

Primjena mjerenja električnog otpora u određivanju sadržaja vode-vlage drvenih materijala

Romić, Nemanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:696720>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-27**



Repository / Repozitorij:

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)





Istarsko veleučilište
Università Istriana
di scienze applicate

Nemanja Romić

**PRIMJENA ODREĐIVANJA SADRŽAJA VODE-
VLAGE DRVENIH MATERIJALA METODOM
ELEKTRIČNOG OTPORA**

Završni rad

Pula, 2020



Istarsko veleučilište
Università Istriana
di scienze applicate

Nemanja Romić

**PRIMJENA ODREĐIVANJA SADRŽAJA VODE-VLAGE
DRVENIH MATERIJALA METODOM ELEKTRIČNOG
OTPORA**

Završni rad

JMBAG: 0122175889

Studijski smjer: Preddiplomski stručni studij politehnike

Predmet: Elektronika 2

Mentor: Sanja Grbac Babić, v.pred.

Pula, 2020.

IZJAVA O SAMOSTALNOSTI IZRADE ZAVRŠNOG RADA

Ovom izjavom potvrđujem da sam završni rad pod nazivom "Naslov teme" napisao samostalno uz pomoć mentorice Sanja Grbac Babić v.pred., primjenjujući znanje stečeno tijekom studiranja te stručnu literaturu koja je navedena na kraju rada. Završni rad je napisan u duhu hrvatskog jezika.

Student: Nemanja Romić

Potpis: _____

SAŽETAK

Električni otpor drveta u snažnoj je korelaciji sa sadržajem vode. Mjerenjem električnog otpora može se odrediti sadržaj vode u drvetu. Za mjerenje vlage drveta metodom električnog otpora mogu se koristiti posebni instrumenti - vlagomjeri ili se mogu primijeniti standardne metode mjerenja električnog otpora. Osim o sadržaju vode, električni otpor ovisiti će o sorti drveta, temperaturi mjerenog uzorka, količini topivih soli i nekim dodacima za zaštitu drva. Poznavajući djelovanje i mogućnosti primjene vlagomjera ili osnovne zakonitosti električne struje i svojstva drveta, možemo odrediti sadržaj vode u drvetu što je važan podatak od praćenja stanja živog stabla preko procesa sušenja i pripreme sirovine kroz cijeli eksploatacijski vijek drvenog proizvoda. Pri ovim mjerenjima potrebno je poznavati relacije vlage, svojstva sorte, temperature i druge parametre za točan rezultat. Detaljnije je opisan vlagomjer Trotec T2000, ispitana su njegova osnovna svojstva te je primijenjen u mjerenjima u ovom radu. Rezultati ovog rada mogu se uzeti kao polazište pri daljnjim istraživanjima ili u primjeni mjerenja vlažnosti drva metodom električnog otpora.

ABSTRACT

There is a high degree of correlation between the electrical resistance of wood and the amount of water it contains. The moisture content of wood can therefore be determined by measuring its electrical resistance. Electrical resistance can be measured using standard electrical test equipment or a specialised instrument called a hygrometer. In addition to moisture content, the electrical resistance of wood depends upon a number of other factors: the variety of wood, the temperature of the sample, the amount of soluble salts it contains and any additives that have been used for preservation. The ability to track the moisture content of timber through every stage of production, from living tree to final product is vital. To obtain correct data, it is important to either understand clearly how your hygrometer works or to have a thorough understanding of the relationship between electrical resistance, the factors listed above and moisture content. In this thesis the functioning of the Trotec T2000 hygrometer was studied, and measurements given were taken with it.

KLJUČNE RIJEČI

vlaga drveta, električni otpor, mjerenje, vlagomjer

KEYWORDS

wood moisture, electrical resistance, measurement, moisture meter

Sadržaj

1	UVOD.....	- 1 -
2	DRVO, VLAGA I ELEKTRIČNI OTPOR – OSNOVNI POJMOVI.....	- 2 -
2.1	Drvo i drveni materijali.....	- 2 -
2.2	Vlaga	- 2 -
2.3	Vlaga drveta.....	- 2 -
2.4	Ravnotežni sadržaj vode u drvu	- 5 -
2.5	Električni otpor	- 6 -
2.6	Mjerenje električnog otpora	- 7 -
2.7	Električna svojstva drveta	- 8 -
3	MJERENJE ELEKTRIČNOG OTPORA DRVENIH MATERIJALA.....	- 9 -
3.1	Mjerenje električnog otpora drveta voltmetrom.....	- 9 -
3.2	Standardi mjerenja vlage drveta metodom električnog otpora	- 10 -
3.3	Svrha i primjena mjerenja električnog otpora drveta.....	- 11 -
3.3.1	Praćenje procesa sušenja drvne sirovine	- 11 -
3.3.2	Određivanje mase drveta mjerenjem masenog udjela vode.....	- 12 -
3.3.3	Mjerenje vlažnosti ogrjevnog drveta	- 13 -
3.3.4	Mjerenje električnog otpora živog stabla – električna tomografija	- 14 -
3.3.5	Analiza prisutnosti i utjecaja mikro organizama na drvo.....	- 15 -
3.3.6	Praćenje uvjeta okoline tijekom eksploatacije drvenih proizvoda i konstrukcija	- 16 -
4	ODREĐIVANJE SADRŽAJA VODE DRVA MJERENJEM ELEKTRIČNOG OTPORA	- 17 -
4.1	Elektronički uređaji-vlagomjeri za određivanje sadržaja vode metodom električnog otpora	- 17 -
4.2	Točnost vlagomjera i mogući utjecaji na mjerni rezultat	- 19 -

4.2.1	Utjecaj krivulje otpora	- 20 -
4.2.2	Utjecaj udaljenosti elektroda na mjerni rezultat.....	- 22 -
4.2.3	Utjecaj smjera elektroda prema godovima na mjerni rezultat	- 22 -
4.3	Instrument Trotec T2000.....	- 23 -
4.3.1	Mjerenje sadržaja vode drveta instrumentom Trotec T2000	- 23 -
4.3.2	Električni parametri mjerenja instrumentom T2000	- 24 -
4.3.3	Temperaturna korekcija	- 25 -
4.3.4	Postupak mjerenja sadržaja vlage drveta	- 26 -
4.3.5	Ispitivanje temperaturne korekcije instrumenta t2000	- 27 -
4.3.6	Mjerenje vlažnosti ogrjevnog drveta	- 29 -
4.4	REZULTATI MJERENJA.....	- 30 -
4.4.1	Rezultati mjerenja utjecaja temperaturne korekcije vlagomjera Trotec T2000	- 30 -
4.4.2	Mjerenje vlage ogrjevnog drveta.....	- 31 -
4.4.3	Promatranje utjecaja smjera mjerenja na mjerni rezultat	- 33 -
4.4.4	Mjerenje vlažnosti drva dugotrajno izloženog sadržaju morske vode .	- 34 -
	-	
5	ZAKLJUČAK	- 38 -
	LITERATURA.....	- 39
	POPIS SLIKA.....	- 41

POPIS OZNAKA I KRATICA

OZNAKA	OPIS	JEDINICA
U	napon	V
I	struja	A
R	Otpor	Ω
R_v	Unutarnji otpor voltmetra	Ω
R_d, R_x	Električni Otpor drveta-nepoznati otpor	Ω
ρ	Električna otpornost	Ωm
δ	Električna provodljivost	Sm^{-1}
A	Površina presjeka	m^2
T_i	Temperatura okoline	K
T_o	Temperatura mjernog objekta	K
M	Masa	g
u, w, h	Udio vode (ovisno o izvoru)	M%
$u_{1...n}$	Udio vode po broju mjerenja	g
M_s	Masa suhog drveta	g
M_v	Masa vlažnog drveta	g
$M_{o...n}$	Masa po broju mjerenja	K^{-1}
$\Delta u, \Delta w$	Razlika sadržaja vlage	M%
f	Frekvencija	Hz
P	tlak	Pa

1 UVOD

Danas drvo kao materijal ima višestruku primjenu u graditeljstvu, u izradi konstrukcijskih elemenata, namještaja i stolarije. Korištenje punog drveta kao ogrijeva u razvijenim zemljama značajno se smanjilo što zbog sve veće vrijednosti sirovine ali i zbog razvijanja ekološke svijesti, očuvanja šuma i smanjenja onečišćenja okoliša produktima sagorijevanja. Međutim, cijene energije rastu te primjena energenata iz drveta i drugih celuloznih tvari ponovno dolazi u širu primjenu posebno u kućanstvima (pelet, briket...).

Pored drugih fizikalnih svojstava, sadržaj vode u drvetu od posebne je važnost na njegova svojstva pri izradi i eksploataciji proizvoda i drveta što će biti detaljnije opisano u ovom radu. Sadržaj vode u drvetu kao sirovini i gotovom materijalu može uvelike utjecati na svojstva materijala; čvrstoću, elastičnost, postojanost oblika, obradivost i trajnost.

Sadržaj vode u drvetu kao materijalu uzima se u obzir već kod prve eksploatacijske radnje, sječe drveta gdje se odabire vegetacijska faza mirovanja s najmanje sadržaja vode, najčešće je to zima. Sadržaj vode u drvetu proporcionalno utječe na električnu provodljivost iz čega možemo pretpostaviti da je električni otpor drveta obrnuto proporcionalan sadržaju vode. Vrijednosti električnog otpora drveta možemo povezati sa sadržajem vode. Osim sadržaja vode na električni otpor drveta utječu i druga fizikalna svojstva kao što su gustoća, sadržaj kemijskih tvari, temperatura.

Gustoća i sadržaj tvari specifičan je za sortu i podneblje te su te vrijednosti uglavnom konstante dok su sadržaj vode i temperatura varijable koje moramo uzeti u obzir kod mjerenja i određivanja sadržaja vode - vlage u drvetu. Određivanje sadržaja vlage je samim tim metoda neophodna u procesu primjene i obrade drveta. Kroz povijest, sadržaj vlage određivao se iskustveno, empirijski dok danas možemo koristiti nekoliko metoda.

Mjerenje vlažnosti drveta metodom električnog otpora tema je ovog završnog rada

2 DRVO, VLAGA I ELEKTRIČNI OTPOR – OSNOVNI POJMOVI

2.1 Drvo i drveni materijali

Drveni materijali su sirovine, poluproizvodi i proizvodi iz drveta kao što su: drvni trupci, cjepanice, piljena građa kao gotov proizvod u graditeljstvu ili poluproizvod – masivno drvo u stolarskoj i industriji ambalaže. Gotovi proizvodi od masivnog drveta kao što su namještaj, građevna stolarija i razni uporabni drvni proizvodi.

Drveni materijali jesu i otpaci od prerade drveta koji se mogu koristiti kao sirovina za proizvodnju kompozitnih drvenih materijala („šper“ ploča, „iveral“, „lesonit“ ...). Otpaci i usitnjeni trupci koriste se i kao energent u rasutom obliku (kotlovi na piljevinu) ili kao sirovina za izradu prešanog ogrijeva u obliku briketa i peleta.

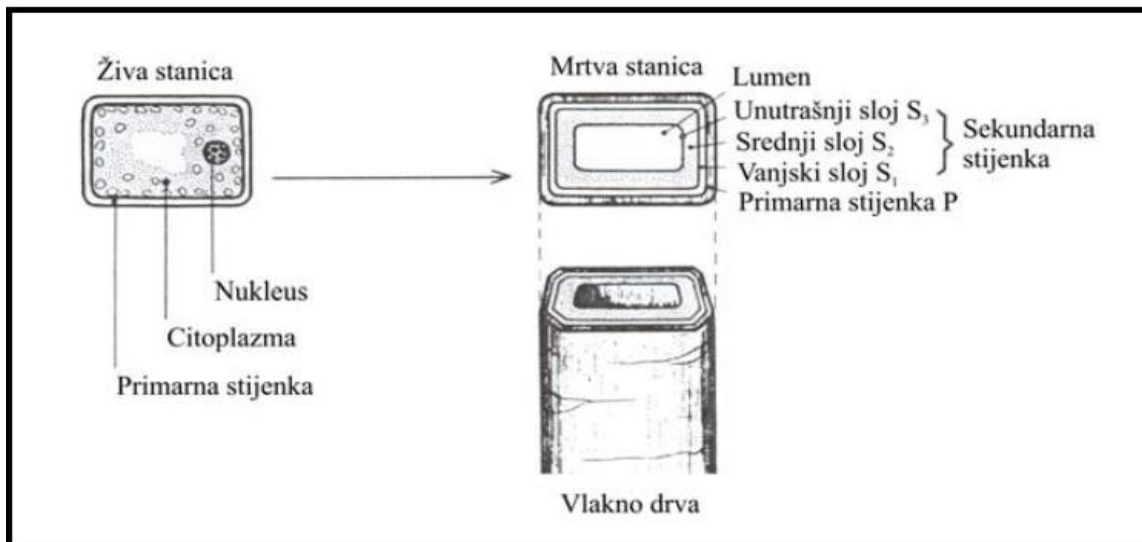
Ovim radom obuhvatiti ćemo mjerenje vlažnosti metodom električnog otpora masivnog drveta, drvene strugotine iz proizvodnog pogona stolarije te šper ploče kao kompozitnog drvenog materijala.

