE JEZGRE 14
9.1. Princip metode 14
9.2. Opis uređaja 14
9.3 Eksperiment 16
9.4. Rezultati 16
10. METODA IZVLAČENJA VIJAKA 18
10.1. Opis uređaja 18
11. METODA ISPITIVANJA TVRDOĆE 20
11.1. Metoda po Brinellu 20
11.2. Metoda po Monninu 21
11.3. Metoda po Janki 22
12. ISPITIVANJE SVOJSTAVA POVIJESNOG DRVA NA LICU MJESTA 24
12.1. LOAD-JACKING METODA 24
12.1.2. Opis uređaja i princip rada 24
12.2. PENETRACIJA PINOVIMA – IGLAMA 26
12.2.1. Opis uređaja i princip rada 26
ZAKLJUČAK 28
LITERATURA 29

Popis slika

Slika 1. Prikaz pretvornika i pozicioniranja pinova kod ispitivanja u radijalnom smjeru (lijevo) i tangentnom smjeru (desno), (Bucur, 2011.)

Slika 2. Prikaz brzine kretanja zvuka u radijalnom smjeru (Bucur, 2011.)

Slika 3. prikaz brzine kretanja zvuka u longitudinalnom smjeru (Bucur, 2011.)

Slika 4. Usporedba rezultata na istom uzorku (Bucur,2011)

Slika 5. Shematski prikaz principa rada (B. Kasal,)

Slika 6. Prikaz uređaja za ispisivanje grafičkog prikaza u pisanom obliku

Slika 7. prikaz odnosa dobivenih rezultata na istom uzorku

Slika 8. Svrdlo za uzimanje uzoraka (Kasal, 2003.), vanjski promjer 9,5mm, unutarnji promjer 5mm

Slika 9. Shematski prikaz kidalice za uzorke dobivene metodom bušenja jezgre (Kasal, 2003.)

Slika 10. Kidalica za uzorke dobivene metodom bušenja jezgre (Kasal.2003.)

Slika 11. grafički prikaz usporedbe standardnih uzoraka i uzoraka dobivenih bušenjem (Kasal,2003.)

Slika 12. Prikaz dva tipa uređaja za izvlačenje vijaka

Slika 13. grafički prikaz rezultata dobivenih metodom izvlačenja vijaka u radijalnom, tangentnom i longitudinalnom smjeru

Slika 14. Shematski prikaz Monninovog testa tvrdoće

Slika 15. Prikaz Turrinijeva i Piazzova uređaja za ispitivanje tvrdoće

Slika 16. Prikaz otiska u provrtu prilikom ispitivanja (lijevo) grafički prikaz dobivenih rezultata prilikom ispitivanja (desno)

Slika 17. shematski prikaz uređaja za load-jacking metodu

Slika 18. Shematski prikaz uređaja za penetraciju pinovima

Slika 19. Prikaz uređaja za penetraciju pinovima

Slika 20. Prikaz grafičkog rezultata ispitivanja

1. UVOD

Etika očuvanja i manjak materijala potiču interes za ponovnu uporabu drvnih proizvoda iz srušenih zgrada pa čak i ponovno korištenje cijelih zgrada. Kao i već postojeće proizvode, procijeniti se moraju i zasađena stabla u šumama te u urbanim dijelovima poput stabala pored pješačkih staza i prometnica. Za neke od navedenih, već se odavno provode razna analiziranja kako bi se pronašla eventualna pogreška gotovog proizvoda ili još zasađenog stabla, no uz stalni razvoj tehnologije te potrebe za produljenjem vijeka trajanja drvnog proizvoda, rade se istraživanja u svrhu napretka i što većeg očuvanja proizvoda. Očuvanje je najizglednije pomoću metoda koje ne razaraju u drvo, već pomoću minimalnih prodiranja u površinu pomoću najnovije tehnologije analize podataka daju pouzdane informacije o stanju ispitanog uzorka.

Metode ispitivanja drvenih konstrukcija mogu podijeliti u tri vrste:

- Destruktivna (destructive)
- Malo destruktivna (SDT-semidestructive)
- Nedestruktivna (NDT-nondestructive).

Osnovnu razliku u podjeli gore navedenih metoda moguće je definirati krajnjim stanjem testiranog uzorka. Kod destruktivnih metoda uzorci se testiraju do krajnje granice, ispituje se čvrstoća na tlak, čvrstoća na vlak i savojna čvrstoća. Dolazi do maksimalnog naprezanja i na kraju do pucanja nakon čega uzorak drva više nije moguće koristiti. Kod ne destruktivnih metoda uzorak je moguće koristiti, na primjer, nakon ispitivanja svojstava lamelirane grede ona se može koristiti i moguće ju je ugraditi u konstrukciju.

Drvene konstrukcijske elemente karakterizira velika nosivost i krutost u odnosu na vlastitu relativno malu težinu. Kao prirodni materijal, drvo je vrlo osjetljivo na vlagu i oštećenja biološkim agensima, a karakterizira ga nedostatak homogenosti.

Najčešći nedostaci konstrukcijskog drvenog elementa uključuju:

- Nedostatke u materijalu – kut žice, kvrge , urasle grane
- Nedostatke zbog utjecaja gljivica - mrlje i truleži (bijela trulež, smeđa trulež)
- Nedostatke zbog utjecaja insekata

- Defekte zbog preopterećenja - pukotine u drvetu, konstrukcijski kvar članova i spojeva, prekomjerni otklon

Važno je napomenuti da osim nedostatka homogenosti, u slučaju povijesnih drvenih građevina niz dodatnih čimbenika utječe na mehaničko svojstva drva, tj. na promjene vlage, promjene temperature, utjecaj bioloških agenasa i trajanje uporabe konstrukcije.

2. CILJ RADA

Porastom svijesti o očuvanju i zaštiti okoliša u području ispitivanja svojstava drva sve češće se koriste nedestruktivne metode kako bi se povećala iskoristivost drvnih sirovina u industriji kojih je sve manje. Za razliku od normiranih, najčešće potpuno destruktivnih metoda, kojom se drvo izlaže velikim i totalnim opterećenjima do loma nedestruktivne metode omogućuju ispitivanje drva bez velikog narušavanja njegove strukture. Takve metode iako nisu normirane i u fazi su istraživanja za drvnu sirovinu, koriste se u dubećim stablima, prilikom ispitivanja zdravosti debla.

U ovom radu će se dati presjek dijela nedestruktivnih metoda koje su danas dostupne i koriste se prilikom ispitivanja sirovine, mjernih uređaja kojima se drvo ispituje i procjenjuje njegovo stanje, te analiza radnje usmjerene na očuvanju i ojačavanju povijesnih drvenih konstrukcija.

Neke od metoda koje će biti obrađene kroz ovaj rad su:

1. Metoda vizualne procjene drvne konstrukcije
2. Metoda dendrokronološke procjene drvne konstrukcije
3. Nedestruktivna metoda
    - Tomografijom
    - Infracrvenim zračenjem
    - Akustično ultrazvučnom tehnologijom
4. Malo destruktivnom metodom
    - Bušenjem
    - Sondiranjem
    - Izvlačenjem vijaka i čavla
5. Metoda određivanja razlika u dinamičkom modulu elastičnosti pomoću tri vibracijske metode

3. METODA VIZUALNE PROCJENE STANJA POSTOJEĆIH DRVENIH KONSTRUKCIJA

Kroz zadanu literaturu vidljivo je da se metode ispitivanja razlikuju ovisno o državama te da za pojedine metode postoji nekoliko izvedbi uređaja.

Istraživanja na licu mjesta („in situ“) koja se usredotočuju na povijesne drvene strukture trebala bi se fokusirati isključivo na prepoznavanje nedostataka i lokaliziranje diskontinuiteta u materijalima. Proces procjene strukture svodi se na tri osnovne faze.

Prva faza je preliminarna evaluacija čija je svrha otklanjanje postojećih dvojbi i stvara temelj drugoj fazi. Izvršava se na način da se vrši vizualni pregled radi utvrđivanja rizika i oštećenja konstrukcije, pregled postojeće dokumentacije (crteža, proračuna, šifri i slično) i dopuna dokumentacije (približna statička procjena i pismeno izvješće).

Druga faza je opća istraga. Njena je svrha detaljna istraga i proračun u slučaju promjena sila, opterećenja i statike te razmatranje mogućnosti urušavanja. Odluka o slijedećim koracima donosi se ovisno o izvješću druge faze, a može doći i do ograničenja korištenja, pojačanog praćenja (nadzora), rušenja objekta ili preporuke detaljnijeg istraživanja.

Treća faza je faza detaljne istrage. Do nje dolazi u slučaju velikih opasnosti od posljedica urušavanja. Tim stručnjaka provodi detaljnu istragu na osnovu podataka iz prve i druge faze te ako je potrebno mogu izvršiti dodatna ispitivanja i analize.

Cilj svake procjene je otkriti i definirati stvarnu razinu štete, utvrditi razlog štete i riješiti problem. U osnovi se sve temelji na vizualnom pregledu i uz pomoć nedestruktivnih ili malo destruktivnih metoda.

