

УТИЦАЈ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЕ НА САВОЈНИ МОДУЛ ЕЛАСТИЧНОСТИ БУКОВОГ ДРВЕТА^(*)

ЗДРАВКО ПОПОВИЋ

Извод: У овом раду саопштени су резултати који се односе на истраживања утицаја влажности и температуре на савојни модул еластичности. Сва истраживања су обављена испитивањем дрвета домаће букве (*F. sylvatica*). Истраживања су обављена под условима алтернације температуре (20-100°C) при константној влажности и алтернације влажности (0- v_{max}) при константној температури дрвета. Испитивања су обављена деловањем оптерећења у радијалном и тангенцијалном анатомском правцу.

Вредности модула еластичности, које су највеће код незагрејаног и потпуно сувог дрвета, се смање за око 4 пута приликом увећања влажности и температуре до горњих граница испитиваних интервала. Доказано је да модул еластичности стоји у функционалној зависности од хигроскопне влажности дрвета и од температуре влажног дрвета. Та зависност је линеарног облика. Модул еластичности се не мења са влажношћу изнад границе хигроскопности нити са температуром када је дрво суво.

Релативно посматрано, повећање влажности у хигроскопном подручју за 1% изазива смањење модула еластичности за 1,3 до 3,3% у зависности од температуре и анатомског правца. Интензитет утицаја температуре износи од 0,2 до 0,6% по 1°C, у зависности од влажности дрвета и анатомског правца.

Кључне речи: модул еластичности, влажност, температура, радијални и тангенцијални правац, буковина

THE EFFECTS OF MOISTURE CONTENT AND TEMPERATURE ON THE MODULUS OF ELASTICITY OF BEECH WOOD

Abstract: - Modulus of elasticity Beech Wood (*F. sylvatica* L.) under the different conditions of hydrothermal treatment was studied. The moisture content was observed in the range between 0% and maximum of moisture content, while temperature range was between 20 and 100°C. The MOE was observed in two anatomy direction: radial and tangential.

Determine the level of elasticity, relationship between different temperature, combination of moisture content and different conditions, will help us value the quality of Beech Wood and estimated the possibility process of bending solid wood, and that is the main reason of experiments and study. Results, established in very exactness regressive equations, shows us very clear the effect of moisture content on the MOE of wood. In principle, we can say that the main factor of changing MOE of wood is bond water, while the intensity of influence depend of the temperature of wood. Only at higher moisture content (up to 10%), the increasing temperature causing decrease of MOE.

Key words: modulus of elasticity, moisture content, temperature, beech wood

Др Здравко Поповић, ванр.проф. Шумарског факултета у Београду

^(*) Овај рад је финансиран средствима пројекта МНТ РС бр. 361005

1. УВОД

Основни задатак науке о дрвету и индустрије за прераду дрвета јесте да детаљно истражи и практично примени најрационалније технолошке поступке, у циљу што већег квантитативног, а нарочито квалитативног искоришћења дрвне сировине. У том контексту, веома значајно место заузимају и различити хидротермички третмани дрвета. Поред сушења дрвета, као најважнијег технолошког поступка у коме се користи, хидротермичка обрада се примењује и у другим случајевима у дрвној индустрији. На пример, у производњи фурнира, шперованог (везаног) дрвета и шибица, паре се или кувају трупци, фличеве и трупчићи да би се омекшало њихово ткиво, како би се потом лакше резали или љуштили. Затим, резана грађа неких врста дрвета се пари у циљу промене боје, стерилизације и спречавања појаве плесни и гљива. Дрво се затим, понекад, пари и пре природног или вештачког сушења у циљу убрзања сушења, потом, због уклањања напрезања изазваних процесом сушења, те због елиминисања неких грешака као што је колапс а делимично и витоперење. Дрво се у производњи савијеног намештаја, буради, спортских справа и сл. хидротермички припрема због његовог омекшавања односно повећања пластичности које, затим, омогућава савијање уз мањи утрошак енергије и мању појаву прскања комада. У последњих неколико година, дрво се хидротермички третира и у циљу производње тзв. термодрвета. Овај третман се, за разлику од претходних, обавља на врло високим температурама (између 150 и 250⁰С), а превасходно има за циљ побољшање природне трајности и отпорности дрвета, промену боје и повећање димензионалне стабилности.

Као мера еластичности дрвета, модул еластичности је једно од његових најважнијих својстава преко кога се може поуздано говорити о успешности примене хидротермичких третмана путем анализе интензитета и карактера њихових утицаја. У овом раду се, зато, детаљније истражује утицај температуре и влажности на модул еластичности дрвета букве. Истраживања су обављена на дрвету букве због тога што је то индустријски најважнија врста дрвета код нас, с једне стране, а с друге стране је то врста која врло добро реагује на све врсте хидро-термичких третмана који се у пракси примењују. Због тога су и резултати који су овде приказани врло значајни за праксу прераде, нарочито буковог дрвета. Модул еластичности је истраживан при напрезању на савијање што такође повећава практичну употребљивост добијених резултата.

2. ДОСАДАШЊА ИСТРАЖИВАЊА

Уобичајено је да се модул еластичности (МОЕ) дрвета одређује деловањем оптерећења на притисак, затезање и савијање. Ако су одређени у истом анатомском правцу и при истој влажности и температури, њихове вредности се међусобно много не разликују. Ко ех лер, већ 1924 године наводи за букву густине 0,66 g/cm³ у апсолутно сувом стању, вредност савојног модула еластичности од 8857 МПа у сировом стању влажности (62% влаге) код собне температуре. При овоме констатује да промена влажности само испод тачке засићености влаканаца тј. испод влажности од око

30%, изазива и промену модула еластичности, и то такву да се са 1% смањења хигроскопне влаге његова вредност повећава за 2%. Поређењем модула еластичности у апсолутно сувом стању са модулом еластичности у сировом стању он добија однос од 1,42:1. Vorreiter (1963), даје вредност МОЕ буковог дрвета густине $\rho=0,73 \text{ g/cm}^3$ и влажности 15%, од 16000 МПа, а буковог дрвета густине $\rho=0,64 \text{ g/cm}^3$, претходно хидротермички припремљеног (не каже се како) од 1780 МПа. Према Леонтиеву (1962), модул еластичности при статичком савијању код влажности веће од 30%, за дрво букве износи 9200 МПа при собној температури. Боровиков и Уголев (1965) за дрво *F. sylvatica* из јерменске ССР дају вредност савојног модула еластичности од 12900 МПа при влажности од 12% и температури 20°C, док за *F. sylvatica* из литванске области ССР та вредност износи 11400 МПа за исте услове.