2.2 Vlaga

Pojam vlaga ima široku primjenu i značenja u standardnom i kolokvijalnom govoru hrvatskog jezika a sva značenja uglavnom se povezuju sa prisutnošću vode koja nije u tekućem pojavnom obliku već je apsorbirana u materijalu ili mješavini plinova (zraku).

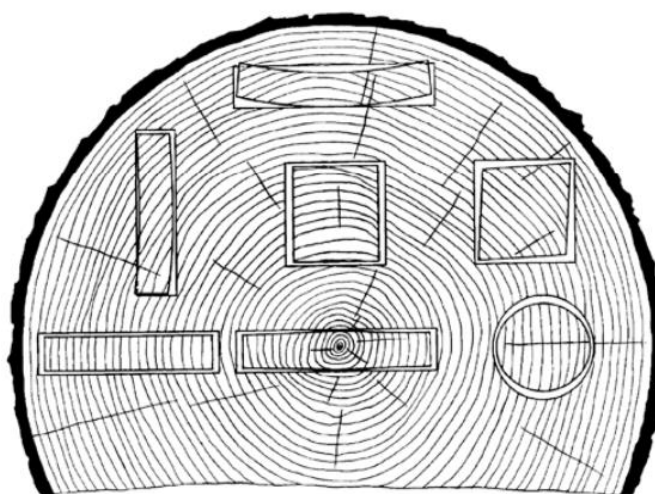
2.3 Vlaga drveta

Vlaga ima najznačajniji utjecaj na svojstva i životni vijek drvene sirovine i drvenih proizvoda [6]. Voda u drvetu prisutna je tijekom životnog vijeka stabla, u sirovini - trupcima i građi te u gotovom proizvodu prisutna u staničnoj stjenici i citoplazmi. Stanična stijenka najvećim je dijelom građena od celuloze, hemiceluloze i lignina [6]



Slika 1: Živa stanica i drveno vlakno [4].

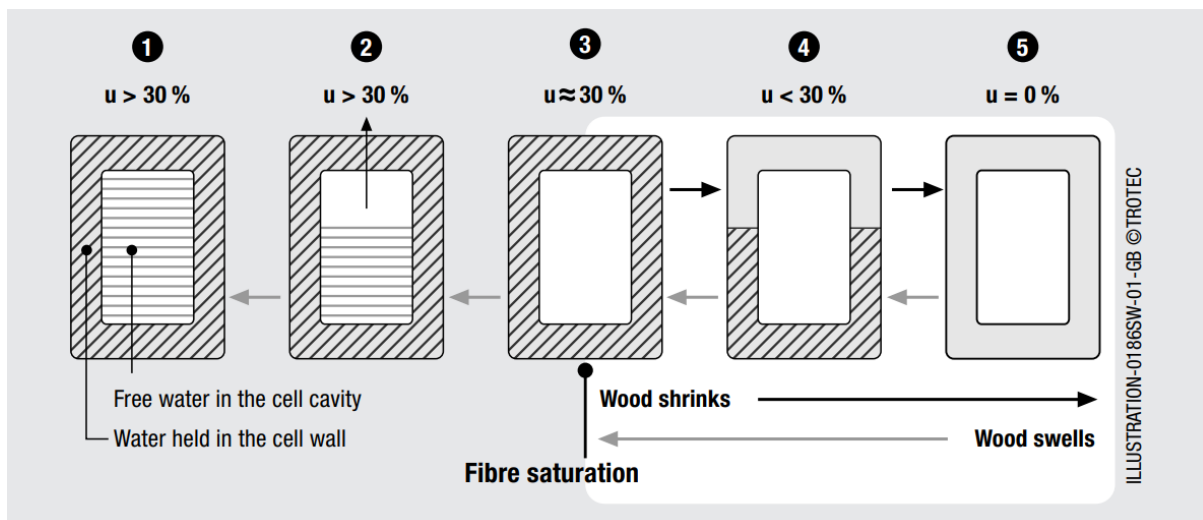
Stanična stijenka najviše doprinosi fizikalnim svojstvima drveta a obzirom da su gradive tvari stjenke: celuloza i hemiceluloza izrazito higroskopne, vlaga utječe na udaljenost polimernih lanaca i utječe na fizikalna svojstva drva. Sadržaj vode u staničnim stijenama tako stvara bubrenje ili skupljanje stanice što izaziva promjenu volumena drveta, [6] sirovine ili gotovog proizvoda a to je jedna od najčešćih neželjenih posljedica drvene sirovine i gotovog drvnog proizvoda. Na skupljanje drveta utječe i odnos na smjer godova pa je tangencijalno -uzdužno skupljanje dvostruko veće od radijalno poprečnog skupljanja [8].



Slika 2: Skupljanje i deformacije različitih oblika drveta u odnosu na smjer godova [8].

Nakon obaranja stabla, započinje proces sušenja drveta gdje voda prvo isparava iz citoplazme. Točka na kojoj drvo više ne sadrži slobodnu vodu zove se točka zasićenja vlakana i leži između 23-35 M% ovisno o sorti drveta.[3]

Vlaga u higroskopnom dijelu stanice naziva se vezana voda dok vlagu u citoplazmi nazivamo slobodna voda. Određeni komad drveta ima zadan i konačan broj „gnijezda“ koja mogu prihvatiti vodu. Granica u kojoj voda zauzme sva slobodna mjesta zovemo točkom zasićenja nakon koje dodatno zasićenje vodom više ne utječe na dimenzije stanice [6].



Slika 3: Različiti stadiji zasićenja vodom drvne stanice [2].

Za oznaku sadržaja vode u drvetu koristiti ćemo oznaku „u“ prema većini izvora korištenih u ovom radu.

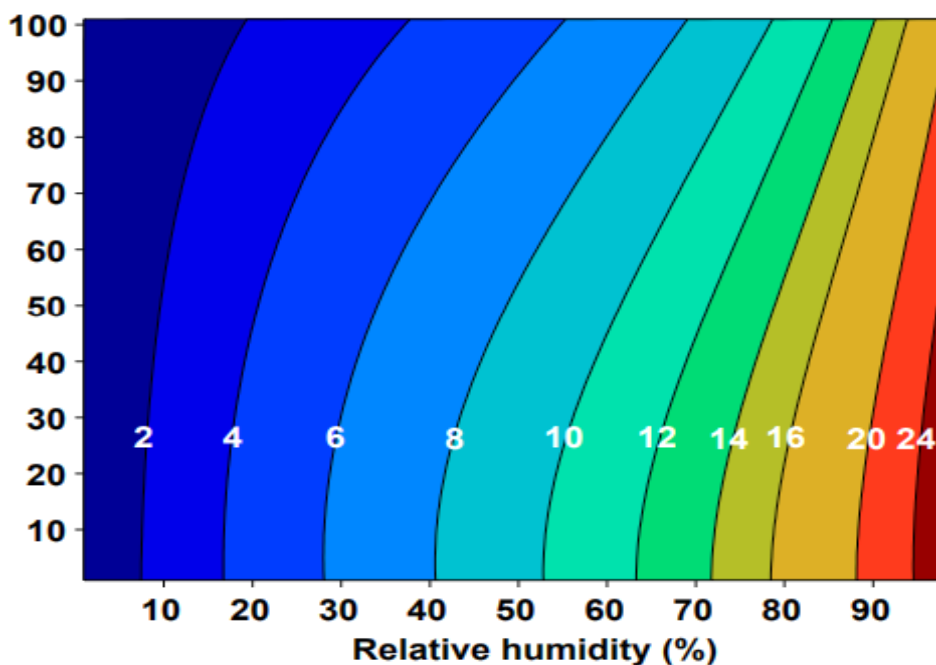
Utjecaj vode na skupljanje i bubrenje drveta raste s gustoćom drveta. Fizikalna svojstva drveta poboljšavaju se smanjenjem sadržaja vode. Na primjer, tlačna čvrstoća i otpornost na uvijanje dvostruko je uvećana kod drveta vlažnosti 12-15% od drveta kod svježeg oborenog stabla [8].

Kod dugotrajne vlažnosti drveta iznad 20%M što podrazumijeva vlažnost okolnog zraka 80-90% RH, na drvetu se razvijaju mikroorganizmi - plijesni. U okruženju iznad 90% vlažnosti zraka nastaje truljenje.

Elementarni sastav suhe drvne tvari gotovo je jednak za sve vrste drveta: suha drvna tvar sadrži u prosjeku: 49,6% ugljika, 5,9% vodika, 44,0% kisika, 0,2% dušika i 0,3% pepela.

2.4 Ravnotežni sadržaj vode u drvu

Ravnotežni sadržaj vode ili vlage u drvetu posebno je važno svojstvo koje utječe na sadržaj vode u drvetu od sječe do kraja eksploatacije gotovog proizvoda od drveta. Zbog higroskopnih svojstava drveta i stanja okolnog zraka u kojem se drvo uglavnom nalazi (temperatura i vlaga), postoji neprestana interakcija između vlage u drvetu i vlage u okolnom zraku. Ova interakcija ovisi o svojstvu sorte drveta te o vlažnosti i temperaturi zraka. Različita sredstva za zaštitu drveta, premazi, boje mogu samo usporiti ovaj proces ali ga ne eliminiraju [6].



Slika 4: Dijagram ovisnosti vlage drveta kao funkcija rel. vlažnosti i temperature zraka [8].

Iz priloženog grafa vidljiva je krivulja ovisnosti sadržaja vlage u drvetu od sadržaja vlage i temperature okolnog zraka. Krivulje su za slobodno, ne tretirano drvo bez boja i premaza. Pojava ravnotežne vlage drveta je predmet istraživanja dijela ovog rada.

2.5 Električni otpor

Električni otpor je električno svojstvo nekog materijala, a odnosi se na otpor koji pruža prolasku električne struje. Električna provodljivost je sposobnost nekog materijala da provodi električnu struju. Električni otpor i provodljivost su obrnuto proporcionalne veličine.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \sigma \equiv 1/\rho$$

Otpor će biti tim veći što je veći napon narinut na promatrani otpornik a manja struja koja kroz taj otpornik teče. Temeljem ovog zakona možemo u praksi primijeniti različite mjerne sklopove za mjerenje električnog otpora.



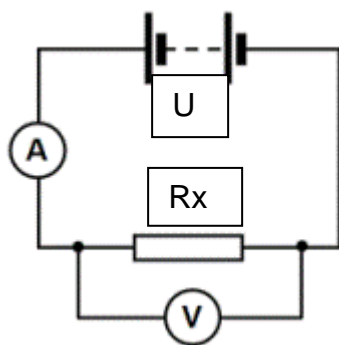
Slika 5: Prikaz zamišljenog vodiča s električnim i relevantnim fizičkim veličinama uz jednadžbu električne otpornosti https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_otpor (18.07.2020.).

2.6 Mjerenje električnog otpora

Mjerenje električnog otpora podliježe zakonitostima Ohmovog zakona gdje je električni otpor jednak omjeru napona i struje prema jednadžbi:

$$R = \frac{U}{I}$$

Za mjerenje električnog otpora potreban je izvor električne struje, nepoznati otpor (u ovom slučaju to je otpor drveta), mjerni vodiči koji spajaju nepoznati otpor i instrument.



Slika 6: Principijelna električna shema ohm metra, https://wiki.seg.org/wiki/Electric_resistivity_methods (18.08.2020).

Gdje je:

U – izvor napona

Rx – nepoznati mjereni otpor

A – amper metar

V- volt metar

Prema ovoj shemi, otpor se može mjeriti putem mjerenja struje kruga uz poznati pad napona na otporniku. Potrebno je poznavati i unutarnji otpor instrumenta u seriji sa nepoznatim otporom jer je ukupna struja kruga u ovisnosti od zbroja svih otpora u krugu. Sheme izvedbi ohm metra unutar komercijalnih vlagomjera autoru nisu dostupne te neće biti detaljnije obuhvaćene ovim radom.

2.7 Električna svojstva drveta

Od električnih svojstava drvo ima električni otpor i potencijal. Voda znatno utječe na oba električna svojstva drveta te se mjerenjem ovih vrijednosti može utvrditi sadržaj vode. Električni otpor drveta osim o sadržaju vode ovisi i o temperaturi, usmjerenosti vlakana i sadržaju soli topivih u vodi. Za razliku od metala, drvo ima negativni temperaturni koeficijent te mu električni otpor opada s temperaturom [8]. Osim električnog otpora - provodljivosti, drvo ima i dielektričnu konstantu. Voda utječe na dielektričnu konstantu a mjerenje m dielektrične konstante može se mjeriti i sadržaj vode u drvetu.

