

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:

Špacapan, A., 2013. Dimenzioniranje sestavljenih lesenih nosilcev. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J., somentor Saje, D.): 35 str.

Datum arhiviranja: 19-03-2015

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:

Špacapan, A., 2013. Dimenzioniranje sestavljenih lesenih nosilcev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J., co-supervisor Saje, D.): 35 pp.

Archiving Date: 19-03-2015

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

**PRVOSTOPENJSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
GK^o " - V@uf \ (UN)**

Kandidat:

Diplomska naloga št.: 98/B-GR

Graduation thesis No.: 98/B-GR

Mentor:

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

Ljubljana, 22. 10. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Anej Špacapan izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Dimenzioniranje sestavljenih lesenih nosilcev«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 11. 9. 2013

Anej Špacapan

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.011(043.2)
Avtor:	Anej Špacapan
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Lopatič
Somentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Dimenzioniranje sestavljenih lesenih nosilcev
Tip dokumenta:	Diplomska naloga: univerzitetni študij – B
Obseg in oprema:	35 str., 8 pregl., 23 sl., 45 en.
Ključne besede:	sestavljene leseni nosilci, vezna sredstva, podajnost veznih sredstev, trdnostne karakteristike masivnega lesa

Izveček

V diplomski nalogi smo analizirali napetostno stanje lesenih sestavljenih nosilcev treh različnih prerezov in dveh enostavnih statičnih sistemov. S programskim orodjem Microsoft® Excel smo izdelali program za analizo sestavljenih lesenih nosilcev iz masivnega lesa. Program omogoča izračun napetostnega stanja škatlastih, »I« in »T« prečnih prerezov s poljubnimi dimenzijami pasnic in stojin. Statični sistem je prostoležeči ali konzolni nosilec, poljubne dolžine. Posamezni deli prereza so med seboj povezani z mehanskimi veznimi sredstvi – gladkimi žebli, standardnih dimenzij po SIST EN 1995-1-1:2005, in imajo lahko različne trdnostne lastnosti. Za dano obtežbo, dimenzije prereza in dolžino izbranega nosilca program izračuna in izriše graf upogibnih momentov in prečnih sil. Na najbolj obremenjenih mestih se izvede kontrola normalnih in strižnih napetosti, nosilnosti veznih sredstev ter pomikov po standardu za projektiranje lesenih konstrukcij SIST EN 1995-1-1.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.011(043.2)
Author:	Anej Špacapan
Supervisor:	Assoc. Prof. Jože Lopatič, Ph.D.
Cosupervisor:	Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
Title:	Design of composite wooden beams
Document type:	Graduation thesis
Notes:	35 p., 8 tab., 23 fig., 45 eq.
Keywords:	composite wooden beams, connectors, flexibility of connectors, strength of wood

Abstract

The graduation thesis deals the stress state of composite wooden beams of three different cross sections and two simple static systems. By using Microsoft® Excel, a simple program for the analysis of composite wooden beams made of hardwood is created. The program can choose between the box, »I« and »T« cross-sections with arbitrary dimensions of flanges and webs. For the static system, simply supported beams of varying lengths can be chosen. The individual elements of the cross section are connected by mechanical fasteners (smooth nails of standard dimensions according to SIST EN 1995-1-1:2005) and may have different strength characteristics. By entering load, cross-section dimensions and length of the selected beam, the program calculates and draws a shear force and bending moment diagram. Based on the maximum values of moments and shear forces obtained, the program checks normal and shear stress as well as nails` carrying capacity and displacements of the beam. All calculations and processes of control are in accordance with the currently established standard for the design of timber structures, i.e. SIST EN 1995-1-1.

KAZALO VSEBINE

Izjave	IV
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	V
Bibliographic – documentalistic information and abstract	VI
Kazalo vsebine	VII
Kazalo preglednic	VIII
Kazalo slik	IX
Okrajšave in simboli	X
1 UVOD	1
2 ANALIZA NAPETOSTNEGA STANJA SESTAVLJENIH LESENIH NOSILCEV	2
2.1 Privzete predpostavke računa	2
2.2 Oblike prerezov	2
2.3 Material	7
2.3.1 Lastnosti lesa	7
2.3.2 Trdnostni razredi masivnega lesa	8
2.4 Obtežne kombinacije in projektne trdnosti lesa	12
2.5 Obtežba nosilca	12
2.6 Vezna sredstva in razdalje med njimi	13
2.7 Statični sistem	17
2.8 Notranje statične količine	18
2.9 Normalne napetosti v težiščih in robovih posameznih delov prereza	19
2.9.1 Težišče prereza	19
2.9.2 Podajnost veznih sredstev	21
2.9.3 Nadomestna upogibna togost prereza	22
2.9.4 Izračun normalnih napetosti v težiščih in robovih posameznih delov prereza	23
2.10 Strižne napetosti	26
2.11 Nosilnost veznih sredstev	28
2.12 Povesi	30
3 ZAKLJUČEK	34
VIRI	35

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Delni varnostni faktorji γ_m za materiale (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 26)	9
Preglednica 2: Razredi trajanja obtežb ter primeri razvrstitve obtežb glede nanjihovo trajanje (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 23).....	10
Preglednica 3: Vrednosti modifikacijskega faktorja k_{mod} (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 23)	10
Preglednica 4: Trdnostni razredi masivnega lesa (Lopatič, 2012: str 25)	11
Preglednica 5: Delni varnostni faktorji za vplive – osnovne kombinacije (Lopatič, 2012: str 28)	13
Preglednica 6: Tipizirane vrste zabitih in uvrtnih žeblicev (Premrl, Dobrila, 2008: str 175).....	14
Preglednica 7: Koeficient lezenja k_{def} (Lopatič, 2012: str 53).....	32
Preglednica 8: Mejne vrednosti upogibov različnih nosilcev (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 58)	32

KAZALO SLIK

Slika 1: Skica škatlastega prereza	3
Slika 2: Skica "I" prereza	3
Slika 3: Skica "T" prereza	4
Slika 4: Začetna stran programa za dimenzioniranje sestavljenih lesenih nosilcev	5
Slika 5: Prikaz zasnove škatlastega prereza	6
Slika 6: Prikaz zasnove »I« prereza	6
Slika 7: Prikaz zasnove »T« prereza	7
Slika 8: Prikaz okna za vnašanje trdnostnih karakteristik lesa.....	12
Slika 9: Prikaz okna za izbiro žeblicev	16
Slika 10: Skica računskega modela prostoležečega nosilca	17
Slika 11: Skica računskega modela konzolnega nosilca	17
Slika 12: Prikaz okna programa za izračun notranjih sil za škatlasti prerez prostoležečega nosilca	19
Slika 13: Skica škatlastega prereza z oznakami	20
Slika 14: Skica »I« prereza z oznakami	20
Slika 15: Skica »T« prereza z oznakami	21
Slika 16: Prikaz okna za izračun normalnih napetosti v težišču elementov prereza	24
Slika 17: Prikaz okna za izračun robnih napetosti za vsak element prereza	25
Slika 18: Prikaz poteka normalnih napetosti po višini prereza	26
Slika 19: Prikaz kontrole in poteka strižnih napetosti po višini prereza	28
Slika 20: Prikaz okna za kontrolo nosilnosti veznih sredstev	30
Slika 21: Prispevki k povesu upogiba prostoležečega nosilca	30
Slika 22: Prispevki k povesu upogiba konzolnega nosilca.....	31
Slika 23: Prikaz okna za kontrolo povesov	33

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

MSN Mejno stanje nosilnosti

MSU Mejno stanje uporabnosti

1 UVOD

Gradbeništvo je panoga, ki porablja veliko energije in surovin za proizvodnjo gradbenega materiala ter tudi za gradnjo objektov. Zaradi uporabe neobnovljivih virov precej obremenjuje okolje in zato spada med energetske najbolj potratne panoge. Skrb za zdravo bivalno okolje sedanjih in prihodnjih generacij, varčna poraba energije ter zavedanje o omejenih količinah naravnih virov usmerja razvoj gradbeništva tudi z ekološkega vidika. V današnjem času prihaja v ospredje pojem trajnostnega gradbeništva. Trajnostno gradbeništvo je usmerjeno k čim nižji porabi energije za predelavo surovin v gradbeni material ali gradbene elemente in v uporabo okolju prijaznih materialov. Mednje lahko na prvem mestu štejemo les.

Les je tradicionalen gradbeni material, s katerim so gradili že v davni preteklosti. Z industrijsko revolucijo pa je les kot gradbeni material začel izgubljati svoj pomen, saj se je z nižanjem cen povečala uporaba železa in portland cementa ter posledično betona. Za predelavo surovin v omenjena gradbena materiala je potrebno vložiti zelo veliko energije. Obdelava lesa iz drevesa v uporabne elemente zahteva precej manj energije ter enostavnejše postopke kot drugi materiali. Prednost uporabe lesa je tudi v tem, da je ostanke enostavno odstraniti in ne obremenjujejo okolja. Dobre lastnosti lesa so njegove trdnostne karakteristike, saj prenaša visoke tlačne in natezne napetosti v smeri vlaken. Z vidika arhitekture in oblikovanja zgradb je les idealen material, saj lahko elemente med seboj poljubno sestavljamo. Organska struktura pa prispeva k občutku topllega ter prijetnega življenjskega prostora. V Sloveniji je za projektiranje gradbenih konstrukcij zakonsko določena uporaba standardov Evrokod. Za projektiranje lesenih konstrukcij uporabljamo standard SIST EN 1995-1-1.

V diplomski nalogi analiziramo napetostno stanje lesenih sestavljenih upogibnih elementov treh različnih prereзов in dveh različnih statičnih sistemov. Posamezni deli prereza so med seboj povezani z mehanskimi veznimi sredstvi, in sicer z žebli. S pomočjo standarda SIST EN 1995-1-1 in programa Microsoft® Excel smo razvili preprosto programsko orodje za analizo sestavljenih nosilcev iz masivnega lesa, ki imajo različne trdnostne karakteristike. Program omogoča račun napetostnega stanja v prečnih prerezih vzdolž nosilca, račun nosilnosti veznih sredstev in račun pomikov nosilca. Vsi računi so izvedeni v skladu s standardom SIST EN 1995-1-1:2005.

2 ANALIZA NAPETOSTNEGA STANJA SESTAVLJENIH LESENIM NOSILCEV

2.1 Privzete predpostavke računa

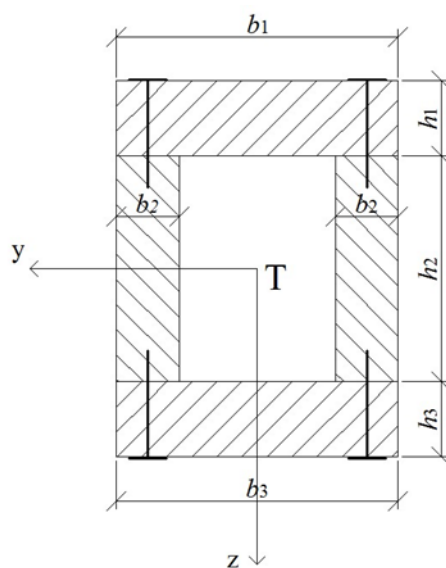
Pri računu uporabljamo poenostavljen postopek dimenzioniranja sestavljenih upogibnih elementov ob naslednjih predpostavkah:

- račun sestavljenih upogibnih elementov temelji na teoriji linearne elastičnosti, in sicer je med silo v veznem sredstvu in zdrsom predpostavljena linearna zveza;
- nosilci so prosto-vrtljivo podprti na razponu l . Za kontinuirane nosilce se lahko izrazi za analizo uporabijo tako, da se za razpon l vzame 80% merodajne razpetine, pri konzolnih nosilcih pa se za razpon l uporabi dvakratno dolžino konzole;
- posamezni sestavni elementi prereza so po celotni dolžini nosilca l iz enega kosa oziroma so med seboj ustrezno zlepljeni, tako da so stiki polno osno nosilni;
- sestavni elementi prereza so spojeni z mehanskimi veznimi sredstvi, katerih togost je opisana z modulom zdrsa K ;
- razmik med veznimi sredstvi je konstanten ali pa se enakomerno spreminja glede na prečno silo med s_{\min} in s_{\max} , pri tem mora veljati: $s_{\max} \leq 4 \cdot s_{\min}$;
- obtežba na sestavljeni nosilec deluje v smeri osi z in povzroča upogibni moment $M(x) = M_y(x)$, ki se po dolžini nosilca spreminja v obliki sinusne krivulje ali parabole, in prečno silo $V(x) = V_z(x)$.