У публикацији FPL (1989) се дају вредности савојног модула еластичности за америчку буквину у сировом стању у износу од 9787 МПа, а при влажности од 12% у износу од 12200 МПа, све при собној температури. Надаље се каже, да једино повећање садржаја везане влаге у дрвету изазива смањење МОЕ, док је он непромењен у сировом подручју влажности. Такође, констатује се да релативно повећање модула еластичности, кога дрво има при влажности од 12%, у случају када се влага смањи до 6% износи 9%, док у случају повећање влаге до 20%, МОЕ опадне за 13%. Ови подаци се односе на дрво температуре 20°C, при чему се не помиње о којој врсти дрвета се ради. Уопштено се каже да загревање дрвета изазива смањење МОЕ а његово хлађење повећање истог. При овоме, ако је влага дрвета константна и ако су температуре ниже од 150°C, МОЕ стоји у приближно линеарној зависности од температуре дрвета. Hoadley (2000) констатује да повећање влажности испод тачке засићености жице изазива смањење савојног МОЕ. Утицај је такав да је његова вредност код границе хигроскопности око 60% вредности коју дрво има у апсолутно сувом стању. При овоме, зависност модула еластичности од хигроскопне влажности је линеарног карактера. Интензитет тог утицаја је такав да 1% повећања везане воде у дрвету има за последицу смањење МОЕ од 2%. По питању утицаја температуре констатује се да њено повећање делује негативно на механичка својства дрвета, тако да у подручју “природних” температура, сваких 10°F повећања температуре изазива смањење механичких својстава за 2 до 5%. Овај ефекат је реверзибилан, што значи да се вредности механичких својстава враћају на вредности које су имале на собној температури, после хлађења. Високе температуре, каже се даље, могу изазвати трајно смањење механичких својстава, чија је величина зависна од нивоа температуре, времена излагања дрвета високим температурама, извора температуре, влажности дрвета и сл.. На пример, неке врсте дрвета са ниским садржајем влаге, ако се тренутно загреју у сувом ваздуху до близу температуре паљења, и одмах охладе, не показују никакво смањење механичких својстава. Међутим, држање влажног дрвета у врућој води на температури близу 100°C може изазвати извесно трајно смањење неких механичких својстава. Нико не може тачно предвидети, наставља се, у којој мери ће се ова својства смањити услед оваквог начина загревања.

Kollmann (1984), наводи да изнад тачке zasiћености влаканаца, слободна вода испуњава крупне капиларе трахеја, трахеида и других анатомских елемената дрвног ткива, па тиме не изазива никакве промене чврстоће и еластичних својстава дрвета. Испод тачке zasiћености влаканаца утезање или бубрење проузрокују повећање или смањење кохезије и крутости дрвета, па тиме и промену еластичних својстава. Због тога је потребно вршити корекцију еластичних својстава на стандардну влагу од 12%, ако су она одређена на некој другој влажности унутар подручја хигроскопности. Вредност савојног модула еластичности буковог дрвета, по њему, код влажности од 10,5% и густини $0,74 \text{ g/cm}^3$, је 14010 МПа, при собној температури. По питању утицаја температуре каже да дрво и нека друга чврста тела (испод тачке топљења или почетка термичке декомпозиције) смањују чврстоћу и крутост са повећањем температуре и то услед термалне експанзије кристалне структуре целулозе и услед повећања интензитета термичких молекуларних осцилација. Sulzberger (1984) је, истражујући утицај температуре (у дијапазону од -20 до 60°C) на савојни модул еластичности више аустралијских врста дрвета, код различитих влажности (8,12 и 20%), показао општи тренд смањења МОЕ са повећањем температуре. Интензитет тог смањења се повећава са порастом влажности дрвета. Принципијелно се може рећи да је овај однос, у већини случајева, окарактерисан линеарном зависношћу. Негтон (1984) наводи да се у практичним условима повећањем температуре изазива сушење дрвета, тако да повећање МОЕ услед сушења дрвета може бити значајније од смањења истог због повећања саме температуре.

Према Кнежевићу (1963), савојни модул еластичности буковине из Србије, при влажности од 12%, износи за подручје Гоча 10919 МПа, за подручје Жељина 11728 МПа и за подручје Ј. Кучаја 9430 МПа. Ове вредности су одређене при собној температури. По Закићу (1985), модул еластичности на савијање се повећава са смањењем температуре и влажности, и при повећању густине дрвета. Данон и Банковић (1985) су испитивали могућност савијања сувог буковог дрвета након омекшавања путем влажења на собној температури до одприлике 28-30%, путем парења у лабораторијској парионици у току 2 сата и путем третмана течним амонијаком (10 и 25% раствором) на собној температури. Они су, при томе, одредили вредност МОЕ код 12% влаге на собној температури у износу од 12600 МПа. Код влажности дрвета од 28-30% и температури од око 80°C измерени МОЕ је био 7290 МПа из радијално изрезаних дасака и 9560 МПа из тангенцијалних дасака. Код узорака изрезаних из радијалних дасака, чија је влажност била 28-30% а температура 20°C , одређена је вредност модула еластичности од 8620 МПа. Модули еластичности дрвета влажности 8-10%, које је претходно третирано 10 и 25% раствором течног амонијака, су износили 4812 и 4140 МПа респективно, а модули еластичности дрвета влажности 28-30%, на исти начин третираних, су били 3980 и 2580 МПа. Туркулин (1985) је испитивао нека механичка својства непластифицираног (влажност 8,5% и температура 20°C) и пластифицираног (влажност 25% и температура $50,70$ и 90°C) дрвета букве, и добио следеће вредности:

Непластифицирано дрво:		E_s (МПа)
		7432
Пластифицирано дрво:	$t=50^{\circ}\text{C}$	2998
	$t=70^{\circ}\text{C}$	2753
	$t=90^{\circ}\text{C}$	1941

Према Н. Лукић (1971) и Ј. Крпан (1956) модул еластичности на савијање буковине при стандардној влажности код собне температуре износи 16000 МПа. Један врло значајан рад по питању истраживања утицаја влаге и температуре на модул еластичности је обављен од стране Р. Мисла (1979), који је модул еластичности испитивао оптерећењем дрвета букве притиском и затезањем, што може на посредан начин говорити о погодности ове врсте дрвета за савијање. Испитивања су обављена у подручју температура од 20 до 80 °C и интервалу влажности од 6% па до изнад тачке засићености влаканаца. За лонгитудинални правац, затезни модул еластичности се креће између 9272 и 1735 МПа, а притисни између 14290 и 2099 МПа. При томе су више вредности нађене код нижих температура и влажности и обрнуто. Он је пронашао несумњиву линеарну везу између модула еластичности, влаге и температуре у сва три анатомска правца и код притисног и код затезног оптерећења.

3. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД ИСТРАЖИВАЊА

Ово истраживање је извршено на буковини са планине Јадовник из ди-нарског планинског ланца у близини Б.Грахова. Ово шумско-привредно подручје налази се на граничном делу континенталног и медитеранског климатског подручја, са средњом релативном влагом ваздуха од 77% и просечном годишњом температуром ваздуха од 8⁰C (Башић-1985, Буцало-1982). Највећи део терена има јужну експозицију, где су и колебања температуре већа. За анализу је узето једно стабло из чијег су се првог трупца од земље, дужине 5 m, израђивале епрувете за испитивање својстава дрвета. Епрувете, стандардних димензија, су вађене само из двеју централних дасака дебљине 50 mm, што значи да су имале јасно дефинисане основне анатомске правце. Укупно је израђено 550 епрувета, које су затим подељене у 50 група од по 11 епрувета у свакој. Свака група је излагана различитој комбинацији влажности, температуре и анатомског правца (укупно 50 комбинација: 5 влажности x 5 температура x 2 анатомска правца), а потом се одређивао савојни модул еластичности сваке епрувете, њеним директним улагањем у машину за испитивање механичких својстава дрвета типа "TIRA-test 2300". Испитивање је обављано на 5 стања влажности дрвета и то на 0, 10, 17 и 25% у хигроскопном подручју, и на епруветама са максималним садржајем воде, те на 5 различитих температура и то на 20, 40, 60, 80 и 100⁰C. Савојно оптерећење је апликовано у радијалном и тангенцијалном анатомском правцу. Епрувете су најпре довођене на одређену влажност, на собној температури, путем непрекидног кондиционирања у току 6 месеци изнад засићених раствора соли (LiCl, NH₄Cl, K₂SO₄), а потом су, у

лабораторијској сушници, загреване на потребну температуру током 2 часа. Одређивање модула еластичности је обављено стандардним путем. Одређена су и основна физичка својства испитиваног дрвета. Резултати истраживања су потом статистички обрађени на рачунару. У ту сврху су се користиле методе математичко-статистичке обраде података уз помоћ којих су се најпре обрачунавали основни статистички показатељи испитиваног обележја као што су: просечна вредност (изражена преко аритметичке средине), стандардна девијација, коефицијент варијације, стандардна грешка аритметичке средине и сл.. После овога се истраживао и статистички верификовао облик и јачина утицаја влажности и температуре на МОЕ а то се постизало коришћењем метода регресионе и корелационе анализе експериментом добијених података. Методом потпуног факторног експеримента (PFE) по Ви на рском (41) и многоструке регресије по Сиди кор-Ко хре ну-у (31), је истраживано једновремено дејство влажности и температуре на МОЕ у циљу изналажења преовлађујућег утицајног фактора, а коришћењем Студент-овог t-теста се долазило до нивоа статистичке значајности разлика аритметичких средина МОЕ код различитих третмана дрвета.

4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

4.1 Преглед основних физичких својстава испитиваног дрвета

У циљу добијања потпунијих информација о материјалу на коме је вршено испитивање, одређене су густина дрвета у апсолутно сувом стању, тачка засићености жице, укупно утезање дрвета у свим анатомским правцима, просечна ширина прстенова прираста и апсолутна влажност дрвета у тренутку испитивања. Добијене просечне вредности наведених физичких својстава са основним статистичким показатељима су дате у табели 1, док су влажности заједно са резултатима везаним за МОЕ дате у табели 2.

Табела 1 - Приказ основних физичких својстава испитиване буквине
Table 1 - The main physical properties of beech wood

Ред.број	Испитивано својство	A	σ_x	V	f_x	n
1	2	3	4	5	6	7
1	Густина у апс.сувом стању (g/cm^3)	0.644	0.03	5.0	0.001	550
2	Тачка засић.влаканаца (%)	34.0	2.87	8.4	0.274	110
3	Укупно запр. утезање (%)	17.6	0.89	5.0	0.080	110
4	Укупно рад. утезање (%)	6.36	0.60	9.5	0.060	110
5	Укупно танг. утезање (%)	11.24	0.76	6.8	0.073	110
6	Фактор анизотропије	1.77	-	-	-	110
7	Ширина прстенова прираста (mm)	1.42	0.38	27.0	0.037	110

Можемо констатовати, посматрајући податке из табеле, да је вредност густине у апсолутно сувом стању испитиване буковине нешто нижа од вредности које помињу Колин (1985) - 0,668; Лукић-Симоновић (1952) - 0,684 и Угреновић (1950) - 0,680 g/cm³ за домаћу буквину (*F. sylvatica*). Коэффициент варијације од 5% указује на релативно малу варијабилност чланова изабраног узорка по питању густине, што само по себи значи да је узорак добро изабран. Ово тим пре што је по наводима литературе (1989) уобичајен коэффициент варијације са којим се рачуна при истраживању густине око 10%. Просечна вредност тачке засићености влаканаца је нешто виша од оне по Колину (1985) - 28,3%, Крпану - 31,4 и 32,1%, Можини-32,1% до 32,9%, Рејоском-23-34% итд. (по Кнежевићу-1963). Разлог за ово сигурно лежи у нижој вредности густине дрвета кога смо ми испитивали, а и у разлици између метода одређивања тачке засићености жице. Вредности укупног запреминског и линеарних утезања се налазе у оквирима који се помињу у литератури. Просечан годишњи прираст је релативно низак и он је условљен великом надморском висином и оштријом климом подручја са кога је узет материјал за испитивање. Позната је чињеница да ширина года има одређеног утицаја на густину и квалитет како четинарских тако и лишћарских врста дрвета. Код групе дифузно порозних лишћара, којој припада и буквина, махом се сматра да ширина прстенова нема никаквог утицаја на густину дрвета. Будући да се располагало са довољним бројем података за густину и ширину прстенова прираста, проверили смо постојање корелације између ова два својства и дошли до резултата да је коэффициент линеарне корелације 0,417, што одговара средње јакој корелационој вези. Ипак, и поред овога, због велике варијабилности података, не бисмо смели да тврдимо да постоји некаква зависност густине дрвета букве од ширине прстенова прираста.

