

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Fortuna, B., 2015. Določitev nastavitvev naprav za razvrščanje lesa v trdnostne razrede. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Turk, G., somentor Plos, M.): 93 str.

Datum arhiviranja: 07-09-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Fortuna, B., 2015. Določitev nastavitvev naprav za razvrščanje lesa v trdnostne razrede. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Turk, G., co-supervisor Plos, M.): 93 p.

Archiving Date: 07-09-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO
GRADBENE KONSTRUKCIJE**

Kandidatka:

BARBARA FORTUNA

**DOLOČITEV NASTAVITEV NAPRAV ZA
RAZVRŠČANJE LESA V TRDNOSTNE RAZREDE**

Magistrsko delo št.: 7/II.GR

**SETTINGS DERIVATION FOR STRENGTH GRADING
MACHINES**

Graduation – Master Thesis No.: 7/II.GR

Mentor:
prof. dr. Goran Turk

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:
Mitja Plos

Ljubljana, 25. 08. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Barbara Fortuna izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom:

»Določitev nastavitv naprav za razvrščanje lesa v trdnostne razrede«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Barbara Fortuna

(podpis)

Ljubljana, 20.8.2015

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	006.7/.8:624.011.1(043.3)
Avtorica:	Barbara Fortuna
Mentor:	prof. dr. Goran Turk
Somentor:	Mitja Plos, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Določitev nastavitvev naprav za razvrščanje lesa v trdnostne razrede
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	93 str., 62 sl., 78 pregl., 35 en.
Ključne besede:	Razvrščanje lesa, trdnostni razred, karakteristična vrednost, optimalni trdnostni razred, dodeljeni trdnostni razred, nastavitve naprave, odločilne lastnosti, indikativne lastnosti, frekvenčne in cenovne matrike

Izveček:

Z optimalnim razvrščanjem konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza lahko element uvrstimo v najboljši možni trdnostni razred v izbrani kombinaciji. V magistrskem delu smo primerjali različne postopke optimalnega razvrščanja in sicer po trenutno veljavnem standardu, po neparametričnem in parametričnem postopku. Slednja sta oba predstavljena v predstandardu. Bistvene razlike med različnimi postopki so predvsem v računu karakteristične vrednosti vzorca. Neparametrični pristop, ravno tako kot standard, pri računu upošteva poenostavitve, parametrični pristop pa temelji na teoretičnih enačbah. Za osem različnih kombinacij trdnostnih razredov smo primerjali rezultate optimalnega razvrščanja po različnih postopkih.

S simulacijami v programu Mathematica smo preverili ustreznost enačb za račun karakterističnih vrednosti, s poudarkom na enačbah, ki so podane za neparametrični pristop v predstandardu. Enačba za korekcijski faktor se, glede na predpostavke predstandarda, ni izkazala za primerno, zato smo poiskali novo enačbo, s katero dobimo primernejše rezultate.

Predstavljena je nova naprava za strojno razvrščanje lesa in nastavitve zanjo. Naprava še ni certificirana, zato njena uporaba za dodeljevanje trdnostnih razredov in uradno označevanje še ni dovoljena. Nastavitve so bile izpeljane na osnovi zahtev za začetne nastavitve, ki so podane v standardu. Za indikativno količino je najbolj primeren dinamični elastični modul, saj je v najboljši povezanosti s trdnostnimi karakteristikami preizkušancev. Preverili smo tudi možnost razvrščanja lesa s poenostavljenim postopkom, brez merjenja gostote. S frekvenčnimi in cenovnimi matrikami smo za izbrane kombinacije trdnostnih razredov ocenili uspešnost naprave in preverili ostale zahteve, ki jih mora naprava izpolnjevati za certifikacijo in uvrstitev na seznam naprav za strojno razvrščanje lesa, ki je podan v standardu. Izkazalo se je, da s predpostavljeno konstantno gostoto preizkušanca dobimo precej slabše rezultate. Z merjenjem gostote pa naprava daje dobre rezultate in je zato primerna za postopek certificiranja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	006.7/.8:624.011.1(043.3)
Author:	Barbara Fortuna
Supervisor:	Prof. Goran Turk, Ph.D.
Co-advisor:	Mitja Plos, B.Sc.
Title:	Settings derivation for strength grading machines
Document type:	M. Sc. Thesis
Notes:	93 p., 62 fig., 78 tab., 35 eq.
Key words:	Strength grading, strength class, characteristic value, optimum grade, assigned grade, strength grading machine settings, grade determining property, indicating property, size matrix, global cost matrix

Abstract:

A timber specimens highest strength grade for a selected strength grade combination can be determined by optimal grading. This can be achieved by different approaches that are represented in the current standard and pre-standard. The pre-standard defines a parametric and non-parametric calculation of characteristic properties from test results, which is the essential difference between various approaches. In both the non-parametric approach and the standard procedure, some simplifications and adjustment factors are used while in the parametric calculation only equations from a theoretical background are used. Procedures are derived for eight different strength grade combination and for all results comparisons are made.

With the Mathematica software we used simulations to test given equations for the calculation of characteristic properties. Special consideration was taken on the non-parametrical calculation. The correction factor equation has not proved to be suitable, at least not for the assumptions that are made in the pre-standard. Therefore, we produced a new equation, which gives better results.

A new strength grading machine is under development, which is not yet standardized and cannot formally be used for strength grading and CE marking yet. The requirements for the derivation of machine settings for initial type testing were met and we established new settings. We tried different properties as the indicative property. Due to its good correlation to specimens strength properties, dynamic modulus of elasticity was chosen. Grading procedure could be simplified by avoiding density measuring. Using size matrix and global cost matrix, we evaluated grading machine performance for data with measured density and data with constant density for each of the strength grade combination. The results using the measured density were significantly better than those with a constant density. The strength grading machine gave good results and is therefore suitable for the certification process.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju prof. dr. Goranu Turku za strokovno in prijazno pomoč pri nastajanju magistrskega dela. Najlepša hvala Mitju Plosu za potrpežljivost, sodelovanje in nesebično pomoč. Hvala tudi Dejanu, vsem prijateljem, študijskim kolegom in seveda družini, da so me spremljali in podpirali tekom celotnega študija.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA.....	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK.....	XI
1 UVOD IN CILJI.....	1
2 RAZVRŠČANJE LESA – SPLOŠNO	3
2.1 VIZUALNO RAZVRŠČANJE	3
2.2 STROJNO RAZVRŠČANJE.....	4
2.3 TRDNOSTNI RAZREDI	5
3 STANDARDI	12
4 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE	13
4.1 UPORABLJENI PREIZKUŠANCI.....	13
4.2 RAZVRŠČANJE V TRDNOSTNE RAZREDE	14
4.3 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE PO STANDARDU SIST EN 384:2010	17
4.4 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE PO PREDSTANDARDU prEN 384:2013	22
4.5 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE – PARAMETRIČNO (TEORIJA).....	27
4.6 PRIMERJAVA REZULTATOV OPTIMALNEGA RAZVRŠČANJA	32
4.6.1 POENOSTAVLJENO OPTIMALNO RAZVRŠČANJE	32
4.6.2 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE PO STANDARDU IN PREDSTANDARDU	36
4.7 SIMULACIJE	38
4.7.1 RAČUN KARAKTERISTIČNIH VREDNOSTI PO RAZLIČNIH ENAČBAH	38
4.7.2 ENAČBA ZA RAČUN PO NEPARAMETRIČNEM PRISTOPU	44
5 PREDSTAVITEV NAPRAVE GT-PRO	48
5.1 METODA VZDOLŽNEGA NIHANJA	48
5.2 OPREMA (MIKROFONI)	49
5.2.1 ZGODOVINA.....	50
5.2.2 KONDENZATORSKI MIKROFON	50
5.2.3 MIKROFON SENNHEISER MKH P48.....	54
6 DOLOČANJE NASTAVITEV	56
6.1 NASTAVITVE Z MERJENO IN PREDPOSTAVLJENO GOSTOTO	57

6.2 PRIMERJAVA	59
6.3 FREKVRENČNE IN CENOVNE MATRIKE.....	63
6.3.1 MERJENA GOSTOTA.....	63
6.3.2 KONSTANTNA GOSTOTA	78
7 MERITVE HOJA.....	80
7.1 MERITVE Z IZMERJENO GOSTOTO	83
7.2 MERITVE S PREDPOSTAVLJENO GOSTOTO.....	84
8 ZAKLJUČEK.....	88
VIRI.....	90
Ostali viri	93

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Karakteristične trdnosti in togostnih lastnosti masivnega mehkega in trdega lesa (Vir: SIST EN 338:2003)	5
Preglednica 2: Parametri porazdelitev trdnosti in frekvenca po posameznih trdnostnih razredih.....	7
Preglednica 3: Frekvenca po optimalnih trdnostnih razredih po standardu SIST EN 384:2010, 1. del.....	20
Preglednica 4: Frekvenca po optimalnih trdnostnih razredih po standardu SIST EN 384:2010, 2. del.....	20
Preglednica 5: Korekcijski faktorji k_n zaradi vpliva števila podvorcev	24
Preglednica 6: Korekcijski faktor k_s za zamik karakteristične vrednosti elastičnosti	25
Preglednica 7: Frekvenca po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (neparametrično) prEN 384:2013, 1. del	26
Preglednica 8: Frekvenca po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (neparametrično) prEN 384:2013, 2. del	27
Preglednica 9: Frekvenca po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (parametrično), 1. del.....	31
Preglednica 10: Frekvenca po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (parametrično), 2. del.....	31
Preglednica 11: Preglednica z zahtevami za karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti po različnih postopkih optimalnega razvrščanja	38
Preglednica 12: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C24)	39
Preglednica 13: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C40)	39
Preglednica 14: Prvi skok vrednosti faktorja k_s , izsek iz tabele faktorja k_s v odvisnosti od števila elementov v vzorcu.....	41
Preglednica 15: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C24, število simulacij 100 000 in popravljena enačba za teorijo).....	42
Preglednica 16: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C40 število simulacij 100 000 in popravljena enačba za teorijo).....	43
Preglednica 17: Verjetnosti $P[m_k > m_k] \leq 0.25$ izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C24)	46
Preglednica 18: Verjetnosti $[Pm_k > m_k] \leq 0.25$ izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C40)	46
Preglednica 19: Tehnični podatki o mikrofону Sennheiser MKH 416 P48 (Vir: Spletna stran Sennheiser)	54
Preglednica 20: Nastavitve dinamičnega elastičnega modula za merjeno gostoto	58
Preglednica 21: Nastavitve za dinamični elastični modul za predpostavljeno gostoto 460 kg/m ³	58
Preglednica 22: Frekvenca trdnostnih razredov, določene na osnovi dinamičnega elastičnega modula (merjena gostota).....	59
Preglednica 23: Frekvenca trdnostnih razredov, določene na osnovi dinamičnega elastičnega modula (konstantna gostota 460 kg/m ³)	59

Preglednica 24: Frekvence trdnostnih razredov, določene na osnovi dinamičnega elastičnega modula (konstantna gostota 440 kg/m ³)	59
Preglednica 25: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18	64
Preglednica 26: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16	64
Preglednica 27: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18	64
Preglednica 28: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C18	65
Preglednica 29: Frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C27-C18	65
Preglednica 30: Frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C24-C18	65
Preglednica 31: Frekvenčna matrika za kombinacijo C30-C24-C16	65
Preglednica 32: Osnovna cenovna matrika iz standarda SIST EN 14081-2:2010	66
Preglednica 33: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18	66
Preglednica 34: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16	66
Preglednica 35: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18	67
Preglednica 36: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C16	67
Preglednica 37: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C18	67
Preglednica 38: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C27-C18	67
Preglednica 39: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C24-C18	68
Preglednica 40: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C30-C24-C16	68
Preglednica 41: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18	69
Preglednica 42: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16	69
Preglednica 43: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18	69
Preglednica 44: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C16	69
Preglednica 45: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C18	70
Preglednica 46: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C27-C18	70
Preglednica 47: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C24-C18	71
Preglednica 48: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C30-C24-C16	71
Preglednica 49: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18	71
Preglednica 50: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16	71
Preglednica 51: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18	72
Preglednica 52: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C16	72
Preglednica 53: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C18	72
Preglednica 54: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C27-C18	72
Preglednica 55: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C24-C16	72
Preglednica 56: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C30-C24-C16	73
Preglednica 57: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C35-C24-C18	73
Preglednica 58: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C35-C24-C16	74
Preglednica 59: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C30-C24-C18	74
Preglednica 60: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C30-C24-C16	75
Preglednica 61: : Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C30-C18	75
Preglednica 62: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C35-C27-C18	76
Preglednica 63: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C35-C24-C18	76

Preglednica 64: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C30-C24-C16.....	77
Preglednica 65: Popravljen nastavitve za obravnavane kombinacije	77
Preglednica 66: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C18 (na osnovi rezultatov nastavitve s konstantno gostoto)	78
Preglednica 67: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C18 (na osnovi rezultatov nastavitve s konstantno gostoto).....	78
Preglednica 68: Frekvenčna matrika za kombinacijo C30-C27-C18 (na osnovi rezultatov nastavitve s konstantno gostoto)	78
Preglednica 69: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C30-C27-C18 (na osnovi rezultatov nastavitve s konstantno gostoto).....	79
Preglednica 70: Karakteristične trdnostne in togostne lastnosti za T-trdnostne razrede v N/mm^2 in kg/m^3 za lamele lepljenega lameliranega lesa (povzeto po EN 14080:2013)	80
Preglednica 71: Sestava kombiniranega prečnega prereza lepljenega lameliranega lesa in minimalne upogibne trdnosti za stike med lamelami v N/mm^2 (povzeto po EN 14080:2013)	81
Preglednica 72: Sestava homogenega prečnega prereza lepljenega lameliranega lesa in minimalne upogibne trdnosti za stike med lamelami v N/mm^2 (povzeto po EN 14080:2013)	81
Preglednica 73: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C40-C30-C18 (merjena gostota).....	83
Preglednica 74: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C35-C27-C18 (merjena gostota).....	84
Preglednica 75: Razvrstitev elementov, ki so se z vsemi meritvami uvrstili v enak trdnostni razred (merjena gostota)	84
Preglednica 76: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C40-C30-C18 (konstantna gostota)	84
Preglednica 77: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C35-C27-C18 (konstantna gostota)	84
Preglednica 78: Razvrstitev elementov, ki so se z vsemi meritvami uvrstili v enak trdnostni razred (konstantna gostota).....	85

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer oznake za gradbeni proizvod pri strojnem razvrščanju lesa (Vir: SIST EN 14081-1:2006)	3
Slika 2: Gostota verjetnosti logaritemsko normalne porazdeljene slučajne spremenljivke	6
Slika 3: Gostota verjetnosti normalne porazdeljene slučajne spremenljivke	6
Slika 4: Histogram in prilagojena krivulja gostote verjetnosti za porazdelitev vzorca (trdnostni razred C24).....	7
Slika 5: Porazdelitve za trdnostne razrede C24, C27 in C30.....	8
Slika 6: Krivulje gostote porazdelitve trdnosti obravnavanega vzorca.	9
Slika 7: Histogrami porazdelitve trdnosti elementov po trdnostnih razredih	9
Slika 8: Gostote porazdelitve za elastični modul (na osnovi podatkov iz celotne populacije).10	
Slika 9: Gostote porazdelitve vzorcev po trdnostnih razredih, kot predvideva standard SIST EN 338.....	10
Slika 10: Gostota porazdelitve kombinacije razredov C35-C27-C18.....	11
Slika 11: Geografski prikaz štirih rastišč, s katerih je bil zbran les za mednarodni projekt GRADEWOOD (Vir: Bučar, Gornik Bučar, Pazlar, idr. 2012)	13
Slika 12: Grafični prikaz različnih postopkov optimalnega razvrščanja.	16
Slika 13: Vrednost korekcijskega faktorja ks karakteristične vrednosti trdnosti	18
Slika 14: Optimalna razvrstitev v kombinacijo C24-C18	21
Slika 15: Optimalna razvrstitev v kombinacijo C35-C24	21
Slika 16: Optimalna razporeditev za kombinacijo C35-C24-C16.....	22
Slika 17: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C35-C24-C18	32
Slika 18: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C35-C24-C16	32
Slika 19: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C30-C24-C18	33
Slika 20: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C30-C24-C16	33
Slika 21: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C35-C27-C18	34
Slika 22: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C35-C24-C18	34
Slika 23: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C30 -C18	35
Slika 24: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede z upoštevanjem enega vzorca in vseh korekcijskih faktorjev (kombinacija 35-C24-C16)	37
Slika 25: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede z upoštevanjem enega vzorca in vseh korekcijskih faktorjev (kombinacija C40-C30-C18)	37
Slika 26: Diagram verjetnosti izračunan z različnimi parametri ukaza »Quantile«	40
Slika 27: Verjetnosti $P[mk > mk]$, izračunane z različnimi postopki (C24, 10 000 simulacij)	40
Slika 28: Potek faktorja ks v odvisnosti od števila elementov v vzorcu	41
Slika 29: Potek faktorja ks v odvisnosti od števila elementov v vzorcu.	42
Slika 30: Verjetnosti $P[mk > mk]$, izračunane z različnimi postopki (C24, 100 000 simulacij, popravljena enačba za teorijo).....	43
Slika 31: Verjetnosti $P[mk > mk]$, izračunane z različnimi postopki (C40, 100 000 simulacij, popravljena enačba za teorijo).....	43
Slika 32: Vrednosti faktorja k, da zadostimo pogoju $P[mk > mk] \leq 0.25$	44
Slika 33: Primerjava različnih enačb za določitev faktorja k	45

Slika 34: Grafični potek faktorja k v odvisnosti od velikosti vzorca, primerjava enačbe v predstandardu in nove enačbe	46
Slika 35: Diagram verjetnosti izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C24)	47
Slika 36: Diagram verjetnosti izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C40)	47
Slika 37: Preprosta oprema naprave GT-PRO (Vir: Plos, 2012)	48
Slika 38: Shematski prikaz metode merjenja dinamičnega modula elastičnosti po metodi vzdolžnega valovanja nihanja (Vir: Plos, 2012)	49
Slika 39: Shema konstrukcije kondenzatorskega mikrofona (Vir: Spletna stran Bright Hub).	50
Slika 40: Frekvenčna karakteristika mikrofona Oktava 319 (Vir: Wikipedia. Pridobljeno 10.6.2015).....	51
Slika 41: Frekvenčna karakteristika mikrofona (Vir: Spletna stran Media College)	51
Slika 42: Shematski prikaz gradientnega mikrofona (Vir: Pelicon, Doplihar, 2011).....	52
Slika 43: Shematski prikaz tlačnega mikrofona (Vir: Pelicon, Doplihar, 2011)	52
Slika 44: Polarni (vsesmerni) vzorec (Vir: Spletna stran Universal Audio WebZine).....	53
Slika 45: Polarni vzorec v obliki osmice (Vir: Spletna stran Universal Audio WebZine. Pridobljeno 12.6.2015).....	53
Slika 46: Izpeljanke osnovnih vzorcev mikrofonom (Vir: Spletna stran Universal Audio WebZine. Pridobljeno 12.6.2015)	53
Slika 47: Krožni vzorec ozko usmerjenega mikrofona (Vir: Sobel, 2009)	53
Slika 49: Slika kondenzatorskega mikrofona, model SSENHEISER MKH 416 P48. (Vir: Spletna stran Sennheiser)	54
Slika 49: Krožna karakteristika mikrofona Sennheiser MKH 416 P48 (Vir: Spletna stran DCAudio Visuel).....	55
Slika 50: Korelacija med merjeno gostoto in trdnostjo.....	57
Slika 51: Korelacija med dinamičnim modulom elastičnosti in trdnostjo.....	57
Slika 52: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C40-C35-C24-C18	60
Slika 53: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C40-C30-C24-C18	60
Slika 54: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C35-C24-C18	61
Slika 56: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C35-C27-C18	61
Slika 56: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C30-C24-C16	62
Slika 57: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C40-C30-C18	62
Slika 58: Grafični prikaz dinamičnega modula elastičnosti v odvisnosti od trdnosti izračunanega z merjeno oziroma predpostavljeno gostoto	63
Slika 59: Graf 5 meritev frekvenc z napravo GT-PRO zunaj proizvodnje.....	83
Slika 60: Primerjava frekvenc pri vseh meritvah enako uvrščenih preizkušancev z merjeno in predpostavljeno gostoto (kombinacija C40-C30-C18)	85
Slika 61: Primerjava frekvenc pri vseh meritvah enako uvrščenih preizkušancev z merjeno in predpostavljeno gostoto (kombinacija C35-C27-C18)	86
Slika 62: Primerjava izmerjenih frekvenc znotraj proizvodnje z navadnim mikrofonom in mikrofonom Sennheiser MKH 416-P48	86

1 UVOD IN CILJI

Pri izboru vrste gradbenega materiala se čedalje več ljudi odloča za les. Les namreč ponuja veliko prednosti pred ostalimi gradbenimi materiali. Odlikuje ga ugodno razmerje med upogibno trdnostjo in lastno težo, zato je zelo primeren material za gradnjo na potresnih območjih, tudi v Sloveniji. Ponuja ugodno bivalno okolje, poleg tega pa je naraven, obnovljiv in okolju prijazen material. Vse to seveda pozitivno vpliva na rast uporabe lesa v gradbenih konstrukcijah. Ker je Slovenija gozdnata država s kakovostnim lesom, ima na tem gospodarskem področju dobre možnosti, ki pa jih trenutno še ne izkorišča v takšnem obsegu, kot bi jih lahko.

Če želimo material uporabiti v nosilnih konstrukcijah, moramo natančno poznati njegove trdnostne karakteristike. Do točnih trdnostnih karakteristik lahko pridemo le z destruktivnimi metodami preizkušanja. Ker seveda vsakega nosilnega elementa ne moremo obremenjevati do porušitve, obstajajo nedestruktivne metode, ki na osnovi statističnih postopkov ocenijo mehanske lastnosti materiala in element tako razvrstijo v ustrezni trdnostni razred. Tako lahko za vsak vgrajeni material, ki je bil projektiran po veljavnih evropskih predpisih, z neko dovolj veliko verjetnostjo trdimo, da bo prenesel karakteristične vrednosti obremenitve. Verjetnost porušitve dodatno zmanjšujemo z varnostnimi faktorji tako na strani materiala, kot tudi na strani obremenitev. Tudi pri ostalih gradbenih materialih, kot sta na primer jeklo in beton, se mehanske karakteristike določa na podoben način, vendar je natančnost pri lesu precej manjša, saj je ta material anizotropen, nehomogen material in zato težko kontroliramo njegove mehanske karakteristike (Srpčič, 2009).

Zaradi vseh teh negotovosti so lesene konstrukcije velikokrat predimenzionirane, kar je seveda nesmiselno in ekonomsko neupravičeno. Zato je bilo opravljenega veliko dela na tem področju s podobnim ciljem, to je določiti postopke ugotavljanja trdnostnih karakteristik lesa, ki bi dali čim bolj natančne rezultate.

Z nedestruktivnimi metodami torej ocenimo trdnostne karakteristike elementov. Trenutno je še vedno najbolj razširjena metoda vizualno razvrščanje, ki je najbolj nenatančna. Počasi se uvaja strojno razvrščanje lesa, ki je bolj zanesljivo od vizualnega. Koliko bolj zanesljivo je, je odvisno od izbranih indikativnih lastnosti. Bistvo nedestruktivnih metod je namreč v tem, da poiščemo neke lastnosti, ki jih lahko izmerimo (pri strojnem razvrščanju) in ki ima s trdnostjo čim boljše korelacijo. Uporabljajo se povezave med mehanskimi karakteristikami, ki so izpeljane na osnovi teorije mehanike ali pa povsem empirične enačbe, ki kar najboljše opisujejo korelacijo (Reščič, 2004).

Pri razvrščanju lesa je pomembno, da se zavedamo dejstva, da ni vseeno, v katere razrede in kombinacije le teh se odločimo razvrstiti les. Isti element lahko namreč razvrstimo v različne razrede, odvisno od tega, kakšno kombinacijo razredov smo si izbrali. To je sicer posledica same statistike, na osnovi katere temelji razvrščanje lesa in tudi posledica postopka razvrščanja lesa ter enačb za račun karakterističnih vrednosti mehanskih lastnosti, ki nam jih podajajo standardi.

Z napravo GT-PRO, ki je bila razvita v sklopu projekta *ARRS: Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti*, so bile predhodno opravljene raziskave na 1078 lesenih preizkušancih. Ti so bili preiskani z različnimi nedestruktivnimi metodami in na koncu tudi porušeni (za določitev pravih mehanskih karakteristik). Zaradi različnih poškodb vzorcev in

napak pri meritvah, je bilo za obdelavo uporabljenih 1059 rezultatov. Te podatke smo lahko uporabili in elemente optimalno razvrstili po postopku, ki ga določa trenutno veljavni standard. V pripravi pa so novi standardi.

Optimalno razvrščanje temelji na rezultatih karakterističnih vrednosti t.i. odločilnih lastnosti. Zato smo se v tej nalogi preverili tudi, kolikšen vpliv imajo spremembe računa karakterističnih vrednosti mehanskih lastnosti in primerjali rezultate optimalnega razvrščanja lesa, ki smo ga opravili najprej z upoštevanjem trenutne in bodoče verzije standardov in rezultate, ki jih dobimo, če se držimo teorije statistike (uporabljene točne enačbe iz teorije verjetnostnega računa in statistike). Pri tej primerjavi smo si pomagali s simulacijami v programu Mathematica. Preverili smo primernost enačb, ki so podane v standardih v pripravi in jih primerjali z ostalimi. Ugotovili smo, da obstoječa enačba ni ustrezna, zato smo s pomočjo simulacij poiskali novo, ki nam da primernejše rezultate.

Za napravo GT-PRO smo pripravili nastavitve za strojno razvrščanje lesa. Za določitev ustrezne indikativne količine smo na osnovi rezultatov preiskav pregledali korelacije med posameznimi mehanskimi karakteristikami (trdnost in gostota, trdnost in frekvenca, trdnost in dinamični elastični modul). Zanimalo nas je tudi, kolikšen vpliv ima izbor indikativne količine na končni izplen razvrščanja in katere so smiselne in še dopustne poenostavitve znotraj postopka razvrščanja, kar ocenimo s cenovnimi matrikami.

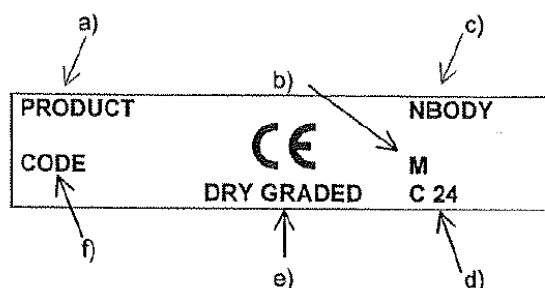
Postopek strojnega razvrščanja lesa je relativno zapleten, zato je v Evropi za ta namen na voljo omejen izbor standardiziranih naprav, s katerimi lahko ocenimo kakovost konstrukcijskega lesa, ki bi ga želeli tržiti kot gradbeni proizvod. V enem izmed znanih slovenskih lesnopredelovalnih centrov so bile zato izvedene meritve z omenjeno napravo. Pridobljene podatke smo uredili in jih obdelali tako, da bi jih v prihodnosti lahko uporabili za pripravo poročila za uvrstitev na seznam standardiziranih naprav za strojno razvrščanje lesa.

2 RAZVRŠČANJE LESA – SPLOŠNO

Harmoniziran evropski standard SIST EN 14081-1:2006 (Lesene konstrukcije – Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti) podaja predpise glede razvrščanja konstrukcijskega lesa. Standard podaja dve metodi nedestruktivnega razvrščanja lesa in sicer vizualno in strojno. V Sloveniji je trenutno razširjeno vizualno razvrščanje (Plos, 2006).

Pravila za vizualno razvrščanje vsebujejo oceno osnovnih značilnosti lesa: velikost, tip in število napak v lesu, ki zmanjšujejo trdnost lesa (grče, gniloba, piravost, smolnata mesta, razpoke...). Pri strojnem razvrščanju pa merimo izbrane parametre, to je običajno dinamični elastični modul za vzdolžno nihanje ali upogibna togost, ki je v neposredni povezavi s trdnostjo. Standard določa, da na koncu z dodatno vizualno oceno upoštevamo še napake v lesu, ki jih naprava za razvrščanje neposredno ne prepozna.

Z uveljavitvijo harmoniziranih standardov morajo biti vsi lesni proizvodi, ki so namenjeni uporabi v konstrukcijah, v skladu z evropsko Uredbo o gradbenih proizvodih (CPR), ki je s 1. julijem 2013 nadomestila prej veljavno Direktivo o gradbenih proizvodih. Pri uveljavitvi nove Uredbe je sicer prišlo do nekaterih sprememb, predvsem pri uporabi terminologije, vendar še vedno velja, da je potrebno za vsak gradbeni proizvod, za katerega obstaja evropski harmonizirani standard ali evropska tehnična ocena, pripraviti izjavo o lastnostih in ga označiti z oznako CE. Oznako CE se označi, kot predvideva ustrezen harmonizirani standard (Spletna stran Ministrstva za gospodarski razvoj in tehnologijo).



- a) Oznaka proizvajalca
- b) »M« pomeni strojno razvrščanje
- c) Identifikacijska številka priglašane organa
- d) Trdnostni razred
- e) Pogoji lesa
- f) Identifikacijska številka dokumenta

Slika 1: Primer oznake za gradbeni proizvod pri strojnem razvrščanju lesa (Vir: SIST EN 14081-1:2006)

2.1 VIZUALNO RAZVRŠČANJE

Vizualno razvrščanje je najstarejši način razvrščanja lesa v trdnostne razrede, v Sloveniji pa je še vedno tudi edini razširjen način razvrščanja lesa. Standard EN 14081-1 za vizualno razvrščanje podaja samo zahteve za nacionalne standarde za vizualno razvrščanje, saj enotnega evropskega standarda, ki bi določal kriterije vizualnega razvrščanja, zaradi različnih razlogov ni (Plos, 2012).

Prejšnji standardi za projektiranje konstrukcij so les označevali z razredi kakovosti (I, II in III). Za posamezne trdnostne razrede so bile določene vizualne karakteristike (širina letnic, naklon vlaken ter dovoljeni obseg napak), ki so v precej slabi povezavi s trdnostjo. Poleg tega je

vizualno razvrščanje zamudno in relativno subjektivno, kar seveda neugodno vpliva na zanesljivost konstrukcij. Slovenija svojega standarda za vizualno razvrščanje nima, je pa dovoljena uporaba privzetega nemškega standarda DIN 4074-1:2009, ki konstrukcijski les razvršča v tri razrede sortirne razrede: S7, S10 in S13 (Srpčič, 2009, Plos, 2012).

V okviru projekta *ARRS: Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti* so na osnovi primerjave rezultatov vizualnega razvrščanja in rezultatov porušnih preiskav pripravili poročilo o vizualnem razvrščanju konstrukcijskega lesa po trdnosti. Na osnovi teh rezultatov je bilo potrjeno vizualno razvrščanje v sortirne razrede po SIST DIN 4074-1 in preslikava v trdnostne razrede C18/C24 za slovenski les v okviru evropskega standarda EN 1912:2012. Tako lahko vizualno razvrstimo in z oznako CE označiti tudi slovenski les (Bučar, Gornik Bučar, Pazlar, idr., 2012a).

2.2 STROJNO RAZVRŠČANJE

Za hitrejše razvrščanje se je začel razvoj naprav za strojno razvrščanje lesa, ki z merjenjem ene ali več indikativnih količin (IP – indicative property) les razvrstijo v trdnostni razred. Naprednejše naprave lahko z empirično povezavo merijo več indikativnih lastnosti hkrati in s tem večajo zanesljivost razvrstitve (Plos, 2012).

Vizualne karakteristike posameznega strojno razvrščenega elementa morajo zadostiti zahtevam, ki so podane v standardu EN 14081-1 za strojno razvrščanje. Te se nanašajo na razpoke, geometrijske nepravilnosti elementa, nepravilnosti prereza, gnilobo, poškodbe zaradi insektov in druge možne nepravilnosti, ki jih z napravo za razvrščanje ni bilo mogoče zaznati. Vizualni pregled je potreben tudi za tiste elemente, kjer z napravo ni bilo mogoče narediti ocene mehanske karakteristike po celotni dolžini.

Naprave, ki se lahko uporabljajo za strojno razvrščanje, so navedene v 4. delu standarda SIST EN 14081 (Lesene konstrukcije – Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti). Samo les, ki je razvrščen z eno izmed navedenih naprav (pri čemer so upoštevana ustrezna dodatna določila), lahko pridobi oznako CE in je primeren za vgradnjo v nosilno konstrukcijo.

Naprave za strojno razvrščanje lesa uporabljajo različne nedestruktivne metode, med katere sodijo:

1. Vizualna metoda
2. Ultrazvočna metoda
3. Metoda vzdolžnega nihanja
4. Metoda statičnega modula elastičnosti
5. Metoda z rentgenskim pregledom

Metode in naprave za strojno razvrščanje so pregledno predstavljene v diplomski nalogi z naslovom *Razvrščanje konstrukcijskega lesa v različne kombinacije trdnostnih razredov* (Plos, 2012).

Standard SIST EN 14081 pri strojnem razvrščanju razlikuje dva osnovna sistema razvrščanja: sistem s sprotnim preverjanjem nastavitvev (*ang. output controlled system*) in sistem z enkratno predhodno nastavitvijo naprave (*ang. machine controlled system*). Pri obeh sistemih je zahtevan dodaten vizualni pregled (*ang. visual override*). Za sisteme z enkratno predhodno

nastavitvijo (ta je bil razvit v Evropi in je najbolj razširjen), standard razlikuje dva tipa lastnosti, ki sta bistvenega pomena pri določanju nastavitv naprave in razvrščanju lesa v trdnostne razrede.

Prve so t.i. »odločilne« lastnosti in zajemajo tri glavne lastnosti lesa: upogibna trdnost, elastični modul pri upogibu okrog močne osi preizkušanca in gostoto.

Druge so že prej omenjene »indikativne lastnosti«. Te lahko naprava izmeri in so v neki povezanosti z odločilnimi lastnostmi (to so na primer višina, širina, teža, elastični modul, ipd). Izbor indikativne lastnosti je v splošnem poljuben, vendar je zaradi nadaljnega postopka potrebno, da so te v čim boljši korelaciji z odločilnimi lastnostmi (Reščič, 2004).

V tej magistrski nalogi se bomo posvetili strojnemu razvrščanju lesa z napravo, ki deluje na osnovi metode vzdolžnega nihanja. Poskušali bomo določiti najbolj optimalno kombinacijo trdnostnih razredov. Z napravo za merjenje vzdolžnega nihanja je bil kot indikativna lastnost izračunan dinamični modul elastičnosti.

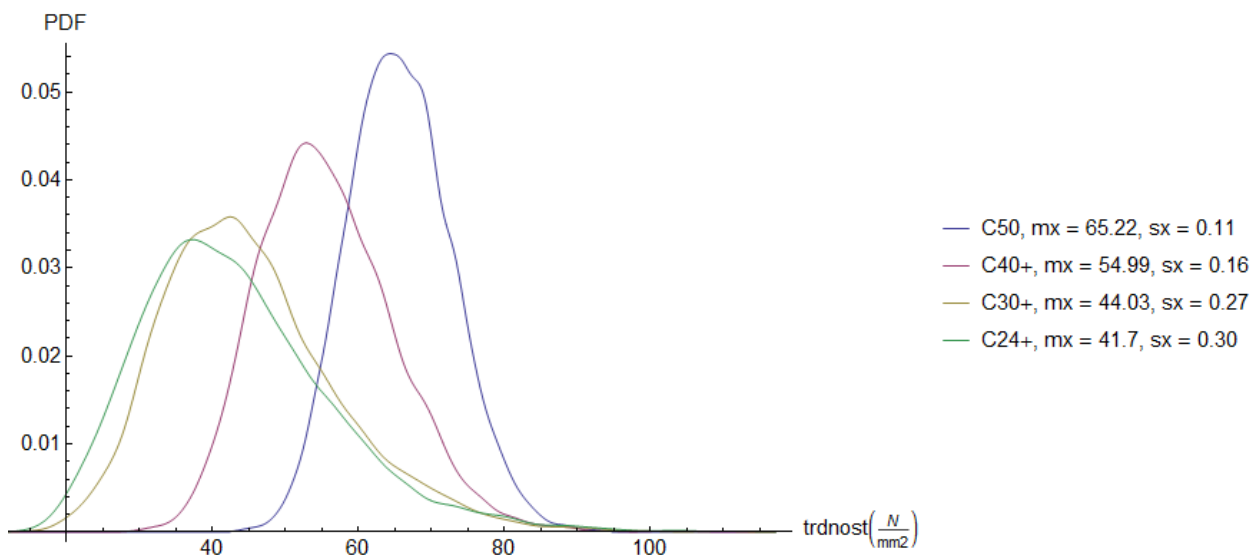
2.3 TRDNOSTNI RAZREDI

Masivni les se razvršča v trdnostne razrede, ki jih določa standard SIST EN 338:2010 (Konstrukcijski les – Trdnostni razredi). Les iglavcev se lahko razvršča v 12 trdnostnih razredov, ki so označeni s kratico C: »Conifers«, les listavcev pa v 6 razredov s kratico D: »Deciduous«. V posamezne trdnostne razrede se les razvrsti na podlagi ugotovljenih karakterističnih vrednosti za gostoto, trdnost in povprečne vrednosti modula elastičnosti. Mejne vrednosti za uvrstitev v določeni trdnostni razred, ki jih standard podaja, so prikazane v spodnji preglednici. Leseni element se v posamezni trdnostni razred lahko uvrsti le, če karakteristične vrednosti hkrati presegajo vrednosti, podane v spodnji preglednici.

