

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Visokošolski program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

Špela Blatnik

Temperaturna in vlažnostna analiza lesa

Diplomska naloga št.: 293

Mentor:
prof. dr. Goran Turk

Somentor:
doc. dr. Simon Schnabl

Ljubljana, 26. 10. 2007

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema

Les je v gradbeništvu eden od najpomembnejših materialov skozi celotno zgodovino človeštva in ima pri gradnji pomembno vlogo še danes. Posekan in posušen les se uporablja v različne namene. Vgrajen v konstrukcijo, se neprestano odziva na spremembe temperature in vlage v okolju.

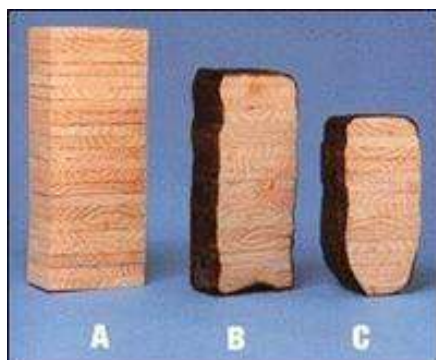
Les je v tehničnem smislu naravni, vlaknasti in organski kompozitni material. Pomembni lastnosti, ki vplivata na mehanske karakteristike sta anizotropija in poroznost.

Pomemben dejavnik je izpostavljenost lesa visokim temperaturam oziroma požaru. Požar je zelo zapleten pojav in ga zato z modeli težko opišemo. Pojav, ki nastane ob tem, je toplotna degradacija ali tako imenovana piroliza. Gorenje lesa določajo vnetljivost, širjenja plamena, zadimljenost, naknadno tlenje, itd. Les pri visokih temperaturah poka, se deformira, površina pa se prekrije z ostankom gorenja, to je ogljem. Faktorji, ki vplivajo na gorenje lesa in posledično na oglenenje, so: temperatura, vsebnost vlage, gostota lesa, dimenzije lesa, itd.

Podobno kot ostali materiali, ki se uporabljajo v gradbeništvu, mora tudi les ustrezati standardom požarne odpornosti. V laboratorijih so opravili mnoge preizkuse, s katerimi so ugotavljali hitrost oglenenja posameznih vrst lesa ob znanih pogojih povišane temperature. Pomembna lastnost zoglenelega lesa je v preprečevanju dviga temperature v plasti oglja in notranjem nezoglenelem delu.

1.2 Cilji naloge

Namen naloge je na osnovi izvedbe občutljivostne analize določiti bistvene parametre za določitev temperaturnega in vlažnostnega stanja lesa pri požaru z upoštevanjem oglenenja lesa.



Slika 1.1: Prikaz zmanjšanja prereza pri gorenju. Prerez A predstavlja prerez pred požarom, prerez B po pol ure gorenja in prerez C po eni uri gorenja

Prevajanje toplote in vlažnosti v poroznih materialih, kakršen je les, opišemo s sistemom dveh nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb Luikova, ki opisuje povezan prehod toplote in vlage v kapilarno poroznih materialih. Pri tem moramo upoštevati, da se toplota in vlaga prenašata na različne načine, to je s konvekcijo, prevajanjem ali kondukcijo in sevanjem ali radiacijo. Upoštevati moramo tudi izhlapevanje, izparevanje in kondenziranje vode ter oglenenje lesa.

Uporabili smo računalniški program, napisan v programskem okolju Matlab. Analizirali smo temperaturno in vlažnostno stanje lesa z upoštevanjem oglenenja. Ker je problem v splošnem prezahteven, analitičnih rešitev ne poznamo, zato smo ga rešili numerično.

Naredili smo študijo enodimenzionalnega prehoda toplote in vlage po homogenem nosilcu za različne materialne parametre. Rezultati izračunov so predstavljeni v diagramih, v katerih je predstavljena odvisnost debeline oglja od različnih parametrov.

Prikazano je tudi dvodimenzionalno oglenenje in spremljajoči zaokrožitveni pojav. Na dvodimenzionalno oglenenje se naveže dimenzioniranje prostoležečega nosilca na hkratno zunanjo statično mehansko obtežbo in požar.

2 OSNOVNE ENAČBE PREVAJANJA TOPLOTE IN VLAGE

2.1 Splošno

Luikov (1975) je razvil enačbe za opis prehoda toplote in vlage v kapilarno poroznih materialih. Enačbe veljajo za vse kapilarno porozne materiale. Uporabne so za opis prehoda toplote in vlage v prehrambeni in tekstilni industriji.

Problem povezanega prehoda toplote in vlage je nelinearen in nestacionaren. V lesenih nosilcih, ki so izpostavljeni velikim temperaturnim spremembam, kot je to v primeru požara, je tako obnašanje še bolj izrazito.

2.2 Enačbi Luikova

Sistem Luikovih enačb (1975) za povezan prehod toplote in vlage v kapilarno poroznih snoveh opisujeta dve nelinearni parcialni diferencialni enačbi.

Enačbi zapišemo z upoštevanjem naslednjih predpostavk:

- homogen in ortogonalno anizotropen material,
- gravitacijske sile zanemarimo, ker so veliko manjše od sil, ki nastopajo v kapilarah
- materialni in prevodnostni parametri lesa in oglja so odvisni od temperature in vlage,
- krčenje in nabrekanje ter ostale mehanske spremembe lesa in oglja zanemarimo,
- maso plinov oziroma hlapov zanemarimo, masni tok je sestavljen le iz toka kapljevine,
- hitrost pretoka kapljevine skozi snov zanemarimo, torej ne upoštevamo vpliva gibalne količine na pretok kapljevine,
- izparevanje oziroma kondenziranje vode deluje kot energijski izvor oziroma ponor,
- kompozitni nosilec se nahaja v okolju s konstantnim zračnim tlakom.

Ob teh predpostavkah zapišemo enačbi (Schnabl (2007), Gams (2003), Chang. Weng. (2000)), ki opisujejo povezan problem prehoda toplote in vlage skozi kapilarno porozno snov, za dve dimenziji v komponentni obliki na naslednji način:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} - (\varepsilon h_{LV} + \gamma) \frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{my} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{my} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.2)$$

Enačba (2.1) je enačba prevajanja toplote, ki ji je dodan člen, s katerim zajamemo vpliv gradienta vlage na spremembo temperature. Druga enačba (2.2), je enačba difuzije vlage, kateri je dodan člen, ki poleg gradienta vlage upošteva tudi vpliv gradienta temperature na razporeditev vlage.

Enačbi sta zapisani za potenciala temperature T in vlage w , zato dobimo rezultate izražene s potencialoma ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{M}$). Rezultate temperature tudi ponavadi izražamo v $^{\circ}\text{C}$. Vlažnost ponavadi izražamo z vlažnostjo lesa V , ki je definirana kot delež vode na maso suhega lesa (kg/kg). Iz potenciala vlažnosti v vlažnost jih pretvorimo z naslednjo formulo:

$$V = c_m w. \quad (2.3)$$

V primeru, da je problem povezanega prehoda vlage in toplote linearen, lahko enačbo (2.1) delimo z ρc_p ter vpeljemo oznaki:

$$L = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.4)$$

in

$$v = \frac{c_m}{c_p} (\varepsilon h_{LV} + \gamma). \quad (2.5)$$

Enačbo (2.1) zapišemo v preglednejši obliki:

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = L \left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + v \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t}. \quad (2.6)$$

Iz enačbe (2.6) izrazimo $\left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2}\right)$ in vstavimo rezultat v enačbo (2.2).

Vpeljemo oznaki:

$$D = \frac{k D_M}{\rho c_m (k + D_M \delta (\varepsilon h_{LV} + \gamma))} \quad (2.7)$$

in

$$\lambda = \frac{c_p D_M \delta}{c_m (k + D_M \delta (\varepsilon h_{LV} + \gamma))}. \quad (2.8)$$

Enačbo (2.2) zapišemo v krajši obliki:

$$\frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + \lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t}. \quad (2.9)$$

Za reševanje linearnega problema uporabljamo zapis prenosa vlage in toplote v obliki enačbe (2.6) in (2.9). Imamo sistem dveh linearnih parcialnih enačb 2. reda glede na koordinate (x, y) in 1. reda glede na čas t .

Za rešitev enačb (2.1) in (2.2) moramo poznati ustrezne robne in začetne pogoje. Z začetnimi pogoji določimo temperaturo in vlago po prerezu pri začetnem času $t = t_0 = 0$,

$$T(x, y, 0) = T_o(x, y) \quad (2.10)$$

in

$$w(x, y, 0) = w_o(x, y). \quad (2.11)$$

Robni pogoji so lahko različnih tipov:

- predpisana temperatura in potencial vlage na robu,
- predpisana toplotni in vlažnostni tok na površini,
- toplotni in vlažnostni tok sta linearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici,
- toplotni in vlažnostni tok sta nelinearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici.

V komponentni obliki se enačbe glasijo:

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} - k_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = h_c (T - T_A) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon) h_{LV} h_m (w - w_A) \quad (2.12)$$

in

$$D_{My} \frac{\partial w}{\partial y} e_{ny} + D_{Mz} \frac{\partial w}{\partial z} e_{nz} + D_{My} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + D_{Mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = -h_m (w - w_A), \quad (2.13)$$

kjer sta h_c in h_m toplotni in vlažnostni prestopni koeficient, T_A in w_A sta temperatura in potencial vlažnosti okolice, ε je efektivna površinska emisivnost zunanje strani nosilca, σ je Stefan-Boltzmanova konstanta radiacije.

2.2.1 Materialni parametri

c_p [J/kg K] specifična toplota snovi

Specifična toplota snovi je toplota, ki je potrebna, da en kilogram snovi segrejemo za eno °C.

c_m [kg/kg °M] specifična vlaga snovi

Specifična vlaga snovi je vlaga, potrebna, da vlažnost enega kilograma snovi spremenimo za eno °M.

D_M [kg/m s °M] prevodnostni koeficient vlage

Prevodnostni koeficient vlage pove, koliko kilogramov vode se prenese skozi meter debelo plast snovi v eni sekundi, če je razlika potencialov vlage med dvema točkama te plasti 1°M.

h_{LV} [J/kg] izparilna toplota snovi

Izparilna toplota snovi je toplota, ki jo moramo pri stalnem tlaku dovesti enemu kilogramu snovi, da preide iz plinastega v kapljevino stanje.

k [W/m K] koeficient toplotne prevodnosti

Koeficient toplotne prevodnosti pove, koliko joulov se prenese skozi en meter debelo plast snovi v eni sekundi, če je temperaturna razlika med krajnima točkama te plasti ena °C.

δ [°M/K] termogradientni koeficient

Termogradientini koeficient pove za koliko se spremni vlažnostni potencial med dvema točkama, če se temperatura spremeni za eno °C.

ε delež vlage v plinastem stanju

γ [J/kg] toplota sorpcije in desorpcije

ρ [kg/m³] gostota snovi

2.2.2 Druge spremenljivke

t [s] čas

$T(x, y, t)$ [°C] temperatura snovi

$V(x, y, t)$ [kg/kg] vlažnost lesa

$w(x, y, t)$ [°M] potencial vlage

x, y [m] koordinate kartezičnega koordinatnega sistema.

2.3 Reševanje enačb

Sistem enačb povezanega prehoda toplote in vlage v kapilarno poroznih materialih je težko rešljiv. Fizikalne lastnosti lesa so pri visokih temperaturah odvisne od temperature, vlage ter drugih parametrov. Tudi, če se omejimo na zelo preproste primere diferencialnih enačb, jih

najpogosteje ne znamo rešiti analitično. Analitične rešitve so možne le v najpreprostejših primerih, numerične metode pa uporabimo za vse druge primere.

V nadaljevanju bomo na kratko opisali posamezne metode reševanja enačb, ki jih ločimo na analitične in numerične.

2.3.1 Analitično reševanje enačb

Analitična rešitev je tista odvedljiva funkcija, ki identično zadošča enačbam in robnim pogojem. Če znamo poiskati analitično rešitev, poznamo rezultat pri poljubni vrednosti neodvisne spremenljivke.

Nelinearne parcialne diferencialne enačbe lahko rešujemo le numerično.

V nadaljevanju bomo našli nekaj rešitev analitičnih enačb za povezan prehod toplote in vlage:

- Luikov in Mikhailov (1966) sta podala analitično rešitev za preproste primere plošče, cilindra in sfere s tem, da sta uporabila konstantne koeficiente prevodnosti znotraj posameznega časovnega koraka.
- Chang in Weng (2000) sta podala analitično rešitev za prehod toplote in vlage s pomočjo Laplaceve transformacije ter Besselovih funkcij. Obravnavani so problemi plošč, sfer in cilindrov. Razlike med numeričnim in analitičnimi rešitvami so zelo majhne in še te verjetno nastanejo zaradi premajhnega števila upoštevanja kompleksnih lastnih vrednosti.
- France Križanič (1985) je podal analitično rešitev za prevajanje toplote na neskončnem nosilcu. Omenimo dva primera rešitev (Turk (1987)).

Prvi primer je prehod toplote skozi homogen sloj, kjer je na robovih predpisana konstantna temperatura. Naloga je linearna in se dobro ujema z numeričnimi rešitvami.



Slika 2.1: Robni pogoji

Drugi primer je prehod toplote skozi homogen sloj. Na eni strani sloja je rob toplotno izoliran, na drugi strani je konvekcija. Največje odstopanje je na robu, kjer toplota prehaja s konvekcijo.

- Ostali raziskovalci, ki so predstavili analitične rešitve so bili še Pandey (1999), Chang in Weng (2000) in drugi.

2.3.2 Numerično reševanje enačb

Numerično reševanje enačb se je začelo z razvojem računalnikov, ki so omogočili reševanje velikih sistemov linearnih enačb. Pred dobo računalnikov so probleme reševali tako, da so zanemarili vpliv nekaterih količin in z analitičnimi metodami poiskali rešitev poenostavljenega problema. Skeptičnost glede pravilnosti rešitve mora vedno obstajati, ker ni vedno nujno, da rezultati konvergirajo k pravi rešitvi. Pomagamo si s primerjavami z analitičnimi rešitvami, ki pa jih ni veliko. Natančnost rešitve je odvisna tudi od gostote diferenčne mreže.

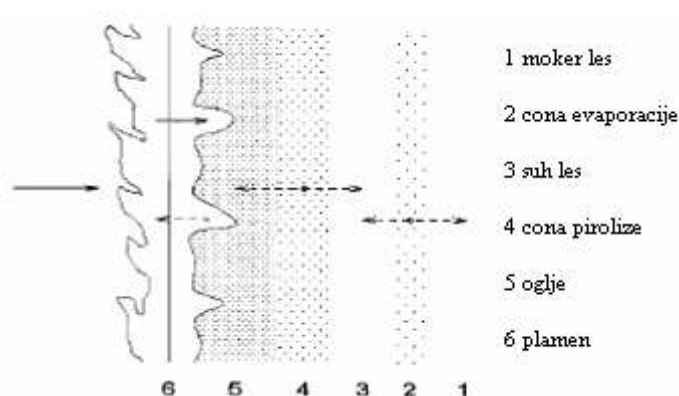
Za numerično reševanje lahko uporabimo naslednje metode: diferenčno metodo, metodo končnih elementov, metodo robnih elementov itd.

Pri metodi končnih elementov področje, ki ga analiziramo razdelimo na končne elemente, ki so vedno razmeroma enostavni. Vpeljemo vozlišča elementov in vozlišča teles, v katerih se stikajo vozlišča elementov (Gams (2003), Turk (1987)).

Diferenčno metodo uporabimo predvsem pri računu pravokotnih območij. V enačbah namesto odvodov uporabimo končne difference točkovnih vrednosti iskanih funkcij ter diferencialne

enačbe nadomestimo z algebraičnimi. Diferenčna metoda lahko služi tudi za primerjavo z metodo končnih elementov (Schnabl (2007)).

2.4 Piroliza lesa



Slika 2.2: Posamezne faze pri procesu pirolize

Les, ki je izpostavljen požaru, je podvržen toplotni degradaciji oziroma tako imenovani pirolizi (Janssens (2004)). Piroliza je izjemno kompleksen proces, kjer se prepletajo kemijski procesi s prehodom toplote in vlage. Piroliza spremeni les v oglje in pline, ki lahko zagorijo, če je prisotnega dovolj kisika in visoke temperature.

Les vedno vsebuje določeno količino vode. Pri izpostavljenosti požaru se izhlapevanje proste vode začne pri temperaturi do 100°C, v območju od 100°C do 220°C pa izparevanje kemijsko vezane vode. Vodna para potuje v smeri požaru izpostavljene zunanje površine, manjši del pa potuje v nasprotni smeri, kjer je temperatura pod 100°C in ponovno kondenzira. Pri temperaturah lesa med 110°C in 220°C poteka razkroj najmanj stabilnih vlaken lesa, bolj stabilna vlakna začnejo razpadati v območju med 200°C in 270°C. Les začne pri teh temperaturah ogljetati. Volumen nastalega oglja je manjši od začetnega volumna lesa. Spremenijo se tudi vse druge termične in mehanske lastnosti materiala. V območju med 270°C in 300°C se les lahko vname, vendar težko. V območju od 280°C do 500°C se gorljivi plini (ogljikov monoksid, metan, formaldehid, mravljična in acetilenska kislina) razredčijo z ogljikovim dioksidom in vodno paro. Običajno se les vname in nastane plamen. Ostanek je oglje.

Pri toplotni degradaciji so definirana tri območja:

- Območje plamena, 225° do 260°C, kjer pride do vžiga, če je prisoten vir vžiga.
- Območje gorenja, 260° do 290°C, kjer se pojavi stalni plamen.
- Območje vžiga, 330° do 470°C, kjer pride do spontanega vžiga.

2.5 Modeli oglečenja

Oglenenje lesa raziskujejo že zelo dolgo. Splošno lahko hitrost oglečenja kvantitativno opišemo kot izgubo mase (g/s) ali kot hitrost širjenja oglja (mm/s).

Na temperaturo požara in njegovo širjenje vplivajo številni parametri, ki jih določamo z eksperimenti. Eksperimente največkrat izvajamo v požarnih laboratorijih. Požarne krivulje so bile razvite v želji po enotnem opisovanju jakosti požara. Razvoj temperatur pri realnem požaru v primerjavi s požarno krivuljo je lahko zelo drugačen. Požarna krivulja predstavlja le ovojnico požara v določenih okoliščinah.

Pri požaru moramo poleg povezanega prehoda toplote in vlage upoštevati tudi hitrost oglečenja oziroma stopnjo zoglenitve. Oglenenje je kompleksen proces, ki je odvisen od številnih faktorjev, kot so vrsta lesa, gostota lesa, vsebnost vlage, termičnih lastnosti.

Modele oglečenja delimo na empirične modele in teoretične modele.

2.5.1 Empirični modeli oglečenja

Razvitih je veliko število različnih modelov oglečenja. Nekateri so preprosti, nekateri pa upoštevajo tudi enačbe termodinamike. Eksperimenti so v večini primerov izredno zahtevni in dragi, zato je poudarek na razvoju učinkovitih računskih modelov.

V veliki večini primerov (Poon (2003)) je splošna oblika modela za določitev hitrosti in debeline oglečenja lesenih elementov je naslednja:

$$\frac{\partial x}{\partial t} \approx at^n, \tag{2.14}$$

kjer $\frac{\partial x}{\partial t}$ pomeni hitrost oglenenja,

x debelino oglja,

t čas izpostavljenosti požarni obtežbi,

a in n pa regresijski konstanti.

Glede na vrsto požarne obtežbe delimo poenostavljene modele na modele, ki določajo hitrost oglenenja v primeru:

- standardnega požara,
- nestandardnega požara,
- konstantne temperature.

2.5.1.1 Standardni požari

Standardna požarna odpornost je po definiciji sposobnost konstrukcije ali njenega dela, da izpolni zahtevane funkcije pri izpostavljenosti segrevanju, glede na standardno požarno krivuljo temperatura – čas za določeno kombinacijo obtežbe in določen čas trajanja.