4.2 Модул еластичности

Експериментално добијене вредности модула еластичности у радијалном и тангенцијалном анатомском правцу, за све услове испитивања, са основним статистичким показатељима, приказане су у табели 2.

Највећу вредност модула еластичности налазимо код апсолутно сувог стања влажности и то око 12880 МПа у радијалном и 12020 МПа у тангенцијалном правцу. Модул еластичности се знатно смањује са повећањем влажности и температуре дрвета, тако да минималне вредности, (у радијалном правцу 3212 МПа а у тангенцијалном правцу 2997 МПа), имамо код влажности на граници хигроскопности или у напојеном стању и температури од 100 °С.

Апсолутно умањење модула еластичности у оба анатомска правца приликом увећања влажности и температуре до горњих граница испитиваних интервала, према томе износи око 4 пута. Просечна вредност стандардне девијације за радијалан правац је 794 МПа, а за тангенцијалан правац 858 МПа. Овакве вредности стандардног одступања за ову врсту испитивања су релативно ниске, што се потврђује и просечним величинама коэффицијената варијације који за радијални правац износи 10,7% а за тангенцијални 12,1%. Према литератури, код испитивања модула еластичности на савијање путем статичког теста, уобичајени коэффициент варија-

ције износи 22%, из чега произилази да је наш узорак био приближно дво-струко хомогенији од уобичајеног. Средња израчуната вредност стандардне грешке аритметичке средине модула еластичности је износила за испитивање проведено у радијалном правцу 239 МПа а у тангенцијалном правцу 259 МПа.

Табела 2 - Приказ вредности МОЕ за све услове испитивања
Table 2 - The review of MOE for all experimental conditions

t (°C)	РАДИЈАЛНО				ТАНГЕНЦИЈАЛНО			
	v _a (%)	E (N/mm ²)	ρ _x (N/mm ²)	V (%)	v _a (%)	E (N/mm ²)	σ _x (N/mm ²)	V (%)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	0	11919	863	7.2	0	11972	827	6.9
20	10	10757	828	7.7	10.3	10040	1084	10.8
20	17.4	10577	528	5.0	18.0	9387	695	7.4
20	24.8	7515	782	10.4	25.1	7508	1312	17.5
20	91.2	7507	753	10.0	94.0	6693	556	8.3
40	0	11983	1627	13.6	0	11604	1158	10.0
40	10.5	8830	514	5.8	10.6	8589	533	6.2
40	17.4	8174	1068	13.1	17.0	7659	725	9.5
40	25.0	6705	765	11.4	25.2	5937	802	13.5
40	113	6563	826	12.6	119	6452	571	8.9
60	0	12634	621	4.9	0	12020	1346	11.2
60	10.0	8982	708	7.9	10.1	8491	837	9.9
60	15.7	8699	699	8.0	16.6	7938	780	9.8
60	24.8	6160	522	8.5	23.5	4954	1102	22.3
60	105	5241	816	15.6	93.0	4553	781	17.2
80	0	10620	794	7.5	0	11354	885	7.8
80	9.9	9459	930	9.8	9.9	8713	611	7.0
80	17.0	5620	955	17.0	16.2	6483	927	14.3
80	22.4	4757	823	17.3	24.9	3999	995	24.9
80	102	5336	760	14.2	93.0	4804	678	14.1
100	0	12786	876	6.9	0	11896	1733	14.6
100	8.8	8663	781	9.0	8.8	7550	768	10.2
100	15.9	5957	940	15.8	15.3	5957	796	13.4
100	22.5	3212	515	16.0	22.0	3902	585	15.0
100	63.0	4079	550	13.5	88.0	2997	350	11.7

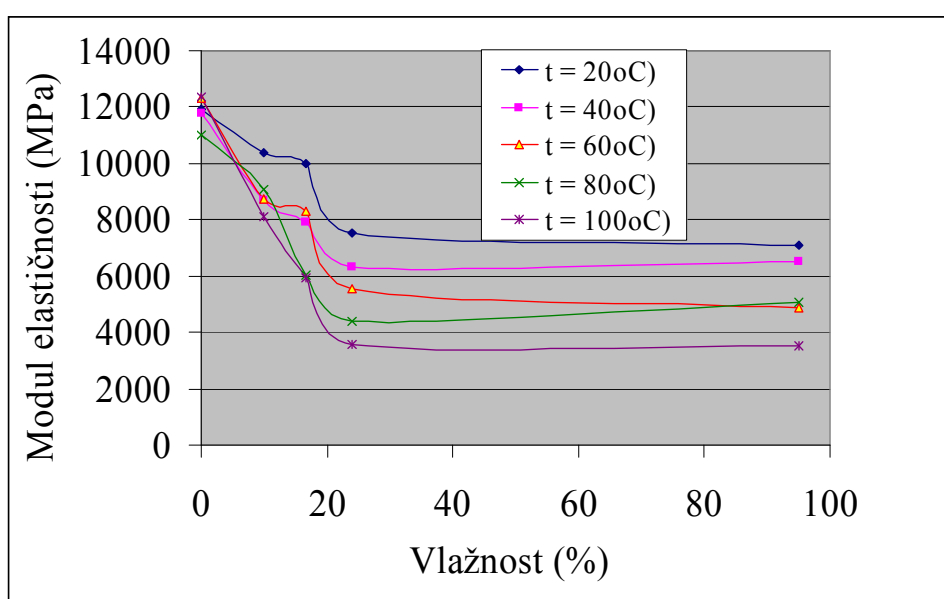
4.2.1 Утицај влажности на модул еластичности при константној температури дрвета

На слици 1 је прегледно приказан утицај влажности на модул еластичности за различите а константне температуре дрвета скупно за радијални и тангенцијални правац. Са слике се јасно уочава да при свим температурама дрвета, модул еластичности опада са повећањем влажности у хигро-

скопном подручју после чега се устаљује. Утицај влажности је, при томе, јачи при вишим температурама.