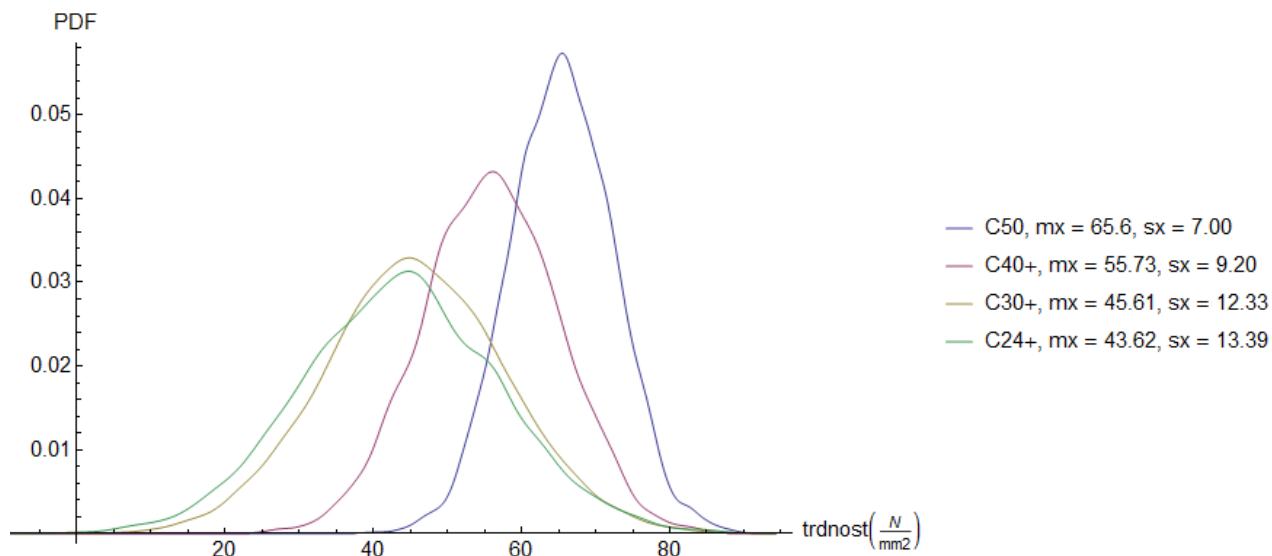
Preglednica 1: Karakteristične trdnosti in togostnih lastnosti masivnega mehkega in trdega lesa (Vir: SIST EN 338:2003)

		Poplar and softwood species											Hardwood species						
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Strength properties (in N/mm ²)																			
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Tension parallel	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Tension perpendicular	$f_{t90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression parallel	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Compression perpendicular	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Shear	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Stiffness properties (in kN/mm ²)																			
Mean modulus of elasticity parallel	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
5% modulus of elasticity parallel	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Mean shear modulus	G_{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25

Kot bomo videli v nadaljevanju naloge, so karakteristične vrednosti odvisne od posameznih vzorcev oziroma od sestave vzorca. Kot za vsak naravni sistem, je tudi v tem primeru značilna normalna porazdelitev trdnostnih in togostnih parametrov, za trdnost pa se lahko predpostavi tudi logaritemsko normalna porazdelitev vrednosti. Oblike teh porazdelitev so prikazane na naslednjih slikah.



Slika 2: Gostota verjetnosti logaritemsko normalne porazdeljene slučajne spremenljivke



Slika 3: Gostota verjetnosti normalne porazdeljene slučajne spremenljivke

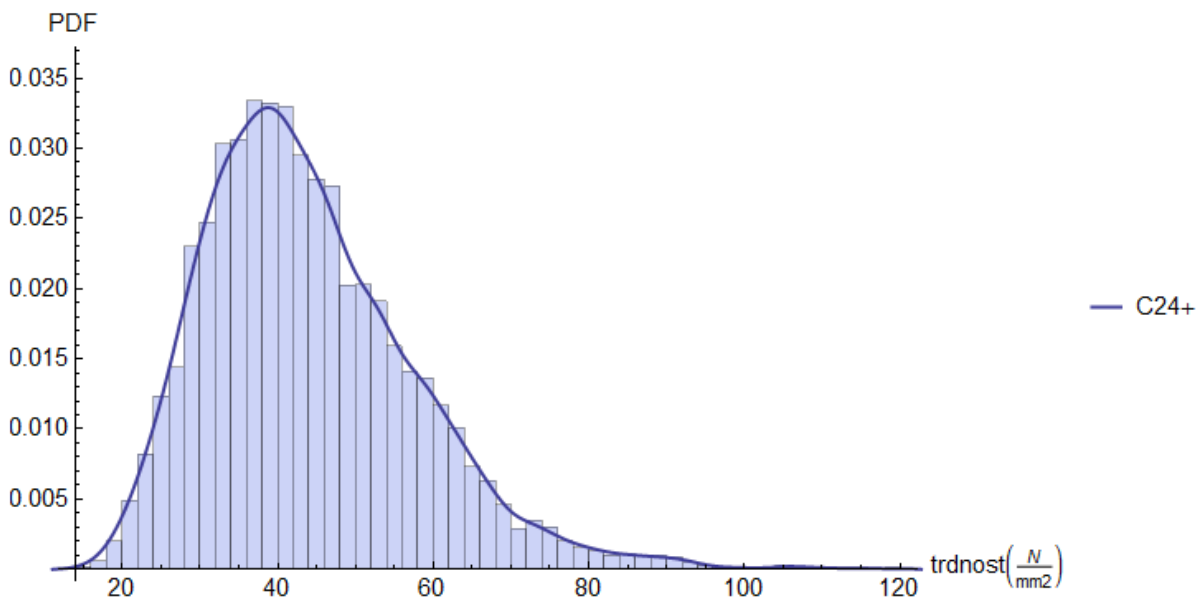
Glede na različne statistične značilnosti vzorca elementov (srednja vrednost in standardni odklon) vidimo, da je lahko porazdelitev zelo razpršena. Poleg tega pa so meje, ki določajo trdnostne razrede, relativno skupaj, zato se porazdelitve običajno prekrivajo. Kako in koliko se prekrivajo posamezni razredi, je odvisno tudi od izbire kombinacije trdnostnih razredov, v katere les razvrščamo. Težava bi torej nastopila, če bi želeli v trdnostni razred uvrstiti posamezni kos lesa, saj bomo videli, da bi ga ravno zaradi tega prekrivanja lahko uvrstili v različne trdnostne razrede. Posameznih elementov seveda ne razvrščamo v trdnostne elemente, ampak smo s tem samo želeli ponazoriti, da nam mehanske karakteristike posameznih elementov ne pokažejo celotne slike.

Za grafično ponazoritev te problematike, ki se pojavi pri opredeljevanju trdnostnih razredov, smo vzorec porušenih lesenih elementov razvrstili v vse trdnostne razrede posebej. Najprej smo jih razvrstili samo v razred C50, nato samo v razred C45 in tako naprej vse do C14.

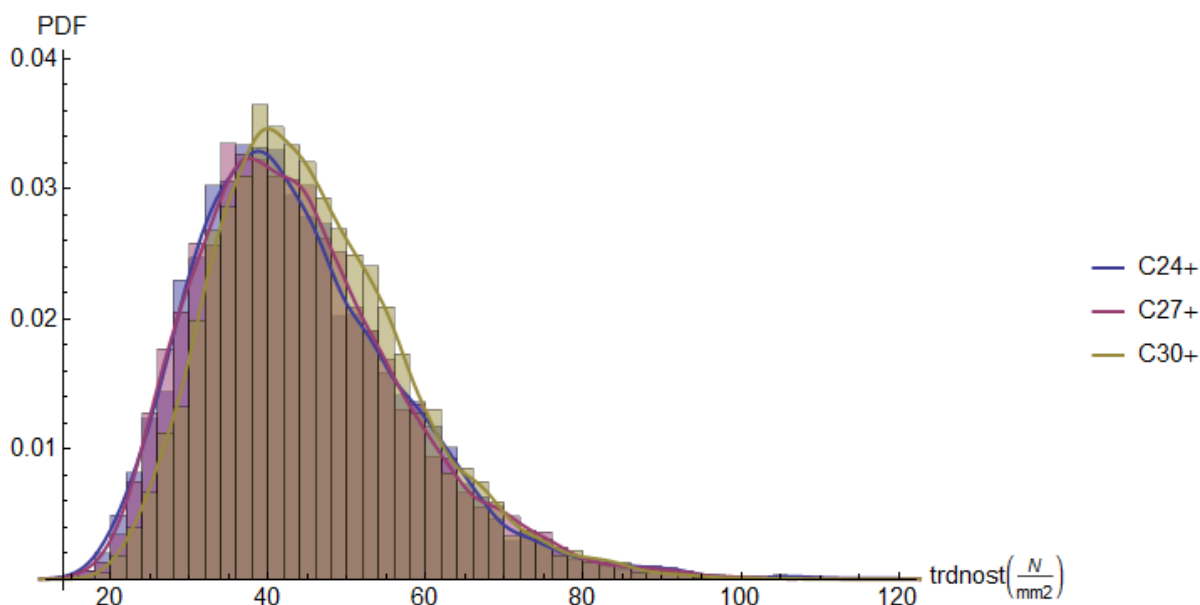
Preglednica 2: Parametri porazdelitev trdnosti in frekvence po posameznih trdnostnih razredih.

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
n	1059	1059	1059	1059	1059	1059	1043	960	660	402	216	95
ostanek	0	0	0	0	0	0	16	99	399	657	843	964
mx	43.62	43.62	43.62	43.62	43.62	43.62	44.03	45.61	51.03	55.73	60.70	65.60
sx	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39	13.39	13.08	12.33	10.28	9.20	8.10	7.00

Z izračunanimi povprečnimi vrednostmi in standardnim odklonom trdnosti smo v programu Wolfram Mathematica generirali večje število vzorcev in jih izrisali s histogrami. Pri tem smo upoštevali, da je trdnost porazdeljena logaritemsko normalno.



Slika 4: Histogram in prilagojena krivulja gostote verjetnosti za porazdelitev vzorca (trdnostni razred C24).



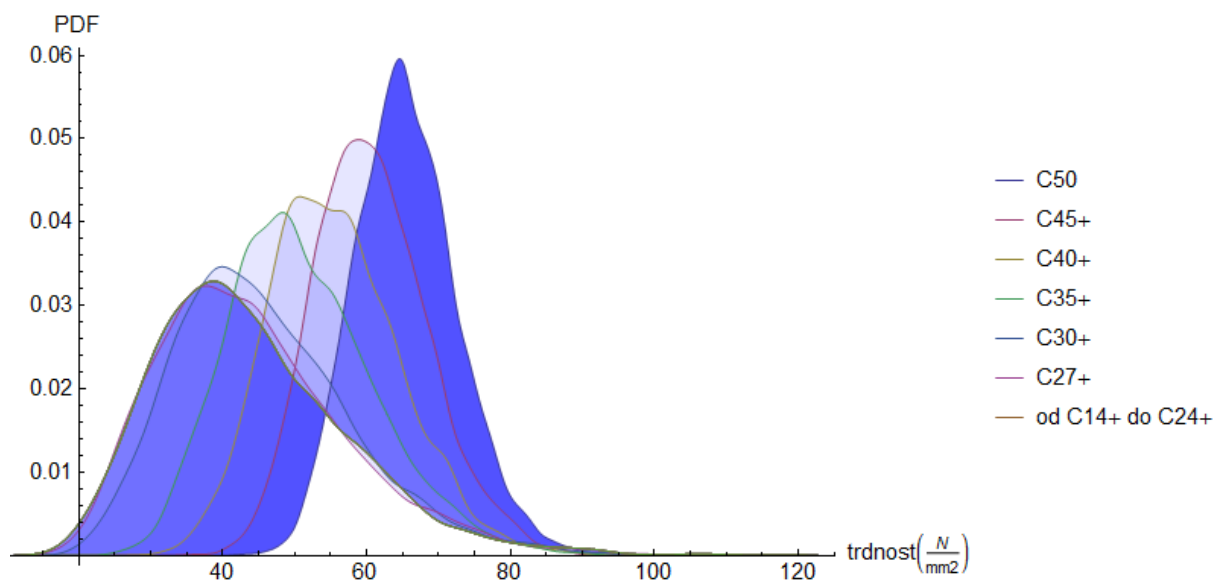
Slika 5: Porazdelitve za trdnostne razrede C24, C27 in C30.

Na spodnji sliki so prikazane krivulje porazdelitev vzorca za posamezne trdnostne razrede in predstavljajo gostoto porazdelitve generiranih vzorcev. Praktično vse krivulje se med seboj vsaj delno prekrivajo. V primeru, da je izmerjena upogibna trdnost na območju prekrivanja krivulj, lahko te elemente razvrstimo v katerikoli trdnostni razred. S stopnjevanjem trdnostnega razreda pa pada razpršenost gostote porazdelitve.

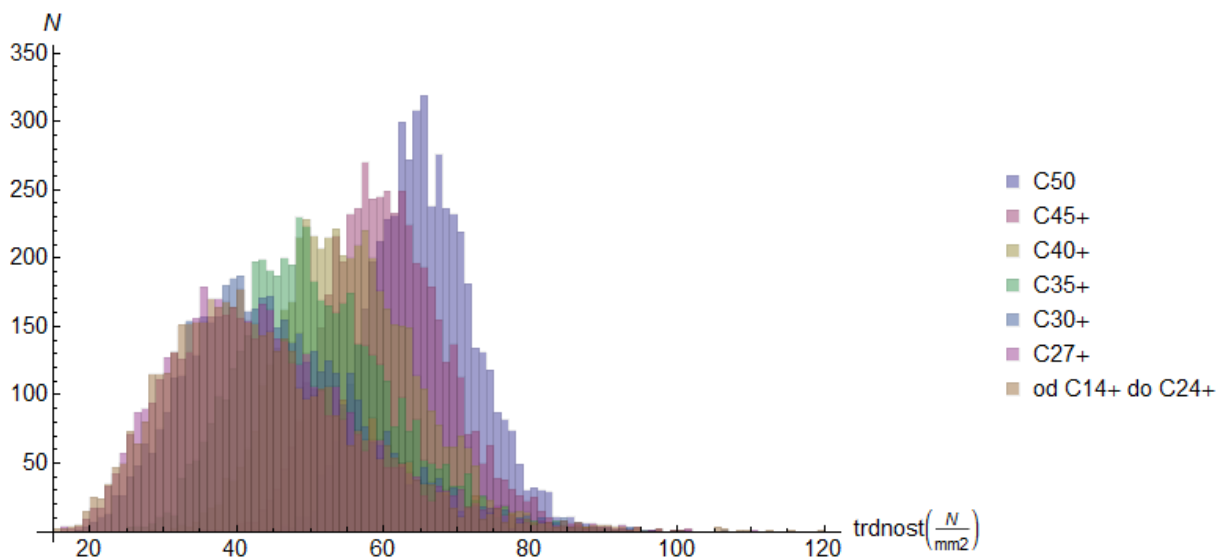
Kot vidimo na sliki, je relativno veliko območje nepobarvano. Nas sicer ne zanima celo območje ampak samo interval na abscisni osi, ki ustreza temu območju. Na tem intervalu trdnosti so zastopani vsi trdnostni razredi, kar pomeni, da lahko elemente z izmerjeno trdnostjo znotraj tega intervala, povsem korektno uvrstimo v katerikoli trdnostni razred. Tako lahko element z upogibno trdnostjo $f_m = 45 \text{ N/mm}^2$ uvrstimo v razred C50 in kot je logično tudi v razred C14. Ampak velja tudi obratna povezava. Element, ki je v C14, bi lahko uvrstili tudi v razred C50.

Skoraj polovico elementov v razredu C30 bi ravno tako lahko upravičeno razvrstili v C50. To ni zanemarljiv delež, zato je pomembno, da se tega zavedamo.

To je tudi razlog, da so lesene konstrukcije velikokrat predimenzionirane, kar je seveda neekonomično. Na drugi strani pa moramo biti previdni, da kateremu elementu ne precenimo trdnosti.



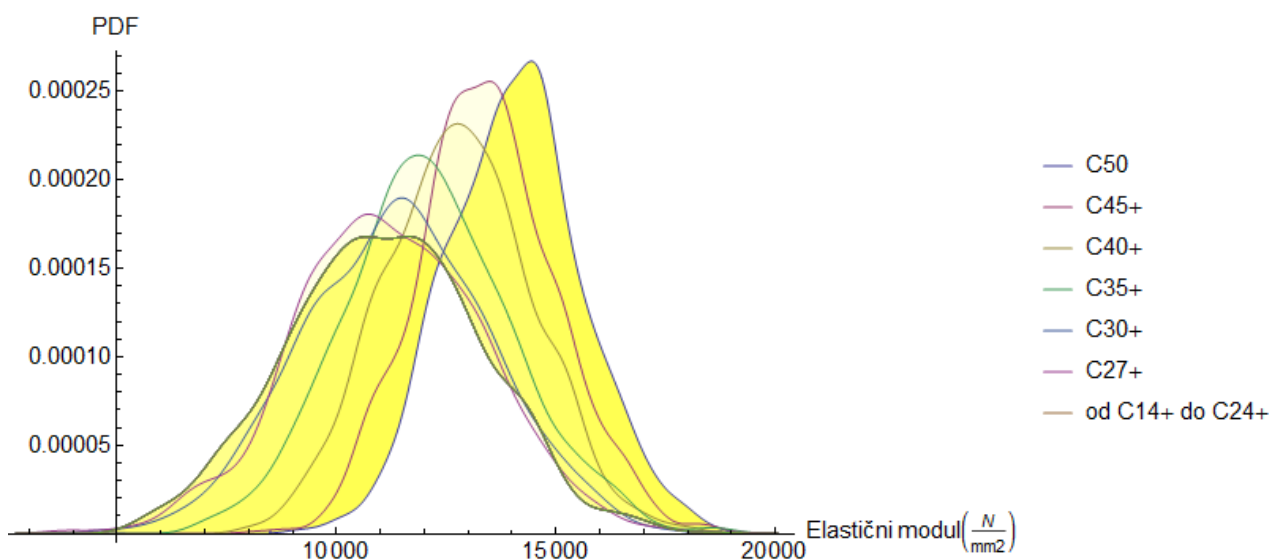
Slika 6: Krivulje gostote porazdelitve trdnosti obravnavanega vzorca.



Slika 7: Histogrami porazdelitve trdnosti elementov po trdnostnih razredih

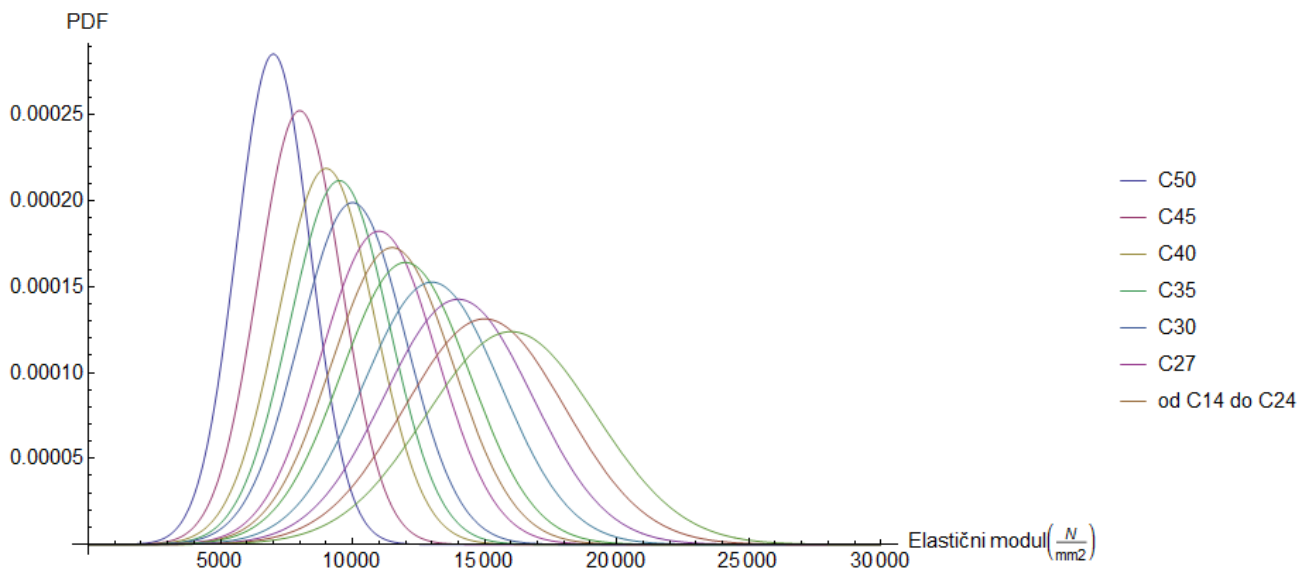
Če pogledamo porazdelitve, ki jih dobimo, če upoštevamo podatke o karakterističnih in povprečnih vrednosti za posamezne razrede iz standarda SIST EN 338 (Slika 9), te ne prikazujejo take slike, kot jo dobimo z dejanskimi vzorci. Ker za trdnost ni podanih povprečnih vrednosti, s katerimi bi lahko izrisali porazdelitve, bomo to pogledali na primeru elastičnega modula. Na Sliki 8 so prikazane krivulje gostote porazdelitve za elastični modul za podatke iz naših vzorcev.

Tudi v tem primeru je interval prekrivanja relativno veliko, kar je seveda neugodno. Želeli bi si bolj razporejene krivulje po celotni abscisi.



Slika 8: Gostote porazdelitve za elastični modul (na osnovi podatkov iz celotne populacije).

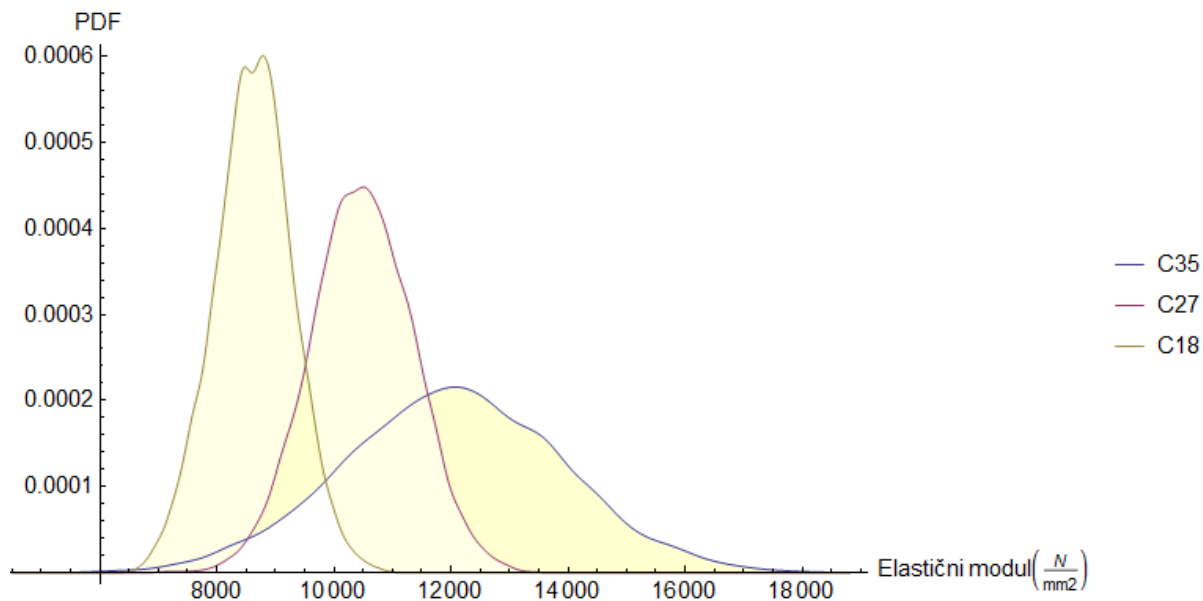
Na Sliki 9 so shematično prikazane porazdelitve za posamezne razrede, kot jih predvideva standard. Vidimo, da je na tej sliki bistveno manj prekrivanja in da so razporeditve trdnostnih razredov bolj enakomerne, kot v realnosti. Opazujemo predvsem obliko krivulje in pozicijo na abscisni koordinatni osi. Predvidevamo, da podatki, ki veljajo v standardu veljajo za razvrstitev vzorca v vse trdnostne razrede hkrati, torej v kombinacijo vseh razredov. Mi pa smo svojo populacijo elementov razvrstili v vsak razred posebej, ne v kombinacijo, saj bi v tem primeru potrebovali bistveno večjo populacijo elementov.



Slika 9: Gostote porazdelitve vzorcev po trdnostnih razredih, kot predvideva standard SIST EN 338.

Sama razpršenost krivulj nas je nekoliko presenetila, saj so višji razredi bistveno bolj razpršeni kot nižji. Glede na naše rezultate pa smo pričakovali ravno obratno. Verjetno je to posledica različnega načina razvrščanja (v kombinacijo razredov oziroma v posamezne trdnostne razrede). To se je potrdilo z optimalno razvrstitvijo naših preizkušancev v kombinacijo C35-

C27-C18. Gostota porazdelitve je prikazana na spodnji sliki. Vidimo, da se razpršenost porazdelitve z višanjem trdnostnega razreda (znotraj dane kombinacije) res veča.



Slika 10: Gostota porazdelitve kombinacije razredov C35-C27-C18.

Z vsako populacijo in razvrščanjem lesa v trdnostne razrede se želimo čimbolj približati zgornji sliki. Zato se nenehno popravljajo stare in razvijajo nove metode razvrščanja, kar je bil tudi eden izmed naših ciljev v tej magistrski nalogi.

3 STANDARDI

Pri razvrščanju lesa so temeljni uporabljeni standardi SIST EN 14081 z naslovom *Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti*. Standard je sestavljen iz štirih delov.

Prvi del določa splošne zahteve razvrščanja konstrukcijskega lesa za vizualno in strojno razvrščanje.

Drugi del natančneje obravnava strojno razvrščanje in podaja dodatne zahteve za začetni preizkus proizvodnje. Ta standard podaja postopek optimalnega razvrščanja lesa in zahteve za naprave za razvrščanje lesa odvisno od tega ali imamo sistem s sprotnim preverjanjem nastavitv ali sistem z enkratno predhodno nastavitvijo naprave. Kot omenjeno, je predstavljen tudi postopek za standardizacijo naprav.

Predstavljen je tudi postopek določanja nastavitv za novo napravo za razvrščanje, katerim smo sledili pri pripravi nastavitv za napravo GT-PRO.

Tretji del, ki obravnava dodatne zahteve za notranjo kontrolo proizvodnje, za naše delo ni bil bistvenega pomena. Četrty del standarda pa ponuja izbor vseh standardiziranih naprav za strojno razvrščanje lesa. Eden izmed ciljev naloge je tudi priprava ustrezne dokumentacije za uvrstitev naprave na seznam teh naprav.

Poleg omenjenih standardov smo morali upoštevati še nekaj drugih. Standard SIST EN 338: Konstrukcijski les – Trdnostni razredi podaja zahteve za uvrstitev v posamezne trdnostne razrede za iglavce (upogibni in natezni preizkus) in listavce.

Standard SIST EN 384: Konstrukcijski les - Ugotavljanje značilnih vrednosti mehanskih lastnosti in gostote, podaja postopke določanja karakterističnih vrednosti mehanskih lastnosti elementov (trdnost, gostota, elastični modul). Ta standard se sklicuje na standard SIST EN 14358: Lesene konstrukcije – Računske lastnosti 5-percentilne vrednosti in srednje vrednosti za namene začetnega preizkušanja tipa in kontrole proizvodnje v obratu.

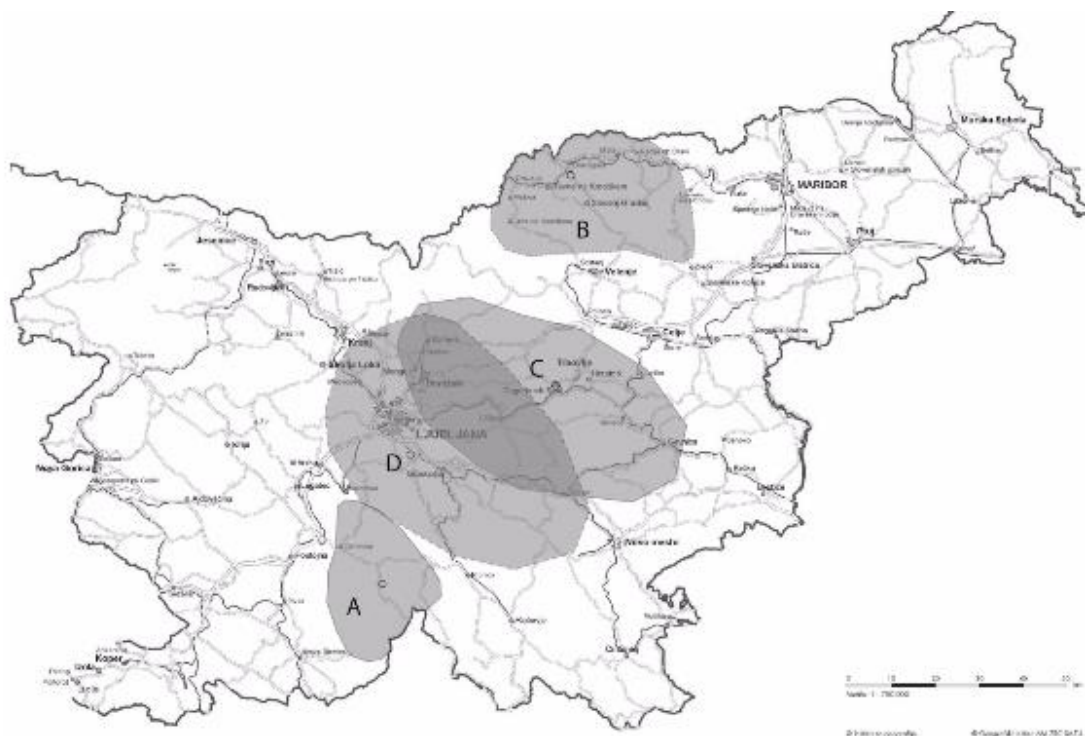
Do sedaj omenjeni standardi obravnavajo samo masivni les, danes pa je v gradbeništvu v velikem porastu uporaba lepljenega lameliranega lesa in lepljenega masivnega lesa. Zato ima pomembno vlogo tudi standard SIS EN 14080, ki zelo obširno obravnava tudi omenjene lesne proizvode. Potrebno je upoštevati tudi zahteve tega standarda, saj se veliko razvrščenega masivnega lesa uporabi za lesne proizvode.

4 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE

Optimalno razvrščanje je način razvrščanja lesa, ki preizkušane elemente razvrsti v čim višje trdnostne razrede. Optimalno razvrščanje se izvaja na osnovi odločilnih lastnosti in sicer trdnosti (dobljena z upogibnim preizkusom po standardu), gostote in modula elastičnosti. Da zagotovimo kar najboljši možen izplen in da so rezultati optimalnega razvrščanja med seboj primerljivi, standard SIST EN 14081-2 natančno predpisuje postopek razvrščanja.

4.1 UPORABLJENI PREIZKUŠANCI

Pri delu smo uporabili podatke nedestruktivnih in destruktivnih preiskav elementov, ki so bile izvedene znotraj raziskovalnega projekta »Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti«. Da bi ugotovili kakovost slovenskega lesa (iglavcev), primerljivost le tega z lesom iz rastišč v drugih državah in posledično upravičenost razvrščanja v enake trdnostne razrede, kot to počnejo sosednje evropske države, je bilo preiskanih 1074 elementov (smreka in jelka) iz različnih rastišč v Sloveniji in sicer iz Notranjske, Koroške in osrednje Slovenije. V osrednji Sloveniji sta bili definirani dve rastišči, kot je prikazano na spodnji sliki (Bučar, Gornik Bučar, Pazlar, idr., 2012b).



Slika 11: Geografski prikaz štirih rastišč, s katerih je bil zbran les za mednarodni projekt GRADEWOOD (Vir: Bučar, Gornik Bučar, Pazlar, idr. 2012b)

Preiskani so bili vzorci elementov različnih dimenzij prečnih prereзов:

- 40 mm² x 100 mm² (249 preizkušancev)
- 50 mm² x 150 mm² (500 preizkušancev)
- 44 mm² x 210 mm² (251 preizkušancev)
- 140 mm² x 140 mm² (74 preizkušancev)

Če želimo preizkušance razvrstiti v vse možne trdnostne razrede, standard SIST EN 14081-2 zahteva, da je celoten vzorec sestavljen iz vsaj 900 preizkušancev, medtem pa morajo biti ti smiselno razporejeni v vsaj štiri manjše reprezentativne vzorce. Tem zahtevam je bilo zadoščeno. Vsak manjši vzorec mora biti sestavljen iz vsaj 100 preizkušancev.

Sestava vzorca mora biti taka, da je zagotovljeno, da je v vsakem razredu minimalno število preizkušancev 20. Če se naenkrat razvršča v dva razreda, standard zahteva, da je minimalno število elementov v posameznem razredu 40 (povzeto po standardu SIST EN 14081-2).

V sklopu evropskega projekta Gradewood so les preiskali vizualno in strojno (nedestruktivno) s petimi različnimi napravami za razvrščanje v različnih državah Evrope (Švedska, Nizozemska, Francija, Belgija in Italija).

Z izmerjenimi dimenzijami in težo preizkušancev je bila izračunana povprečna gostota lesa. Z uporovnim vlagomerom je bila izmerjena vlažnost lesa. Ta je bila ponovno določena gravimetrično po končanih porušnih preiskavah na odžaganem delu preizkušanca čistega dela lesa brez grč. Na Zavodu za gradbeništvo so bile opravljene tudi enostavne nedestruktivne preiskave za določitev dinamičnega modula elastičnosti in sicer po frekvenčni in ultrazvočni metodi. Frekvenčni modul elastičnosti je bil merjen z napravo GT PRO.

Po opravljenih nedestruktivnih preiskavah v različnih evropskih institucijah, so bili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije izvedene še porušne preiskave teh elementov in sicer po navodilih standardov EN 384:2010 in EN 408:2003.

4.2 RAZVRŠČANJE V TRDNOSTNE RAZREDE

Vsi elementi morajo biti razvrščeni na osnovi lastnosti, za katere so podane zahteve in določajo uvrstitev v najvišji možni razred. Če se v določen razred razvrsti manj kot 20 elementov (v primeru razvrščanja v več kot dva trdnostna razreda hkrati se ta vrednost dvigne na 40 elementov), moramo te elemente prerazporediti ustrezno v nižje razrede tako, da obravnavani razred ne vsebuje nobenega (vse elemente premaknemo v nižji razred) ali pa jih vsebuje vsaj dvajset (nekaj elementov iz zgornjega razreda premaknemo v nižji obravnavani razred). Tako za vsak element dobimo njegov optimalen razred. Zahtevane karakteristične vrednosti izračunamo po predpisih standarda SIST EN 338 z upoštevanjem vseh modifikacijskih faktorjev (podani v SIST EN 338 oziroma v SIST EN 384).

Standard podaja naslednji postopek določanja optimalnih razredov:

- 1) Najprej razvrstimo elemente po velikosti glede na izbrano odločilno lastnost. Nato določimo maksimalno število elementov, ki še zadostijo zahtevam za izbran trdnostni razred (npr. karakteristična vrednost gostote za vzorec je višja od zahtevane po standardu)
- 2) Korak 1) ponovimo še za ostale odločilne lastnosti
- 3) Na osnovi števila elementov v trdnostnem razredu ovrednotimo odločilne lastnosti in sicer tako, da je odločilna lastnost, po kateri se je v razred uvrstilo največ elementov, označena s črko (a), naslednja s črko (b), (c) pa označuje lastnost z najmanjšim številom elementov v razredu.
- 4) Elemente v (a) nato razvrstimo primarno po lastnosti (b) in sekundarno po (c) in (a) in tako določimo maksimalno število elementov, ki še zadoščajo zahtevam za lastnost (b). Takšen izbor elementov nato razvrstimo primarno po lastnosti (c) in sekundarno po lastnosti (b) in (a) in določimo maksimalno število elementov, ki še

zadoščajo zahtevam za lastnost (c). Sedaj morajo vse odločilne lastnosti ustrezati zahtevam trdnostnega razreda.

- 5) Že uvrščene elemente odstranimo iz obravnave in ponavljamo postopek od 1) do 4) za naslednje izbrane razrede v kombinaciji.

Na ta način smo preizkušance razvrstili v osem različnih kombinacij trdnostnih razredov. Izbor kombinacij temelji na predhodnem pregledu kombinacij trdnostnih razredov, za katere so že pripravljene nastavitve za naprave za strojno razvrščanje lesa, ki so že na seznamu standardiziranih naprav v standardu SIST EN 14081-4. V razrede in kombinacije razredov, ki so se največkrat pojavile, smo optimalno razvrstili naše preizkušance. Te kombinacije bomo tudi v nadaljevanju uporabili pri pripravi nastavitve za napravo GT-PRO:

- C40-C35-C24-C18
- C40-C35-C24-C16
- C40-C30-C24-C18
- C40-C30-C24-C16
- C35-C27-C18
- C35-C24-C18
- C30-C24-C16
- C40-C30-C18

Za razrede višje od C40 se nismo odločili, saj se v (slovenski) industriji uporablja les srednjih trdnostnih razredov. Poleg tega pa po veljavnih standardih slovenskega lesa ni mogoče razvrščati v višje trdnostne razrede (Plos, 2012).

Odločilne lastnosti morajo zadoščati naslednjim zahtevam:

- trdnost 95 % elementov razreda mora presegati zahtevano trdnost E_{req}
- povprečje modulov elastičnosti elementov razreda E_m mora presegati zahtevani modul elastičnosti E_{req} ,
- gostota 95 % elementov razreda mora presegati zahtevano gostoto ρ_{req}

Za lažjo predstavo je na spodnji sliki grafično prikazan postopek obdelave podatkov po različnih postopkih.

OPTIMALNO RAZVRŠČANJE	PREDSTANDARD	PARAMETRIČNO (TEORIJA)	Popravljeni karakteristični vrednosti za trdnost, elastični modul in gostoto podvorcev.
			Gostota in modul elastičnosti sta porazdeljena normalno.
			Trdnost je porazdeljena logaritemsko normalno.
		NEPARAMETRIČNO	Vzorec mora imeti vsaj 40 elementov.
			Popravljeni karakteristični vrednosti za trdnost, elastični modul in gostoto podvorcev.
		PREDPOSTAVKE	Ustrezno upoštevan faktor k_v .
	Vzorec je dovolj velik.		
	Poenostavljen postopek za račun 5. centila.		
	Upoštevana korekcija za E_{mod} na strani zahtev.		
	STANDARD	PREDPOSTAVKE	Ustrezno upoštevan faktor k_v .
Vzorec je dovolj velik.			
Poenostavljen postopek za račun 5. centila.			
Upoštevana korekcija za E_{mod} na strani zahtev.			

Slika 12: Grafični prikaz različnih postopkov optimalnega razvrščanja.

4.3 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE PO STANDARDU SIST EN 384:2010

Karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti (trdnosti, globalnega elastičnega modula in gostote) smo izračunali, kot predpisuje standard SIST EN 384:2010.

- Trdnost

Za vsak izbrani vzorec (v našem primeru so to kar elementi, ki se uvrstijo v izbrani trdnostni razred) je potrebno določiti 5. centil trdnosti in sicer tako, da najprej vse podatke (trdnosti) razvrstimo po velikosti, padajoče. Potem poiščemo vrednost, za katero velja, da je 5 % vrednosti manjših ali enakih od te karakteristične vrednosti. Če nobena vrednost v vzorcu ne ustreza izračunanemu centilu, se med vrednostmi izvede interpolacija (Reščič, 2004).