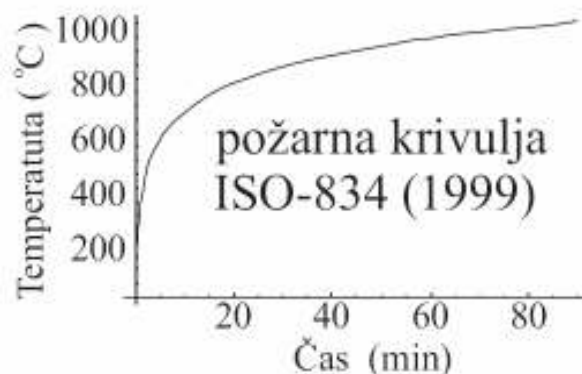
Standardna požarna obtežba **ISO 834** (Benichou, Sultan (1999)) je podana s krivuljo časovnega spreminjanja temperature požarnega prostora. Odpornost konstrukcij in konstrukcijskih elementov je definirana glede na standardno požarno krivuljo. Temperatura požarnega prostora ves čas narašča. Temperatura se spreminja po naslednji formuli:

$$T_g = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (2.15)$$

kjer T_g pomeni povprečno temperaturo požarnega prostora v °C,

T_0 temperaturo okoliškega zraka ob nastopu obtežbe v °C in

t čas izpostavljenosti požaru, izražen v minutah.



Slika 2.3: Požarna krivulja ISO-834

V Severni Ameriki uporabljajo krivuljo **ASTM E 119** (White, Nordheim (1992)), ki je podana z naslednjo enačbo:

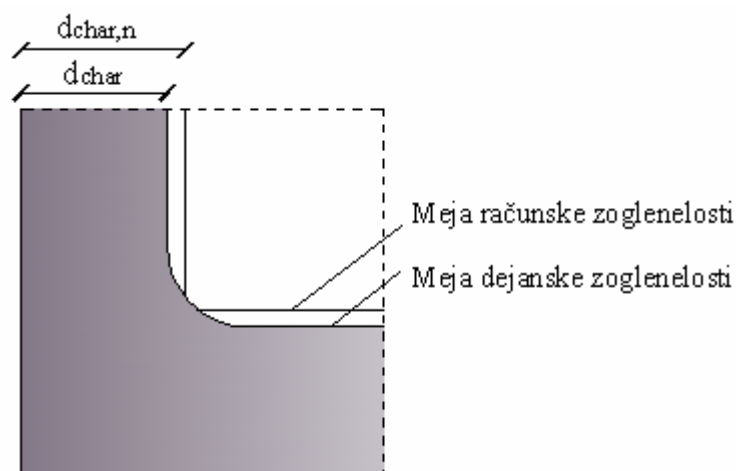
$$T_g = T_o + 750 * (1 - \exp(-0,49\sqrt{t})) + 22\sqrt{t}. \quad (2.16)$$

V **EC 5** (SIST EN 1995) je globina oglja d_{char} (mm) v primeru enodimenzionalnega oglenenja lesa, ki ni požarno zaščiten, podana z izrazom:

$$d_{char} = \beta_0 t, \quad (2.17)$$

kjer β_0 pomeni hitrost enodimenzionalnega oglenenja za različne vrste lesa in gostote lesa [mm/min],

t je čas požarne izpostavljenosti [min].



Slika 2.4: Prikaz dejanske zoglenelosti in računske zoglenelosti ter zaokrožitveni pojav

Predvidena računsko globina zogljenosti se določi na osnovi trajanja izpostavljenosti in predvidene projektne hitrosti oglečenja, kot je prikazano v izrazu:

$$d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t, \quad (2.18)$$

kjer $d_{\text{char},n}$ pomeni predvideno projektno globino zogljenosti,

β_n predvidena računsko hitrost oglečenja, ki upošteva vpliv zaokrožitve prereza in nastanka razpok [mm/min],

t čas požarne izpostavljenosti [min].

Pri izračunu predvidene projektne globine je vpliv zaokrožitve zogljenosti na robovih upoštevan v predvideni projektni hitrosti oglečenja β_n , katere vrednost zajema vpliv zaokrožitve zogljenosti na robovih in vpliv razpok. Zato je mejna črta predvidene zogljenosti v primerjavi z mejo dejanske zogljenosti nekoliko bolj pomaknjena v notranjost prereza.

Pri metodi zmanjšane prečne prereza upoštevamo efektivni prečni prerez. Metoda temelji na zmanjšanju osnovnega prečne prereza zaradi predvidene zogljenosti sloja neposredno pod izpostavljeno površino ter sloja elementa neposredno ob meji preostalega prereza, za katerega se meni, da nima odpornosti in trdnosti. Za ostali prerez se predpostavi, da sta odpornost in trdnost v času izpostavljenosti nespremenjeni.

Debelino oglja izračunamo po formuli:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 d_0, \quad (2.19)$$

kjer je $d_0 = 7$ mm,

$$k_0 = \begin{cases} t/20 & t < 20 \text{ min} \\ 1,0 & t \geq 20 \text{ min} \end{cases}, \quad (2.20)$$

β_n upošteva povečano hitrost oglečenja zaradi efekta zaokrožitve prečne prereza ($0,5 \leq \beta_n \leq 0,8$).

AS 1720.4-1990 (Poon (2003)) je avstralski standard, pri katerem je hitrost oglenenja podana z enačbo

$$\dot{c} = 0,4 + \left(\frac{280}{\rho} \right)^2, \quad (2.21)$$

kjer \dot{c} pomeni hitrost oglenenja (mm/min),

ρ specifično gostoto lesa (kg/m^3) z vsebnostjo vlage 12%,

d_c efektivno globino oglja (mm), ki je določena z izrazom

$$d_c = \dot{c} t + 7,5. \quad (2.22)$$

Konig in Walleij (Poon (2003)) sta razvila model ki je izpostavljen požarni obtežbi z EC 5 in se deli na dve območji:

- Območje s požarno zaščito, ki se deli na fazo, kjer les ne ogleni in na fazo, ko se začne oglenenje za zaščito.
- Območje brez požarne zaščite lesa.

White in Nordheim (Poon (2003)) sta model oglenenja določila z eksperimenti različnih vrst lesa, ki so izpostavljeni požarni obtežbi določeni z ASTM E 119. Globino oglja določa izraz:

$$t_c = m x_c^{1.23}, \quad (2.23)$$

kjer je m recipročna vrednost hitrosti oglenenja (min/mm),

x_c je debelina oglja (mm),

t_c je čas izpostavljenosti požaru (min).

Schaffer (Poon (2003)) je podal izraze recipročne hitrosti oglenenja različnih vrst lesa v odvisnosti od vlažnosti lesa in njegove gostote, ki so izpostavljeni požarni obtežbi določeni z ASTM E 119:

$$\begin{aligned} B &= 2((28,726 + 0,578 M)\rho + 4,187), & \text{jelka} \\ B &= 2((5,832 + 0,012 M)\rho + 12,862), & \text{bor} \end{aligned} \quad (2.24)$$

kjer je M delež vlage v odstotkih,

ρ gostota lesa.

Vrednosti hitrosti oglenenja c v merskih enotah SI dobimo s pretvorbo $c = \frac{25,4}{B}$ [fmm/min].

Lawson (Poon (2003)) je s sodelavci analiziral oglenenje elementov iz lesa jelke. Hitrost oglenenja je podal z izrazom:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = 1,04 t^{-0,2}, \quad (2.25)$$

kjer je x debelina oglja (mm),

t čas trajanja izpostavljenosti požaru (min).

2.5.1.2 Nestandardni požari

Nestandardni požari v primerjavi s standardnimi požarnimi krivuljami predstavljajo bolj realno dogajanje pri požaru. Modelov na tem področju je malo, ker je eksperimentalnih rezultatov za nestandardni požar zelo malo.

Butcher (Poon (2003)) je podal debelino oglja z izrazom:

$$\frac{dh}{dt} = 0,022 Q_r, \quad (2.26)$$

kjer je $\frac{dh}{dt}$ debelina oglja (mm/min),

Q_r je radiacija (kW/m²).

Leceister (Poon (2003)) je podal končno debelino oglja z izrazom:

$$h_{\text{eff}} = 360 \frac{t_{\text{FS}}}{\rho} + 1,5 \sqrt{t_{\text{FS}}}, \quad 1,5 \sqrt{t_{\text{FS}}} < 10 \quad (2.27)$$

kjer je h_{eff} efektivna debelina oglja (mm),

t_{FS} čas nad 300°C (min),

ρ gostota suhega lesa (kg/m³).

Butler (Poon (2003)) je podal izraz za debelino oglja:

$$c = 21,96 \dot{q}, \quad (2.28)$$

kjer je c debelina oglja (mm/min),

\dot{q} radiacija (MW/m²).

$$\dot{q} = \varepsilon \phi \sigma T^4, \quad (2.29)$$

kjer je ε emisivnost,

ϕ konfiguracijski faktor,

σ Stefan Boltzmanova konstanta,

T absolutna temperatura radiacije (K).

Mikkola (Poon (2003)) je uporabil izraz Butler in dodal vpliv specifične gostote in vlažnosti materiala ter koncentracije kisika, ki vplivajo na hitrost oglenjenja in debelino oglja. Končno debelino oglja lahko izračunamo kot obratno sorazmerno z gostoto materiala:

$$\frac{1}{\rho + 120}, \quad (2.30)$$

kjer je ρ gostota lesa (kg/m³),

ali kot obratno sorazmerno z vlažnostjo

$$\frac{1}{1 + 2,5w}, \quad (2.31)$$

kjer je w vlažnost lesa.

Zmanjšanje koncentracije kisika zraka iz 21% na 8-10%, lahko zmanjša hitrost oglenjenja za 20%.

Hadving (Poon (2003)) je za osnovo vzel lepljene nosilce z gostoto 470 kg/m³ in vlažnostjo 10%. Debelino oglja izračunamo iz enačb:

$$\begin{aligned}
 \Theta &= 0,0175 \frac{q}{F}, \\
 \beta_0 &= 1,25 - \frac{0,035}{F + 0,021} \quad \text{za } 0,02 \leq F \leq 0,30, \\
 X &= \beta_0 \tau \quad \text{za } 0 \leq \tau \leq \frac{\Theta}{3}, \\
 X &= \beta_0 \left(-\frac{1}{12} \Theta + \frac{3}{2} \tau - \frac{3}{4} \frac{\tau^2}{\Theta} \right) \quad \text{za } \frac{\Theta}{3} \leq \tau \leq \Theta.
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

kjer je Θ čas, pri katerem je dosežena največja debelina oglja (min),

β_0 debelina oglja (mm/min)

X globina oglja (mm),

q projektna požarna obtežba (MJ/m²),

τ čas (min).

2.5.1.3 Požari s konstantno temperaturo

Lau, Zeeland in White (Poon (2003)) so analizirali oglenenje na vzorcih borovega lesa v primeru s konstantno temperaturo 500°C in konstantne sile. Določili so približno velikost efektivnega prečnega prereza z naslednjim izrazom:

$$A(t) = -1,628 t + 3080, \tag{2.33}$$

kjer je $A(t)$ efektivni prečni prerez (mm²),

t je čas (s).

S pomočjo enačbe (2.32) so določili koeficient hitrosti oglenjenja β (mm/min) in sicer kot:

$$\beta(t) = -\frac{\alpha}{8} \left[\frac{\alpha t}{4} + \frac{1}{16} (a_o + b_o)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{2.34}$$

kje je t čas (s),

a_o in b_o sta dimenziji prečnega prereza (mm),

$$\alpha = \frac{\partial A(t)}{\partial t} = -1,628. \tag{2.35}$$

Tran in White (Poon (2003)) sta raziskala izgubo vlage in toplote in oglenenje različnih vrst lesa. Hitrost oglenjenja je podana z izrazom:

$$c = \frac{\dot{m}}{\rho_w}, \quad (2.36)$$

kjer je \dot{m} izguba teže (kg/s)

ρ_w suha gostota (kg/m³).

Schafer (Poon (2003)) je razvil izraz iz katerega izračunamo hitrost oglenjenja za primer jelke:

$$t = -k \ln \left(1 - \frac{x}{3} \right) e^{\frac{JE}{RT}}, \quad (2.37)$$

kjer je $k = (28,576 + 0,575 w)\rho + 4,548$, (2.38)

$J = 4,184$ Joulova konstanta [joul/cal],

$R = 8,14$ plinska konstanta [joul/gram mol/K]

$E = 3108$ reakcijska energija [cal/gmol],

x debelina oglja [inč],

w vsebnost vlage [%],

T temperatura [K].

2.5.2 Teoretični modeli oglenjenja

Do razvoja matematičnih modelov je prišlo zaradi potrebe po splošnejšem opisu oglenjenja lesa. Modeli se med seboj zelo razlikujejo. Opisali bomo model Fredlunda (1993) in model Schnabl in Turk (2006), ki smo ga uporabili pri izračunih.

Model, ki ga je razvil **Fredlund** (1993), upošteva pretok energije in pretok mase. Upošteval je pretok energije zaradi prevajanja toplote skozi snov, kot tudi zaradi konvekcijskega toka produktov pirolize in vodne pare skozi pore obravnavanega lesa. Ena glavnih predpostavk je izpolnjevanje termodinamičnega ravnovesja v vsaki točki obravnavanega telesa.

Osnovna enačba o ohranitvi energije ima v dveh dimenzijah obliko:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} - \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q_1^* + Q_2^* = 0, \quad (2.39)$$

kjer pomeni T temperaturo (K),

c specifično toploto (J/kg K),

λ koeficient toplotne prevodnosti (W/m K),

κ konvekcijski koeficient (W/m²),

Q_1^* in Q_2^* ponora/izvora energije zaradi pirolize lesa in izhlapevanja/kondenziranja vode/vodne pare (J/m³ s).

Model masnega pretoka temelji na spremembi pritiskov v lesu. Upošteva tudi, da je masni tok vlage v obliki tekočine zaradi majhnih hitrosti zanemarljiv. Osnovna diferencialna enačba masnega pretoka je tako:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \psi P + G^* - \omega \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad (2.40)$$

kjer je P pritisk (Pa),

ω masna kapaciteta (mol/J),

ϕ koeficient masnega pretoka (mol s/kg),

ψ koeficient toplotnega raztezka (mol/J s).

Za rešitev enačb (2.38) in (2.39) morajo biti podani robni pogoji. V primeru enačbe (2.38) predstavljajo izmenjavo energije telesa z okolico in so podani kot predpisani toplotni tok ali predpisana temperatura na robu. V primeru enačbe (2.39) so predpisani masni tokovi na robovih elementa.

Fredlund je definiral pogoj nastanka oglja. Nastanek oglja se začne, ko gostota materiala v točki pade pod 300 kg/m³.

Fredlund je eksperiment procesa pirolize izvedel z namenom boljšega razumevanja kompleksnega obnašanja lesa pri požaru in zaradi možnosti primerjave z numeričnimi

rezultati. Model opisuje enodimenzionalen prehod toplote in vlage. Količine, ki so bile merjene so bile: temperatura, pritisk, gostota in vsebnost vlage v lesu.

Vzorec je v obliki kocke s stranicami 135 mm, ki je izpostavljen napetosti 75 ali 90 k W/m². Obravnavan je bil les različnih vrst in sicer: smreka, bor in iverka. Vsebnost vlage je 0, 12 ali 24%. Dolžina poizkusa je 60 minut. Rezultati so merjeni in zabeleženi vsaki 2 minuti. Eksperimenti pokažejo dobro ujemanje z enačbama (2.38) in (2.39) in tudi s pogojem nastanka oglja.

Schnabl in Turk (2006) sta razvila model oglenenja, ki upošteva dve fazi: les in oglje. Zanimarjen je vpliv tlaka na povezan prehod toplote in vlage v porozni snovi ter vpliv konvekcijskega dela toka tekočine k energijskemu/toplotnemu toku skozi snov.

Osnovni enačbi, ki opisujeta matematični model sta enačbi Lukova (2.1) in (2.2).

Model upošteva povezan prehod toplote in vlage skozi snov in pri tem omogoča upoštevanje poljubne požarne obtežbe in materialnih karakteristik materiala, ki so lahko odvisne od smeri materialnih vlaken, od temperature, nivoja vlage, gostote materiala, vrste lesa, itd. za temperaturo vnetišča se ponavadi vzame 300°C.

2.6 Požarno projektiranje

Izračun odpornosti konstrukcije, izpostavljene požaru, je potrebno izvesti na podlagi analize celotne konstrukcije. Taka analiza je zahtevna, saj upošteva fizikalne in kemične procese pri gorenju. Preprostejši način za analizo konstrukcije je podan v standardu SIST EN 1995-1-2. Ta način je primeren predvsem za dokazovanje odpornosti posameznih elementov konstrukcije na požar. Iz odpornosti posameznih elementov se sklepa odpornost celotne konstrukcije, izpostavljene požaru.

2.6.1 Standardna požarna odpornost lesenih konstrukcij

Poenostavljena metoda požarnega projektiranja nezaščitenega lesenega nosilca, izpostavljenega standardnemu požaru ISO 834, je predstavljena v standardu EN 1995-1-2.

Za določitev učinkov vplivov $E_{d,f,i}$ pri izpostavljenosti lesene konstrukcije požaru, je potrebno združiti mehanske vplive skladno z EN 1990 za primer nezgodnega projektne stanja,

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\Psi_{1,1} \text{ ali } \Psi_{1,2}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,1} Q_{k,i}. \quad (2.41)$$

Če ni potrebno upoštevati posrednih učinkov vplivov, lahko poenostavimo določanje učinkov vplivov in izpeljemo $E_{d,f,i}$ iz analize učinkov vplivov pri normalni temperaturi za čas $t = 0$

$$E_{d,f,i,t} = E_{d,f,i} = \eta_{fi} E_d, \quad (2.42)$$

kjer je E_d računsko vrednost pri normalni temperaturi za osnovno kombinacijo vplivov,

η_{fi} redukcijski faktor za računsko obtežbo v primeru požara.

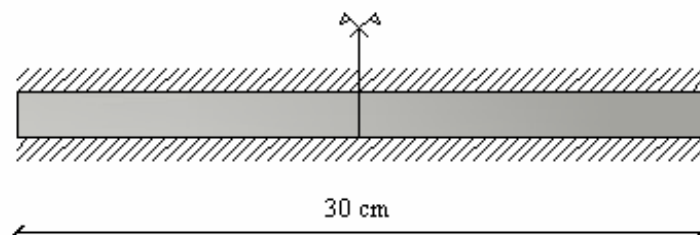
Kot poenostavitev je predlagana vrednost $\eta_{fi} = 0,6$.

3 RAČUNSKI PRIMERI

Računski primeri so razdeljeni v tri skupine. V prvi skupini je prikazana parametrična študija hitrosti enodimenzionalnega oglenjenja smrekovih nosilcev v odvisnosti od različnih parametrov. V drugi skupini je prikazano dvodimenzionalno oglenenje. V tretji skupini pa je prikazano dimenzioniranje na požarno obremenitev na osnovi rezultatov dvodimenzionalnega oglenjenja iz druge skupine računskih primerov.

3.1 Parametrična študija enodimenzionalnega oglenjenja lesenih nosilcev

Obravnavamo enodimenzionalen prehod toplote in vlage skozi homogen smrekov nosilec dolžine 30 cm in majhne višine, ki je toplotno in vlažnostno izoliran s spodnje in zgornje strani. Model je izpostavljen standardni požarni obtežbi ISO 834.



Slika 3.1: Geometrija modela

Prerez ima ob začetku enakomerno temperaturo in vlago prereza $T_0 = 20\text{ °C}$ in $w_0 = 4\text{ °M}$, vlažnost okolja, v katerem prerez obravnavamo je $w_A = 4\text{ °M}$. Začetna gostota smrekovega nosilca je $\rho = 370\text{ kg/m}^3$.