Ове експерименталне резултате смо подвргли регресионој анализи са циљем да се утврди да ли постоји и каква веза између модула еластичности и влажности дрвета у хигроскопном подручју, пошто смо, пре тога, утврдили да не постоје статистички оправдане разлике између модула еластичности код влажности од 24% и оних код напојеног стања влажности.

Показало се да за овај конкретан случај односу модула еластичности и хигроскопне влажности код свих температура најбоље одговарао линеарни модел општег облика: $y = a + bx$, односно $E_s = a + bv_a$; где је E_s у МПа, а v_a у %.



Слика 1 - Утицај влажности на модул еластичности при различитим температурама
Figure 1: The influence of MC to MOE at different temperature

У табели 3 су приказани резултати регресионе анализе у облику коефицијената корелације и коефицијената регресије a и b за све испитиване температуре. Како се из табеле 3 види, апсолутна вредност коефицијената корелације у свим случајевима прелази вредност 0.9, а у неким случајевима је и врло блиска јединици, из чега можемо закључити да је усвојени модел адекватан, односно да можемо тврдити да између модула еластичности и хигроскопне влажности, при свим испитиваним температурама, постоји врло јака, практично функционална, линеарна зависност. Негативан предзнак коефицијената корелације, у свим случајевима, доказује инверзност ове зависности тј., доказује да модул еластичности опада са повећањем хигроскопне влажности дрвета.

Табела 3 - Преглед резултата корелационе анализе односа МОЕ и хигроскопне влажности буковине
 Table 3 - The correlation analysis of relation of MOE and hygroscopic beech wood MC

t (°C)	РАДИЈАЛНО				ТАНГЕНЦИЈАЛНО			
	Коефицијент корелације	a	b	Коефицијент корекције	Коефицијент корелације	a	b	Коефицијент корекције
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	-0.904	12283	-160	0.0130	-0.986	12000	-170	0.0142
40	-0.980	11637	-205	0.0176	-0.992	11370	-221	0.0194
60	-0.980	12288	-251	0.0204	-0.981	11920	-284	0.0238
80	-0.958	11105	-283	0.0255	-0.999	11447	-299	0.0261
100	-0.999	12639	-423	0.0334	-0.987	11440	-357	0.0312

Посматрамо ли вредности коефицијената правца, који у ствари представљају пресециште екстраполираних вредности регресионих линија и ординатне осе, односно који нам дају податак за модул еластичности у апсолутно сувом стању (0% влаге), можемо приметити да су оне приближно једнаке за све температуре, па из тога произилази да температура нема никаквог битнијег утицаја на модул еластичности у апсолутно сувом стању влажности. Коефицијент правца *b*, који представља, можемо га и тако посматрати, брзину смањења модула еластичности са јединичним повећањем хигроскопне влаге дрвета, при константној температури, је променљив са температуром. Видимо да је он најмањи (-160) код температуре од 20 °C а потом да се повећава и постаје највиши (-423) код температуре од 100 °C. Ово би значило да сваки проценат повећања хигроскопне влажности дрвета испитиване букве, при температури од 20 °C, изазива смањење својног модула еластичности у радијалном правцу за 160 МПа а при температури дрвета од 100 °C смањење од 422 МПа. Између коефицијента правца *b* и температуре дрвета постоји корелација линеарног облика:

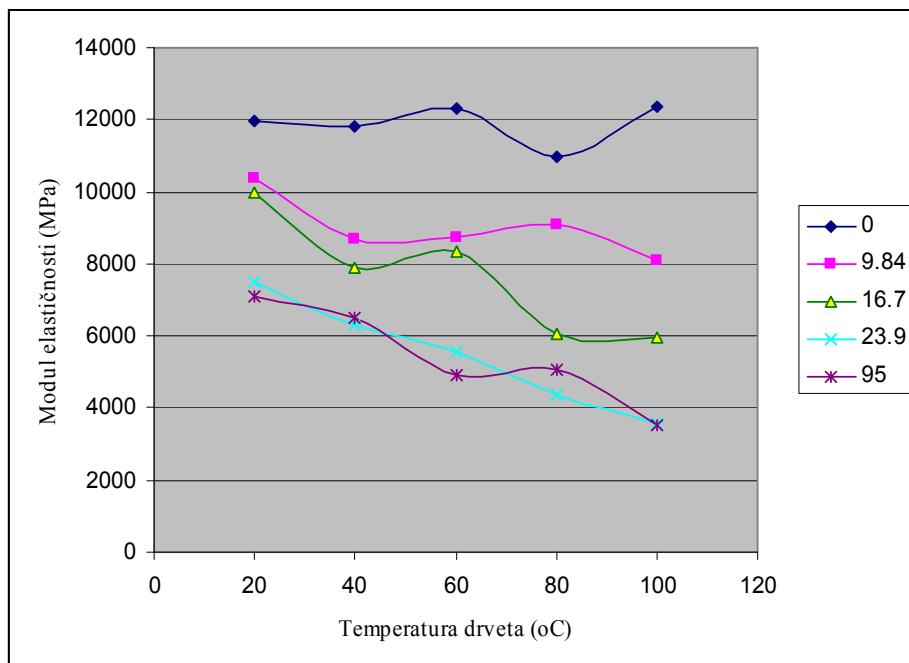
$b = 83.6 + 3.01t$, са коефицијентом корелације од 0.954, за радијални правац, и $b = 131 + 2.26t$, са коефицијентом корелације од 0.988, за тангенцијални правац.

На основу података о вредностима коефицијената правца *b* је затим обрачунато процентуално смањење модула еластичности са јединичним повећањем хигроскопне влажности, а њихов децимални облик тзв. коефицијент корекције "с", је приказан у колонама 5 и 9 табеле 3. Уобичајена вредност коефицијента корекције за модул еластичности при оптерећењу на савијање, која се среће у литератури и стандардима, јесте 0,02. Упоредимо ли добијене вредности са овом вредношћу, приметимо да је једино коефицијент корекције при температури од 60 °C приближан уобичајеном, док су они за температуре испод 60 °C нижи, а за температуре преко 60 °C знатно виши од њега. Ово нас упућује на закључак да је увек, када се жели вршити корекција модула еластичности на другу влажност, неопходно водити рачуна о температури дрвета. Ово је потребно урадити нарочито због тога што се и корелационом анализом утврдило да између ова два параметра постоји врло јака линеарна веза ($r=0.984$ за радијални и $r=0.993$ за тангенцијални правац), коју представљају

следеће једначине: $c = 0.00737 + 0.000244t$, за радијални и $c = 0.0107 + 0.0002t$, за тангенцијални правац.