„Električna provodljivost drveta izrazito je povezana sa sadržajem vode“ [8]. Povećanjem sadržaja vode u drvetu od 0 do točke zasićenja vlakana (25-35%M, ovisno o sorti) može umanjiti električni otpor za 10^{10} puta. Otpor iznosi oko 10^{15} do 10^{16} Ω kod potpuno suhog drveta (sušenje na 105°C) do 10^3 - 10^4 kod točke zasićenja vlakana (Wood and cellulose science 1964 citirano [8] str 4-15) Daljnjim zasićenjem drveta opadanje otpornosti se smanjuje .

Slobodni ioni nosioci električnog naboja u drvetu:

K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Cl^- [17].

Glavni nosioci električne struje su kalij i kalcij uz manje sudjelovanje magnezijevih i natrijevih iona.[17]. Na provodljivost drveta mogu utjecati i drugi elektroliti iz tvari za impregniranje ili vodo topive soli kao što je slučaj s drvetom koje je duže vremena izloženo morskoj vodi i natrij kloridu [8] što će se razmatrati u nastavku ovog rada

3 MJERENJE ELEKTRIČNOG OTPORA DRVENIH MATERIJALA

Sadržaj vode je jedno od osnovnih svojstava drveta kao materijala. Obzirom da je drvo prirodan materijal i stabla kao biljke, voda je neophodna za rast te se u stablu ovisno o sorti i periodu vegetacije nalazi u masenim udjelima od 30-200 %M [8].

U elektrotehnici i elektronici, drvo se promatra kao izolator.

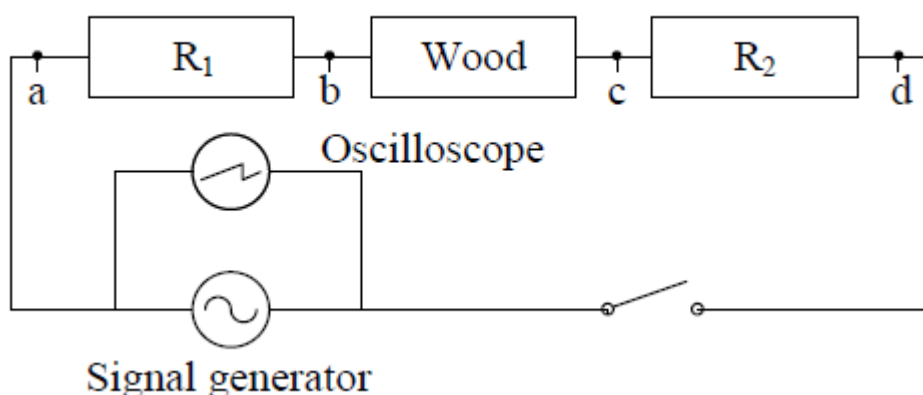
Prema definiciji, Električni izolator je materijal u kojem nema slobodnih nositelja električnog naboja, pa zbog toga vrlo slabo vodi električnu struju. [19]. Međutim, ovim i drugim radovima je pokazano da sadržaj vode izrazio utječe na otpornost i provodljivost drveta zbog prisutnosti elektrolita koji otopljeni u vodi prenose električnu struju. Umjesto izolatorom, drvo možemo nazvati slabim vodičem.

Svojstvo promjene električnog otpora drveta uslijed promjene sadržaja vode, temelj je ovog rada.

3.1 Mjerenje električnog otpora drveta voltmetrom

Obzirom da se otpor drveta kreće u širokim rasponima od 10^4 do $10^{16} \Omega$, mjerenjem se mora obuhvatiti cijeli raspon. Opsezi mjerenja univerzalnih mjernih instrumenta na tržištu imaju gornje granice 20-60M Ω .

Neka novija istraživanja [18] pokazala su najbolje rezultate korištenjem napona 5V i frekvencije 1000 HZ. Stoga ćemo opisati jedan takav sklop:



Slika 7: Shema spoja mjerenja električnog otpora voltmetrom [7].

Prema gornjoj shemi, za izvor napona koristi se generator signala čiji se signal promatra osciloskopom. Napon se vodi na serijski spoj dva poznata otpora i uzorka s nepoznatim otporom. Volt metrom se mjeri napon na označenim točkama.

Pomoću izmjerenih vrijednosti napona, na mjernim točkama, prema jednadžbi:

$$\bar{I} = \frac{\frac{U_{ab}}{R_1} + \frac{U_{cd}}{R_2}}{2} \quad [7]$$

Izračunava se struja serijskog strujnog kruga. Dalje, pomoću jednadžbe ohmovog zakona uz poznatu struju i pad napona na nepoznatom otporu (drvetu), izračunava se nepoznati otpor.

Uz poznati električni otpor koristimo jednadžbu za određivanje sadržaja vode pojedine sorte drveta:

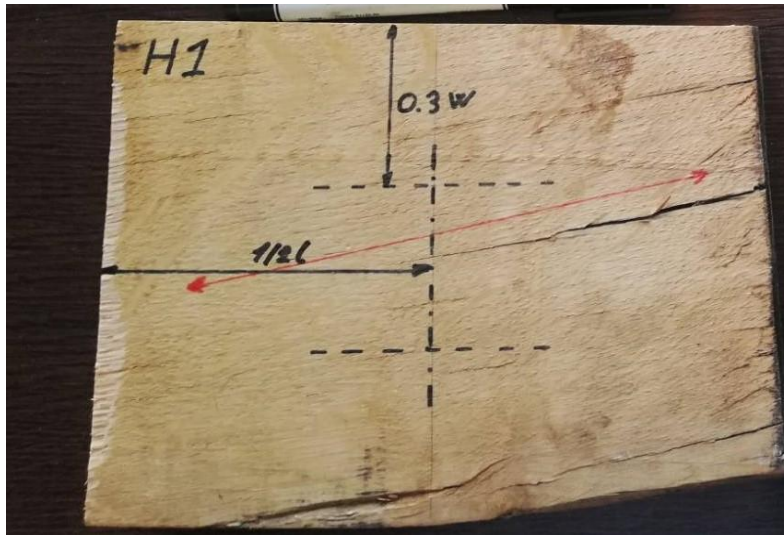
$$\text{Log}[\log(R)+1]=a \times u+b \quad [7]$$

a i b su koeficijenti specifični za sortu – krivulju otpora drveta.

Dobiveni rezultat korigira se obzirom na temperaturu uzorka prema primjeru u poglavlju 4.1. ovog rada

3.2 Standardi mjerenja vlage drveta metodom električnog otpora

Za mjerenje vlažnosti drveta metodom električnog otpora postoje standardi kao što je: DIN EN 13183-2: 2002-07. ili EVS-EN 13103-2:2002. Između ostalog, standard opisuje odabir mjesta mjerenja prema dimenzijama uzorka -drveta, broj ponavljanja mjerenja ovisno o broju uzoraka i preporučuje korištenje izoliranih elektroda obzirom na moguću površinsku vlažnost drveta.



Slika 8: određivanje mjesta mjerenja prema DIN-EN-13183-2:2002 (Autor).

Gornja slika prikazuje komad drveta sa preporučenim mjestom mjerenja obzirom na dimenzije uzorka kraćeg od 600 mm prema DIN-EN-13183-2:2002.

3.3 Svrha i primjena mjerenja električnog otpora drveta

“Vlaga uvjerljivo ima najveći utjecaj na svojstva i životni vijek drveta, drvenih proizvoda i konstrukcija „ [6] str.1. Kako je već navedeno, mjerenjem električnog otpora drveta možemo ustanoviti maseni udio vode u drvetu ili vlaga drveta. Vlaga drveta je podatak koji se koristi u brojnim slučajevima od uzgoja, pripreme sirovine, izrade gotovog proizvoda te tijekom eksploatacije drveta, drvenih proizvoda i konstrukcija. Sadržaj vlage drveta iznad 20%M osnovni je preduvjet pojave štetnih posljedica za korisna svojstva drveta

3.3.1 Praćenje procesa sušenja drvne sirovine

Mjerenjem vlage trupca uz njegove dimenzije može se procijeniti utrošak vremena i energije potrebne za sušenje do potrebne vlažnosti. Tijekom procesa sušenja može se kontinuirano pratiti promjena sadržaja vlage te optimizirati proces. Mjerenja u sušarama mogu biti ručna ili automatizirana s konstantno postavljenim elektrodama.

3.3.2 Određivanje mase drveta mjerenjem masenog udjela vode

Mjerenjem vlažnosti drveta uz volumen i poznatu specifičnu masu suhog drveta neke sorte može se jednostavno izračunati ukupna masa

$$M_d = M_{sp} * V + M_{ds} * u$$

Obzirom da udio vlage u svježe oborenom stablu može biti i 140% [11], ukupna masa trupca može znatno utjecati na tehničke uvjete, cijenu manipulacije i transporta drveta. Sadržaj vode znatno utječe i na volumen drveta, na primjer ogrjevnice cjepanice metrice¹ [11]. što je uz masu tereta vrlo važan podatak u transportu, obzirom da se cijena transporta uglavnom određuje prema omjeru zapremine i mase tereta.

Slika 7 prikazuje razliku volumena sloga bukove cjepanice metrice sirovog i prosušenog drveta bukve. Tradicionalno, ogrjevno drvo se u Hrvatskoj kupuje uglavnom po prostornom metru sloga². Kupovinom sirovog drveta nakon prosušivanja imati ćemo manju zapreminu istog sloga. Kupovinom suhe metrice može se i uštedjeti na prostoru za pohranu ogrjevnog drveta.

¹ Metrica-šumarski naziv za drvo piljeno na dužinu 1 metra, česta dimenzija za transport ogrjevnog drveta

² Slog-Metrice složene za skladištenje ili transport. Slog metrice dužine i visine 1m čini 1 prostorni metar ogrjevnog drveta (kolokvijalno „metar drva“) što ne treba miješati sa volumenom debla koji se odnosi na volumen čiste drvne mase.kolokvijalno „kubik“Od 1 prostornog metra volumena debla može se dobiti do 1.5 prostornih metara cijepane metrice u slogu zbog toga što dio volumena sloga metrice čine šupljine između komada metrice. Omjer šupljina u volumenu ovisi o obliku drveta (oblica, cjepanica, ravno, iskrivljeno) te o načinu slaganja i -međusobnog preklapanja metrice.



Slika 9: Grafički prikaz promjene volumena ogrjevnog drveta [11].

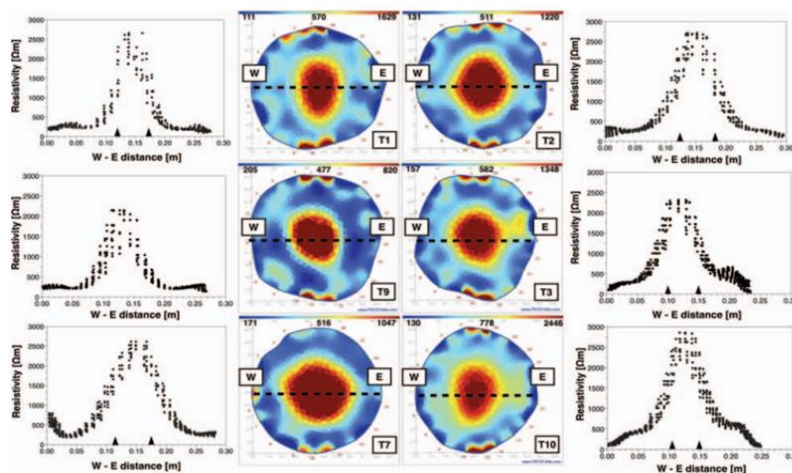
3.3.3 Mjerenje vlažnosti ogrjevnog drveta

Danas se 51% svjetske proizvodnje drveta koristi za ogrjev [11]. Provjera sadržaja vlage ogrjevnog drveta primjenjuje se radi procjene dali je drvo prikladno za ogrjev. Idealan sadržaj vlage drveta za ogrjev je 15 - 18%. Veći sadržaj vode doprinosi slabijem izgaranju ali o znatnim gubicima energije jer se dio energije gorenja troši na isparavanje vode koja se dimnjacima ispušta u atmosferu. Ovdje treba uzeti u obziri znatnu ekološku komponentu sagorijevanja pre vlažnog drveta kroz nepotreban gubitak energije što za posljedicu ima povećanu potrošnju drveta a samim tim i sječugubitak šuma te štetan utjecaj izgubljene energije kroz vodenu paru koja doprinosi globalnom zatopljenju. Prisutan je i štetan utjecaj povećanog sadržaja čestica dima pri gorenju pre vlažnog drveta. Šira grupa s jednakim ovisnostima o sadržaju vlage jesu čvrsta biogoriva.