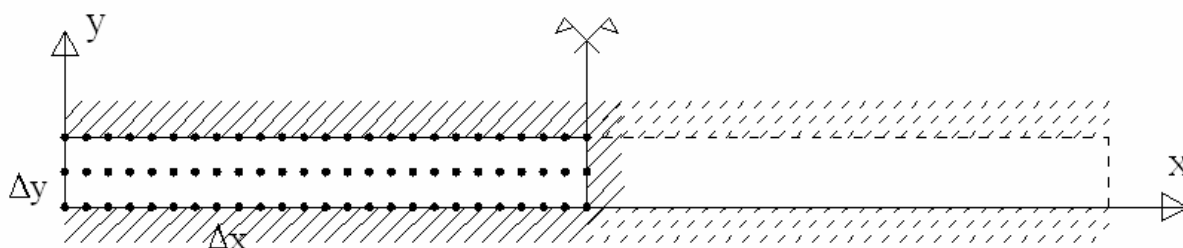
Upoštevamo konstantne materialne parametre lesa in oglja:

$$k_{\text{les}} = 0,15, \quad k_{\text{ogljje}} = 0,65\text{ W/(m K)}, \quad D_M = 2,2 \times 10^{-8}\text{ kg/(m s °M)}, \quad h_{LV} = 2500\text{ kJ/kg},$$

$$h_c = 22,5\text{ W/(m}^2\text{ K)}, \quad e = 0,3, \quad c_{p\text{les}} = 2500\text{ J/(kg K)}, \quad c_{p\text{ogljje}} = 1050\text{ J/(kg K)},$$

$$c_m = 0,01\text{ kg/(kg °M)}, \quad d = 2,0\text{ °M/K}, \quad h_m = 2,5 \times 10^{-6}, \quad d = 0,3\text{ m}, \quad \sigma = 0, \text{ višina poljubno.}$$

Zaradi simetrije obravnavamo le polovico nosilca širine 15 cm. Diferenčna mreža znaša 26×3 točke, pri čemer je $\Delta x = 0,006$ m in Δy je zelo majhen. Gostota točk po širini je zelo pomembna, po višini ne, ker gre za enodimenzionalen prehod. Celotni čas računa je 1 ura, pri čemer dolžina časovnega koraka znaša 1 sekundo. Oglenenje lesa začne s procesom pirolize, to je, pri temperaturi 300°C .



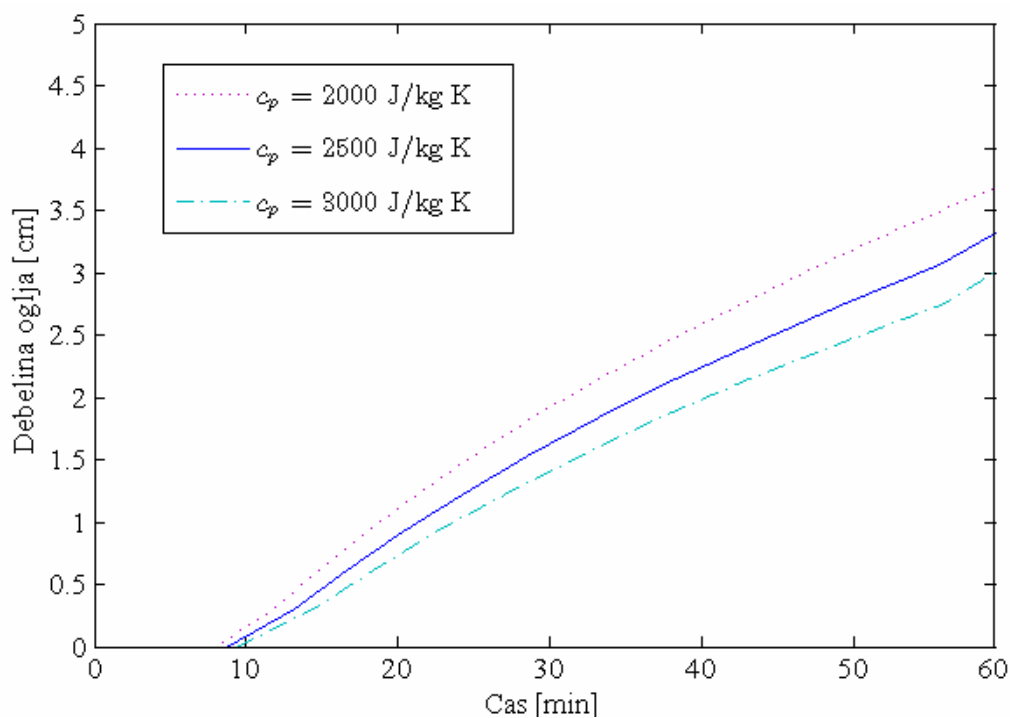
Slika 3.2: Model enodimenzionalnega simetričnega prereza s prikazom diference mreže

V nadaljevanju opišemo parametrično analizo s katero študiramo vpliv različnih parametrov na hitrost oglenjenja. Analiziramo vpliv naslednjih parametrov: specifično toploto lesa c_p , specifično vlago lesa c_m , izparilno toploto lesa h_{LV} , koeficient toplotne prevodnosti lesa in oglja k , termogradientni koeficient lesa δ , delež vlage v plinastem stanju lesa ε in gostoto lesa ρ , na hitrost oglenjenja smrekovega nosilca.

3.1.1 Vpliv specifične toplote snovi na hitrost oglenjenja

Iz slike 3.3 je razvidno, da specifična toplota lesa vpliva na hitrost oglenjenja. Les z višjo vrednostjo specifične toplote ogleni počasneje in tudi začetek oglenjenja je kasnejši.

Pri času 10 minut je razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo 1,2 mm, pri času 20 minut je razlika že 3,7 mm, 5 mm pri 30-ih minutah, 6,5 mm pri 45-ih minutah in 7 mm pri 60-ih minutah. Oglenenje se začne v 8 minuti pri najnižji vrednosti specifične toplote, pri višjih vrednostih se proces začne približno minuto kasneje.

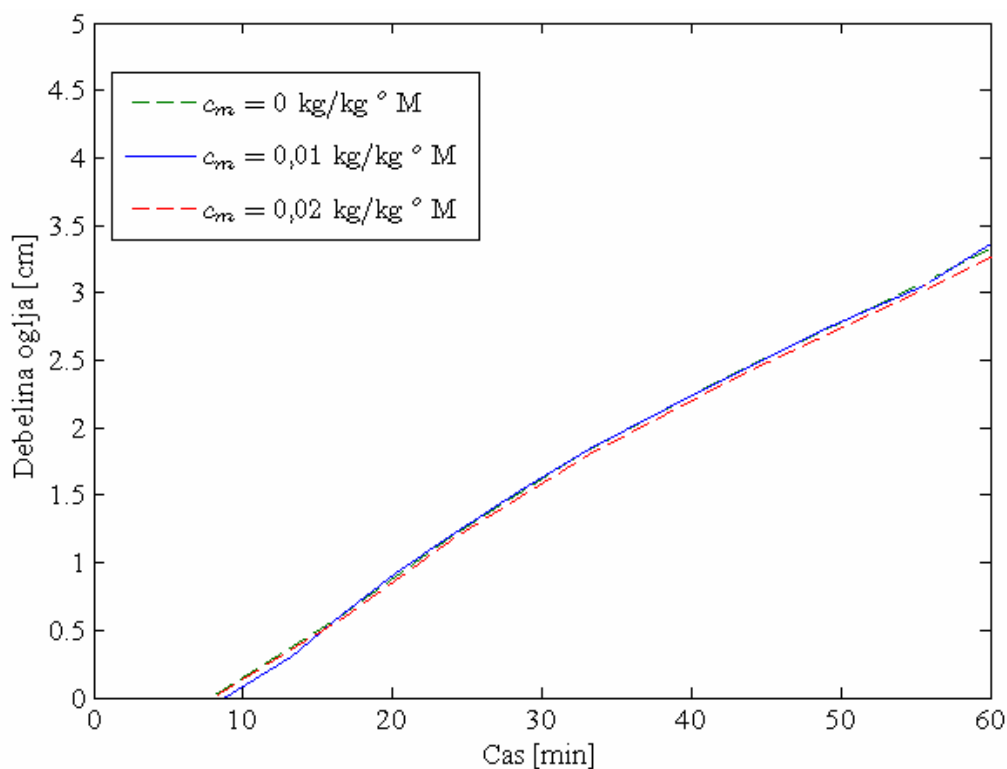


Slika 3.3: Vpliv specifične toplote lesa na hitrost oglenjenja

3.1.2 Vpliv specifične vlage snovi na hitrost oglenjenja

Vpliv specifične vlage lesa na hitrost oglenjenja je zelo majhen. Iz slike 3.4 je vidna majhna razlika v debelini oglja in razlika v začetku oglenjenja.

Pri času 10 minut ni razlike med največjo in najmanjšo vrednostjo, pri času 20 minut je razlika 0,1 mm, 0,5 mm pri 30-ih minutah, 0,8 mm pri 45-ih minutah in 1,1 mm pri 60-ih minutah.

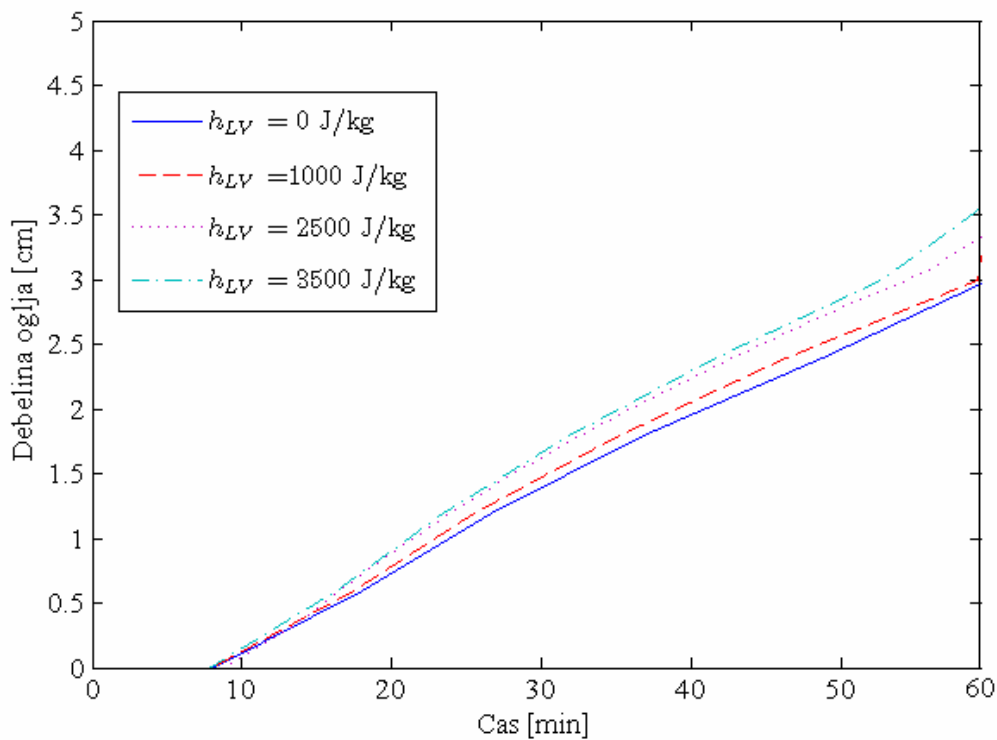


Slika 3.4: Vpliv specifične vlage lesa na hitrost oglenjenja

3.1.3 Vpliv izparilne toplote snovi na hitrost oglenjenja

Iz slike 3.5 je razviden vpliv izparilne toplote lesa na oglenenje. Čas začetka oglenjenja ni odvisen od vrednosti izparilne toplote lesa.

Razlike v debelini oglja med največjo in najmanjšo vrednostjo po časih si sledijo: 0,4 mm v 10-ih minutah, 1,7 mm v 20-ih minutah, 2,7 mm v 30-ih minutah, 3,9 mm v 45-ih minutah, in 4,4 mm v 60-ih minutah.

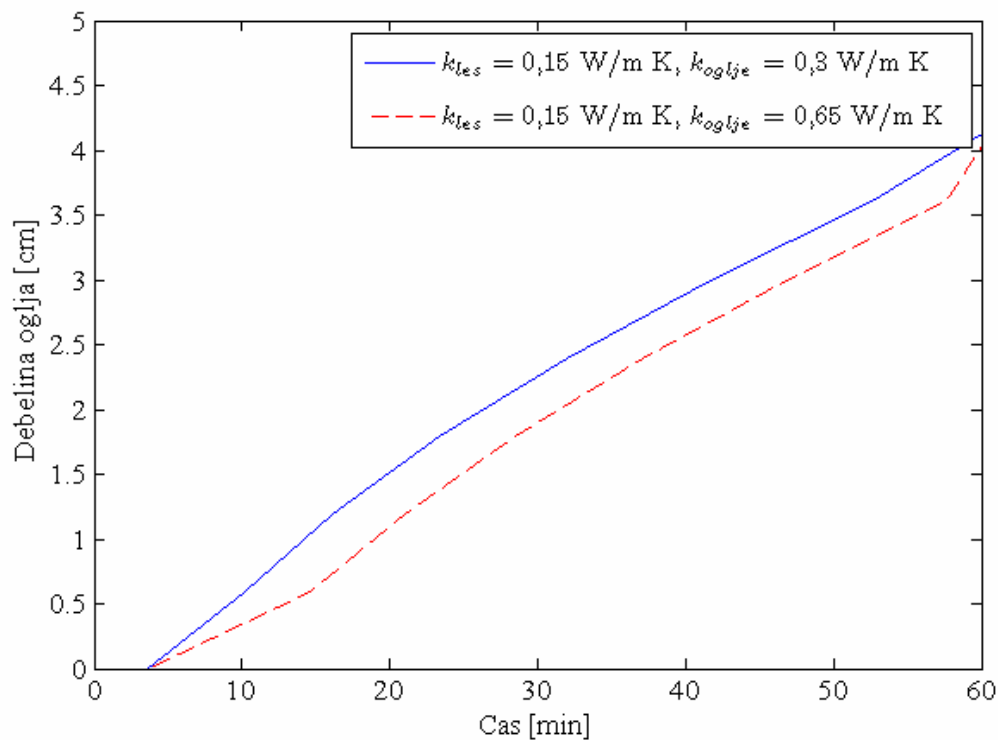


Slika 3.5: Vpliv izparilne toplote lesa na hitrost oglenjenja

3.1.4 Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti na hitrost oglenjenja

Rezultati študije pokažejo, da je hitrost oglenjenja odvisna od koeficienta toplotne prevodnosti.

Nižji kot je koeficient, hitrejšje je oglenenje lesa in začetek oglenjenja je krajši.

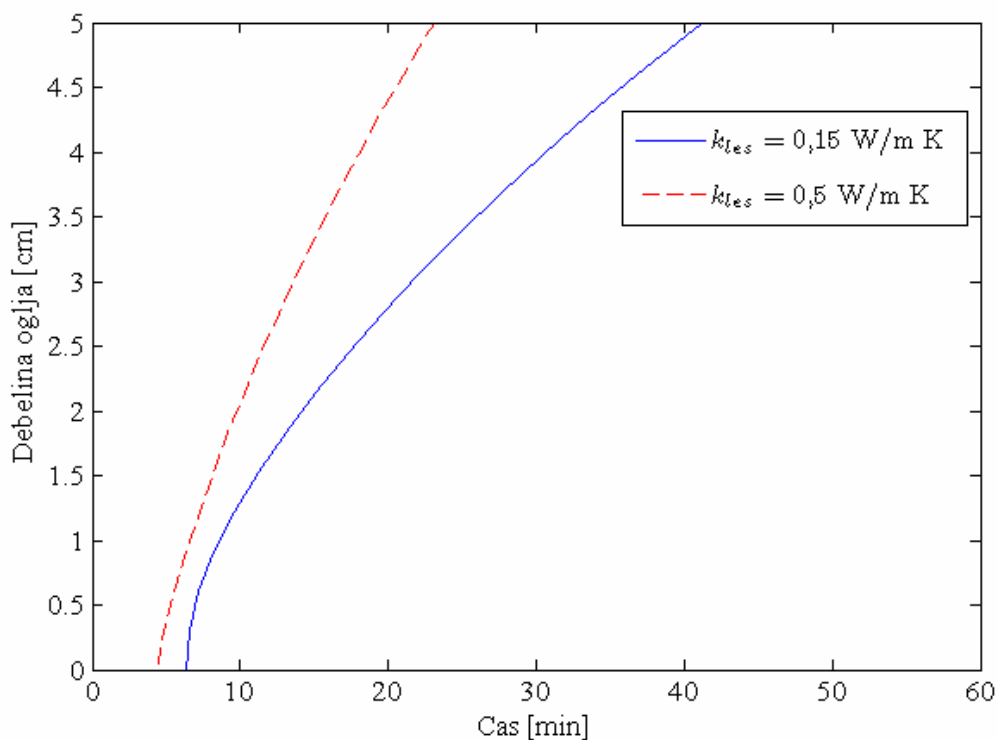


Slika 3.6: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti oglja na hitrost oglenjenja

Razlike po časih med največjo in najmanjšo vrednostjo so: 3 mm v 10-ih minutah, 4 mm v 20-ih minutah, 1 mm v 30-ih minutah, 3,7 mm v 45 minutah in 6 mm 60-ih minutah.

Slika 3.7 prikazuje primer, pri kateri je koeficient lesa višji od koeficienta oglja. Rezultati pokažejo, da se oglenenje nadaljuje vse do sredine prereza.

Slika 3.7 prikazuje pomembnost koeficienta prevodnosti. Zogleneli del lesa pomeni zmanjšanje trdnostnih in togostnih parametrov materiala in pojav razpok na celi črti zoglenelosti. Prav zaradi razpok vzamemo koeficient oglja višje vrednosti od lesa, čeprav v realnosti ni tako. Oglje služi kot toplotni izolator pri gorenju in povečuje čas odpornosti lesa pri gorenju.

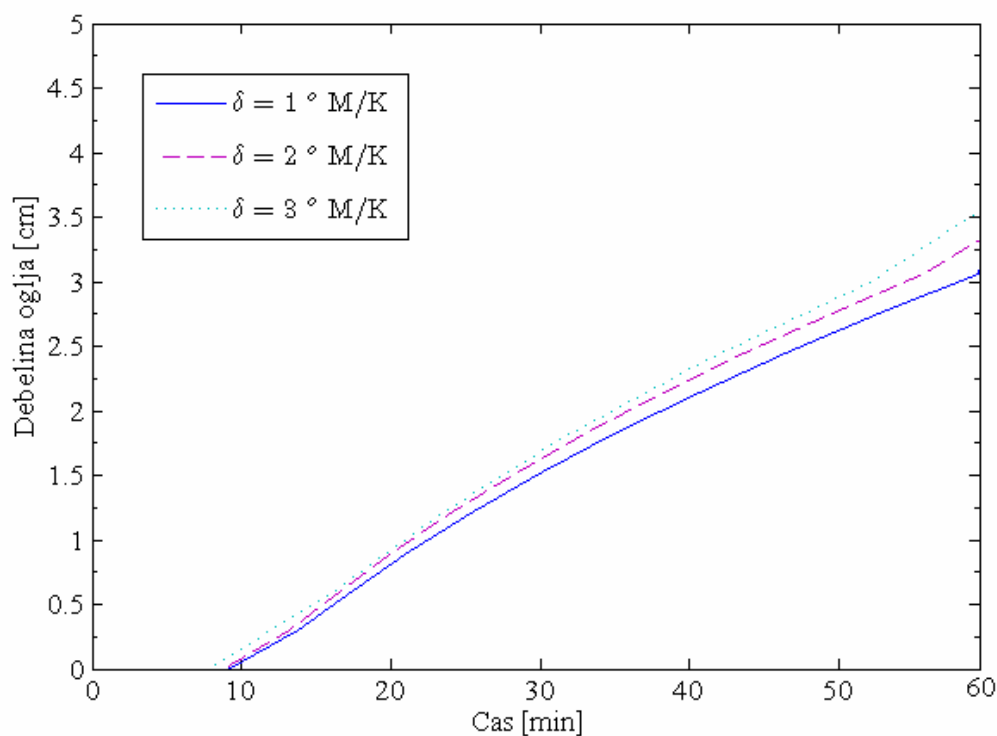


Slika 3.7: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti lesa na hitrost oglenjenja

3.1.5 Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglečenja

Vpliv termogradientnega koeficienta se kaže s tem, da se z višanjem vrednosti koeficienta hitrost oglečenja zvišuje. Na začetek oglečenja pa nima bistvenega vpliva.