Metode određivanja svojstava drva su metode koje mogu biti destruktivne ili malo destruktivne. Ispitivanje gustoće drva vrši se bušenje jezgre, otpor pri bušenju, otpor pri prodiranju u drvo i otpor na izvlačenje, ispitivanje napetosti/tlaka- laboratorijsko ispitivanje ili test opterećenjem Ispitivanje na smik ispitivanje smičnog naprezanje na uzorcima srži Ispitivanje modula elastičnosti- dinamička naprezanja, ultrazvučna naprezanja i sl.

Metode procjene su nedestruktivne i uglavnom se baziraju na vizualnom pregledu. Dokumentiranje, vizualna procjena, tapping metoda (zvučna analiza), kartiranje pukotina, ispitivanje atmosferskih čimbenika, ispitivanje sadržaja vode u drvu, endoskopija, otpornost na bušenje, izvlačenje i penetraciju, metoda bušenja jezgre ispitivanje smika na uzorcima srži, RTG metoda.

Osnovna mjerila pri donošenju odluka su rezultati dobiveni prilikom ispitivanja svojstava, a to su: mjerenje naprezanja i opterećenja, mikroskopske i makroskopske laboratorijske metode, čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti. Ove metode su destruktivne i vrše se na standardiziranim uzorcima. Uz navedene metode vrši se i ispitivanje gustoće.

Na temelju usporedbe gustoće, električne vodljivosti, vlažnosti i ostalih već poznatih svojstava za pojedinu vrstu drva, s podacima dobivenim nedestruktivnim metodama određuje se stanje drva.

4. DENDROKRONOLOGIJA I ISPITIVANJE STANJA DRVA

Dendrokronologija je znanstvena metoda koja se koristi za datiranje prirodnih značajki, strukturne baštine te arheološki nalazi koji sadrže drvo. Dendrokronološka ispitivanja imaju važnu ulogu u tehničkom ocjenjivanju stanja konstrukcije. Temelje se na analizi godišnjeg prirasta čija širina ovisi uglavnom o okolišu i uvjetima koji su vladali u određeno vrijeme.

Godišnji rast stvara niz koji varira u debljini (u godinama u kojima su okolišni uvjeti povoljni za određenu vrstu, tj. god je širi). Usporedbe sličnosti u drvetu u analiziranim uzorcima koji dolaze iz jedne populacije omogućilo određivanje slijeda šireg i užeg goda drveća. Drugim riječima identificiranje zajedničkog uzorka rasta.

Slažući uzorke, počevši od onih najstarijih, dendrokronolozi su razradili dendrokronološku skalu koji daju referencu za određene geografske regije i vrste drveća. Starost uzorka sa stabla može se odrediti usklađivanjem njegovog uzorka goda sa datiranog uzorka

Primjena dendrokronoloških metoda zahtijeva da drvo ispunjava niz uvjeta. Između ostalih uvjeta, važno je da uzorak koji treba analizirati ima anatomski različite godove i da stabla koja se analiziraju dolaze sa šireg geografskog područja. Hrast je primjer vrste podložan dendrokronološkom ispitivanju i ispunjava sve potrebne uvjete.

Dendrokronološka istraživanja koriste se za određivanje starosti povijesne građevine, za identifikaciju različitih građevinskih faza građevine koja se istražuje te za otkrivanje prošlih intervencija obnove, popravaka i konzervacije.

Otpornost na bušenje može se koristiti za generiranje prikaza godišnjeg rasta goda. Ono omogućuje određivanje starosti drva koje se ispituje.

Danas postoje mnoge nove tehnike za mjerenje strukturnih, fizičkih i kemijskih svojstava drva pri visokoj radijalnoj razlučivosti. Neke od njih su: SliviScanTM, rendgenski denzitomski ispitivač, infracrvenu spektroskopiju, kompjuteriziranu tomografiju, optičku i zvučno skeniranje.

Uređaji za mjerenje otpora bušenja također su učinkoviti u procjeni zdravlja i tehničkog stanja drva. Oni omogućuju procjenu unutarnje strukture drva, omogućujući lokalizaciju i određivanje opsega nedostataka koji prijete njegovoj stabilnosti kao što su trulež, pukotine, mehanička oštećenja i slično.

Statička mjerenja stabla pružaju sredstvo za predviđanje prijetnji i suzbijanje mogućih utjecaja oštećenih dijelova presjeka drva. (Voichita Bucur, 2011.)

5. TOMOGRAFIJA

Tomografija je metoda koja se već dulji niz godina koristi prilikom ispitivanja dubećih stabala. Temelji se na brzini širenja ultrazvučnih valova. Cilj je utvrditi ima li u deblu truleži ili unutarnjih oštećenja koja nisu uočljiva. Na taj način se uklanja opasnost od pada stabla u gradovima i parkovima, smanjuje se mogućnost štete i opasnosti od ozljeda prolaznika. Ova metoda se proširila i u drvnoj industriji. Pomoću tomografije moguće je ispitati kvalitetu trupaca i sortirati ih po kvaliteti. Pomoću brzine kretanja valova, kroz trupac se sortiraju trupci visoke kvalitete za proizvodnju furnira. Na taj način se odabiru trupci za proizvodnju glazbenih instrumenata.

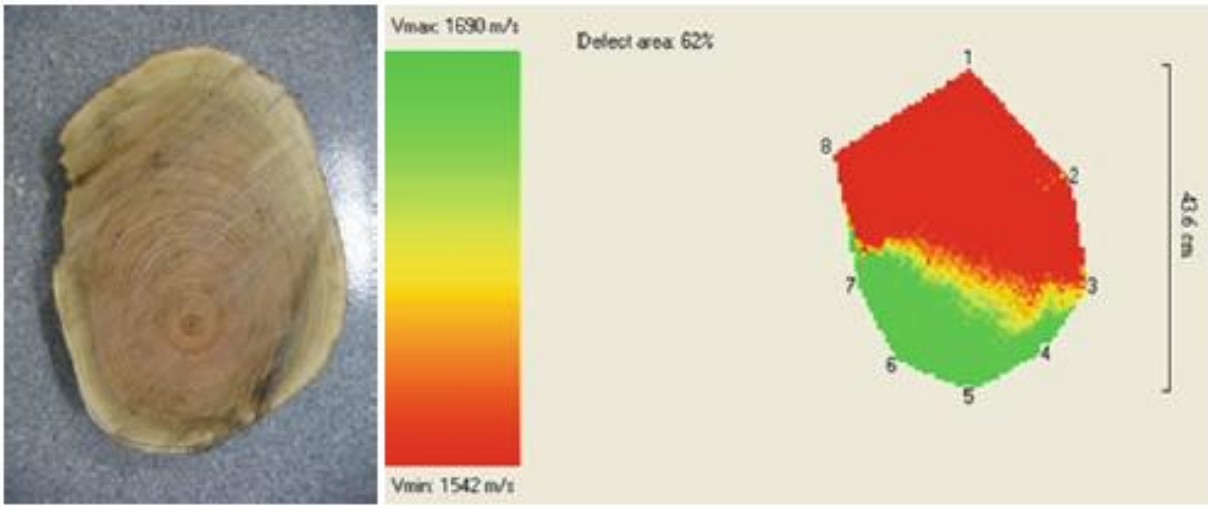
Slika 1. Prikaz pretvornika i pozicioniranja pinova kod ispitivanja u radijalnom smjeru (lijevo) i tangentnom smjeru (desno), (Bucur, 2011.)

5.1. Princip metode

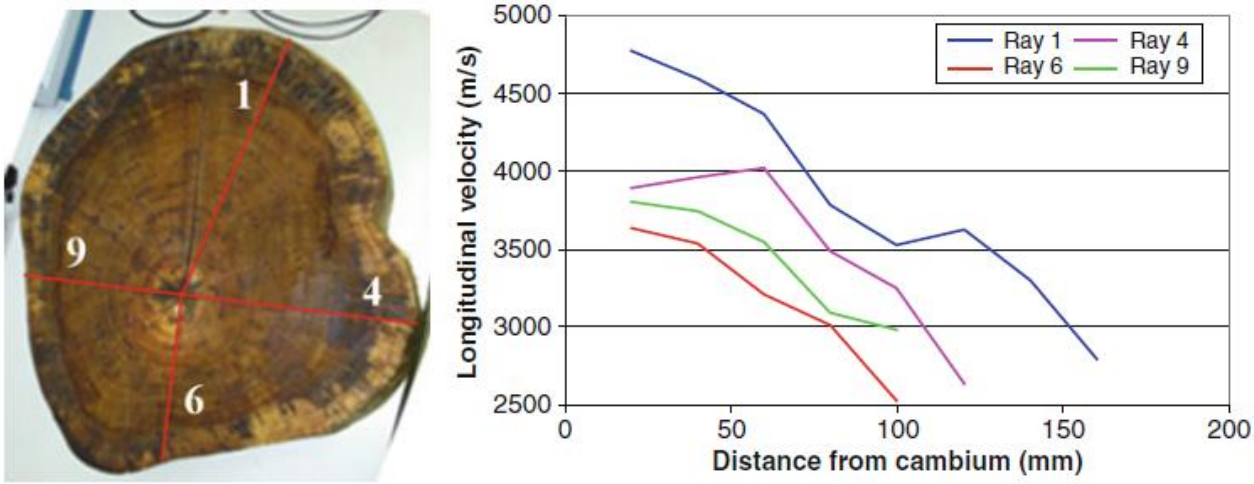
Metoda ultrazvučnih valova je razvijena s ciljem detektiranja i lociranja tenzijskog drva. Akustična tomografija omogućava grafičku rekonstrukciju raspodjele brzine ultrazvučnih valova koji se šire na području dijela drva koji se ispituje. U uzorak se zabiju pinovi s pretvaračima koji su povezani na uređaj koji ulazni signal pretvara u grafički prikaz. Udarac čekića uzrokuje zvučne valove koji se bilježe u određenim vremenskim intervalima. Računalo kroz razne grafičke prikaze pruža informaciju o brzini zvuka kroz ispitani uzorak. U ovom

slučaju ispitivalo se tenzijsko drvo, Kod radijalnog ispitivanja najveća brzina iznosila je 1690 m/s, a kod tangentnog najveća brzina je iznosila oko 4700 m/s.