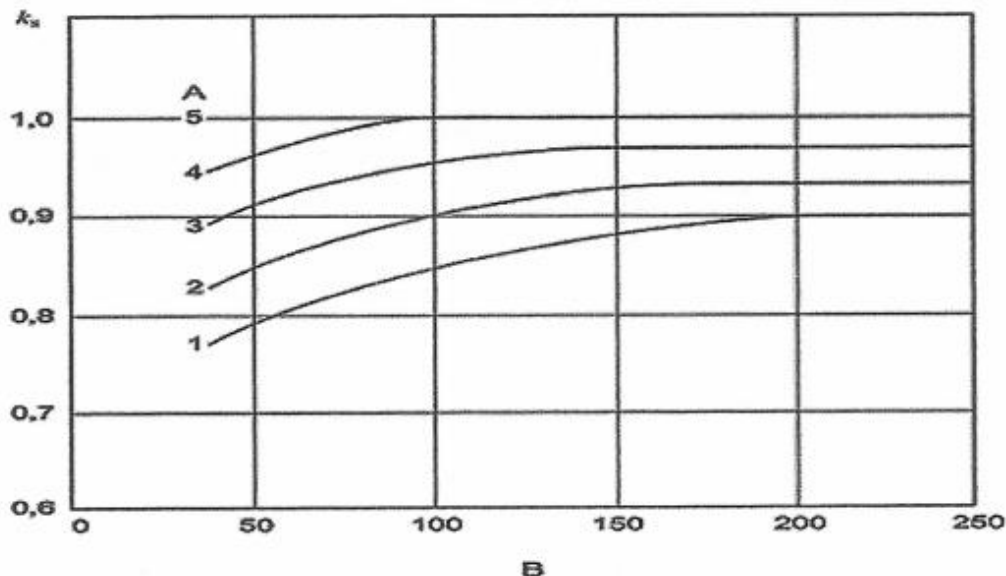
Za to uporabimo naslednjo enačbo:

$$y_{0.05} = y_j + (0.05 \cdot n - j) \cdot (y_{j+1} - y_j) \quad (1)$$

Vendar to še ni prava karakteristična vrednost, kot jo določa standard. Potrebne so še korekcije, ki so odvisne od velikosti vzorca (k_s) in od izbranega trdnostnega razreda, v katerega razvrščamo (k_v), če razvrščamo strojno.

Vrednost korekcijskega faktorja k_s je odvisna od števila vzorcev (A) in od števila preizkušancev v najmanjšem vzorcu (B). Posamezni vzorec naj bi bil sestavljen iz preizkušancev ene velikosti prečnega prereza in iz ene populacije preizkušancev. S tem faktorjem zmanjšujemo karakteristične vrednosti, saj so vrednosti manjše od 1. Velika redukcija je potrebna, kadar vzorec ni reprezentativen. Če imamo samo en vzorec z majhnim številom preizkušancev, lahko ta redukcija doseže med 20 – 25 %.

Zavedati se moramo, da zaradi majhne površine države v Sloveniji načeloma nimamo težav z reprezentativnostjo preizkušancev. V primerjavi z velikostjo drugih držav, lahko predpostavimo, da celotna Slovenija predstavlja eno rastišče. Delitev v posamezne vzorce je v tem pogledu nesmiselna.



Slika 13: Vrednost korekcijskega faktorja k_s vs karakteristične vrednosti trdnosti

Po drugi strani pa veljavni standard dopušča, da se karakteristična vrednost poveča za 12 % na račun strojnega razvrščanja, ki zagotavlja manjšo variabilnost izmerjenih vrednosti trdnosti. Za razrede nižje od vključno C30, lahko uporabimo faktor $k_v = 1.12$. S tem se konservativnost razvrščanja nekoliko zmanjša.

Cilj našega optimalnega razvrščanja je predvsem v tem, da pripravimo pregled nad rezultati optimalnega razvrščanja, ki ga izvedemo z različni postopki (po veljavnem standardu, standardu v pripravi in teoretičnih enačbah, ki so ravno tako podane v predstandardu). Tako lahko primerjamo, po katerem postopku dobimo boljši izplen in kateri izmed teh je na varni strani in pri tem ni preveč konservativen. Kot bomo videli v nadaljevanju, teoretične enačbe ne predvidevajo nobenih korekcijskih faktorjev, ki bi upoštevali velikost vzorca (v odvisnosti od reprezentativnosti tega). Zato smo tudi pri tem postopku optimalnega razvrščanja ta faktor zanemarili oziroma predpostavili, da je enak 1, kar velja v primeru dovolj reprezentativnega vzorca.

Faktor k_v smo ustrezno upoštevali pri nižjih trdnostnih razredih.

- Gostota

Za gostoto se 5. centil ρ_{05} določi na enak način kot za trdnost. Za karakteristično vrednost pa upoštevamo uteženo povprečje vzorca, ki ga izračunamo po enačbi

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05,j} n_j}{\sum n_j} \quad (2)$$

n_j ... število preizkušancev v vzorcu j in

$\rho_{05,j}$... 5. centil gostote v vzorcu j .

Korekcije zaradi števila vzorcev in zaradi strojnega razvrščanja pri gostoti niso predpisane.

- Elastični modul

Izmerjeni elastični modul moramo preračunati na lokalni elastični modul in izračunati povprečno vrednost vzorca po enačbi (3).

$$\bar{E} = [\sum E_i/n] \cdot 1.3 - 2690 \quad (3)$$

E_i ... elastični modul i -tega preizkušanca v vzorcu z elementi $i = 1$ do n

Karakteristična vrednost modula elastičnosti se nato izračuna po enačbi

$$E_{0,mean} = \frac{\sum \bar{E}_j \cdot n_j}{\sum n_j}, \text{ kjer je} \quad (4)$$

n_j ... število preizkušancev v vzorcu j

\bar{E}_j ... povprečna vrednost modula elastičnosti vzorca j .

Korekcije zaradi števila vzorcev in zaradi strojnega razvrščanja pri elastičnem modulu niso predpisane. Vendar standard SIST EN 14081-2:2011 v poglavju, ki določa postopke za izpeljavo in preveritev nastavitv naprav za strojno razvrščanje, tudi modulu elastičnosti dodaja faktor k_s (ne glede na izbiro postopka optimalnega razvrščanja). Vrednosti elastičnega modula na strani zahtev, katerim moramo zadostiti za dosego trdnostnega razreda, pa moramo pomnožiti še s faktorjem 0.95. Tudi to velja pri vseh postopkih optimalnega razvrščanja.

V programu EXCEL so bile izdelane preglednice za izračun karakterističnih vrednosti odločilnih lastnosti. Upoštewane so bile opisane predpostavke, algoritem in enačbe. V programskem jeziku VBA (Visual Basic for Applications) smo napisali program, ki avtomatsko poišče maksimalno možno število elementov v posameznem razredu tako, da odločilne lastnosti še ustrezajo zahtevam za izbrani razred. Natančnost je primerna natančnosti eksperimentalnih podatkov. Gostota in trdnost sta obravnavani na eno decimalno mesto natančno, modul elastičnosti pa na celo število.

V spodnji preglednici je so prikazani rezultati optimalnega razvrščanja.

Preglednica 3: Frekvence po optimalnih trdnostnih razredih po standardu SIST EN 384:2010, 1. del

razred	C40		C40		C40		C40	
	C35		C35					
					C30		C30	
	C24		C24		C24		C24	
	C18				C18			
			C16				C16	
	C40-C35-C24-C18		C40-C35-C24-C16		C40-C30-C24-C18		C40-C30-C24-C16	
		N	%	N	%	N	%	N
C50								
C45								
C40	536	50.6	536	50.6	536	50.6	536	50.6
C35	0	0.0	0	0.0				
C30					61	5.8	61	5.8
C27								
C24	423	39.9	423	39.9	331	31.3	331	0.0
C18	0	0.0			31	2.9	0	
C16			80	7.6			127	12.0
ostanek	100	9.4	20	1.9	100	9.4	4	0.4

Preglednica 4: Frekvence po optimalnih trdnostnih razredih po standardu SIST EN 384:2010, 2. del

razred							C40	
	C35		C35					
					C30		C30	
			C27					
	C24				C24			
	C18		C18				C18	
					C16			
	C35-C24-C18		C35-C27-C18		C30-C24-C16		C40-C30-C18	
	N	%	N	%	N	%	N	%
C50								
C45								
C40							536	50.6
C35	752	71.0	752	71.0				
C30					993	93.8	61	5.8
C27			103	9.7				
C24	154	14.5			0	0.0		
C18	73	6.9	172	16.2			462	43.6
C16					66	6.2		
ostanek	80	7.6	32	3.0	0	0.0	0	0.0

Iz zgornjih preglednic vidimo, da so nekatere izbrane kombinacije precej nesmiselne. Taka je npr. C30-C24-C16, saj je razred C24 popolnoma prazen. Sicer pa je porazdelitev elementov ugodna, saj je večje število elementov v najvišjem trdnostnem razredu.

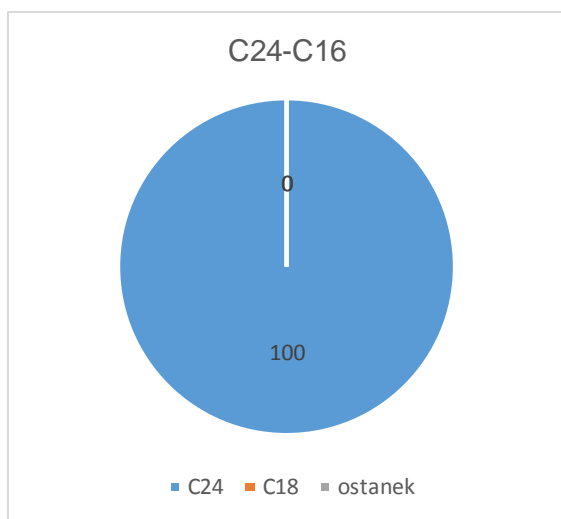
Opazimo tudi, da razvrščanje lesa v sosednje oziroma bližnje trdnostne razrede, kot npr. C24-C18 ravno tako ni smiselno, saj ima višji razred neprimerno večje število elementov kot sosednji, kar je zopet posledica predvsem pravil statistike in samega algoritma razvrščanja (kot je že predstavljeno v 2. poglavju). To je lepo vidno tudi v primeru kombinacije razredov C40-C35-C24-C18, kjer so elementi samo v razredih C40 in C24, ostala dva pa sta prazna, pri tem pa imamo še skoraj 10 % elementov v ostanku. Že v kombinaciji C40-C35-C24-C16 je razporeditev nekoliko ugodnejša, saj razreda C24 in C16 nista sosednja.

Za najbolj optimalno kombinacijo razvrščanja se je tako po mojem mnenju izkazala kombinacija C40-C30-C18 (podobno bi bilo za kombinacijo C40-C30-C16, saj bi se elementi iz razreda C18 prestavili v C16) in kombinacija C35-C27-C18.

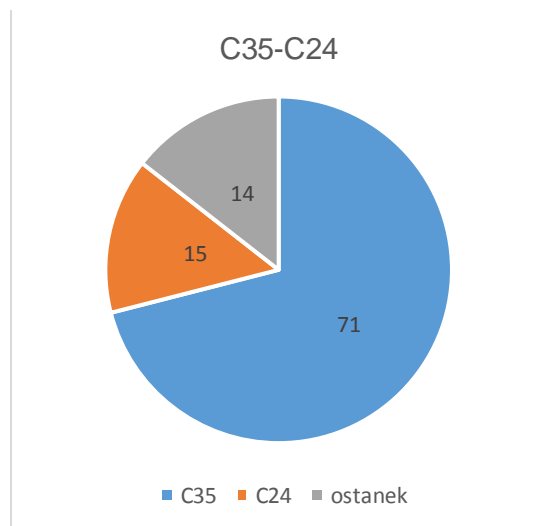
Izogibati pa se želimo tudi ostanku, saj je to neizkoriščen les, ki pa ni nujno, da ima slabe lastnosti. Vidimo, da pri določenih kombinacijah ostankov ni, pri nekaterih pa je teh skoraj 10 %.

Zastopanost razreda C24 je relativno dobra v skoraj vseh kombinacijah, razen pri C30-C24-C16. Slednji rezultat je samo odraz izbrane kombinacije.

Pravzaprav je glede na podatke, ves slovenski les v trdnostnem razredu C24. Da bi to dokazali na dejanskem primeru, smo naredili novi kombinaciji s samo dvema razredoma, in sicer C24-C16 in C35-C24. V prvem primeru se je izkazalo, da vse elemente lahko uvrstimo v C24, zato je bil razred C16 popolnoma prazen, ostanka pa tudi ni bilo.

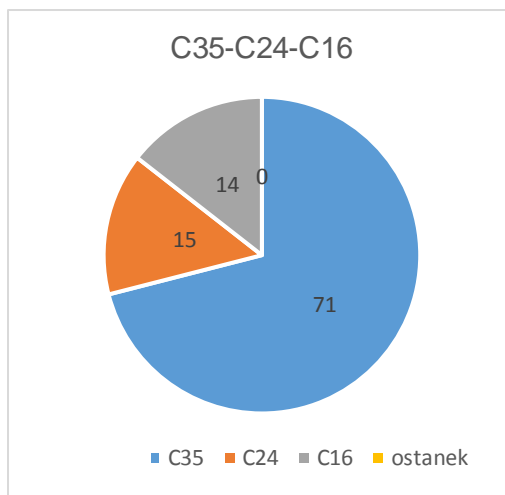


Slika 14: Optimalna razvrstitev v kombinacijo C24-C16



Slika 15: Optimalna razvrstitev v kombinacijo C35-C24

Ena izmed ustreznih kombinacij bi bila tudi C35-C24-C16, saj smo dobili ugoden razpored preizkušancev po razredih. Sestava je prikazana na spodnji sliki.



Slika 16: Optimalna razporeditev za kombinacijo C35-C24-C16

Kot vidimo, je vse odvisno od samih potreb po kakovosti lesa. Če želimo razvrščati v višje razrede, si izberemo kombinacijo, kjer so zastopani razredi višjih trdnosti, če nas zanimajo nižji trdnostni razredi, seveda ne bomo izbrali kombinacije, ki vsebuje trdnostni razred C40.

4.4 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE PO PREDSTANDARDU prEN 384:2013

Trenutno je v pripravi nov standard EN 384, objavljen pa je predstandard prEN 384:2013, ki podaja nekaj sprememb na področju računanja karakterističnih vrednosti odločilnih lastnosti. Sklicuje se na standard EN 14358, čigar novejša verzija je ravno tako v pripravi in obravnava dva načina določanja karakteristične trdnosti in gostote. To sta parametrični in neparametrični pristop. Posebej pa obravnava srednje vrednosti za togostne parametre.

Nekaj sprememb je tudi v uporabi terminologije, saj se uporablja izraz »subsample« ali podvzorec, ki ga v veljavnem standardu ni. Po definiciji naj bi podvzorec vseboval vsaj 40 preizkušancev iz enega vira (rastišča) in z eno ali več različnimi velikostmi prečnega prereza. Vzorec pa je skupina enega ali več podvzorcev, kjer so različne vrste lesa (ali njihovih kombinacij), rastišč, dimenzij in kakovosti lesa primerni pokazatelji mehanskih lastnosti celotne populacije lesa. Pomembno je torej, da z vzorcem zajamemo vse bistvene lastnosti lesa, ki vplivajo na končno optimalno razvrstitev.

- Trdnost

Za vsak izbrani podvzorec izračunamo vrednost 5. centila trdnosti $f_{05,i}$. Ta se določi po navodilih predstandarda prEN 384:2013, ki pravi naj se uporabi neparametričen pristop, podan v standardu EN 14358. Trenutno veljavni standard še ne obravnava ločenega računa karakterističnih vrednosti po parametričnem oziroma neparametričnem pristopu. Zato smo uporabili predstandard prEN 14358:2013.

Neparametrični pristop se lahko uporabi samo v primeru, ko imamo v vzorcu več kot 40 preizkušancev.

Popravljen karakteristična vrednost z zmanjšano vrednostjo (s stopnjo zaupanja 75 %) se izračuna po enačbi

$$m_k = y_{0,05} \cdot \left(1 - \frac{k_{0,05;0,75} \cdot V}{\sqrt{n}}\right), \text{ kjer je} \quad (5)$$

n ... število preizkušancev v vzorcu,

$y_{0,05}$... vrednost 5. centila vzorca preizkušancev

$k_{0,05;0,75}$... faktor, s katerim določimo 75-odstotni interval zaupanja za določitev karakteristične vrednosti in velja $f_{05,i} = m_k$

$$k_{0,05;0,75} = \frac{0,49 \cdot n + 17}{0,28 \cdot n + 7,1}, \text{ kjer je} \quad (6)$$

V ... koeficient variacije vzorca elementov izračunan po enačbi:

$$V = \frac{S}{\bar{X}}; \text{ kjer je}$$

S ... standardna deviacija vzorca

\bar{X} ... povprečje vzorca.

Karakteristična vrednost trdnosti f_k celotnega vzorca se izračuna po enačbi

$$f_k = \min \left(1,2 f_{05,i,\min}, \frac{\sum_{i=1}^j n_i \cdot f_{05,i}}{n} \right) \cdot k_n, \text{ kjer je} \quad (7)$$

$f_{05,i,\min}$... najmanjša izmed i vrednosti 5. centila trdnosti,

$f_{05,i}$... 5. centil trdnosti za podvzorec i ,

j ... število podvzorcev,

n_i ... število preizkušancev v podvzorcju i ,

n ... skupno število preizkušancev (v vzorcu),

k_n ... modifikacijski faktor, odvisen od števila podvzorcev.

Kot vidimo je sprememba glede na veljavni standard tudi pri modifikacijskih faktorjih. Korekcije na račun strojnega razvrščanja k_v ni več, k_n pa nadomesti prejšnji redukcijski faktor zaradi števila podvzorcev k_s .

Preglednica 5: Korekcijski faktorji k_n zaradi vpliva števila podvzorcev

Število podvzorcev	1	2	3	4	5
k_n	0.88	0.91	0.94	0.97	1

Zaradi primerjave rezultatov optimalnega razvrščanja po različnih postopkih, faktorja za vpliv reprezentativnosti vzorca tudi v tem primeru ne bomo upoštevali, oziroma bomo predpostavili, da je število elementov v posameznem podvzorcu dovolj veliko, da lahko tvorimo vsaj 5 podvzorcev in tako upoštevamo faktor $k_n = 1$.

- Gostota

Vrednost 5. centila gostote podvzorcev izračunamo po enakem postopku kot v primeru trdnosti.

Karakteristično vrednost gostote za celotni vzorec določimo po enačbi (8)

$$\rho_k = \min \left(1.1 \rho_{05,i,\min}, \frac{\sum_{i=1}^j n_i \cdot \rho_{05,i}}{n} \right) \cdot k_n, \text{ kjer je} \quad (8)$$

$\rho_{05,i,\min}$... najmanjša izmed i vrednosti 5. centila gostote,

$\rho_{05,i}$... 5. centil gostote za podvzorec i ,

- Modul elastičnosti

Predstandard nima posebnega poglavja za oceno srednje vrednosti elastičnega modula, vendar določa postopek računa srednje vrednosti za celoto togostnih lastnosti preizkušancev. Modul elastičnosti je posredna mera togosti materiala.

Za račun povprečne vrednosti modula elastičnosti podvzorca predpostavimo, da so elementi vzorca porazdeljeni normalno in uporabimo naslednje izraze

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \text{ kjer je} \quad (9)$$

m_i ...ustrezna togostna karakteristika podvzorca (v našem primeru je to modul elastičnosti).

Standardni odklon in srednja vrednost se izračunata po spodnjih enačbah

$$s_y = \max \left(\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0.05 \cdot \bar{y} \right) \quad (10)$$

$$m_{mean} = \bar{y} - k_s(n) \cdot s_y, \text{ kjer je} \quad (11)$$

s_y ... standardni odklon in

m_{mean} ... povprečna vrednost.

Koeficient k_s dobimo iz spodnje tabele.

Preglednica 6: Korekcijski faktor k_s za zamik karakteristične vrednosti elastičnosti

n	k_s
3	0.471
5	0.331
10	0.222
15	0.179
20	0.154
30	0.125
50	0.096
100	0.068
500	0.030
∞	0.000

oziroma izračunamo po enačbi

$$k_s(n) = \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

n ... število elementov v razredu,

$t_{\alpha, n-1}$... α . centil v centralni t-porazdelitvi z $n - 1$ prostostnimi stopnjami,

α ... stopnja zaupanja (določena je vrednost 75 %).

Pri našem razvrščanju smo uporabili kar enačbo (12), saj ima program Excel vgrajeno funkcijo $TINV(\text{verjetnost}, \text{stop_prostosti})$. Funkcija vrne vrednost inverzne porazdelitvene funkcije za simetrično Studentovo porazdelitev z upoštevanjem obeh repov porazdelitve. Zato smo kot parameter »verjetnost« upoštevali vrednost $0.5 = 2 \cdot 0.25$ in za parameter »stopnja prostosti« $n - 1$.

S faktorjem k_s tako določimo 75 % interval zaupanja za izračun karakteristične srednje vrednosti modula elastičnosti.

Pri tem moramo paziti, da upoštevamo določila prEN 384:2013 in izmerjeni globalni modul elastičnosti $E_{m,g}$ preračunamo na modul elastičnosti vzporedno na vlakna E_0 po enačbi (13)

$$E_0 = E_{m,g} \cdot 1.3 - 2690 \quad (13)$$

$E_{m,g}$... globalni modul elastičnosti za upogib vzporedno z vlakni. Pri tem uporabljamo podatke, ki so preračunani na relativno vlažnost lesa 12 %.

Karakteristična srednja vrednost modula elastičnosti celotnega vzorca izračunamo po podobnih enačbah kot za gostoto

$$E_k = \min \left(1.1 E_{05,i,min}, \frac{\sum_{i=1}^j n_i E_{05,i}}{n} \right) \cdot k_n \quad (14)$$

$E_{05,i,min}$... najmanjša izmed i vrednosti 5. centila modula elastičnosti,

$E_{05,i}$... 5. centil modula elastičnosti za podvzorec i ,

Za primerjavo rezultatov, torej vpliva spremenjenih enačb, smo ponovno razvrstili preizkušance v optimalne razrede. Pri tem smo uporabili enak algoritem, kot je opisan na začetku poglavja. Rezultati so prikazani v spodnjih preglednicah.

Preglednica 7: Frekvence po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (neparametrično) prEN 384:2013, 1. del

razred	C40		C40		C40		C40	
	C35		C35		C30		C30	
	C24		C24		C24		C24	
	C18		C18		C18		C18	
	C16		C16		C16		C16	
	C40-C35-C24-C18		C40-C35-C24-C16		C40-C30-C24-C18		C40-C30-C24-C16	
	N	%	N	%	N	%	N	%
C50								
C45								
C40	402	38.0	402	38.0	402	38.0	402	38.0
C35	0	0.0	0	0.0				
C30					160	15.1	160	15.1
C27								
C24	478	45.1	478	45.1	149	14.1	149	14.1
C18	124	11.7			348	32.9		
C16			179	16.9			348	32.9
ostanek	55	5.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0

Preglednica 8: Frekvence po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (neparametrično) prEN 384:2013, 2. del

razred							C40	
	C35		C35					
					C30		C30	
			C27					
	C24				C24			
	C18		C18				C18	
					C16			
	C35-C24-C18		C35-C27-C18		C30-C24-C16		C40-C30-C18	
	N	%	N	%	N	%	N	%
C50								
C45								
C40							402	38.0
C35	660	62.3	660	62.3				
C30					895	84.5	160	15.1
C27			0	0.0				
C24	0	0.0			0	0.0		
C18	399	37.7	399	37.7			497	46.9
C16					164	15.5		
ostanek	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0

4.5 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE – PARAMETRIČNO (TEORIJA)

Omenili smo že, da predstandard razlikuje dva postopka razvrščanja (parametrično in neparametrično). Presenetilo nas je, da se predstandard sklicuje samo na neparametrični pristop (za vzorce večje od 40 elementov), kjer so uporabljene enačbe, ki niso izpeljane iz teorije, ampak gre za empirične enačbe, kjer je tveganje za napake bistveno večje. Predstandard ne predpisuje niti, kako ravnati v primeru, ko takega (pod)vzorca nimamo (ni direktne navezave na parametrični pristop). Pri tem sklepamo, da je prišlo do napake in da bi v takšnem primeru morali uporabiti parametrični pristop. Ta je namreč izpeljan iz teoretičnih enačb statistike. Zato bi tudi rezultati morali biti ustrezni, tudi za manjše vzorce.

Zanimalo nas je, kolikšne napake oziroma spremembe povzročijo take poenostavitve in enačbe, ki so uporabljene pri neparametričnem pristopu. Optimalno razvrščanje smo zato naredili še na osnovi računa karakterističnih vrednosti, kot je to podano v poglavju 4.2.2 predstandarda, ki opisuje parametrični pristop.

- Trdnost

Za trdnost smo (po prEN 14358:2013) predpostavili, da je porazdeljena logaritemsko normalno.

Za logaritemsko normalno porazdeljeno slučajno spremenljivko za izračun karakteristične vrednosti potrebujemo nekoliko drugačne enačbe. Srednja vrednost logaritemsko normalno porazdeljene slučajne spremenljivke se lahko izrazi po enačbi (Turk, 2012).

$$m_Y = \tilde{m}_Y \cdot e^{\frac{1}{2}\sigma_{\ln Y}^2} \quad (15)$$

standardna deviacija pa po enačbi

$$\sigma_Y = \sqrt{m_Y^2 (e^{\frac{1}{2}\sigma_{\ln Y}^2} - 1)} \quad (16)$$

m_Y ... srednja vrednost slučajne spremenljivke Y ,

σ_Y ... standardna deviacija slučajne spremenljivke Y ,

Običajno se uporabljajo obratne zveze, kjer izračunamo parametra logaritemsko normalne porazdelitve:

$$\tilde{m}_Y = m_Y \cdot e^{-\frac{1}{2}\sigma_{\ln Y}^2} = \frac{m_Y}{\sqrt{\frac{\sigma_Y^2}{m_Y^2} + 1}} \quad (17)$$

$$\sigma_{\ln Y}^2 = \ln\left(\frac{\sigma_Y^2}{m_Y^2} + 1\right) \quad (18)$$

in upoštevamo $\ln m_Y = m_X$, kjer je

\tilde{m}_Y ... parameter pričakovane vrednosti za logaritemsko normalno porazdeljeno slučajno spremenljivko

m_X ... srednja vrednost normalno porazdeljene slučajne spremenljivke X

Iz teh enačb sta v predstandardu izpeljani enačbi za oceno srednje vrednosti \bar{y} in standardno deviacijo s_y .

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (19)$$

$$s_y = \max\left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2}, 0.05\right) \quad (20)$$

m_i ... izmerjena trdnost i -tega preizkušanca.

Karakteristična trdnost se izračuna po spodnji enačbi, ki upošteva še faktor k_s

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n) \cdot s_y) \quad (21)$$

$$k_s(n) = \frac{k_\alpha(n)}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

$k_\alpha(n)$... α . centil necentralne porazdelitve t z $n - 1$ prostostnimi stopnjami in parametrom

$$\lambda = u_{1-p} \cdot \sqrt{n} \quad (23)$$

u_{1-p} ... $(1 - p)$ - ti centil standardizirane normalne porazdelitve in

n ... število elementov v podvzorcu.

Program Excel nima vgrajene funkcije za račun vrednosti necentralne t-porazdelitve. Zato smo v tem koraku morali uporabiti program Mathematica in izračunati te vrednosti za različne vrednosti n . Ta vrednost se med razvrščanjem nenehno spreminja, zato bi morali iz vrednotiti faktorje za vsak možni n , torej za $n = 1, 2, \dots, 1059$. To je relativno zahteven računski postopek tudi za računalniški program, še posebej za višje vrednosti n . Zato smo želeli postopek poenostaviti in faktorje $k_s(n)$ izračunati po večjih korakih, med njimi pa vrednosti interpolirati. V nadaljevanju dela se je izkazalo, da imajo že razlike na drugem decimalnem mestu velik vpliv na končne karakteristične vrednosti, saj $k_s(n)$ v enačbi nastopa v eksponentu. Zato tudi interpolacija za točen račun ni primerna, še posebej pri manjših vrednostih n , kjer vidimo, da krivulja hitro pada. Izkaže se, da se pri višjem številu elementov n razlike v faktorju manjšajo, saj se vrednosti približujejo vrednosti 1.6. Opazimo, da bi lahko pri vrednostih višjih od 200, upravičeno uporabili interpolacijo in pri tem ne bi naredili prevelike napake, saj so razlike med faktorji zanemarljive. Obnašanje omenjenega faktorja in njegov vpliv na končni rezultat si bomo pogledali v nadaljevanju v poglavju z naslovom *Simulacije*.

Ker v tem primeru potrebujemo čim bolj zanesljive in pravilne rezultate optimalnega razvrščanja, se za poenostavitev nismo odločili in pripravili tabelo s faktorji izračunanimi za vsak n . To smo nato vključili v programček za razvrščanje v optimalne razrede.

Predstandard tudi pri parametričnem pristopu ponuja poenostavljeno enačbo za račun $k_s(n)$

$$k_s(n) = \frac{6.5 n+6}{3.7 n-3} \quad (24)$$

Te enačbe v tem delu nismo uporabili, smo pa jo preverili v naslednjem poglavju *Simulacije*, in dokazali, da z njeno uporabo dobimo precej drugačne rezultate.

Končne karakteristične vrednosti trdnosti posameznega vzorca (razreda) izračunamo iz karakterističnih vrednosti podvzorca enako kot v neparametričnem pristopu.

- Gostota

Upoštevali smo, da je gostota porazdeljena normalno. Uporabili smo enačbe za srednjo vrednost in standardno deviacijo, kot jih predpisuje predstandard in so ravno tako dobljene iz teorije statistike.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (25)$$

$$s_y = \max \left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0.05 \cdot \bar{y} \right) \quad (26)$$

Karakteristična vrednost se izračuna z uporabo faktorja $k_s(n)$ po enačbi

$$m_k = \bar{y} - k_s(n) \cdot s_y \quad (27)$$

Faktor $k_s(n)$ se izračuna enako kot pri trdnosti.

Končne karakteristične vrednosti gostote posameznega vzorca (razreda) izračunamo iz karakterističnih vrednosti podvzora enako kot v neparametričnem pristopu.

- Modul elastičnosti

Za modul elastičnosti ravno tako predpostavimo, da je porazdeljen normalno. Račun karakterističnih vrednosti je enak postopku, ki je predstavljen v prejšnjem podpoglavju (neparametrični pristop).

V spodnji preglednici so prikazani rezultati optimalnega razvrščanja v iste kombinacije trdnostnih razredov, kot v prejšnjih podpoglavjih.

Preglednica 9: Frekvence po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (parametrično), 1. del

razred	C40		C40		C40		C40	
	C35		C35					
					C30		C30	
	C24		C24		C24		C24	
	C18				C18			
			C16				C16	
	C40-C35-C24-C18		C40-C35-C24-C16		C40-C30-C24-C18		C40-C30-C24-C16	
		N	%	N	%	N	%	N
C50								
C45								
C40	393	37.1	393	37.1	393	37.1	393	37.1
C35	0	0.0	0	0.0				
C30					179	16.9	179	16.9
C27								
C24	492	46.5	492	46.5	112	10.6	112	10.6
C18	0	0.0			375	35.4		
C16			174	16.4			375	35.4
ostanek	174	16.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0

Preglednica 10: Frekvence po optimalnih trdnostnih razredih po predstandardu (parametrično), 2. del

razred							C40	
	C35		C35				C30	
					C27			
	C24		C24		C24			
	C18		C18				C18	
					C16			
	C35-C24-C18		C35-C27-C18		C30-C24-C16		C40-C30-C18	
		N	%	N	%	N	%	N
C50								
C45								
C40							393	37.1
C35	633	59.8	633	59.8				
C30					903	85.3	179	16.9
C27			0	0.0				
C24	187	17.7			0	0.0		
C18	201	19.0	426	40.2			487	46.0
C16					156	14.7		
ostanek	38	3.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0

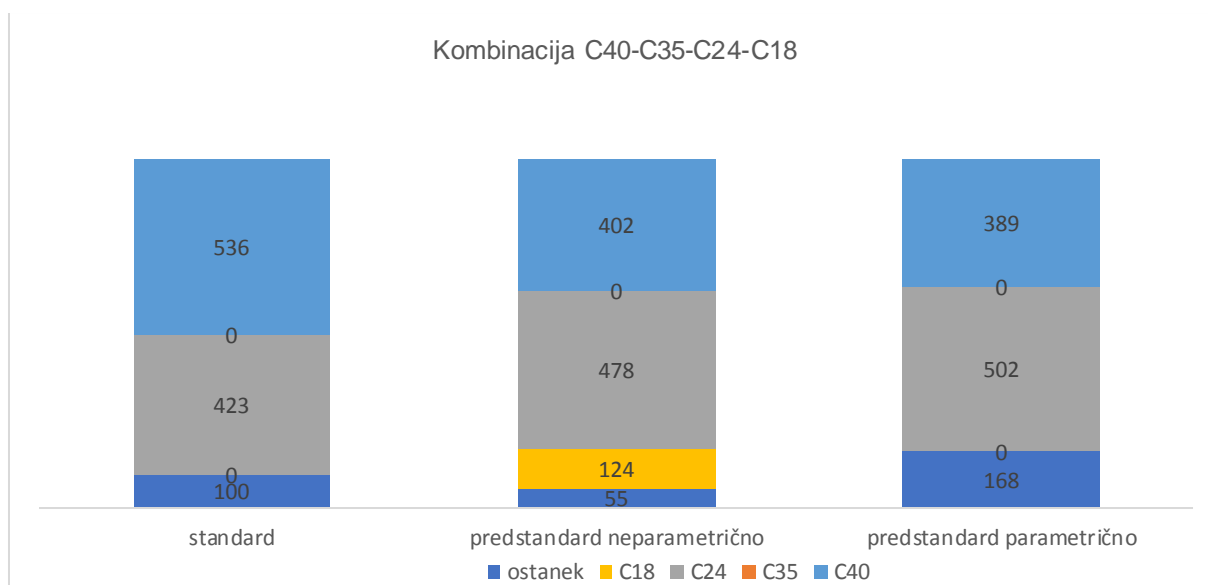
4.6 PRIMERJAVA REZULTATOV OPTIMALNEGA RAZVRŠČANJA

4.6.1 POENOSTAVLJENO OPTIMALNO RAZVRŠČANJE

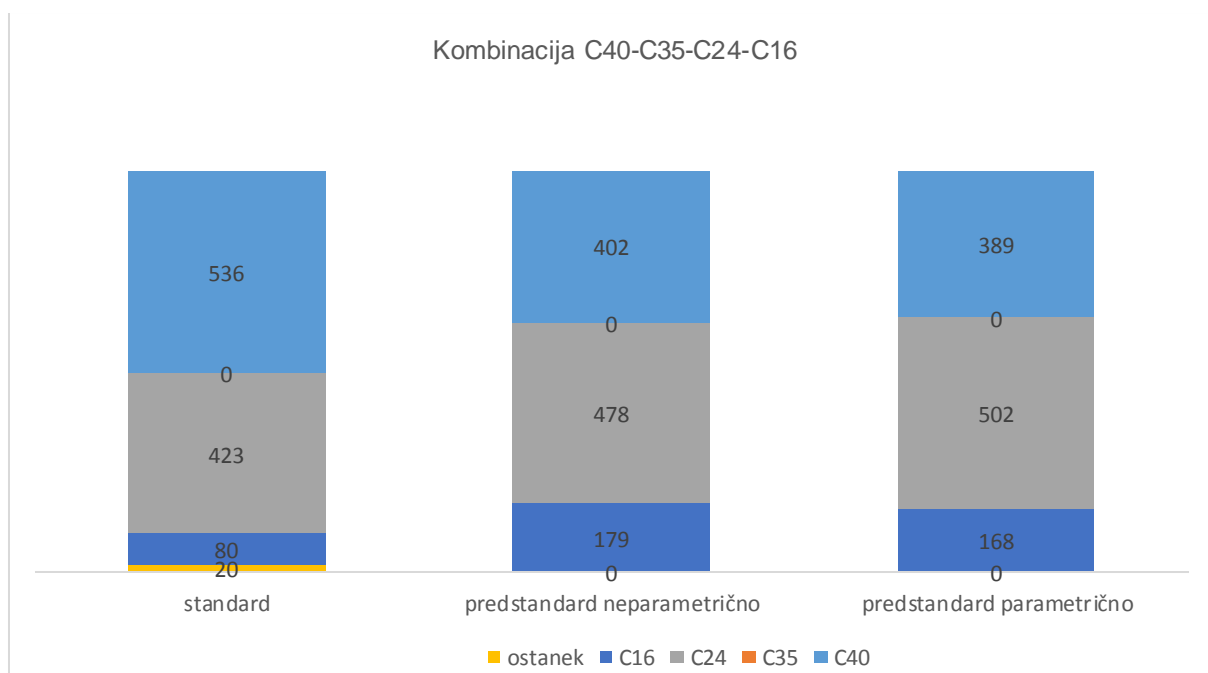
Primerjali bomo rezultate, ki smo jih dobili v prejšnjih treh poglavjih (optimalno razvrščanje po treh različnih postopkih ob predpostavki, da imamo dovolj reprezentativen vzorec).

Na spodnjih diagramih so prikazani rezultati optimalnega razvrščanja in sicer tako, da lahko med seboj primerjamo frekvence posameznega trdnostnega razreda za določeno kombinacijo glede na postopek razvrščanja.