Razlike v debelini oglja med največjo in najmanjšo vrednostjo si sledijo: 1mm v 10-ih minutah, 1,3 mm v 20-ih minutah, 1,7mm v 30-ih minutah, 2,3 mm v 45-ih minutah, 4,1 mm v 60-ih minutah. Opazimo, da debelina oglja s časom narašča.

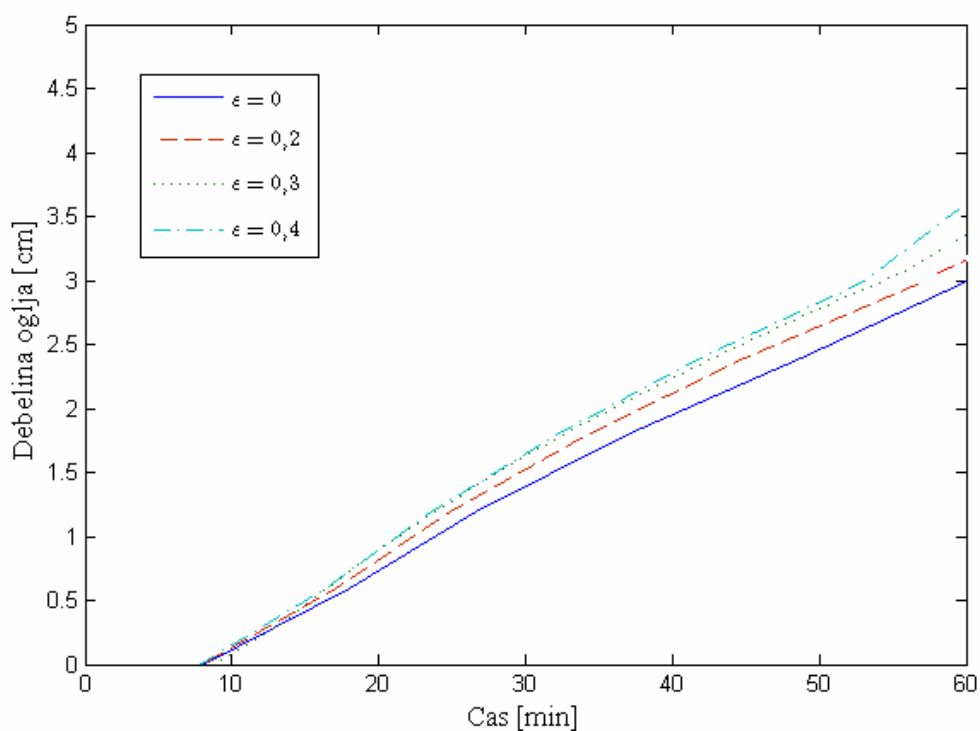


Slika 3.8: Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglečenja

3.1.6 Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja

Z večanjem deleža vlage se hitrost oglenjenja povečuje. Delež vlage v plinastem stanju pa ne vpliva na čas začetka oglenjenja. Oglenenje se začne v osmi minuti in nato postopoma narašča za posamezne deleže vlage.

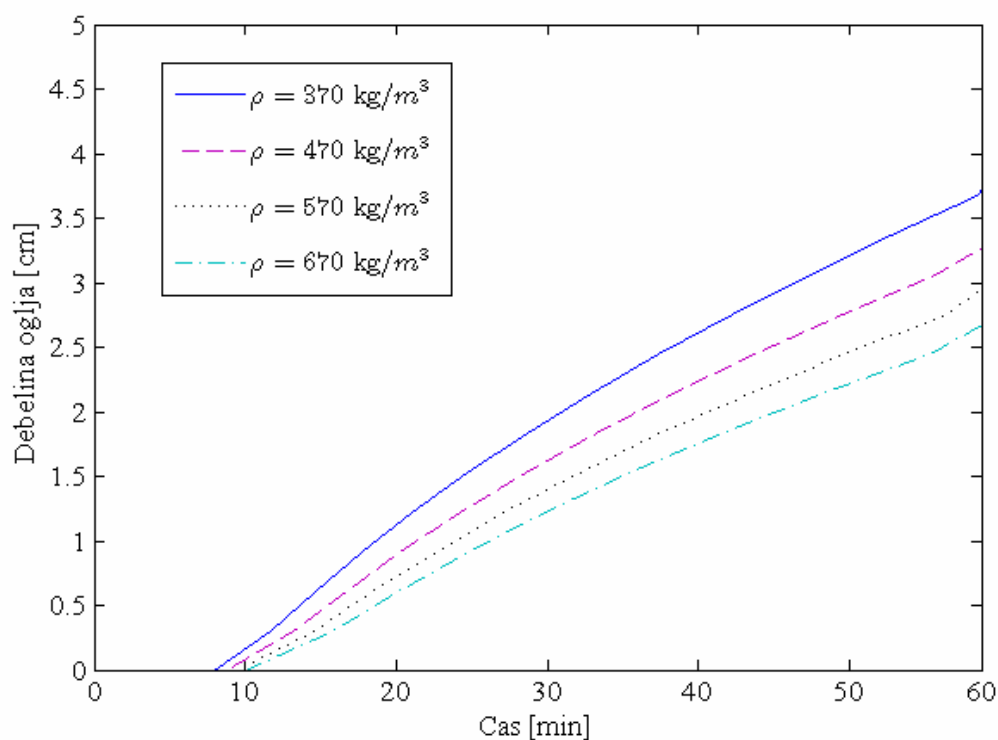
Razlike v debelini oglja med največjo in najmanjšo vrednostjo po časih si sledijo: 0,3 mm v 10-ih minutah, 1,6 mm v 20-ih minutah, 2,8 mm v 30-ih minutah, 4 mm v 45-ih minutah, 5 mm v 60-ih minutah. Debelina oglja s časom narašča.



Slika 3.9: Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja

3.1.7 Vpliv specifične gostote pri različnih vlažnostih na hitrost oglenjenja

Prikazan je primer oglenjenja v odvisnosti od gostote lesa. Vpliv specifične gostote lesa na oglenenje pokaže, da ima gostota pomemben vpliv na hitrost oglenjenja. Les z nižjo gostoto ogleni hitreje kot les z višjo gostoto. Začetek oglenjenja pri najnižji gostoti je najhitrejši, to je v osmi minuti. Z večanjem gostote se čas začetka oglenjenja nekoliko premakne. Razlike med oglenenjem z različnimi vlažnostmi lesa so zelo majhne. Bistveni prispevek k oglenjenju ima gostota lesa in ne toliko vlažnost lesa.



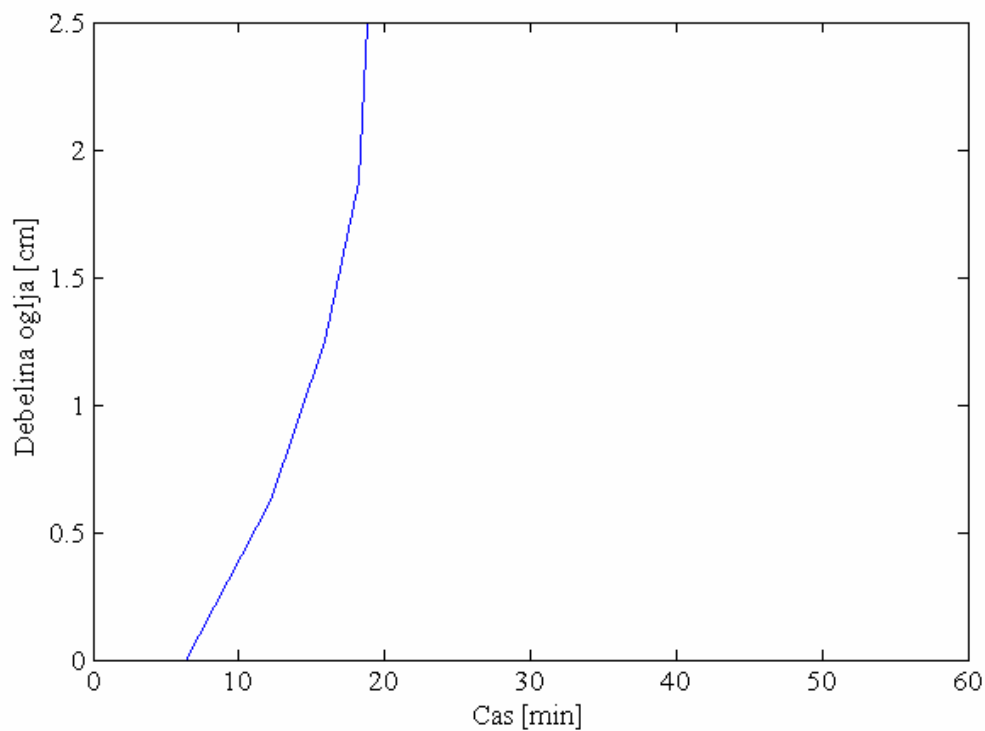
Slika 3.10: Vpliv specifične gostote materiala na hitrost oglenjenja pri vlažnosti $w = 13^\circ M$

Preglednica 1: Rezultati parametrične študije, to je debelina oglja v [cm], za posamezne parametre pri časih 10, 20, 30, 45, 60 min

	Čas [min]	10	20	30	45	60
c_p [J/kg K]	2000	0,16	1,11	1,92	2,91	3,7
	2500	0,09	0,9	1,63	2,54	3,35
	3000	0,04	0,74	1,42	2,26	3
c_m [Jkg/kg ° M]	0,00	0,15	0,87	1,63	2,54	3,31
	0,01	0,09	0,9	1,63	2,54	3,35
	0,02	0,15	0,86	1,58	2,46	3,2
h_{LV} [J/kg]	3500	0,15	0,91	1,67	2,61	3,4
	2500	0,14	0,9	1,63	2,54	3,35
	1000	0,13	0,79	1,48	2,33	3
	0	0,11	0,74	1,4	2,22	2,96
k [W/m K]	0,15	0,7	1,63	2,25	3,2	4,2
	0,65	0,4	1,23	2,15	2,83	3,6
δ [°M/K]	3	0,17	0,95	1,7	2,63	3,5
	2	0,09	0,9	1,63	2,54	3,35
	1	0,07	0,82	1,53	2,4	3,09
ε []	0,4	0,15	0,9	1,66	2,6	3,5
	0,3	0,14	0,9	1,63	2,54	3,35
	0,2	0,14	0,83	1,63	2,54	3,35
	0	0,1	0,74	1,38	2,2	3
ρ [kg/m ³]	370	0,2	1,15	1,95	2,9	3,75
	470	0,14	0,83	1,63	2,54	3,35
	570	0,05	0,75	1,4	2,2	3
	670	0	0,6	1,2	2	2,4

3.1.8 Primer tankega prereza

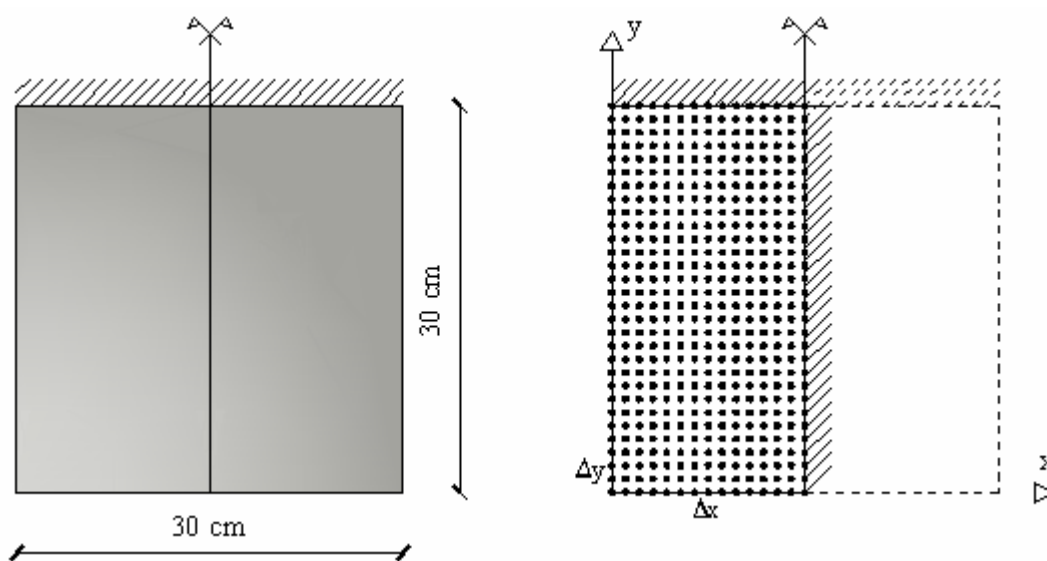
Na sliki je prikazan primer tankega prereza dimenzij 5 cm x 1 cm. Vhodni podatki so enaki kot pri enodimenzionalnem prehodu. Opazimo lahko, da se oglenenje ne ustavi, temveč zogleni cel prerez.



Slika 3.11: Debelina oglja pri zelo tankem prerezu

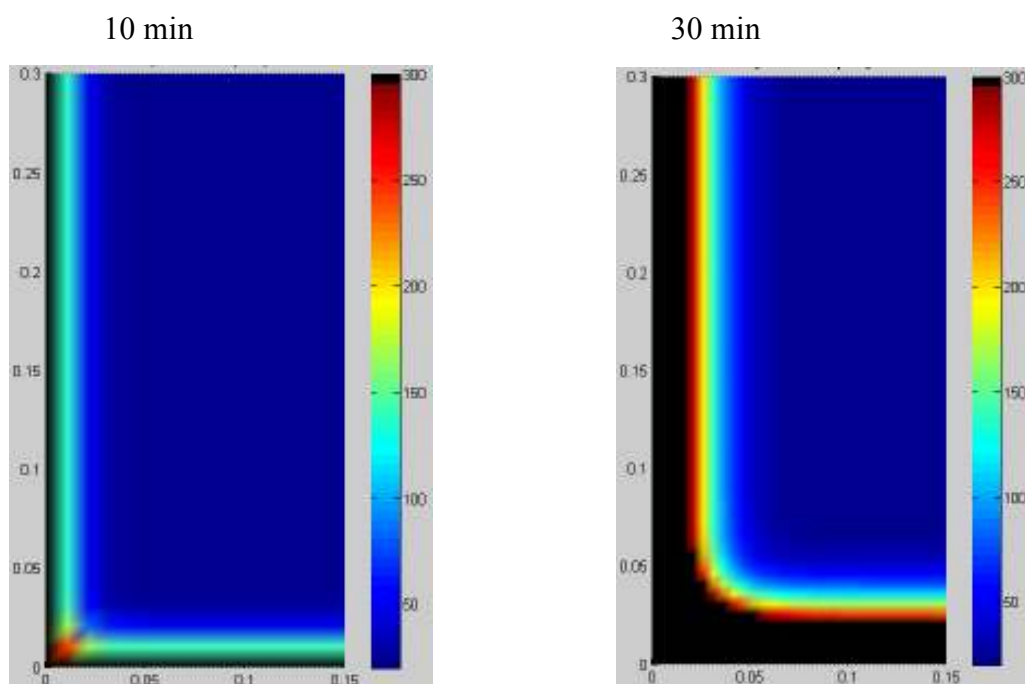
3.2 Dvodimenzionalno oglenenje lesenih nosilcev

Obravnavali smo dvodimenzionalno oglenenje smrekovih nosilcev, ki so izpostavljeni standardni požarni obtežbi ISO 834 s treh strani, zgornji rob nosilca je toplotno in vlažnostno izoliran. Dimenzije prereza so bile 30 cm x 30 cm. Upoštevali smo simetrijo prereza, zato smo obravnavali le polovico prereza. Diferenčna mreža je znašala 15 x 30 točk. Uporabili smo enake materialne lastnosti lesa kot pri enodimenzionalnem oglenenju.

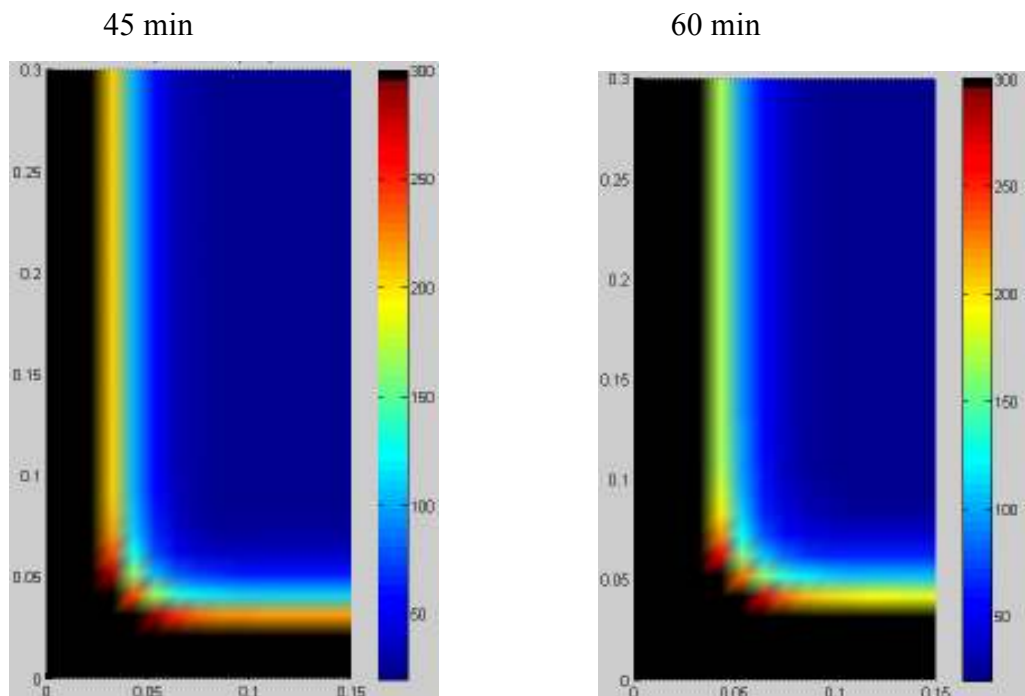


Slika 3.12: Geometrija dvodimenzionalnega prereza (leva slika) in diferenčna mreža (desna slika)

Najhitrejše oglenenje je v vogalih zaradi izpostavljenosti požara iz dveh strani. Temu pojavu rečemo zaokrožitveni efekt, kar pomeni, da kmalu po začetku gorenja prerez ni več pravokoten.



Slika 3.13: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 10 min in 30 min



Slika 3.14: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 45 min in 60 min

3.3 Dimenzioniranje prostoležečega nosilca

Obravnavamo smrekov prostoležeči nosilec, ki je poleg statične mehanske obtežbe obtežen tudi s standardno požarno obtežbo ISO 834. Predpostavimo, da je temperaturno stanje nosilca in okolice vzdolž nosilca nespremenjeno.

Dimenzionirali smo nosilec pri normalnih pogojih ($T = 20 \text{ °C}$) in nato na osnovi temperaturno-vlažnostne analize dvodimenzionalnega oglenenja iz poglavja 3.2. Odpornost nosilca smo preverili za čase 10, 30, 45 in 60 minut.