U slučaju ispitivanja drvenih konstrukcija koje u unutrašnjosti potencijalno mogu biti potpuno trule, rezultati bi bili drastično drugačiji jer u slučaju potpunog raspadanja unutrašnjosti grede brzina bi iznosila oko 300 do 400 m/s.

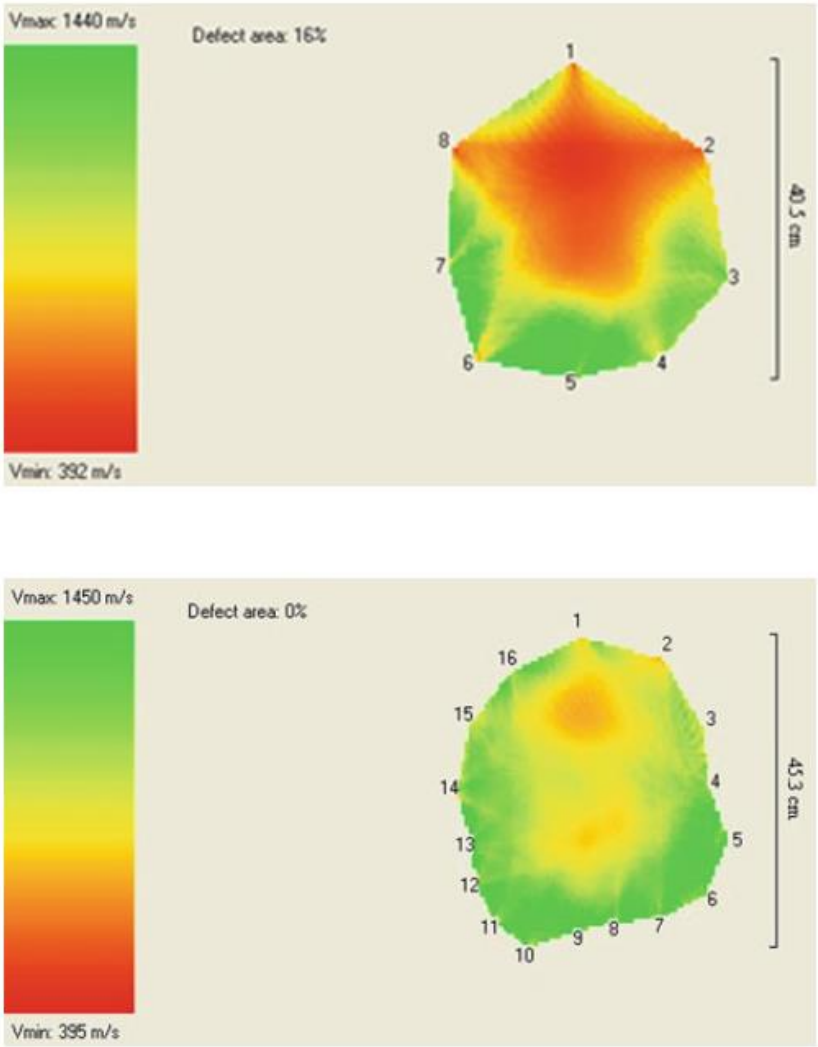


Slika 2. Prikaz brzine kretanja zvuka u radijalnom smjeru (Bucur, 2011.)



Slika 3. Prikaz brzine kretanja zvuka u longitudinalnom smjeru (Bucur, 2011.)

Analizom dobivenih rezultata možemo zaključiti da osim gustoće veliku ulogu ima i smjer vlakanaca. Slika 2. prikazuje nižu brzinu kretanja zvuka u radijalnom tenzijskom drvu za razliku od ostatka presjeka. Na slici 3. je zbog smjera rezultat potpuno suprotan.



Slika 4. Usporedba rezultata na istom uzorku (Bucur,2011)

Slika 4. prikazuje isti uzorak kod kojeg se brzina zvuka ispitivala u radijalnom smjeru. Gledamo li samo brzinu razlika iznosi oko 10 m/s, ali ako usporedimo područje odstupanja koje ima drastično nižu brzinu (crveno) zaključili bismo da se uopće ne radi o istom uzorku.

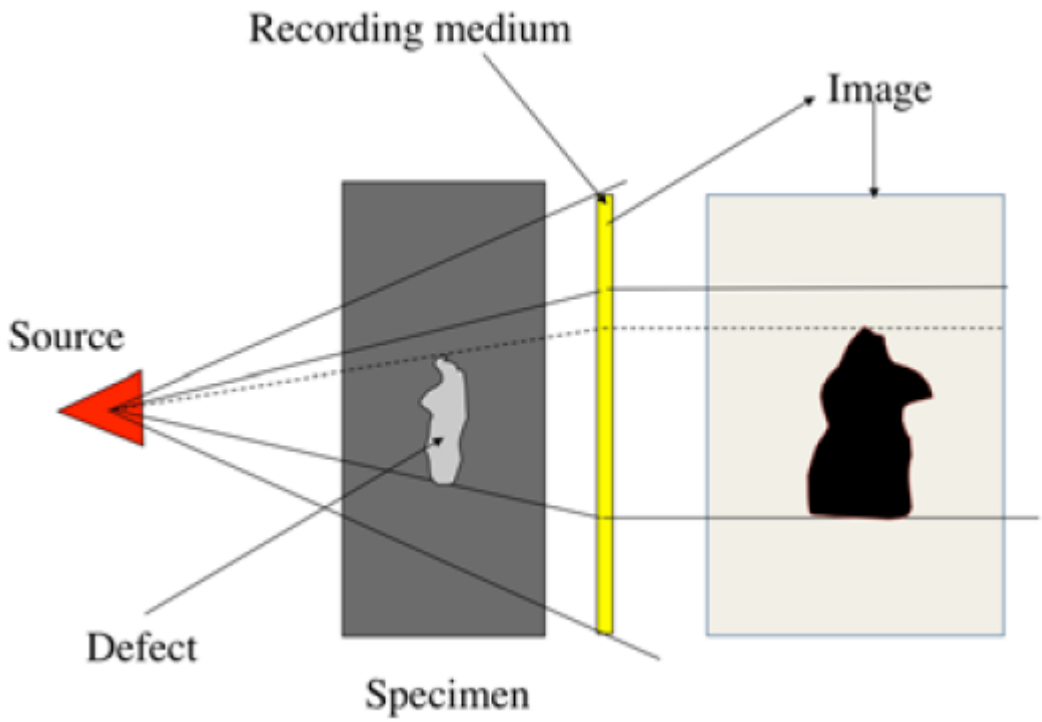
Akustična tomografija je brza, pouzdana, sigurna metoda čiji postupak provedbe nije skup. Što veći broj pretvornika koristimo prilikom ispitivanja uzoraka imamo točniju sliku i pouzdaniju informaciju o stvarnom stanju. (Voichita Bucur, 2011.)

6. RADIOGRAFIJA

Ova metoda dolazi od laboratorijskih testiranja i primjenjiva je kao metoda na licu mjesta (in-situ). Koristi se nisko energetskim gama X-zrakama. Zbog niskih svojstava prigušivanja, drvo i ostali materijali se lako podvrgavaju ovoj metodi testiranja. Osnovni parametri su: vrijeme izlaganja, razina energije i udaljenost između izvora energije, testiranog objekta i slikovne površine. Ako su svi parametri precizno podešeni moguće je odrediti zonu kasnog i ranog drva. Također je moguće odrediti dimenzije unutrašnjih oštećenja, deformacije i naprezanja.

6.1. Princip metode

Radiografija koristi radijaciju koja penetrira u strukturu uzorka. Uzorci koji se ispituju ovom metodom upijaju različite količine radijacije, ovisno o gustoći i debljini materijala. Suprotno od izvora radijacije iza uzorka koji se ispituje, nalazi se film koji je osjetljiv na radijaciju koji emitira sliku. Ova metoda pruža mogućnost neinvazivnog intenzivnog ispitivanja struktura koje su od velike kulturne i povijesne važnosti. Moguće je otkriti nedostatke i oštećenja, zaostale metale i slično. (Bohumil Kasal, 2003)



Slika 5. Shematski prikaz principa rada (B. Kasal,2003.)