2.2 Oblike prerezov

Obravnavamo tri različne prereze, in sicer:

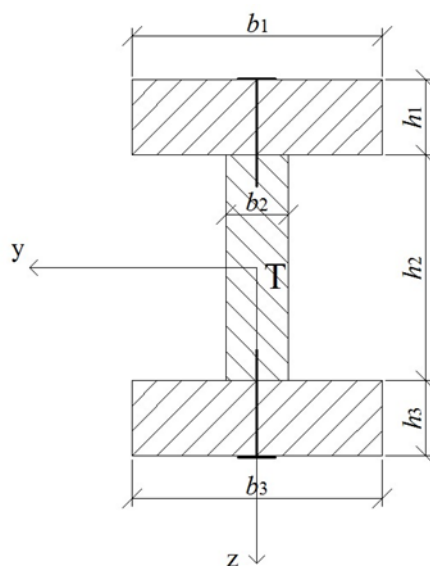
- škatlasti prerez



Slika 1: Skica škatlastega prereza

Škatlasti prerez je sestavljen iz dveh stojin višine h_2 in širine b_2 ter dveh pasnic višine h_1 in h_3 ter širine b_1 in b_3 , ki sta žebeljani na stojini. Koordinatni sistem (y, z) je izbran glede na težišče celotnega prereza.

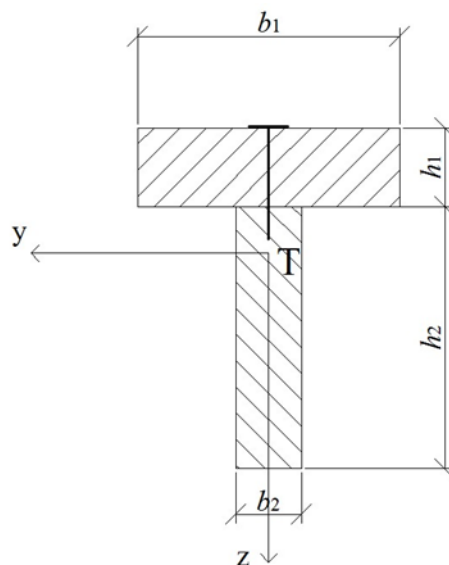
- »I« prerez



Slika 2: Skica "I" prereza

»I« prerez je sestavljen iz dveh pasnic širine b_1 in b_3 in višine h_1 in h_3 ter vmesne stojine z višino h_2 in širino b_2 . Pasnici sta na stojino žebeljani. Koordinatni sistem (y, z) je izbran glede na težišče celotnega prereza.

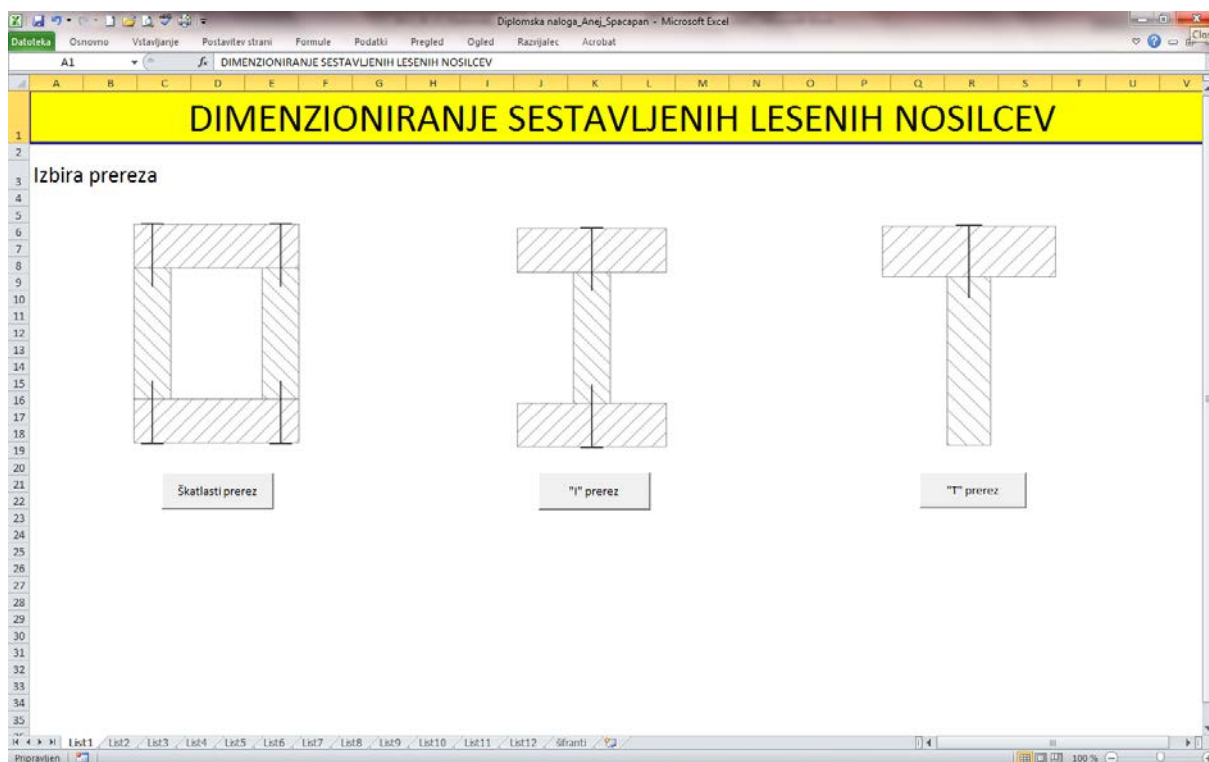
- »T« prerez



Slika 3: Skica "T" prereza

»T« prerez je sestavljen iz stojine in pasnice. Višina pasnice je h_1 , širina pasnice je b_1 , višina stojine je h_2 , širina stojine je b_2 . Pasnica in stojina sta med seboj žebeljani. Izhodišče koordinatnega sistema (y, z) je postavljeno v težišče celotnega prereza.

S klikom na gumb, ki se nahaja tik pod sliko posameznega prereza, v programu za dimenzioniranje sestavljenih lesenih nosilcev izberemo prečni prerez.

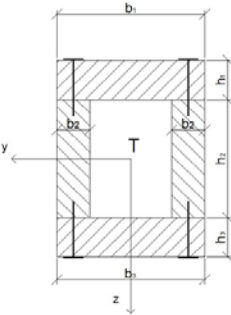


Slika 4: Začetna stran programa za dimenzioniranje sestavljenih lesenih nosilcev

Klik na izbrani prerez odpre okno, v katerem si izberemo dimenzije prereza in dolžino sestavljenega nosilca, vrste lesa, iz katerih so narejeni posamezni deli prereza, obtežbo, ki deluje na nosilec, in vrsto veznega sredstva ter statični sistem.

ŠKATLASTI PREREZ Naslovna stran

Zasnova prereza



prostor za vpis podatkov

Dolžina nosilca
 $l = 4,00 \text{ m} \rightarrow 400 \text{ cm}$

Širina elementa		Višina elementa	
$b_1 = 15 \text{ cm}$	$b_2 = 5 \text{ cm}$	$h_1 = 5 \text{ cm}$	$h_2 = 25 \text{ cm}$
$b_3 = 15 \text{ cm}$		$h_3 = 5 \text{ cm}$	

Ploščina elementa		Vztrajnostni moment elementa	
$A_1 = 75 \text{ cm}^2$	$A_2 = 250 \text{ cm}^2$	$I_1 = 156,25 \text{ cm}^4$	$I_2 = 13020,83 \text{ cm}^4$
$A_3 = 75 \text{ cm}^2$		$I_3 = 156,25 \text{ cm}^4$	

Vrsta uporabljenega lesa in obtežna kombinacija

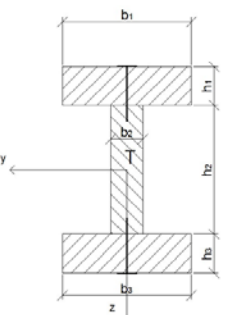
Izbira vrste lesa in obtežne kombinacije:

Vrsta lesa

Slika 5: Prikaz zasnove škatlastega prereza

"I" PREREZ Naslovna stran

Zasnova prereza



prostor za vpis podatkov

Dolžina nosilca
 $l = 4,00 \text{ m} \rightarrow 400 \text{ cm}$

Širina elementa		Višina elementa	
$b_1 = 15 \text{ cm}$	$b_2 = 5 \text{ cm}$	$h_1 = 5 \text{ cm}$	$h_2 = 15 \text{ cm}$
$b_3 = 15 \text{ cm}$		$h_3 = 5 \text{ cm}$	

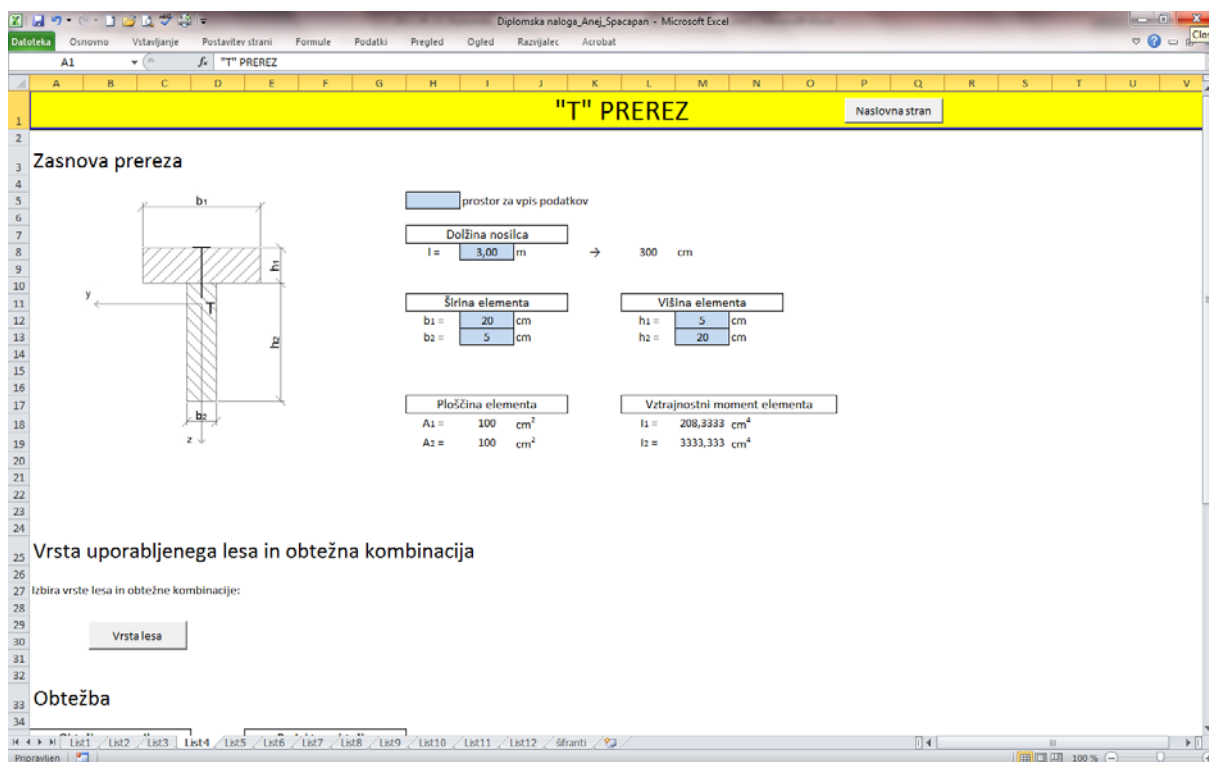
Ploščina elementa		Vztrajnostni moment elementa	
$A_1 = 75 \text{ cm}^2$	$A_2 = 75 \text{ cm}^2$	$I_1 = 156,25 \text{ cm}^4$	$I_2 = 1406,25 \text{ cm}^4$
$A_3 = 75 \text{ cm}^2$		$I_3 = 156,25 \text{ cm}^4$	

Vrsta uporabljenega lesa in obtežna kombinacija

Izbira vrste lesa in obtežne kombinacije:

Vrsta lesa

Slika 6: Prikaz zasnove »I« prereza



Slika 7: Prikaz zasnove »T« prereza

V programu si pod poglavjem »Zasnova prereza« izberemo dolžino l nosilca. V preglednici »Širina elementa« in »Višina elementa« vpišemo podatke o širini b_i ($i = 1,2,3$) in višini h_i ($i = 1,2,3$) posameznih delov prereza, ki sestavljajo naš izbrani prerez. Iz teh podatkov program preračuna ploščine A_i ($i = 1,2,3$) in vztrajnostne momente I_i ($i = 1,2,3$) posameznih delov prereza. Pri tem je treba poudariti, da je del z indeksom »2« osnovni del prereza, na katerega je pritrjena ena ali več pasnic – v našem primeru največ dve pasnici. Če izberemo »T« prerez, ki je sestavljen le iz dveh delov, predpostavljamo, da sta širina b_3 in višina h_3 enaki nič. Tudi ploščina A_3 in vztrajnostni moment I_3 sta enaka nič.