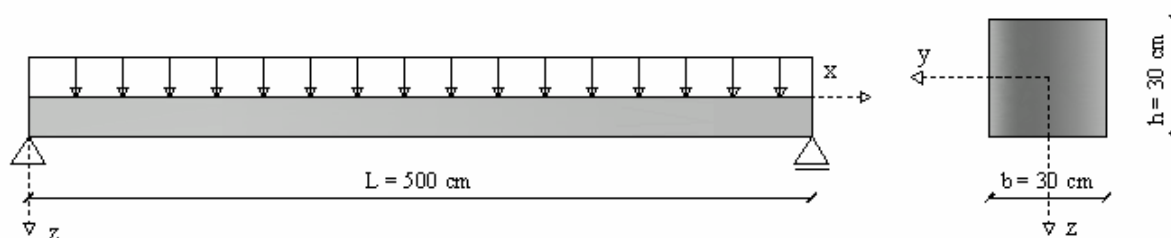
Nato smo nosilnost preverili po EC 5 s postopkom zmanjšane prečnega prereza. Prav tako smo odpornost nosilca preverili za čase 10, 30, 45 in 60 minut.

Preverili smo čas do katerega nosilec zadošča odpornosti po postopku na osnovi temperaturno-vlažnostne analize in po postopku zmanjšane prereza.

Rezultate primerjamo med sabo.

3.3.1 Dimenzioniranje pri normalni temperaturi

3.3.1.1 Geometrija nosilca



Slika 3.15: Geometrijski podatki nosilca

3.3.1.2 Materialne karakteristike

Izbrali smo smrekov les razreda C30.

Preglednica 2: Materialne karakteristike lesa.

Les	$E_{0,\text{mean}}$ [kN/cm ²]	G_{mean} [kN/cm ²]	$\varepsilon_{\text{mean}}$ [kN/cm ²]	$f_{m,d}$ [kN/cm ²]	$f_{v,d}$ [kN/cm ²]
C30	1200	75	460	1,846	0,185

3.3.1.3 Obtežba

Nosilec je obremenjen s stalno obtežbo g in s spremenljivo obtežbo q . Stalno obtežbo predstavlja lastna teža nosilca g , spremenljivo obtežbo predstavlja zvezna linijska obtežba q .

Lastna teža nosilca:

$$g = b h \rho = 0,3 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 460 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ kg/m s}^2 \cdot 0,001 = 0,414 \text{ kN/m}$$

Zvezna linijska obtežba:

$$q = 16,5 \text{ kN/m}$$

3.3.1.4 Projektna obtežba

Projektna obtežba za mejno stanje nosilnosti MSN

$$q_d = 1,35 g + 1,5 q = 1,35 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 16,5 \text{ kN/m} = 25,31 \text{ kN/m}$$

Projektna obtežba za mejno stanje uporabnosti MSU

$$q_d = 1,0 g + 1,0 q = 1,0 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,0 \cdot 16,5 \text{ kN/m} = 16,91 \text{ kN/m}$$

3.3.1.5 Obremenitve

Maksimalni moment:

$$M_d = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{25,31 \text{ kN/m} \cdot 5^2 \text{ m}^2}{8} = 7909,03 \text{ kNcm}$$

Prečna sila:

$$V_d = \frac{q_d L}{2} = \frac{25,31 \text{ kN/m} \cdot 5 \text{ m}}{2} = 63,27 \text{ kN}$$

Normalne napetosti:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{7909,03 \text{ kNcm}}{4500 \text{ cm}^3} = 1,76 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{\frac{2}{3} * A} = \frac{63,27 \text{ kN}}{\frac{2}{3} \cdot 900 \text{ cm}^2} = 0,11 \text{ kN/cm}^2$$

3.3.1.6 Dimenzioniranje

$$\text{Odpornostni moment } W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{300 \text{ cm} \cdot 300^2 \text{ cm}^2}{6} = 4500 \text{ cm}^3$$

$$\text{Vztrajnostni moment } I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{300 \text{ cm} \cdot 300^3 \text{ cm}^3}{12} = 67500 \text{ cm}^4$$

Mejno stanje nosilnosti MSN

Normalne napetosti

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$1,76 \text{ kN/cm}^2 \leq 1,846 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

$$0,11 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,185 \text{ kN/cm}^2$$

Mejno stanje uporabnosti MSU

Začetni pomiki:

$$u = \frac{5 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 500^4 \text{ cm}^4}{384 \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 \cdot 67500 \text{ cm}^4} = 10,05 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$P: k_{\text{def}} = 0,80$$

$$M: k_{\text{def}} = 0,25$$

$$u_{\text{inst}} = q_d u$$

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{inst}} (1 + k_{\text{def}})$$

$$g: \quad u_{1,\text{inst}} = 0,00414 \text{ kN/cm} \cdot 10,05 \text{ cm}^2/\text{kN} = 0,04 \text{ cm}$$

$$u_{1,\text{fin}} = 0,04 \text{ cm} \cdot (1 + 0,80) = 0,07 \text{ cm}$$

$$q: \quad u_{2,\text{inst}} = 0,165 \text{ kN/cm} \cdot 10,05 \text{ cm}^2/\text{kN} = 1,66 \text{ cm}$$

$$u_{2,\text{fin}} = 1,66 \text{ cm} (1 + 0,25) = 2,07 \text{ cm}$$

Kontrola trenutnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{inst,max}} \leq \frac{L}{300}$$

$$1,66 \text{ cm} \leq 1,67 \text{ cm}$$

Kontrola končnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{net,fin}} \leq \frac{L}{200}$$

$$2,15 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm}$$

3.3.2 Odpornost na požarno obremenitev na podlagi temperaturno-vlažnostne analize

Preverili smo ali je prerez dimenzioniran v poglavju 4.1 odporen na požarno obremenitev. Predpostavljeno je, da zogleneli del prereza nima nosilnosti. Podatke o zooglenelosti prereza smo vzeli iz poglavja 3.2. Preverili smo odpornost pri času 10 min, 30 min, 45 min in 60 min.

Prikažemo račun za čas 10 min po začetku požara.

Geometrija nosilca, materialne karakteristike in obtežba ostanejo enake kot pri obtežbi brez upoštevanja temperaturne obtežbe.

3.3.2.1 Obtežba

Lastna teža nosilca:

$$g = b h \rho = 0,3 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 460 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ kg/m s}^2 \cdot 0,001 = 0,414 \text{ kN/m}$$

Zvezna linijska obtežba:

$$q = 16,5 \text{ kN/m}$$

3.3.2.2 Projektna obtežba

Projektna obtežba za mejno stanje nosilnosti MSN

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q) = 0,6 \cdot (1,35 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 15,19 \text{ kN/m}$$

Projektna obtežba za mejno stanje uporabnosti MSU

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q) = 0,6 (1,0 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,0 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 10,15 \text{ kN/m}$$

3.3.2.3 Obremenitve

Maksimalni moment:

$$M_d = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 5^2 \text{ m}^2}{8} = 4745,42 \text{ kNcm}$$

Prečna sila:

$$V_d = \frac{q_d L}{2} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 500 \text{ m}}{2} = 37,96 \text{ kN}$$

Normalne napetosti:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{4745,42 \text{ kNcm}}{2773,93 \text{ cm}^3} = 1,71 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{\frac{2}{3} * A} = \frac{37,96 \text{ kN}}{\frac{2}{3} * 876 \text{ cm}^2} = 0,06 \text{ kN/cm}^2$$

3.3.2.4 Dimenzioniranje

Odpornostni in vztrajnostni moment smo izračunali s programom Gekar (2001), na osnovi temperaturno-vlažnostne analize.

$$W = 4322,39 \text{ cm}^3$$

$$I = 63971,37 \text{ cm}^4$$

Mejno stanje nosilnosti MSN

Normalne napetosti

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$1,08 \text{ kN/cm}^2 \leq 1,846 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

$$0,06 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,185 \text{ kN/cm}^2$$

Mejno stanje uporabnosti MSU

Začetni pomiki:

$$u = \frac{5 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 500^4 \text{ cm}^4}{384 \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 \cdot 63971,37 \text{ cm}^4} = 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$P: k_{\text{def}} = 0,80$$

$$M: k_{\text{def}} = 0,25$$

$$u_{\text{inst}} = q_d u$$

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{inst}} (1 + k_{\text{def}})$$

$$g: u_{1,\text{inst}} = 0,00414 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 0,03 \text{ cm}$$

$$u_{1,\text{fin}} = 0,03 \text{ cm} \cdot (1 + 0,80) = 0,05 \text{ cm}$$

$$q: \begin{aligned} u_{2,\text{inst}} &= 0,165 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 1,05 \text{ cm} \\ u_{2,\text{fin}} &= 1,05 \text{ cm} (1 + 0,25) = 1,31 \text{ cm} \end{aligned}$$

Kontrola trenutnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{inst,max}} \leq \frac{L}{300}$$
$$1,05 \text{ cm} \leq 1,67 \text{ cm}$$

Kontrola končnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{net,fin}} \leq \frac{L}{200}$$
$$1,36 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm}$$

Enake izračune naredimo še za 30 minut, 45 minut in 60 min. Rezultati so prikazani v preglednici 3.

3.3.3 Odpornost na požarno obremenitev na podlagi EC5

Za izračun odpornosti na požarno obremenitev na podlagi EC5, bomo uporabili postopek zmanjšanja prečnega prereza. Prikažemo postopek za čas 10 minut.

3.3.3.1 Globina zoglenelosti pri 10-ih minutah

Predvidena računsko hitrost oglenenja, ki upošteva vpliv zaokrožitve prereza in nastanka razpok [mm/min]:

$$\beta_n = 0,55$$

Za zaščitene površine je faktor k_0 v odvisnosti od časa izpostavljenosti požaru podan z izrazom:

$$k_0 = \begin{cases} t/20 & t < 20 \text{ min} \\ 1,0 & t \geq 20 \text{ min} \end{cases} = 0,50$$

$$d_0 = 0,7 \text{ cm}$$

$$d_{\text{char},n} = \beta_n t = 0,55 \cdot 10 = 0,55 \text{ cm}$$

Debelino oglja izračunamo po formuli:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 d_0 = 0,55 + 0,5 \cdot 0,7 = 0,59 \text{ cm}$$

3.3.3.2 Projektna obtežba

Projektna obtežba za mejno stanje nosilnosti MSN

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q) = 0,6 \cdot (1,35 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 15,19 \text{ kN/m}$$

Projektna obtežba za mejno stanje uporabnosti MSU

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q) = 0,6 (1,0 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,0 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 10,15 \text{ kN/m}$$

3.3.3.3 Obremenitve

Maksimalni moment:

$$M_d = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 5^2 \text{ m}^2}{8} = 4745,42 \text{ kNcm}$$

Prečna sila:

$$V_d = \frac{q_d L}{2} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 500 \text{ m}}{2} = 37,96 \text{ kN}$$

Normalne napetosti:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{4745,42 \text{ kNcm}}{3980 \text{ cm}^3} = 1,19 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{\frac{2}{3} * A} = \frac{37,96 \text{ kn}}{\frac{2}{3} * 821 \text{ cm}^2} = 0,06 \text{ kN/cm}^2$$

3.3.3.4 Dimenzioniranje

Odpornostni moment izračunamo:

$$W = \frac{(b - 2d_{ef})(h - d_{ef})^2}{6} = \frac{(30 \text{ cm} - 2 \cdot 0,9 \text{ cm}) \cdot (30 \text{ cm} - 0,9 \text{ cm})^2}{6} = 3980 \text{ cm}^3$$

$$I = \frac{(b - 2d_{ef})(h - d_{ef})^3}{12} = \frac{(30 \text{ cm} - 2 \cdot 0,9 \text{ cm}) \cdot (30 \text{ cm} - 0,9 \text{ cm})^3}{12} = 57909 \text{ cm}^4$$

Mejno stanje nosilnosti MSN

Normalne napetosti

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$1,19 \text{ kN/cm}^2 \leq 1,846 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

$$0,06 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,185 \text{ kN/cm}^2$$

Mejno stanje uporabnosti MSU

Začetni pomiki:

$$u = \frac{5 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 500^4 \text{ cm}^4}{384 \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 \cdot 57909 \text{ cm}^4} = 11,71 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$P: k_{\text{def}} = 0,80$$

$$M: k_{\text{def}} = 0,25$$

$$u_{\text{inst}} = q_d u$$

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{inst}} (1 + k_{\text{def}})$$

$$g: u_{1,\text{inst}} = 0,00414 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 0,03 \text{ cm}$$

$$u_{1,\text{fin}} = 0,03 \text{ cm} \cdot (1 + 0,80) = 0,05 \text{ cm}$$

$$q: u_{2,\text{inst}} = 0,165 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 1,16 \text{ cm}$$

$$u_{2,\text{fin}} = 1,05 \text{ cm} (1 + 0,25) = 1,44 \text{ cm}$$

Kontrola trenutnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{inst,max}} \leq \frac{L}{300}$$

$$1,16 \text{ cm} \leq 1,67 \text{ cm}$$

Kontrola končnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{net,fin}} \leq \frac{L}{200}$$

$$1,5 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm}$$

Preglednica 3: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale na osnovi temperaturno-vlažnostne analize.

Čas [min]	Normalne napetosti [kN/cm ²] $\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$	Strižne napetosti [kN/cm ²] $\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$	Začetni pomiki [cm] $u_{inst,max} \leq \frac{L}{300}$	Končni pomiki [cm] $u_{net,fin} \leq \frac{L}{200}$	Dimenzije prereza 30 x 30 [cm ²]
0	1,76 ≤ 1,85	0,11 ≤ 0,18	1,66 ≤ 1,68	2,15 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
10	1,09 ≤ 1,85	0,06 ≤ 0,18	1,05 ≤ 1,68	1,36 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
30	1,38 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,39 ≤ 1,68	1,8 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
45	1,55 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,61 ≤ 1,68	2,08 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
60	1,77 ≤ 1,85	0,09 ≤ 0,18	1,89 ≤ 1,68	2,45 ≤ 2,5	Ne ustreza dimenzijam

Preglednica 4: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale po EC 5.

Čas [min]	Normalne napetosti [kN/cm ²] $\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$	Strižne napetosti [kN/cm ²] $\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$	Začetni pomiki [cm] $u_{inst,max} \leq \frac{L}{300}$	Končni pomiki [cm] $u_{net,fin} \leq \frac{L}{200}$	Dimenzije prereza 30 x 30 [cm ²]
0	1,76 ≤ 1,85	0,11 ≤ 0,18	1,66 ≤ 1,68	2,15 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
10	1,19 ≤ 1,85	0,06 ≤ 0,18	1,15 ≤ 1,68	1,5 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
30	1,47 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,51 ≤ 1,68	1,95 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
45	1,67 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,76 ≤ 1,68	2,28 ≤ 2,5	Ne ustreza dimenzijam
60	1,91 ≤ 1,85	0,09 ≤ 0,18	2,08 ≤ 1,68	2,7 ≤ 2,5	Ne ustreza dimenzijam

Iz preglednice 3 je razvidno, da prerez dimenzij 30 cm x 30 cm, pri hkratni linijski obtežbi in požarni obtežbi, zadošča pogojem nosilnosti pri 10, 30 in 45-ih minutah. Pri 60-ih minutah prerez ne zadošča več pogojem nosilnosti, temveč ga je potrebno ponovno dimenzionirati. Ustreza do 39. minute.

Iz preglednice 4 je razvidno, da prerez dimenzij 30 cm x 30 cm, pri hkratni linijski obtežbi in požarni obtežbi, zadošča pogojem nosilnosti pri 10 in 30-ih minutah. Pri 45 in 60-ih minutah prerez ne zadošča več pogojem nosilnosti, temveč ga je potrebno ponovno dimenzionirati.

4 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo analizirali temperaturno-vlažnostno stanje lesenih nosilcev z upoštevanjem oglenenja lesa. Uporabili smo nelinearni parcialni diferencialni enačbi Luikova, ki se uporabljata za opis povezanega prehoda toplote in vlage skozi les.

Uporabili smo izdelan računalniški program v okolju Matlab, s katerim smo izvedli računske primere.

Naredili smo parametrično študijo vpliva različnih parametrov na hitrost oglenenja lesa. Parametrično študijo smo izvedli za enodimenzionalni prerez s konstantnimi parametri. Analizirali smo vpliv naslednjih parametrov: specifično toploto lesa c_p , specifično vlago lesa c_m , izparilno toploto lesa h_{LV} , koeficient toplotne prevodnosti lesa in oglja k , termogradientni koeficient lesa δ , delež vlage v plinastem stanju lesa ε in gostoto lesa ρ , na hitrost oglenenja lesa. Ugotovili smo, da imajo parametri velik vpliv na hitrost in debelino oglenenja. Vplivajo pa tudi na začetek oglenenja, ki ga definiramo, ko les doseže temperaturo 300 °C.

Prikazali smo tudi oglenenje dvodimenzionalnega homogenega prereza z enakimi konstantnimi vhodnimi podatki. Pri dvodimenzionalnem oglenenju pride do zaokrožitvenega pojava, kar pomeni, da prerez kmalu po začetku gorenja ni več pravokoten.

Razporeditev oglja po dvodimenzionalnem prerezu smo uporabili za dimenzioniranje homogenega prostoležečega nosilca, ki ga obtežimo z mehansko in požarno obtežbo. Preverili smo nosilnost tudi po metodi zmanjšanega prereza po EC 5 in rezultate primerjali.

Pomembna lastnost zoglenega dela lesa je, da zoglelost lesa pomeni drastično zmanjšanje trdnostnih in togostnih parametrov materiala in pojav razpok. Po drugi strani pa les slabo prevaja toploto po globini. Oglje, ki je na površini zгореlega lesa, je toplotni izolator. Zato se

kisik hitro porabi in možna je samougasnitev. Do te pogosteje pride pri prerezih velikih dimenzij.

VIRI

Budaiwi, I., El-Diasty, R., Abdou, A. 1999. Modeling of moisture and thermal transient behaviour of multilayer non-cavity walls. *Building and Environment* 34, 537-551.

Chang, W.J., Weng, C.I. 2000. An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43: 3621-3632.

Fredlund, B. 1993. Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire. *Fire Safety Journal* 20: 39-69.

Gams, M. 2003. Povezan prenos toplote in vlage v poroznem materialu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Gekar. 2001. Program za izračun osnovnih geometrijskih karakteristik ravninskih likov poligonalne oblike. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo.

Irudayaraj, K., Haghghi, K., Strohine, R.L. 1990. Nonlinear finite element analysis of coupled heat and mass transfer problems with an application to timber drying, *Drying Technology* 8, 4: 731-749.

Janssens, M.L. 2004. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. *Fire and Materials* 18: 199-207.

Kocafe, D., Wounsi, R., Chaudry, B., Kocaefer, Y. 2006. Modeling of heat and mass transfer during high temperature treatment of aspen. *Wood Science and Technology* 40: 371-391.

Križanič, F., Vidav., I. 1985. Navadne in parcialne diferencialne enačbe. Variacijski račun. Ljubljana. Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS. Zveza organizacij za tehnično kulturo Slovenije.

Lau, P.W.C., White, R., Van Zeeland, I. 1999. Modelling the charring behaviour of structural lumber. *Fire and Materials* 23: 209-216.

Liu, J. Y., Cheng, S. 1991. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 34, 7: 1747-1754.

Luikov, A.V., Mikhailov, Yu.A. 1966. Theory of energy and mass transfer. Oxford. Pergamon Press: 392 str.

Luikov, A.V. 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (Review). *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18: 1-14.

Nijdam, J.J., Langrish, T.A.G., Keey, R.B. 2000. A high-temperature drying model for softwood timber. *Chemical Engineering Science* 55: 3585-3598.

Mišmaš, B. 2004. Analiza lesenih nosilcev, izpostavljenih požaru. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Schaffer, E.L. 1967. Charring rate of selected woods-transverse to grain. Research paper FPL-69. USDA Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin, USA.

Schnabl, S. 2007. Mehanska in požarna analiza kompozitnih nosilcev. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Thomas, H.R., Morgan, K., Lewies, R.W. 1980. A fully nonlinear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies. *International Journal for numerical Methods in Engineering* 15: 1381-1393.