4.2.2 Утицај температуре на модул еластичности при константној влажности дрвета

Подаци добијени извођењем описаног експеримента омогућавају и засебно посматрање утицаја температуре на модул еластичности, под претпоставком константности влажности дрвета (слика 2). Са слике се већ и визуелно може запазити да модул еластичности смањује своју вредност са повећањем температуре при свим испитиваним влажностима дрвета, изузев у апсолутно сувом стању.



Слика 2 - Утицај температуре на модул еластичности при различитим влажностима дрвета
Figure 2 - The influence of temperature to MOE at different MC

Ова оцена, међутим, није довољно поуздана за доношење дефинитивних закључака, па смо стога, примењујући метод регресионе анализе, утврдили, код свих испитиваних влажности дрвета, и математичко-статистичку зависност модула еластичности од температурне промене. При овоме је линеарни модел показао највеће коефицијенте корелације, па смо га стога и усвојили као најадекватнијег, а резултати те анализе, код свих влажности, приказани су у табели 4.

Табела 4 - Преглед резултата корелационе анализе односа
МОЕ и температуре

Table 4 - The correlation analysis of relation of MOE
and temperature

Влаж- ност (%)	РАДИЈАЛНО				ТАНГЕНЦИЈАЛНО			
	Коефицијент корелације	a	b	Коефицијент корекције	Коефицијент корелације	a	b	Коефицијент корекције
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.07	11877	1.85	0.00016	-0.250	11910	-2.26	0.00019
10	-0.664	10460	-17.8	0.00171	-0.862	10133	-24.3	0.00240
17	-0.910	11343	-59.0	0.00520	-0.948	9896	-40.2	0.00406
24	-0.980	8836	-52.8	0.00597	-0.962	8005	-45.7	0.00570
95	-0.968	8170	-40.4	0.00494	-0.944	7812	-45.2	0.00579

Из прегледа коефицијената корелације може се видети да је вредност у апсолутно сувом стању практично блиска нули, из чега изводимо закључак да температура дрвета нема никакав утицај на модул еластичности код оптерећења на савијање. При влажности од 10%, коефицијент корелације већ прилично нараста, док при вишим влажностима достиже вредност већу и од 0,9, што значи да температура има много јачи утицај при вишим влажностима дрвета. То нам показују и величине коефицијената правца *b* које су у апсолутном износу највеће при влажности од 17% и 24%. Ако јачину утицаја температуре изразимо преко коефицијената корекције, који у овом случају представљају процентуално смањење (у децималном облику) модула еластичности са повећањем температуре од 1°C, видећемо да је она највећа код влажности дрвета од 24% и у напојеном стању. Или, ако се поједностави наведено, може се рећи да код влажности од 24%, на пример, за радијални правац, сваки °C повећања температуре, изазива смањење модула еластичности од око 0,6%. Упоредимо ли коефицијенте корекције по температури са коефицијентима корекције по влажности (табела 4), за исти анатомски правац, запазит ћемо да су ови други знатно виши, што значи да јединично повећање хигроскопне влаге има већи утицај на смањење модула еластичности него јединично повећање температуре дрвета. У просеку коефицијент корекције по влажности је за око 6 пута већи од коефицијента корекције по температури, што значи да у просеку 1% повећања хигроскопне влажности дрвета, изазива 6 пута веће смањење модула еластичности од повећања температуре дрвета за 1°C. Или, другачије речено, да би модул еластичности дрвета испитиване букве смањило своју вредност за исти износ који је проузрокован повећањем хигроскопне влажности од 1%, потребно је дрвету повећати температуру за 6°C.

4.2.3 Анализа једновременог утицаја влаге и температуре на модул еластичности

У претходним поглављима показан је начин промене модула еластичности приликом промене влажности дрвета при константној температури, а затим, и при промени температуре дрвета код константне влажности.

Иако су ове анализе пружиле значајна обавештења о утицају влаге и температуре на модул еластичности, ипак, нису нам дала дефинитиван одговор на питање који од ова два фактора има већи значај на смањење модула еластичности. Да би се донели чврсти одговори и закључци по овом питању, верификовани математичком статистиком, на овом месту смо применили два метода статистичке анализе који су у стању да пруже такве одговоре, од којих је први метод потпуног факторног експеримента (PFE) (по Винарском - Лурје ну), а други метод многоструке регресије (по Snidkor - Kohren-у). Потребно је напоменути, да је анализа једновременог утицаја влаге и температуре вршена за интервал влажности унутар хигроскопног подручја (јер модул еластичности остаје непромењен у надхигроскопном подручју), и да је при томе потпуно обухваћен усвојени интервал температуре од 20-100°C. Резултати таквих анализа су следећи:

а) за радијални правац

Једначина која најбоље описује једновремени утицај влаге и температуре на радијални модул еластичности, добијена методом PFE, има следећи облик:

$$E_r = 13122 - 187v_a - 4,8t - 2,07v_a t;$$

По методу многоструке регресије добијена је следећа зависност радијалног модула еластичности од влажности и температуре:

$$E_r = 14880 - 246v_a - 53t$$

На основу ових анализа, и из њих проистеклих апсолутних вредности коефицијената регресије b_1 и b_2 , можемо још једном констатовати да је утицај хигроскопне влажности на промену (смањење) модула еластичности много јачи (за око 4,6 пута) од утицаја температуре. До сличних закључака су дошли Б. Колин (16), истражујући утицај влажности и температуре на притисну чврстоћу паралелно току влаканаца, код неколико домаћих врста дрвета и Мисило (26) приликом проналажења зависности притисне и затезне чврстоће од влажности и температуре домаће буковине.

б) за тангенцијални правац

Једначина регресије која се најбоље уклапа у ове експерименталне податке, а која је добијена коришћењем метода PFE, има следећи облик:

$$E_t = 12549 - 167v_a - 21,1t - 1,1v_a t$$

Анализом, уз помоћ метода многоструке регресије, дошли смо до следеће једначине:

$$E_t = 13724 - 222v_a - 47,2t.$$

Примећујемо да је коефицијент парцијалне регресије b_1 , који репрезентује утицај влажности на модул еластичности, знатно већи од коефицијента парцијалне регресије b_2 , који се односи на утицај температуре на исти, и то за отприлике 4,7 пута. Ово значи да један проценат повећања

хигроскопне влажности изазива 4,7 пута веће смањење тангенцијалног модула еластичности од повећања температуре дрвета за 1°C.