2.3 Material

2.3.1 Lastnosti lesa

Les je organski kompozitni material, ki je sestavljen iz olesenih vzdolžnih vlaken, por in vode. V primerjavi z ostalimi gradbenimi materiali, kot so beton, jeklo, opeka, je zelo enostaven za obdelavo. Je izrazito anizotropen material, kar pomeni, da je njegova trdnost v različnih smereh obremenjevanja različna. Največja je trdnost lesa vzporedno z vlakni, najmanjša pa je pravokotna na vlakna, zato je

treba biti pri projektiranju konstrukcij pazljiv na ustrezno postavitev elementov glede usmerjenosti vlaken.

Prednost lesa je tudi v manjši toplotni prevodnosti in relativno dobri požarni odpornosti kljub temu, da mnogi mislijo nasprotno. Poskusi so pokazali, da se pri gorenju lesa po površini gorečega prereza naredi zогlenela plast, ki deluje kot samozaščita pred nadaljnjimi poškodbami zaradi gorenja. Tako ostanejo mehanske lastnosti lesa dlje časa nespremenjene tudi pri visokih temperaturah. Če je prerez dovolj masiven, lahko kljub požaru še dolgo opravlja svojo funkcijo nosilnosti v objektu. Stanje lesa je predvidljivo tudi ob požaru in zato ga lahko z ustrezno zmanjšano nosilnostjo in merami prereзов upoštevamo pri projektiranju.

V primerjavi z nosilnostjo je lastna teža lesa majhna, kar pomeni, da so objekti, zgrajeni iz lesa tudi bolj odporni na dinamične obremenitve, kamor sodijo tudi potresne sile.

Zaradi njegove organske strukture lahko različne elemente med seboj poljubno sestavljamo in tako lahko na enostaven način oblikujemo zelo razgibane objekte. Les je naravni material in je izpostavljen parazitom ter bakterijam. Neobstojeen je pri izmeničnem spreminjanju vlažnosti v okolici. V takem okolju začne les precej hitro razpadati. Hitrost razpadanja je odvisna tudi od vrste lesa.

2.3.2 Trdnostni razredi masivnega lesa

Med običajni gradbeni les, ki ga uporabljamo za izdelavo nosilnih elementov, sodijo:

- iglavci: smreka, jelka, bor, macesen;
- listavci: hrast, bukev.

Med naštetimi se največ uporablja smrekov in jelkin les, ker sta v primerjavi z ostalimi vrstami cenovno ugodna.

V svetu se danes uporabljata predvsem dva načina razvrščanja lesa:

- vizualno razvrščanje,
- strojno razvrščanje.

Strojno razvrščanje lesa se opravi na podlagi meritev mehanskih količin trdnosti, modula elastičnosti in gostote lesa. Temelji na standardu SIST EN 338:2004, ki navaja karakteristične in projektne trdnosti masivnega lesa.

Trdnostni razred lesa je funkcija trdnosti, elastičnosti in gostote:

$$C_i = C_i(f_{m,k}, E_{0,mean}, \rho), \quad D_i = D_i(f_{m,k}, E_{0,mean}, \rho)$$

pri čemer so:

- $f_{m,k}$ karakteristična upogibna trdnost lesa,
- $E_{0,mean}$ modul elastičnosti lesa vzporedno z vlakni,
- ρ gostota lesa.

Za označevanje lesa listavcev se uporablja oznaka D (angl. deciduous = listavci), za les iglavcev pa C (angl. coniferous = iglavci). Kratici pripišemo število, ki predstavlja karakteristično upogibno trdnost lesa v MPa. Če imamo trdnostni razred C30, kratica »C« označuje les iglavcev ali topolovino, število »30« pa predstavlja karakteristično upogibno trdnost 30 MPa. Pri projektiranju s pomočjo varnostnih faktorjev zmanjšamo trdnostne lastnosti lesa – uporabljamo projektne vrednosti odpornosti. Izračunamo jih z izrazom:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (1)$$

Pri čemer je:

- X_d projektna vrednost trdnosti,
- X_k karakteristična vrednost trdnosti,
- k_{mod} modifikacijski faktor, ki zajame vpliv trajanja obtežbe in vsebnosti vlage na trdnost,
- γ_m materialni varnostni faktor.

Preglednica 1: Delni varnostni faktorji γ_m za materiale (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 26)

Osnovne kombinacije	Faktor
Masivni les	1,30
Lepljeni lamelirani les	1,25
LVL, vezani les, OSB	1,20
Iverne plošče	1,30
Vlakenne plošče	1,30
Vlakenne plošče, srednje trde	1,30
Vlakenne plošče, MDF	1,30
Vlakenne plošče, mehke	1,30
Zveze	1,30
Kovinske ježaste plošče	1,25
Nezgodne kombinacije	1,00

Po enačbi (1) izračunamo odpornosti vseh vrst lesa glede na upogib, nateg, tlak in strig v odvisnosti od trajanja obtežbe in vlažnosti lesa.

Preglednica 2: Razredi trajanja obtežb ter primeri razvrstitve obtežb glede na njihovo trajanje (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 23)

Razred trajanja obtežbe	Kumulativno trajanje karakteristične obtežbe	Primer obtežbe
Trajna	> 10 let	lastna teža
Dolgotrajna	6 mesecev do 10 let	koristna v skladiščih
Srednje dolga	1 teden do 6 mesecev	vsiljena obtežba
Kratkotrajna	< 1 teden	sneg, veter
Trenutna		nezgodna obtežba

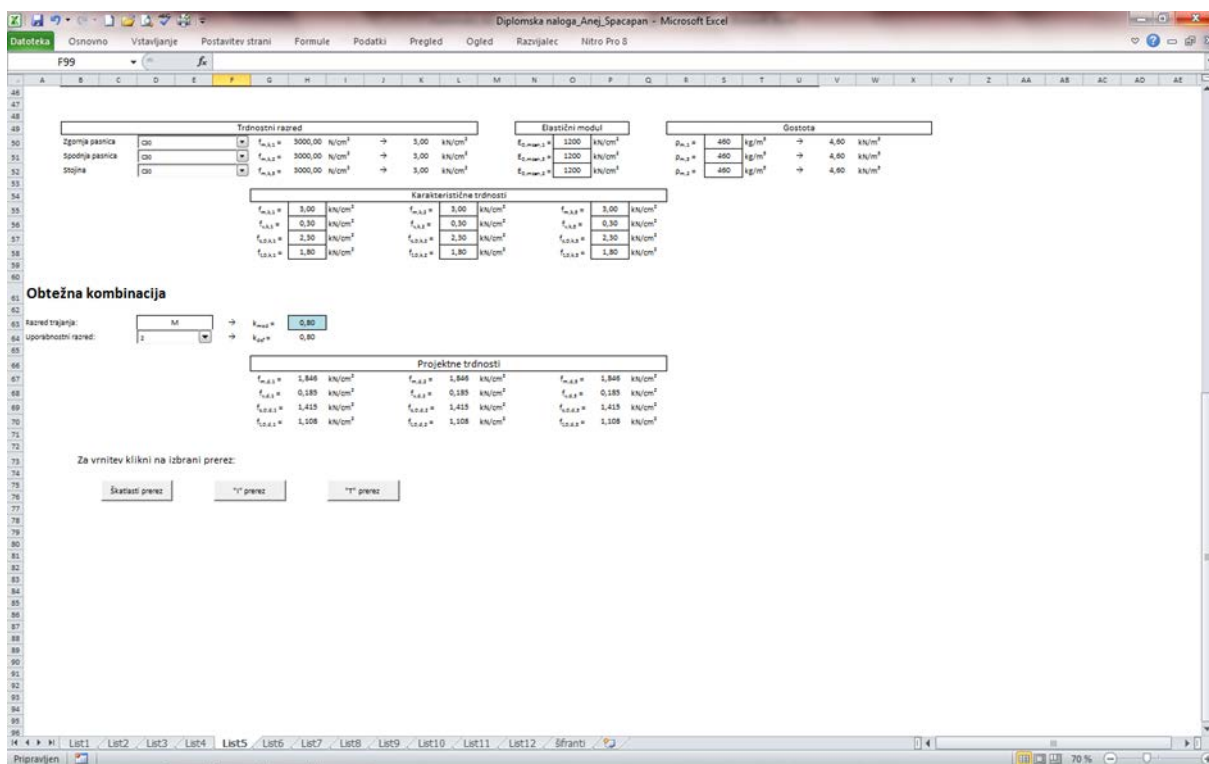
Preglednica 3: Vrednosti modifikacijskega faktorja k_{mod} (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 23)

Razred trajanja obtežbe	Razred uporabe		
	1	2	3
Trajna	0,60	0,60	0,50
Dolgotrajna	0,70	0,70	0,55
Srednje dolga	0,80	0,80	0,65
Kratkotrajna	0,90	0,90	0,70
Trenutna	1,10	1,10	0,90

Preglednica 4: Trdnostni razredi masivnega lesa (Lopatič, 2012: str 25)

TRDNOSTNI RAZREDI - karakteristične in projektne vrednosti																				
		Iglavci in topolovina										Listavci								
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Trdnost [N/cm ²]																				
Upogib	$f_{m,k}$	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2700	3000	3500	4000	4500	5000	3000	3500	4000	5000	6000	7000	
		P	646	738	831	923	1015	1108	1246	1385	1615	1846	2077	2308	1385	1615	1846	2308	2769	3231
	$f_{m,d}$	L	754	862	969	1077	1185	1292	1454	1615	1885	2154	2423	2692	1615	1885	2154	2692	3231	3769
		M	862	985	1108	1231	1354	1477	1662	1846	2154	2462	2769	3077	1846	2154	2462	3077	3692	4308
		S	969	1108	1246	1385	1523	1662	1869	2077	2423	2769	3115	3462	2077	2423	2769	3462	4154	4846
Nateg, paralelno	$f_{t,0,k}$	800	1000	1100	1200	1300	1400	1600	1800	2100	2400	2700	3000	1800	2100	2400	3000	3600	4200	
		P	369	462	508	554	600	646	738	831	969	1108	1246	1385	831	969	1108	1385	1662	1938
	$f_{t,0,d}$	L	431	538	592	646	700	754	862	969	1131	1292	1454	1615	969	1131	1292	1615	1938	2262
		M	492	615	677	738	800	862	985	1108	1292	1477	1662	1846	1108	1292	1477	1846	2215	2585
		S	554	692	762	831	900	969	1108	1246	1454	1662	1869	2077	1246	1454	1662	2077	2492	2908
40	50	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Nateg, pravokotno	$f_{t,90,k}$	18	23	23	23	23	23	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	
		L	22	27	27	27	27	27	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
	$f_{t,90,d}$	M	25	31	31	31	31	31	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
		S	28	35	35	35	35	35	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
		40	50	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Tlak, paralelno	$f_{c,0,k}$	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2500	2600	2700	2900	2300	2500	2600	2900	3200	3400	
		P	738	785	831	877	923	969	1015	1062	1154	1200	1246	1338	1062	1154	1200	1338	1477	1569
	$f_{c,0,d}$	L	862	915	969	1023	1077	1131	1185	1238	1346	1400	1454	1562	1238	1346	1400	1562	1723	1831
		M	985	1046	1108	1169	1231	1292	1354	1415	1538	1600	1662	1785	1415	1538	1600	1785	1969	2092
		S	1108	1177	1246	1315	1385	1454	1523	1592	1731	1800	1869	2008	1592	1731	1800	2008	2215	2354
Tlak, pravokotno	$f_{c,90,k}$	200	220	220	230	240	250	260	270	280	290	310	320	800	840	880	970	1050	1350	
		P	92	102	102	106	111	115	120	125	129	134	143	148	369	388	406	448	485	623
	$f_{c,90,d}$	L	108	118	118	124	129	135	140	145	151	156	167	172	431	452	474	522	565	727
		M	123	135	135	142	148	154	160	166	172	178	191	197	492	517	542	597	646	831
		S	138	152	152	159	166	173	180	187	194	201	215	222	554	582	609	672	727	935
170	180	200	220	240	250	280	300	380	380	380	380	380	300	340	380	460	530	600		
Strig	$f_{v,k}$	170	180	200	220	240	250	280	300	380	380	380	380	300	340	380	460	530	600	
		P	78	83	92	102	111	115	129	138	157	175	175	175	138	157	175	212	245	277
	$f_{v,d}$	L	92	97	108	118	129	135	151	162	183	205	205	205	162	183	205	248	285	323
		M	105	111	123	135	148	154	172	185	209	234	234	234	185	209	234	283	326	369
		S	118	125	138	152	166	173	194	208	235	263	263	263	208	235	263	318	367	415
Deformabilnost - modul [kN/cm²]																				
Modul elastičnosti, paralelno	$E_{0,mean}$	700	800	900	950	1000	1100	1150	1200	1300	1400	1500	1600	1000	1000	1100	1400	1700	2000	
Modul elastičnosti, paralelno	$E_{0,05}$	470	540	600	640	670	740	770	800	870	940	1000	1070	800	870	940	1180	1430	1680	
Modul elastičnosti, pravokotno	$E_{90,mean}$	23	27	30	32	33	37	38	40	43	47	50	53	64	69	75	93	113	133	
Stržni modul	G_{mean}	44	50	56	59	63	69	72	75	81	88	94	100	60	65	70	88	106	125	
Gostota [kg/m³]																				
Gostota, karakteristična	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900	
Gostota, povprečna	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080	

S klikom na gumb »Vrsta lesa« nam program odpre preglednico karakterističnih trdnosti, preglednico vrednosti modifikacijskega faktorja k_{mod} in preglednico vrednosti koeficienta lezenja k_{def} , ki je odvisen od uporabnostnega razreda lesa. Nato se v programu pod preglednico karakterističnih in projektnih trdnosti lesa prikaže preglednica za izbiro trdnostnega razreda lesa, elastični modul $E_{0,mean,i}$, gostota $\rho_{m,i}$ izbranega lesa in preglednica, v kateri so vključene upogibne $f_{m,k,i}$, strižne $f_{v,k,i}$, tlačne $f_{c,0,k,i}$ in natezne $f_{t,0,k,i}$ karakteristične trdnosti lesa ($i = 1,2,3$). Vse te vrednosti se izpišejo ob izbiri trdnostnega razreda lesa za vsak posamezen del prereza posebej.