Turk, G. 1987. Programska oprema za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote z upoštevanjem raznih robnih pogojev in notranjega vira toplote zaradi hidratacije cementa. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Konstrukcijska smer.

Yang, L., Chen, X., Zhou, X., Fan, W. 2003. The pyrolysis and ignition of charring materials under an external heat flux. *Combustion and Flame* 133: 407-413.

White, R.H., Nordheim, E.V. 1992. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technology* 28, 1: 5-30.

Pravilniki

SIST EN 1995-1-2. 2004. Eurocode 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – Del 1-2: Splošna pravila – Projektiranje požarno odpornih konstrukcij.

Internet

Poon, L. 2003. Literature Review on the Contribution of fire resistant timber construction to heat release rate. Warrington fire research.

<http://wfra.com.au/20633.pdf> (3.9.2007)

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana ŠPELA BLATNIK izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:

»TEMPERATURNA IN VLAŽNOSTNA ANALIZA LESA«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 15.10.2007

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 614.84:624.011.1:691.1(043.2)

Avtor: Špela Blatnik

Mentor: izr. prof. dr. Goran Turk

Somentor: dr. Simon Schnabl

Naslov: Temperaturna in vlažnostna analiza lesa

Obseg in oprema: 53 str., 4 pregl., 19 sl.

Ključne besede: parametrična študija, enačbe Luikova, požar, oglenenje

Povzetek:

V diplomski nalogi je predstavljena analiza temperaturno-vlažnostnega stanja lesenih nosilcev z upoštevanjem oglenjenja lesa. Uporabljeni sta nelinearni parcialni diferencialni enačbi Luikova, ki se uporabljata za opis povezanega prehoda toplote in vlage skozi les. Računski primeri so bili izvedeni s programom napisanim za okolje Matlab. Parametrična študija je izvedena za enodimenzionalen prerez s konstantnimi parametri. Prikazani so vplivi različnih parametrov na hitrost oglenjenja. Prikazano je tudi oglenenje dvodimenzionalnega homogenega prereza s pojavom zaokrožitve. Izračunano razporeditev oglja po dvodimenzionalnem prerezu uporabimo za dimenzioniranje homogenega prostoležečega nosilca, ki ga obtežimo z zunanjo statično in požarno obtežbo.

BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**UDC: 614.84:624.011.1:691.1(043.2)****Author: Špela Blatnik****Supervisor: Assoc. prof. dr Goran Turk****Co-mentor: dr. Simon Schnabl****Title: Heat and moisture transfer analysis of wood****Notes: 53 p., 4 tab., 19 fig.****Key words: parametric study, Luikov equations, fire, charring****Abstract:**

The aim of the diploma thesis is to analyze the temperature and moisture transfer in timber beams where the charring rate is also taken into account. A simultaneous heat and moisture transfer in wood is represented by two second order non-linear partial differential equations derived by Luikov. Simulation results are performed by software programme written for Matlab environment. The software program models the Luikov equations, which are used for analysis and behaviour of two-dimensional section of timber exposed to fire. A parametric study with constant parameters is done for a one dimensional section through. The influences of different parameters on charring rate are shown. Charring of the homogeneous two-dimensional section with effect of rounding is also represented. We use numerically calculated arranged charcoal in the two-dimensional section through case for dimensioning homogeneous simply supported beam, which is subjected with external static and fire load. For this case the calculations are made and compared with numerical calculations for two-dimensional case.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se najlepše zahvaljujem mentorju izr.prof.dr. Goranu Turku in somentorju dr. Simonu Schnablu.

Hvala družini za podporo in potrpežljivost.

Hvala Janezu za spodbudo in pomoč.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Opredelitev problema	1
1.2	Cilji naloge	1
2	OSNOVNE ENAČBE PREVAJANJA TOPLOTE IN VLAGE	3
2.1	Splošno	3
2.2	Enačbi Luikova	3
2.2.1	Materialni parametri	6
2.2.2	Druge spremenljivke	7
2.3	Reševanje enačb	7
2.3.1	Analitično reševanje enačb	8
2.3.2	Numerično reševanje enačb	9
2.4	Piroliza lesa	10
2.5	Modeli oglečenja	11
2.5.1	Empirični modeli oglečenja	11
2.5.1.1	Standardni požari	12
2.5.1.2	Nestandardni požari	16
2.5.1.3	Požari s konstantno temperaturo	18
2.5.2	Teoretični modeli oglečenja	19
2.6	Požarno projektiranje	22
2.6.1	Standardna požarna odpornost lesenih konstrukcij	22
3	RAČUNSKI PRIMERI	23
3.1	Parametrična študija enodimenzionalnega oglečenja lesenih nosilcev	23
3.1.1	Vpliv specifične toplote snovi na hitrost oglečenja	25
3.1.2	Vpliv specifične vlage snovi na hitrost oglečenja	26
3.1.3	Vpliv izparilne toplote snovi na hitrost oglečenja	27
3.1.4	Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti na hitrost oglečenja	28
3.1.5	Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglečenja	30

3.1.6	Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja.....	31
3.1.7	Vpliv specifične gostote pri različnih vlažnostih na hitrost oglenjenja.....	32
3.1.8	Primer tankega prereza	34
3.2	Dvodimenzionalno oglenenje lesenih nosilcev.....	35
3.3	Dimenzioniranje prostoležečega nosilca.....	37
3.3.1	Dimenzioniranje pri normalni temperaturi.....	37
3.3.1.1	Geometrija nosilca.....	37
3.3.1.2	Materialne karakteristike	37
3.3.1.3	Obtežba.....	38
3.3.1.4	Projektna obtežba.....	38
3.3.1.5	Obremenitve.....	38
3.3.1.6	Dimenzioniranje	39
3.3.2	Odpornost na požarno obremenitev na podlagi temperaturno-vlažnostne analize	40
3.3.2.1	Obtežba.....	41
3.3.2.2	Projektna obtežba.....	41
3.3.2.3	Obremenitve.....	41
3.3.2.4	Dimenzioniranje	42
3.3.3	Odpornost na požarno obremenitev na podlagi EC5.....	43
3.3.3.1	Globina zoglenelosti pri 10-ih minutah	43
3.3.3.2	Projektna obtežba.....	44
3.3.3.3	Obremenitve.....	44
3.3.3.4	Dimenzioniranje	45
4	ZAKLJUČEK	49

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Rezultati parametrične študije, to je debelina oglja v [cm], za posamezne parametre pri časih 10, 20, 30, 45, 60 min.....	33
Preglednica 2: Materialne karakteristike lesa.	38
Preglednica 3: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale na osnovi temperaturno-vlažnostne analize.	47
Preglednica 4: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale po EC 5.....	47

KAZALO SLIK

Slika 1.1: Prikaz zmanjšanja prereza pri gorenju. Prerez A predstavlja prerez pred požarom, prerez B po pol ure gorenja in prerez C po eni uri gorenja	2
Slika 2.1: Robni pogoji	9
Slika 2.2: Posamezne faze pri procesu pirolize	10
Slika 2.3: Požarna krivulja ISO-834	13
Slika 3.1: Geometrija modela	23
Slika 3.2: Model enodimenzionalnega simetričnega prereza s prikazom diferenčne mreže	24
Slika 3.3: Vpliv specifične toplote lesa na hitrost oglenjenja	25
Slika 3.4: Vpliv specifične vlage lesa na hitrost oglenjenja	26
Slika 3.5: Vpliv izparilne toplote lesa na hitrost oglenjenja	27
Slika 3.6: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti oglja na hitrost oglenjenja	28
Slika 3.7: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti lesa na hitrost oglenjenja	29
Slika 3.8: Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglenjenja	30
Slika 3.9: Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja	31
Slika 3.10: Vpliv specifične gostote materiala na hitrost oglenjenja pri vlažnosti $w = 13^{\circ}M$	32
Slika 3.11: Debelina oglja pri zelo tankem prerezu	34
Slika 3.12: Geometrija dvodimenzionalnega prereza (leva slika) in diferenčna mreža (desna slika)	35
Slika 3.13: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 10 min in 30 min	36
Slika 3.14: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 45 min in 60 min	36
Slika 3.15: Geometrijski podatki nosilca	37

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema

Les je v gradbeništvu eden od najpomembnejših materialov skozi celotno zgodovino človeštva in ima pri gradnji pomembno vlogo še danes. Posekan in posušen les se uporablja v različne namene. Vgrajen v konstrukcijo, se neprestano odziva na spremembe temperature in vlage v okolju.

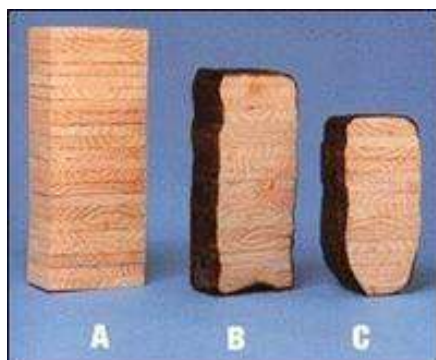
Les je v tehničnem smislu naravni, vlaknasti in organski kompozitni material. Pomembni lastnosti, ki vplivata na mehanske karakteristike sta anizotropija in poroznost.

Pomemben dejavnik je izpostavljenost lesa visokim temperaturam oziroma požaru. Požar je zelo zapleten pojav in ga zato z modeli težko opišemo. Pojav, ki nastane ob tem, je toplotna degradacija ali tako imenovana piroliza. Gorenje lesa določajo vnetljivost, širjenja plamena, zadimljenost, naknadno tlenje, itd. Les pri visokih temperaturah poka, se deformira, površina pa se prekrije z ostankom gorenja, to je ogljem. Faktorji, ki vplivajo na gorenje lesa in posledično na oglenenje, so: temperatura, vsebnost vlage, gostota lesa, dimenzije lesa, itd.

Podobno kot ostali materiali, ki se uporabljajo v gradbeništvu, mora tudi les ustrezati standardom požarne odpornosti. V laboratorijih so opravili mnoge preizkuse, s katerimi so ugotavljali hitrost oglenenja posameznih vrst lesa ob znanih pogojih povišane temperature. Pomembna lastnost zoglenelega lesa je v preprečevanju dviga temperature v plasti oglja in notranjem nezoglenelem delu.

1.2 Cilji naloge

Namen naloge je na osnovi izvedbe občutljivostne analize določiti bistvene parametre za določitev temperaturnega in vlažnostnega stanja lesa pri požaru z upoštevanjem oglenenja lesa.



Slika 1.1: Prikaz zmanjšanja prereza pri gorenju. Prerez A predstavlja prerez pred požarom, prerez B po pol ure gorenja in prerez C po eni uri gorenja

Prevajanje toplote in vlažnosti v poroznih materialih, kakršen je les, opišemo s sistemom dveh nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb Luikova, ki opisuje povezan prehod toplote in vlage v kapilarno poroznih materialih. Pri tem moramo upoštevati, da se toplota in vlaga prenašata na različne načine, to je s konvekcijo, prevajanjem ali kondukcijo in sevanjem ali radiacijo. Upoštevati moramo tudi izhlapevanje, izparevanje in kondenziranje vode ter oglenenje lesa.

Uporabili smo računalniški program, napisan v programskem okolju Matlab. Analizirali smo temperaturno in vlažnostno stanje lesa z upoštevanjem oglenenja. Ker je problem v splošnem prezahteven, analitičnih rešitev ne poznamo, zato smo ga rešili numerično.

Naredili smo študijo enodimenzionalnega prehoda toplote in vlage po homogenem nosilcu za različne materialne parametre. Rezultati izračunov so predstavljeni v diagramih, v katerih je predstavljena odvisnost debeline oglja od različnih parametrov.

Prikazano je tudi dvodimenzionalno ogljenje in spremljajoči zaokrožitveni pojav. Na dvodimenzionalno ogljenje se naveže dimenzioniranje prostoležečega nosilca na hkratno zunanjo statično mehansko obtežbo in požar.

2 OSNOVNE ENAČBE PREVAJANJA TOPLOTE IN VLAGE

2.1 Splošno

Luikov (1975) je razvil enačbe za opis prehoda toplote in vlage v kapilarno poroznih materialih. Enačbe veljajo za vse kapilarno porozne materiale. Uporabne so za opis prehoda toplote in vlage v prehrabeni in tekstilni industriji.

Problem povezanega prehoda toplote in vlage je nelinearen in nestacionaren. V lesenih nosilcih, ki so izpostavljeni velikim temperaturnim spremembam, kot je to v primeru požara, je tako obnašanje še bolj izrazito.

2.2 Enačbi Luikova

Sistem Luikovih enačb (1975) za povezan prehod toplote in vlage v kapilarno poroznih snoveh opisujeta dve nelinearni parcialni diferencialni enačbi.

Enačbi zapišemo z upoštevanjem naslednjih predpostavk:

- homogen in ortogonalno anizotropen material,
- gravitacijske sile zanemarimo, ker so veliko manjše od sil, ki nastopajo v kapilarah
- materialni in prevodnostni parametri lesa in oglja so odvisni od temperature in vlage,
- krčenje in nabrekanje ter ostale mehanske spremembe lesa in oglja zanemarimo,
- maso plinov oziroma hlapov zanemarimo, masni tok je sestavljen le iz toka kapljevine,
- hitrost pretoka kapljevine skozi snov zanemarimo, torej ne upoštevamo vpliva gibalne količine na pretok kapljevine,
- izparevanje oziroma kondenziranje vode deluje kot energijski izvor oziroma ponor,
- kompozitni nosilec se nahaja v okolju s konstantnim zračnim tlakom.

Ob teh predpostavkah zapišemo enačbi (Schnabl (2007), Gams (2003), Chang. Weng. (2000)), ki opisujejo povezan problem prehoda toplote in vlage skozi kapilarno porozno snov, za dve dimenziji v komponentni obliki na naslednji način:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} - (\varepsilon h_{LV} + \gamma) \frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{my} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{my} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.2)$$

Enačba (2.1) je enačba prevajanja toplote, ki ji je dodan člen, s katerim zajamemo vpliv gradienta vlage na spremembo temperature. Druga enačba (2.2), je enačba difuzije vlage, kateri je dodan člen, ki poleg gradienta vlage upošteva tudi vpliv gradienta temperature na razporeditev vlage.

Enačbi sta zapisani za potenciala temperature T in vlage w , zato dobimo rezultate izražene s potencialoma ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{M}$). Rezultate temperature tudi ponavadi izražamo v $^{\circ}\text{C}$. Vlažnost ponavadi izražamo z vlažnostjo lesa V , ki je definirana kot delež vode na maso suhega lesa (kg/kg). Iz potenciala vlažnosti v vlažnost jih pretvorimo z naslednjo formulo:

$$V = c_m w. \quad (2.3)$$

V primeru, da je problem povezanega prehoda vlage in toplote linearen, lahko enačbo (2.1) delimo z ρc_p ter vpeljemo oznaki:

$$L = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.4)$$

in

$$v = \frac{c_m}{c_p} (\varepsilon h_{LV} + \gamma). \quad (2.5)$$

Enačbo (2.1) zapišemo v preglednejši obliki:

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = L \left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + v \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t}. \quad (2.6)$$

Iz enačbe (2.6) izrazimo $\left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right)$ in vstavimo rezultat v enačbo (2.2).

Vpeljemo oznaki:

$$D = \frac{k D_M}{\rho c_m (k + D_M \delta (\varepsilon h_{LV} + \gamma))} \quad (2.7)$$

in

$$\lambda = \frac{c_p D_M \delta}{c_m (k + D_M \delta (\varepsilon h_{LV} + \gamma))}. \quad (2.8)$$

Enačbo (2.2) zapišemo v krajši obliki:

$$\frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + \lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t}. \quad (2.9)$$

Za reševanje linearnega problema uporabljamo zapis prenosa vlage in toplote v obliki enačbe (2.6) in (2.9). Imamo sistem dveh linearnih parcialnih enačb 2. reda glede na koordinate (x, y) in 1. reda glede na čas t .

Za rešitev enačb (2.1) in (2.2) moramo poznati ustrezne robne in začetne pogoje. Z začetnimi pogoji določimo temperaturo in vlago po prerezu pri začetnem času $t = t_0 = 0$,

$$T(x, y, 0) = T_o(x, y) \quad (2.10)$$

in

$$w(x, y, 0) = w_o(x, y). \quad (2.11)$$

Robni pogoji so lahko različnih tipov:

- predpisana temperatura in potencial vlage na robu,
- predpisana toplotni in vlažnostni tok na površini,
- toplotni in vlažnostni tok sta linearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici,
- toplotni in vlažnostni tok sta nelinearno odvisna od razlike med temperaturo in vlago na robu in v okolici.

V komponentni obliki se enačbe glasijo:

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} - k_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = h_c (T - T_A) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon) h_{LV} h_m (w - w_A) \quad (2.12)$$

in

$$D_{My} \frac{\partial w}{\partial y} e_{ny} + D_{Mz} \frac{\partial w}{\partial z} e_{nz} + D_{My} \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + D_{Mz} \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} = -h_m (w - w_A), \quad (2.13)$$

kjer sta h_c in h_m toplotni in vlažnostni prestopni koeficient, T_A in w_A sta temperatura in potencial vlažnosti okolice, ε je efektivna površinska emisivnost zunanje strani nosilca, σ je Stefan-Boltzmanova konstanta radiacije.

2.2.1 Materialni parametri

c_p [J/kg K] specifična toplota snovi

Specifična toplota snovi je toplota, ki je potrebna, da en kilogram snovi segrejemo za eno °C.

c_m [kg/kg °M] specifična vlaga snovi

Specifična vlaga snovi je vlaga, potrebna, da vlažnost enega kilograma snovi spremenimo za eno °M.

D_M [kg/m s °M] prevodnostni koeficient vlage

Prevodnostni koeficient vlage pove, koliko kilogramov vode se prenese skozi meter debelo plast snovi v eni sekundi, če je razlika potencialov vlage med dvema točkama te plasti 1°M.

h_{LV} [J/kg] izparilna toplota snovi

Izparilna toplota snovi je toplota, ki jo moramo pri stalnem tlaku dovesti enemu kilogramu snovi, da preide iz plinastega v kapljevino stanje.

k [W/m K] koeficient toplotne prevodnosti

Koeficient toplotne prevodnosti pove, koliko joulov se prenese skozi en meter debelo plast snovi v eni sekundi, če je temperaturna razlika med krajnima točkama te plasti ena °C.

δ [°M/K] termogradientni koeficient

Termogradientini koeficient pove za koliko se spremni vlažnostni potencial med dvema točkama, če se temperatura spremeni za eno °C.

ε delež vlage v plinastem stanju

γ [J/kg] toplota sorpcije in desorpcije

ρ [kg/m³] gostota snovi

2.2.2 Druge spremenljivke

t [s] čas

$T(x, y, t)$ [°C] temperatura snovi

$V(x, y, t)$ [kg/kg] vlažnost lesa

$w(x, y, t)$ [°M] potencial vlage

x, y [m] koordinate kartezičnega koordinatnega sistema.

2.3 Reševanje enačb

Sistem enačb povezanega prehoda toplote in vlage v kapilarno poroznih materialih je težko rešljiv. Fizikalne lastnosti lesa so pri visokih temperaturah odvisne od temperature, vlage ter drugih parametrov. Tudi, če se omejimo na zelo preproste primere diferencialnih enačb, jih

najpogosteje ne znamo rešiti analitično. Analitične rešitve so možne le v najpreprostejših primerih, numerične metode pa uporabimo za vse druge primere.

V nadaljevanju bomo na kratko opisali posamezne metode reševanja enačb, ki jih ločimo na analitične in numerične.

2.3.1 Analitično reševanje enačb

Analitična rešitev je tista odvedljiva funkcija, ki identično zadošča enačbam in robnim pogojem. Če znamo poiskati analitično rešitev, poznamo rezultat pri poljubni vrednosti neodvisne spremenljivke.

Nelinearne parcialne diferencialne enačbe lahko rešujemo le numerično.