5. ЗАКЉУЧЦИ

У овом раду саопштени су резултати који се односе на истраживања утицаја влажности и температуре на савојни модул еластичности. Сва истраживања су обављена испитивањем дрвета домаће букве (*F. sylvatica*) из босанско-граховског шумско-привредног подручја. Истраживања су обављена под условима алтернације температуре при константној влажности и алтернације влажности при константној температури дрвета. При овоме су опитне температуре вариране у дијапазону од 20 до 100 °C, са међутемпературама од 40, 60 и 80 °C. Влажности дрвета у току испитивања су биле: 0, 10, 17 и 24% у хигроскопном и напојено стање у надхигроскопном подручју влажности. Испитивања су обављена деловањем оптерећења у радијалном и тангенцијалном анатомском правцу. Због потпунијег увида у квалитет и полазне особине испитиваног дрвета, одређена су и основна физичка својства коришћеног материјала. Имајући у виду добијене резултате истраживања могу се донети следећи закључци:

1. Код свих експериментом обухваћених температура, влажност има значајан утицај на промену модула еластичности у хигроскопном подручју и то, на тај начин, што се са њеним повећањем модул еластичности смањује. Ова констатација се односи, како на модул еластичности одређен у радијалном, тако и на модул еластичности одређен у тангенцијалном правцу.

2. На основу извршених и приказаних математичко-статистичких анализа, доказано је да је модул еластичности у функционалној зависности од хигроскопне влажности дрвета. Ова функционална веза се може представити једначином општег линеарног облика, $E=a+bv_a$, за све температуре и оба анатомска правца. Добијене конкретне вредности извршене регресионе анализе овог односа могу се видети у табелама 3 и 4.

3. На основу вредности коефицијената линеарне корелације које су веома високе, може се рећи да је утврђена веома јака, скоро потпуна, корелација.

4. Брзина смањења модула еластичности са повећањем хигроскопне влаге је функција температуре дрвета, у смислу да је њен износ најмањи при најнижој температури од 20 °C, а највећи код температуре од 100 °C.

5. Коефицијент регресије b из наведене опште једначине зависности, који у овом случају представља брзину смањења модула еластичности под утицајем повећања садржаја везане воде, стоји у функционалном линеарном односу са температуром дрвета са следећим облицима:

- Радијални правац: $b= 83,6 + 3,01*t$ (МПа)

- Тангенцијални правац: $b= 131 + 2,26*t$ (МПа)

6. Сваки проценат повећања хигроскопне влажности, у зависности од температуре дрвета, изазива смањење модула еластичности у радијалном правцу између 1,3 и 3,34% од максималне вредности коју је дрво имало у апсолутно сувом стању. За тангенцијални правац се ове вредности крећу између 1,42 и 3,12%.

7. Са повећањем температуре дрвета расте и коефицијент корекције модула еластичности по влажности, и тај однос је представљен следећим једначинама:

- Радијални правац: $c = 0,00737 + 0,000244 * t$ (0,01 %/%vlage);
- Тангенцијални правац: $c = 0,0107 + 0,0002 * t$ (0,01 %/%vlage).

8. Температура дрвета, код свих опитних влажности, сем у апсолутно сувом стању, такође има значајан утицај на промену модула еластичности, и то тако да се са повећањем температуре смањује савојни модул еластичности. Ово важи и за радијални и за тангенцијални анатомски правац.

9. Резултати приказаних регресионих анализа показују да температура значајно не утиче на промену модула еластичности код дрвета које се налази у стању ослобођеном влаге, док код виших влажности, постоји обрнуто пропорционална функционална линеарна зависност модула еластичности од температуре дрвета.

10. Интензитет (брзина) опадања модула еластичности са повећањем температуре, је зависан од влажности дрвета. На вишим влажностима дрвета (17,24% и напојеном стању) брзина смањења модула еластичности је највећа.

11. Повећањем температуре дрвету за 1 °С, у зависности од влажности и анатомског правца, долази до апсолутног смањења модула еластичности у износу који се креће између 18 и 60 МПа.

12. Изразимо ли овај утицај на релативан начин, можемо рећи да сваки наредни °С повећања температуре дрвета чији је садржај влаге изнад 17%, изазива смањење максималне вредности модула еластичности (коју дрво у овом случају има при температури од 20 °С) између 0,4 и 0,6% у оба анатомска правца. Код дрвета са садржајем влаге од 10%, ова вредност се креће око 0,2% без обзира на анатомски правац.

13. Посматрањем и анализом једновременог дејства влаге и температуре на промену модула еластичности, дошло се до закључка да је при томе јединични утицај хигроскопне влажности знатно јачи од јединичног утицаја температуре. Наиме, један проценат повећања везане влаге дрвета изазива око 4,6 пута у радијалном и 4,7 пута у тангенцијалном правцу, веће смањење модула еластичности од повећања температуре дрвету за један степен Целзијусов.

14. За сигурну процену модула еластичности при одређеној температури и влажности, унутар испитиваних интервала, могу послужити следеће формуле:

- Радијални правац: $E_r = 13122 - 187v_a - 4,8t - 2,07v_a t;$

$$E_r = 14880 - 246v_a - 53t$$

- Тангенцијални правац: $E_t = 12549 - 167v_a - 21,1t - 1,1v_a t$

$$E_t = 13724 - 222v_a - 47,2t.$$

6. ЛИТЕРАТУРА

- Душ ко, Б. (1985): *Ловно-привредна основа ловишта Гњай-Рисовац и Шайор-Међузорје за период 1984-1993. год.*, Босанско Грахово.
- Бр чић, В. (1978): *Отпорност материјала*, Београд
- Буца ло, В. (1982): *Еколошко-производне карактеристике ниских букових шума на дрварском подручју и приједло узгојних мјера*, магистарски рад, Титов Дрвар
- Буца ло, В. (1983): *Основне карактеристике и приједло узгојног уређивања неких типова букових ниских шума на дрварском подручју*, Шумарство, бр. 3-4
- Данон, Г., Банковић, Р. (1985): *Припрема сувог буковог дрвета за обраду савијањем*, Гласник шумарског факултета - серија Б (Дрвна индустрија), бр. 3, Београд
- Буришић, З. (1988): *Зависност рада резања од режима машинске обраде дрвета лоданем*, магистарски рад, Београд
- Герхардс, С.С. (1982): *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood; an analysis of immediate effects*, Wood and Fiber:14(1), p. 4-36
- Горшек, Ж. (1987): *Влијив парења на физикалне ласћиности буковине*, Лес бр. 7-8
- Handbook of wood and wood-based materials for engineers, architects and builders (1989): F. P. Laboratory Forest Service U.S. Department of agriculture; New York, Washington, Philadelphia, London
- Hoadley, R.V. (2000): *Understanding wood*, Newtown, Connecticut
- Кнежевић, М. (1948): *Механичка прерада дрвета*, Научна књига, Београд
- Кнежевић, М. (1963): *Својства и примарна механичка прерада буковине*, Београд
- Карахановић, А. (1988): *Наука о дрвету*, Сарајево
- Коелер, А. (1924): *The properties and uses of wood*, McGraw-Hill Book Company, New York and London,
- Коллин, Б. (1985): *Утицај температуре на припадну чврстоћу и граничну хигроскопност дрвета*, докторска дисертација, Београд
- Kollmann F. and W.A. Co te (1984): *Principles of wood science and technology*, Solid wood, Berlin, New York
- Лукић-Симоновић, Н. (1952): *Прилоз познавању главних физичких и механичких особина парене и непарене буковине*, Шумарство, бр. 6, с. 511-514
- Лукић-Симоновић, Н. (1971): *Прилоз испитивању технолошких својства буковине у Југославији (досадашња испитивања)*, Шумарство 7-8
- Лукић-Симоновић, Н. (1953): *О неким својствима парене и непарене буковине мајданџечке домене*, Гласник шумарског факултета, бр. 6, с. 51-56
- Лукић-Симоновић, Н. (1967): *Промене неких механичких својства у деблу парене и непарене буковине*, Шумарство, бр. 5-6, с. 56-65
- Мисило, П. (1979): *Утицај температуре и влаге дрвета на величину модула еластичности и границу чврстоће у влаку и тлаку за сва три аналитичка правца*, докторска дисертација, Сарајево
- Mukudai, J. and S. Yata (1987): *Further modeling and simulation of viscoelastic behavior (bending deflection) of wood under moisture change*, Wood science and technology, 21, p.49-63
- Поповић, З. (1990): *Утицај влажности и температуре на модул еластичности и савиљливости буковог дрвета*, магистарски рад, Шумарски факултет, Београд
- Stewens W.C. and N. Turner (1948): *Solid and Laminated wood bending*, London
- Шошкић, Б. (1977): *Утицај начина слања резане грађе при парењу на физичка и механичка својства буковине после парења*, магистарски рад, Београд
- Шошкић, Б. (1984): *Утицај парења на својства дрвета букве*, Шумарство, бр.3-4, стр.3-19, Београд,
- Шпољарић, З. (1978): *Анатомија дрва*, Загреб
- Шумарска енциклопедија*, Вол. II, с. 461-462.

- Туркулин, Х. (1985): *Чврстоћа на тлак и савијање буковине и багремовине при различитим уветима температуре и садржаја влаге*, Дрвна индустрија, 36(7-8), с. 161-167
- Угреновић, А. (1950): *Технологија дрвета*, Загреб
- Винарскиј М. С. и Н. В. Љури (1973): *Планирање експеримената у технолошким испитивањима*, Москва
- Земљишта привредне јединице-Јадовник-Босанско Грахово (1973)*: Институт за шумарство и дрвну индустрију, Београд,
- Испитивање технолошких особина буковине у вези примене метода селекције и технике гајења*, (1971): Елаборат о раду 1966-1970, Институт за шумарство и дрвну индустрију, Београд,
- Закић, Б. (1985): *Увод у механику дрвета*, Београд
- Рајман, В. (1970): *Прилог утврђивању интензитета и динамике оштећења најважнијих техничких својстава незаштешене буковине*, Преглед научно-техничких радова и информација, 3-4, Сарајево
- Tang, R.C. and N.H. Nelson (1972): *Dynamic Youngs moduli of wood related to moisture content*, Wood Science, Vol.5, No. 1
- Хрибар, Ј. (1962): *Утицај режима парења на боју и својства буковине*, Дрвна индустрија, 9-10
- Крпан, Ј. (1956): *Савијање масивног дрва*, Дрвна индустрија, 9-10

THE EFFECTS OF MOISTURE CONTENT AND TEMPERATURE
ON THE MODULUS OF ELASTICITY OF BEECH WOOD

Zdravko Popović

S u m m a r y

The impact of moisture and temperature on static MOE of beech wood has been investigated. Testing have been performed at wood moisture of 0, 10, 17 and 24% in hygroscopic range, and in full-suched state of moisture, and at temperature of 20, 40, 60, 80 and 100°C. Testing have been done in both radial and tangential directions.

The highest value of MOE was at dry wood – 12880 MPa in radial, and 12020 MPa in tangential direction. MOE has significantly been decreased with increasing of moisture and temperature of the wood so that minimal values appeared (in radial direction 3212 MPa and in tangential one 2997 MPa) at moisture content close the FSP or in fully suched state and temperature of 100°C. Absolutely decreasing of MOE in the both anatomical directions during decreasing of moisture and temperature up to high frontiers of tested intervals, reached around four times.

Based on mathematical-statistically analysis it has been proved that MOE exist in functional dependence of general linear shape, of hygroscopic wood moisture as well as of temperature of moist wood. MOE doesn't change nor with moisture over the FSP, neither with temperature in the case of dry wood.

In general, increasing of moisture in hygroscopic area for 1% causes the decreasing of MOE for 1,3-3,3% in dependence temperature and anatomical directions. The intensity of impact of temperature reaches from 0,2 till 0,6% for each 1°C, depending to wood moisture for the both anatomical directions.

MOE at certain temperatures and moisture could be calculated using the next equations:

$$\text{Radial direction: } E_r = 13122 - 187 \cdot MC - 4,8 \cdot t - 2,07 \cdot MC \cdot t \quad (\text{MPa})$$

$$\text{Tangential direction: } E_t = 12549 - 167 \cdot MC - 21,1 \cdot t - 1,1 \cdot MC \cdot t \quad (\text{MPa})$$