„U čvrsta biogoriva ubrajamo drvene proizvode kao što su drvena sječka, drvno iverje, sve vrste cijepanog i oblog drva, drvni pelet, briket te svi drugi biljni ostaci.“ [11], str.25.

3.3.4 Mjerenje električnog otpora živog stabla – električna tomografija

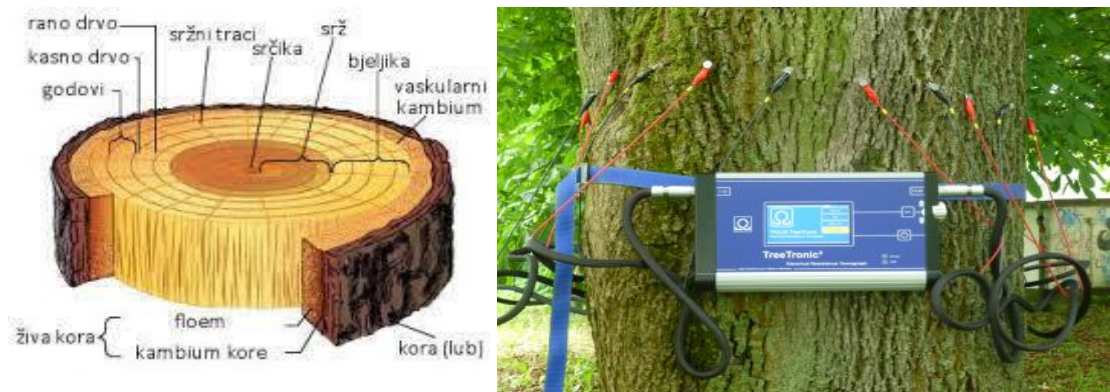
Električna tomografija debla metodom električnog otpora može pružiti uvid u stanje debla - stabla živog drveta. Ova metoda korisna je u uzgoju šuma za eksploataciju drvene mase jer daje uvid u omjer srčike i bjeljike u presjeku stabla. Omjer srčike i bjeljike može biti važan obzirom na buduću namjenu drveta. [9] Podaci iz ovakvih mjerenja mogu ukazati i na uzgojne čimbenika kao što su prisutnost elektrolita fosfora i kalija. Na temelju ovih podataka može se tijekom uzgoja intervenirati korekcijom prihrane ili navodnjavanja



1. Electrical resistivity tomographs for the 10 trees. West to east profiles (from W to E) are plotted next to the tomographs. Dashed line the profile on the tomographs. Measured location of SW-NW boundaries are indicated by triangles on the axis of the profiles

Slika 10: Grafički prikaz rezultata mjerenja otpora stable [9].

Temelj ove metode je činjenica da srčika drveta sadrži manje vode od bjeljike. Srčika uglavnom ne sudjeluje u transportu vode kroz stablo što je važan podatak kod primjene pesticida gdje veći udio srčike podrazumijeva slabiji prijenos aktivnih tvari. S druge strane, srčika je poželjna kod eksploatacije drveta npr. zbog izražene koloracije kod trešnje i oraha ili intenzivnijeg ugodnog mirisa kod cedra. Stoga električna tomografija pomaže kod pravilnog uzgoja i kod odabira stabala željenih svojstava za eksploataciju. [6].



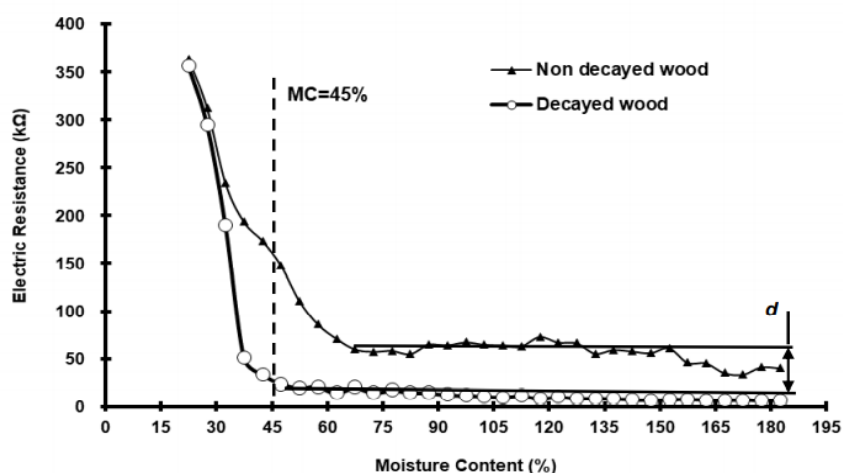
Slika 11: Prikaz presjeka debla i instaliran uređaj za električnu tomografiju debla

<https://zir.nsk.hr/islandora/object/sumfak:1417/preview> (05.09.2020.).

<https://www.environmental-expert.com/products/picus-treetronic-electric-resistance-tomograph-564686> (27.08.2020.).

3.3.5 Analiza prisutnosti i utjecaja mikro organizama na drvo

Neki noviji radovi [13], [5],[18] opisuju mogućnosti primjene mjerenja električnog otpora u određivanju stupnja oštećenja drvene stanice uzrokovanih djelovanjem mikroorganizama. Za svaku vrstu drveta potrebno je poznavati krivulju otpora kod zdravog drveta i krivulju otpora prema stupnju zaraženosti. Zdravo drvo određene sorte potpuno se osuši te se izlaže djelovanju određenog mikroorganizma. Uz praćenje porasta sadržaja vlage vaganjem. Usporedno se prate zdravi uzorci. U određenim vremenskim razmacima mjeri se otpor zdravog i zaraženog drveta s poznatim masenim udjelom vode. Na temelju razlike u otporu, utvrđuje se krivulja otpora zaraženog drveta. [18]



Slika 12: Dijagram mjerenja otpora zdravog i drveta koloniziranog s "Gloeophyllum trabeum"[18].

Ova mjerenja mogu dati korisne podatke pri analizi čvrstoće drvenih konstrukcija i dati podatke za postupke zaustavljanja daljnjeg propadanja drveta kao sirovine ili konstruktivnog elementa. Primjer rezultata prikazan je na slici 4.

3.3.6 Praćenje uvjeta okoline tijekom eksploatacije drvenih proizvoda i konstrukcija

Sadržaj vode u drvetu iznad 20%M ima različite štetne utjecaje na drvo, drvene proizvode i konstrukcije. [6]

- Znatno se povećava opasnost od napada insekata
- Stvaraju se povoljni uvjeti za razvoj štetnih mikro organizama (gljivica)
- Povećava se brzina korozije veznih elemenata (vijci, čavli, nosači...)
- Čestom promjenom vlažnosti drveta povećava se sklonost izvijanju. [6]

Vrijednost od 20% vlažnosti drveta u ravnoteži je sa 90%rH i 20°C okolnog zraka. (slika 4).

Za razvoj bakterija nije dovoljna najviša moguća zasićenost vlagom iz zraka već je potrebno dugotrajno (tjednima ili mjesecima) natapanje drveta vodom. [6].

Ispravan ili poželjan sadržaj vlage drveta ovisi o njegovoj sorti, namjeni ali i podneblju u kojem se koristi. prema dostupnim podacima, na primjeru SAD, Za toplija i vlažnija područja (Florida) dozvoljavaju se vrijednosti 08-13 % za interijer i 9-14 za eksterijer dok su za topla i suha jugozapadna područja (Kalifornija) preporučene vrijednosti 4-9 % za interijer i 7-12% za eksterijer. [6]

Mjerenje vlažnosti drveta električnim otporom omogućava brzu i dovoljno točnu provjeru stanja drveta obzirom na preporučena područja. Mjerenjem se lako i brzo mogu uočiti prekoračenja preporučenih vrijednosti kako bi na vrijeme otkrili uzroke povećanja i djelovali na sprječavanju mogućih šteta.

drveta tj. svojstvo opadanja električnog otpora s porastom temperature, Podatak o temperaturi mjerenog drveta važan za točnost mjernog rezultata.

Regresivnom analizom u nekim istraživanjima utvrđen je odnos električnog otpora u funkciji vlažnosti drveta kako slijedi:

$$\text{Log}[\log(R)+1]=a \times u+b \quad [7]$$

a i b su koeficijenti specifični za sortu – krivulju otpora drveta.

Temperaturna korekcija radi se prema jednadžbi:

$$\text{Log}(\log(R)+2)=-0.00147 \cdot T-0.0262 \cdot u-0.000158 T \cdot u+1.075 \quad [7]$$

Iz gore navedenog odnosa može se izračunati temperaturna korekcija mjerenja kada je poznata krivulja otpora sorte pri temperaturi 20°C

$$uk = - \frac{0.00147 T \ln(10) + \ln(\exp(a u - m_{\text{jer}} \ln(10)) + b \ln(10)) + 1 - 1.075 \ln(10)}{\ln(10)(0.000158 T + 0.0262)} \quad [7]$$

Gdje je:

u_{kor} temperaturno korigirani sadržaj vode (%)

u_{mjer} rezultat očitani s mjernog instrumenta bez automatske temperaturne korekcije

T temperatura drveta (°C)

a,b konstante određene sorte drveta [7]

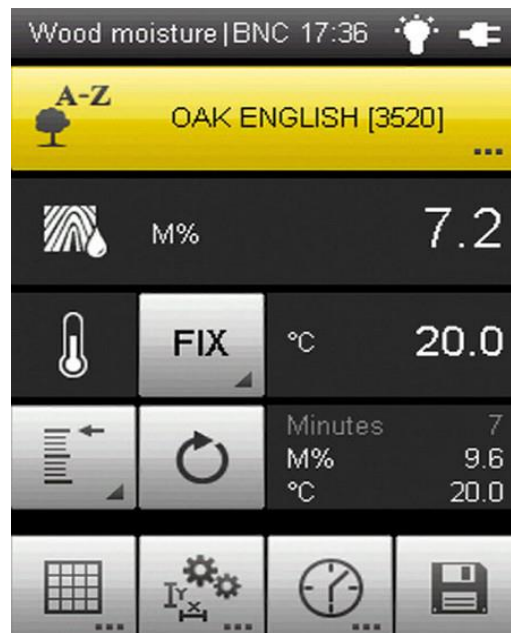
U literaturi se može pronaći podatak da je temperaturna korekcija oko 0.1 -0.15/ mjernih jedinica/°C kada je temperatura mjerenog drveta drugačija od 20°C. [7]

4.2 Točnost vlagomjera i mogući utjecaji na mjerni rezultat

Točnost vlagomjera uvelike ovisi o krivulji otpora za određenu sortu drveta. Pored toga utjecaj ima i točnost mjerenja temperature uzorka. Prema istraživanjima [7] koje je provedeno nad 16 vlagomjera, u intervalu pouzdanosti 95% utvrđena je točnost mjerenja od ±1.5 do ±2.5% mjernih jedinica (M%) što je bolje od točnosti kapacitivnih vlagomjera gdje se vrijednosti kreću u području od ±3.0% do ±5.0% u istom istraživanju [7].

4.2.1 Utjecaj krivulje otpora

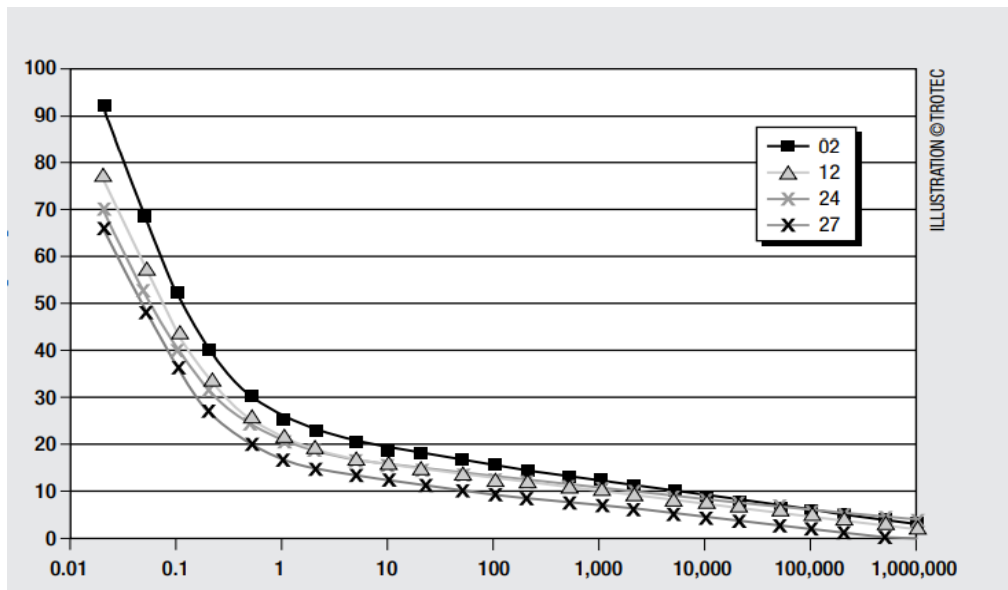
Vrlo važno svojstvo kvalitetnog vlagomjera jesu tvornički unesene krivulje otpora sorte drveta. Krivulja otpora drveta mora se odabrati ručno prije svakog mjerenja gdje mjeritelj mora znati ili prepoznati koje drvo mjeri. Uz vlagomjere se isporučuju tiskane tablice drvnih sorti sa oznakama krivulja a noviji vlagomjeri imaju sučelje gdje se krivulja unosi odabirom naziva drveta na zaslonu instrumenta (Trotec T3000)



Slika 15: Sučelje instrumenta Trotec T3000 s internom bazom krivulja otpora po sortama [2].