7. OTPOR NA BUŠENJE

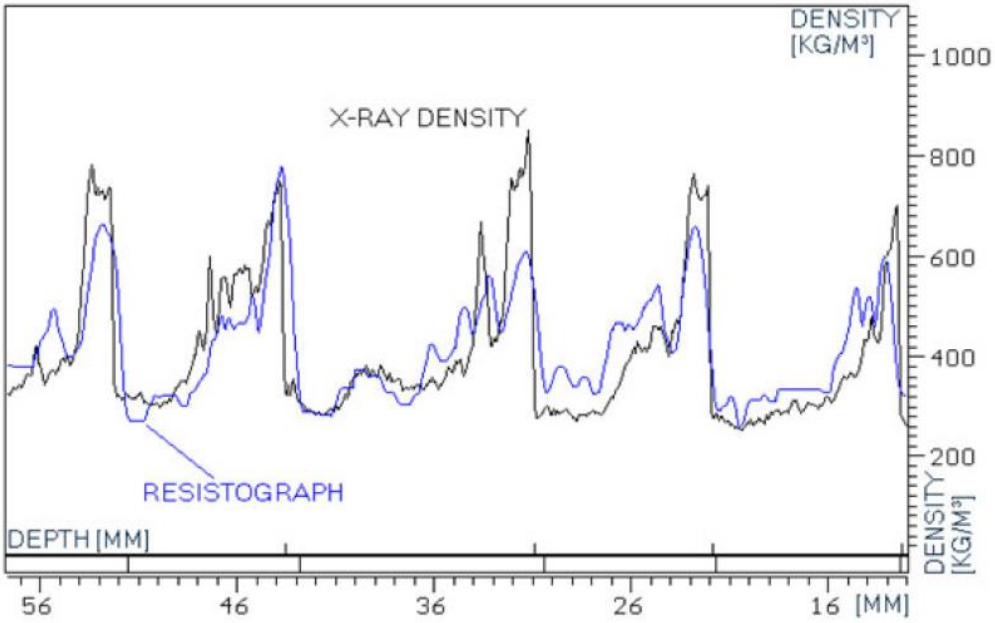
Metoda bušenja temelji se na odnosu između tvrdoće i gustoće materijala te otporu pri bušenju. Malo svrdlo nalik na iglu penetrira u drvo pri konstantnoj brzini. Korelacija između mehaničkih svojstava i otpora pri bušenju je veoma slaba. Metoda daje pouzdane i točne podatke, ali samo za lokaciju na uzorku, a na osnovi malog broja testova nije pouzdano donositi zaključke.

7.1. Opis uređaja

Metoda otpora na bušenje je nedestruktivna metoda koja analizira unutrašnjost drva. Bušilica za mjerenje otpora koristi se svrdlom maloga promjera od 1,5 do 3mm. Bušilica za mjerenje otpora radi na principu aku bušilice. Ima elektromotore i bateriju koji pokreću cijeli uređaj. Radi se o relativno malom uređaju što omogućuje prijenos i ispitivanje na licu mjesta. Svrdlo se mora mijenjati svakih 50 do 100 bušenja, ovisno o preporuci proizvođača. Važno je da su zakretni moment i brzina prodora konstantni kako ne bi došlo do odskakanja prilikom mjerenja. Otpor se bilježi te se na kraju dobije grafički prikaz koji može biti u digitalnom ili pisanom obliku.

Slika 6. Prikaz uređaja za ispisivanje grafičkog prikaza u pisanom obliku

Manji otpor pri bušenju zahtjeva i manji okretni moment elektromotora. Područja nižeg otpora osim što ukazuju na manju gustoću, mogu biti pokazatelji napuknuća ili nekog drugog tipa oštećenja. Oštećenja od insekata će isto tako ostaviti određene grafičke uzorke jer pojedine vrste insekata napadaju određene dijelove drva i na taj način vanjski vidljivi dijelovi mogu izgledati zdravi i netaknuti, a iznutra mogu biti pojedeni. Faktor korelacije iznosi $r^2 > 0,9$ iz čega se može zaključiti da ako se uređajem rukuje pravilno moguće je dobiti pouzdane i točne rezultate.



Slika 7. prikaz odnosa dobivenih rezultata na istom uzorku

Na grafičkom prikazu moguće je vidjeti krivulju visokih i niskih vrijednosti. Niske točke prikaz su nižeg otpora i manje gustoće. To su najčešće zone ranog drva ili neka oštećenja, a točke s visokim vrijednostima su zone kasnog drva. (Lear i sur., 2003.)

8. MALO DESTRUKTIVNA METODA ISPITIVANJA TLAČNOG I VLAČNOG NAPREZANJA KOD POVIJESNIH GRAĐEVINA

Povijesne građevine gotovo uvijek imaju drvene elemente koji mogu biti nosivi, dakle opterećeni ili su samo estetske prirode. Kada se odlučuje između zamjene, obnove, rekonstrukcije i očuvanja, zamjena je uvijek zadnja opcija. Za odabir optimalnog rješenja potrebno je utvrditi vrstu drva i ispitati svojstva drva kao što su sadržaj vode, modul elastičnosti, gustoća i volumni udio oštećenja.

U slučaju ispitivanja nosivog dijela glavni parametri su: modul elastičnosti i udio oštećenja. S obzirom da su sve standardne metode ispitivanja modula elastičnosti destruktivne nije moguće provesti takav tip ispitivanja na konstrukciji koja je od povijesne i kulturne važnosti. Tijekom godina razvile su se nedestruktivne metode kojima se testiranje može provesti na licu mjesta, *in-situ*. Prednost ovakvih metoda jest da su brze, jednostavne i nije potrebno uzimanje velikog broja uzoraka za laboratorijsku analizu. Nedostatak ovih metoda jest da imaju velika odstupanja od realnih vrijednosti koje se mogu dobiti destruktivnim metodama.

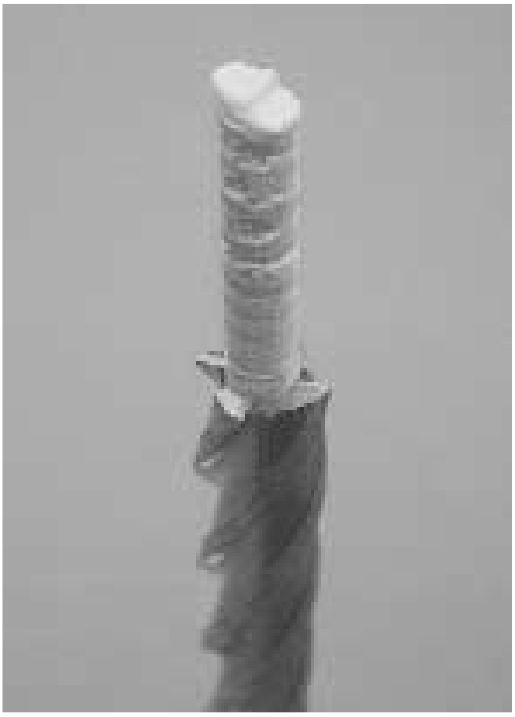
Nedestruktivnim metodama se smatraju metode koje minimalno oštećuju drvo. Otpor pri bušenju, bušenje jezgre, metoda bušenja te ispitivanje iglama/sondama. Nedostatak ovih metoda jesu rezultati dobiveni prilikom ispitivanja karakteristika samo uskog dijela ispitanog uzorka. Drvo je anizotropan i nehomogen materijal, stoga je uzorkovanje i određivanje opće vrijednosti veoma nepouzdano jer gore navedene metode nisu standardizirane.

9. BUŠENJE JEZGRE

Tehnika bušenja jezgre koristi se već neko vrijeme i ima razne funkcije, poput određivanja metoda očuvanja drva do određivanja gustoće ili kvalitete lijepljenog spoja. Kulturna važnost povijesnih građevina opravdava korištenje sofisticiranijih metoda ispitivanja koje daju pouzdane rezultate o strukturnom integritetu objekta na kojem se vrši testiranje.

9.1. Princip metode

Cilj metode je ispitati tlačno naprezanje drva. S obzirom da su provrti koji ostaju u drvu nakon vađenja uzoraka izuzetno mali ne narušava se nosivost konstrukcije. Provrt se može lako zatvoriti. Na taj način se sprječavaju mogućnosti napada nametnika i ne umanjuje se otpor pri tlačnom naprezanju.