V nadaljevanju bomo našli nekaj rešitev analitičnih enačb za povezan prehod toplote in vlage:

- Luikov in Mikhailov (1966) sta podala analitično rešitev za preproste primere plošče, cilindra in sfere s tem, da sta uporabila konstantne koeficiente prevodnosti znotraj posameznega časovnega koraka.
- Chang in Weng (2000) sta podala analitično rešitev za prehod toplote in vlage s pomočjo Laplaceve transformacije ter Besselovih funkcij. Obravnavani so problemi plošč, sfer in cilindrov. Razlike med numeričnim in analitičnimi rešitvami so zelo majhne in še te verjetno nastanejo zaradi premajhnega števila upoštevanja kompleksnih lastnih vrednosti.
- France Križanič (1985) je podal analitično rešitev za prevajanje toplote na neskončnem nosilcu. Omenimo dva primera rešitev (Turk (1987)).

Prvi primer je prehod toplote skozi homogen sloj, kjer je na robovih predpisana konstantna temperatura. Naloga je linearna in se dobro ujema z numeričnimi rešitvami.



Slika 2.1: Robni pogoji

Drugi primer je prehod toplote skozi homogen sloj. Na eni strani sloja je rob toplotno izoliran, na drugi strani je konvekcija. Največje odstopanje je na robu, kjer toplota prehaja s konvekcijo.

- Ostali raziskovalci, ki so predstavili analitične rešitve so bili še Pandey (1999), Chang in Weng (2000) in drugi.

2.3.2 Numerično reševanje enačb

Numerično reševanje enačb se je začelo z razvojem računalnikov, ki so omogočili reševanje velikih sistemov linearnih enačb. Pred dobo računalnikov so probleme reševali tako, da so zanemarili vpliv nekaterih količin in z analitičnimi metodami poiskali rešitev poenostavljenega problema. Skeptičnost glede pravilnosti rešitve mora vedno obstajati, ker ni vedno nujno, da rezultati konvergirajo k pravi rešitvi. Pomagamo si s primerjavami z analitičnimi rešitvami, ki pa jih ni veliko. Natančnost rešitve je odvisna tudi od gostote diferenčne mreže.

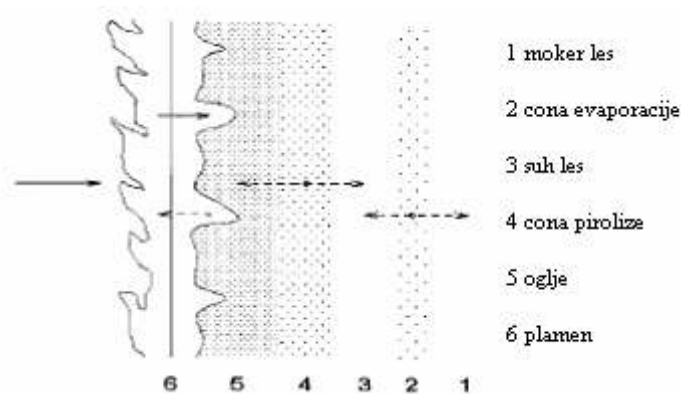
Za numerično reševanje lahko uporabimo naslednje metode: diferenčno metodo, metodo končnih elementov, metodo robnih elementov itd.

Pri metodi končnih elementov področje, ki ga analiziramo razdelimo na končne elemente, ki so vedno razmeroma enostavni. Vpeljemo vozlišča elementov in vozlišča teles, v katerih se stikajo vozlišča elementov (Gams (2003), Turk (1987)).

Diferenčno metodo uporabimo predvsem pri računu pravokotnih območij. V enačbah namesto odvodov uporabimo končne difference točkovnih vrednosti iskanih funkcij ter diferencialne

enačbe nadomestimo z algebraičnimi. Diferenčna metoda lahko služi tudi za primerjavo z metodo končnih elementov (Schnabl (2007)).

2.4 Piroliza lesa



Slika 2.2: Posamezne faze pri procesu pirolize

Les, ki je izpostavljen požaru, je podvržen toplotni degradaciji oziroma tako imenovani pirolizi (Janssens (2004)). Piroliza je izjemno kompleksen proces, kjer se prepletajo kemijski procesi s prehodom toplote in vlage. Piroliza spremeni les v oglje in pline, ki lahko zagorijo, če je prisotnega dovolj kisika in visoke temperature.

Les vedno vsebuje določeno količino vode. Pri izpostavljenosti požaru se izhlapevanje proste vode začne pri temperaturi do 100°C, v območju od 100°C do 220°C pa izparevanje kemijsko vezane vode. Vodna para potuje v smeri požaru izpostavljene zunanje površine, manjši del pa potuje v nasprotni smeri, kjer je temperatura pod 100°C in ponovno kondenzira. Pri temperaturah lesa med 110°C in 220°C poteka razkroj najmanj stabilnih vlaken lesa, bolj stabilna vlakna začnejo razpadati v območju med 200°C in 270°C. Les začne pri teh temperaturah ogljneti. Volumen nastalega oglja je manjši od začetnega volumna lesa. Spremenijo se tudi vse druge termične in mehanske lastnosti materiala. V območju med 270°C in 300°C se les lahko vname, vendar težko. V območju od 280°C do 500°C se gorljivi plini (ogljikov monoksid, metan, formaldehid, mravljična in acetilenska kislina) razredčijo z ogljikovim dioksidom in vodno paro. Običajno se les vname in nastane plamen. Ostanek je oglje.

Pri toplotni degradaciji so definirana tri območja:

- Območje plamena, 225° do 260°C, kjer pride do vžiga, če je prisoten vir vžiga.
- Območje gorenja, 260° do 290°C, kjer se pojavi stalni plamen.
- Območje vžiga, 330° do 470°C, kjer pride do spontanega vžiga.

2.5 Modeli oglenjenja

Oglenenje lesa raziskujejo že zelo dolgo. Splošno lahko hitrost oglenjenja kvantitativno opišemo kot izgubo mase (g/s) ali kot hitrost širjenja oglja (mm/s).

Na temperaturo požara in njegovo širjenje vplivajo številni parametri, ki jih določamo z eksperimenti. Eksperimente največkrat izvajamo v požarnih laboratorijih. Požarne krivulje so bile razvite v želji po enotnem opisovanju jakosti požara. Razvoj temperatur pri realnem požaru v primerjavi s požarno krivuljo je lahko zelo drugačen. Požarna krivulja predstavlja le ovojnico požara v določenih okoliščinah.

Pri požaru moramo poleg povezanega prehoda toplote in vlage upoštevati tudi hitrost oglenjenja oziroma stopnjo zогlenitve. Oglenenje je kompleksen proces, ki je odvisen od številnih faktorjev, kot so vrsta lesa, gostota lesa, vsebnost vlage, termičnih lastnosti.

Modele oglenjenja delimo na empirične modele in teoretične modele.

2.5.1 Empirični modeli oglenjenja

Razvitih je veliko število različnih modelov oglenjenja. Nekateri so preprosti, nekateri pa upoštevajo tudi enačbe termodinamike. Eksperimenti so v večini primerov izredno zahtevni in dragi, zato je poudarek na razvoju učinkovitih računskih modelov.

V veliki večini primerov (Poon (2003)) je splošna oblika modela za določitev hitrosti in debeline oglenjenja lesenih elementov je naslednja:

$$\frac{\partial x}{\partial t} \approx at^n, \tag{2.14}$$

kjer $\frac{\partial x}{\partial t}$ pomeni hitrost oglenjenja,

x debelino oglja,

t čas izpostavljenosti požarni obtežbi,

a in n pa regresijski konstanti.

Glede na vrsto požarne obtežbe delimo poenostavljene modele na modele, ki določajo hitrost oglenjenja v primeru:

- standardnega požara,
- nestandardnega požara,
- konstantne temperature.

2.5.1.1 Standardni požari

Standardna požarna odpornost je po definiciji sposobnost konstrukcije ali njenega dela, da izpolni zahtevane funkcije pri izpostavljenosti segrevanju, glede na standardno požarno krivuljo temperatura – čas za določeno kombinacijo obtežbe in določen čas trajanja.

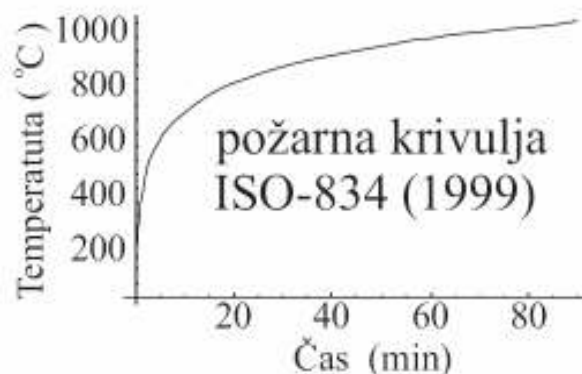
Standardna požarna obtežba **ISO 834** (Benichou, Sultan (1999)) je podana s krivuljo časovnega spreminjanja temperature požarnega prostora. Odpornost konstrukcij in konstrukcijskih elementov je definirana glede na standardno požarno krivuljo. Temperatura požarnega prostora ves čas narašča. Temperatura se spreminja po naslednji formuli:

$$T_g = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (2.15)$$

kjer T_g pomeni povprečno temperaturo požarnega prostora v °C,

T_0 temperaturo okoliškega zraka ob nastopu obtežbe v °C in

t čas izpostavljenosti požaru, izražen v minutah.



Slika 2.3: Požarna krivulja ISO-834

V Severni Ameriki uporabljajo krivuljo **ASTM E 119** (White, Nordheim (1992)), ki je podana z naslednjo enačbo:

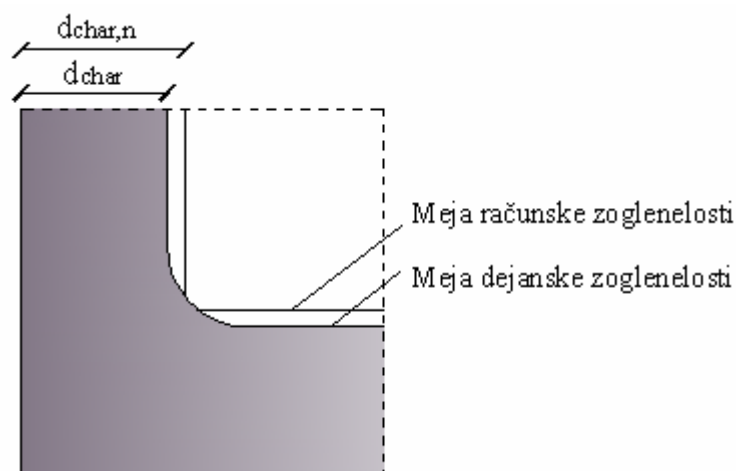
$$T_g = T_o + 750 * (1 - \exp(-0,49\sqrt{t})) + 22\sqrt{t}. \quad (2.16)$$

V **EC 5** (SIST EN 1995) je globina oglja d_{char} (mm) v primeru enodimenzionalnega oglenenja lesa, ki ni požarno zaščiten, podana z izrazom:

$$d_{char} = \beta_0 t, \quad (2.17)$$

kjer β_0 pomeni hitrost enodimenzionalnega oglenenja za različne vrste lesa in gostote lesa [mm/min],

t je čas požarne izpostavljenosti [min].



Slika 2.4: Prikaz dejanske zoglenelosti in računske zoglenelosti ter zaokrožitveni pojav

Predvidena računsko globina zogljenosti se določi na osnovi trajanja izpostavljenosti in predvidene projektne hitrosti oglečenja, kot je prikazano v izrazu:

$$d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t, \quad (2.18)$$

kjer $d_{\text{char},n}$ pomeni predvideno projektno globino zogljenosti,

β_n predvidena računsko hitrost oglečenja, ki upošteva vpliv zaokrožitve prereza in nastanka razpok [mm/min],

t čas požarne izpostavljenosti [min].

Pri izračunu predvidene projektne globine je vpliv zaokrožitve zogljenosti na robovih upoštevan v predvideni projektni hitrosti oglečenja β_n , katere vrednost zajema vpliv zaokrožitve zogljenosti na robovih in vpliv razpok. Zato je mejna črta predvidene zogljenosti v primerjavi z mejo dejanske zogljenosti nekoliko bolj pomaknjena v notranjost prereza.

Pri metodi zmanjšane prečne prereza upoštevamo efektivni prečni prerez. Metoda temelji na zmanjšanju osnovnega prečne prereza zaradi predvidene zogljenosti sloja neposredno pod izpostavljeno površino ter sloja elementa neposredno ob meji preostalega prereza, za katerega se meni, da nima odpornosti in trdnosti. Za ostali prerez se predpostavi, da sta odpornost in trdnost v času izpostavljenosti nespremenjeni.

Debelino oglja izračunamo po formuli:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 d_0, \quad (2.19)$$

kjer je $d_0 = 7$ mm,

$$k_0 = \begin{cases} t/20 & t < 20 \text{ min} \\ 1,0 & t \geq 20 \text{ min} \end{cases}, \quad (2.20)$$

β_n upošteva povečano hitrost oglečenja zaradi efekta zaokrožitve prečne prereza ($0,5 \leq \beta_n \leq 0,8$).

AS 1720.4-1990 (Poon (2003)) je avstralski standard, pri katerem je hitrost oglenenja podana z enačbo

$$\dot{c} = 0,4 + \left(\frac{280}{\rho} \right)^2, \quad (2.21)$$

kjer \dot{c} pomeni hitrost oglenenja (mm/min),

ρ specifično gostoto lesa (kg/m^3) z vsebnostjo vlage 12%,

d_c efektivno globino oglja (mm), ki je določena z izrazom

$$d_c = \dot{c}t + 7,5. \quad (2.22)$$

Konig in Walleij (Poon (2003)) sta razvila model ki je izpostavljen požarni obtežbi z EC 5 in se deli na dve območji:

- Območje s požarno zaščito, ki se deli na fazo, kjer les ne ogleni in na fazo, ko se začne oglenenje za zaščito.
- Območje brez požarne zaščite lesa.

White in Nordheim (Poon (2003)) sta model oglenenja določila z eksperimenti različnih vrst lesa, ki so izpostavljeni požarni obtežbi določeni z ASTM E 119. Globino oglja določa izraz:

$$t_c = m x_c^{1.23}, \quad (2.23)$$

kjer je m recipročna vrednost hitrosti oglenenja (min/mm),

x_c je debelina oglja (mm),

t_c je čas izpostavljenosti požaru (min).

Schaffer (Poon (2003)) je podal izraze recipročne hitrosti oglenenja različnih vrst lesa v odvisnosti od vlažnosti lesa in njegove gostote, ki so izpostavljeni požarni obtežbi določeni z ASTM E 119:

$$\begin{aligned} B &= 2((28,726 + 0,578 M)\rho + 4,187), & \text{jelka} \\ B &= 2((5,832 + 0,012 M)\rho + 12,862), & \text{bor} \end{aligned} \quad (2.24)$$

kjer je M delež vlage v odstotkih,

ρ gostota lesa.

Vrednosti hitrosti oglenenja c v merskih enotah SI dobimo s pretvorbo $c = \frac{25,4}{B}$ [fmm/min].

Lawson (Poon (2003)) je s sodelavci analiziral oglenenje elementov iz lesa jelke. Hitrost oglenenja je podal z izrazom:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = 1,04 t^{-0,2}, \quad (2.25)$$

kjer je x debelina oglja (mm),

t čas trajanja izpostavljenosti požaru (min).

2.5.1.2 Nestandardni požari

Nestandardni požari v primerjavi s standardnimi požarnimi krivuljami predstavljajo bolj realno dogajanje pri požaru. Modelov na tem področju je malo, ker je eksperimentalnih rezultatov za nestandardni požar zelo malo.

Butcher (Poon (2003)) je podal debelino oglja z izrazom:

$$\frac{dh}{dt} = 0,022 Q_r, \quad (2.26)$$

kjer je $\frac{dh}{dt}$ debelina oglja (mm/min),

Q_r je radiacija (kW/m²).

Leceister (Poon (2003)) je podal končno debelino oglja z izrazom:

$$h_{\text{eff}} = 360 \frac{t_{\text{FS}}}{\rho} + 1,5 \sqrt{t_{\text{FS}}}, \quad 1,5 \sqrt{t_{\text{FS}}} < 10 \quad (2.27)$$

kjer je h_{eff} efektivna debelina oglja (mm),

t_{FS} čas nad 300°C (min),

ρ gostota suhega lesa (kg/m³).

Butler (Poon (2003)) je podal izraz za debelino oglja:

$$c = 21,96 \dot{q}, \quad (2.28)$$

kjer je c debelina oglja (mm/min),

\dot{q} radiacija (MW/m²).

$$\dot{q} = \varepsilon \phi \sigma T^4, \quad (2.29)$$

kjer je ε emisivnost,

ϕ konfiguracijski faktor,

σ Stefan Boltzmanova konstanta,

T absolutna temperatura radiacije (K).

Mikkola (Poon (2003)) je uporabil izraz Butler in dodal vpliv specifične gostote in vlažnosti materiala ter koncentracije kisika, ki vplivajo na hitrost oglenjenja in debelino oglja. Končno debelino oglja lahko izračunamo kot obratno sorazmerno z gostoto materiala:

$$\frac{1}{\rho + 120}, \quad (2.30)$$

kjer je ρ gostota lesa (kg/m³),

ali kot obratno sorazmerno z vlažnostjo

$$\frac{1}{1 + 2,5w}, \quad (2.31)$$

kjer je w vlažnost lesa.

Zmanjšanje koncentracije kisika zraka iz 21% na 8-10%, lahko zmanjša hitrost oglenjenja za 20%.

Hadving (Poon (2003)) je za osnovo vzel lepljene nosilce z gostoto 470 kg/m³ in vlažnostjo 10%. Debelino oglja izračunamo iz enačb:

$$\begin{aligned}
\Theta &= 0,0175 \frac{q}{F}, \\
\beta_0 &= 1,25 - \frac{0,035}{F + 0,021} \quad \text{za } 0,02 \leq F \leq 0,30, \\
X &= \beta_0 \tau \quad \text{za } 0 \leq \tau \leq \frac{\Theta}{3}, \\
X &= \beta_0 \left(-\frac{1}{12} \Theta + \frac{3}{2} \tau - \frac{3}{4} \frac{\tau^2}{\Theta} \right) \quad \text{za } \frac{\Theta}{3} \leq \tau \leq \Theta.
\end{aligned} \tag{2.32}$$

kjer je Θ čas, pri katerem je dosežena največja debelina oglja (min),

β_0 debelina oglja (mm/min)

X globina oglja (mm),

q projektna požarna obtežba (MJ/m²),

τ čas (min).

2.5.1.3 Požari s konstantno temperaturo

Lau, Zeeland in White (Poon (2003)) so analizirali oglenenje na vzorcih borovega lesa v primeru s konstantno temperaturo 500°C in konstantne sile. Določili so približno velikost efektivnega prečnega prereza z naslednjim izrazom:

$$A(t) = -1,628 t + 3080, \tag{2.33}$$

kjer je $A(t)$ efektivni prečni prerez (mm²),

t je čas (s).

S pomočjo enačbe (2.32) so določili koeficient hitrosti oglenjenja β (mm/min) in sicer kot:

$$\beta(t) = -\frac{\alpha}{8} \left[\frac{\alpha t}{4} + \frac{1}{16} (a_o + b_o)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{2.34}$$

kje je t čas (s),

a_o in b_o sta dimenziji prečnega prereza (mm),

$$\alpha = \frac{\partial A(t)}{\partial t} = -1,628. \tag{2.35}$$

Tran in White (Poon (2003)) sta raziskala izgubo vlage in toplote in oglenenje različnih vrst lesa. Hitrost oglenjenja je podana z izrazom:

$$\dot{c} = \frac{\dot{m}}{\rho_w}, \quad (2.36)$$

kjer je \dot{m} izguba teže (kg/s)

ρ_w suha gostota (kg/m³).