Slika 8: Prikaz okna za vnašanje trdnostnih karakteristik lesa

2.4 Obtežne kombinacije in projektne trdnosti lesa

V oknu programa za izbiro karakterističnih trdnosti lesa v poglavju »Obtežna kombinacija« vpišemo v namenjene celice delovnega lista podatek o trajanju obtežbe, na podlagi katerega izberemo vrednost modifikacijskega faktorja k_{mod} . Modifikacijski faktor zajema vpliv trajanja obtežbe in vsebnost vlage na trdnost in je nujen za izračun projektne upogibnih $f_{m,d,i}$, strižnih $f_{v,d,i}$, tlačnih $f_{c,0,d,i}$ in nateznih $f_{t,0,d,i}$ trdnosti izbranega lesa. Izračun le-teh poteka ob vpisu karakterističnih trdnosti in modifikacijskega faktorja. Te vrednosti potrebujemo za dokazovanje različnih kontrol, ki so navedene v nadaljevanju.

Z izbiro ustreznega uporabnostnega razreda lesa se izpiše vrednost modifikacijskega faktorja, s katerim program izračuna projektne vrednosti trdnosti lesa za ustrezen razred trajanja.

2.5 Obtežba nosilca

Osnovne kombinacije vplivov za mejna stanja nosilnosti zapišemo v skladu s standardom SIST EN 1990:2004:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

pri čemer so:

- $\gamma_{G,j}$ delni varnostni faktor za stalni vpliv,
- γ_P delni varnostni faktor za prednapetje,
- $\gamma_{Q,1}$ delni varnostni faktor za prevladujočo spremenljivo obtežbo,
- $\gamma_{Q,i}$ delni varnostni faktor za preostalo spremenljivo obtežbo,
- $G_{k,j}$ stalna obtežba,
- P obtežba zaradi prednapetja,
- $Q_{k,1}$ prevladujoča spremenljiva obtežba,
- $Q_{k,i}$ preostala spremenljiva obtežba.

Preglednica 5: Delni varnostni faktorji za vplive – osnovne kombinacije (Lopatič, 2012: str 28)

	Stalni vplivi	Spremenljivi vplivi	
		Prevladujoč	Preostali (kombinacijska vrednost)
Ugoden učinek vpliva $\gamma_{F,inf}$	1,00	0,00	0,00
Neugoden učinek vpliva $\gamma_{F,sup}$	1,35	1,50	1,50

Pri obravnavani analizi sestavljenih lesenih nosilcev upoštevamo stalne in spremenljive vplive. Izmed stalnih vplivov upoštevamo lastno težo nosilca $g_{l.t.}$ in preostalo stalno obtežbo $g_{p.o.}$, izmed spremenljivih vplivov pa le koristno obtežbo q_z . Obe obtežbi delujeta v smeri koordinatne osi z . Program izračuna lastno težo nosilca $g_{l.t.}$ ob vnosu podatkov o dolžini nosilca, zasnovi prečnega prereza ter vrsti lesa. Vrednosti preostale stalne obtežbe $g_{p.o.}$ in koristne obtežbe q_z pa vpišemo v označeni celici v programu. Ko je vsa obtežba definirana, program po zgornjem izrazu (2) izračuna projektno obtežbo na izbrani nosilec.

2.6 Vezna sredstva in razdalje med njimi

Osnovna naloga mehanskih veznih sredstev v lesenih konstrukcijah je povezovanje sestavnih delov prereza v celoto in preprečevanje zdrsov ali zamikov med posameznimi deli. Do zdrsov ali zamikov prihaja zaradi podajnosti veznih sredstev in deformabilnosti lesa. To pomeni, da vezna sredstva pri lesenih konstrukcijah ne zagotavljajo povsem toge povezave med sestavnimi deli.

V diplomski nalogi smo obravnavali mehanska vezna sredstva – gladke žeblje. Karakteristična nosilnost žebeljev je določena s standardom SIST EN 1995-1-1:2005 in pomeni nosilnost veznega sredstva v strižni ravnini. Odvisna je od:

- števila strižnih ravnin (enostrižna, dvostrizna, večstrižna),
- vrste povezanih materialov (npr. les-les, les-pločevina, les-vezana plošča...),
- trdnostnega razreda povezanih materialov,
- uporabnostnega razreda materialov,
- vrste žebeljev,
- načina izvedbe zabijanja žeblja (predhodno vrtana luknja, brez predhodno vrtane luknje).

V standardu SIST EN 1995-1-1:2005 so obravnavani žebliji (preglednica 6) podanih karakteristik, opisani z dolžino in debelino žeblja.

Preglednica 6: Tipizirane vrste zabitih in uvrtnih žebeljev (Premrl, Dobrila, 2008: str 175)

Oznaka	d [mm]	l [mm]
22/10 x 45-50	2,2	45, 50
25/10 x 55-60	2,5	55,60
28/10 x 65	2,8	65
31/10 x 70-80-90	3,1	70, 80, 90
34/10 x 90	3,4	90
38/10 x 100	3,8	100
42/10 x 110	4,2	110
46/10 x 130	4,6	130
55/10 x 140-160	5,5	140, 160
60/10 x 180	6,0	180
70/10 x 210	7,0	210
75/10 x 230	7,5	230
80/10 x 280	8,0	280
90/10 x 310	9,0	310

V nalogi se omejimo na enostrižne zveze med dvema elementoma iz masivnega lesa. V nadaljevanju prikažemo t.i. Johansenove enačbe, s katerimi izračunamo bočno nosilnost žeblja v eni strižni ravnini. S pomočjo teh enačb, ki jih določa standard SIST EN 1995-1-1:2005, izračunamo bočno nosilnost

jeklenega veznega sredstva v eni priključni ravnini glede na vrsto porušitve. Za merodajno bočno nosilnost se vzame najmanjša izmed izračunanih vrednosti:

- a) vezno sredstvo vzporedno vtisnjeno v prvem sestavnem delu:

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d, \quad (3)$$

- b) vezno sredstvo vzporedno vtisnjeno v drugem sestavnem delu:

$$F_{v,Rk} = f_{h,2,d} \cdot t_2 \cdot d, \quad (4)$$

- c) zasuk veznega sredstva:

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (5)$$

- d) plastifikacija veznega sredstva v drugem sestavnem delu:

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (6)$$

- e) plastifikacija veznega sredstva v prvem sestavnem delu:

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (7)$$

- f) plastifikacija veznega sredstva v obeh sestavnih delih prereza:

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}. \quad (8)$$

pri čemer so:

- $f_{h,1,k}$ bočna trdnost lesa v prvem sestavnem delu prereza,
- $f_{h,2,k}$ bočna trdnost lesa v drugem sestavnem delu prereza,

- t_1 dolžina veznega sredstva v prvem sestavnem delu prereza,
- t_2 dolžina veznega sredstva v drugem sestavnem delu prereza,
- d debelina veznega sredstva,
- β razmerje bočnih trdnosti

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}, \quad (9)$$

- $M_{y,Rk}$ vrednost upogibnega momenta pri popolni plastifikaciji jekla,
- $F_{ax,Rk}$ izvlečna nosilnost.

Projektna nosilnost – odpornost žebeljev se določi s pomočjo izraza:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_m} \quad (10)$$

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'Diplomska naloga_Anej_Spacapan - Microsoft Excel'. The main content is a table for selecting nails, with columns for diameter (2.2 to 9 mm) and rows for various properties. Below the table, there are two sections for selecting nails for 'Strižna ravnina 1/2' and 'Strižna ravnina 2/3', showing calculated values for diameter, length, weight, and strength.

	2.2	2.5	2.5	2.5	2.8	3.1	3.1	3.1	3.1	3.8	4.2	4.6	5.5	5.5	6	7	7.5	8	9	
11 Debelina [mm]	2.2	2.5	2.5	2.5	2.8	3.1	3.1	3.1	3.1	3.8	4.2	4.6	5.5	5.5	6	7	7.5	8	9	
12 Dolžina [mm]	45	50	55	60	65	65	70	80	90	100	110	130	140	160	180	210	230	280	310	
13 ρ_k [mm]	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
14 ρ_k [mm]	17.6	17.6	20.0	20.0	22.4	24.8	24.8	24.8	27.2	30.4	33.6	36.8	44.0	44.0	48.0	56.0	60.0	64.0	72.0	72.0
15 Min. gl. zab [mm]	17.6	17.6	20.0	20.0	22.4	24.8	24.8	24.8	27.2	30.4	33.6	36.8	44.0	44.0	48.0	56.0	60.0	64.0	72.0	72.0
16 Max. deb. lesa 1 [mm]	27.4	32.4	35.0	40.0	42.6	40.2	45.2	55.1	62.8	69.6	76.4	93.2	96.0	116.0	132.0	154.0	170.0	216.0	238.0	238.0
17 Min. deb. lesa 1 [mm]	15.4	15.4	17.5	17.5	19.6	21.7	21.7	21.7	23.8	26.6	29.4	32.2	39.4	39.4	45.6	58.0	64.1	70.3	82.7	82.7
18 Min. deb. lesa 2 [mm]	15.4	15.4	17.5	17.5	19.6	21.7	21.7	21.7	23.8	26.6	29.4	32.2	39.4	39.4	45.6	58.0	64.1	70.3	82.7	82.7
19 Brez predh. vrt. $f_{v,1}$ [N/mm ²]	24.60	24.60	23.67	23.67	22.88	22.19	22.19	22.19	21.59	20.88	20.26	19.71	18.68	18.68	18.20	17.38	17.02	16.70	16.12	16.12
20 Brez predh. vrt. $f_{v,2}$ [N/mm ²]	24.60	24.60	23.67	23.67	22.88	22.19	22.19	22.19	21.59	20.88	20.26	19.71	18.68	18.68	18.20	17.38	17.02	16.70	16.12	16.12
21 Predh. vrt. $f_{v,1}$ [N/mm ²]	30.47	30.47	30.38	30.38	30.19	30.19	30.19	30.19	30.10	29.98	29.85	29.73	29.45	29.45	29.29	28.98	28.82	28.67	28.36	28.36
22 Predh. vrt. $f_{v,2}$ [N/mm ²]	30.47	30.47	30.38	30.38	30.19	30.19	30.19	30.19	30.10	29.98	29.85	29.73	29.45	29.45	29.29	28.98	28.82	28.67	28.36	28.36
23 β	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
24 $M_{y,Rk}$ [Nm]	1398.21	1398.21	1949.47	1949.47	2617.48	3410.46	3410.46	3410.46	4396.28	5790.42	7511.40	9515.75	15143.12	15143.12	18987.41	28348.33	33918.12	40114.97	54488.27	54488.27
25 $F_{v,Rk}$ [N]	447	447	552	552	666	788	788	788	917	1102	1300	1511	2029	2029	2342	3020	3385	3765	4572	4572

Below the table, there are two sections for selecting nails for 'Strižna ravnina 1/2' and 'Strižna ravnina 2/3', showing calculated values for diameter, length, weight, and strength.

Strižna ravnina 1/2		Strižna ravnina 2/3	
d =	4.2 mm	d =	4.2 mm
l =	110 mm	l =	110 mm
n =	2	n =	2
s_{nk} =	4 cm	s_{nk} =	4 cm
s_{nk} =	2 cm	s_{nk} =	2 cm
$F_{v,Rk}$ =	1300	$F_{v,Rk}$ =	1300
$F_{v,Rd}$ =	0,800 kN	$F_{v,Rd}$ =	0,800 kN

Slika 9: Prikaz okna za izbiro žebeljev

V programu moramo pred izbiro ustreznih žebeljev izbrati karakteristično trdnost lesa, zaradi upoštevanja karakteristične gostote ρ_k v enačbah za izračun karakteristične vtiske trdnosti $f_{h,1,k}$ in $f_{h,2,k}$. Indeks »1« označuje les prvega dela, indeks »2« pa les osnovnega dela, na katerega je prabit prvi del.