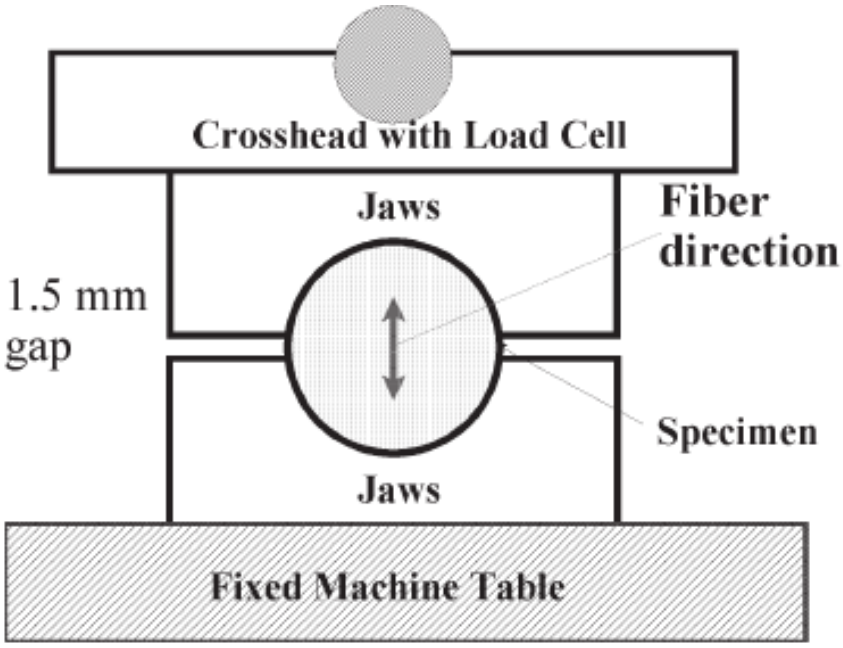


Slika 8. Svrdlo za uzimanje uzoraka (Kasal, 2003.), vanjski promjer 9,5mm, unutarnji promjer 5mm

9.2. Opis uređaja

Specijalno svrdlo za uzimanje uzoraka dizajnirano je s unutarnjim provrtom od 5mm i vanjskim promjerom od 9,5mm. Proces bušenja je spor. Dubina postepeno raste kako bi se smanjilo trenje koje može narušiti stanje uzorka i dati netočne rezultate. Uzorak dobiven bušenjem nalikuje na moždanik manjih dimenzija. Promjer mu je 5mm i ima minimalnu duljinu od

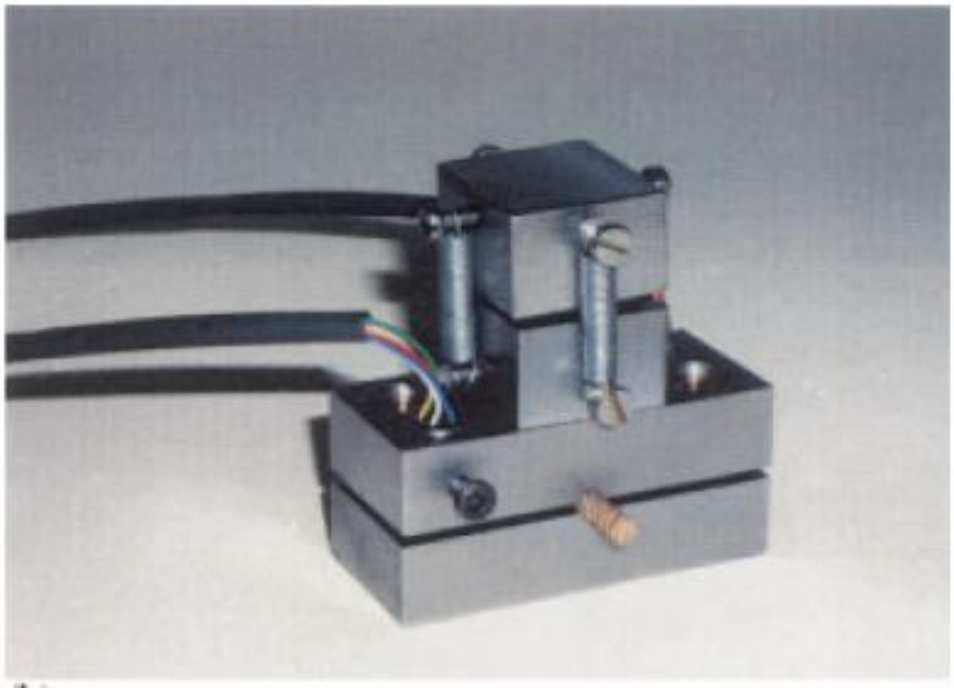
20mm. Uređaj na kojem se vrši ispitivanje uzorka nalik je kidalici. Ima dvije čeljusti od kojih je jedna fiksna, a druga je pomična i preko nje djeluje sila. Uzorak se u kidalicu postavlja na način da su vlakna paralelna sa smjerom djelovanja sile. Smjer vlakanaca je važan kao i kod standardnih metoda testiranje jer ima veliki utjecaj na rezultate. Dva minijaturna diferencijalna pretvarača na čeljustima mjere deformaciju i taj podatak je u direktnoj korelaciji s tlačnim MOE-om (modul elastičnosti). Krivulja odnosa deformacije i naprezanja prikazuje i graničnu vrijednost maksimalnog opterećenja.



Slika 9. Shematski prikaz kidalice za uzorke dobivene metodom bušenja jezgre (Kasal, 2003.)

9.3 Eksperiment

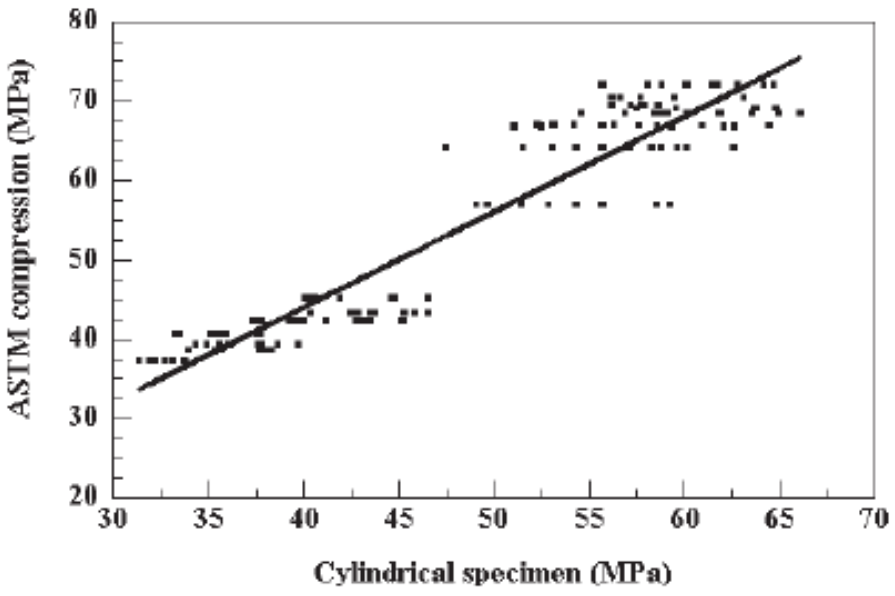
Kako bi se utvrdila korelacija među rezultatima dobivenim na klasičnoj kidalici po standardnim ISO normama i kidalici za uzorke nalik na moždanike, potrebno je napraviti probno ispitivanje. Odabrane vrste drva za testiranje su: bijeli jasen (lat. Fraxinus excelsior), šećerni javor (lat. Acer saccharum) , crveni cedar (lat. Thuja plicata), žuti bor (lat. Pinus ponderosa) i crveni hrast (lat. Quercus rubra). Važno je da se svi parametri prilikom laboratorijskih i eksperimentalnih ispitivanja podudaraju kako bi rezultati bili pouzdaniji. Gustoća, smjer vlakanaca, sadržaj vode i ostale karakteristike moraju biti što sličnije na svim uzorcima. Ove vrste drva su odabrane zbog velike razlike u gustoći kako bi se dobio što veći spektar podataka. (žuti bor 438 kg/m^3- crveni hrast 790 kg/m^3)



Slika 10. Kidalica za uzorke dobivene metodom bušenja jezgre (Kasal.2003.)

9.4. Rezultati

Usporedbom dobivenih rezultata ASTM standardima i metodom bušenja vidljiva je korelacija između tlačnih naprezanja. Poznato je da nije moguće dobiti apsolutno točne i pouzdane grafove, ali s obzirom na koeficijent korelacije koji iznosi r^2= 0,89 može se zaključiti kako metoda bušenja jezgre ipak može biti pouzdana kod ispitivanja tlačnog naprezanja na čiste uzorke drva.



Slika 11. grafički prikaz usporedbe standardnih uzoraka i uzoraka dobivenih bušenjem (Kasal,2003.)

Svi uzorci prilikom ispitivanja imali su ujednačen sadržaj vode koji je iznosio 65% i temperaturu od 22°C

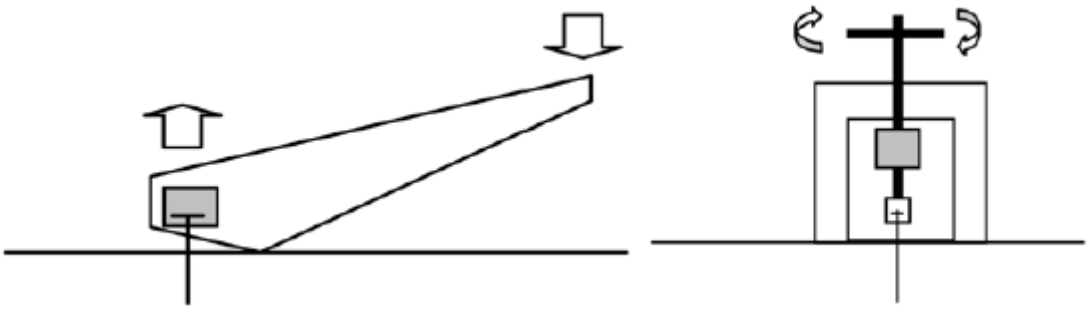
Metoda bušenja jezgre u kombinaciji s drugim nedestruktivnim metodama može dati pouzdane rezultate prilikom ispitivanja modula elastičnosti i tlačnog naprezanja. Iako se radi o nedestruktivnoj metodi, prednost ove metode i dodatan pokazatelj točnosti jesu rezultati dobiveni pomoću kidalice koja je pouzdana. Ne narušava se stabilnost niti nosivost konstrukcije od koje su dobiveni uzorci. (Bohumil Kasal, 2003)

10. METODA IZVLAČENJA VIJAKA

Metoda izvlačenja vijaka nastala je kao brz i jednostavan test biološke degradacije drva. Vijak se zabuši u drvo i polugom se izvlači iz drva. Ako se bez velikog otpora izvlači, zaključak je da je drvo toliko degradiralo da nije sigurno za upotrebu. Na ovom principu razvila se i današnja metoda izvlačenja vijaka koja ima širi spektar rezultata. Rezultati nisu samo pozitivni i negativni, već se preko odnosa sile izvlačenja definira čvrstoća na savijanje.