- C40 - C35 - C24 - C18 (C16)



Slika 17: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C35-C24-C18

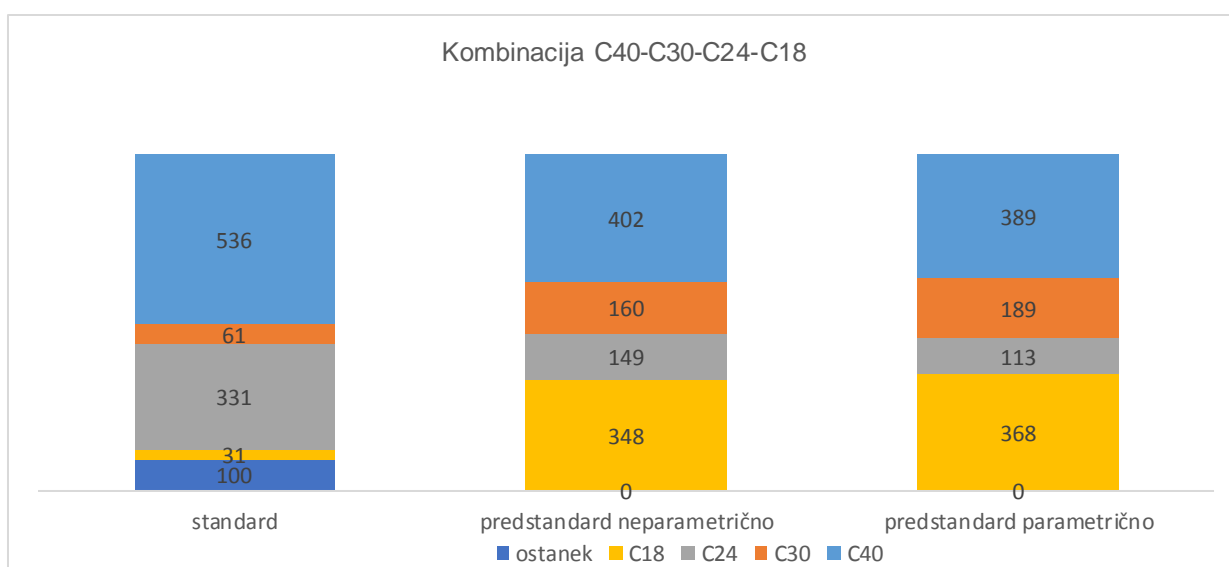


Slika 18: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C35-C24-C16

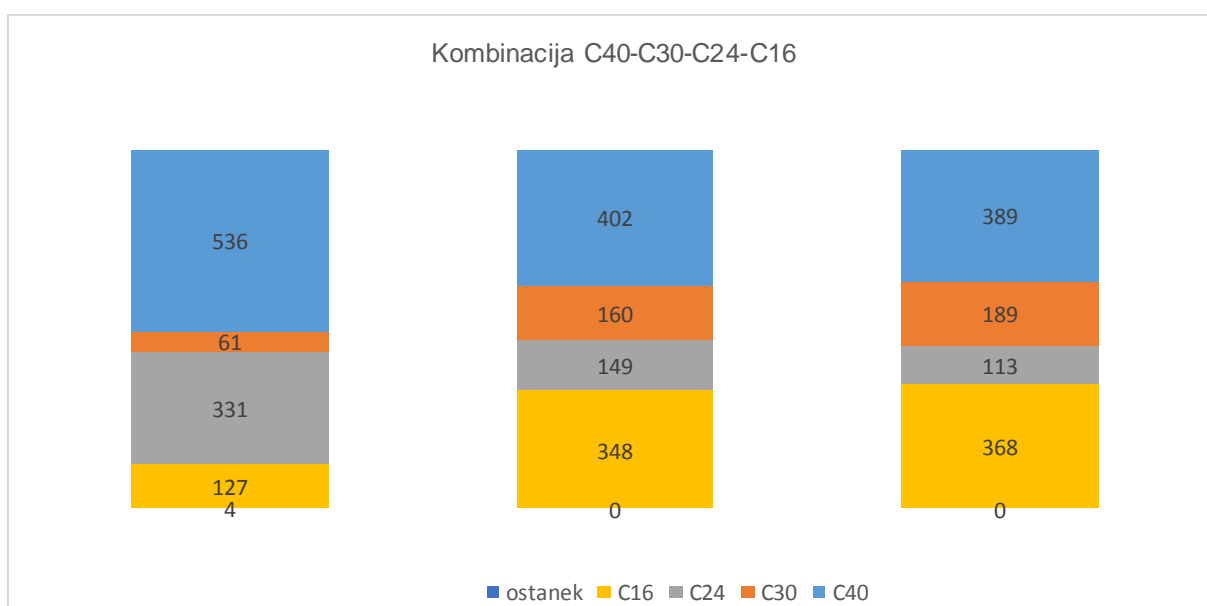
Z razvrščanjem po trenutno veljavnem standardu je razred C35 za izbrano kombinacijo prazen. Kot je razloženo v podpoglavju *Trdnostni razredi*, je razlog za to prekrivanje posameznih razredov, še posebej bližnjih razredov, kjer so meje za karakteristične vrednosti relativno skupaj. Enako se zgodi tudi, ko razvrščamo z drugimi postopki. Ne glede na to, da se število elementov v najvišjem razredu nekoliko zmanjša, je razred C35 še vedno prazen. Razred C16 je bistveno večji, ko razvrščamo po predstandardu, C40 pa je opazno manjši. Na ta račun je razred C24 toliko bolj poln. Torej ima predstandard nekoliko bolj konservativen postopek. Ugodno pa je, da se pri tem izognemo tudi ostanku lesa.

Razlika med zgornjima diagramoma na Sliki 17 in Sliki 18 je samo v prerazporeditvi elementov v nižjih razredih. Elementi, ki so bili sicer uvrščeni v razred C16, se v kombinaciji z C18 prerazporedijo še v ostanek.

- C40 – C30 – C24 – C18 (C16)



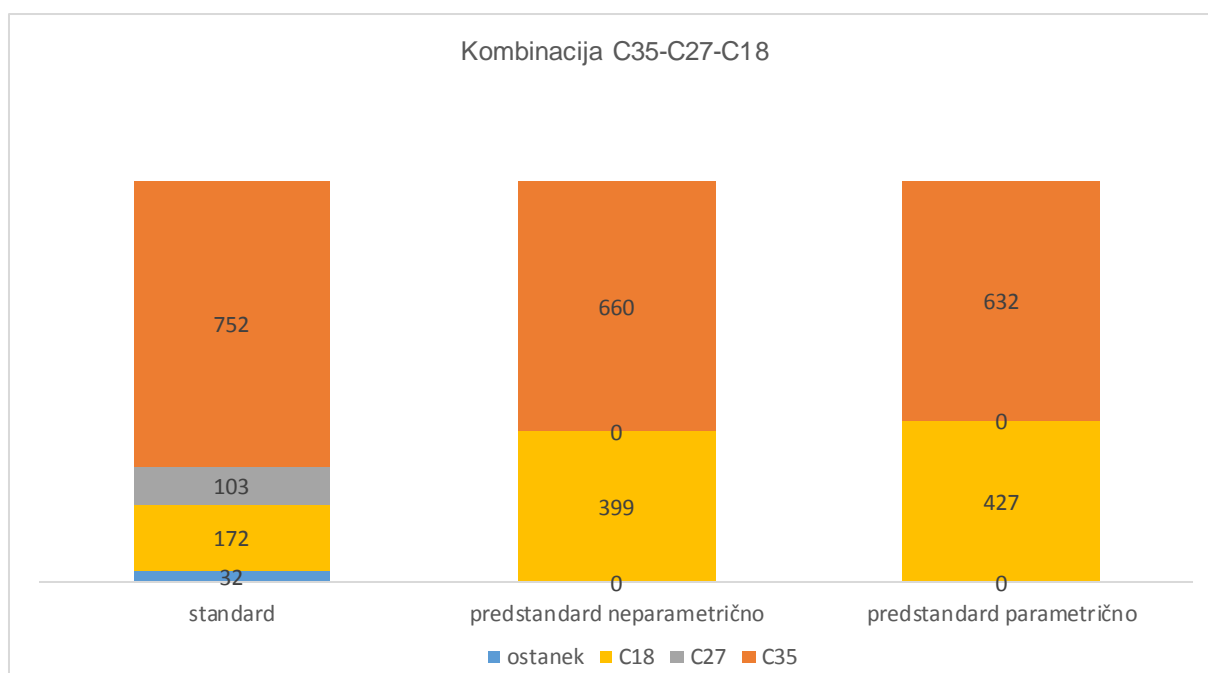
Slika 19: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C30-C24-C18



Slika 20: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C30-C24-C16

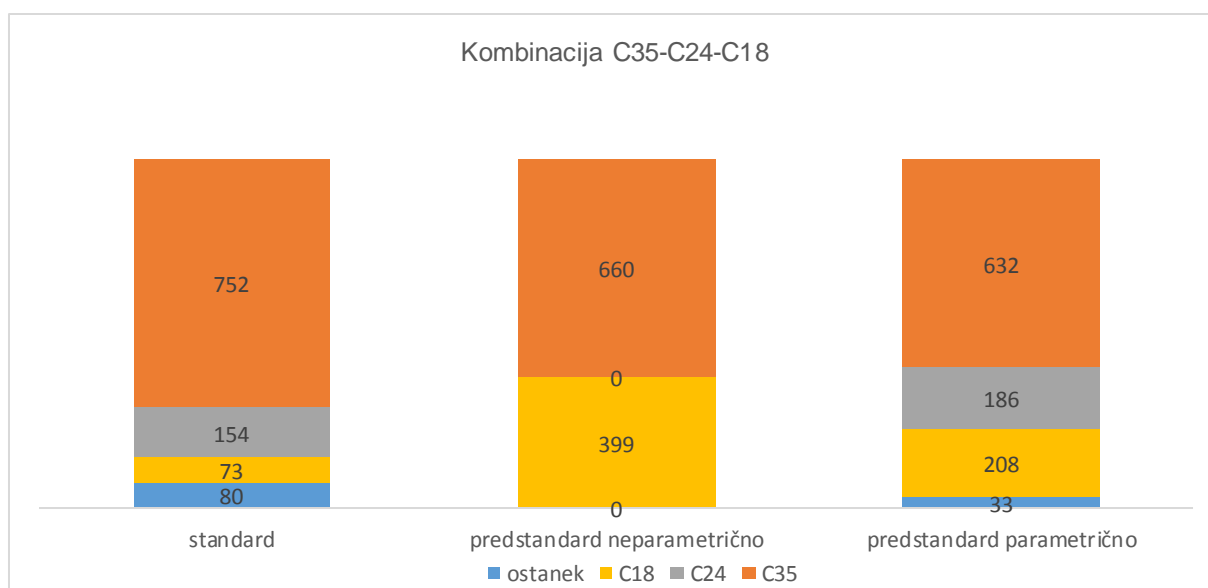
Pri zgornjih kombinacijah gre za podobno zgodbo kot v prejšnjem primeru. V višjih razredih se elementi po predstandardu prerazporedijo tako, da so višji trdnostni razredi slabše zastopani. Ostanke se izognemo in ne pride do prerazporeditve elementov v nižjih razredih, kar pomeni, da sta trdnostna razreda C16 in C18 enako zastopana. Očitno je nekaj elementov takšnih, ki niso dovolj kakovostni za razred C24, imajo pa dovolj dobre lastnosti, da zvišajo karakteristične vrednosti in so tako primerni ne samo za razred C16 ampak tudi za razred C18. Po standardu je razred C24 bistveno bolje zastopan, kot po predstandardu. Zato se ostali elementi prerazporedijo in pridobimo tudi nekaj ostanka.

- C35 – C27 – C18



Slika 21: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C35-C27-C18

- C35 – C24 – C18

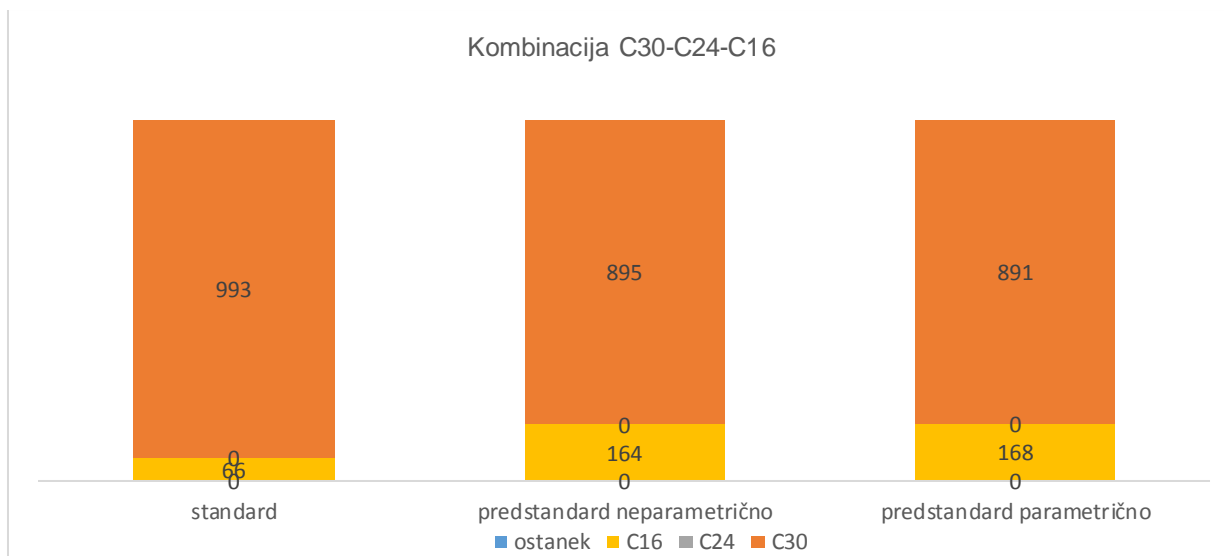


Slika 22: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C35-C24-C18

V kombinacijah C35-C27-C18 in C35-C24-C18, kjer razvrščamo v najvišji razred C35, se velik delež elementov uvrsti v ta razred. S tem potrjujemo visoko kakovost slovenskega lesa.

Ko razvrščamo po predstandardu je razred C27 prazen in tudi razred C35 je manjši kot v ostalih dveh primerih. Vsi ti elementi se razvrstijo v nižji razred C18. Več elementov pa seveda ustreza pogojem za razred C24, ki je po parametričnem pristopu iz predstandarda nekoliko bolje zastopan. Na ta račun se zmanjša število preizkušancev v razredu C18, je pa zato ostanek nekoliko večji.

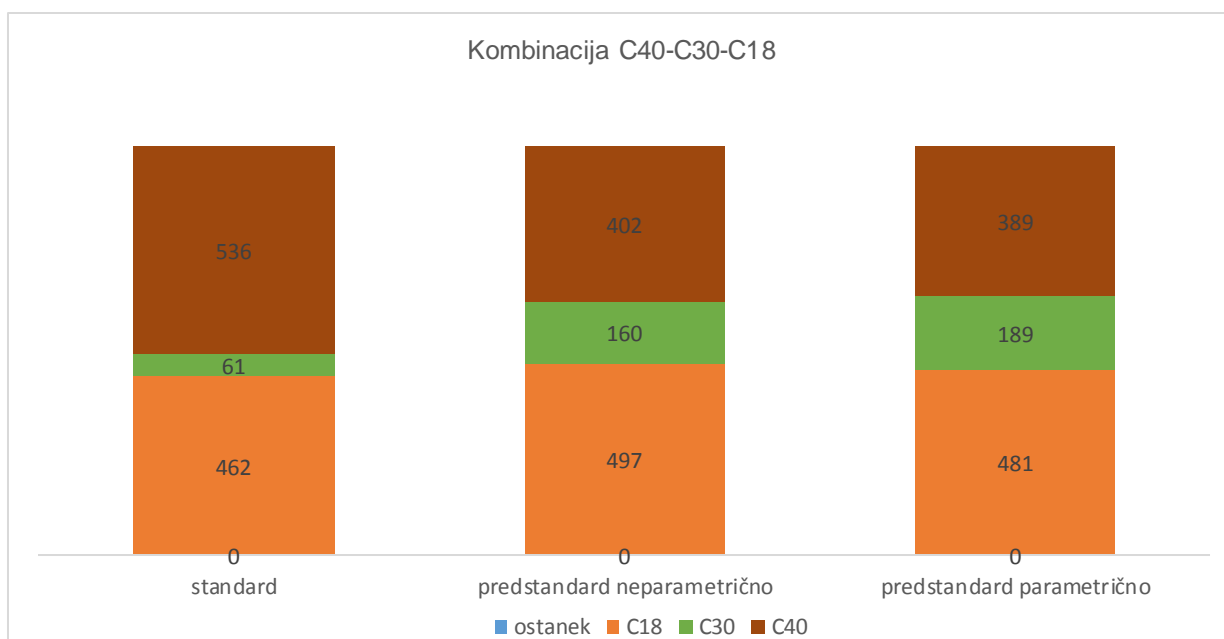
- C30 – C24 – C16



Slika 19: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C30-C24-C16

V tem primeru se skoraj 95 % elementov uvrsti v najvišji razred C30. Zopet se potrdi kakovost slovenskega lesa.

- C40 – C30 – C18



Slika 23: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede za kombinacijo C40-C30 -C18

Relativno enakomerno porazdelitev dobimo za kombinacijo C40-C30-C18, saj si trdnostni razredi niso preveč blizu. Kombinacija C30-C18 je ugodna, saj zagotavlja, da pri razvrščanju v nobenem primeru ni ostanka.

Pri vseh prikazanih diagramih se izkaže, da je optimalno razvrščanje po parametričnem pristopu predstandarda najbolj konzervativno. To pomeni, da so razne poenostavitve, ki so upoštevane pri standardu in neparametričnem pristopu predstandarda na nevarni strani, saj so višji trdnosti razredi vedno bolje zastopani.

Na boljši izplen v višjih razredih pri standardu vpliva sam postopek določitve karakteristične vrednosti in pa tudi upoštevani korekcijski faktorji na strani zahtev za uvrstitev v posamezni trdnostni razred. Standard ima poleg faktorja 0.95, ki ga upoštevamo pri redukciji zahtev za modul elastičnosti, še faktor $k_v = 1.12$, ki se sicer upošteva samo pri trdnosti. Ta zvišuje karakteristične vrednosti trdnosti za razrede nižje od C30. Tudi primerjava med frekvencami razredov se giblje okrog vrednosti 12 %, pri tem pa se pri višjih razredih razlike povečujejo. Iz tega lahko sklepamo, da so enačbe v predstandardu pripravljene tako, da z njimi dobimo nižje karakteristične vrednosti za višje trdnostne razrede. Na to se bomo osredotočili v poglavju *Simulacije*.

4.6.2 OPTIMALNO RAZVRŠČANJE PO STANDARDU IN PREDSTANDARDU

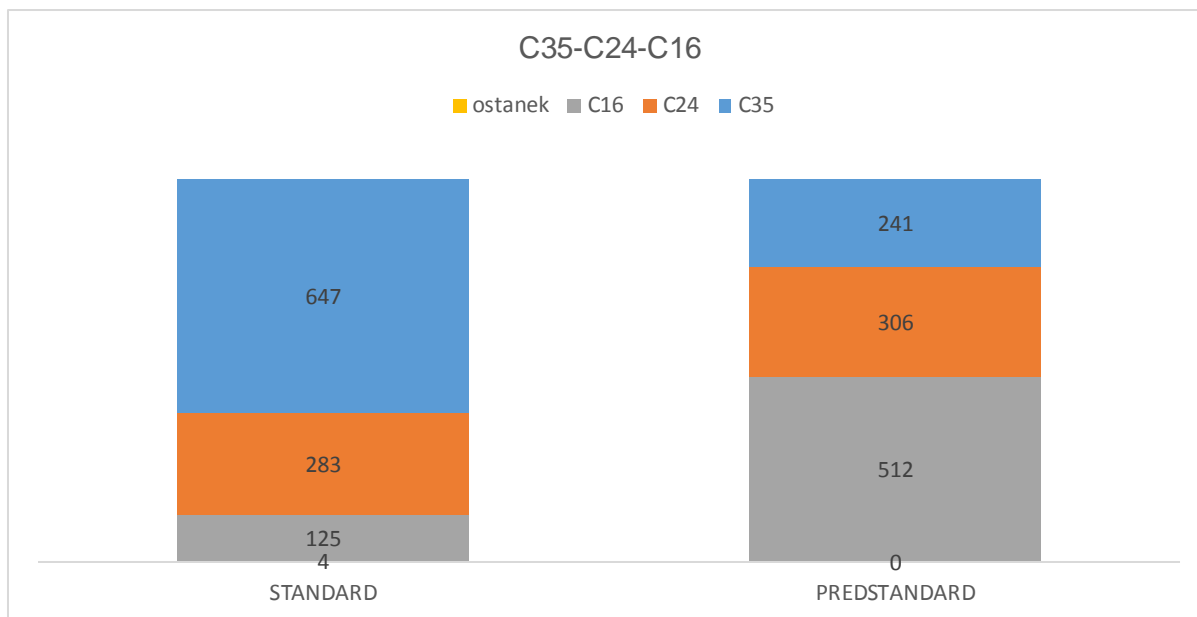
V prejšnjem poglavju smo predpostavili ustrezno reprezentativnost vzorca in si tako poenostavili postopek optimalnega razvrščanja, saj smo zanemarili faktor k_s pri standardu in faktor k_n pri predstandardu. To je kar velika poenostavitev, ki smo jo naredili predvsem zaradi primerjave z rezultati po teoriji.

Zato smo se odločili, da bomo za dve najbolj smiselni kombinaciji trdnostnih razredov naredili optimalno razvrščanje samo za standard in predstandard, pri tem pa ustrezno upoštevali tudi omenjena korekcijska faktorja za vpliv velikosti vzorca.

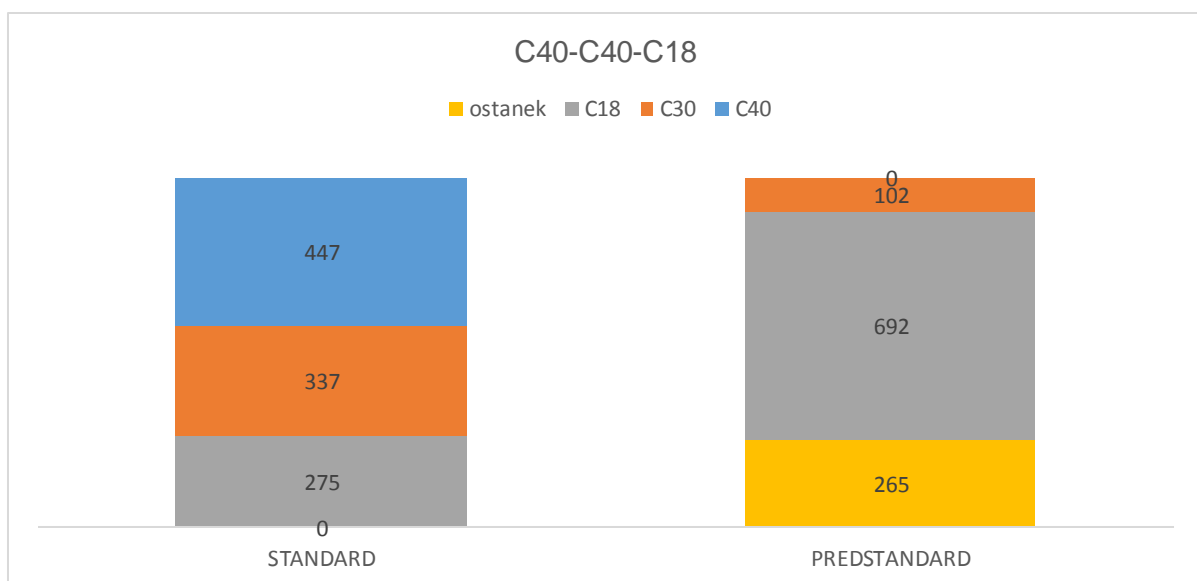
Ker nobeden izmed predpisov ne določa eksplicitno, na kateri način si naj izberemo podvzorce, smo se odločili, da bomo preverili rezultate za najbolj neugodno možnost. Imamo torej samo en vzorec.

Pri standardu smo upoštevali spodnjo krivuljo. Ker ima vzorec 1059 elementov, je vrednost $k_s = 0.9$. Pri predstandardu smo upoštevali faktor $k_n = 0.88$. Pomembna razlika je tudi v tem, da k_n upoštevamo pri vseh parametrih (trdnost, modul elastičnosti in gostota), k_s pa samo pri trdnosti.

Izkaže se, da so razlike med rezultati na ta račun še veliko večje, kot v prejšnji primerjavi, kjer smo za omenjena faktorja predpostavili, da sta enaka 1. Vse druge predpostavke so ostale iste. Na spodnjih slikah so prikazani rezultati.



Slika 24: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede z upoštevanjem enega vzorca in vseh korekcijskih faktorjev (kombinacija 35-C24-C16)



Slika 25: Diagram razvrstitve elementov v trdnostne razrede z upoštevanjem enega vzorca in vseh korekcijskih faktorjev (kombinacija C40-C30-C18)

Razlike so celo tako velike, da se po neparametričnem postopku predstandarda, v razred C40 ne uvrsti noben element, saj se zahteve, glede na standard, za ta razred bistveno povečajo. Še posebej, če primerjamo zahteve za elastični modul in gostoto s tistimi po predstandardu. Vidimo, da ima tudi elastični modul velik vpliv na razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede.

Preglednica 11: Preglednica z zahtevami za karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti po različnih postopkih optimalnega razvrščanja

razred C40	zahteve EN 338	zahteve standard SIST EN 384	zahteve predstandard prEN 384
Trdnost [N/mm ²]	40	44.44	45.45
Modul elastičnosti [N/mm ²]	14000	13300	15113.64
Gostota [kg/m]	420	420	477.27

Predpostavka, da imamo samo en podvzorec je izredno neugodna, še posebej pri predstandardu, saj dobimo popolnoma drugačno optimalno razvrstitev.

Glede na različne postopke razvrščanja, smo dobili različne optimalne razvrstitve. Pri tem se seveda vprašamo, kateri postopek je bolj pravilen in se najbolj približa dejanskemu stanju. Paziti moramo, da smo na varni strani in da ne precenimo kakovost vgrajenega lesa, vendar je pretirana konservativnost ekonomsko neupravičena.

4.7 SIMULACIJE

Zato smo se odločili, da bomo ustreznost enačb, ki so podane v predstandardu, preverili s simulacijami in jih primerjali z ostalimi enačbami. Simulacije so pripomoček za numerično reševanje problemov in temeljijo na obravnavi velikega števila numerično generiranih podatkov oziroma preizkusov. Vzorec psevdoslučajnih spremenljivk generiramo s pomočjo inverzne metode (Turk, 2012).

4.7.1 RAČUN KARAKTERISTIČNIH VREDNOSTI PO RAZLIČNIH ENAČBAH

Na osnovi podatkov o srednji vrednosti in standardni deviaciji trdnosti preizkušancev smo predpostavili, da so to prave vrednosti celotne populacije. Izračunali smo 5. centil populacije. Ta vrednost je predstavljala pravo, referenčno vrednost, s katero smo primerjali vrednosti, dobljene po različnih postopkih. Uporabili smo inverzno funkcijo gostote porazdelitve ob upoštevanju, da je trdnost logaritemsko normalno porazdeljena slučajna spremenljivka.

Predstandard podaja enačbe za katere naj bi veljalo, da določajo karakteristične vrednosti s stopnjo zaupanja $\alpha = 75\%$. Stopnja zaupanja je verjetnost, da je karakteristična vrednost vzorca večja od ocenjene vrednosti karakteristične vrednosti. To velja za parametrični in neparametrični pristop. S simulacijami smo torej preverjali verjetnosti, kjer je ocenjena karakteristična vrednost večja od dejanske $\hat{m}_k > m_k$. Predstandard predvideva, da to velja le v največ 25 %.

Enačbe smo preverili za različno veliko število elementov v vzorcu n_{samp} ter za trdnostna razreda C24 in C40. V spodnjih Preglednicah so prikazani rezultati, ki smo jih dobili pri uporabi 10 000 simulacij.

Pri točnem parametričnem pristopu smo uporabili točen izračun vrednosti faktorja k_s (enačbe (22) in (23)), pri poenostavljenem parametričnem računu pa poenostavljeno enačbo (24) za ta faktor, ki je predstavljena v poglavju 4.5. Enačbe za račun karakteristik po predstandardu (neparametrično) in standardu so ravno tako predstavljene že v prejšnjih poglavjih.

- C24, $m_x = 43.621$, $s_x = 13.381$, število simulacij $n_{sim} = 10\ 000$

Preglednica 12: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C24)

n_{samp}	PARAMETRIČNO	PARAMETRIČNO POENOSTAVLJENO	NEPARAMETRIČNO	STANDARD
10	0.306	0.252	0.177	0.598
20	0.295	0.254	0.086	0.353
30	0.285	0.268	0.078	0.348
40	0.274	0.248	0.11	0.397
50	0.278	0.249	0.104	0.398
100	0.26	0.194	0.14	0.436
200	0.259	0.136	0.158	0.455
300	0.257	0.094	0.163	0.461
500	0.412	0.05	0.175	0.464

- C40, $m_x = 53.380$, $s_x = 9.472$, število simulacij $n_{sim} = 10\ 000$

Preglednica 13: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C40)

n_{samp}	PARAMETRIČNO	PARAMETRIČNO POENOSTAVLJENO	NEPARAMETRIČNO	STANDARD
10	0.296	0.258	0.228	0.659
20	0.277	0.263	0.128	0.427
30	0.278	0.254	0.121	0.426
40	0.274	0.247	0.174	0.497
50	0.281	0.245	0.184	0.496
100	0.273	0.194	0.271	0.597
200	0.265	0.13	0.349	0.673
300	0.262	0.094	0.405	0.729
500	0.422	0.048	0.501	0.794

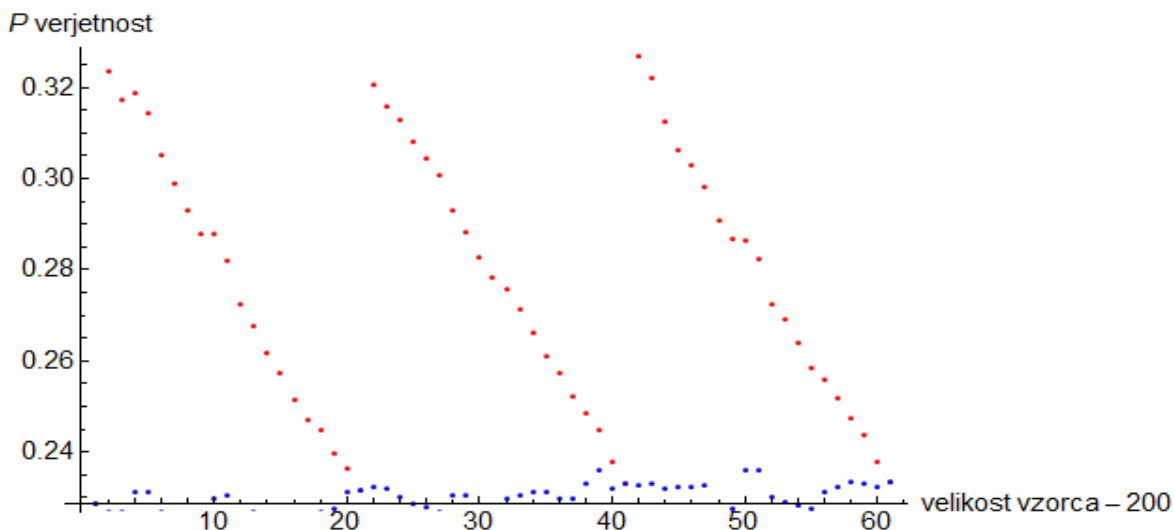
Vrednosti v preglednicah niso fiksne, saj so rezultat simulacij, torej generiranja slučajnih spremenljivk. Vendar, če je število simulacij dovolj veliko, se te vrednosti ne spreminjajo bistveno.

Pri standardu smo karakteristično vrednost trdnosti ocenili praktično na enak način, kot je določena prava vrednost, le da je ocenjena na osnovi velikega števila generiranih vzorcev z enakimi parametri porazdelitve kot osnovna populacija. Razred C24 ima nekoliko večjo razpršenost, zato se tudi verjetnosti gibljejo okrog 50 %. Razred C40 pa je očitno manj razpršen in je glede na porazdelitev celotne populacije zamaknjen v desno, saj so verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k]$ veliko večje od 25 %. S tem smo potrdili rezultate optimalnega razvrščanja, saj smo pri razvrščanju po standardu na nevarni strani, s predstandardom pa glede na teorijo ostanemo na varni strani.

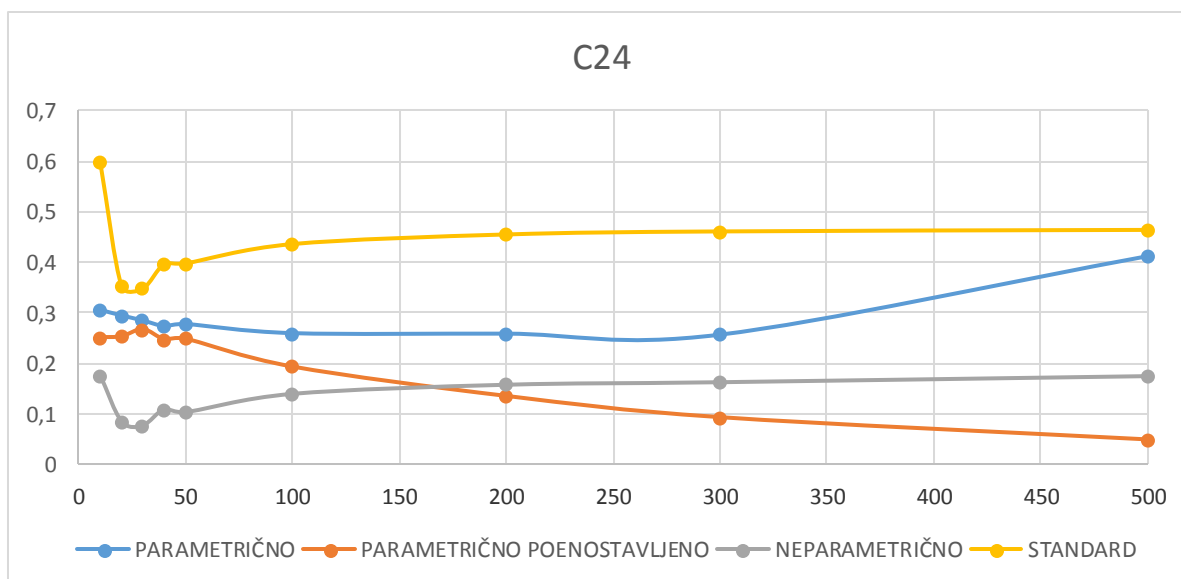
Iz diagrama na Sliki 27 je razvidno, da so verjetnosti izračunane po standardu nekonsistentne pri manjšem številu elementov v vzorcu, saj se gibljejo med 0.35 in 0.60. Standard za manjše vzorce torej ni ustrezen. Kot omenjeno, standard karakteristično trdnost izračuna kot 5. centil danega vzorca in sicer tako, da elemente sortira po velikosti, po potrebi pa med vrednostmi interpolira. Pri majhnem številu elementov ima vsaka vrednost veliko utež in velik vpliv na

rezultat, kar seveda ni realen pokazatelj stanja. To je tudi razlog za tako nezanesljive rezultate pri manjših vzorcih.

Na tem mestu je smiselno, da izpostavimo račun 5. centila vzorca v programu Mathematica. Med delom smo namreč ugotovili, da ukaz $Quantile[vzorec, p - percentila]$ ni povsem ustrezen, saj vrednosti ne interpolira pravilno oziroma ima privzet drugačen račun vmesne vrednosti. Na spodnji sliki je prikazana razlika med rezultati verjetnosti, če računamo z ustreznimi parametri v ukazu (modre pike) ali brez parametrov (rdeče pike). Če ne uporabimo ustrezne interpolacije se pojavi nekakšen vzorec, ki se ponavlja in zato ne dobimo ustreznih rezultatov. Nihanje modrih pik pa je predvsem posledica slučajnosti simulacij. Zato je pomembno, da ukazu dodamo argument $\{\{a, b\}, \{c, d\}\}$, kjer definiramo parametre $a = 0, b = 0, c = 0$ in $d = 1$. Te vrednosti parametrov namreč ustrezajo t.i. Kalifornijski metodi interpolacije, s katero dobimo najboljše rezultate. Mathematica pa ponuja še šest drugih metod, ki jih lahko uporabimo za interpolacijo.



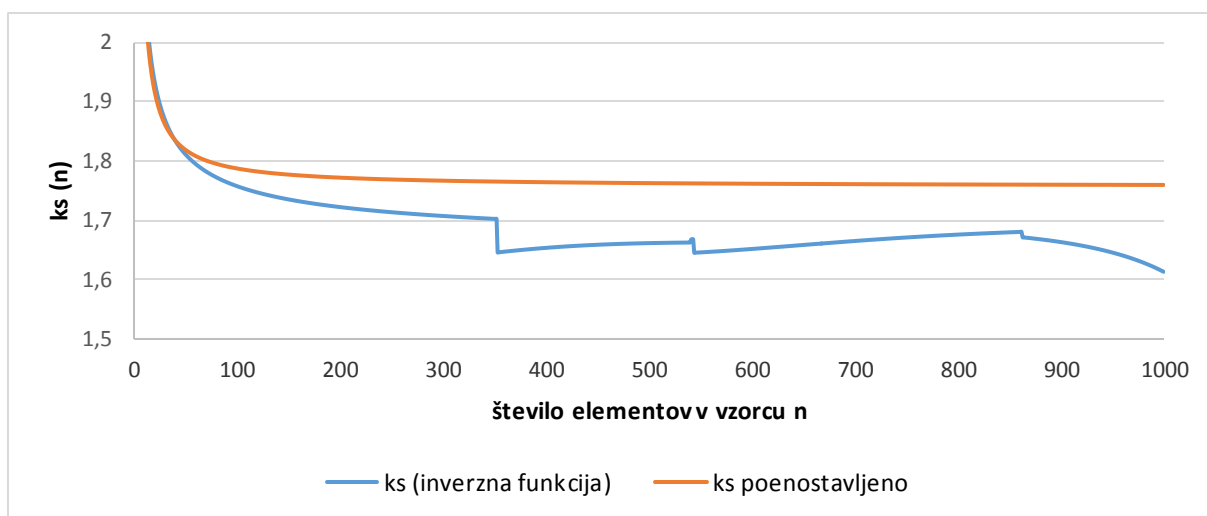
Slika 26: Diagram verjetnosti izračunan z različnimi parametri ukaza »Quantile«



Slika 27: Verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k]$, izračunane z različnimi postopki (C24, 10 000 simulacij)

Če bi držala določila predstandarda, bi se vse vrednosti morale gibati okoli 25 %. To velja tudi za točni parametrični pristop, vendar vidimo, da temu ni tako. Pri večjem številu elementov v vzorcu od 300 naprej, se verjetnosti začnejo povečevati, kar je zopet na nevarni strani. Lepše rezultate sicer dobimo za nižje vrednosti n , vendar anomalija, ki se pojavi med 300 in 500 elementi opozarja, da je pri računu prišlo do nekakšne napake.

Zato smo si natančneje pogledali faktor k_s in njegov potek v odvisnosti od števila elementov v vzorcu, ki smo ga izračunali v Mathematici z vgrajenim ukazom `InverseCDF` za necentralno Studentovo porazdelitev.



Slika 28: Potek faktorja k_s v odvisnosti od števila elementov v vzorcu

Na sliki je prikazan diagram vrednosti faktorja v odvisnosti od števila elementov v vzorcu izračunan s programom Mathematica in po poenostavljeni enačbi. Pri prvem opazimo tri očitne padce vrednosti faktorja in ponovno naraščanje vrednosti. To ni potek, ki smo ga pričakovali glede na to, da gre za rezultat analitično izpeljane enačbe.

Prvi skok se pojavi v okolici števila elementov 350 in kot vidimo v Preglednici 14, ni zanemarljiv. Tudi rezultati v Preglednici 12 in Preglednici 13 od te vrednosti naprej niso več konsistentni.