Nato določimo, kako bomo žeblje vgradili v les. Izbiramo med možnostma zabijanja »brez predhodnega vrtanja lukenj« ali zabijanja s »predhodnim vrtanjem lukenj« v les. Če si izberemo les, ki ima karakteristično gostoto večjo od 500 kg/m^3 , moramo po standardu žeblje zabiti v les s predhodnim vrtanjem lukenj. Program avtomatsko zazna mejno vrednost gostote in ne dopušča izbire zabijanja žabljev brez predhodnega vrtanja.

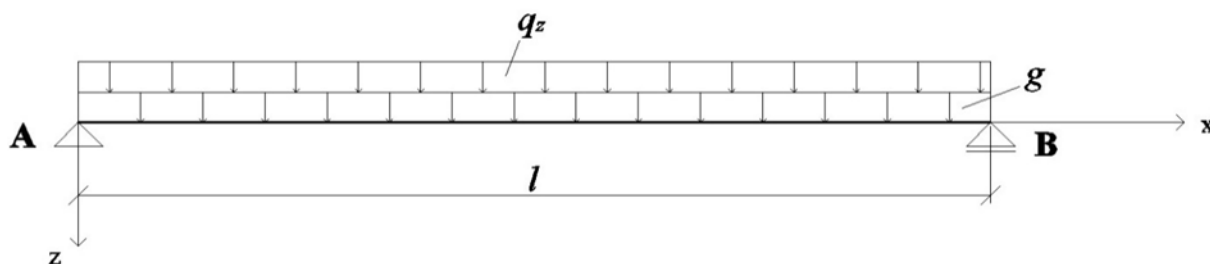
Pri izračunu karakteristične nosilnosti žabljev zanemarimo prispevek izvlečnega mehanizma $F_{ax,Rk}/4$. S klikom na gumb »Karakteristična nosilnost žabljev« program izračuna Johansenove enačbe in določi karakteristično nosilnost žablja za vsak tip posebej. Nato izberemo primeren žebelj. Dela se lotimo tako, da poiščemo, v kateri interval maksimalne debeline lesa in minimalne debeline lesa 1 pade debelina dela t_1 , ki ga priključujemo na osnovni del. Mere izbranih žabljev, debelino d in dolžino l , vpišemo v preglednico, ki nam služi za izračun projektne vrednosti nosilnosti žabljev pri kontroli nosilnosti veznih sredstev.

S klikom na gumb se vrnemo na zasnovo izbranega prereza.

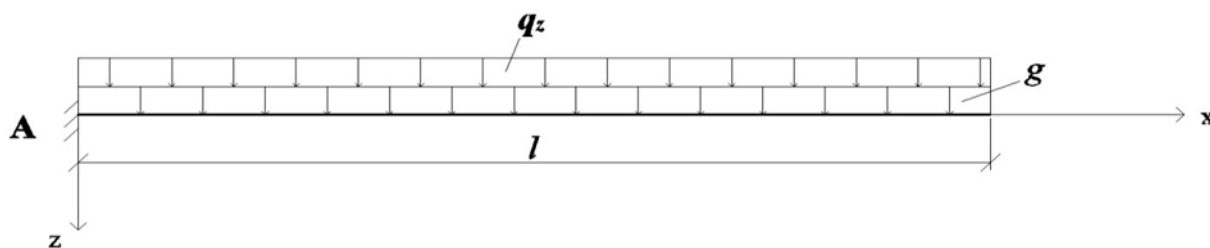
2.7 Statični sistem

Pri analizi sestavljenih lesenih nosilcev lahko s klikom na gumb izbiramo med dvema različnima enostavnima statičnima sistemoma:

- prostoležeči nosilec,
- konzolni nosilec.



Slika 10: Skica računskega modela prostoležečega nosilca



Slika 11: Skica računskega modela konzolnega nosilca

Oba statična sistema sta poljubne dolžine l , obremenjena z enakomerno porazdeljeno obtežbo, lastno težo $g_{l.t.}$ in preostalo stalno obtežbo $g_{p.o.}$ ter koristno obtežbo q_z . Vsota lastne teže nosilca in preostale stalne obtežbe je stalna obtežba nosilca g . Vsa obtežba deluje v smeri koordinatne osi z .

2.8 Notranje statične količine

Izračun notranjih statičnih količin, upogibnih momentov in prečnih sil, se izvede za izbrani statični sistem v mejnem stanju nosilnosti. Ob znani projektne obtežbi $q_{z,d}$ lahko zapišemo formule za izračun momentov $M_{y,d}(x)$ in prečnih sil $V_{z,d}(x)$ v odvisnosti od dolžine nosilca:

- prostoležeči nosilec

$$M_{y,d}(x) = q_{z,d} \cdot \left(\frac{l}{2}\right) \cdot x - q_{z,d} \cdot \left(\frac{x^2}{2}\right), \quad (11)$$

$$V_{z,d}(x) = q_{z,d} \cdot \left(\frac{l}{2}\right) - q_{z,d} \cdot x, \quad (12)$$

- konzolni nosilec

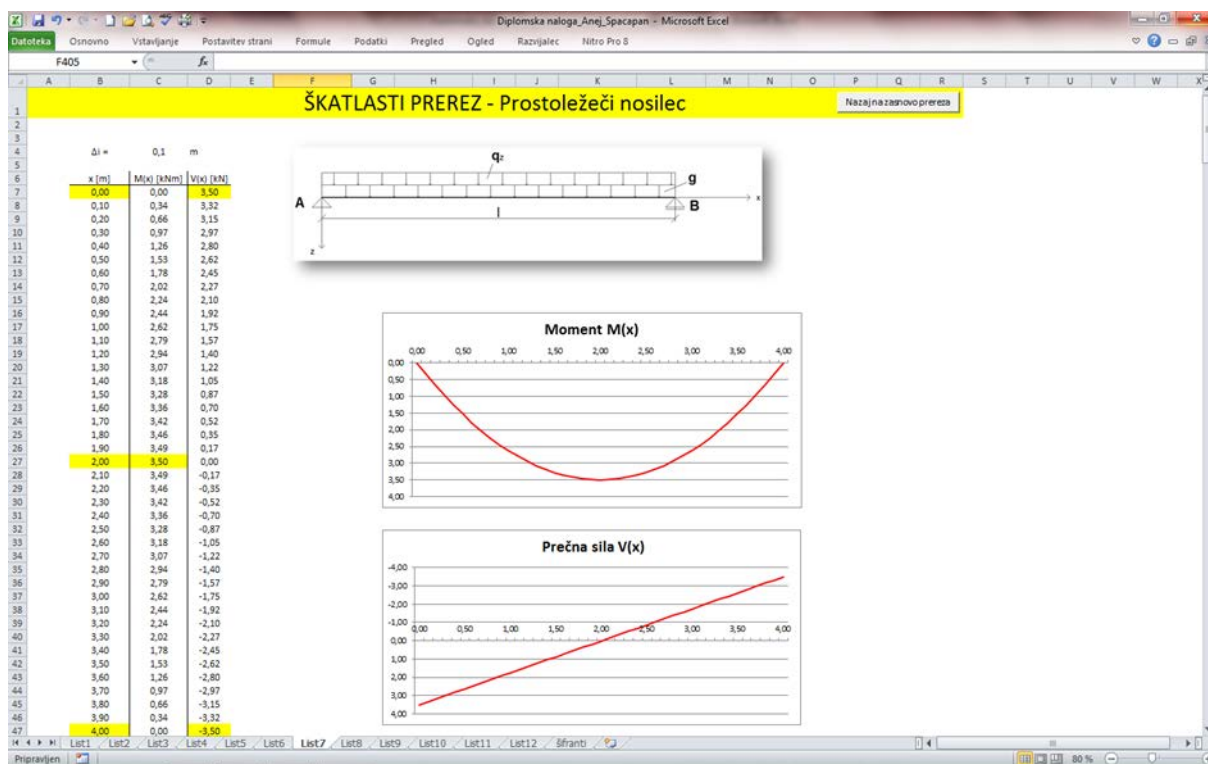
$$M_{y,d}(x) = q_{z,d} \cdot l \cdot x - q_{z,d} \cdot \left(\frac{x^2}{2}\right) - q_{z,d} \cdot \left(\frac{l^2}{2}\right), \quad (13)$$

$$V_{z,d}(x) = q_{z,d} \cdot l - q_{z,d} \cdot x, \quad (14)$$

pri čemer so:

- $M_{y,d}(x)$ vrednost projektne momenta v odvisnosti od koordinate x ,
- $q_{z,d}$ projektne obtežbe na nosilec,
- l dolžina nosilca,
- $V_{z,d}(x)$ vrednost projektne prečne sile v odvisnosti od koordinate x ,
- x dolžina, na kateri določamo notranje sile.

Za ponazoritev izračuna momentov, prečnih sil in kontrol po standardu, izberemo škatlasti prerez in prostoležeči nosilec. Pri izračunu notranjih sil program razdeli dolžino izbranega nosilca na štirideset enakih delov, dolžine Δi . Razdelitev na štirideset delov smo izbrali zato, da je prikazani potek notranjih sil dokaj natančen (Slika 12).



Slika 12: Prikaz okna programa za izračun notranjih sil za škatlasti prerez prostoležečega nosilca

2.9 Normalne napetosti v težiščih in robovih posameznih delov prereza

2.9.1 Težišče prereza

Oddaljenost težišča osnovnega dela prereza od težišča celotnega sestavljenega prereza je določena z izrazom:

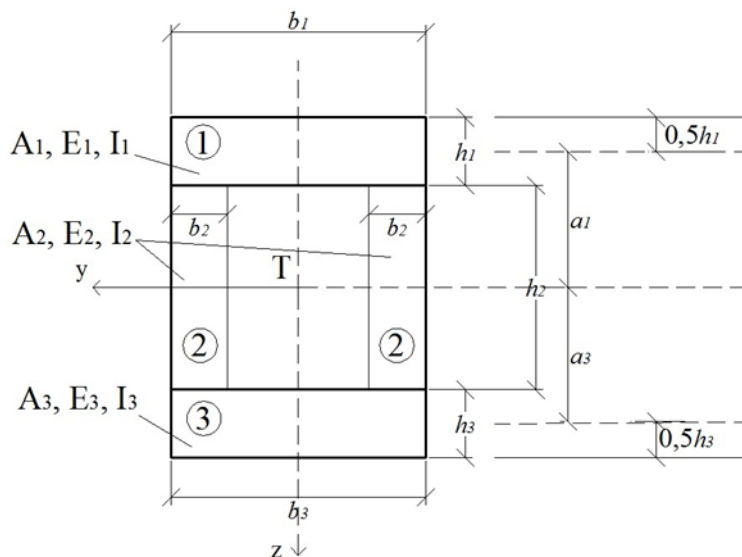
$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i} \quad (15)$$

Pri »T« prerezu, ki je sestavljen iz dveh delov, predpostavljamo, da je višina tretjega dela enaka nič ($h_3 = 0$) in iz tega potem tudi sledi, da je ploščina tretjega dela prereza enaka nič $A_3 = 0$.

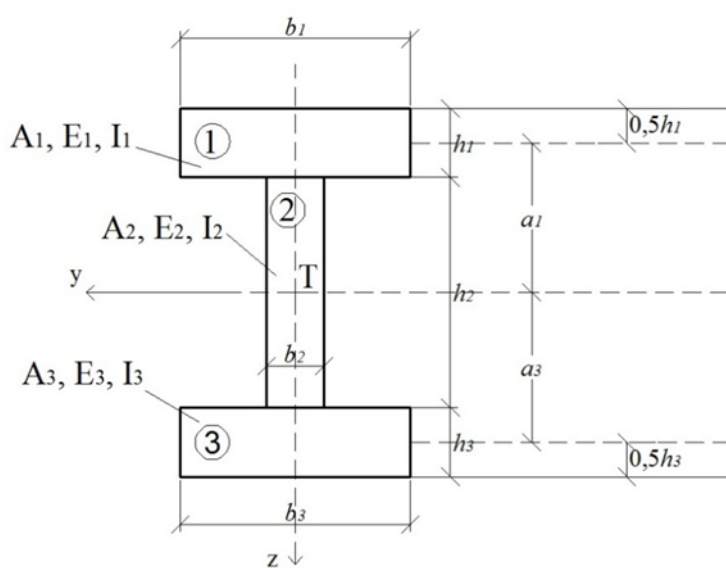
Pri simetričnih prerezih, kjer so pasnice enakih dimenzij in so v obeh stičnih ravninah enaka vezna sredstva, je $a_2 = 0$, kar pomeni, da leži koordinatna os y ravno na polovici višine celotnega prereza.