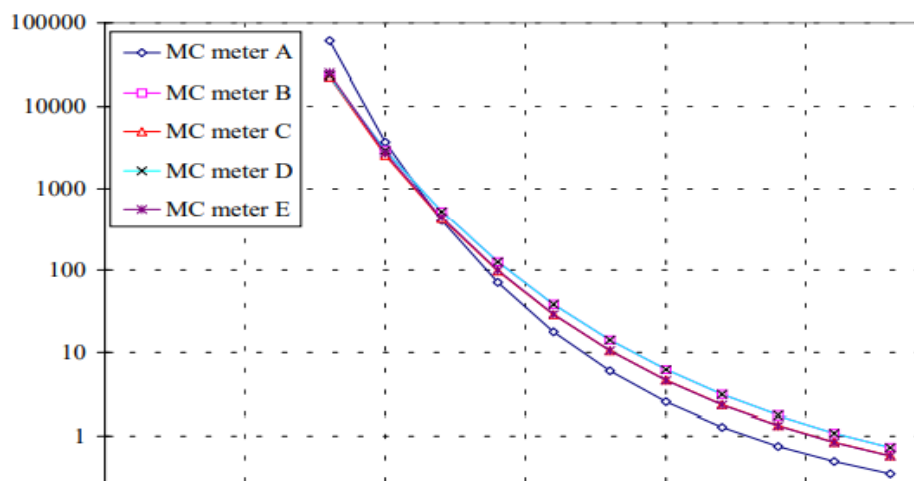
Gornja slika prikazuje izgled zaslona pri mjerenju vlage drveta metodom električnog otpora. U gornjem dijelu zaslona vidimo prikaz odabrane sorte (Engleski hrast) i redni broj sorte u internoj pohrani instrumenta. Na zaslonu je i temperatura uzorka (drveta) koja se na ovom uređaju može unijeti ručno ili uzeti sa priključenog PT100 senzora. Mogućnost ručnog unosa temperature je od velike koristi obzirom da nam tada nije potrebna dodatna temperaturna sonda a možemo se poslužiti drugim načinima mjerenja temperature (pirometar, termografija, dubinske sonde...). Ručnim unosom temperature mjerenja možemo pratiti promjenu rezultata- prikazane vrijednosti vlage što olakšava i definiranje temperaturne korekcije instrumenta prema eksperimentu **4**. Obzirom da današnja elektronska tehnologija omogućuje precizno mjerenje otpora, upravo će krivulje otpora za svaku specifičnu sortu drveta odrediti točnost mjerenja.

Istraživanja su pokazala da neka sredstva za dubinsku zaštitu drveta mogu znatno izmijeniti električne karakteristike sorte što se mora uzeti u obzir kod mjerenja [19].



Slika 16: Sadržaj vode kao funkcija izmjenjenog otpora i krivulje otpora za sorte 02, 12, 24, 27 pri temperaturi 20C za vlagomjer Trotec T2000 [3].

Na slici 16 na y osi nalaze se vrijednosti sadržaja vode, a na x osi je električni otpor [MOhm]. Iz grafikona se može iščitati da je kod nekih sorti otpor reda GOhm kod 4% sadržaja vode.



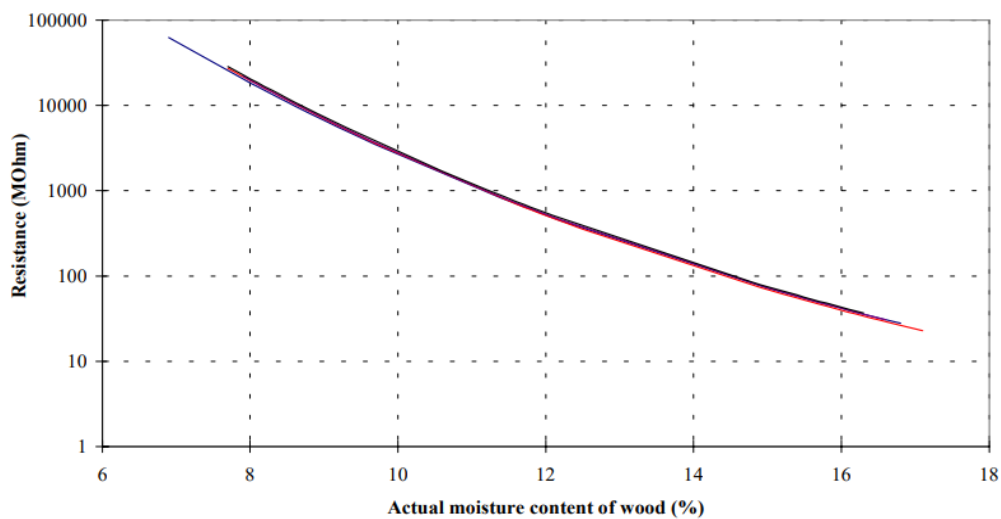
Slika 17: Mjerni rezultati kod različitih instrumenata za isti otpor i vrstu (jela) [7].

„Zbog različitih krivulja otpora kod različitih proizvođača, biti će različiti rezultati mjerenja“ [7] str.14 kao što se da iščitati iz podataka na slici 11.

Neka istraživanja [21] dokazala su da izlaganje drveta temperaturi od 82°C i više, može poremetiti krivulju otpora tako da očitavanje vlagomjera kod mjerenja vlažnosti takvog drveta pokazuje od 0.5 do 4.5%M više od stvarne vrijednosti. Ovakvim temperaturama ponekad može biti izloženo drvo u sušarama.

4.2.2 Utjecaj udaljenosti elektroda na mjerni rezultat

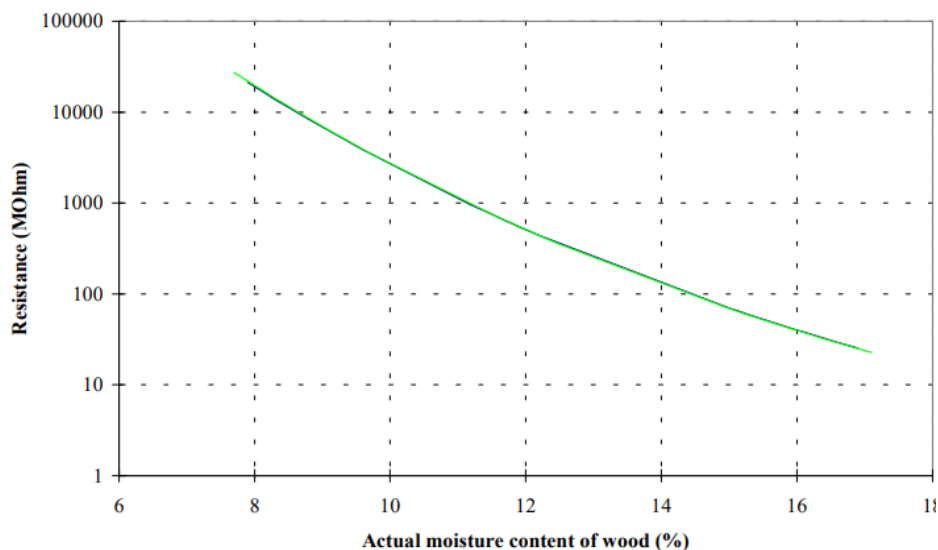
Različiti vlagomjeri imaju različite udaljenosti između dvije elektrode. Istraživanja su pokazala da udaljenost između elektroda ne utječe na mjerni rezultat “ [7] Međutim, treba uzeti u obzir da se između dvije elektrode mogu nalaziti anomalije u drvetu kao što su šupljine, trulež ili različiti omjeri srčike i bjelike te će tada ove pojave imati utjecaj na el.otpor i mjerni rezultat. Upravo se ova svojstva koriste kod električne tomografije ili procjene zahvaćenosti mikro organizmima [18],



Slika 18: Utjecaj udaljenosti elektroda na mjerene vrijednosti [7].

4.2.3 Utjecaj smjera elektroda prema godovima na mjerni rezultat

Tijekom istraživanja, u literaturi su pronađeni različiti podaci o utjecaju položaja elektroda u odnosu na godove na mjerni rezultat Samuel V.; Zelinka, Samuel L. (2010) 4-15 navode: „Provodnost drveta također ovisi o temperaturi, kutu godova i topivim solima...““provodljivost je veća uzduž godova nego poprečno..““Dok [7] i [12] mjerenjima dokazuju da nema utjecaja smjera mjerenja na mjerni rezultat to jest da je utjecaj zanemariv.



Slika 19: Dijagram odstupanja mjerene i stvarne vrijednosti obzirom na smjer mjerenja [7].

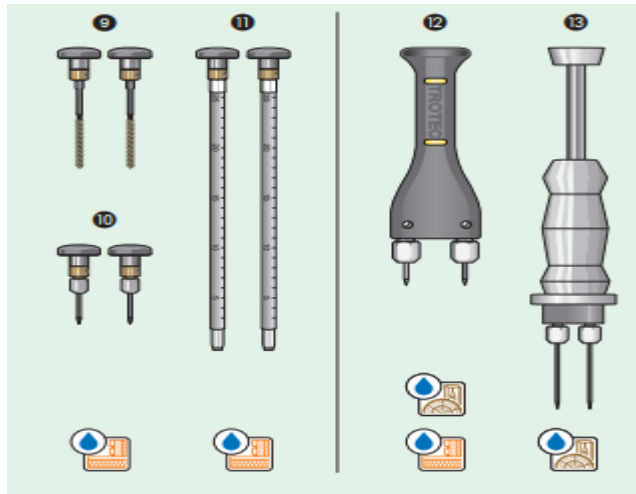
Na gornjoj slici vidljivo je da su krivulje otpora identične za različite smjerove mjerenja. U nastavku ovog rada eksperimentom smo pokušali potvrditi ovu tvrdnju.

4.3 Instrument Trotec T2000

Instrument Trotec T2000 je višenamjenski elektronski uređaj za mjerenje više veličina uz primjenu odgovarajućih mjernih nastavaka - sondi. Trotec 2000 mjeri: temperaturu zraka, vlažnost zraka s kapacitivnim senzorom, temperaturu površine s PT100 senzorom, vlažnost drveta i mineralnih materijala kapacitivnom i metodom električnog otpora, mjerenje vlažnosti mineralnih poroznih materijala ultrazvučnom metodom.

4.3.1 Mjerenje sadržaja vode drveta instrumentom Trotec T2000

Za mjerenje vlažnosti metodom električnog otpora priložene su različite drške i mjerne elektrode, ovisno o vrsti materijala i željenoj dubini mjerenja. Za mjerenje vlažnosti drveta može se koristiti drška za prihvat čavlastih izmjenjivih elektroda dubine do 40mm a za dublja mjerenja koristi se drška s udarnim utegom i elektrodama do 120 mm. Postoje i posebno duge elektrode za mjerenje vlažnosti rasutih materijala kao što su žitarice i piljevina.