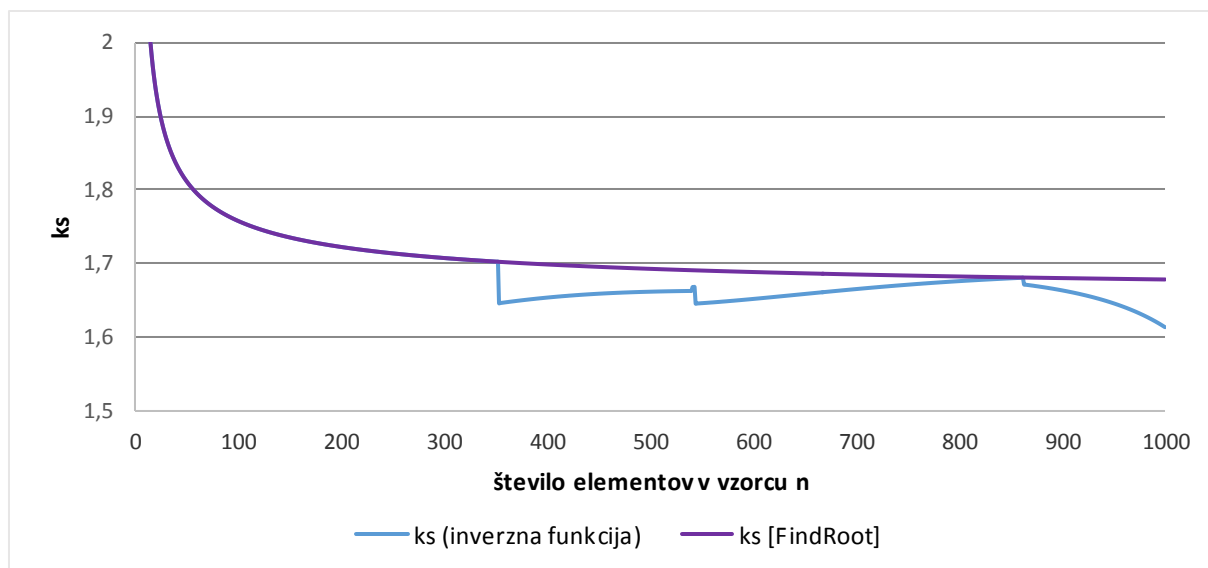
Preglednica 14: Prvi skok vrednosti faktorja k_s , izsek iz tabele faktorja k_s v odvisnosti od števila elementov v vzorcu

350	1.702669
351	1.702582
352	1.702497
353	1.646174
354	1.646367
355	1.646559

Po približni enačbi (k_s poenostavljeno na grafu) parametričnega pristopa (24) opazimo, da s številom elementov verjetnosti padajo potem pa se lepo ustalijo na vrednosti 1.76 zato so tudi verjetnosti v Preglednici 12 in Preglednici 13 bolj enakomerne, tudi pri višjih n .

Inverzna funkcija v programu Mathematica za necentralno Studentovo porazdelitev torej ni ustrežna. Zato smo uporabili drug pristop in sicer s pomočjo funkcije `FindRoot`, ki išče rešitev

enačbe. V našem primeru smo reševali enačbo, kjer je gostota necentralne Studentove porazdelitve enaka 0.75 (stopnja zaupanja). Dobili smo pravi potek faktorja in tudi bolj logične rezultate pri računu verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k]$. V primeru uporabe teoretičnih enačb parametričnega pristopa in računa s pomočjo programske opreme Mathematica je torej priporočljiva uporaba ukaza FindRoot.



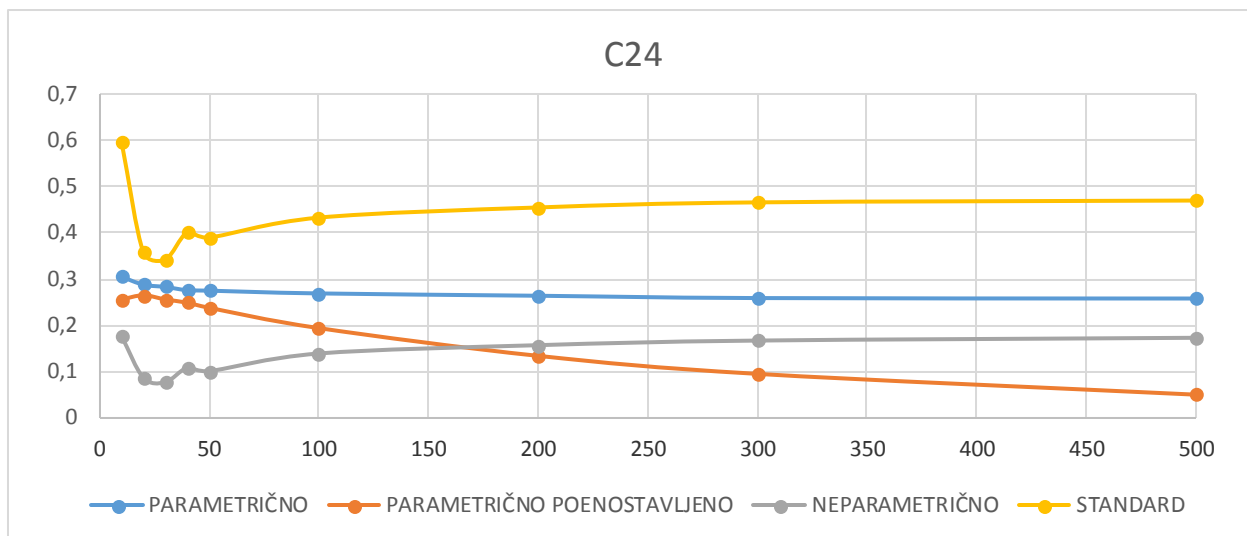
Slika 29: Potek faktorja k_s v odvisnosti od števila elementov v vzorcu.

Izračun verjetnosti smo ponovili še z novo enačbo za faktor k_s in pričakovano dobili bolj smiselne rezultate tudi za teoretični postopek. Diagram verjetnosti se približuje verjetnosti 0.25. V tem primeru smo ponovili 100 000 simulacij tako, da so rezultati bolj zanesljivi. Sicer večjih razlik med rezultati med 10 000 in 100 000 simulacij ni. Po večini se razlike pojavijo šele na 3. decimalnem mestu. Maksimalna razlika med rezultati znaša 5 %. Iz tega lahko sklepamo, da so rezultati dovolj zanesljivi že pri številu simulacij $n_{sim} = 10\,000$.

- C24, $m_x = 43.621$, $s_x = 13.381$, število simulacij $n_{sim} = 100\,000$

Preglednica 15: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C24, število simulacij 100 000 in popravljena enačba za teorijo)

n_{samp}	PARAMETRIČNO	PARAMETRIČNO POENOSTAVLJENO	NEPARAMETRIČNO	STANDARD
10	0.305	0.256	0.273	0.598
20	0.288	0.265	0.135	0.358
30	0.283	0.256	0.116	0.342
40	0.276	0.249	0.155	0.401
50	0.275	0.238	0.143	0.390
100	0.269	0.194	0.177	0.433
200	0.264	0.134	0.189	0.455
300	0.259	0.095	0.194	0.466
500	0.258	0.05	0.199	0.470

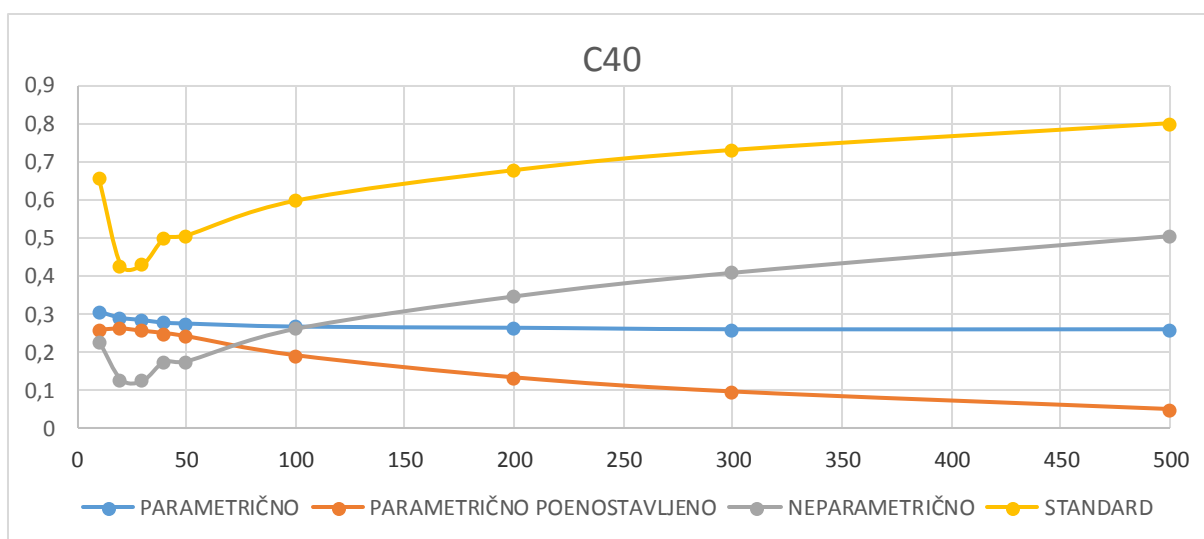


Slika 30: Verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k]$, izračunane z različnimi postopki (C24, 100 000 simulacij, popravljena enačba za teorijo)

- C40, $m_x = 53.3800$, $s_x = 9.4720$, število simulacij $n_{sim} = 100\ 000$

Preglednica 16: Preglednica rezultatov simulacij z uporabo različnih enačb glede na različno število elementov v vzorcu (razred C40 število simulacij 100 000 in popravljena enačba za teorijo)

n_{samp}	PARAMETRIČNO	PARAMETRIČNO POENOSTAVLJENO	NEPARAMETRIČNO	STANDARD
10	0.306	0.259	0.229	0.655
20	0.29	0.262	0.129	0.428
30	0.284	0.256	0.125	0.429
40	0.277	0.250	0.176	0.499
50	0.275	0.242	0.176	0.506
100	0.267	0.192	0.261	0.597
200	0.264	0.134	0.346	0.677
300	0.260	0.097	0.408	0.730
500	0.260	0.051	0.504	0.800



Slika 31: Verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k]$, izračunane z različnimi postopki (C40, 100 000 simulacij, popravljena enačba za teorijo)

Rezultati za razred C40 so podobni, le pri standardu verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k]$ nekoliko hitreje rastejo. Vidimo pa tudi hitro naraščanje verjetnosti po neparametričnem pristopu. To je seveda na nevarni strani. Pri razredu C24 pa se so se vrednosti ustalile pod 20 %. Očitno imajo pri neparametrični enačbi velik vpliv na rezultate tudi sami parametri porazdelitev, kar kaže na nekonsistenco enačbe.

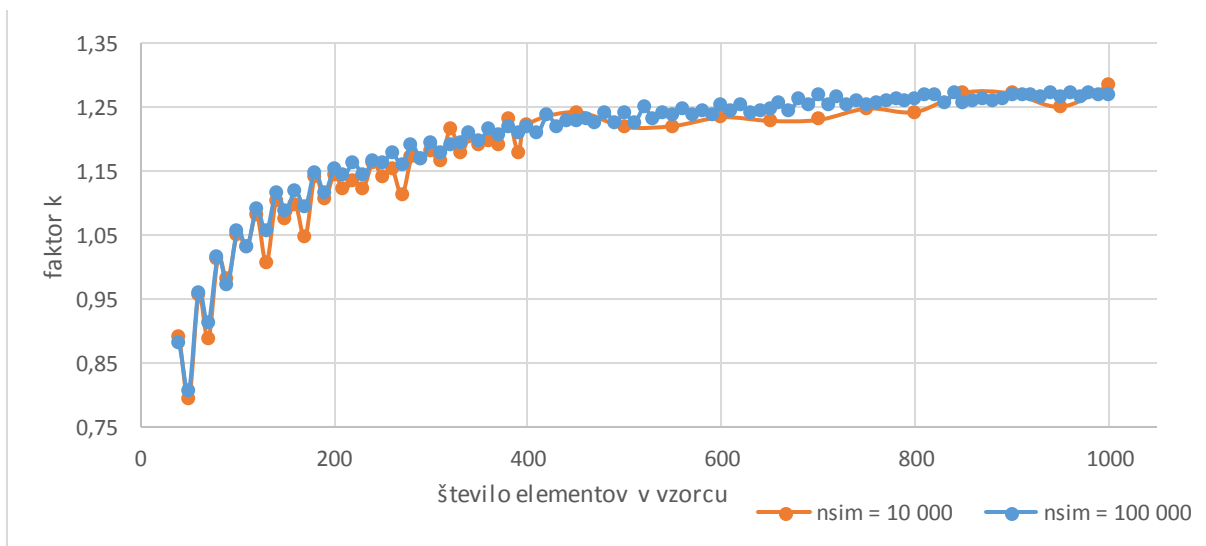
4.7.2 ENAČBA ZA RAČUN PO NEPARAMETRIČNEM PRISTOPU

Že pri optimalnem razvrščanju smo ugotovili, da je pristop, ki je podan v predstandardu precej konservativen, tako v primerjavi s teorijo kot tudi z veljavnim standardom. To se je potrdilo tudi pri računu karakterističnih vrednosti.

Eden izmed ciljev magistrske naloge je tudi ta, da bi poiskali novo enačbo, ki bi nadomestila obstoječo v predstandardu in se tako čimbolj približali rezultatom teoretičnega pristopa oziroma osnovni predpostavki predstandarda, da je verjetnost $P[\hat{m}_k > m_k] \leq 0.25$.

Za obstoječo enačbo za karakteristično vrednost (5) smo želeli poiskati novo enačbo za faktor s katerim določimo 75-odstotni interval zaupanja za določitev karakteristične vrednosti $k_{0.05,0.75}$.

Poiskali smo take vrednosti faktorja, da smo z 10 000 simulacijami dobili verjetnost $P[\hat{m}_k > m_k] \leq 0.25$. Z dobljenimi točkami vrednosti faktorja v odvisnosti od števila elementov v vzorcu v vzorcu smo dobili diagram, ki je prikazan na spodnji sliki. Postopek smo ponovili za 100 000 simulacij. Opazimo, da je nihanje na začetku diagrama nekoliko manjše za primer z več simulacij, zato pričakujemo boljše rezultate.



Slika 32: Vrednosti faktorja k , da zadostimo pogoju $P[\hat{m}_k > m_k] \leq 0.25$

Za rezultate k faktorja, ki smo jih dobili s 100 000 simulacijami smo iskali enačbo za faktor k , ki bi se najbolj prilegala podatkom. Faktor je odvisen samo od števila elementov v vzorcu n . Preverili smo tri oblike enačbe:

$$k = a + \frac{b}{n} \quad (28)$$

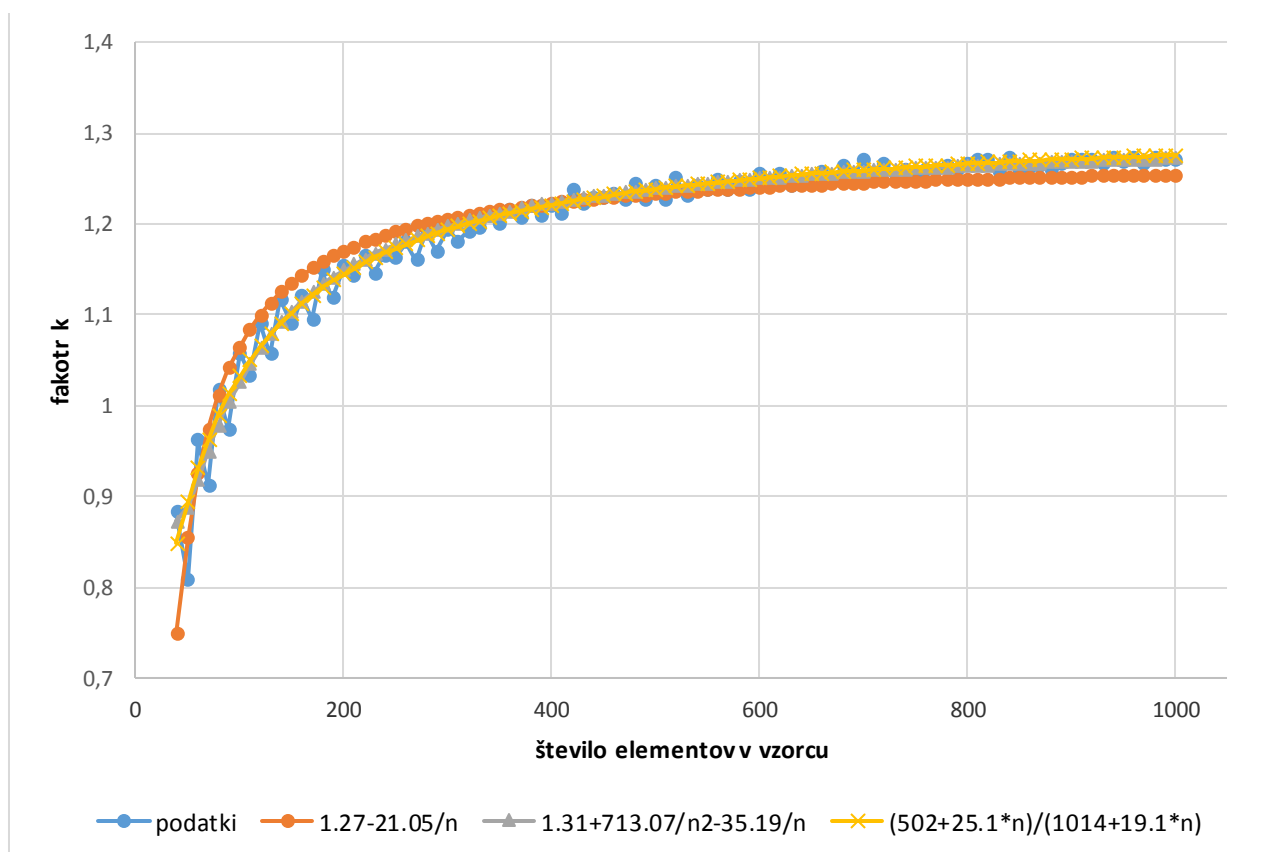
$$k = a + \frac{b}{n} + \frac{c}{n^2} \quad (29)$$

$$k = \frac{a+b \cdot n}{c+d \cdot n} \quad (30)$$

Na diagramu so prikazane vse enačbe in pripadajoče krivulje. Vse tri krivulje relativno lepo sovpadajo s podatki. Po metodi najmanjših kvadratov smo preverili, s katero enačbo pride do najmanjših odstopanj od podatkov. Najbolje se prilega enačba (29) vendar so odstopanja zelo nizka tudi v primeru enačbe (30). Do minimalnih razlik lahko pride tudi zaradi same slučajnosti rezultatov.

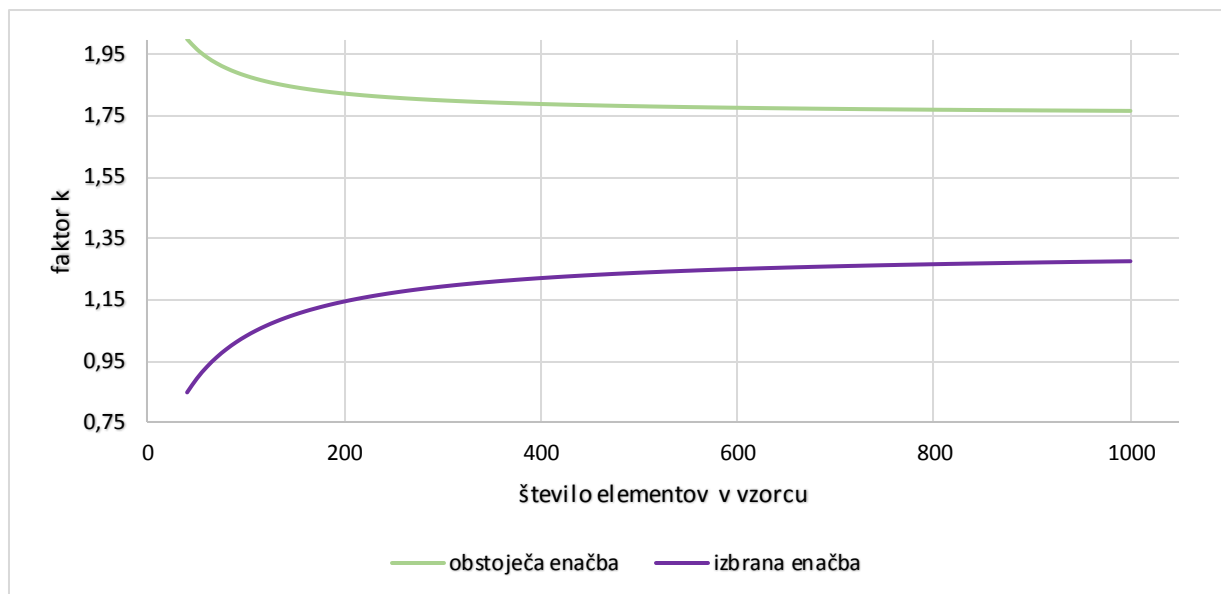
Glede na to, da je v trenutni verziji predstandarda podana enačba v obliki (30), se bomo tudi mi držali te oblike. Izbrana enačba za korekcijski faktor k , ki je v predstandardu označen kot $k_{0,05;0,75}$, ima torej naslednjo obliko:

$$k = k_{0,05;0,75} = \frac{502+25,1 \cdot n}{1014+19,1 \cdot n} \quad (31)$$



Slika 33: Primerjava različnih enačb za določitev faktorja k

Če sedaj primerjamo sam potek faktorja v odvisnosti od števila elementov v vzorcu vidimo, da sta si enačbi zelo različni oziroma celo nasprotni/zrcalni (Slika 35). Pri naši enačbi vrednosti faktorja s številom elementov narašča, po predstandardu pa pada. Rezultat nas je precej presenetil, vendar se je pri kontroli verjetnosti izkazal za pravilnega.



Slika 34: Grafični potek faktorja k v odvisnosti od velikosti vzorca, primerjava enačbe v predstandardu in nove enačbe

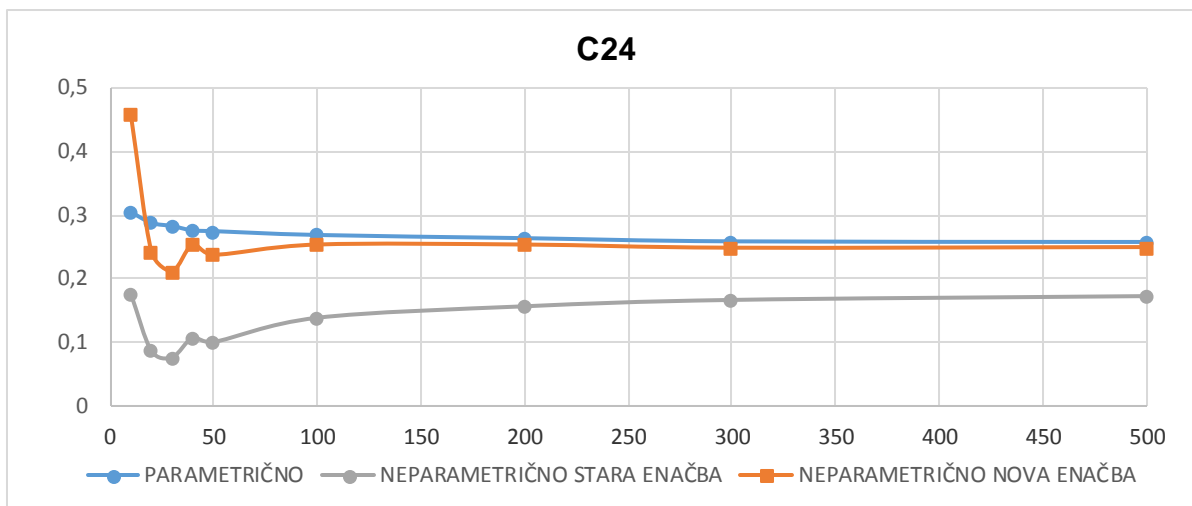
S ponovitvijo 100 000 simulacij smo za razred C24 in C40 ponovno izračunali verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k] \leq 0.25$, tokrat z uporabo enačbe (31). V Preglednici 17 in Preglednici 18 so zbrani rezultati po novi in stari enačbi ter po teoriji.

Preglednica 17: Verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k] \leq 0.25$, izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C24)

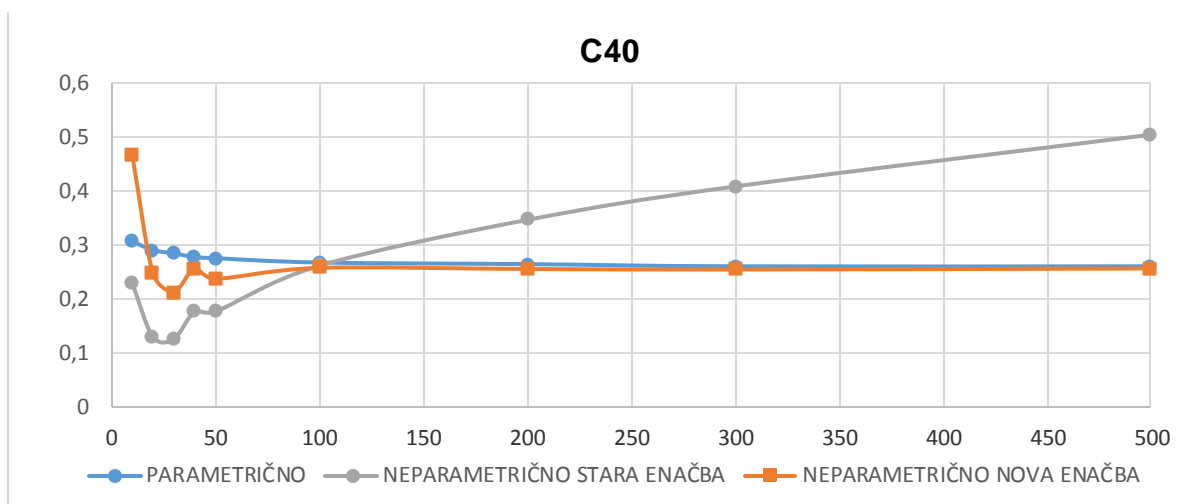
n_{samp}	PARAMETRIČNO	NEPARAMETRIČNO NOVA ENAČBA	NEPARAMETRIČNO STARA ENAČBA
10	0.305	0.459	0.177
20	0.288	0.243	0.087
30	0.283	0.212	0.077
40	0.276	0.255	0.108
50	0.275	0.238	0.101
100	0.269	0.254	0.139
200	0.264	0.254	0.157
300	0.259	0.249	0.167
500	0.258	0.25	0.173

Preglednica 18: Verjetnosti $P[\hat{m}_k > m_k] \leq 0.25$, izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C40)

n_{samp}	PARAMETRIČNO	NEPARAMETRIČNO NOVA ENAČBA	NEPARAMETRIČNO STARA ENAČBA
10	0.306	0.467	0.229
20	0.29	0.247	0.129
30	0.284	0.212	0.125
40	0.277	0.256	0.176
50	0.275	0.237	0.176
100	0.267	0.257	0.261
200	0.264	0.255	0.346
300	0.26	0.254	0.408
500	0.26	0.256	0.504



Slika 35: Diagram verjetnosti izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C24)



Slika 36: Diagram verjetnosti izračunane na osnovi nove enačbe za korekcijski faktor (razred C40)

Verjetnosti, izračunane na osnovi korekcijskega faktorja po novi enačbi, so veliko bolj primerljive s teoretičnimi rezultati, kar je tudi bil naš cilj. Enačba v predstandardu namreč daje preveč konservativne rezultate karakterističnih vrednosti, kar je povsem nepotrebno, saj so tudi teoretični rezultati, glede na trenutno veljavni standard, na varni strani.

Manjše težave se sicer pojavijo pri manjših vzorcih, kjer verjetnosti sicer presežejo mejo 25-odstotne verjetnosti, vendar to za nas niti ni pomembno, saj nas zanimajo rezultati od števila elementov v vzorcu $n = 40$ naprej, kot je tudi podano v predstandardu. Rezultati za manjše vzorce so v vsakem primeru relativno nezanesljivi, saj je težko določiti karakteristične vrednosti na majhnem vzorcu.

5 PREDSTAVITEV NAPRAVE GT-PRO

Naprava GT-PRO podjetja ILKON d.o.o. je bila uporabljena v projektu ARRS: Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti, kjer je bilo preizkušenih več kot 1000 lesenih elementov. Preizkušeni so bili najprej z različnimi nedestruktivnimi metodami in napravami. Na koncu so bile izvedene še porušne preiskave za ugotavljanje pravih trdnostnih lastnosti elementov. Naprava za merjenje dinamičnega modula elastičnosti deluje po principu metode širjenja vzdolžnega nihanja in je sestavljena iz osnovne računalniške opreme (s primernim programom, ki je bil spisan za ta namen), mikrofona in kladiva. Oprema je prikazana na spodnji sliki.

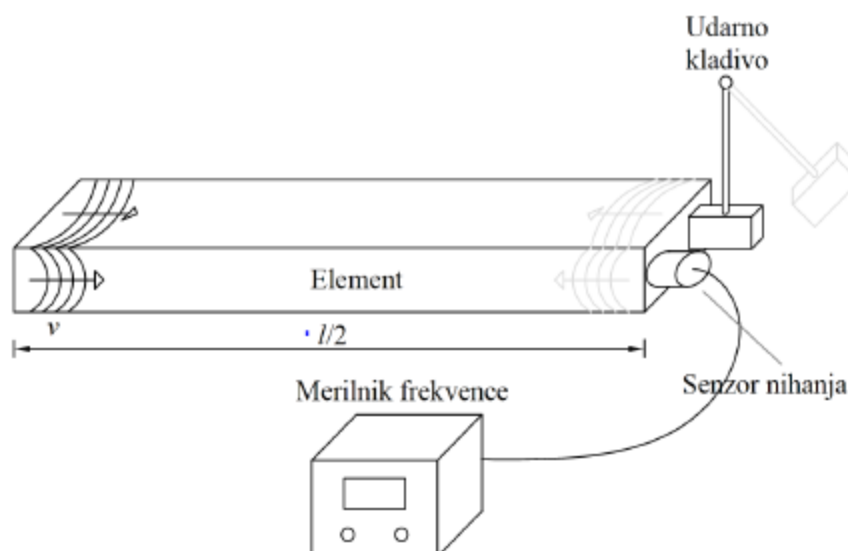
Ne glede na enostavnost opreme, se je naprava izkazala za izredno uporabno in s primerljivo natančnostjo z drugimi napravami istega tipa, ki delujejo po enaki metodi (Plos, 2012).



Slika 37: Preprosta oprema naprave GT-PRO (Vir: Plos, 2012)

5.1 METODA VZDOLŽNEGA NIHANJA

Metoda vzdolžnega nihanja ali metoda longitudinalnega širjenja valov je ena enostavnejših in zato tudi pogosto uporabljenih metod določanja odločilnih lastnosti preizkušanca. S kladivom v preizkušancu vzbudimo vzdolžno nihanje, nato pa to nihanje merimo s piezoelektričnim senzorjem oziroma senzorjem nihanja, kot je prikazano na spodnji sliki. Nihanje lesa lahko merimo tudi posredno z mikrofoni, ki merijo nihanje zraka. Na tak način deluje tudi obravnavana naprava GT-PRO.



Slika 38: Shematski prikaz metode merjenja dinamičnega modula elastičnosti po metodi vzdolžnega valovanja nihanja (Vir: Plos, 2012)

Z napravo tako določimo frekvenco nihanja f (prva lastna frekvenca). Za valovno dolžino prve nihajne oblike vzamemo dvojno dolžino preizkušanca $2l$, saj je ta prostoležeč in konci niso vpeti. Z lastno frekvenco in valovno dolžino lahko enostavno izračunamo hitrost nihanja v v preizkušancu po enačbi

$$v = \lambda \cdot f \quad (32)$$

kjer je λ valovna dolžina.

Iz tega pa naprej dinamični elastični modul po enačbi:

$$E_{dyn} = \rho \cdot v^2 \quad (33)$$

kjer je ρ gostota preizkušanca.

Slabša kot je kakovost lesa, počasnejša je hitrost širjenja valovanja in nižje so frekvence lastnega nihanja, posledično pa je nižji dinamični modul elastičnosti.

5.2 OPREMA (MIKROFONI)

Na osnovi podatkov (frekvence) nihanja valovanja, ki jih izmerimo z mikrofonom torej izračunamo dinamični modul elastičnosti. Zato moramo posebno pozornost posvetiti tudi samemu izboru in kakovosti mikrofonom. To je predvsem pomembno pri meritvah izven laboratorija in v halah žagarskih obratov, kjer lahko znaten hrup okolice moti meritve. Zato sem pripravila krajši pregled obstoječih mikrofonom in tehnologije, ki stoji za tem.

Mikrofon je akustični senzor, ki akustično energijo pretvori v električni signal na različne načine, od tega je tudi odvisen tip mikrofona. Danes so v najpogostejši uporabi dinamični mikrofoni, kondenzatorski mikrofoni ali piezoelektrični mikrofoni. Z različnimi mehanizmi (elektromagnetna indukcija, sprememba kapacitivnosti, piezoelektričnosti) iz sprememb v pritisku zraka generirajo električni signal. Mikrofon je povezan z predojačevalnikom in avdio ojačevalnikom. Delovanje vseh mikrofonom je osnovano na podobnem principu. Energija

zvočnega nihanja se preko nihanja membrane oziroma plošče spremeni v mehansko energijo. Gibanje plošče vpliva nato na spremembo električnega signala.

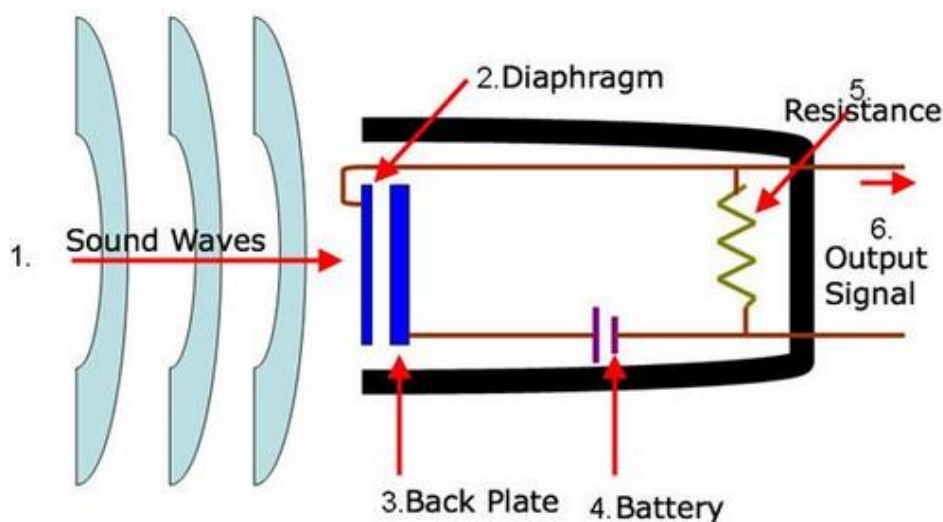
5.2.1 ZGODOVINA

Čisto prvi poskusi izdelave mikrofona segajo v leto 1861, ko je nemški fizik Johann Philipp Reis razvil prvi »zvočni oddajnik«. Ta je bil sestavljen iz kovinskega traku, ki je bil točkovno pritrjen na membrano in s tem tvoril električni krog. Ta prototip sicer ni dal prave kakovosti zvoka, vendar je pomemben za zgodovino, saj se je prvič pojavila teorija, da se preko vibriranja membrane, nihanje prenaša na kovinski trak, ki naj bi sinhrono z vibriranjem zvoka prekinjala kontakt in posledično električni krog. Ta »izum« je sprožil nadaljnji razvoj. Alexander Graham Bell in Elisha Gray naj bi istočasno leta 1876 razvila podoben t.i. »tekočinski oddajnik«, kjer je na membrano pritrjena dobro prevodna igla, ki se dotika kisle tekočine. Z vibriranjem membrane se spreminja dolžina potopljene konice. In s tem prevodnost električnega toka.

Prvi večji uspeh pa je doživel t.i. ogljeni mikrofoni, ki sta ga neodvisno razvila Anglež David Edward Hughes in Američan Thomas Edison leta 1877. Ogljena zrnca so zapakirana v ohišje z elastično membrano. Nihanje zvočnega tlaka se preko membrane prenese na zrna in povzroči spremembe v uporovnosti teh, kar omogoča relativno natančno električno reprodukcijo zvočnega signala. Tak tip mikrofona se je dolgo uporabljal v telefoniji. Šele po slabih 40 letih je bil razvit nov tip mikrofona, kondenzatorski mikrofoni, ki pa je danes tudi najbolj razširjen.

5.2.2 KONDENZATORSKI MIKROFON

Mikrofon je bil razvit leta 1914 in je sestavljen iz dveh plošč, ki sta del kondenzatorja. Zvočno valovanje neposredno vpliva na gibljivo ploščo kondenzatorja in spreminja razdaljo med ploščama. To povzroči spremembo v kapaciteti kondenzatorja. Iz spremembe električnega toka v krogu se določi električni signal. Glede na izbor membrane (plošče kondenzatorja) lahko takšne mikrofone uporabljamo tudi za potrebe meritev z visoko kakovostjo posnetega zvoka. Kondenzatorski mikrofoni zaznavajo tudi zelo šibke signale.

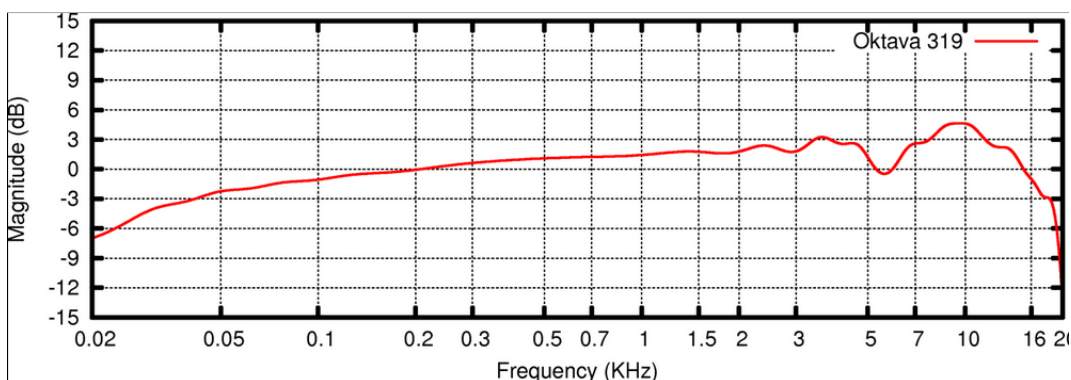


Slika 39: Shema konstrukcije kondenzatorskega mikrofona (Vir: Spletna stran Bright Hub).