Če imamo v prerezu dve ali več stojin, jih združimo v eno, z vsoto širin b_2 osnovnega prereza, saj takšna združitev ne vpliva na sam izračun normalnih ali strižnih napetosti, niti na podajnost veznih

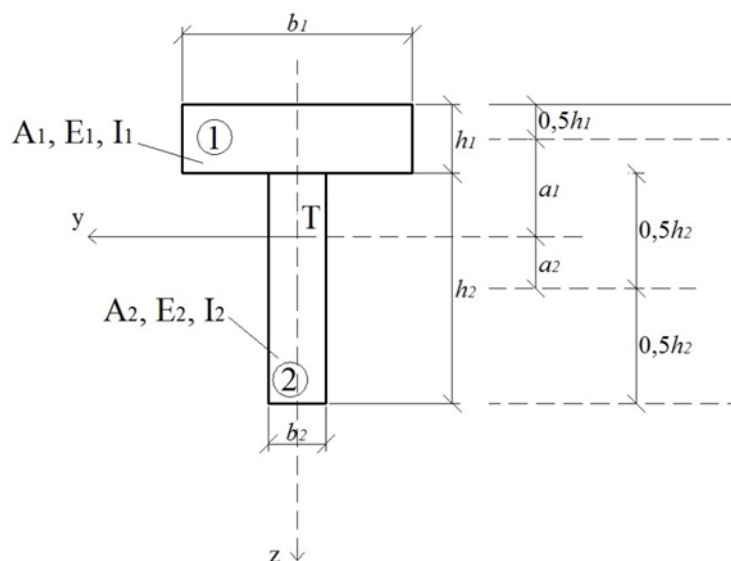
sredstev, izračun pa se poenostavi. Pomembno je, da pravilno izberemo osnovni del prereza (na sliki 16 je označen s številko »2«) in upoštevamo število vrst zabitih žbljev n .



Slika 13: Skica škatlastega prereza z oznakami



Slika 14: Skica »I« prereza z oznakami



Slika 15: Skica »T« prereza z oznakami

2.9.2 Podajnost veznih sredstev

Naloga veznih sredstev v lesenih konstrukcijah je, da med seboj povezujejo sestavne dele prereza v celoto in pri tem deloma preprečujejo medsebojne zdrse v priključnih ravninah. Mehanska vezna sredstva v lesenih konstrukcijah ne zagotavljajo povsem toge povezave med posameznimi elementi in zaradi tega bistveno spremenijo napetostno stanje v elementu. Z izračunom podajnosti veznih sredstev reduciramo togost prereza pri upogibu. Enačba za podajnost veznih sredstev, ki vežejo priključne dele prereza, je:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot l^2}}; \quad (i = 1, 3) \quad (16)$$

pri čemer so:

- $E_i = E_{0,mean,i}$ elastični modul posameznega dela prereza,
- A_i ploščina prečnega prereza posameznega dela prereza,
- s_i računska razdalja med veznimi sredstvi v ravnini i ($i = 1, 3$)

$$s_i = \frac{s_{dej}}{n}, \quad (17)$$

- s_{dej} dejanski razmik med veznimi sredstvi,
- n število veznih sredstev v vrsti,

- K_i modul zdrsa (K_{ser} ali K_u)

$$K_i = K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (18)$$

- K_u modul zdrsa veznega sredstva v mejnem stanju nosilnosti,
- K_{ser} modul zdrsa veznega sredstva v mejnem stanju uporabnosti

za vijake, trne, žeblice s predhodno vrtano luknjo je določena z izrazom

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \text{ [N/mm]}, \quad (19)$$

za žeblice brez predhodno vrtane luknje pa z izrazom

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8}}{30} \text{ [N/mm]}, \quad (20)$$

- ρ_m je srednja vrednost gostote lesa v kg/m^3 ,
- d je debelina veznega sredstva v mm.

Program omogoča analizo sestavljenih lesenih nosilcev, povezanih z gladkimi žeblici standardnih dimenzij, s predhodno vrtano luknjo ali brez predhodno vrtane luknje. Izbiro označimo s klikom na potrditveno polje. Tako program izračuna modul zdrsa K_{ser} v mejnem stanju uporabnosti in modul zdrsa K_u v mejnem stanju nosilnosti ter podajnost žebeljev v obeh mejnih stanjih.

2.9.3 Nadomestna upogibna togost prereza

Nadomestna upogibna togost predstavlja togost celotnega prečnega prereza sestavljenega nosilca, z upoštevanjem podajnosti veznih sredstev, je določena z naslednjim izrazom:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (21)$$

pri tem so:

- $E_i = E_{0,mean,i}$ modul elastičnosti posameznega dela prereza,
- I_i vztrajnostni moment posameznega dela prereza okoli koordinatne osi y

$$I_i = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}, \quad (22)$$

- γ_i podajnost veznih sredstev (MSN, MSU),
- A_i ploščina prečnega prereza posameznega dela prereza

$$A_i = b_i \cdot h_i, \quad (23)$$

- a_i oddaljenost težišča posameznih delov prereza od skupnega težišča prereza.

Program izračuna nadomestno upogibno togost prereza v mejnem stanju nosilnosti in nadomestno upogibno togost v mejnem stanju uporabnosti. Slednja se uporabi le pri kontroli povosov.

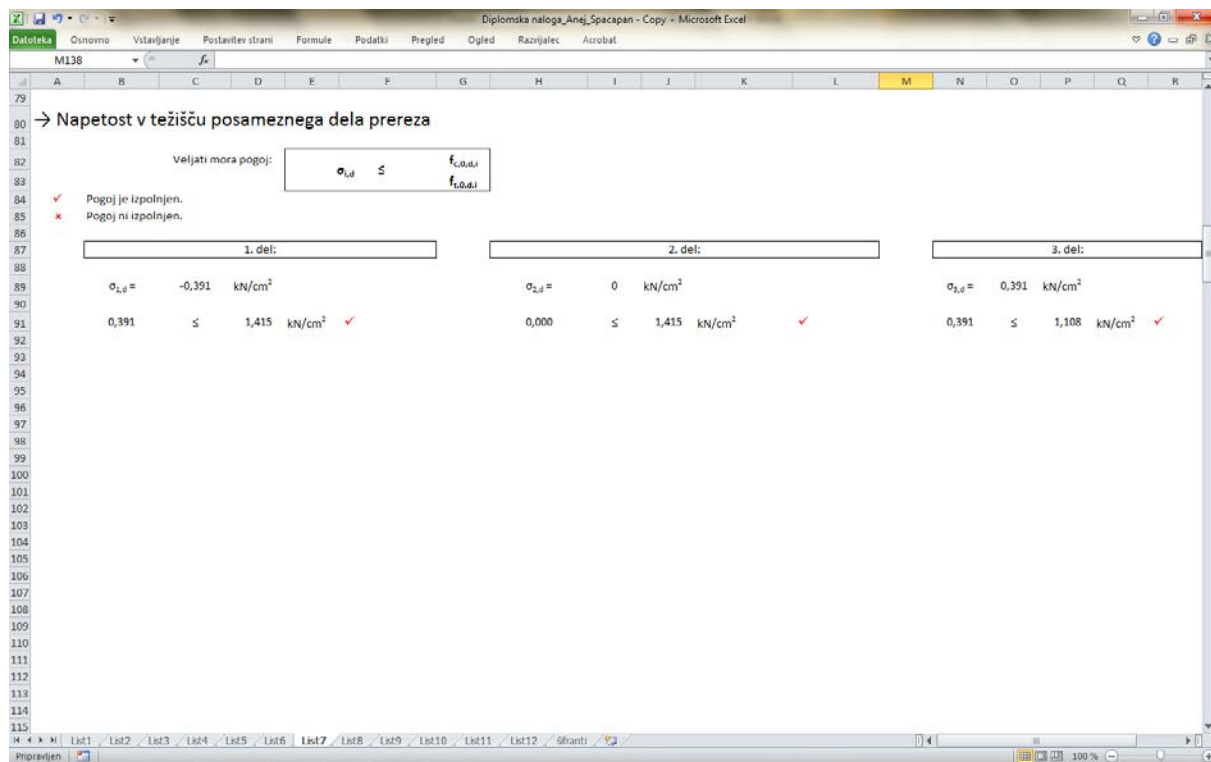
2.9.4 Izračun normalnih napetosti v težiščih in robovih posameznih delov prereza

Kontrola normalnih napetosti se izvaja v težiščih posameznih delov prereza in se izvede z naslednjim izrazom iz SIST EN 1995-1-1:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M_{y,\max,d}}{(EI)_{ef}} \leq \begin{cases} f_{c,0,d} \\ f_{t,0,d} \end{cases} \quad (24)$$

pri čemer so:

- σ_i tlačna oz. natezna napetost v težišču posameznega dela prereza,
- γ_i faktor togosti veznih sredstev v spoju med i -tim in drugim delom: $0 \leq \gamma_i \leq 1$;
drugi del je osnovni del, na katerega so priključeni ostali deli prereza ($\gamma_2 = 1,0$),
- $E_i = E_{0,\text{mean}}$ elastični modul posameznega dela prereza,
- a_i oddaljenost težišča posameznega dela prereza od skupnega težišča prereza,
- $(EI)_{ef}$ nadomestna upogibna togost prereza,
- $f_{c,0,d}$ projektna tlačna trdnost izbranega dela prereza,
- $f_{t,0,d}$ projektna natezna trdnost izbranega dela prereza.



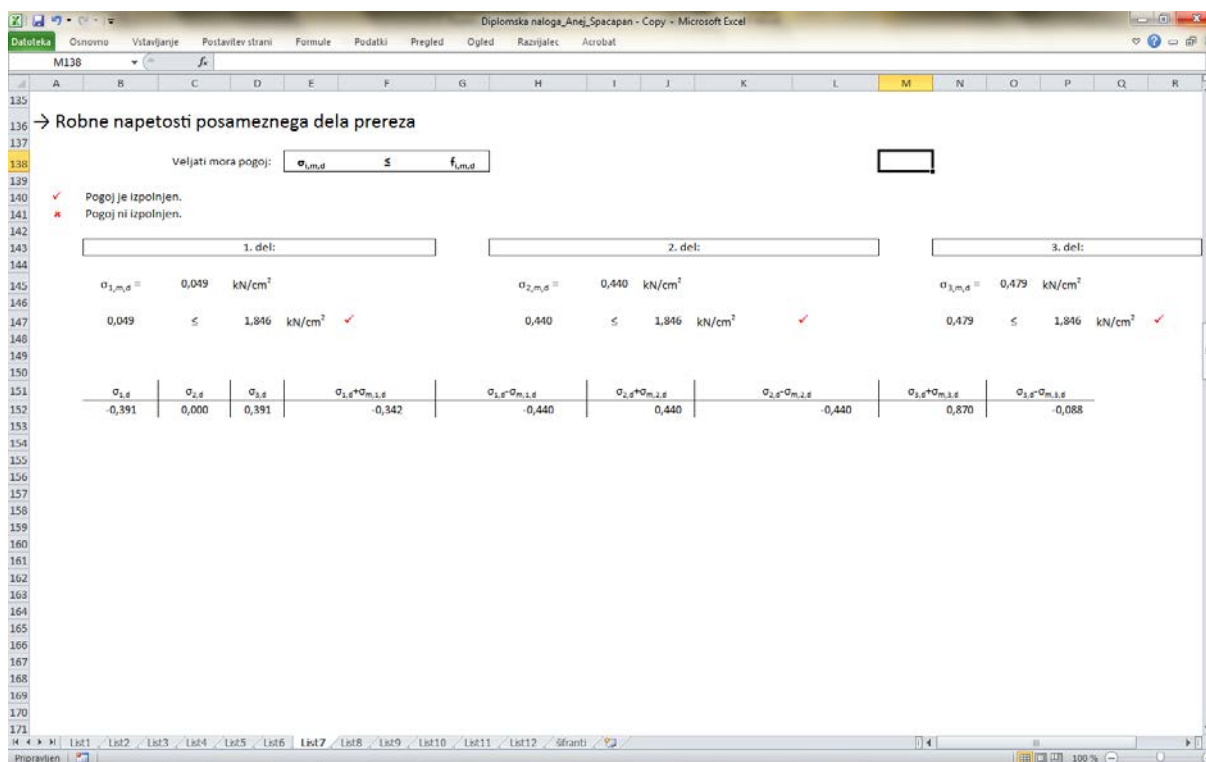
Slika 16: Prikaz okna za izračun normalnih napetosti v težišču elementov prereza

Razliko napetosti v težišču in na robu posameznih delov prereza, določimo z enačbo:

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot M_{y,\max,d}}{(EI)_{ef}}, \quad (25)$$

pri čemer so:

- $\sigma_{m,i}$ razlika med napetostma v težišču in na robu posameznega dela prereza,
- $E_i = E_{0,\text{mean},i}$ modul elastičnosti posameznega dela prereza,
- h_i višina posameznega dela prereza,
- $M_{y,\max,d}$ največji projektni moment,
- $(EI)_{ef}$ nadomestna upogibna togost prereza.