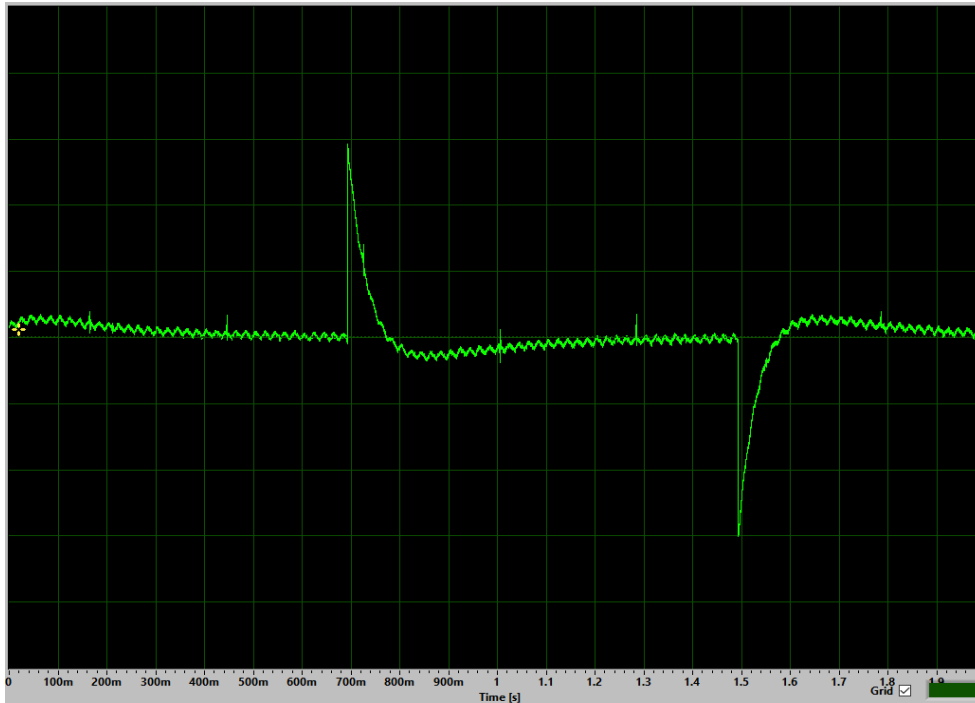
Slika 20: Elektrode za mjerenje vlažnosti metodom el. Otpora uz instrument T2000 [2].

Pri mjerenjima opisanim u ovom radu koristili smo jednostavnu dršku s čavlastim elektrodama duljine 12 i 20 mm za mjerenja dubine 7 i 20 mm.

Instrument posjeduje tvornički programirane - upisane krivulje za više od 2000 sorti drveta koje se nalaze u 24 grupe. Odabir grupe vrši se ručno u izborniku instrumenta a prema priloženim tiskanim tablicama. Novija verzija instrumenta (Trotec 3000) posjeduje upisane sorte drveta u samom instrumentu, pregled i odabir sorte se obavlja putem sučelja instrumenta te nije potrebna tiskana tablica.

4.3.2 Električni parametri mjerenja instrumentom T2000

Nisu pronađeni podaci o električnim izlaznim parametrima mjerenja stoga smo priključili elektrode vlagomjera na analogni i digitalni voltmetar s ciljem određivanja napona mjerenja. Analognim instrumentom je opaženo da napon varira u kratkim intervalima (skokovi kazaljke instrumenta) a digitalnim instrumentom brzo su se izmjenjivale vrijednosti u području od -5 do + 5V. Ovim opažanjima pretpostavljen je impulsni oblik izlaznog napona te je osciloskopom sniman izlazni signal.



Slika 21: Oblik izlaznog napona na mjernim elektrodama T2000 – Winscope. (Autor).

Izgled izlaznog signala potvrdio je sumnje. Izlazni signal daje impulse napona oko 6V ukupnog trajanja manje od 0.1s i periodom od 0.8s. Impulsi su naizmjenično invertirani (+/-6V). Sinusoidalni signal vidljiv na slici 17 potječe od mrežnog šuma 50Hz. Neki autori [20]. primjenili su metode mjerenja električnog otpora drveta izmjeničnom strujom frekvencije 1000 Hz i napona. Možemo pretpostaviti da razlog primjene izmjeničnih struja -impulsa pri mjerenju električnog otpora drveta leži u činjenici da električni naboj kroz vlažno drvo prenose slobodni ioni. Ukoliko bi dugotrajno bio narinut istosmjerni električni napon, došlo bi do migracije iona iz područja anode u područje katode [17] što bi kroz vrijeme poremetilo koncentracije slobodnih iona oko elektroda a samim time izmijenilo otpor i tok struje kroz drvo. To će dovesti do krivog očitavanja instrumenta kao manje vlažnosti od stvarne vrijednosti.

4.3.3 Temperaturna korekcija

Instrument T2000 automatski izračunava temperaturnu korekciju mjerenja prema tvornički programiranoj krivulji sorte i podacima s ugrađenog temperaturnog osjetnika ili vanjskom PT100 sondom koja se priključi na instrument. Mjerenje vanjskom PT100 sondom puno je praktičnije od korištenja ugrađenog senzora jer omogućava mjerenje temperature drveta dok ugrađeni osjetnik mjeri temperaturu instrumenta. Ukoliko

temperatura instrumenta i mjernog uzorka nije ista, rezultat neće biti odgovarajući. U praksi nije uvijek moguće imati istu temperaturu uzorka i instrumenta što znatno otežava točno mjerenja, što će detaljnije biti promotreno i objašnjeno u nastavku ovog rada.

4.3.4 Postupak mjerenja sadržaja vlage drveta

Nakon priključenja vodiča s odgovarajućim elektrodama i uključivanja instrumenta, pokrećemo sučelje sa dvije prikazane vrijednosti: temperaturom (interni senzor se aktivira automatski ukoliko PT100 sonda nije priključena) i vlagom. Temperatura se prikazuje u Celzijevim stupnjevima a sadržaj vlage u masenom omjeru (%) prema jednadžbi:

$$u = \frac{m \text{ vode}}{m \text{ drveta}} * (100\%)$$

Gdje je:

u - maseni udio vode u drvetu koji se često u literaturi označava sa MC (Moisture content)

m vode - masa vode u drvetu, u gramima

m drveta - masa potpuno suhog drveta.

U literaturi na engleskom jeziku ovakvo stanje potpuno suhog drveta uglavnom se naziva *Oven dry wood* jer u svakodnevici drvo ne može biti potpuno suho zbog svojstava apsorpcije vlage iz zraka - *ravnotežni sadržaj vode ili equilibrium moisture content (eng.)*.

Protokol mjerenja vlage drveta instrumentom Trotec T2000

- Odabir odgovarajuće ručke i ubodnih elektroda, ovisno o dubini mjerenja.
- Priključenje ručke na uređaj
- Paljenje uređaja
- Odabir sorte drveta
- Priključenje PT100 sonde(opcija)
- Aplikacija ubodnih elektroda u drvo
- Očitavanje mjernog rezultata nakon nekoliko sekundi

Proizvođač vlagomjera navodi da je najveća točnost mjerenja leži u području između 6-28% ali podaci o točnosti instrumenta nisu priloženi.

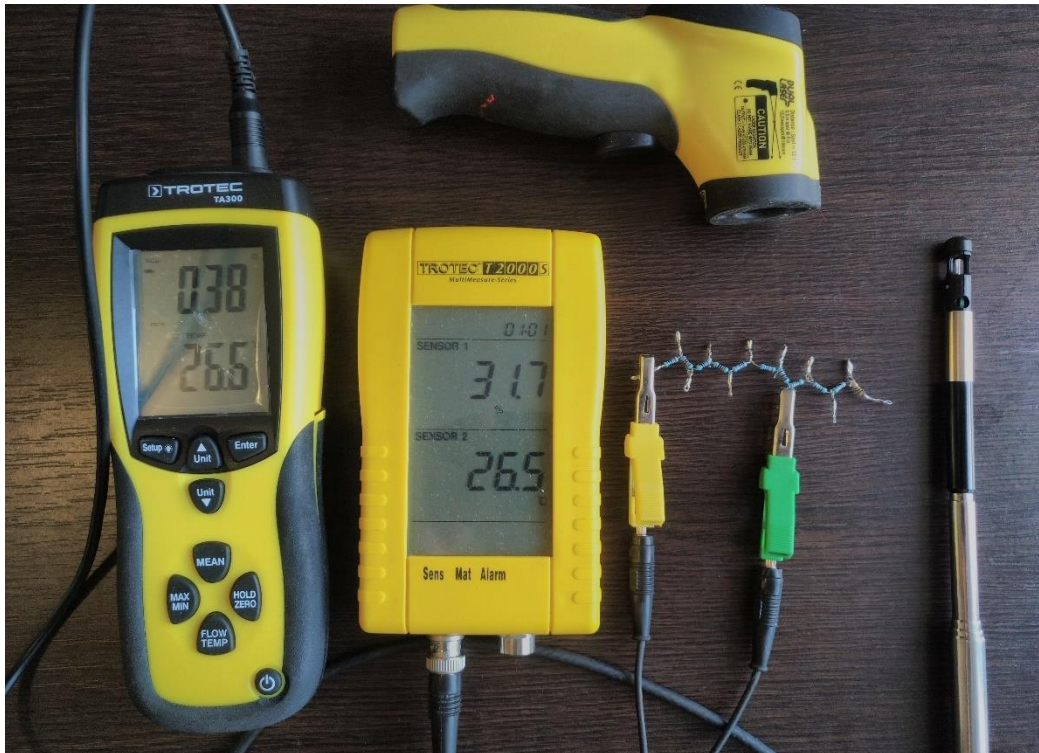
4.3.5 Ispitivanje temperaturne korekcije instrumenta t2000

Kako je navedeno, drvo ima negativni temperaturni koeficijent što znači da električni otpor opada s porastom temperature za istu sortu i sadržaj vlage. Kvalitetniji vlagomjeri sami izračunavaju temperaturnu korekciju prema tvorničkim postavkama a podaci o temperaturi unose se ručno ili automatski putem ugrađenih termometara ili sondi. Ovim eksperimentom pokušati ćemo dokazati različite rezultate mjerenja pri različitim ulaznim temperaturama instrumenta za poznate otpore.

Za poznate otpore uzeli smo ugljene otpornike od 10, 20, 300 i 1000 k Ω te ih spojili u seriju u koracima 20, 20, 20, 100, 100, 100, 300, 300, 300, 1000k Ω . Ovakav slijed otpornika izabran je na manjoj, početnoj strani prema dosadašnjim spoznajama iz ovog rada o otporu kod zasićenja ($10^3\Omega$) a na većoj strani zbog očekivanog oblika asimptote na grafu.

Prvo mjerenje obavljeno je na stabilnoj temperaturi okoline. Termo higrometrom uspoređene su vrijednosti temperature zraka i ugrađenog termometra vlagomjera.

Praćene su vrijednosti za postavke - krivulje otpora 12 (hrast, bukva) i 1 (jela). Redom su priključeni otpornici od najmanje vrijednosti 20k Ω do najveće vrijednosti 2260k Ω gdje je u svakom mjerenju dodan jedan slijedeći otpornik. Rezultati su zapisani na papir a potom uneseni i obrađeni u programima Word i Excell. Prvo su mjerene vrijednosti pri temperaturi 27°C za obje sorte a potom na 12°C za obje krivulje.



Slika 22: Ispitivanje utjecaja temperaturne korekcije Trotec T2000 (Autor).

Na gornjoj slici prikazani su instrumenti korišteni pri mjerenju i serijski spoj otpornika Pored vlagomjera T2000 za praćenje temperature okoline instrumenta (hladnjaka), korišten je termo anemometar Trotec TA300 i pirometar. BP.... Otpornici su serijski povezani nizom po veličini kako je navedeno u tablici na slici 19. Prvo mjerenje obavljeno je na stabilnoj temperaturi okoline. Termo higrometrom uspoređene su vrijednosti temperature zraka i ugrađenog termometra vlagomjera. Za drugo mjerenje bilo je potrebno dovesti osjetnik temperature instrumenta na nižu temperaturu i ponoviti mjerenje istim redoslijedom. Obzirom da se osjetnik nalazi u kućištu instrumenta, instrument je ostavljen u hladnjak na temperaturu 12°C.

Temperatura hladnjaka mjerena je termometrom TA300. Mjerenje otpora započelo je kada je temperatura na zaslonu vlagomjera odgovarala temperaturi termometra. Ponavlja se postupak mjerenja poznatih otpora slijedom kao pod 1, podaci se zapisuju, unose i obrađuju u programu Excell. Rezultati mjerenja i opažanja opisani su u nastavku.

4.3.6 Mjerenje vlažnosti ogrjevnog drveta

Mjerenje vlažnosti bukove metrice obavljeno je na mjestu uzimanja uzoraka. Korišten je vlagomjer T2000 s ugrađenim senzorom temperature. Za mjerni uzorak nasumično su izabrane dvije bukove metrice iz nepokrivenog sloga ogrjevnog drveta. Drvo je posječeno u veljači 2020. godine, a debla su odmah izrezana u metricu i dopremljena na mjestu mjerenja. Od sječe do mjerenja proteklo je 7 mjeseci. Slog je izložen atmosferskim utjecajima, djelomično nadsjenjen krošnjama. Jedna čeona strana sloga okrenuta je prema jugoistoku a druga strana prema sjeverozapadu te je uvijek u sjeni. Promatrati ćemo vlažnost suncu izložene i osjenjene strane metrice.



Slika 24: Mjerenje vlage bukove metrice. (Autor).