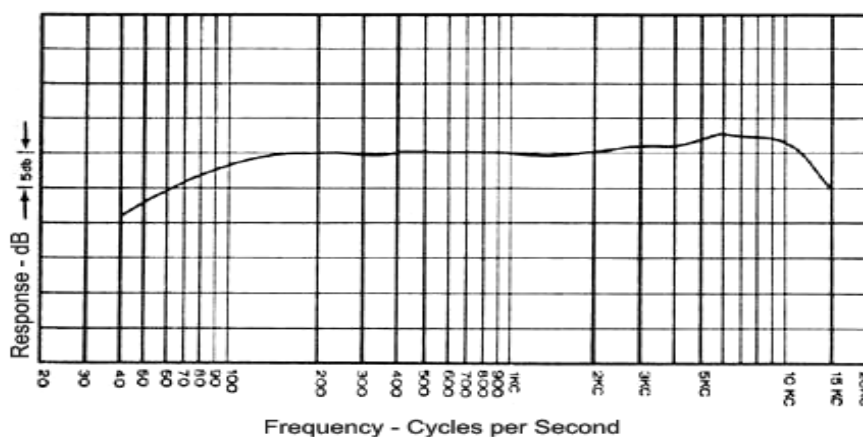
Značilne karakteristike mikrofonov:

- Frekvenčna karakteristika

Zaradi različne sestave oziroma konstrukcije imajo mikrofoni različne odzive na zvočne signale. To je lepo razvidno iz frekvenčnega diagrama, ki prikazuje občutljivost mikrofona v dB v odvisnosti od frekvenčnega spektra običajno od 20 Hz do 20 000 Hz. Diagrami običajno niso konstantni, torej se občutljivost za zvočne signale razlikuje glede na frekvenco zvoka. Idealno bi bilo, še posebej za potrebe znanstvenih meritev, da bi se z diagramom kar se da približali ravnemu platoju konstantne občutljivosti (vsaj na določenem frekvenčnem območju). Na spodnji sliki sta prikazana frekvenčna diagrama različnih mikrofonov. Frekvenčni odziv mikrofona lahko podamo tudi tekstualno, vendar moramo biti previdni, da je posebej izpostavljena tudi toleranca napake, običajno velikostnega reda nekaj dB (npr.: ± 3 dB), saj sam razpon frekvenc ni tako bistven podatek.



Slika 40: Frekvenčna karakteristika mikrofona Oktava 319 (Vir: Wikipedia. Pridobljeno 10.6.2015).



Slika 41: Frekvenčna karakteristika mikrofona (Vir: Spletna stran Media College)

- Občutljivost mikrofona

Občutljivost mikrofona predstavlja razliko med magnitudo vhodnega in izhodnega signala, torej spremembo napetosti na izhodu mikrofona v odvisnosti od zvočnega signala.

Izračuna se po enačbi (30).

$$\text{Občutljivost [dBV/Pa]} = 20 \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{\text{Občutljivost } \left[\frac{\text{mV}}{\text{Pa}} \right]}{\text{Referenčna izhodna napetost } \left[1 \frac{\text{V}}{\text{Pa}} \right]} \right) \quad (34)$$

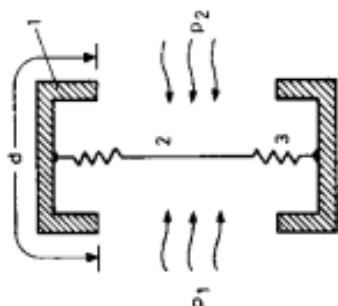
Občutljivost je lahko podana v voltih ali v decibelih.

Vrednosti občutljivosti v decibelih so negativne vrednosti, saj se vse izraža na referenčno vrednost napetosti 1V. Manjša kot je negativna vrednost, boljša je občutljivost mikrofona.

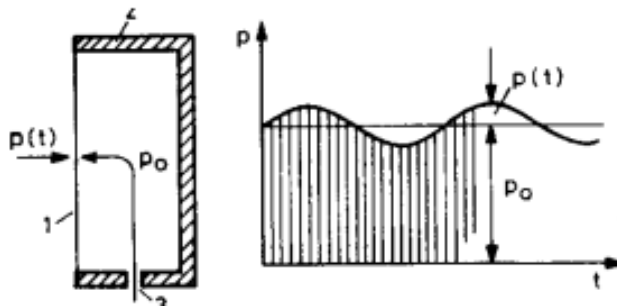
Pri označevanju občutljivosti velja pretvorba $1 \text{ Pa} = 94 \text{ dB}$ (nivo zvočnega tlaka – SPL). Če imamo občutljivost podano v voltih dobimo podatek kakšna je izhodna napetost mikrofona, če ta sliši zvočni pritisk 94 dB oziroma 1 Pa . Višja kot je vrednosti v voltih (običajno so to mV), višja je občutljivost mikrofona.

- Smerna karakteristika

Večina smernih karakteristik je definiranih za zvočne valove, ki prihajajo v horizontalni ravnini. Takšni valovi so izraziti, relativno enostavni in predstavljajo dobro aproksimacijo zvoka iz oddaljenih zvočnih virov. Glede na smeri, iz katerih se meri nihanje zvoka ločimo gradientni in tlačni mikrofoni. Membrana je izpostavljena iz obeh strani. Gradientni mikrofoni se odzivajo na spremembe tlaka iz vseh smeri, saj spremembo tlaka zaznajo kot razliko pritiska na membrano iz ene in druge strani.

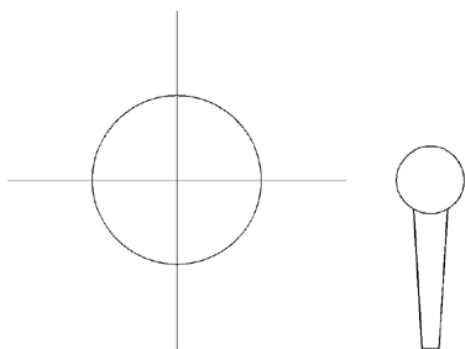


Slika 42: Shematski prikaz gradientnega mikrofona (Vir: Pelicon, Doplihar, 2011).

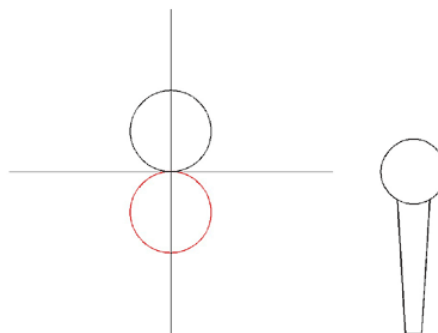


Slika 43: Shematski prikaz tlačnega mikrofona (Vir: Pelicon, Doplihar, 2011).

Osnovni smerni karakteristiki mikrofona sta vsesmerni mikrofoni in mikrofoni z vzorcem v obliki osmice, kot je prikazano na spodnji sliki. Diagrami na slikah v nadaljevanju prikazujejo območja iz katerih lahko mikrofoni zaznava vibracije zvoka oziroma so to območja točk izvora zvočnega signala, ki rezultirajo v enako intenzivnem izhodnem signalu. Načeloma imajo vsi mikrofoni krožne karakteristike za nizke frekvence, pri višjih frekvencah pa se pokažejo značilne oblike usmerjenosti.

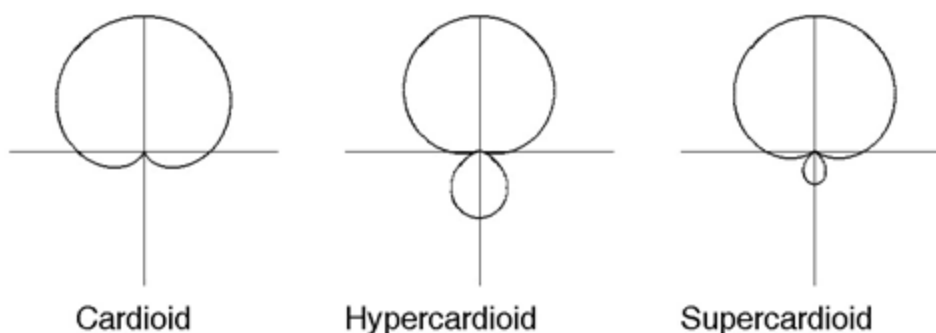


Slika 44: Polarni (vsesmerni) vzorec (Vir: Spletna stran Universal Audio WebZine)



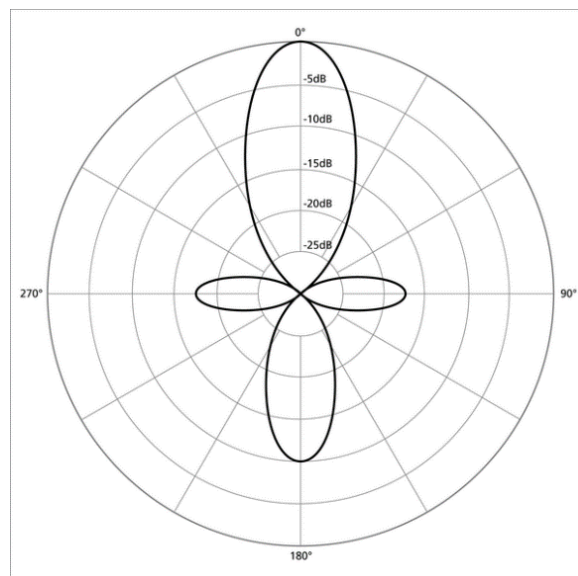
Slika 45: Polarni vzorec v obliki osmice (Vir: Spletna stran Universal Audio WebZine. Pridobljeno 12.6.2015)

Z ustreznim kombiniranjem dveh osnovnih vzorcev pa dobimo naslednje izpeljanke vzorcev:



Slika 46: Izpeljanke osnovnih vzorcev mikrofonov (Vir: Spletna stran Universal Audio WebZine. Pridobljeno 12.6.2015)

Posebna izpeljanka pa je t.i. »shotgun« mikrofona, ki pa je kombiniran še z vzorcem stranskega mikrofona. Tak mikrofona je izrazito ozko usmerjen in zaznava zvoke večinoma s sprednje in zadnje strani, manj pa tudi iz leve in desne strani. Tak mikrofona je primeren za snemanje zvokov v hrupnih in nenadzorovanih okoljih, kar pomeni, da bi bil tak mikrofona primeren tudi za snemanje v proizvodnji. Ravno zaradi ozke usmerjenosti, pa moramo biti pozorni pri uporabi tak mikrofona, saj majhna sprememba v usmerjenosti mikrofona lahko povzroči, da zvoka ne zajamemo dovolj natančno oziroma ga sploh ne zajamemo.



Slika 47: Krožni vzorec ozko usmerjenega mikrofona (Vir: Sobel, 2009)

- Lastni šum

Lastni šum predstavlja nivo zvoka, ki povzroči izhodno napetost na mikrofону enako, kot če zvoka ne bi bilo. To predstavlja najnižjo točko dinamičnega razpona mikrofona in je bistvenega pomena v primeru, ko želimo posneti šibke zvočne signale. Lastni šum se meri v dB in nižja kot je vrednost, boljše so meritve. Dinamični razpon mikrofona je razlika med maksimalnim in minimalnim nivojem zvočnega tlaka (SPL).

5.2.3 MIKROFON SENNHEISER MKH P48

Omenjeni mikrofón je predstavnik »shotgun« mikrofónov. Membrana mikrofona zajema spremembe v tlaku z obeh strani, torej gre za gradientni mikrofón. Ker je mikrofón kondenzatorski, je odporen na zunanje dejavnike, kot je vlaga in prah. Zato je primeren za uporabo v odprtih, manj zaščitenih zunanjih prostorih ali v bolj prašnih okoljih, kot na primer v proizvodnih prostorih. Krožno karakteristiko ima tipično za shotgun mikrofóne z nizkim nivojem lastnega šuma, zato se meritve zvoka toliko bolj natančne.



Slika 48: Slika kondenzatorskega mikrofona, model SENNHEISER MKH 416 P48. (Vir: Spletna stran Sennheiser)

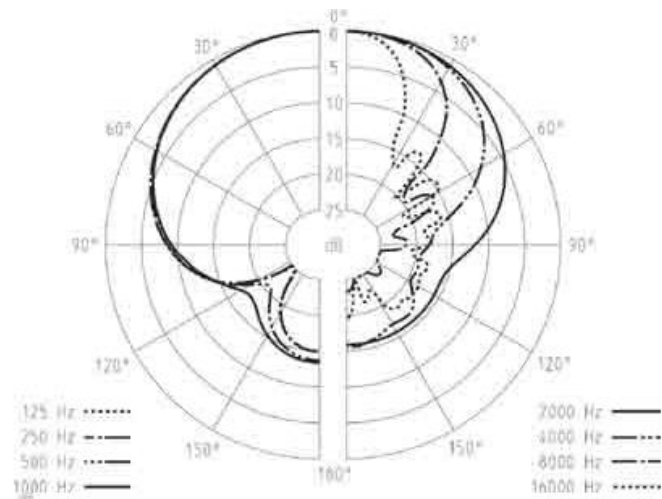
Ima relativno velik frekvenčni razpon (od 40 – 20 000 Hz) in dobro občutljivost. Ta znaša 25 mV/Pa, kar pomeni, da ima pri nivoju zvočnega tlaka 1 Pa izhodno napetost 25 mV.

Preglednica 19: Tehnični podatki o mikrofónu Sennheiser MKH 416 P48 (Vir: Spletna stran Sennheiser)

Frekvenčni razpon	40 Hz - 20 kHz
Občutljivost	25 mV/Pa
Nominalna impedanca	25 Ω
Lastni šum	13 dB
Maksimalni SPL	130 dB
Napetost	48±4 V Phantom

Podatki za občutljivost veljajo pri nivoju zvoka 1 kHz. Občutljivost se običajno spreminja glede na frekvenco zvoka. Naj omenim, da leseni elementi (smreke) nihajo v območju frekvenc okoli 1 kHz

Dejanski krožni vzorec občutljivosti je prikazan na spodnji sliki (superkardioidni vzorec) in se nekoliko razlikuje od shematskega prikaza krožne karakteristike za shotgun mikrofone.



Slika 49: Krožna karakteristika mikrofona Sennheiser MKH 416 P48 (Vir: Spletna stran DCAudio Visuel)

6 DOLOČANJE NASTAVITEV

Iz optimalnega razvrščanja smo že določili primerne kombinacije razredov razvrščanja. Za te kombinacije želimo določiti nastavitve naprave. To so spodnje mejne vrednosti indikativne količine, na osnovi katerih se določi trdnostni razred posameznega lesa. Za samo razvrščanje je pravzaprav vseeno, katere indikativne količine uporabimo, je pa zelo pomembno, da je ta količina v čim boljši korelaciji s trdnostjo lesa, ki je rezultat celotnega postopka razvrščanja.

Povprečno merjeno gostoto lahko enostavno izračunamo iz mase in dimenzij elementa. Najbolj enostavno bi bilo, če bi lahko bila kar gostota tista količina na osnovi katere elemente razvrstimo v kombinacijo trdnostnih razredov. Preverili smo korelacije povprečne merjene gostote s trdnostjo. Korelacijski koeficient znaša 0.51.

Naprava GT-PRO meri frekvenčni odziv elementa na sunkovit udarec in izmeri prvo lastno frekvenco elementa. Preverili smo odnos med izmerjeno frekvenco in trdnostjo in dobili nekoliko boljše rezultate za korelacijski koeficient, ki je znašal 0.68. Kljub relativno dobri povezanosti trdnosti s frekvenco, slednja ni primerna za indikativno količino. Odčitek frekvence je namreč neposredno odvisen od dolžine elementa. Ker so naši preizkušanci vsi približno enake dolžine, so tudi frekvence med seboj primerljive in v dobri povezanosti s trdnostjo. V realnem stanju, pa ne moremo pričakovati, da bodo leseni elementi enake dolžine, zato se pri izboru indikativne količine nismo odločili za frekvenco.

Če pa uporabimo podatke o izmerjeni gostoti, frekvenci in dolžini elementa, lahko izračunamo elastični dinamični modul po enačbi (35). Korelacijski koeficient znaša 0.72.

$$E_{dyn} = \rho \cdot v^2 = \rho \cdot 4 \cdot l^2 \cdot f^2 \quad (35)$$

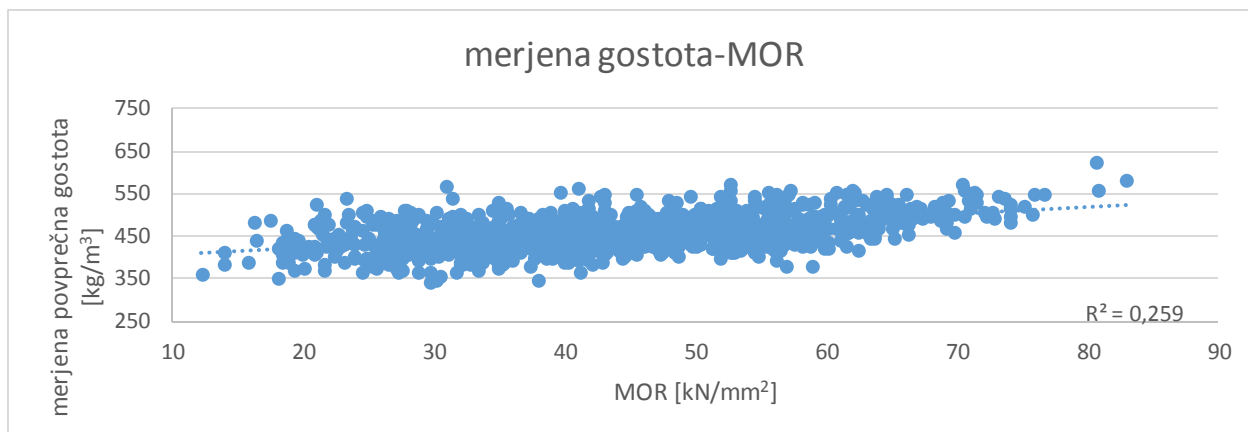
f ... izmerjena frekvenca nihanja

l ... dolžina elementa

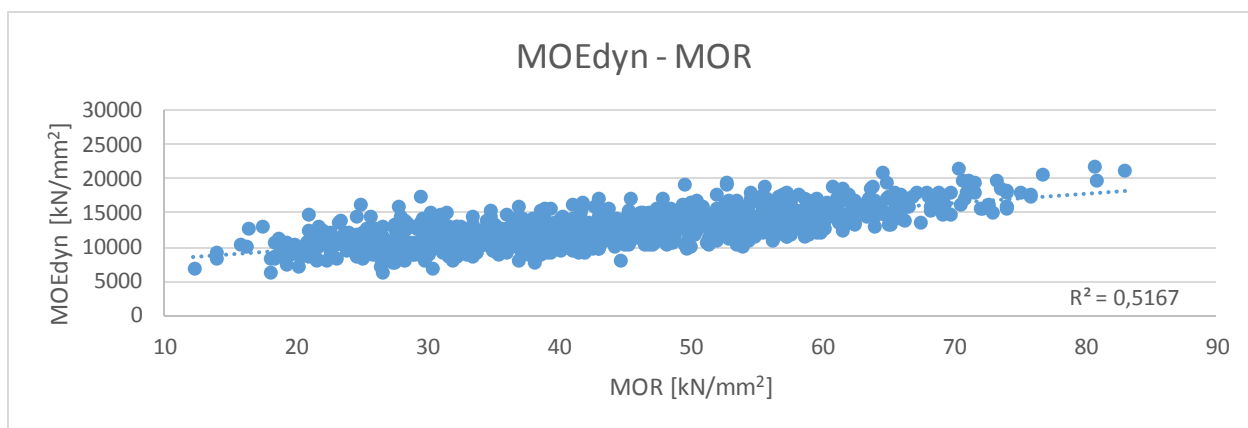
ρ ... gostota elementa

V najboljši povezavi s trdnostjo je dinamični modul elastičnosti in je zato najbolj primerna indikativna količina. Izračun tega pa je relativno enostavno vključiti tudi v programsko opremo naprave GT PRO.

Na spodnjih diagramih so grafično prikazane korelacije med posameznimi količinami in trdnostjo.



Slika 50: Korelacija med merjeno gostoto in trdnostjo.



Slika 51: Korelacija med dinamičnim modulom elastičnosti in trdnostjo.

6.1 NASTAVITVE Z MERJENO IN PREDPOSTAVLJENO GOSTOTO

Zanimala nas je razlika med rezultati, če gostoto merimo ali pa jo kar predpostavimo (in po katerem postopku jo predpostavimo). Meritev gostote preizkušancev je sicer enostaven postopek, vendar bi z morebitno opustitvijo tega koraka pri razvrščanju lesa prihranili precej časa, kar je pomemben vidik za proizvodne obrate.

Za 1020 elementov smo izračunali indikativne vrednosti dinamičnega elastičnega modula (E_{mod}) z vrednostjo gostote, ki je bila izmerjena za celoten element (brez korekcije glede na dejansko vlažnost). Elemente smo nato razporedili po vrsti od najvišje do najnižje vrednosti. S tako urejenim vzorcem smo lahko poiskali mejne vrednosti indikativne količine E_{mod} , za posamezno kombinacijo razredov in tako dobili nastavitve za napravo GT-PRO.

Enak postopek smo naredili z elastičnim modulom, ki smo ga izračunali iz predpostavljene gostote. Najprej smo upoštevali povprečno gostoto 460 kg/m^3 , kar je sicer pri mehkem lesu karakteristična vrednost za razred C50. Vrednost je tudi višja od povprečja izmerjenih gostot elementov. Mejne vrednosti nastavitv imajo generalno višje vrednosti kot pri izmerjeni gostoti, saj je elastični modul linearno odvisen od gostote, zato predvidevamo, da so takšne nastavitve na varni strani.

Preglednica 20: Nastavitve dinamičnega elastičnega modula za merjeno gostoto

nastavitve E_{mod} (merjena gostota)	C40	C35	C30	C27	C24	C18	C16
C40-C35-C24-C18	15451	-			6267	-	
C40-C35-C24-C16	15451	-			6267		-
C40-C30-C24-C18	15451		12099		10724	6267	
C40-C30-C24-C16	15451		12099		10724		6267
C35-C24-C18		14444			7073	-	
C35-C27-C18		14444		10770		6267	
C30-C24-C16			11457		-		6267
C40-C30-C18	15451		12099			6267	

Preglednica 21: Nastavitve za dinamični elastični modul za predpostavljeno gostoto 460 kg/m^3

Nastavitve E_{mod} (konstantna gostota 460 kg/m^3)	C40	C35	C30	C27	C24	C18	C16
C40-C35-C24-C18	15203	14400			7607	-	
C40-C35-C24-C16	15203	14400			7607		-
C40-C30-C24-C18	15203		12219		11351	7607	
C40-C30-C24-C16	15203		12219		11351		7607
C35-C24-C18		13604			9459	-	
C35-C27-C18		13604		11340		7607	
C30-C24-C16			11801		-		7607
C40-C30-C18	15203		12219			7607	

Preverili smo še nastavitve in rezultate, ki jih dobimo z nekoliko nižjo vrednostjo predpostavljene gostote in sicer 440 kg/m^3 , kar približno ustreza povprečju izmerjenih gostot preizkušancev. Ker gostota na vrednost dinamičnega modula vpliva linearno, bodo mejne vrednosti za posamezne trdnostne razrede (nastavitve) nižje za slabih 5 %, kar ustreza razliki med izbranimi konstantnima gostotama.

V samem izplenu elementov po trdnostnih razredih ni razlike, ne glede na to, da je pri določenih kombinacijah dejansko povprečje izmerjenih gostot večje od druge konstantne gostote (440 kg/m^3) in bi pričakovali, da smo pri takšnih nastavitvah na nevarni strani. To izhaja iz dejstva, da se v posamezne razrede pri merjeni gostoti uvrstijo preizkušanci z različnimi identifikacijami, torej z različnimi mehanskimi lastnostmi, kot pri predpostavljene gostoti. Ko pa predpostavimo gostoto, je vse odvisno samo še od izmerjene frekvence in dolžine elementa in ne več od gostote. Tudi v primeru nerealne vrednosti gostote (kot npr. 1500 kg/m^3) bi bil končni izplen enak. Razvrstitev je torej za kakršnokoli predpostavljeno gostoto enaka, posledično pa tudi izplen, kar je razvidno iz spodnjih tabel, kjer so prikazane frekvence za vse tri primere nastavitvev.

Preglednica 22: Frekvence trdnostnih razredov, določene na osnovi dinamičnega elastičnega modula (merjena gostota)

kombinacija	E_{mod} (merjena gostota)							
	C40	C35	C30	C27	C24	C18	C16	OST
C40-C35-C24-C18	155	0			865	0		0
C40-C35-C24-C16	155	0			865		0	0
C40-C30-C24-C18	155		422		212	231		0
C40-C30-C24-C16	155		422		212		231	0
C35-C24-C18		239			778	0		3
C35-C27-C18		239		545		236		0
C30-C24-C16			689		0		331	0
C40-C30-C18	155		422			443		0

Preglednica 23: Frekvence trdnostnih razredov, določene na osnovi dinamičnega elastičnega modula (konstantna gostota 460 kg/m³)

kombinacija	E_{mod} (konstantna gostota 460 kg/m ³)							
	C40	C35	C30	C27	C24	C18	C16	OST
C40-C35-C24-C18	90	88			842	0		0
C40-C35-C24-C16	90	88			842		0	0
C40-C30-C24-C18	90		541		175	214		0
C40-C30-C24-C16	90		541		175		214	0
C35-C24-C18		302			693	0		25
C35-C27-C18		302		507		211		0
C30-C24-C16			715		0		305	0
C40-C30-C18	90		541			389		0

Preglednica 24: Frekvence trdnostnih razredov, določene na osnovi dinamičnega elastičnega modula (konstantna gostota 440 kg/m³)

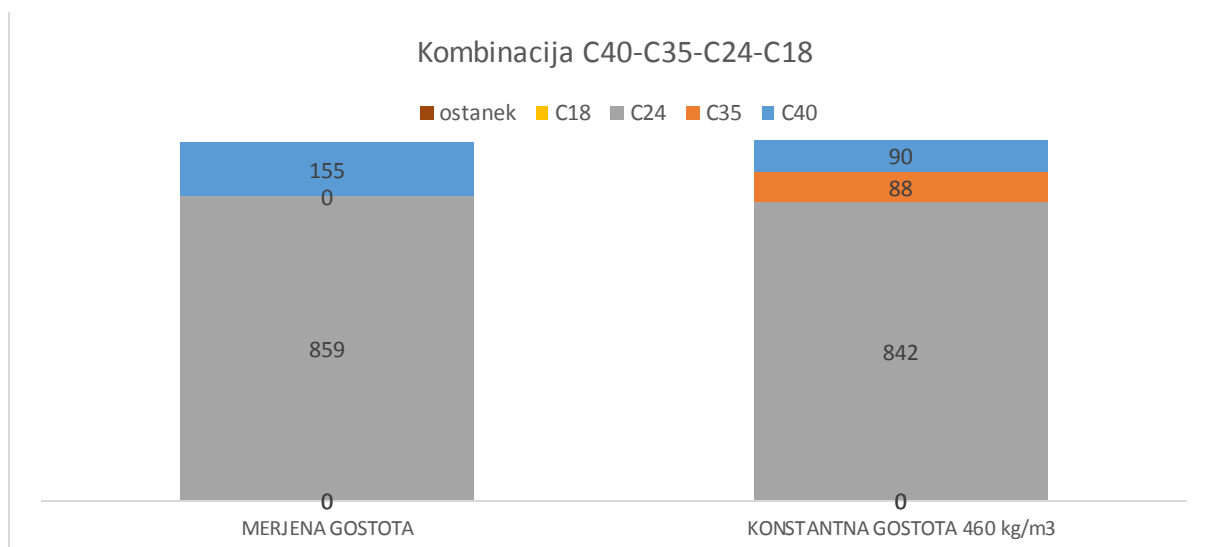
kombinacija	E_{mod} (konstantna gostota 440 kg/m ³)							
	C40	C35	C30	C27	C24	C18	C16	OST
C40-C35-C24-C18	90	88			842	0		0
C40-C35-C24-C16	90	88			842		0	0
C40-C30-C24-C18	90		541		175	214		0
C40-C30-C24-C16	90		541		175		214	0
C35-C24-C18		302			693	0		25
C35-C27-C18		302		507		211		0
C30-C24-C16			715		0		305	0
C40-C30-C18	90		541			389		0

6.2 PRIMERJAVA

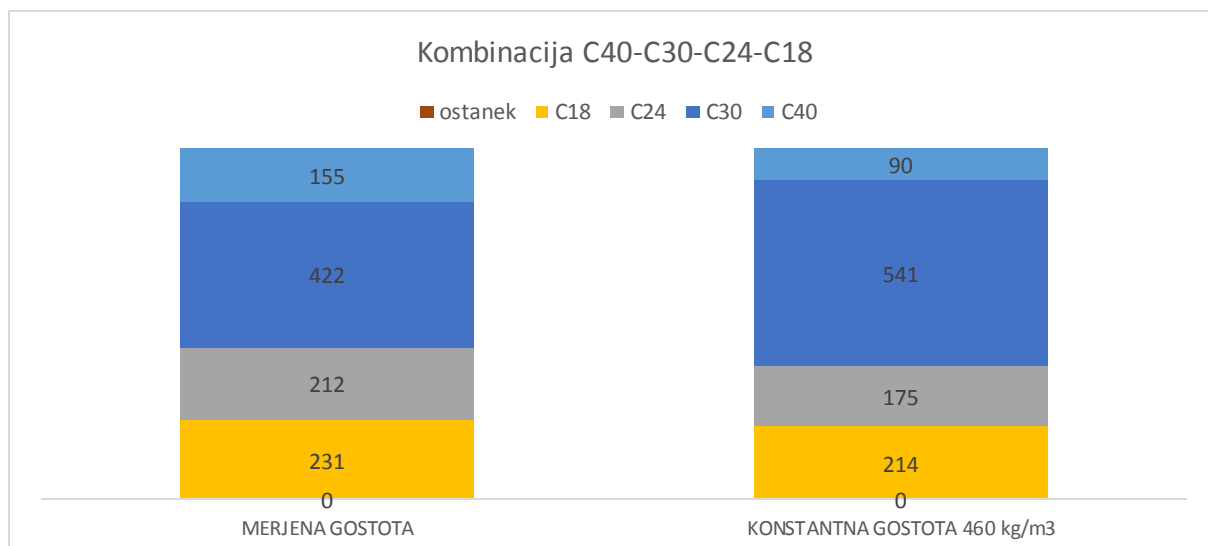
Že pri optimalnem razvrščanju smo ugotovili, da so nekatere kombinacije razredov nesmiselne, saj dobimo relativno slab izplen. To se izkaže tudi pri določanju nastavitv, kar je lepo razvidno iz tabel in spodnjih grafov, kjer vidimo, da so nekateri višji razredi prazni, na ta

račun pa je več elementov padlo v nižje razrede. Razporeditev elementov po trdnostnih razredih se razlikuje od optimalnega razvrščanja, kar smo seveda pričakovali. Kolikšne so razlike pa bomo preverili v nadaljevanju magistrske s t.i. cenovnimi matrikami.

Standard tudi pri določanju nastavitvev obravnava primer, ko se v razred uvrsti manj kot 20 elementov in dovoljuje, da se pri tem lahko zmanjša število elementov v višjem razredu (pri tem se seveda spremenijo tudi nastavitve). Na ta račun se elementi uvrstijo v nižji razred, da se zadosti pogoju, da je v posameznem razredu vsaj 20 elementov (oziroma 40 elementov, če razvrščamo v več kot dva razreda hkrati). V našem primeru tega koraka ni bilo potrebno izvesti, saj so bili razredi vedno dovolj polni oziroma že v osnovi popolnoma prazni (zaradi nesmiselnosti kombinacije trdnostnih razredov).

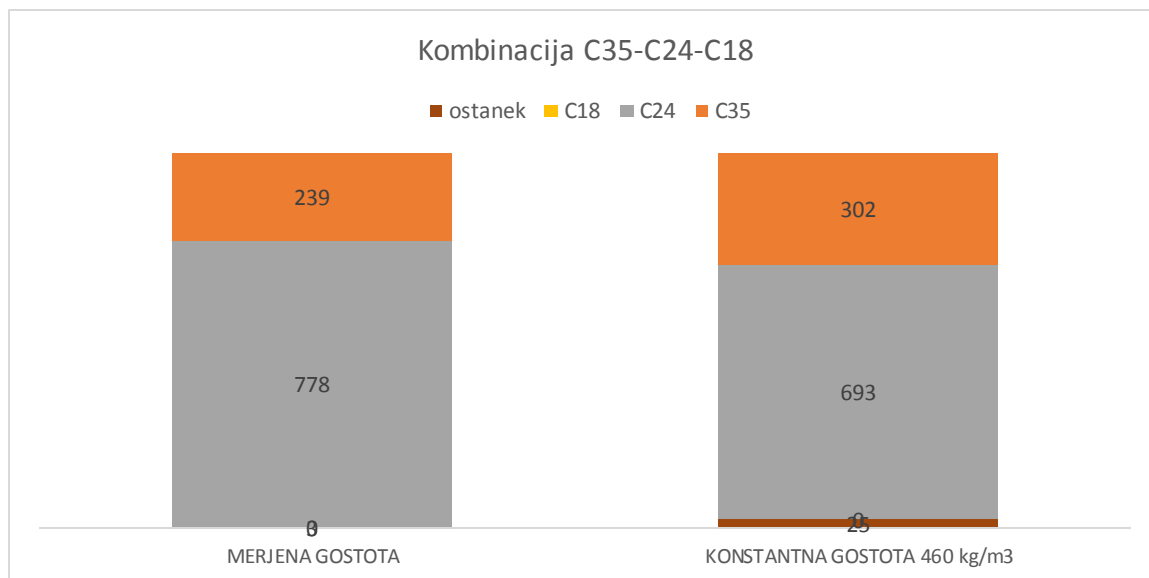


Slika 52: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C40-C35-C24-C18



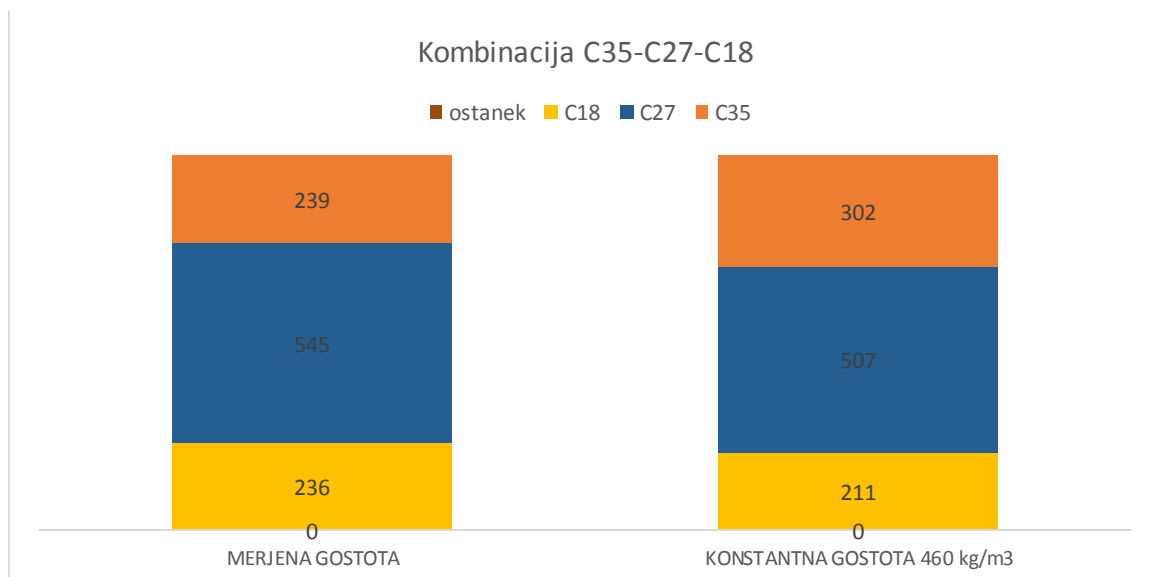
Slika 53: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C40-C30-C24-C18

Pri nastavitvah s konstantnimi gostotami dobimo v višjih razredih manj elementov. Je pa zato razred C30 toliko bolj zastopan. To pomeni, da imajo elementi, ki so se z merjeno gostoto uvrstili v razred C40, povprečno višjo gostoto. V tem primeru bi torej s predpostavljeno gostoto podcenili kakovost lesa. Pri nižjih razredih pa s konstantno gostoto dobimo več preizkušancev. Za razred C40 je postopek s konstantno gostoto bolj konservativen.



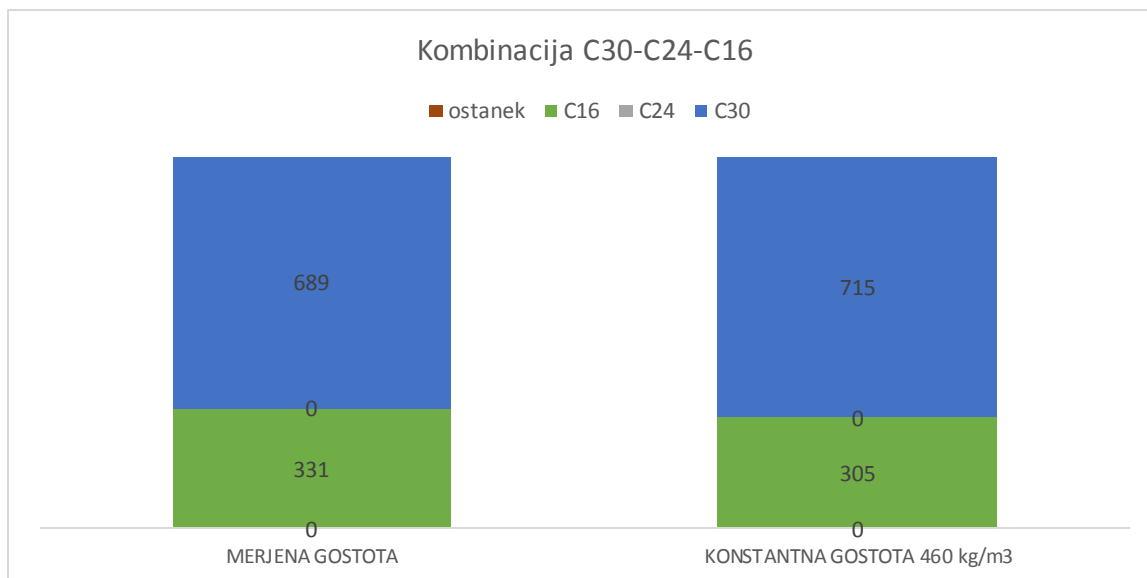
Slika 54: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C35-C24-C18

Konservativnost postopka za višje razrede pa ne velja več pri kombinaciji C35-C24-C18, saj s konstantno gostoto dobimo več elementov v razredu C35, kot bi jih sicer z merjenjem gostote. Zmanjša se frekvenca razreda C24, nekoliko večji pa je tudi ostanek.