Slika 17: Prikaz okna za izračun robnih napetosti za vsak element prereza

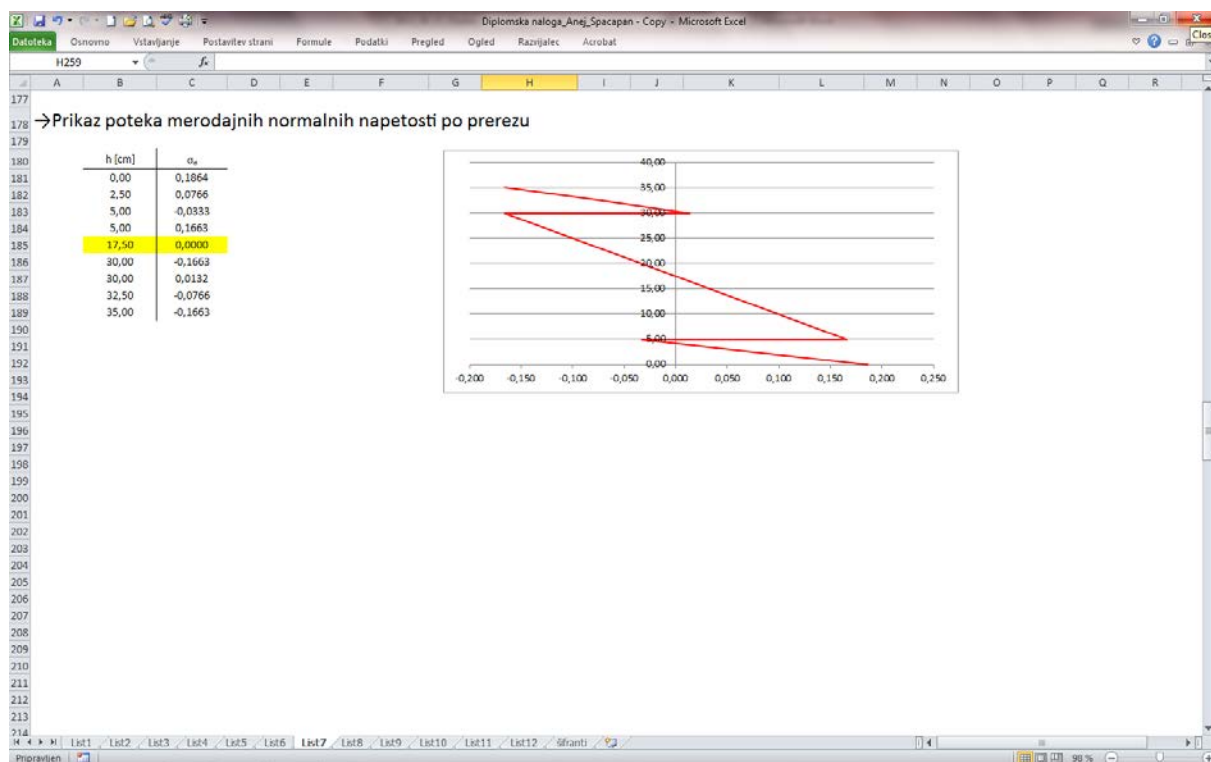
Največja napetost na robu ne sme presegati projektne upogibne trdnosti lesa izbranega dela:

$$\sigma_i + \sigma_{m,i} \leq f_{m,d} ; (i = 1, 2, 3) \quad (26)$$

- $f_{m,d}$ projektna upogibna trdnost izbranega lesa.

Če izračunane napetosti presegajo projektno trdnost, povečamo prerez ali izberemo novo vrsto lesa z večjo trdnostjo ali uporabimo močnejša vezna sredstva ali zmanjšamo razmik med veznimi sredstvi.

Program izračuna potek normalnih napetosti po višini najbolj obremenjenega prereza in vrednosti prikaže v grafu.



Slika 18: Prikaz poteka normalnih napetosti po višini prereza

2.10 Strižne napetosti

Največje strižne napetosti se v naših oblikah prerezov pojavijo v osnovnem delu prereza, na katerega so pritrjeni ostali deli, in sicer v težišču celotnega sestavljenega prereza. Strižne napetosti morajo ustrezati pogoju:

$$\tau_{2,\max,d} \leq f_{v,d} \quad (27)$$

pri čemer sta:

- $\tau_{2,\max,d}$ največja strižna napetost v osnovnem delu prereza (2),
- $f_{v,d}$ računaska strižna trdnost osnovnega dela prereza (2).

Največja strižna napetost je:

$$\tau_{2,\max,d} = \frac{V_{Ed} \cdot (\gamma_3 \cdot E_3 \cdot a_3 \cdot A_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h^2)}{(EI)_{ef} \cdot b_2} \quad (28)$$

pri čemer so:

- V_{Ed} projektna prečna sila $V_{Ed} = V_{Ed}(x)$ v obravnavanem prerezu,
- γ_3 faktor togosti veznih sredstev v spoju med tretjim in osnovnim delom prereza,
- $E_3 = E_{0,mean,3}$ modul elastičnosti tretjega dela prereza,
- a_3 oddaljenost težišča tretjega dela prereza od skupnega težišča prereza,
- A_3 ploščina prečnega prereza tretjega dela prereza

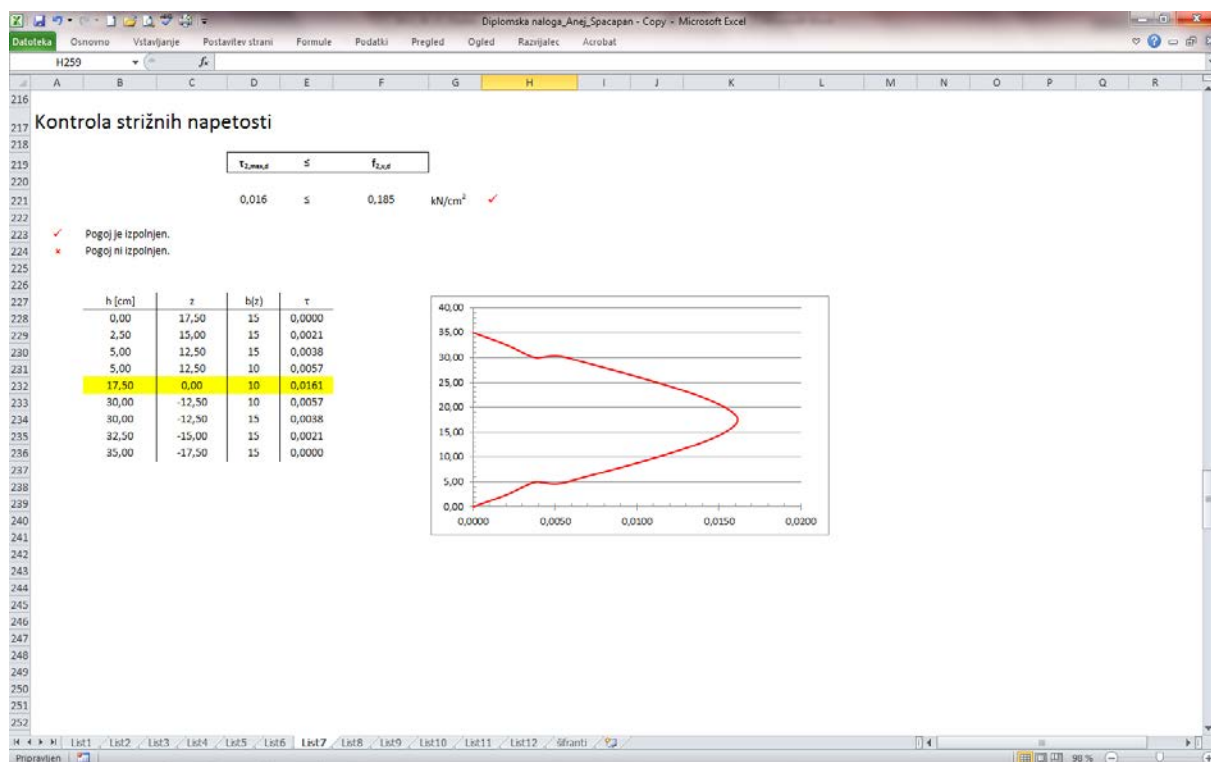
$$A_3 = b_3 \cdot h_3, \quad (29)$$

- $E_2 = E_{0,mean,2}$ elastični modul osnovnega dela prereza,
- b_2 širina osnovnega dela prereza,
- h_2 oddaljenost skupnega težišča oziroma y -osi od spodnjega roba osnovnega dela,
- $(EI)_{ef}$ nadomestna upogibna togost prereza.

Prav tako kakor za normalne napetosti tudi tukaj program izračuna potek strižnih napetosti po višini prereza v najbolj obremenjenem prerezu nosilca. Za izračun se uporabi izraz (28), ki izračuna strižne napetosti po osnovnem delu prereza ter izraz:

$$\tau_i = \frac{V_{Ed} \cdot 0,5 \cdot E_i \cdot b_i \cdot \gamma_i \cdot h_i^2}{(EI)_{ef} \cdot b_i}; \quad i = (1, 3) \quad (30)$$

ki izračuna strižne napetosti v posameznem delu prereza nosilca, ki je pritrjen na osnovni del. Izračunane vrednosti prikaže v obliki grafa.



Slika 19: Prikaz kontrole in poteka strižnih napetosti po višini prereza

2.11 Nosilnost veznih sredstev

Pri kontroli veznih sredstev, ki so nameščena v strižnih ravninah – ravninah na stikih med osnovnim delom prereza in deli prereza, ki so na osnovnega pritrjeni z žblji, mora veljati pogoj:

$$F_{i,Ed} \leq F_{v,i,Rd} \quad \text{ali} \quad \frac{F_{i,Ed}}{F_{v,i,Rd}} \leq 1; \quad (i = 1, 3), \quad (31)$$

pri čemer sta:

- $F_{i,Ed}$ projektna obremenitev enega veznega sredstva v strižni ravnini i ($i = 1, 3$),
- $F_{v,i,Rd}$ projektna odpornost enega veznega sredstva v ustrezni strižni ravnini i ($i = 1, 3$),

Veljati mora torej:

$$\frac{F_{1,Ed}}{F_{v,1,Rd}} \leq 1 \quad (32)$$

za vezna sredstva v strižni ravnini med osnovnim delom (2) in prvim (1) delom prereza,

$$\frac{F_{3,Ed}}{F_{v,3,Rd}} \leq 1 \quad (33)$$

za vezno sredstvo v strižni ravnini med osnovnim delom (2) in tretjim (3) delom prereza.

Računsko obremenitev enega veznega sredstva v strižni ravnini določimo z izrazom:

$$F_{i,Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot A_i \cdot s_i}{(EI)_{ef}} \quad (34)$$

pri čemer so:

- V_{Ed} projektna prečna sila $V_{Ed} = V_{Ed}(x)$,
- γ_i podajnost veznih sredstev,
- $E_i = E_{0,mean,i}$ modul elastičnosti posameznega dela prereza,
- a_i oddaljenost težišča posameznih delov prereza od skupnega težišča prereza,
- A_i ploščina prečnega prereza posameznega dela prereza

$$A_i = b_i \cdot h_i, \quad (35)$$

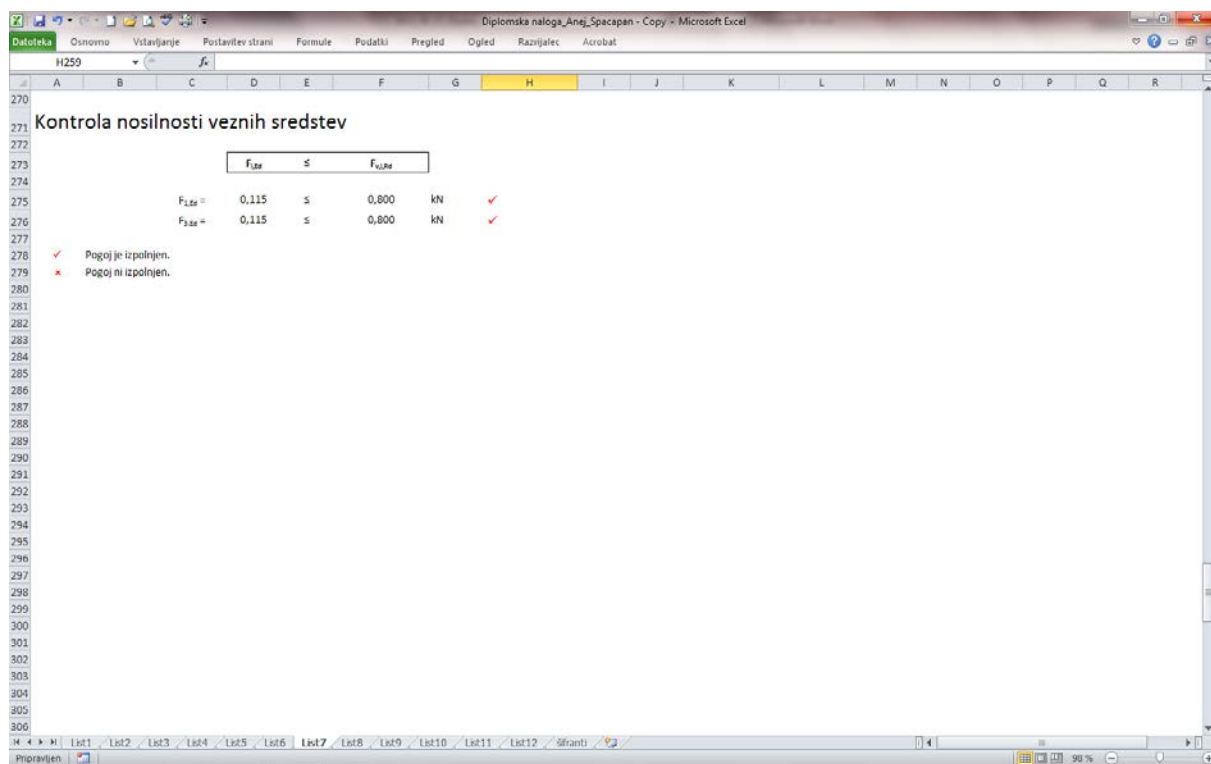
- s_i računsko razdalja med veznimi sredstvi v ravnini i ($i = 1, 3$)

$$s_i = \frac{s_{dej}}{n}. \quad (36)$$

Kjer je stojina sestavljena iz dveh delov (škatlasti prerez), je razmik med veznimi sredstvi s_i določen kot kvocient dejanskega razmika med veznimi sredstvi s številom vrst n :

- s_{dej} dejanski razmik med veznimi sredstvi,
- n število veznih sredstev v vrsti.