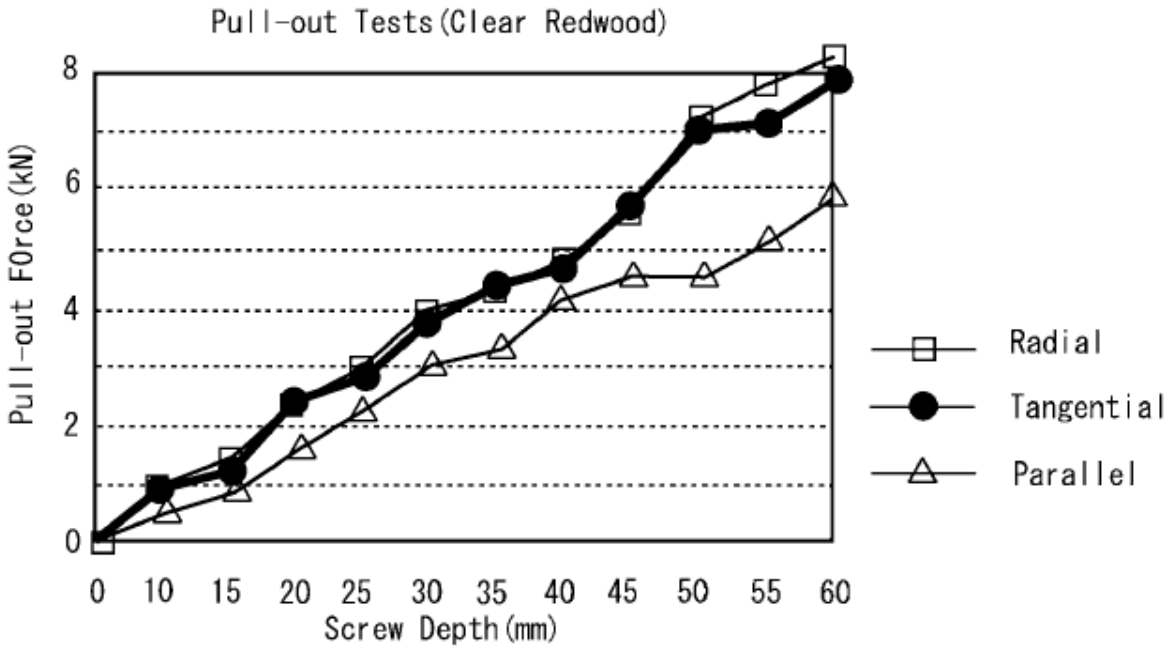
10.1. Opis uređaja

Otpor pri izvlačenju vijaka mjeri se preko sile koja je potrebna za izvlačenje vijka iz uzorka. Postoje dva osnovna tipa alata za ispitivanje. Prvi uređaj radi na principu poluge. Njime se mjeri teret potreban za izvlačenje vijka. Drugi uređaj je nešto složeniji. Glavu vijka primaju vilice koje su povezana na osovinu s ručkom koja se rotira. Vijak se izvlači okretanjem ručke. Otpor pri izvlačenju definira se preko sile koja je potrebna za izvlačenje.



Slika 12. Prikaz dva tipa uređaja za izvlačenje vijaka

Nizom testiranih uzoraka potvrđeno je da su specifična težina, modul elastičnosti i tlačna svojstva u korelaciji s otporom pri izvlačenju vijaka. Smanjenje specifične težine pouzdan je indikator za procjenu degradacije drva kao sirovine, a tlačna svojstva i modul elastičnosti su dobri indikatori za procjenu drvenih konstrukcija.



Slika 13. grafički prikaz rezultata dobivenih metodom izvlačenja vijaka u radijalnom, tangentnom i longitudinalnom smjeru

Iz dobivenih rezultata prilikom testiranja može se zaključiti da povećanjem dubine prodora vijka raste i potrebna sila za izvlačenje. U radijalnom i tangentnom smjeru nema velike razlike u rezultatima, ali u longitudinalnom smjeru, paralelno s vlakancima, vidljiv je slabiji rast potrebne sile.

U nekim slučajevima ova metoda ne služi svrsi jer nije moguće provesti dovoljan broj ispitivanja pa nije moguće dobiti pouzdane rezultate. Potrebno je stvoriti veliku bazu podataka širokog spektra svojstava drva sa standardiziranim tipom vijaka kako bi se mogli dobiti pouzdani rezultati na manjem broju ispitanih uzoraka i na taj način povećati mogućnost i pouzdanost ovakvog tipa testiranja. (Nobuyoshi Yamaguchi i Bohumil Kasal, 2003)

11. METODA ISPITIVANJA TVRDOĆE

U ovom poglavlju obrađuje se nekoliko različitih metoda ispitivanja tvrdoće. Rezultati ispitivanja ovise o alatu s kojim se vrši ispitivanje, a u slučaju drva veliki faktor su anizotropnost, nehomogenost i higroskopnost. Poznate su standardne metode ispitivanja tvrdoće po Brinell, Monninu i po Janki. Njihov nedostatak je taj što su laboratorijske metode te nije moguće ispitati tvrdoću drva u konstrukciji izvan laboratorija. Piazza i Turrini test tvrdoće zamišljen je kao nedestruktivna metoda za ispitivanje drva u konstrukcijama te je moguće mapirati degradaciju drva.

Postoji nekoliko principa ispitivanja tvrdoće, a najbrža i najjednostavnija metoda je metoda utiskivanja. Svojstva koja se mjere definirana su deformacijom materijala u koji se utiskuje kuglica ispitivača. S obzirom da su svojstva svih vrsta drva već poznata, moguće je predvidjeti dobivene rezultate.

11.1. Metoda po Brinellu

Metoda po Brinellu nastala je 1932. godine i mjeri se pomoću promjera metalne kuglice koja se utiskuje u površinu. Promjer kuglice iznosi 10 milimetara a utiskuje se silom od 50 kPa. Maksimalna sila doseže se u 15 s i ima konstantno djelovanje od 30 s nakon kojeg se sila smanjuje na 0 kPa u periodu od 15 s. Ako P označava silu u kilopaskalima, D promjer kuglice koja se utiskuje, a d označava promjer otiska, tvrdoća se može definirati po sljedećoj formuli:

$$H_B = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \ [\mathrm{kp/cm^2}]$$

11.2. Metoda po Monninu

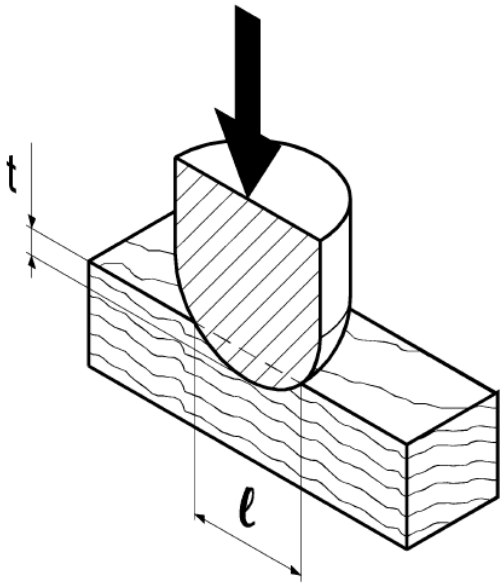
Metoda kod koje se utiskuje metalni cilindar promjera 30 mm sa maksimalnom silom od 2kN u periodu od 5 *s*. Rezultati ovog ispitivanja dobiveni su preko dubine penetracije, s obzirom da je dubinu *t* teško precizno odrediti uzima se duljina utisnutog uzorka l i preko nje se zaključuje točna dubina po sljedećoj formuli.

$$t = 15 - \frac{1}{2}\sqrt{900 - l^2}$$

Vrijednost *t* je dobiven preko duljine *l* koja se izmjeri na utisnutoj površini.

$$H_M = \frac{1}{t}$$

Vrijednost t se uvrštava u H_M formulu preko koje se dobije konačna vrijednost. Iako zbog nepreciznosti prilikom mjerenja, metoda po Janki je pouzdanija i točnija.