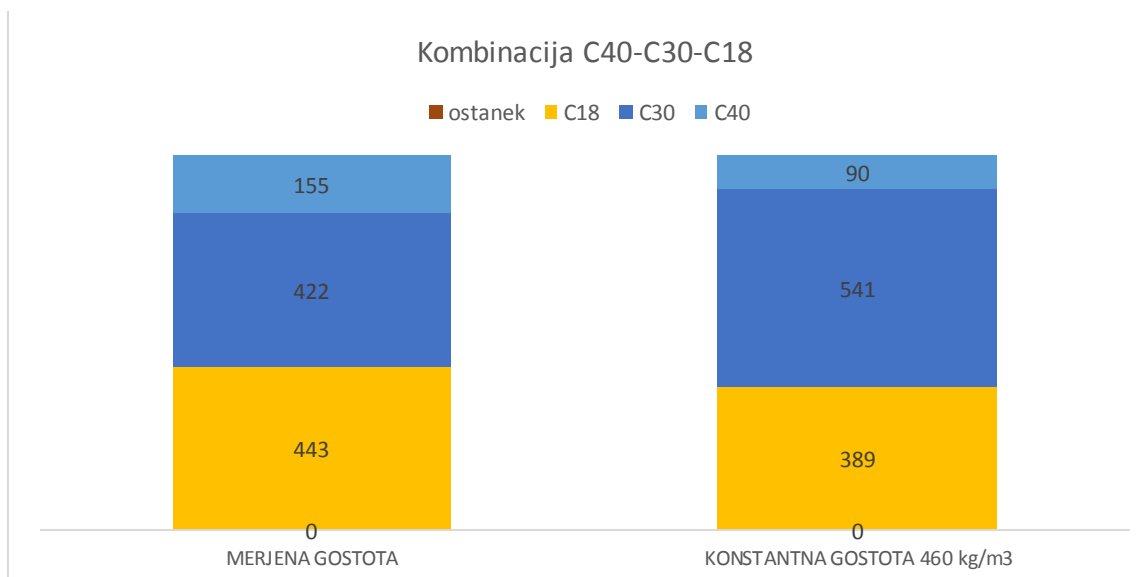
Slika 55: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C35-C27-C18

Tudi pri tej kombinaciji, kjer je C35 najvišji razred, dobimo pri konstantni gostoti več elementov. To pomeni, da je povprečna izmerjena gostota elementov, ki se uvrstijo v C35 sicer nižja od predpostavljene.



Slika 56: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C30-C24-C16

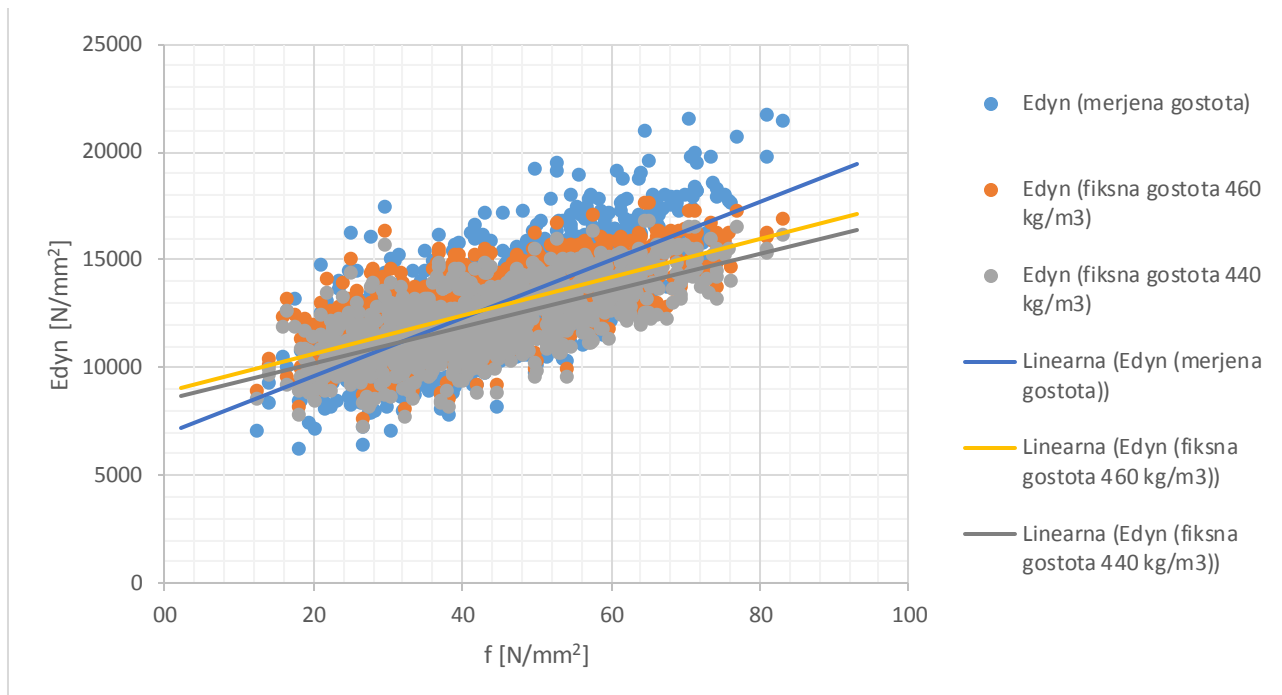
Izbrana kombinacija je nesmiselna, saj je srednji razred popolnoma prazen. To smo ugotovili tudi že pri optimalnem razvrščanju, saj se razreda C30 in C24 preveč pokrivata. Večjih razlik med nastavitvami z merjeno in predpostavljeno gostoto v tem primeru ni.



Slika 57: Diagram razvrstitve preizkušancev v dodeljene razrede za kombinacijo C40-C30-C18

Kar zadeva samo konservativnost, na teh primerih ne moremo priti do večjih zaključkov. Vse je odvisno od samega vzorca, saj se v razred C40 uvrsti manj preizkušancev, v nižjih razredih pa je frekvenca vedno višja pri konstantni gostoti. Na spodnjem diagramu smo skušali grafično predstaviti, kaj se dogaja s frekvencami dodeljenih razredov glede na različno upoštevane gostote. Trendna linija podatkov iz merjene gostote je bolj strma, kar pomeni, da imajo elementi z višjo trdnostjo, dejansko višje gostote in posledično boljše dinamične module elastičnosti, kot

to predvidimo s predpostavljeno gostoto. Pri nižjih trdnostih, pa je predpostavljena gostota precenjena glede na dejansko gostoto.



Slika 58: Grafični prikaz dinamičnega modula elastičnosti v odvisnosti od trdnosti izračunanega z merjeno oziroma predpostavljeno gostoto

V nadaljevanju bomo s cenovnimi matrikami na nivoju posameznega kosa ocenili varnost in upravičenost predpostavke o konstantni gostoti. V teh matrikah se namreč pokaže kateri kosi so narobe uvrščeni in koliko je takih, ki so narobe uvrščeni zaradi poenostavitve.

6.3 FREKVENČNE IN CENOVNE MATRIKE

Kot je že omenjeno, se ustreznost razvrstitve elementov v trdnostne razrede oceni s frekvenčnimi in cenovnimi matrikami. Določitev teh matrik je predstavljena v standardu SIST EN 14081-2.

S frekvenčnimi matrikami se dokazuje pravilnost razvrščanja v razrede. V tej matriki preverjamo razliko med optimalnimi in dodeljenimi razredi. Težimo k temu, da določen element z napravo razvrstimo v isti trdnostni razred, kot smo to storili pri optimalnem razvrščanju. Večji, kot je delež pravilno razvrščenih elementov, boljša je naprava. Po diagonali matrike so podani pravilno razvrščeni elementi. Vendar se velikokrat zgodi, da elemente dodelimo v višje (elementi pod diagonalo) oziroma nižje trdnostne razrede (elementi nad diagonalo), kot bi jih dejansko morali glede na optimalno razvrščanje.

6.3.1 MERJENA GOSTOTA

Razvrstitev v dodeljene razrede je izvedena ob upoštevanju prave, merjene gostote. Ta je bila določena tako, da je bila izmerjena masa preizkušanca in dimenzije. Pri računu gostote ni bilo

upoštevanih nobenih korekcij zaradi vsebnosti vlage preizkušanca, kot je to zahtevano po standardu za optimalno razvrščanje.

V spodnjih Preglednicah so prikazane frekvenčne matrice za kombinacije, ki smo jih obravnavali že pri optimalnem razvrščanju. Kombinacija C40-C30-C24-C16 ni prikazana, saj so rezultati praktično enaki, kot v kombinaciji, kjer namesto C16 nastopa C18.

Preglednica 25: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18

C40-C35-C24-C18		dodeljeni razredi					vsota
		C40	C35	C24	C18	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	0	366	0	0	517
	C35	0	0	0	0	0	0
	C24	4	0	402	0	0	406
	C18	0	0	0	0	0	0
	ostanek	0	0	97	0	0	97
vsota		155	0	865	0	0	1020

Preglednica 26: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16

C40-C35-C24-C16		dodeljeni razredi					vsota
		C40	C35	C24	C16	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	0	366	0	0	517
	C35	0	0	0	0	0	0
	C24	4	0	402	0	0	406
	C16	0	0	78	0	0	78
	ostanek	0	0	19	0	0	19
vsota		155	0	865	0	0	1020

Preglednica 27: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18

C40-C30-C24-C18		dodeljeni razredi					vsota
		C40	C30	C24	C18	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	297	54	15	0	517
	C30	3	109	91	23	0	226
	C24	0	0	0	0	0	0
	C18	1	16	67	193	0	277
	ostanek	0	0	0	0	0	0
vsota		155	422	212	231	0	1020

Preglednica 28: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C18

C40-C30-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C40	C30	C18	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	297	69	0	517
	C30	3	109	114	0	226
	C18	1	16	260	0	277
	ostanek	0	0	0	0	0
vsota		155	422	443	0	1020

Preglednica 29: Frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C27-C18

C35-C27-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C35	C27	C18	ostanek	
optimalni razredi	C35	232	425	69	0	726
	C27	6	74	18	0	98
	C18	1	46	118	0	165
	ostanek	0	0	31	0	31
vsota		239	545	236	0	1020

Preglednica 30: Frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C24-C18

C35-C24-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C35	C24	C18	ostanek	
optimalni razredi	C35	232	494	0	0	726
	C24	7	141	0	0	148
	C18	0	68	0	0	68
	ostanek	0	75	0	3	78
vsota		239	778	0	3	1020

Preglednica 31: Frekvenčna matrika za kombinacijo C30-C24-C16

C30-C24-C16		dodeljeni razredi				vsota
		C30	C24	C16	ostanek	
optimalni razredi	C30	677	0	279	0	956
	C24	0	0	0	0	0
	C16	12	0	52	0	64
	ostanek	0	0	0	0	0
vsota		689	0	331	0	1020

Opazimo, da je veliko število elementov precenjenih, število podcenjenih pa tudi ni zanemarljivo. Točneje bomo napravo lahko ovrednotili s cenovnimi matrikami, ki jih tvorimo na osnovi frekvenčnih matrik. Vrednosti v frekvenčnih matrikah delimo s skupnim številom elementov v dotičnem dodeljenem razredu in pomnožimo z ustrezno utežjo, ki je predstavljena v osnovni cenovni matriki glede na dodeljen razred in optimalni razred. Osnovna cenovna

matrika je prikazana v spodnji tabeli in je povzeta iz standarda SIST EN 14081-2:2010. Predstavlja utežne faktorje za kose, ki so bili napačno razvrščeni (precenjeni ali podcenjeni), kar nam pomaga pri določitvi sprejemljivosti naprave za razvrščanje lesa. Vidimo, da so utežni faktorji za kose s precenjenim dodeljenim razredom višji, kot za podcenenje razrede.

Preglednica 32: Osnovna cenovna matrika iz standarda SIST EN 14081-2:2010

optimalni razredi	dodeljeni razredi											
	C50	C45	C40	C35	C30	C27	C24	C22	C20	C18	C16	C14
C50	0	0.22	0.45	0.72	1.01	1.16	1.33	1.69	1.9	2.11	2.6	3.17
C45	0.37	0	0.23	0.49	0.77	0.92	1.09	1.45	1.64	1.85	2.33	2.89
C40	0.83	0.42	0	0.25	0.53	0.68	0.84	1.19	1.38	1.59	2.05	2.6
C35	1.43	0.95	0.48	0	0.27	0.42	0.57	0.91	1.1	1.3	1.76	2.29
C30	2.22	1.67	1.11	0.56	0	0.14	0.29	0.63	0.81	1.01	1.45	1.97
C27	2.84	2.22	1.6	0.99	0.37	0	0.15	0.48	0.66	0.85	1.29	1.8
C24	3.61	2.92	2.22	1.53	0.83	0.42	0	0.32	0.5	0.69	1.12	1.63
C22	4.24	3.48	2.73	1.97	1.21	0.76	0.3	0	0.17	0.36	0.77	1.26
C20	5	4.17	3.33	2.5	1.67	1.17	0.67	0.33	0	0.18	0.59	1.07
C18	5.93	5	4.07	3.15	2.22	1.67	1.11	0.74	0.37	0	0.4	0.87
C16	7.08	6.04	5	3.96	2.92	2.29	1.67	1.25	0.83	0.42	0	0.46
C14	8.57	7.38	6.19	5	3.81	3.1	2.38	1.9	1.43	0.95	0.48	0

V spodnjih preglednicah so prikazane dobljene cenovne matrike za izbrane kombinacije trdnostnih razredov. Vrednosti pod diagonalo so posledica precenjenih kosov, na katere moramo biti zaradi varnosti še posebej pozorni.

Preglednica 33: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18

C40-C35-C24-C18		dodeljeni razredi				
		C40	C35	C24	C18	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0	0.355422	0	0
	C35	0	0	0	0	0
	C24	0.057	0	0	0	0
	C18	0	0	0	0	0
	ostanek	0	0	0.291	0	0

Preglednica 34: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16

C40-C35-C24-C16		dodeljeni razredi				
		C40	C35	C24	C16	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0	0.355422	0	0
	C35	0	0	0	0	0
	C24	0.057	0	0	0	0
	C16	0	0	0.151	0	0
	ostanek	0	0	0.073	0	0

Preglednica 35: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18

C40-C30-C24-C18		dodeljeni razredi				
		C40	C30	C24	C18	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0.373	0.214	0.103	0
	C30	0.021	0	0.124	0.101	0
	C24	0	0	0	0	0
	C18	0.026	0.084	0.351	0	0
	ostanek	0	0	0	0	0

Preglednica 36: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C16

C40-C30-C24-C16		dodeljeni razredi				
		C40	C30	C24	C16	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0.373	0.214	0.133	0
	C30	0.022	0	0.124	0.144	0
	C24	0	0	0	0	0
	C16	0.032	0.111	0.528	0	0
	ostanek	0	0	0	0	0

Preglednica 37: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C18

C40-C30-C18		dodeljeni razredi			
		C40	C30	C18	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0.373	0.248	0
	C30	0.022	0	0.260	0
	C18	0.026	0.084	0	0
	ostanek	0	0	0	0

Preglednica 38: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C27-C18

C35-C27-C18		dodeljeni razredi			
		C35	C27	C18	ostanek
optimalni razredi	C35	0	0.328	0.380	0
	C27	0.025	0	0.065	0
	C18	0.013	0.141	0	0
	ostanek	0	0	0.146	0

Preglednica 39: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C24-C18

C35-C24-C18		dodeljeni razredi			
		C35	C24	C18	ostanek
optimalni razredi	C35	0	0.361928	0	0
	C24	0.045	0	0	0
	C18	0	0.097	0	0
	ostanek	0	0.245	0	0

Preglednica 40: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C30-C24-C16

C30-C24-C16		dodeljeni razredi			
		C30	C24	C16	ostanek
optimalni razredi	C30	0	0	1.222	0
	C24	0	0	0	0
	C16	0.050	0	0	0
	ostanek	0	0	0	0

Standard podaja zahteve, ki jih morajo izpolnjevati cenovne matrike:

1. Vrednosti v globalni cenovni matriki, ki predstavljajo previsoko razvrščene elemente (vrednosti pod diagonalo), ne smejo biti višje od 0.2
2. Karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti za dodeljene razrede, izračunane v skladu z veljavnim standardom SIST EN 384, morajo biti enake ali večje od zahtevanih za posamezni razred (po standardu SIST EN 338). Pri računu karakterističnih vrednosti je potrebno upoštevati faktor k_v , faktorja k_s pa pri tem ne upoštevamo.
3. Če so izpolnjene zgornje zahteve je potrebno preveriti še nastavitve za najnižji razred v kombinaciji. Te morajo zagotavljati, da je v dodeljenem ostanku najmanj pet preizkušancev ali najmanj 0.5 % celotnega vzorca.

Samo kombinacije C40-C35-C24-C16, C40-C30-C18, C35-C27-C18 in C30-C24-C16 izpolnjujejo prvo zahtevo standarda, pri ostalih kombinacijah pa so potrebni popravki nastavitv naprav, da tej zahtevi zadostimo. To smo naredili po iterativnem postopku tako, da smo višali nastavitve in s tem prestavljali elemente iz dodeljenega razreda, kjer je presežena vrednost v cenovni matriki, v nižji trdnostni razred toliko časa, da smo prišli pod mejo 0.2. S spremembo nastavitv dosežemo zmanjšanje seštevka (po optimalnih razredih) elementov v dodeljenem razredu, vendar to zmanjšanje ne gre samo na račun zelene celice v matriki, ampak se spremeni razporeditev elementov po optimalnih razredih. Zato je potreben iterativen postopek.

Drugo zahtevo izpolnjujejo vse kombinacije, kot bomo videli v nadaljevanju. Korekcije matrik pa so bile potrebne tudi zaradi tretje zahteve, ki v večjem delu kombinacij ni izpolnjena.

Na naslednjih Preglednicah so prikazane popravljene frekvenčne in cenovne matrike. Tukaj bomo prikazali popravljene frekvenčne in cenovne matrike za vse kombinacije.

Preglednica 41: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18

C40-C35-C24-C18		dodeljeni razredi					vsota
		C40	C35	C24	C18	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	0	365	0	1	517
	C35	0	0	0	0	0	0
	C24	4	0	401	0	1	406
	C18	0	0	0	0	0	0
	ostanek	0	0	64	0	33	97
vsota		155	0	830	0	35	1020

Preglednica 42: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16

C40-C35-C24-C16		dodeljeni razredi					vsota
		C40	C35	C24	C16	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	0	366	0	0	517
	C35	0	0	0	0	0	0
	C24	4	0	402	0	0	406
	C16	0	0	77	0	1	78
	ostanek	0	0	14	0	5	19
vsota		155	0	859	0	6	1020

Preglednica 43: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18

C40-C30-C24-C18		dodeljeni razredi					vsota
		C40	C30	C24	C18	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	297	29	40	0	517
	C30	3	109	53	61	0	226
	C24	0	0	0	0	0	0
	C18	1	16	18	236	6	277
	ostanek	0	0	0	0	0	0
vsota		155	422	100	337	6	1020

Preglednica 44: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C16

C40-C30-C24-C16		dodeljeni razredi					vsota
		C40	C30	C24	C16	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	297	0	69	0	517
	C30	3	109	0	114	0	226
	C24	0	0	0	0	0	0
	C16	1	16	0	254	6	277
	ostanek	0	0	0	0	0	0
vsota		155	422	0	437	6	1020

Pri prvotnih frekvenčnih matrikah smo zapisali, da so te za kombinaciji C40-C30-C24-C18 in C40-C30-C24-C16 enake. Popravljenе frekvenčne matrike pa se med omenjenima kombinacijama razlikujeta, saj smo morali za zadostitev prve zahteve predstandarda v kombinaciji C40-C30-C24-C16 razred C24 popolnoma izprazniti. Torej smo morali vseh 212 elementov, ki so dejansko dovolj kakovostni za razred C24, prestaviti v nižji razred C16.

Delno je za to kriva slaba korelacija med indikativno količino in mehanskimi lastnostmi preizkušancev, velik vpliv pa ima tudi osnovna cenovna matrika, ki za preценjene preizkušance v razredu C24 namesto v razredu C16 podaja večji utežni faktor, kot če element preценimo v razred C24 namesto v C18. Končne globalne cenovne matrike so prikazane v nadaljevanju.

Preglednica 45: Popravljenа frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C18

C40-C30-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C40	C30	C18	ostanek	
optimalni razredi	C40	151	297	69	0	517
	C30	3	109	114	0	226
	C18	1	16	254	6	277
	ostanek	0	0	0	0	0
vsota		155	422	437	6	1020

Preglednica 46: Popravljenа frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C27-C18

C35-C27-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C35	C27	C18	ostanek	
optimalni razredi	C35	232	425	69	0	726
	C27	6	74	18	0	98
	C18	1	46	118	0	165
	ostanek	0	0	25	6	31
vsota		239	545	230	6	1020

Praviloma se je delež narobe preценjenih elementov v vseh popravljenih matrikah zmanjšalo, le pri kombinacijah C40-C30-C18 in C35-C27-C18 je ta delež ostal enak, saj smo te kombinacije popravljali samo zaradi ostanka. Umetno pridobljen ostanek v kombinaciji C40-C30-C18 je očitno podcenjen, saj se nahaja nad diagonalo matrike. Sicer pa je z napravo pravilno razvrščenih skoraj 51 % preizkušancev, podcenjenih 47.6 %, preценjenih pa slaba 2 %.

Pri kombinaciji C35-C27-C18 je vseh 6 elementov v ostanku, ki smo jih premestili iz dodeljenega razreda C18, sedaj pravilno razvrščenih. Prej je bilo namreč 31 preizkušancev nepravilno uvrščenih v razred C18, število pa se je sedaj zmanjšalo na 25. Prestavitev teh elementov je ugodno vplivala tudi na vrednosti v cenovni matriki, saj smo se nekoliko oddaljili od zgornje meje 0.2, ki jo postavlja standard.

Preglednica 47: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C35-C24-C18

C35-C24-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C35	C24	C18	ostanek	
optimalni razredi	C35	232	493	0	1	726
	C24	7	141	0	0	148
	C18	0	67	0	1	68
	ostanek	0	58	0	20	78
vsota		239	759	0	22	1020

Preglednica 48: Popravljen frekvenčna matrika za kombinacijo C30-C24-C16

C30-C24-C16		dodeljeni razredi				vsota
		C30	C24	C16	ostanek	
optimalni razredi	C30	677	0	277	2	956
	C24	0	0	0	0	0
	C16	12	0	48	4	64
	ostanek	0	0	0	0	0
vsota		689	0	325	6	1020

Preglednica 49: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C18

C40-C35-C24-C18		dodeljeni razredi				
		C40	C35	C24	C18	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0	0.369	0	0.003
	C35	0	0	0	0	0
	C24	0.057	0	0	0	0.002
	C18	0	0	0	0	0
	ostanek	0	0	0.200	0	0

Preglednica 50: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C35-C24-C16

C40-C35-C24-C16		dodeljeni razredi				
		C40	C35	C24	C16	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0	0.358	0	0
	C35	0	0	0	0	0
	C24	0.057	0	0	0	0
	C16	0	0	0.150	0	0
	ostanek	0	0	0.054	0	0

Preglednica 51: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C18

C40-C30-C24-C18		dodeljeni razredi				
		C40	C30	C24	C18	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0.373	0.244	0.189	0
	C30	0.025	0	0.154	0.183	0
	C24	0	0	0	0	0
	C18	0.026	0.084	0.200	0	0.005
	ostanek	0	0	0	0	0

Preglednica 52: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C24-C16

C40-C30-C24-C16		dodeljeni razredi				
		C40	C30	C24	C16	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0.373	0	0.324	0
	C30	0.022	0	0	0.378	0
	C24	0	0	0	0	0
	C16	0.032	0.111	0	0	0.006
	ostanek	0	0	0	0	0

Preglednica 53: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C18

C40-C30-C18		dodeljeni razredi			
		C40	C30	C18	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0.373	0.251	0
	C30	0.022	0	0.263	0
	C18	0.026	0.084	0	0.006
	ostanek	0	0	0	0

Preglednica 54: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C27-C18

C35-C27-C18		dodeljeni razredi			
		C35	C27	C18	ostanek
optimalni razredi	C35	0	0.328	0.390	0
	C27	0.025	0	0.067	0
	C18	0.013	0.141	0	0
	ostanek	0	0	0.121	0

Preglednica 55: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C35-C24-C18

C35-C24-C18		dodeljeni razredi			
		C35	C24	C18	ostanek
optimalni razredi	C35	0	0.370	0	0.002
	C24	0.045	0	0	0
	C18	0	0.098	0	0.001
	ostanek	0	0.198	0	0

Preglednica 56: Popravljen globalna cenovna matrika za kombinacijo C30-C24-C16

C30-C24-C16		dodeljeni razredi			
		C30	C24	C16	ostanek
optimalni razredi	C30	0	0	1.235	0.005
	C24	0	0	0	0
	C16	0.051	0	0	0.004
	ostanek	0	0	0	0

Tretja zahteva standarda pravi, da morajo biti karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti višje od zahtevanih. V spodnjih Preglednicah so zbrane karakteristične vrednosti mehanskih lastnosti po trdnostnih razredih za vse kombinacije in sicer za prvotne in popravljene matrike ter zahtevane vrednosti.

Preglednica 57: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C35-C24-C18

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C40			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Zahteva EN 338:2010	40	13300	420
C35			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	/	/	/
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	/	/	/
Zahteva EN 338:2010	35	12350	400
C24			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	21.5	11073.8	374
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	22.55	11262.2	381
Zahteva EN 338:2010	21.43	10450	350
C18			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	/	/	/
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	/	/	/
Zahteva EN 338:2010	16.07	8550	320

Preglednica 58: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C35-C24-C16

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C40			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Zahteva EN 338:2010	40	13300	420
C35			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	/	/	/
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	/	/	/
Zahteva EN 338:2010	35	12350	400
C24			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	21.5	11073.8	374
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	21.69	11114.8	376
Zahteva EN 338:2010	21.43	10450	350
C16			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	/	/	/
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	/	/	/
Zahteva EN 338:2010	14.29	7600	310

Preglednica 59: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C30-C24-C18

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C40			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Zahteva EN 338:20010	40	13300	420
C30			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	27.5	12759.4	409
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	27.5	12759.4	409
Zahteva EN 338:2010	26.79	11400	380
C24			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	22.56	10451.3	385.8
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	24.6	10918.5	384
Zahteva EN 338:2010	21.43	10450	350
C18			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	18.76	8565.9	352.55
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	19.185	9113.5	363.9
Zahteva EN 338:2010	16.07	8550	320

Preglednica 60: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C30-C24-C16

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C40			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Zahteva EN 338:2010	40	13300	420
C30			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	27.5	12759.4	409
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	27.5	12759.4	409
Zahteva EN 338:2010	26.79	11400	380
C24			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	22.56	10451.3	385.8
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	/	/	/
Zahteva EN 338:2010	21.43	10450	350
C16			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	18.76	8565.9	352.55
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	19.8	9526.6	366.9
Zahteva EN 338:2010	14.29	7600	310

Preglednica 61: : Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C40-C30-C18

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C40			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	40.58	16302.8	459
Zahteva EN 338:2010	40	13300	420
C30			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	27.5	12759.4	409
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	27.5	12759.4	409
Zahteva EN 338:2010	26.79	11400	380
C18			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	19.6	9468.2	363.2
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	19.8	9526.6	366.9
Zahteva EN 338:2010	16.07	8550	320

Preglednica 62: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C35-C27-C18

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C35			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	35.94	15553.2	445
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	35.94	15553.2	445
Zahteva EN 338:2010	35	12350	400
C27			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	24.425	11682.1	397
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	24.425	11682.1	397
Zahteva EN 338:2010	24.11	10925	370
C18			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	18.7	8567.1	352.8
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	18.8	8654.5	360
Zahteva EN 338:2010	16.07	8550	320

Preglednica 63: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C35-C24-C18

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C35			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	35.94	15553.2	445
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	35.94	15553.2	445
Zahteva EN 338:2010	35	12350	400
C24			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	21.49	10765.9	374
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	21.69	10865.3	378
Zahteva EN 338:2010	21.43	10450	350
C18			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	/	/	/
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	/	/	/
Zahteva EN 338:2010	16.07	8550	320

Preglednica 64: Preglednica karakterističnih in zahtevanih vrednosti odločilnih lastnosti, kombinacija C30-C24-C16

	f [N/mm ²]	E _{mod} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
C30			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	22.55	12117.7	378
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	22.55	12117.1	378
Zahteva EN 338:2010	26.79	11400	380
C24			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	/	/	/
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	/	/	/
Zahteva EN 338:2010	21.43	10450	350
C16			
Karakteristična vrednost dodeljenih razredov	21.5	11349.6	374.6
Karakteristična vrednost popravljenih dodeljenih razredov	21.5	11327.1	374.3
Zahteva EN 338:2010	14.29	7600	310

Pri vseh kombinacijah so karakteristične vrednosti za popravljene trdnostne razrede višje. To je logična posledica tega, da smo morali nekaj elementov prestaviti v nižji razred. Tako smo pri ocenjevanju nekoliko bolj konservativni, kot bi bili sicer.

Na osnovi novih razporeditev preizkušancev v dodeljene razrede smo odčitali ustrezne mejne vrednosti (nastavitve) indikativne količine, ki določa posamezni razred.

Preglednica 65: Popravljene nastavitve za obravnavane kombinacije

nastavitve (merjena gostota)	C40	C35	C30	C27	C24	C18	C16	OST
C40-C35-C24-C18	15451	-			8804	-		0
C40-C35-C24-C16	15451	-			7441		-	0
C40-C30-C24-C18	15451		12099		11507	7441		0
C40-C30-C24-C16	15451		12099		-		7441	0
C35-C24-C18		14444			8493	-		0
C35-C27-C18		14444		10770		7441		0
C30-C24-C16			11457		-		7441	0
C40-C30-C18	15451		12099			7441		0

Vrednosti nastavitv se za višje razrede, kjer popravki niso bili potrebni, niso spremenile. Do razlik pride v nastavitvah za razrede C24, C18 in C16, kjer so se vrednosti nekoliko povišale, saj smo morali prestaviti elemente iz višjega v nižji trdnostni razred oziroma v ostanek.

Kar nekaj kombinacij je nesmiselnih, kot smo ugotovili že pri optimalnem razvrščanju, saj so nekateri razredi popolnoma prazni. Če bi bila potreba po točno določeni kombinaciji, bi lahko prilagodili nastavitve tako, da bi nekaj boljših elementov premaknili v nižje trdnostne razrede s tem pa bi lahko tudi kakšen slabši element prestavili v višji trdnostni razred tako, da bi bilo še zadoščeno minimalnim zahtevam karakterističnim vrednosti.

6.3.2 KONSTANTNA GOSTOTA

S konstantno gostoto smo preverili samo dve kombinaciji, ki sta se nam zdeli najbolj smiselni, in nimata praznih razredov. Nastavitve smo izpeljali predvsem zaradi primerjave rezultatov in smiselnosti predpostavljjanja konstantne gostote. Upoštevali smo gostoto $\rho = 460 \text{ kg/m}^3$.

Elemente smo razvrstili v optimalne razrede tudi z nastavitvami, ki smo jih dobili z upoštevanjem konstantne gostote (460 kg/m^3). V nadaljevanju so prikazani rezultati samo za kombinaciji C40-C30-C18 in C35-C27-C18.

Preglednica 66: Frekvenčna matrika za kombinacijo C40-C30-C18 (na osnovi rezultatov nastavitv s konstantno gostoto)

C40-C30-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C40	C30	C18	ostanek	
optimalni razredi	C40	86	352	79	0	517
	C30	4	144	78	0	226
	C18	0	45	232	0	277
	ostanek	0	0	0	0	0
vsota		90	541	389	0	1020

Preglednica 67: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C40-C30-C18 (na osnovi rezultatov nastavitv s konstantno gostoto)

C40-C30-C18		dodeljeni razredi			
		C40	C30	C18	ostanek
optimalni razredi	C40	0	0.345	0.323	0
	C30	0.049	0	0.203	0
	C18	0	0.185	0	0
	ostanek	0	0	0	0

V primerjavi s prejšnjimi frekvenčnimi in cenovnimi matrikami za te kombinacije vidimo, da je izplen nekaj slabši. Pravilno je razvrščenih 45.3 % elementov, skoraj 50 % je podcenjenih, slabih 5% pa precenjenih, kar je dvakrat toliko kot pri nastavitvah z merjeno gostoto. Prvi dve zahtevi standarda sta izpolnjeni, potrebno pa bi bilo prilagoditi nastavitve in prestaviti vsaj 6 elementov iz razreda C18 v ostanek, da bi zadostili še tretji zahtevi.

Preglednica 68: Frekvenčna matrika za kombinacijo C30-C27-C18 (na osnovi rezultatov nastavitv s konstantno gostoto)

C35-C27-C18		dodeljeni razredi				vsota
		C35	C27	C18	ostanek	
optimalni razredi	C35	289	366	71	0	726
	C27	11	70	17	0	98
	C18	2	69	94	0	165
	ostanek	0	2	29	0	31
vsota		302	507	211	0	1020

Preglednica 69: Globalna cenovna matrika za kombinacijo C30-C27-C18 (na osnovi rezultatov nastavitv s konstantno gostoto)

C35-C27-C18		dodeljeni razredi			
		C35	C27	C18	ostanek
optimalni razredi	C35	0	0.303	0.437	0
	C27	0.036	0	0.068	0
	C18	0.021	0.227	0	0
	ostanek	0	0.013	0.153	0

Za kombinacijo C35-C27-C18 je naprava (brez merjenja gostote) pravilno razvrstila 44.5 %. Nevarno razvrščenih pa je kar 11 % preizkušancev, vendar nas na to že opozori vrednost v globalni cenovni matriki, ki je višja od 0.2. Vendar je precenjenih bistveno več elementov kot v primeru z merjeno gostoto.

Matrike bi morale popraviti tako, da bi bile vse vrednosti pod diagonalo manjše od 0.2 in vsaj 6 elementov prestaviti v ostanek. Glede na to, da smo s predpostavljeno gostoto v primerjavi z merjeno dobili precej slabše rezultate, se za ta korak nismo odločili.

7 MERITVE HOJA

Med nedestruktivnimi metodami je v Sloveniji najbolj razširjeno vizualno razvrščanje. To je izrazito subjektivna ocena lesa na podlagi vizualnega opisa preizkušanca. Upoštevajo se značilnosti lesa, ki zmanjšujejo njegovo nosilnost in tiste značilnosti, ki so povezane z geometrijsko obstojnostjo lesa. Izkazalo se je, da je takšen način razvrščanja izrazito konservativen (Plos, 2012). Takšen način razvrščanja lesa uporabljajo tudi v podjetju Hoja.

Podjetje Hoja d.d. je že dalj časa uveljavljeno podjetje na področju lesenih konstrukcij. Z uvedbo strojnega razvrščanja bi se konkurenčnost podjetja izboljšala, saj je bi lahko isti les razvrstili v bolj kakovostne trdnostne razrede. Vendar naprave, ki so v Evropi uveljavljene za strojno razvrščanje lesa, predstavljajo velik strošek za relativno majhne žagarske obrate.

Lepljen lameliran les obravnava standard SIST EN 14080:2013. Ta se uporablja za lepjen lameliran les, sestavljen iz lesa iglavcev, ki je natančneje določen tudi znotraj omenjenega standarda ali iz lesa topola. Pod posebnimi določili, se lahko za lepjen lameliran les uporabijo tudi trše sorte lesa listavcev.

Lepljen lameliran les je lahko homogen ali kombiniran. Homogen prečni prerez je sestavljen iz lamel enake kakovosti in z enakimi mehanskimi lastnostmi. Kombiniran prečni prerez pa ima na spodnjem in zgornjem robu, kjer se pojavijo največje natezne oziroma tlačne napetosti, lamele bolj kakovostnega lesa, v sredini pa manj kakovostne lamele iz iste vrste lesa.

Standard SIST EN 14080:2013 je nadomestil prej veljavni standard SIST EN 14080:2005 in SIST EN 1194, pri tem pa so bile vpeljane tudi nove oznake za trdnostne razrede lamel, ki se uporabljajo za lepljene lamelirane lesene elemente. V spodnji tabeli so povzete zahtevane karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti za lamele lepljenega lameliranega lesa. Pomembna novost, ki jo prinaša novi standard je tudi to, da se za odločilno lastnost trdnosti ne uporablja več upogibna trdnost $f_{m,k}$, ampak natezna trdnost v vzdolžni smeri vlaken $f_{t,0,k}$.

Preglednica 70: Karakteristične trdnostne in togostne lastnosti za T-trdnostne razrede v N/mm² in kg/m³ za lamele lepljenega lameliranega lesa (povzeto po EN 14080:2013)

T – trdnostni razred lamel	$f_{t,0,i,k}$	$E_{t,0,i,mean}$	$\rho_{i,k}$
T8 (C14)	8	7000	290
T9	9	7500	300
T10 (C16)	10	8000	310
T11 (C18)	11	9000	320
T12 (C20)	12	9500	330
T13 (C22)	13	10000	340
T14 (C24)	14	11000	350
T14.5	14.5	11000	350
T15	15	11500	360
T16 (C27)	16	11500	370
T18 (C30)	18	12000	380
T21 (C35)	21	13000	390
T22	22	13000	390
T24 (C40)	24	13500	400
T26	26	14000	410
T27 (C45)	27	15000	410
T28	28	15000	420
T30 (C50)	30	15500	430

Lameliran lepljen les se razvršča v 7 trdnostnih razredov. Ti so v naslednjih Preglednicah predstavljeni tako za homogene prečne prereze, kot tudi za kombinirane prereze (oznaka »c«).

Preglednica 71: Sestava kombiniranega prečnega prereza lepljenega lameliranega lesa in minimalne upogibne trdnosti za stike med lamelami v N/mm² (povzeto po EN 14080:2013)

Lepljen lameliran les – trdnostni razred	Zunanje lamele			Lamele v sredini			Notranje lamele		
	Trdnostni razred	Razmerje [%]	$f_{m,j,k}$ [N/mm ²]	Trdnostni razred	Razmerje [%]	$f_{m,j,k}$ [N/mm ²]	Trdnostni razred	Razmerje [%]	$f_{m,j,k}$ [N/mm ²]
GL 20c	T13	2 x 33	21	-	-	-	T8	34	18
GL 22c	T13	2 x 33	26	-	-	-	T8	34	18
GL 24c	T14	2 x 33	31	-	-	-	T9	34	19
GL 26c	T16	2 x 33	34	-	-	-	T11	34	22
GL 28c	T18	2 x 25	37	-	-	-	T14	50	28
GL 28c	T21	2 x 17	36	-	-	-	T14	66	26
GL 28c	T21	2 x 17	38	-	-	-	T13	66	25
GL 28c	T21	2 x 25	35	-	-	-	T11	50	22
GL 28c	T21	2 x 20	35	T14	2 x 20	28	T11	20	22
GL 28c	T22	2 x 20	35	-	-	-	T13	60	25
GL 30c	T22	2 x 17	40	-	-	-	T15	66	27
GL 30c	T22	2 x 17	41	-	-	-	T14	66	28
GL 30c	T22	2 x 20	40	T14	2 x 20	30	T11	20	22
GL 30c	T22	2 x 17	42	T14	2 x 23	31	T11	20	22
GL 32c	T24	2 x 17	44	-	-	-	T18	66	31
GL 32c	T26	2 x 17	45	-	-	-	T14	66	26
GL 32c	T26	2 x 10	48	T18	2 x 20	32	T11	40	22

Preglednica 72: Sestava homogenega prečnega prereza lepljenega lameliranega lesa in minimalne upogibne trdnosti za stike med lamelami v N/mm² (povzeto po EN 14080:2013)

Lepljen lameliran les – trdnostni razred	Trdnostni razred lamel	$f_{m,j,k}$
GL 20h	T10	25
GL 20h	T11	22
GL 22h	T13	25
GL 24h	T14	30
GL 26h	T16	33
GL 28h	T18	36
GL 30h	T21	38
GL 30h	T22	37
GL 32h	T24	41
GL 32h	T26	38

V uporabi je predvsem vizualno razvrščanje, zato se pojavi težava, da je C30 najvišji dovoljeni trdnostni razred, v katerega lahko vizualno razvrščamo, kar po novem standardu ustreza trdnostnemu razredu T18. V podjetju Hoja torej lahko izdelujejo le lepljene lamelirane nosilce do trdnostnega razreda GL 28 (za homogene in kombinirane prečne prereze). S takim problemom se ne srečujejo samo v podjetju Hoja d.d. ampak tudi v ostalih slovenskih žagarskih obratih (če les sploh razvrščajo). V želji, da bi povečali svojo konkurenčnost tudi na širšem

evropskem in mednarodnem trgu, je torej nujno potrebno, da se uvede strojno razvrščanje lesa in se tako posledično omogoči proizvodnja lepljenega lameliranega lesa višjih trdnostnih razredov.