Slika 23: Mjerenje vlage svježeg odsječka 30 mm.

Nakon mjerenja vlažnosti obje strane oba uzorka, motornom pilom skraćujemo jedan uzorak za 30 mm. Ponovno mjerimo vlagomjerom i ohm metrom na novoj površinu presjeka. Rezultati se zapisuju i biti će naknadno obrađeni i protumačeni. Ponovno se skraćuje isti uzorak za 25 mm a taj odsječak koristiti će u daljnjim opisima. Za mjerenje površinske temperature koristi se Termo pirometar Trotec BP20.

Univerzalnim mjernim instrumentom izmjeren je električni otpor preko elektroda vlagomjera a rezultat je dokumentiran i naknadno obrađen.

4.4 REZULTATI MJERENJA

4.4.1 Rezultati mjerenja utjecaja temperaturne korekcije vlagomjera Trotec T2000

MJERENJE JELA (1) 27-12								
br.mjer.	Ti (°C)	R (kΩ)	Ti °C	u% (27°C)	Δu% T1T2	u% (12°C)	% razlike	
1	27	20	12.2	86.5	9.5	96	9.90	
2	27	40	12.2	70	8	78	10.26	
3	27	60	12.2	60.6	6.4	67	9.55	
4	27	160	12.2	41.4	4.6	46	10.00	
5	27	260	12.2	34.9	4.5	39.4	11.42	
6	27	360	12.2	31.6	4.2	35.8	11.73	
7	27	660	12.2	26.5	3.7	30.2	12.25	
8	27	960	12.2	24.3	3.5	27.8	12.59	
9	27	1260	12.2	23.2	3.3	26.5	12.45	
10	27	2260	12.2	21.2	3.1	24.3	12.76	

Slika 25: Mjerenje utjecaja temperaturne korekcije na rezultat (Autor).

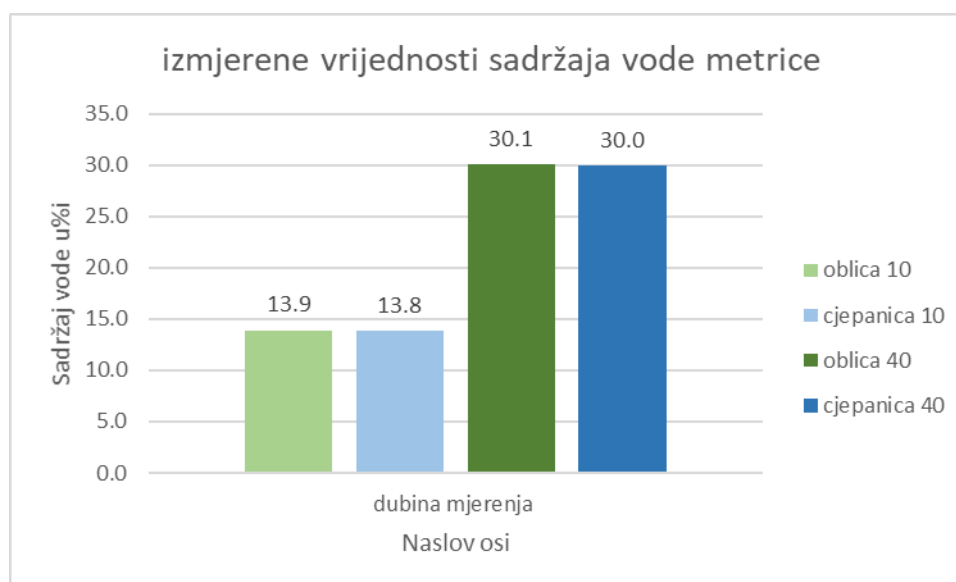
Iz podataka u gornjoj tablici i grafikonu vidljiv je utjecaj temperaturne korekcije instrumenta na mjerni rezultat za poznati otpor. Za razliku temperature od 15°C, razlika u mjerenoj vrijednosti je 3.1% što je više od 12% odstupanja. Zanimljivo je primijetiti da postotak odstupanja opada sa otporom. Iz ovog instrumenta možemo zaključiti da ugrađeni temperaturni osjetnik instrumenta Trotec T2000 nije pouzdano rješenje osim u uvjetima gdje su uzorak i instrument na istoj temperaturi što u praksi nije uvijek slučaj. Na primjer, ukoliko instrument koristimo u sušarama drveta gdje je temperatura najmanje 50°C, morali bi čekati izjednačenje temperature instrumenta s drvetom, sličan je slučaj i kada mjerimo vani po hladnom vremenu. Praktično rješenje ovog problema je ili imati vanjsku PT100 sondu koja trenutno mjeri temperaturu drveta ili koristiti vlagomjer sa ručnim unosom temperature koju mjerimo posebnim termometrom.

4.4.2 Mjerenje vlage ogrjevnog drveta

Iznosi mjerenih vrijednosti sadržaja vlage bukove metrice (u %)								
sunčano					sjena			
dubina mjerenja (mm)								
10		40		10		40		
r.b.	oblica	cjepanica	oblica	cjepanica	oblica	cjepanica	oblica	cjepanica
1.	13.9	13.9	30.1	30	14.1	14	30.2	30.1
2.	13.8	13.7	30	29.9	14	13.9	30	30.2
3.	14	13.8	30.2	30.1	14	14.1	29.9	30
srednja v.	13.9	13.8	30.1	30.0	14.0	14.0	30.0	30.1

Slika 26: Rezultati mjerenja sadržaja vlage ogrjevnog drveta (Autor).

Iz gornje tablice je vidljivo da su rezultati po istoj dubini mjerenja za oblicu i cjepanicu te za osunčanu i osjenjenu stranu u granicama $\pm 0.2\%$ što je znatno manje od ustanovljene mjerne greške vlagomjera ($\pm 2.5 \dots \pm 4.0$) iz istraživanja [7]. Znatno odstupaju rezultati mjerenja između dvaju dubina, 10 i 40mm podjednako kod oblice i cjepanice, osunčane i zasjenjene strane. Kako se vidi na grafu ispod:



Slika 27: Grafički prikaz vrijednosti vlage o dubini mjerenja (Autor).

Kod mjerenja vlažnosti ogrjevnog drveta dubina mjerenja ima značajan utjecaj. Vrijednosti mjerenja su više nego dvostruke na dubini 40mm

Iz tablice vidljivo je da oblik i osunčanost ne utječu značajno na mjerni rezultat. Dubina mjerenja bitno utječe na mjerni rezultat i svakako ju treba uzeti u obzir pri odabiru mjernih elektroda ili pozicije mjerenja. Tijekom mjerenja uočen je problem utjecaja sunca na mjerenje; Mjerenje je obavljeno u jutarnjim satima, sunčeve zrake u kratkom su vremenu tijekom mjerenja (5 minuta) ugrijale površinu drveta na kojoj se mjerilo što se lako moglo očitati pirometrom. vlagomjer se isto tako naglo zagrijao na suncu te je ugrađeni termometar pokazivao vrijednosti više od 30°C iako je temperatura zraka bila oko 16°C. Nakon izrade odsječka na samo 25mm dubine, temperatura drveta bila je 12°C što znači da

Imali smo dakle 2 vrijednosti temperature koje su se znatno razlikovale od stvarne temperature na dubini mjerenja. U ovom slučaju bi mjerenje i sa vanjskom sondom dalo očitavanje površinske temperature koje ne odgovara temperaturi na dubini mjerenja. Iz ovog opažanja možemo zaključiti da bi trebalo izbjegavati mjerenje vlažnosti drveta koje je pod direktnim utjecajem sunca zbog mogućeg krivog očitavanja temperature a samim tim i krive temperaturne korekcije.

- Vrijednosti vlažnosti podjednake su za osunčanu i zasjenjenu stranu.
- Dubina mjerenja izrazito utječe na mjerenu vrijednost
- Instrument bez vanjske temperaturne sonde i bez mogućnosti ručnog unosa temperature nije praktičan za vanjska mjerenja.

4.4.3 Promatranje utjecaja smjera mjerenja na mjerni rezultat

Pod smjerom mjerenja podrazumijevamo položaj elektroda u odnosu na godove drveta.



Slika 30: Radijalni smjer

Slika 28: Tangencijalni smjer

Slika 29. Longitudinalni s. (Autor)

Gornje slike prikazuju mjerenja ovisno o položaju elektroda prema smjeru godova. Mjerena je vlažnost u zraku drveta hrasta, dimenzija d,š,v (mm): 70,50,25, prema DIN EN 13183-2. Instrument je bio podešen za krivulju 12 (europski hrast). Temperatura internog osjetnika instrumenta je bila 28.3-28.4°C a temperatura uzorka 28.2°C mjereno termo pirometrom Trotec BP20 iz čega možemo zaključiti da je temperatura instrumenta odgovara temperaturi uzorka.

Izvršeno je po 6 mjerenja za svaki smjer, podaci su upisani na papir a potom unešeni i obrađeni u programu MS Excell.

JELA, 10*60*20						
		RADIJALNO u (M%) T2000		TANGENCIJALNO u (M%) T2000		LONGITUDINALNO u (M%) T2000
Br.m.						odstupanje %M
1.		9.5		9.8		9.5
2.		9.3		9		9.2
3.		9.7		8.9		9.1
4.		9.5		9.7		9.8
5.		9.6		9.3		9.7
6.		9.4		10.3		9.5
Arit.sred.		9.5		9.5		9.47
						0.35

Slika 31: Utjecaj smjera mjerenja na mjerni rezultat (Autor).

Iz gornje tablice je vidljivo da smjer mjerenja (položaj elektroda obzirom na godove) nema značajan utjecaj na mjerni rezultat što je u skladu sa istraživanjima [7], [12].

Treba napomenuti da smjer označava položaj elektroda prema godovima a ne smjer struje koji je okomit na smjer elektroda.

4.4.4 Mjerenje vlažnosti drva dugotrajno izloženog sadržaju morske vode

Ovim mjerenjem pokušati će se dokazati utjecaj dugotrajne izloženosti drveta morskoj vodi na rezultate mjerenja sadržaja vlage metodom električnog otpora. Za ovo mjerenje odabrani su uzorci iste sorte drveta (hrasta) s mjesta remonta drvenog motornog broda Tomislav Pula. Uzeti su odbačeni komadi starog hrastovog drveta od oplata trupa broda i komadi novog hrastovog drveta koje se koristilo prilikom popravka. Prema iskazu prisutnih kalafata, starost zamijenjenog, izvornog drva je oko 60 godina a starost novog zamjenskog drva je oko 4 godine. Komadi odabrani za uzorke stajali su na tlu, potpuno izloženi atmosferskim utjecajima.



Slika 32: Komadi novog i starog drveta-oplate broad (Autor).

Od većih komada drveta otpiljeni su uzorci debljine oko 2.5cm i mase manje od 100g obzirom na mjerni opseg mikro vage. Uzorci su izvagani te je obavljeno mjerenje vlagomjerom Trotec T2000 s čavlastim elektrodama duljine 20 mm i dubinom mjerenja 7 - 8 mm. Rezultati mjerenje su upisani u tablicu. Potom su uzorci stavljeni u pećnicu na temperaturu 104 ± 2 °C. Svakih 2 sata uzorci su vađeni iz pećnice i vagani. Rezultat je bilježen u tablicu. Ovaj postupak ponavlja se dok promjena mase dva uzastopna mjerenja ne bude manja od 0.1%. Od početne mase uzorka oduzima se konačna-suha masa drveta a razlika u masi je početni stvarni sadržaj vode.

$$Mv = \frac{Mdv}{Mds}$$

Tada prema jednadžbi postotnog udjela:

$$u = \frac{Mv}{Mds} * (100\%)$$

Izračunavamo stvarni sadržaj vode prije sušenja i rezultat uspoređujemo s rezultatima početnog mjerenja vlagomjerom



Slika 33: Uzorci drveta kod prvog mjerenja vlage i mase (Autor).

Na slici 28 vide se komadi uzeti sa lokacije remonta broda (gore lijevo) te uzorci za eksperiment i mikro vaga točnosti ± 0.01 gram, razlučivosti prikaza 0.01 gram s područjem mjerenja do 100 grama.



Slika 34: sušenje uzoraka uz praćenje temperature (Autor).

Na gornjoj slici prikazan je termometar za praćenje temperature isušivanja i uzorke u pećnici. Kod pećnica s ventilatorom postiže se brže isušivanje i postizanje suhe mase. Prema EVS-EN 13183-1:2002 standardu, za drvo sa visokim sadržajem hlapljivih tvari (smolama) preporučuje se sušenje u vakuumu (<100 Pa) na temperaturama $<50^{\circ}\text{C}$ [20]. I na ovom eksperimentu pokazao se značaj dubine mjerenja na mjerni rezultat.