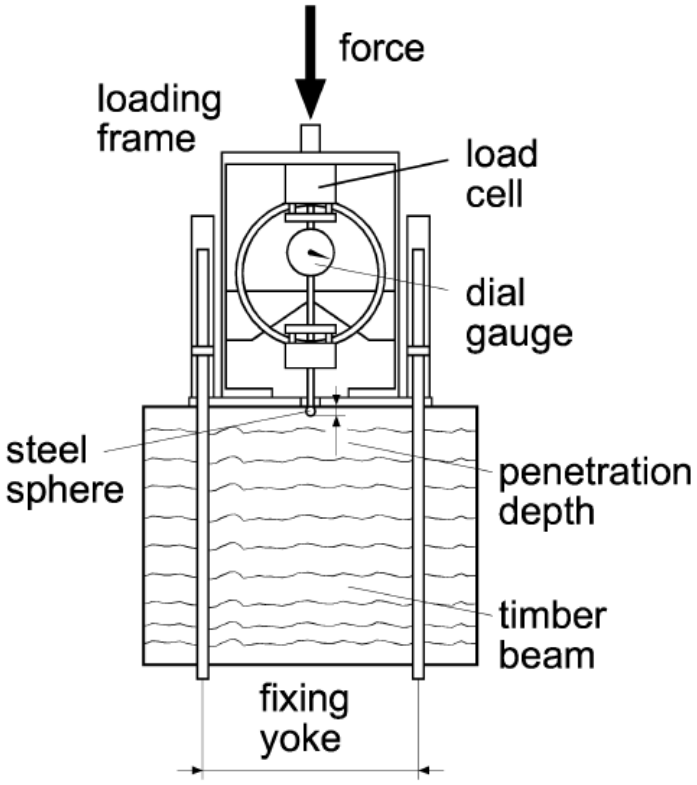


Slika 14. Shematski prikaz Monninovog testa tvrdoće

11.3. Metoda po Janki

Metoda po Janki je modificirana Brinellova metoda namijenjena drvu. Ova metoda je minimalno destruktivna za drvo i ima bazu podataka za više od 240 vrsta drva. Trenutno se najviše koristi za ispitivanje drva prilikom izrade parketa. Ova metoda je pouzdana u slučaju ispitivanja čistih uzoraka drva s definiranim sadržajem vode.

Iz metode po Janki nastala je Piazzova i Turrinijeva metoda koja se može koristiti na licu mjesta, odnosno može se vršiti ispitivanje konstrukcija i materijala na terenu. Metoda je minimalno destruktivna i utiskuje čelično svrdlo s kuglicom na vrhu čiji je promjer 5 do 10 mm. Uređaj je vidljiv na slici 15.



Slika 15. Prikaz Turrinijeva i Piazzova uređaja za ispitivanje tvrdoće

Na slici 15 vidljivi su slijedeći dijelovi: *Loading frame* – kućište uređaja koje se fiksira na uzorak, *Load cell*- mjerna ćelija koja se fiksira na kućište, *dial gauge*-pokazivač sile kojom uređaj djeluje na uzorak, *steel sphere*- čelična kuglica kojom se penetrira u uzorak, *penetration*

depth-dubina do koje se utiskuje kuglica i iznosi 5 mm, *timber beam*- uzorak drva, u ovom slučaju grede, *fixing yoke*- vilica za fiksiranje uređaja s kućištem.

Ova metoda je površinski minimalno destruktivna iako ostavlja duboke provrte zbog vilica koje je potrebno dobro fiksirati za točnije rezultate ispitivanja. Moguće ih je zatvoriti kako bi se smanjila mogućnost napada nametnika. (Mariapaola Riggio, Maurizio Piazza i Bohumil Kasal, 2003)

12. ISPITIVANJE SVOJSTAVA POVIJESNOG DRVA NA LICU MJESTA

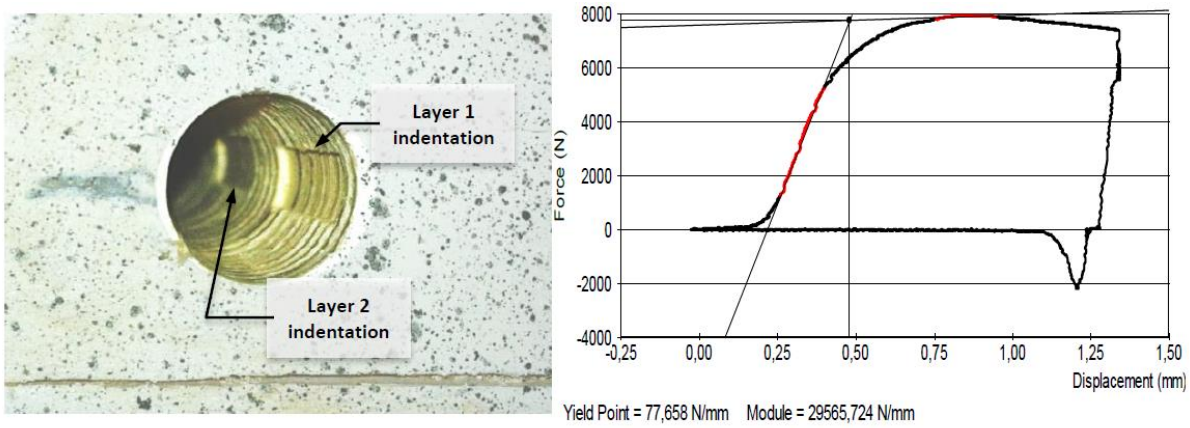
Metoda penetracije pinovima i metoda load-jacking su metode za ispitivanje mehaničkih svojstava drva na licu mjesta. Ove metode su namijenjene ispitivanju povijesnog drva. Naprimjer: drvene konstrukcije sakralnih objekata, stari stambeni objekti u funkciji muzeja i slično. Ovakve konstrukcije nije moguće rastavljati i provoditi laboratorijsko ispitivanje ili provoditi ispitivanje nekom destruktivnom metodom.

12.1. LOAD-JACKING METODA

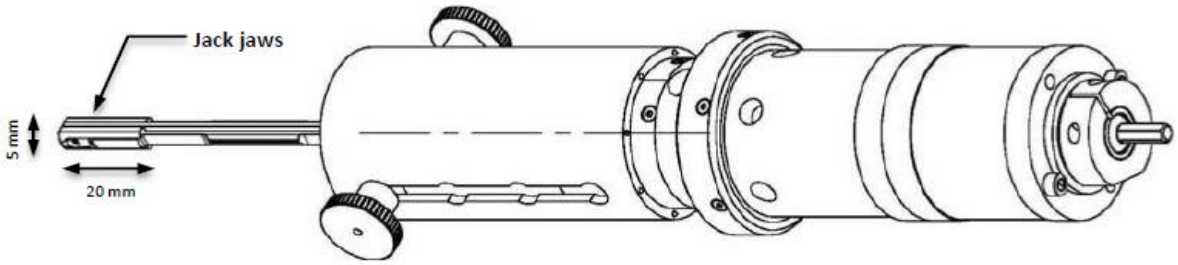
Nova metoda kojom se drvo ispituje na tlačno naprezanje direktno na licu mjesta. Osmišljen je uređaj koji mjeri silu kojom se djeluje na drvo i deformaciju koja nastaje prilikom djelovanja. Ova metoda je minimalno invazivna jer je potrebno samo bušenje provrta promjera 12 mm u radijalnom smjeru. U provrte se postavlja uređaj kojom se vrši ispitivanje. Ovaj uređaj ima prednost jer brzo vrši ispitivanje i na jednom provrtu može napraviti do četiri ispitivanja na različitim dubinama.

12.1.2. Opis uređaja i princip rada

Uređaj se sastoji od podesive školjke s vijcima koji drže komponente uređaja na mjestu. Unutarnji mehanizam za ispitivanje sastoji se od potezne/vučne šipke i mjerača opterećenja blizu vrha tijela uređaja koji pokreće akumulatorska bušilica s epicikličkim zupčanikom ili ručno jednom rukom. Uređaj je podesiv i sposoban za uzimanje mjerenja na četiri fiksne dubine položaja unutar prethodno izbušene rupe: 5–25 mm, 35–55 mm, 65-85 mm i 95-115 mm. Sila koja djeluje na vučnu šipku konstantno se bilježi i prenosi bežično na računalo gdje se obrađuje u podatke. Izlaz se vizualno prikazuje na grafički formiranom dijagramu naprezanje-deformacija na temelju stvarne sile dizalice opterećenja koja je u korelaciji s izmjerenom udaljenosti pomaka čeljusti u drveni element. Grafikon prikazuje dubinu udubljenja u stijenku provrta i silu koja je potrebna da se udubljenje napravi.