Znotraj operacije »Po kreativni poti do praktičnega znanja« je podjetje ILKON d.o.o. v sodelovanju z Ekonomsko fakulteto Univerze v Ljubljani v letu 2014 izvedlo projektno nalogo z naslovom *Tehnologija razvrščanja konstrukcijskega lesa in vpliv razvrščanja na učinkovitost proizvodnje lesenih konstrukcijskih elementov*, kjer so opravili analizo vpliva strojnega razvrščanja na proizvodni proces. Za primer so vzeli proizvodno podjetje Hoja d.d. Z napravo GT-PRO so opravili tudi meritve na 362 elementih z namenom strojne razvrstitve le teh v trdnostne razrede. Naprava ni certificirana, zato s takšno razvrstitvijo lesa seveda ne morejo dati na trg, saj nima ustrezne oznake CE.

Kot smo že omenili, standard SIST EN 14081-2:2011 podaja zahteve in postopke za certificiranje naprave za razvrščanje lesa. Ena izmed zahtev je tudi, da se preveri t.i. ponovljivost rezultatov. Ta pravi, da se nastavitve naprave preveri na najmanj 100 naključno izbranih kosih lesa. Na teh kosih se mora izvesti pet ponovitev meritev indikativnih lastnosti. Razpon vrednosti izmerjenih odločilnih lastnosti se nato razdeli v t.i. fiktivne razrede. Število teh razredov mora biti enako številu trdnostnih razredov v kombinaciji v katero želimo razvrstiti les. Na primer, če razvrščamo v kombinacijo C40-C30-C18 moramo narediti tri fiktivne razrede (za ponovljene meritve) in še en dodatni razred, ki je namenjen neuvrščeni elementom. Delitev naredimo tako, da je število elementov v posameznem razredu približno enako. Ti razredi so dodeljeni razredi. Razred, v katerega je določen preizkušane največkrat dodeljen, je njegov optimalni razred. Glede na takšno razvrstitev se nato tvori cenovne matrike za vsako meritev posebej. Vrednosti v teh matrikah ne smejo presežati vrednosti 0.1.

Znotraj omenjene projektne naloge so ravno zaradi potencialnega certificiranja naprave, na teh preizkušancih petkrat ponovili meritve, ki bi služile tudi za pripravo poročila, ki je potrebno za standardizacijo naprave za strojno razvrščanje.

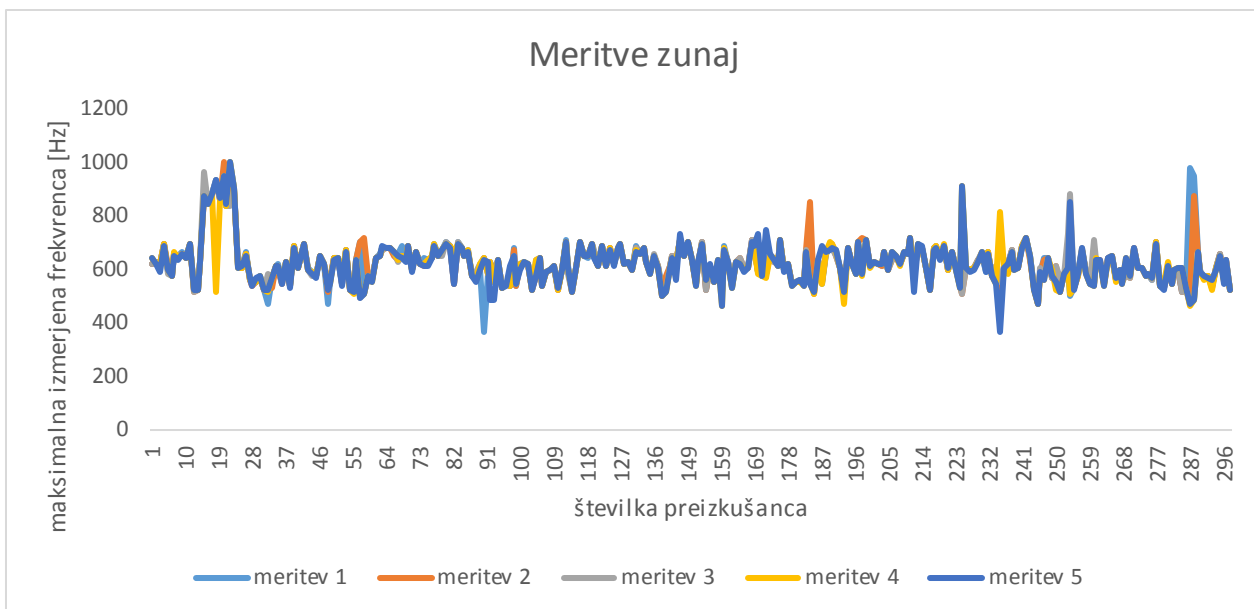
Z rezultati petih meritev smo preverili zgornje zahteve o ponovljivosti meritev. Ker so se za smiselne izkazale kombinacije s tremi trdnostnimi razredi smo ponovljivost preverili s tremi fiktivnimi razredi A, B in C ter ostanek. Rezultat so frekvenčne in globalne cenovne matrike. Za te se je izkazalo, da ustrezajo zahtevam standarda, zato je takšna naprav dovolj zanesljiva, da se jo uporabi za strojno razvrščanje lesa. Frekvenčne in globalne cenovne matrike so priložene nalogi v Prilogi A.

Meritve so bile opravljene na preizkušancih iz smrekovega lesa različnih dolžin med 2.83 m in 4.36 m, širin med 0.09 m in 0.23 m ter višin med 0.04 m in 0.06 m. Izmerjena je bila še masa in izračunana gostota preizkušanca (nepopravljena).

Pri določenih elementih so bile meritve izvedene nepravilno oziroma je prišlo do večjih napak, zato je bilo nekaj elementov med samim postopkom merjenja izločenih. Razlog je bil predvsem v slabši kakovosti teh kosov, ki bi morali biti izločeni že z vizualnim pregledom. Kosi slabše kakovosti namreč nimajo izrazitih prvih lastnih frekvenc, zato jih je težko pravilno izmeriti. Tako razpolagamo z nekaj manjšim številom preizkušancev (297), kar pa je še vedno več kot dovolj glede na zahteve standarda (za certificiranje naprave).

Vseh pet ponovitev meritev je bilo izvedenih zunaj proizvodnje. Tako so izločeni šumi, ki bi lahko motili in slabšali natančnost meritev. Za kontrolo pa so bile ponovljene meritve še znotraj proizvodnje in sicer dvakrat vendar na samo 136 preizkušancih. Enkrat z navadnim

mikrofonom, kot je bil uporabljen pri določanju nastavitv, drugič pa z bolj kakovostnim mikrofonom tipa shotgun SENNHEISER MKH P48, ki je opisan v 5. poglavju. Rezultati teh meritev bodo prikazani v nadaljevanju. Na spodnjem grafu so prikazani rezultati merjenih frekvenc v petih ponovitvah. Vrednosti so si med seboj v večji meri podobne in si sledijo, kar kaže na kakovost in konsistenco meritev in naprave. Vendar je nekaj tudi takšnih meritev, ki v določeni ponovitvi očitno izstopajo.



Slika 59: Graf 5 meritev frekvenc z napravo GT-PRO zunaj proizvodnje.

7.1 MERITVE Z IZMERJENO GOSTOTO

Iz izmerjenih gostot in frekvenc smo izračunali indikativno količino E_{mod} za vsako meritev posebej. Preizkušance smo nato razvrstili v kombinaciji trdnostnih razredov C40-C30-C18 in C35-C27-C18 ravno tako za vsako meritev posebej. Ker so se rezultati posameznih meritev med seboj razlikovali, tudi razvrstitev in izplen po razredih nista bila enaka.

Preglednica 73: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C40-C30-C18 (merjena gostota)

C40-C30-C18	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5
C40	22	19	17	17	21
C30	91	97	97	94	88
C18	167	163	163	165	167
ostanek	12	13	15	16	16
skupaj	292	292	292	292	292

Preglednica 74: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C35-C27-C18 (merjena gostota)

C35-C27-C18	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5
C35	41	40	38	38	40
C27	134	135	135	136	132
C18	105	104	104	102	104
ostanek	12	13	15	16	16
skupaj	292	292	292	292	292

Večji del preizkušancev pa je bilo pri vseh meritvah uvrščeno v enak trdnostni razred. Pri kombinaciji C40-C30-C18 je bilo takšnih 244, pri kombinaciji C35-C27-C18 pa 237 elementov.

Ostanek je relativno majhen, kar je ugodno.

Preglednica 75: Razvrstitev elementov, ki so se z vsemi meritvami uvrstili v enak trdnostni razred (merjena gostota)

	C40-C30-C18		C35-C27-C18
C40	14	C35	32
C30	78	C27	115
C18	144	C18	82
ostanek	8	ostanek	8

7.2 MERITVE S PREDPOSTAVLJENO GOSTOTO

Preizkušance smo razvrstili še na osnovi predpostavljene gostote $\rho = 460 \text{ kg/m}^3$ v kombinaciji C40-C30-C18 in C35-C27-C18.

Preglednica 76: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C40-C30-C18 (konstantna gostota)

C40-C30-C18	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5
C40	6	6	4	5	4
C30	63	61	63	64	64
C18	64	69	69	66	66
ostanek	159	156	156	157	158
skupaj	292	292	292	292	292

Preglednica 77: Razvrstitev preizkušancev v trdnostne razrede kombinacije C35-C27-C18 (konstantna gostota)

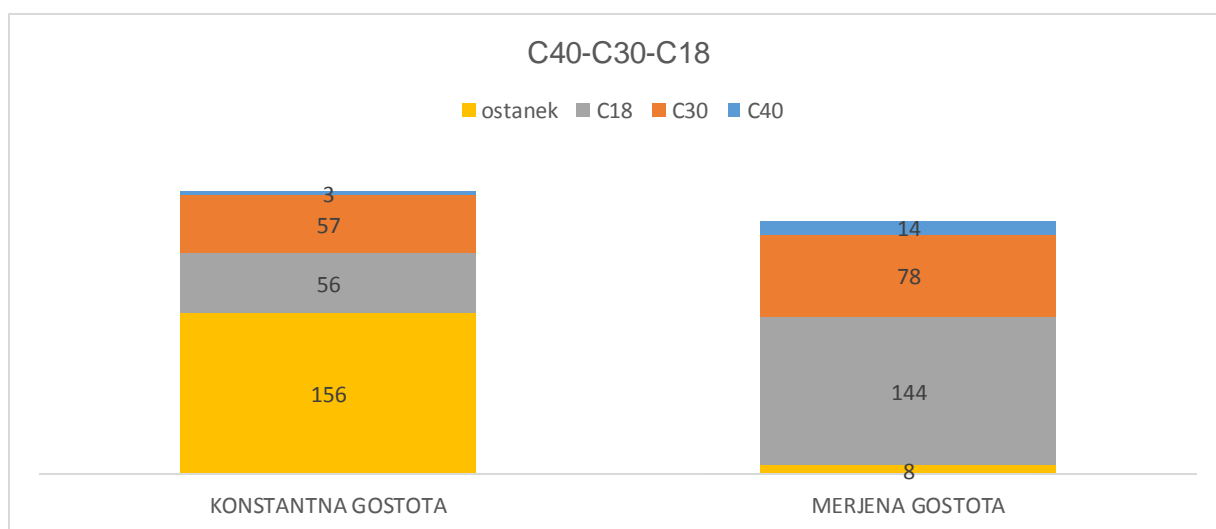
C35-C27-C18	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3	Meritev 4	Meritev 5
C35	38	35	34	31	31
C27	53	58	57	62	58
C18	42	43	45	42	45
ostanek	159	156	156	157	158
skupaj	292	292	292	292	292

Razvrstitev preizkušancev je opazno slabša s predpostavljeno gostoto, kot v primeru merjene gostote. Višji razredi so bistveno slabše zastopani, kar je tudi logična posledica rezultatov, ki smo jih dobili v poglavju *Določanje nastavitv*. Tam smo ugotovili, da so dejanske izmerjene gostote boljše od predpostavljene in imajo višji razredi slabšo zastopanost. Ker so gostote v območju srednjih trdnosti približno enake (povprečna izmerjena gostota je približno enaka predpostavljeni), smo pričakovali, da bodo razredi srednjih trdnosti približno enako zastopani. Vendar se je izkazalo, da so vsi ti elementi pri predpostavljeni gostoti uvrščeni v ostanek. To je seveda zelo neugodno, še posebej ker smo dokazali, da je les sicer bistveno boljše kakovosti.

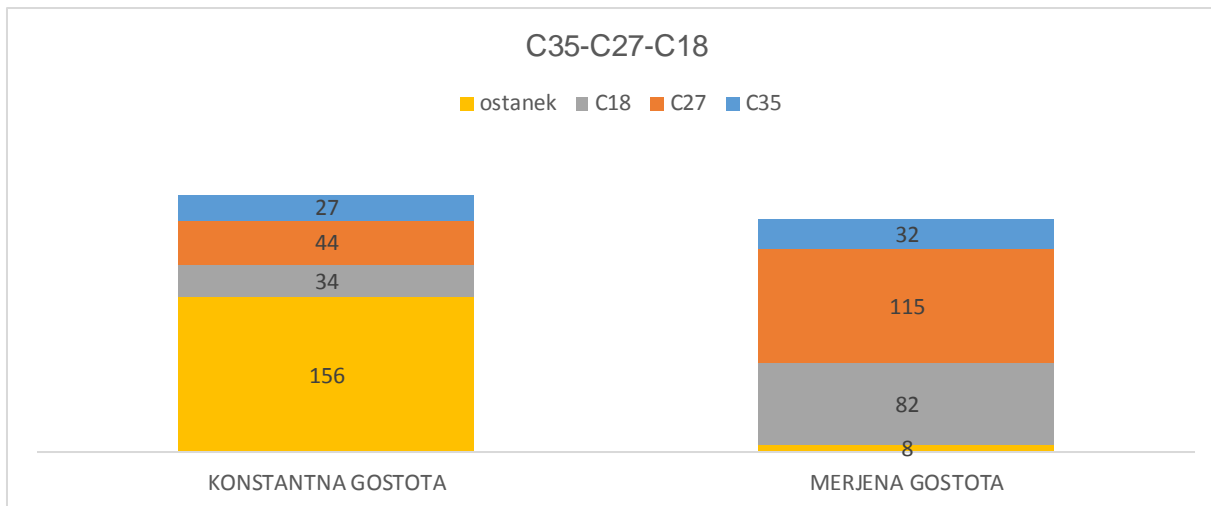
Preglednica 78: Razvrstitev elementov, ki so se z vsemi meritvami uvrstili v enak trdnostni razred (konstantna gostota)

	C40-C30-C18		C35-C27-C18	
C40	3	C35	27	
C30	57	C27	44	
C18	56	C18	34	
ostanek	156	ostanek	156	

Skupno je bilo pri vseh meritvah enako uvrščenih 272 elementov (kombinacija C40-C30-C18) in 261 (kombinacija C35-C27-C18). Konsistenca meritev je v tem pogledu sicer boljše pri predpostavljeni gostoti, vendar do tega pride na račun ostanka, ki je nesorazmerno velik in ne odraža dejanskega stanja. Sicer pa so frekvence po razredih bistveno nižje pri predpostavljeni gostoti. Še posebej slabi rezultati so za kombinacijo z višjimi trdnostnimi razredi.



Slika 60: Primerjava frekvenc pri vseh meritvah enako uvrščenih preizkušancev z merjeno in predpostavljeno gostoto (kombinacija C40-C30-C18)

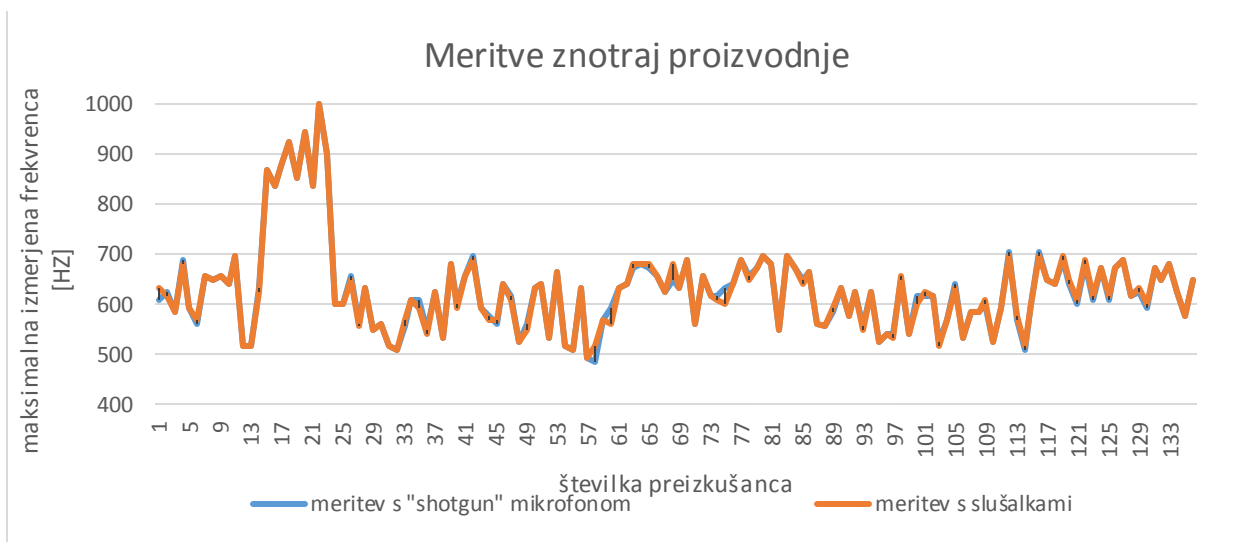


Slika 61: Primerjava frekvenc pri vseh meritvah enako uvrščenih preizkušancev z merjeno in predpostavljeno gostoto (kombinacija C35-C27-C18)

Na zgornjih diagramih vidimo, da je razlika med izplenom res velika. Glede na to, da je določitev gostote preizkušanca relativno hiter in enostaven postopek ocenjujemo, da pri razvrščanju tega nima smisla opustiti, saj dobimo bistveno boljše rezultate, če določimo pravo gostoto.

- MERITVE Z MIKROFONOM SENNHEISER MKH 416-P48

V proizvodnji so bile še dvakrat opravljene kontrolne meritve. Najprej z navadnim mikrofonom, kot zunaj proizvodnje, nato pa še s shothun mikrofonom Sennheiser MKH 416-P48. Na spodnjem grafu so prikazani rezultati.



Slika 62: Primerjava izmerjenih frekvenc znotraj proizvodnje z navadnim mikrofonom in mikrofonom Sennheiser MKH 416-P48

Z mikrofonom Sennheiser MKH P48 so bili dobljeni podobni rezultati, kot z navadnim mikrofonom, ki je bil uporabljen pri ostalih meritvah. Uporaba takega mikrofona bi bila torej smiselna, saj bi lahko napravo uporabljali tudi v bolj hrupnem okolju, kot je na primer proizvodni žagarski obrat. Pomembno pa je tudi to, da lahko s takšnim mikrofonom meritve izvajamo na

določeni oddaljenosti od preizkušanca, spodnji rezultati so bili namreč izmerjeni na oddaljenosti 20 cm. Navadni mikrofoni so morali biti v neposredni bližini (oddaljenost 1 cm) preizkušanca, da so bile sploh lahko zajete konice frekvenc nihanja. Tako bi lahko mikrofoni fiksno namestili v proizvodno linijo in tako pospešili postopek razvrščanja.

8 ZAKLJUČEK

Glede na to, da so trdnostne lastnosti konstrukcijskega materiala ena prvih stvari, s katero se projektant sreča pri delu, je samo razumevanje tega pojma na precej nizki ravni. Zato smo se odločili, da bomo s to magistrsko nalogo poskušali bolje obrazložiti problematiko samega razvrščanja v trdnostne razrede, različne postopke razvrščanja, primerjavo med njimi in končne rezultate.

Pomembno je, da se zavedamo, da razvrščanje lesa v trdnostne razrede ni proces z enoličnim rezultatom, ne glede na to, da imamo na voljo enake vhodne podatke. Celoten postopek razvrščanja je namreč izpeljan tako, da je vse odvisno od začetnih predpostavk, v katere trdnostne razrede želimo lesa razvrstiti. Pomembno je tudi, kako razvrščamo. Če uporabimo vizualno razvrščanje, smo pri tem bolj konservativni, s strojnem razvrščanjem pa lažje in natančneje ocenimo kakovost lesa in smo zato pri tem bolj ekonomični, saj je les bolj izkoriščen.

Več pozornosti smo posvetili strojnemu razvrščanju, saj je tako razvrščanje v Evropi vedno bolj razširjeno. Vendar so tudi pri strojnem razvrščanju uveljavljena pravila, ki imajo še kar nekaj maneverskega prostora za izboljšave. V želji po res čim bolj realni oceni kakovosti lesa, se opravljajo nove raziskave in testiranja za prilagoditev teh pravil. V tej magistrski nalogi smo zato pripravili analizo obstoječih pravil razvrščanja in pravil, ki so trenutno še v predstandardu in jih med seboj primerjali.

Pri delu smo uporabili dva različna paketa podatkov. Prvi vzorec preizkušancev je bil nekoliko večji in smo ga uporabili pri optimalnem razvrščanju in končno izpeljavo nastavitv za napravo za strojno razvrščanje lesa in jo želimo v prihodnosti certificirati in uvrstiti na seznam naprav za strojno razvrščanje lesa v standardu. Tudi drugi paket podatkov je namenjen certificiranju naprave, predstavlja pa sicer nekoliko manjši vzorec preizkušancev, na katerih je bilo ponovljenih pet serij meritev. Te smo uporabili za dokaz zanesljivosti in ponovljivosti meritev naprave.

Primerjave med postopki optimalnega razvrščanja smo naredili za več različnih kombinacij trdnostnih razredov. S tem smo tudi dokazali, kolikšen vpliv ima začetni izbor zelenih trdnostnih razredov. Za referenčne rezultate smo uporabili enačbe, ki so izpeljane iz teorije. Te so se izkazali za najbolj konservativne, kar smo tudi pričakovali. Standard in predstandard predvidevata različne modifikacijske faktorje, ki so izpeljani na osnovi poskusov. Ugotovili smo, da je trenutno veljavni standard precej na nevarni strani, tudi glede na predstandard. Več pozornosti smo posvetili računu karakterističnih vrednosti odločilnih lastnosti. S simulacijami smo primerjali vrednosti, ki smo jih dobili z različnimi postopki. Kar zadeva konservativnost, smo prišli do podobnih ugotovitev, kot pri optimalnem razvrščanju. Karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti trdnostnih razredov so najvišje po enačbah veljavnega standarda, najnižje pa so po neparametričnem pristopu predstandarda. Zaradi velike konservativnosti tega pristopa smo se odločili, da preverimo enačbo, ki je podana. Izkazalo se je obstoječa enačba ni primerna. Predstandard namreč pravi, da so ocenjene karakteristične vrednosti v minimalno 75 % primerov nižje od dejanskih karakterističnih vrednosti. Enačba sicer zadosti predpostavki, vendar je zelo konservativna, saj se ta odstotek giblje okoli 90 %. Na osnovi te predpostavke smo določili novo, primernejšo enačbo.

Pri delu smo prišli do zanimivih ugotovitev, ki sicer zadevajo bolj računski postopek določanja karakterističnih vrednosti. Simulacije smo delali v programu Mathematica in ugotovili, da pri

računu 75. centila za necentralno Studentovo porazdelitev z direktnim ukazom *Inverse* pride do računske nestabilnosti, saj je v odvisnosti od prostostnih stopenj (števila elementov v vzorcu) prišlo do skoka vrednosti, ki so imele velik vpliv na končne rezultate (teorija). Ugotovili smo, da dobimo pravilne rezultate z ukazom *FindRoot*, kjer je potek centila gladek tudi za višje vrednosti prostostnih stopenj.

Tudi pri računu 5. centila kot karakteristične vrednosti vzorca po t.i. poenostavljenem postopku z ukazom *Quantile* v *Mathematici* moramo biti pozorni in ukazu dodati argument, ki definira metodo interpolacije vrednosti, v primeru ko izbrani centil ni eden izmed vrednosti v vzorcu.

Pripravili smo nastavitve za napravo za strojno razvrščanje GT-PRO, kjer smo za indikativno količino uporabili dinamični modul elastičnosti. Ta se je izkazal za najbolj primerno izmed količin, ki jih lahko z napravo merimo. Na osnovi nastavitve smo preizkušance razdelili v dodeljene trdnostne razrede, določili frekvenčne in globalne cenovne matrike in ugotovili, da se je naprava izkazala za relativno uspešno pri razvrščanju. Uspešnost se je spreminjala v odvisnosti od izbrane kombinacije trdnostnih razredov, povečini pa je bilo pravilno razvrščenih med 50 % in 55 % preizkušancev. Okoli 40 % je bilo podcenjenih kosov, delež precenjenih pa je omejen s cenovnimi matrikami, zato smo pri večjem delu kombinacij morali popravljati nastavitve tako, da smo zmanjšali število precenjenih kosov. Vrednosti pod diagonalo cenovne matrike namreč po določilih predstandarda ne smejo prekoračiti meje 0.2. Ta meja zagotavlja, da je delež nepravilno precenjenih kosov dovolj majhen in ne ogroža varnosti. Vendar smo ugotovili, da so lahko ravno cenovne matrike vzrok za neracionalne rezultate. Pri kombinaciji C40-C30-C24-C16 smo namreč morali zaradi te omejitve prestaviti vse elemente, ki so bili sicer uvrščeni v razred C24 v nižji razred, kljub temu da so dejansko zadoščali minimalnim zahtevam za uvrstitev v trdnostni razred. Vrednostni uteži v osnovni cenovni matriki so bile tako velike, da omejitvi 0.2 nismo mogli zadostiti na drugačen način. Res, da je to tudi posledica nekakšnega slučaja, vendar je to zelo nesmiselno in potrebno bi bilo izključiti možnost, da se več kot 20 % preizkušancev po nepotrebem uvrsti v nižji trdnostni razred, kot bi se lahko glede na dejanske mehanske lastnosti.

Z novimi nastavitvami smo obdelali drugi paket meritev manjšega vzorca preizkušancev za vseh pet ponovitev meritev. Tako smo dokazali primernost naprave, saj smo izpolnili pogoj standarda o ponovljivosti rezultatov meritev. To smo zopet preverjali s pomočjo frekvenčnih in cenovnih matrik.

Pričakujemo, da bi se z uveljavitvijo nove enačbe pri razvrščanju po predstandardu sicer lahko nekoliko pomaknili na bolj varno stran ampak pri tem ostali nekoliko bolj ekonomični, kot sicer z uporabo enačb parametričnega pristopa predstandarda. Tudi naprava GT-PRO se je izkazala za povsem primerno, saj z dobimo ustrezne rezultate, ki zadostujejo zahtevam standarda.

VIRI

Srpčič, J. 2009. Les za gradbene konstrukcije. Lesena gradnja v Sloveniji.

<http://www.lesena-gradnja.si/html/pages/si-clanki-konstrukcije-les-za-gradbene-konstrukcije.htm> (Pridobljeno 20. 4. 2015.)

Plos, M. 2012. Razvrščanje konstrukcijskega lesa v različne kombinacije trdnostnih razredov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Plos): 66 f.

Vratuša, S. 2015. Evropski standardi za projektiranje lesenih konstrukcij. Spletni portal Lesena gradnja v Sloveniji, Konstrukcije.

<http://www.lesena-gradnja.si/html/pages/si-clanki-zasnova-konstrukcije-evropskistandardi.htm> (Pridobljeno 26. 5. 2015.)

Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo, Uredba EU št. 305/2011.

http://www.mgrt.gov.si/si/delovna_podrocja/notranji_trg/sektor_za_proizvode_in_blagovne_rezerve/gradbeni_proizvodi/uredba_eu_st_3052011/izjava_o_lastnostih_dop_in_oznacevanje_gradbenih_proizvodov_z_oznako_ce/ (Pridobljeno 15. 7. 2015.)

Bučar, B., Gornik Bučar, D., Pazlar, T., Plos, M., Srpčič, J., Šega, B., Turk, G. 2012a. Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 05.2009/04.2012.

<http://www.dlib.si/?URN=URN:NBN:SI:DOC-EVRHLZYE> (Pridobljeno 11. 06. 2015.)

Turk, G. 2012. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 264 str.

Plos, M. 2006. Nedestruktivne metode za razvrščanje gradbenega lesa po trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Plos): 71 f.

Bučar, B., Gornik Bučar, D., Pazlar, T., Plos, M., Srpčič, J., Šega, B., Turk, G. 2012b. Internal report on the visual classification of structural timber from the Slovenian rectangular cross section spruce and the appropriate destructive tests, GRADEWOOD – Sampling justification – Slovenia. Ljubljana. Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 11 f.

Reščič, D. 2004. Strojno razvrščanje lesa z uporabo umetnih nevronske mreže. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Reščič): 61 f.

STANDARDI

SIST EN 338:2010. Konstrukcijski les – Trdnostni razredi.

SIST EN 384:2010. Konstrukcijski les – Ugotavljanje značilnih vrednosti mehanskih lastnosti in gostote.

SIST EN 14081-1:2006+A1:2011. Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti - 1. del: Splošne zahteve.

SIST EN 14081-2:2011+A1:2013. Lesene konstrukcije – Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti – 2. del: Strojno razvrščanje – Dodatne zahteve za začetni preizkus proizvodnje.

SIST EN 14081-4:2009. Lesene konstrukcije – Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti – 4. del: Strojno razvrščanje – Nastavitve strojev za razvrščanje pri strojno kontroliranih sistemih.

SIST EN 1912:2012. Konstrukcijski les – Trdnostni razredi – Določitev trdnostnih razredov na podlagi vizualnega razvrščanja in vrste lesa.

SIST EN 14358:2007. Lesene konstrukcije – Računske lastnosti 5-percentilne vrednosti in privzemni kriteriji za vzorce.

SIST EN 14080:2013. Lesene konstrukcije – Lepljeni lamelirani les in lepljeni masivni les.

PREDSTANDARDI

prEN 338:2013. Konstrukcijski les – Trdnostni razredi.

prEN 384:2013. Konstrukcijski les – Ugotavljanje značilnih vrednosti mehanskih lastnosti in gostote.

prEN 14358:2013. Lesene konstrukcije – Računske lastnosti 5-percentilne vrednosti in srednje vrednosti za namene začetnega preskušanja tipa in kontrole proizvodnje v obratu.

Microphone. 2015.

http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone#Liquid_microphone (Pridobljeno 15. 6. 2015.)

Pelicon, A., Doplihar, M. 2011. Akustični senzorji (mikrofoni), seminarska naloga pri predmetu Merilni pretvorniki. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.

http://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/UNIVSS/meri_pret/seminar%202011/Porocilo%20Merlini%20pretvorniki%20_%20akusticni%20senzorji%20Doplihar%20Matej%20in%20Aljaz%20Pelicon.pdf (Pridobljeno 15. 6. 2015.)

Bright Hub. 2015.

<http://www.brighthouse.com/multimedia/audio/articles/112955.aspx> (Pridobljeno 12. 6. 2015.)

Geoff the Grey Geek. 2015.

<http://geoffthegreygeek.com/microphone-sensitivity/> (Pridobljeno 12. 6. 2015.)

Robjohns, H. 2010. A brief history of microphones. Microphone Data.

<http://microphone-data.com//media/filestore/articles/History-10.pdf> (Pridobljeno 10. 6. 2015.)

Universal Audio WebZine. 2015.

<http://www.uaudio.com/webzine/2005/december/text/content2.html> (Pridobljeno 12. 6. 2015.)

Media College. 2015.

<http://www.mediacollege.com/audio/microphones/frequency-response.html> (Pridobljeno 10. 6. 2015.)

Sobel, D. 2009. InfoBlog – Microphone pickup patterns. The John Lennon. Objavljeno 15. 5. 2009.

http://www.lennonbus.org/index.php?/blog/posts/infoblog_-_microphone_pickup_patterns1/ (Pridobljeno 12. 6. 2015.)

Sennheiser. Shotgun Microphones. MKH 416-PU48U3. 2015.

<http://en-us.sennheiser.com/short-gun-tube-microphone-camera-films-mkh-416-p48u3> (Pridobljeno 13. 7. 2015.)

DCAudio Visuel. 2015.

http://www.dcaudiovisuel.com/pages/Sennheiser/Sennheiser_MKH416_specs.htm

(Pridobljeno 13. 7. 2015.)

Ostali viri

Šinkovec, N. 2008. Uporaba umetnih nevronske mreže za oceno trdnosti lesenih elementov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Šinkovec): 81 f.

Burgar, I. 2006. Razvrščanje lesa z nedestruktivnimi metodami. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba I. Burgar): 51 f.

DIN 4074-1. Razvrščanje lesa v trdnostne razrede - 1. del: Žagani les-iglavci.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: FREKVENČNE IN CENOVNE MATRIKE (DOKAZ O PONOVLJIVOST
MERITEV)

**PRILOGA A: FREKVENČNE IN CENOVNE MATRIKE (DOKAZ O PONOVLJIVOSTI
MERITEV)**

Kot zahteva standard smo si izbrali 3 fiktivne razrede s približno enakim številom elementov. V spodnji tabeli so prikazane ustrezne nastavitve.

Preglednica A 1: Uporabljene nastavitve za fiktivne razrede

nastavitve (merjena gostota)	A	B	C
	12790	11000	8980

Preglednica A 2: Optimalna razvrstitev preizkušancev

OPTIMALNA RAZVRSTITEV	Število elementov
A	87
B	73
C	80
OSTANEK	52

Preglednica A 3: Frekvenčna matrika, meritev 1

MERITEV 1		dodeljeni razredi				vsota
		A	B	C	ostanek	
optimalni razredi	A	86	0	0	1	87
	B	2	71	0	0	73
	C	0	4	76	0	80
	ostanek	3	0	0	49	52
vsota		91	75	76	50	292

Preglednica A 4: Frekvenčna matrika, meritev 2

MERITEV 2		dodeljeni razredi				vsota
		A	B	C	ostanek	
optimalni razredi	A	84	2	0	1	87
	B	2	67	4	0	73
	C	1	5	74	0	80
	ostanek	3	0	4	45	52
vsota		90	74	82	46	292

Preglednica A 5: Frekvenčna matrika, meritev 3

MERITEV 3		dodeljeni razredi				vsota
		A	B	C	ostanek	
optimalni razredi	A	82	4	0	1	87
	B	2	67	4	0	73
	C	0	2	78	0	80
	ostanek	2	1	5	44	52
vsota		86	74	87	45	292

Preglednica A 6: Frekvenčna matrika, meritev 4

MERITEV 4		dodeljeni razredi				vsota
		A	B	C	ostanek	
optimalni razredi	A	86	0	0	1	87
	B	0	67	5	1	73
	C	1	2	75	2	80
	ostanek	1	3	2	46	52
vsota		88	72	82	50	292

Preglednica A 7: Frekvenčna matrika, meritev 5

MERITEV 5		dodeljeni razredi				vsota
		A	B	C	ostanek	
optimalni razredi	A	81	4	1	1	87
	B	0	69	4	0	73
	C	4	1	70	5	80
	ostanek	1	1	2	48	52
vsota		86	75	77	54	292

Ker pri teh matrikah nimamo realnih trdnostnih razredov (nimamo minimalnih zahtev za odločilne lastnosti), se osnovna cenovna matrika določi nekoliko drugače. Na diagonali, kjer so elementi z enakim dodeljenim in optimalnim razredom, so vrednosti enake 0. Sicer je vrednost enaka številu razredov, ki so dodeljeni stran od optimalnega razreda. Torej če je element uvrščen v dodeljen razred, ki je za en razred oddaljen od njegovega optimalnega razreda, je na tistem mestu vrednost 1 itd.

Preglednica A 8: Osnovna cenovna matrika za fiktivne razrede.

optimalni razredi		dodeljeni razredi			ostanek
		A	B	C	
A		0	1	2	3
B		1	0	1	2
C		2	1	0	1
OSTANEK		3	2	1	0

Preglednica A 9: Globalna cenovna matrika za fiktivne razrede, meritev 1

MERITEV 1		dodeljeni razredi			
		A	B	C	ostanek
optimalni razredi	A	0	0	0	0.06
	B	0.022	0	0	0
	C	0.000	0.053	0	0
	ostanek	0.099	0	0.000	0

Preglednica A 10: Globalna cenovna matrika za fiktivne razrede, meritev 2

MERITEV 2		dodeljeni razredi			
		A	B	C	ostanek
optimalni razredi	A	0	0.027	0	0.065
	B	0.022	0	0.049	0
	C	0.022	0.068	0	0
	ostanek	0.100	0	0.049	0

Preglednica A 11: Globalna cenovna matrika za fiktivne razrede, meritev 3

MERITEV 3		dodeljeni razredi			
		A	B	C	ostanek
optimalni razredi	A	0	0.054	0	0.067
	B	0.023	0	0.046	0
	C	0.000	0.027	0	0
	ostanek	0.070	0.027	0.057	0

Preglednica A 12: Globalna cenovna matrika za fiktivne razrede, meritev 4

MERITEV 4		dodeljeni razredi			
		A	B	C	ostanek
optimalni razredi	A	0	0.000	0	0.060
	B	0.000	0	0.061	0.040
	C	0.023	0.028	0	0.040
	ostanek	0.034	0.083	0.024	0

Preglednica A 13: Globalna cenovna matrika za fiktivne razrede, meritev 5

MERITEV 5		dodeljeni razredi			
		A	B	C	ostanek
optimalni razredi	A	0	0.053	0.026	0.056
	B	0.000	0	0.052	0
	C	0.093	0.013	0	0.093
	ostanek	0.035	0.027	0.026	0