Očigledna je razlika u vlazi između prvog i drugog odsječka gdje je prvi odsječak bio otvoren prema zraku prije uzimanja uzoraka te je voda tijekom stajanja uzoraka na otvorenom isparila do dubine drugog odsječka (25 mm).

Tijekom sušenja a što se vidi iz tablice ispod, primijećeno je da se novo drvo sušilo gotovo dvostruko brže od starog drveta iako su debljine bile približne unutar ± 2 mm.

UTJECAJ SOLI U DRVU NA MJERENJE VLAGE EL.OTPOROM							
UZORAK		DS1	DS2		D1		DN2
POČETNA MASA M0		86.86	83.6		78.37		84.98
OSUŠENA MASA MS		74.35	74.52		69.59		74.53
MASA VODE M0-Ms (g)		12.51	9.08		8.78		10.45
SADRŽAJ VODE u (%)		16.8	12.2		12.6		14.0
MJERENO VLAGOMJEROM		23.1	15.9		12		13.2
RAZLIKA "u" (M%)		-6.3	-3.7		0.6		0.8
ODSTUPANJE		-27.2	-23.4		5.1		6.2

Slika 35: Utjecaj soli na mjerenje sadržaja vode u drvetu (Autor).

Iz gornje tablice jasno se vidi razlika između rezultata mjerenja vlagomjerom i rezultata dobivenih gravimetrijskom metodom. Kod uzoraka koji su duže vrijeme bili izloženi djelovanju morske vode, odstupanja su do 27% mjerene vrijednosti dok su kod novog, ne zasoljenog drveta odstupanja 5-6%.

Postotni udio odstupanja raste sa stvarnim sadržajem vlage u drvetu.

Iz gore navedenog možemo zaključiti da mjerenje vlage drveta duže vremena izloženog morskoj vodi ne daje pouzdane rezultate metodom električnog otpora.

5 ZAKLJUČAK

Drvo kao prirodan porozan materijal sadrži različite masene omjere vode kao živo stablo, poluproizvod, sirovina i gotov proizvod. Određivanje sadržaja vode drveta važan je tehnički i tehnološki podatak. Drvo provodi električnu struju zahvaljujući prisutnosti vode i slobodnih iona. Električna otpornost drveta u direktnoj je zavisnosti od sadržaja vode uz specifičnosti sorte. Matematički odnos električnog otpora i specifičnosti sorte-koeficijenta „a“ i „b“ naziva se krivulja otpora. Mjerenjem električnog otpora uz primjenu krivulje otpora dobijemo maseni udio vode u drvetu „u“(M%). Drvo ima negativni temperaturni koeficijent i stoga je potrebno provesti temperaturnu korekciju prema matematičkom modelu. Razlika temperature mjerenog uzorka utječe od ± 0.1 do ± 0.15 % apsolutne vrijednosti mjernog rezultata, za svaki 1°C odstupanja od referentne temperature 20°C .

Sadržaj vode u drvetu jednostavno se može mjeriti elektronskim uređajima-vlagomjerima. Većina vlagomjera automatski izračunava rezultat prema odabranoj pohranjenoj krivulji otpora i temperaturnoj korekciji. Praktičniji su vlagomjeri s vanjskom kontaktnom temperaturnom sondom kojom direktno mjerimo temperaturu mjerenog drveta ili s ručnim unosom vrijednosti temperature. Jednostavnije je koristiti novije vlagomjere sa pohranjenom bazom podataka sorti drveta.

Prema istraživanjima iz ovog rada, smjer mjerenja obzirom na godove ne utječe na mjerni rezultat ali položaj elektroda obzirom na oblik i dimenzije uzorka te dubina mjerenja može utjecati na rezultat.

Standard EN 1383-2:2002. definira pravila za mjerenje vlage drveta metodom električnog otpora. Referentna metoda je gravimetrijsko određivanje sadržaja vode u drvetu zadana standardom EN 1383-2:2002

Mjerenje vode-vlage drvenih materijala primjenom metode električnog otpora manje je točna ali je znatno praktičnija i brža metoda od referentne gravimetrijske metode.

LITERATURA

- [1] Šošić I., Serdar V. "Uvod u statistiku", Zagreb, 2009.
- [2] Trotec „T2000 Wood species list, Version 2.0“ Heinsberg, 2004.
- [3] Trotec „T2000 Praxishandbuch“ Heinsberg, 2004.

IZVORI S INTERNETA

- [4] Antolović A. (2010), kemija drva, skripta iz predmeta kemija drva, Zagreb 2010., <http://www.mojfaks.com/skripte/sumfak/kemija-drva>, 19.06.2020.
- [5] Brischke, C. Simon S., Meyer L.-Veltrup and Emmerich L: Holzforschung | Volume 73: Issue 5, Changes in sorption and electrical properties of wood caused by fungal decay, DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0171> | Published online: 25 Dec 2018., 21.06.2020.
- [6] Carll C & Wiedenhoef C.A. (2009) Moisture Related Properties of wood and Effects of Moisture on Wood and Wood Products., https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2009/fpl_2009_carll001.pdf, 21.06.2020.
- [7] Forsen, H., & Tarvainen, V. (2000). Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. (Revised ed.) VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Publications, No. 420 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2000/P420.pdf>, 22.06.2020.
- [8] Glass, Samuel V.; Zelinka, Samuel L. 2010. Moisture relations and physical properties of wood. Wood handbook : wood as an engineering material: chapter 4. Centennial ed. General technical report FPL ; GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 4.1-4.19., https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_04.pdf, 12.06.2020.
- [9] Guyot A, Ostergaard KT, Lenkopane M, Fan J, Lockington DA. Using electrical resistivity tomography to differentiate sapwood from heartwood: application to conifers. Tree Physiol. 2013;33(2):187-194. <https://doi:10.1093/treephys/tps128>, 26.06.2020.
- [10] J. Chem. Soc., Faraday Trans., 1998,94, 223-226 Electrical properties of wood Determination of ionic transference numbers and electroosmotic water flow in PinussylvestrisL. (Scots pine) <https://doi.org/10.1039/A706066A>, 19.08.2020.
- [11] Jergović, I. (2016). Prilog istraživanju promjene gustoće cijepanog ogrjevnog drva obične bukve (Fagus sylvatica L.) uslijed prirodnog sušenja (Diplomski rad), <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:617346>, 28.06.2020.

- [12] J. Fernandez-Golfín¹, M. Conde García², M. Conde García¹, J. J. Fernandez-Golfín³, R. Calvo Haro¹, M. V. Baonza Merino¹ and P. de Palacios³ Curves for the estimation of the moisture content of ten hardwoods by means of electrical resistance measurements 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2112211-11429>, 02.07.2020.
- [13] Martin, T. Complex resistivity measurements on oak. Eur. J. Wood Prod. 70, 45-53 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0493-z>, 29.07.2020.
- [15] Skaar C. (1988) Electrical Properties of Wood. In: Wood-Water Relations. Springer Series in Wood Science. Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-73683-4_6, 12.07.2020.
- [16] Samuelsson A., CALIBRATION CURVES FOR RESISTANCE-TYPE MOISTURE METERS, Paper presented at 3rd IUFRO International Wood Drying Conference, Vienna, August 18-21, 1992, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1080039/FULLTEXT01.pdf>, 06.07.2020.
- [17] Simons, P.J., Spiro, M., & Levy, J. (1998). Electrical properties of wood Determination of ionic transference numbers and electroosmotic water flow in PinussylvestrisL. (Scots pine). Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 94, 223-226., <https://www.semanticscholar.org/paper/Electrical-properties-of-wood-Determination-of-and-Simons-Spiro/7f8d39cbfe1ec335b82af33c6f1e4c3ba404a4b9>, 19.07.2020.
- [18] Xu, H., Li, Q., Xu, Q., Bao, Z., Wang, L., & Xing, T. (2019). Effects of Brown-rot Decay on the Electrical Resistance of Wood and its Mechanism. Bioresources, 14, 6134-6145., <https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-Brown-rot-Decay-on-the-Electrical-of-and-Xu-Li/8cee377ba298735a4a27d2b5d059ae15050d8e1a#references>, 06.07.2020.
- [19] Konopka, A., Barański, J., Orłowski, K., and Szymanowski, K. (2018). "The effect of full-cell impregnation of pine wood (Pinus sylvestris L.) on changes in electrical resistance and on the accuracy of moisture content measurement using resistance meters," BioRes. 13(1), 1360-1371. DOI: [10.15376/biores.13.1.1360-1371](https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1360-1371), 06.08.2020.
- [20] EVS EN 13183-2: 2002-07 "Moisture content of a piece of sawn timber - Part 2: Estimation by electrical resistance method"; German version EN 13183-2: 2002, Issue date 2002-07, Original languages: German, <https://dx.doi.org/10.31030/9199968>, 25.08.2020.
- [21] Garrahan, P. (1988). Moisture meter correction factors for high temperature dimension lumber., https://www.researchgate.net/publication/267709485_MOISTURE_METER_CORRECTION_FACTORS_FOR_HIGH_TEMPERATURE_DIMENSION_LUMBER, 10.09.2020.

POPIS SLIKA

Slika 1 Živa stanica i drvno vlakno [4]	- 3 -
Slika 2 Skupljanje i deformacije različitih oblika drveta u odnosu na smjer godova [8]- 3 -	
Slika 3 Različiti stadiji zasićenja vodom drvne stanice [2]	- 4 -
Slika 4 Dijagram ovisnosti vlage drveta kao funkcija rel.vlažnosti i temperature zraka [8]	- 5 -
Slika 5 Prikaz zamišljenog vodiča s električnim i relevantnim fizičkim veličinama uz jednadžbu električne otpornosti https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_otpor (18.07.2020.)	- 6 -
Slika 6: Principijelna električna shema ohm metra, https://wiki.seg.org/wiki/Electric_resistivity_methods (18.08.2020.	- 7 -
Slika 7: Shema spoja mjerenja električnog otpora voltmetrom [7]	- 9 -
Slika 8: određivanje mjesta mjerenja prema DIN-EN-13183-2:2002 (Autor)	- 11 -
Slika 9: Grafički prikaz promjene volumena ogrijevnog drveta [11].....	- 13 -
Slika 10: Grafički prikaz rezultata mjerenja otpora stable [9]	- 14 -
Slika 11: Prikaz presjeka debla i instaliran uređaj za električnu tomografiju debla. - 15 -	
Slika 12: Dijagram mjerenja otpora zdravog i drveta koloniziranog s "Gloeophyllum trabeum"[18]	- 15 -
Slika 13: Mjerni instrument Trotec T2000 s mjernim elektrodama i sondama	- 17 -
Slika 14: Sučelje instrumenta Trotec T2000 - odabir krivulje otpora prema tiskanim tablicama	- 18 -
Slika 15: Sučelje instrumenta Trotec T3000 s internom bazom krivulja otpora po sortama [2].....	- 20 -
Slika 16:Sadržaj vode kao funkcija izmjerenog otpora i krivulje otpora za sorte 02,12,24,27 pri temperaturi 20C za vlagomjer Trotec T2000 [3].....	- 21 -
Slika 17: Mjerni rezultati kod različitih instrumenata za isti otpor i vrstu (jela) [7]. - 21 -	
Slika 18: Utjecaj udaljenosti elektroda na mjerene vrijednosti [7]	- 22 -

Slika 19: Dijagram odstupanja mjerene i stvarne vrijednosti obzirom na smjer mjerjenja [7]	- 23 -
Slika 20: Elektrode za mjerenje vlažnosti metodom el. Otpora uz instrument T2000 [2]	- 24 -
Slika 21: Oblik izlaznog napona na mjernim elektrodama T2000 – Winscope	- 25 -
Slika 22: Ispitivanje utjecaja temperaturne korekcije T2000	- 28 -
Slika 23: Mjerenje vlage svježeg odsječka 30 mm	- 29 -
Slika 24: Mjerenje vlage bukove metrice	- 29 -
Slika 25: Mjerenje utjecaja temperaturne korekcije na rezultat	- 30 -
Slika 26: Rezultati mjerenja sadržaja vlage ogrijevnog drveta	- 31 -
Slika 27: grafički prikaz vrijednosti vlage o dubini mjerenja	- 31 -
Slika 28: Tangencijalni smjer	- 33 -
Slika 29. Longitudinalni s.	- 33 -
Slika 30: Radijalni smjer	- 33 -
Slika 31: Utjecaj smjera mjerenja na mjerni rezultat	- 34 -
Slika 32: Komadi novog starog drveta-oplate broda	- 35 -
Slika 33: Uzorci drveta kod prvog mjerenja vlage i mase	- 36 -
Slika 34: sušenje uzoraka uz praćenje temperature	- 36 -
Slika 35: Utjecaj soli na mjerenje sadržaja vode u drvetu	- 37 -