Slika 16. Prikaz otiska u provrtu prilikom ispitivanja (lijevo) grafički prikaz dobivenih rezultata prilikom ispitivanja (desno)



Slika 17. Shematski prikaz uređaja za load-jacking metodu

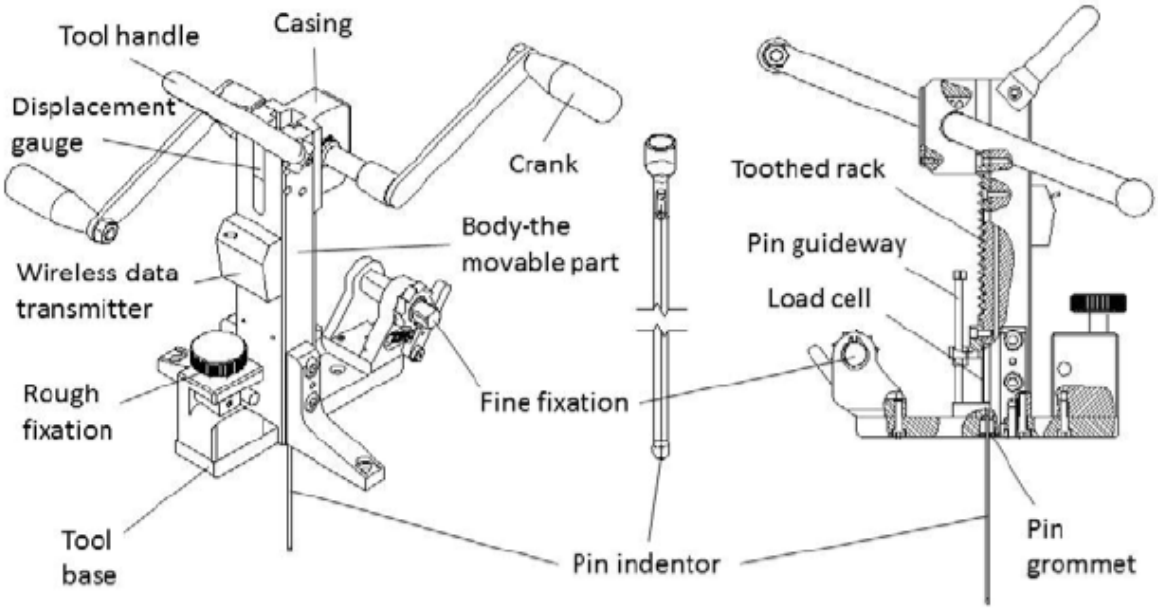
Na vrhu glave alata nalaze se pločice čija površina iznosi 100 mm^2 i utiskuju se u stijenku provrta 1 do 2 mm. Kod ovog uređaja provrti za ispitivanje su u radijalnom smjeru, a sila kojom se djeluje prilikom ispitivanja, djeluje longitudinalno ili u tangentnom smjeru u odnosu na godove.

12.2. PENETRACIJA PINOVIMA – IGLAMA

Ova metoda slična je metodi otpora na bušenje. Nudi rješenje kojim utvrđuje otpor prilikom prodora u materijal. Namijenjena je za ispitivanje drvenih nosivih konstrukcija ali je praktična prilikom ispitivanja povijesnih konstrukcija zbog jednostavnog utvrđivanja unutrašnjih nedostataka.

12.2.1. Opis uređaja i princip rada

Uređaj je osmišljen da bude jednostavan i prenosiv. Jednostavan je za upotrebu i lako se rukuje njime na teško dostupnim mjestima. Uređaj se fiksira na površinu grede pomoću remenja ili se šarafi direktno u drvo, što se izbjegava zbog veće oštećene površine koja ostaje nakon ispitivanja. Kad je uređaj fiksiran, ručka uređaja se okreće i na taj način se pokreće igla koja ulazi u drvenu gredu do maksimalne dubine od 110 mm. Zupčanik i zupčasta letva osiguravaju konstantnu brzinu vertikalnog gibanja igle.

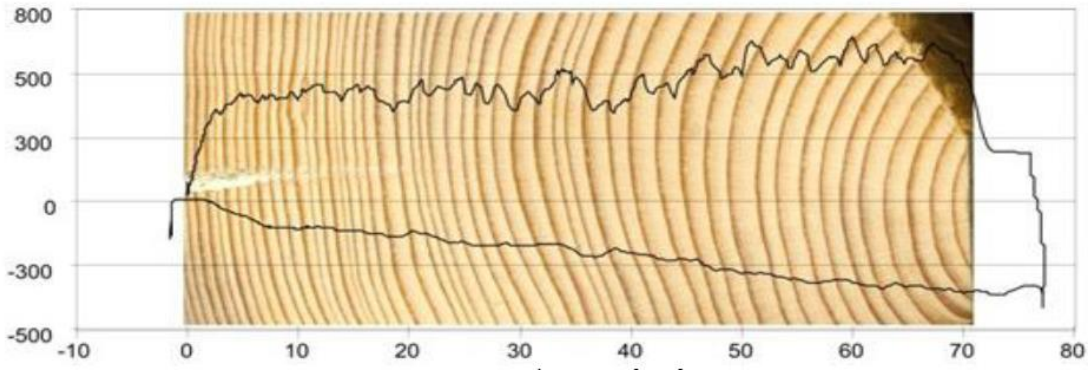


Slika 18. Shematski prikaz uređaja za penetraciju pinovima

Uređaj se sastoji od baze alata pomoću kojeg se fiksira za uzorak, vijaka za grubo i precizno fiksiranje, odašiljača za prijenos podataka, magnetskog mjerača pomaka, okretnih ručica za pokretanje zupčanika, zupčanika, zupčaste letve, pina ili igle koja prodire u drvo i vodilice pina koja sprječava izvijanje pina.

Slika 19. Prikaz uređaja za penetraciju pinovima

Magnetni senzor pomaka bilježi kretnju igle i automatski šalje podatke u računalo koji se grafički ispisuju. U grafičkom prikazu na slici 19 vidljiva je dubina do koje se vrši ispitivanje i sila kojom se djeluje na drvo. Vrhovi u grafu ukazuju na prodor kroz dio drva veće tvrdoće (zona kasnog drva), a točke nižih vrijednosti ukazuju na prolaz kroz mekše područje manje gustoće (zona ranog drva).



Slika 20. Prikaz grafičkog rezultata ispitivanja

Prosječna sila kojom se djeluje dobivena je iz grafa. Ovakav način određivanja prosječne sile inače nije pouzdan, ali s obzirom da se igla za ispitivanje utiskuje dovoljno duboko, do 11 cm što je više od polovice presjeka grede, može se reći da je rezultat prosječne sile pouzdan.
(Julie J. Maddox1, Miloš F. Drdácký iMichael Kloiber, 2014)

ZAKLJUČAK

S obzirom na sve veću osviještenost o zaštiti okoliša i pokušaju maksimalnog iskorištavanja dostupne sirovine, vidljiva je težnja smanjenju neiskorištenih drvnih ostataka. Destruktivne metode ispitivanja, iako uništavaju minimalne količine drva, nastoje se zamijeniti metodama koje ne utječu na stabilnost anatomske strukture. Poznato je da se nakon destruktivne metode drvo više ne može koristiti pa se usavršavaju metode koje nisu štetne u tolikoj mjeri. Velika prednost nedestruktivnih i malo destruktivnih metoda jest iskoristivost materijala nakon ispitivanja. Dakle, u slučaju ispitivanja truleži na nekoj gredi nije ju potrebno ispitivati na kidalici, već je moguće ispitivanjem akustičnih svojstava i na temelju rezultata ocijeniti stanje grede.

Samo ispitivanje kod nedestruktivnih i malo destruktivnih metoda je jednostavnije i kraće od klasičnih laboratorijskih destruktivnih metoda. Usporedi li se samo metoda tlačnog ispitivanja na kidalici i ispitivanje uzoraka na kidalici koji su dobiveni metodom bušenja, vidljiva je sličnost. Metoda bušenja jezgre nastala je iz tlačnog ispitivanja pa je vidljiva korelacija među metodama. Metoda bušenja ima veliku prednost zbog svoje jednostavnosti. Obje metode koriste isti princip kidalice, samo je u slučaju metode bušenja kidalica veličine dlana i lako je prenosiva. Kod standardne metode potrebno je uzorke nositi u laboratorij dok je kod metode bušenja situacija obrnuta i moguće je uzorke ispitivati na bilo kojoj lokaciji.

Sve nedestruktivne i malo destruktivne metode imaju velike prednosti pred standardnim metodama ispitivanja jer su brže, jednostavnije i potrebna je kraća priprema za vršenje ispitivanja. Glavni nedostatak ovih nestandardnih metoda jest njihova nepouzdanost. Većina metoda je osmišljena u zadnjih desetak godina i nemaju dovoljno veliku bazu podataka kako bi se mogli usporediti dobiveni rezultate i sa sigurnošću reći da su točni.

Potreban je period u kojem će se ovakve metode još dodatno razvijati kako bi bile kvalitetne i pouzdane te jednoga dana u potpunosti zamijenile destruktivne metode i na taj način omogućile veću iskoristivost drvne sirovine.

LITERATURA

1) Voichita Bucur, Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites, 2011.

2) Bohumil Kasal, Semi-destructive method for in-situ evaluation of compressive strength of wood structural members, 2003.

3) Gretchen Lear, Bohumil Kasal and Ron Anthony, poglavlje 4. . Bohumil Kasal- In Situ Aisessment of Structural Timber

3) Nobuyoshi Yamaguchi, Poglavlje 8,Bohumil Kasal- In Situ Aisessment of Structural Timber

4) Mariapaola Riggio and Maurizio Piazza, poglavlje 9. Bohumil Kasal- In Situ Aisessment of Structural Timber

5) Julie J. Maddox1, Miloš F. Drdácký2, and Michael Kloiber - In situ assessment of strenght of historic wood, 2014.