Če nosilnost veznih sredstev ni zadostna, je potrebno izbrati žeblje višjega razreda.



Slika 20: Prikaz okna za kontrolo nosilnosti veznih sredstev

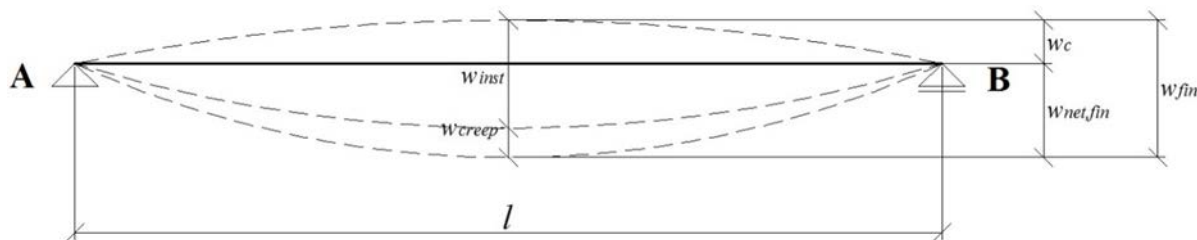
2.12 Povesi

Zadnja kontrola je kontrola povesov sestavljenih upogibnih nosilcev. Pri računu upoštevamo vrednost efektivne nadomestne upogibne togosti $(EI)_{ef}$, ki jo izračunamo s pomočjo modulov zdrsa veznih sredstev v mejnem stanju uporabnosti $K_i = K_{ser,i}$.

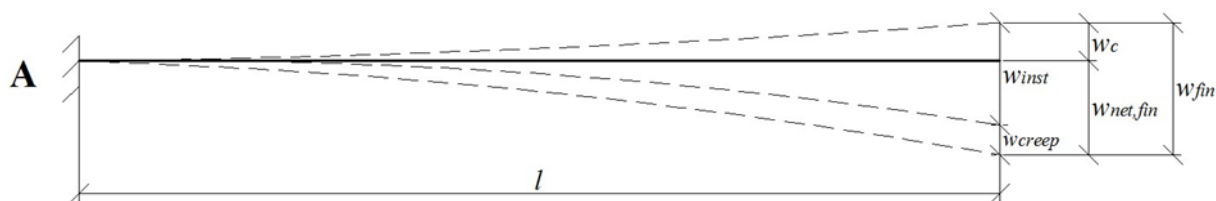
Končni poves w_{fin} upogibno obremenjenih nosilcev je vsota:

- nadvišanja w_c ,
- trenutnega povesa upogiba w_{inst} ,
- povesa upogiba zaradi lezenja w_{creep} :

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (37)$$



Slika 21: Prispevki k povesu upogiba prostoležečega nosilca



Slika 22: Prispevki k povesu upogiba konzolnega nosilca

Torej velja:

če ni nadvišanja, je končni poves $w_{net,fin}$:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} \quad (38)$$

Izračun začetnih povesov v skladu s standardom EN 1995-1-1:2005 izvedemo pri karakteristični kombinaciji vplivov:

$$w_{inst} = \sum w_{inst}(G_{k,j}) + w_{inst}(Q_{k,1}) + \sum_{i>1} w_{inst}(\psi_{0,i} Q_{k,i}), \quad (39)$$

povese v končnem času pa pri navidezno stalni kombinaciji vplivov. V programu je uporabljen poenostavljen postopek za določitev w_{fin} (vsi deli prereza z enakimi reološkimi lastnostmi):

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q,1} + \sum_{i>1} w_{fin,Q,i}, \quad (40)$$

pri čemer s:

- $w_{fin,G}$ končni poves zaradi stalnih vplivov G

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}), \quad (41)$$

- $w_{fin,Q,1}$ končni poves zaradi prevladujočega spremenljivega vpliva Q_1

$$w_{fin,Q,1} = w_{inst,q,1} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}), \quad (42)$$

- $w_{fin,Q,i}$ končni poves zaradi spremljajočih spremenljivih vplivov $Q_i (i > 1)$

$$\sum_{i>1} w_{fin,Q,i} = \sum_{i>1} w_{inst,Q,i} \cdot (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot k_{def}), \quad (43)$$

- $\psi_{2,1}, \psi_{2,i}$ faktorji za navidezno stalno vrednost sprejemljivih vplivov,

- $\psi_{0,1}$ faktor za kombinacijske vrednosti spremenljivih vplivov.

k_{def} je koeficient lezenja lesa glede na uporabnostni razred.

Preglednica 7: Koeficient lezenja k_{def} (Lopatič, 2012: str 53)

Uporabnostni razred	k_{def}
1.	0,60
2.	0,80
3.	2,00

Začetni poves w_{inst} se izračuna z izrazom:

- za prostoležeči nosilec

$$w_{inst} = \frac{5 \cdot q_z \cdot l^4}{384 \cdot (EI)_{ef}} \quad (44)$$

- za konzolni nosilec

$$w_{inst} = \frac{q_z \cdot l^4}{8 \cdot (EI)_{ef}} \quad (45)$$

Pri tem so:

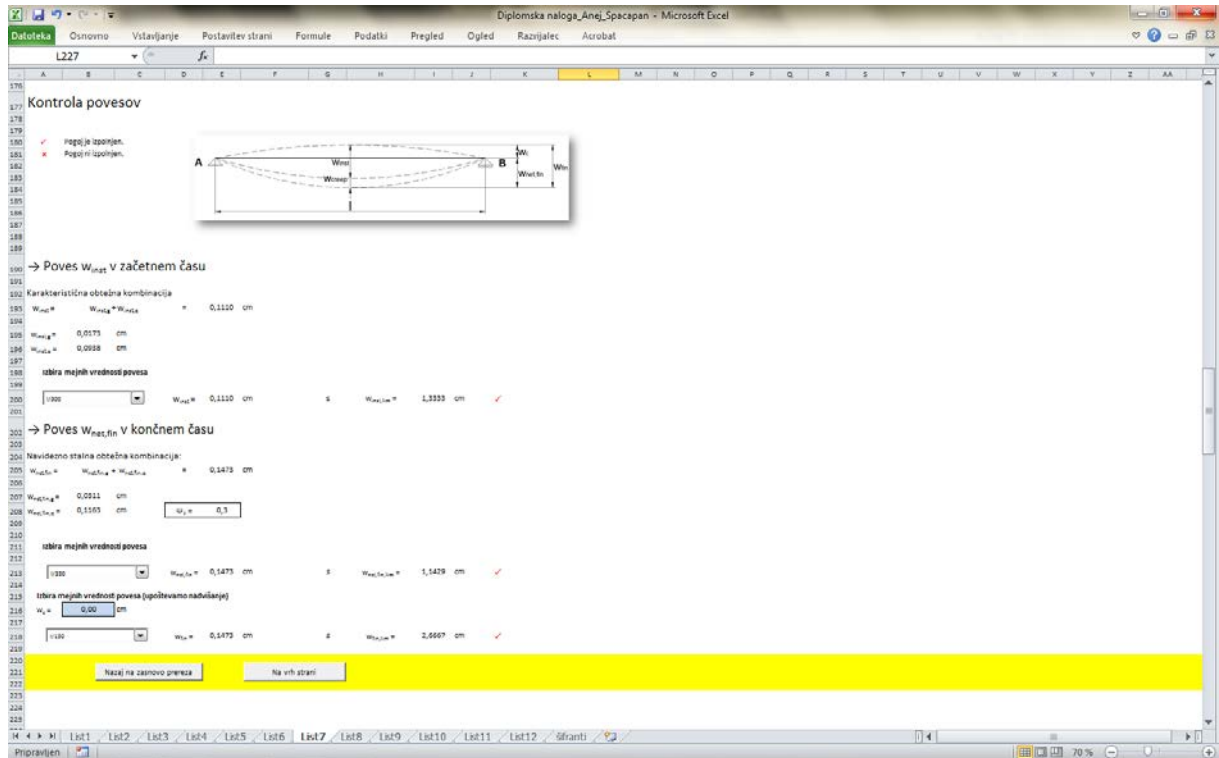
- q_z obtežba na nosilec,
- l dolžina nosilca,
- $(EI)_{ef}$ nadomestna upogibna togost prereza za mejno stanje uporabnosti.

Izračunane vrednosti začetnih povesov w_{inst} , končnih neto povesov $w_{net, fin}$ in končnih povesov w_{fin} ne smejo presegati vrednosti, podanih v standardu EN 1995-1-1:2005.

Preglednica 8: Mejne vrednosti upogibov različnih nosilcev (SIST EN 1995-1-1, 2005: str 58)

	w_{inst}	$w_{net, fin}$	w_{fin}
Prostoležeči nosilec	$l/300$ do $l/500$	$l/250$ do $l/350$	$l/150$ do $l/300$
Konzolni nosilec	$l/150$ do $l/250$	$l/125$ do $l/175$	$l/75$ do $l/150$

V programu si mejno vrednost povesov lahko izberemo med podanima (preglednica 8). Če z analizo ugotovimo, da pogojem ni zadoščeno, lahko povečamo izbrani prečni prerez in ponovno izvedemo kontrolo povesov ali pa nosilec nadvišamo za w_c . Pri tem se za mejne vrednosti povesov upošteva w_{fin} .



Slika 23: Prikaz okna za kontrolo povesov

3 ZAKLJUČEK

Diplomsko delo je obsegalo izdelavo orodja za analizo sestavljenih lesenih nosilcev s programskim orodjem Microsoft® Excel. Program omogoča analizo konstrukcij dveh različnih statičnih sistemov, prostoležečega ali konzolnega nosilca, poljubne dolžine, s tremi različnimi prečnimi prerezi, škatlastim, »I« ali »T« prerezom, poljubnih dimenzij. Posamezni sestavni deli prereza so iz masivnega lesa enakih reoloških lastnosti, vsakemu delu prereza pa lahko določimo trdnost. Mehanska vezna sredstva, ki med seboj povezujejo lesene dele prereza, so gladki žebliji, standardnih dimenzij. V programu vgrajen postopek analize nosilcev je poenostavljeni postopek za dimenzioniranje po standardu SIST EN 1995-1-1:2005, ki zahteva kontrolo normalnih in strižnih napetosti v posameznem delu prereza, nosilnosti veznih sredstev in velikosti povosov konstrukcije.

VIRI

Dobriča, P. 1977. *Osnove lesenih konstrukcij*. Maribor: Visoka tehniška šola.

Gojković, M., Stevanović, B., Komnenović, M., Kuzmanović, S., Stojić, D. 2001. *Drvene konstrukcije*. Beograd: Građevinski fakultet.

Lopatič, J. 2012. *Lesene konstrukcije B-UNI*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študijsko gradivo.

Premrov, M., & Dobriča, P. 2008. *Lesene konstrukcije*. Maribor: Fakulteta za gradbeništvo.

Srpčič, J., Plos, M., Pazlar, T. & Turk, G. (2010). Indikativne lastnosti za razvrščanje žaganega konstrukcijskega lesa po trdnosti. *LesWood*, 62(11-12), 490-496.

Žarnić, R. (2009). Vloga lesa pri konkurenčnem razvoju Slovenskega gradbeništva. *Lesena gradnja*. <http://www.lesena-gradnja.si/html/pages/si-clanki-trajnostni-razvoj-les-slovensko-gradbenistvo.htm> (Pridobljeno 25. 6. 2013).

SIST EN 1995-1-1: 2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.