Schafer (Poon (2003)) je razvil izraz iz katerega izračunamo hitrost oglenjenja za primer jelke:

$$t = -k \ln \left(1 - \frac{x}{3} \right) e^{\frac{JE}{RT}}, \quad (2.37)$$

kjer je $k = (28,576 + 0,575 w)\rho + 4,548$, (2.38)

$J = 4,184$ Joulova konstanta [joul/cal],

$R = 8,14$ plinska konstanta [joul/gram mol/K]

$E = 3108$ reakcijska energija [cal/gmol],

x debelina oglja [inč],

w vsebnost vlage [%],

T temperatura [K].

2.5.2 Teoretični modeli oglenjenja

Do razvoja matematičnih modelov je prišlo zaradi potrebe po splošnejšem opisu oglenjenja lesa. Modeli se med seboj zelo razlikujejo. Opisali bomo model Fredlunda (1993) in model Schnabl in Turk (2006), ki smo ga uporabili pri izračunih.

Model, ki ga je razvil **Fredlund** (1993), upošteva pretok energije in pretok mase. Upošteval je pretok energije zaradi prevajanja toplote skozi snov, kot tudi zaradi konvekcijskega toka produktov pirolize in vodne pare skozi pore obravnavanega lesa. Ena glavnih predpostavk je izpolnjevanje termodinamičnega ravnovesja v vsaki točki obravnavanega telesa.

Osnovna enačba o ohranitvi energije ima v dveh dimenzijah obliko:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} - \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q_1^* + Q_2^* = 0, \quad (2.39)$$

kjer pomeni T temperaturo (K),

c specifično toploto (J/kg K),

λ koeficient toplotne prevodnosti (W/m K),

κ konvekcijski koeficient (W/m²),

Q_1^* in Q_2^* ponora/izvora energije zaradi pirolize lesa in izhlapevanja/kondenziranja vode/vodne pare (J/m³ s).

Model masnega pretoka temelji na spremembi pritiskov v lesu. Upošteva tudi, da je masni tok vlage v obliki tekočine zaradi majhnih hitrosti zanemarljiv. Osnovna diferencialna enačba masnega pretoka je tako:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \psi P + G^* - \omega \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad (2.40)$$

kjer je P pritisk (Pa),

ω masna kapaciteta (mol/J),

ϕ koeficient masnega pretoka (mol s/kg),

ψ koeficient toplotnega raztezka (mol/J s).

Za rešitev enačb (2.38) in (2.39) morajo biti podani robni pogoji. V primeru enačbe (2.38) predstavljajo izmenjavo energije telesa z okolico in so podani kot predpisani toplotni tok ali predpisana temperatura na robu. V primeru enačbe (2.39) so predpisani masni tokovi na robovih elementa.

Fredlund je definiral pogoj nastanka oglja. Nastanek oglja se začne, ko gostota materiala v točki pade pod 300 kg/m³.

Fredlund je eksperiment procesa pirolize izvedel z namenom boljšega razumevanja kompleksnega obnašanja lesa pri požaru in zaradi možnosti primerjave z numeričnimi

rezultati. Model opisuje enodimenzionalen prehod toplote in vlage. Količine, ki so bile merjene so bile: temperatura, pritisk, gostota in vsebnost vlage v lesu.

Vzorec je v obliki kocke s stranicami 135 mm, ki je izpostavljen napetosti 75 ali 90 k W/m². Obravnavan je bil les različnih vrst in sicer: smreka, bor in iverka. Vsebnost vlage je 0, 12 ali 24%. Dolžina poizkusa je 60 minut. Rezultati so merjeni in zabeleženi vsaki 2 minuti. Eksperimenti pokažejo dobro ujemanje z enačbama (2.38) in (2.39) in tudi s pogojem nastanka oglja.

Schnabl in Turk (2006) sta razvila model oglenenja, ki upošteva dve fazi: les in oglje. Zanimarjen je vpliv tlaka na povezan prehod toplote in vlage v porozni snovi ter vpliv konvekcijskega dela toka tekočine k energijskemu/toplotnemu toku skozi snov.

Osnovni enačbi, ki opisujeta matematični model sta enačbi Lukova (2.1) in (2.2).

Model upošteva povezan prehod toplote in vlage skozi snov in pri tem omogoča upoštevanje poljubne požarne obtežbe in materialnih karakteristik materiala, ki so lahko odvisne od smeri materialnih vlaken, od temperature, nivoja vlage, gostote materiala, vrste lesa, itd. za temperaturo vnetišča se ponavadi vzame 300°C.

2.6 Požarno projektiranje

Izračun odpornosti konstrukcije, izpostavljene požaru, je potrebno izvesti na podlagi analize celotne konstrukcije. Taka analiza je zahtevna, saj upošteva fizikalne in kemične procese pri gorenju. Preprostejši način za analizo konstrukcije je podan v standardu SIST EN 1995-1-2. Ta način je primeren predvsem za dokazovanje odpornosti posameznih elementov konstrukcije na požar. Iz odpornosti posameznih elementov se sklepa odpornost celotne konstrukcije, izpostavljene požaru.

2.6.1 Standardna požarna odpornost lesenih konstrukcij

Poenostavljena metoda požarnega projektiranja nezaščitenega lesenega nosilca, izpostavljenega standardnemu požaru ISO 834, je predstavljena v standardu EN 1995-1-2.

Za določitev učinkov vplivov $E_{d,f,i}$ pri izpostavljenosti lesene konstrukcije požaru, je potrebno združiti mehanske vplive skladno z EN 1990 za primer nezgodnega projektne stanja,

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\Psi_{1,1} \text{ ali } \Psi_{1,2}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,1} Q_{k,i}. \quad (2.41)$$

Če ni potrebno upoštevati posrednih učinkov vplivov, lahko poenostavimo določanje učinkov vplivov in izpeljemo $E_{d,f,i}$ iz analize učinkov vplivov pri normalni temperaturi za čas $t = 0$

$$E_{d,f,i,t} = E_{d,f,i} = \eta_{fi} E_d, \quad (2.42)$$

kjer je E_d računsko vrednost pri normalni temperaturi za osnovno kombinacijo vplivov,

η_{fi} redukcijski faktor za računsko obtežbo v primeru požara.

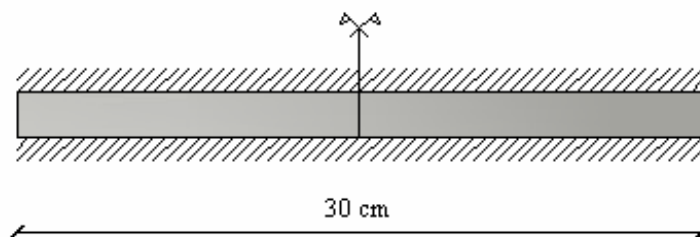
Kot poenostavitev je predlagana vrednost $\eta_{fi} = 0,6$.

3 RAČUNSKI PRIMERI

Računski primeri so razdeljeni v tri skupine. V prvi skupini je prikazana parametrična študija hitrosti enodimenzionalnega oglenjenja smrekovih nosilcev v odvisnosti od različnih parametrov. V drugi skupini je prikazano dvodimenzionalno oglenenje. V tretji skupini pa je prikazano dimenzioniranje na požarno obremenitev na osnovi rezultatov dvodimenzionalnega oglenjenja iz druge skupine računskih primerov.

3.1 Parametrična študija enodimenzionalnega oglenjenja lesenih nosilcev

Obravnavamo enodimenzionalen prehod toplote in vlage skozi homogen smrekov nosilec dolžine 30 cm in majhne višine, ki je toplotno in vlažnostno izoliran s spodnje in zgornje strani. Model je izpostavljen standardni požarni obtežbi ISO 834.



Slika 3.1: Geometrija modela

Prerez ima ob začetku enakomerno temperaturo in vlago prereza $T_0 = 20\text{ °C}$ in $w_0 = 4\text{ °M}$, vlažnost okolja, v katerem prerez obravnavamo je $w_A = 4\text{ °M}$. Začetna gostota smrekovega nosilca je $\rho = 370\text{ kg/m}^3$.

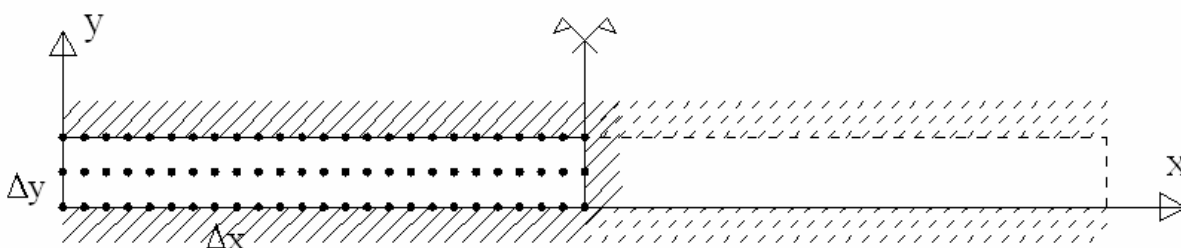
Upoštevamo konstantne materialne parametre lesa in oglja:

$$k_{\text{les}} = 0,15, \quad k_{\text{ogljje}} = 0,65\text{ W/(m K)}, \quad D_M = 2,2 \times 10^{-8}\text{ kg/(m s °M)}, \quad h_{LV} = 2500\text{ kJ/kg},$$

$$h_c = 22,5\text{ W/(m}^2\text{ K)}, \quad e = 0,3, \quad c_{p\text{les}} = 2500\text{ J/(kg K)}, \quad c_{p\text{ogljje}} = 1050\text{ J/(kg K)},$$

$$c_m = 0,01\text{ kg/(kg °M)}, \quad d = 2,0\text{ °M/K}, \quad h_m = 2,5 \times 10^{-6}, \quad d = 0,3\text{ m}, \quad \sigma = 0, \text{ višina poljubno.}$$

Zaradi simetrije obravnavamo le polovico nosilca širine 15 cm. Diferenčna mreža znaša 26 x 3 točke, pri čemer je $\Delta x = 0,006$ m in Δy je zelo majhen. Gostota točk po širini je zelo pomembna, po višini ne, ker gre za enodimenzionalen prehod. Celotni čas računa je 1 ura, pri čemer dolžina časovnega koraka znaša 1 sekundo. Oglenenje lesa začne s procesom pirolize, to je, pri temperaturi 300°C.



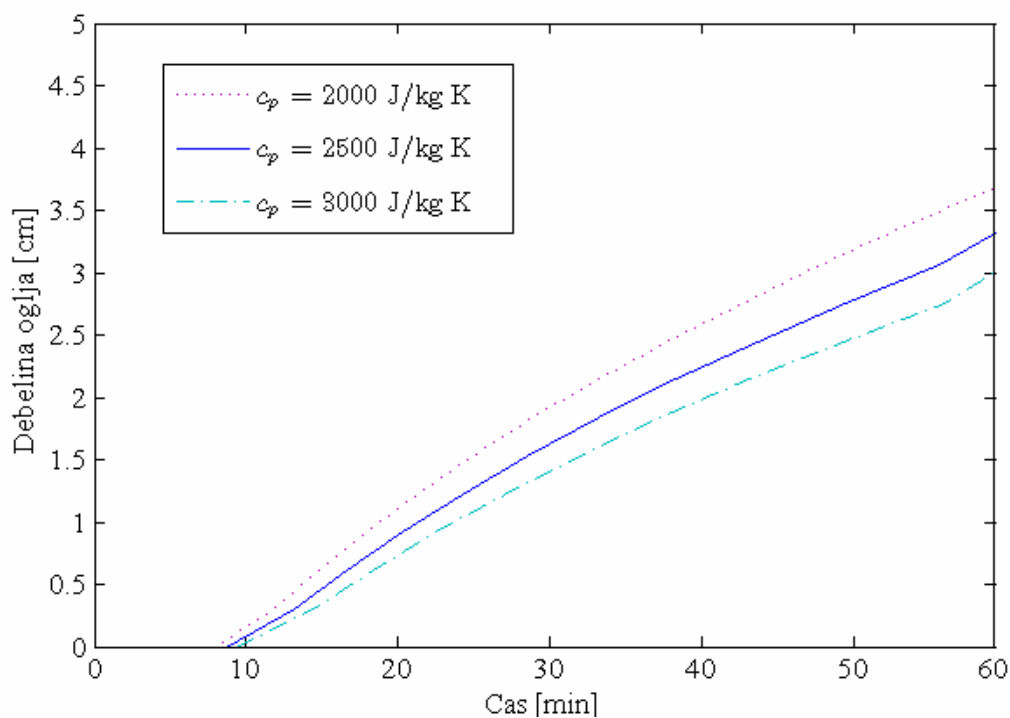
Slika 3.2: Model enodimenzionalnega simetričnega prereza s prikazom diference mreže

V nadaljevanju opišemo parametrično analizo s katero študiramo vpliv različnih parametrov na hitrost oglenjenja. Analiziramo vpliv naslednjih parametrov: specifično toploto lesa c_p , specifično vlago lesa c_m , izparilno toploto lesa h_{LV} , koeficient toplotne prevodnosti lesa in oglja k , termogradientni koeficient lesa δ , delež vlage v plinastem stanju lesa ε in gostoto lesa ρ , na hitrost oglenjenja smrekovega nosilca.

3.1.1 Vpliv specifične toplote snovi na hitrost oglenjenja

Iz slike 3.3 je razvidno, da specifična toplota lesa vpliva na hitrost oglenjenja. Les z višjo vrednostjo specifične toplote ogleni počasneje in tudi začetek oglenjenja je kasnejši.

Pri času 10 minut je razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo 1,2 mm, pri času 20 minut je razlika že 3,7 mm, 5 mm pri 30-ih minutah, 6,5 mm pri 45-ih minutah in 7 mm pri 60-ih minutah. Oglenenje se začne v 8 minuti pri najnižji vrednosti specifične toplote, pri višjih vrednostih se proces začne približno minuto kasneje.

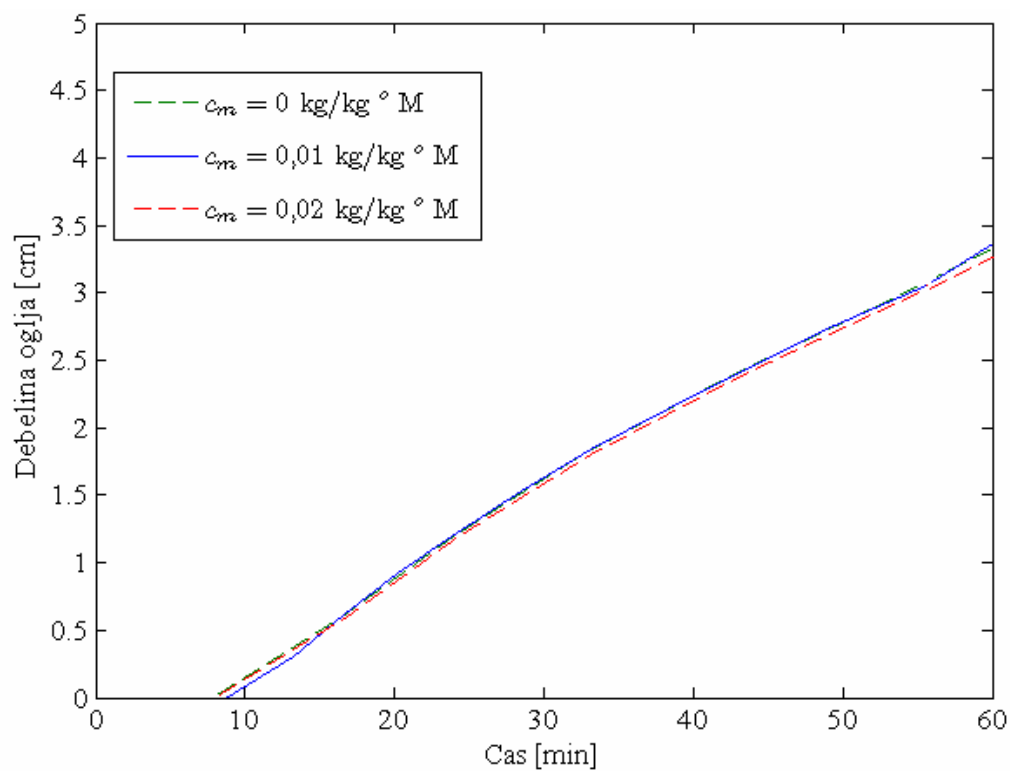


Slika 3.3: Vpliv specifične toplote lesa na hitrost oglenjenja

3.1.2 Vpliv specifične vlage snovi na hitrost oglenjenja

Vpliv specifične vlage lesa na hitrost oglenjenja je zelo majhen. Iz slike 3.4 je vidna majhna razlika v debelini oglja in razlika v začetku oglenjenja.

Pri času 10 minut ni razlike med največjo in najmanjšo vrednostjo, pri času 20 minut je razlika 0,1 mm, 0,5 mm pri 30-ih minutah, 0,8 mm pri 45-ih minutah in 1,1 mm pri 60-ih minutah.

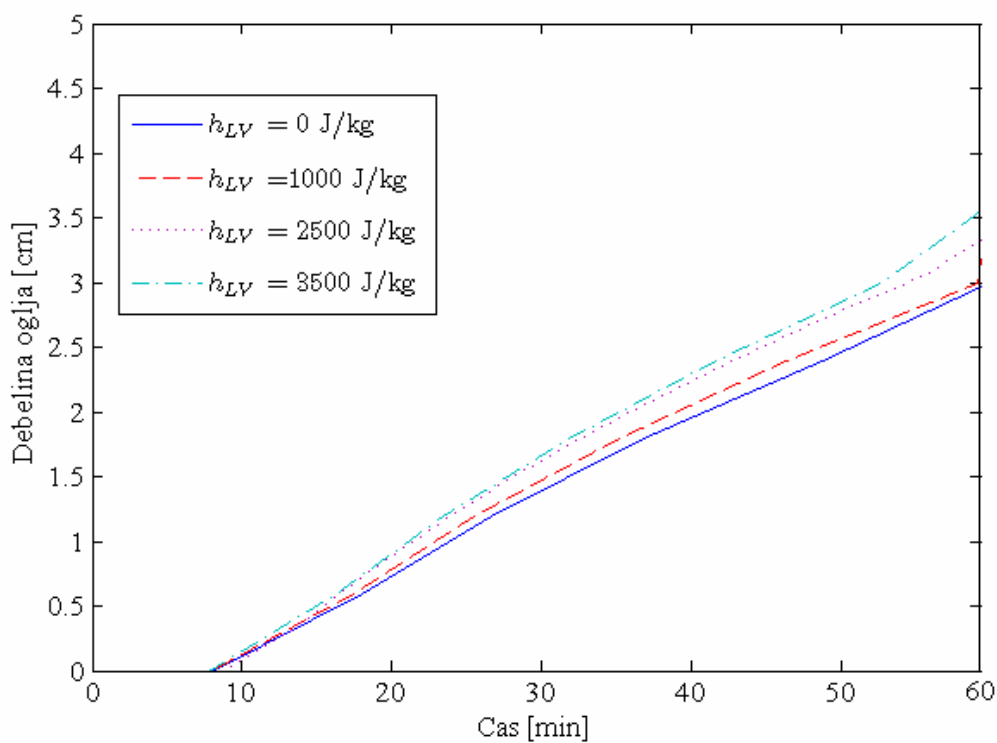


Slika 3.4: Vpliv specifične vlage lesa na hitrost oglenjenja

3.1.3 Vpliv izparilne toplote snovi na hitrost oglenjenja

Iz slike 3.5 je razviden vpliv izparilne toplote lesa na oglenenje. Čas začetka oglenjenja ni odvisen od vrednosti izparilne toplote lesa.

Razlike v debelini oglja med največjo in najmanjšo vrednostjo po časih si sledijo: 0,4 mm v 10-ih minutah, 1,7 mm v 20-ih minutah, 2,7 mm v 30-ih minutah, 3,9 mm v 45-ih minutah, in 4,4 mm v 60-ih minutah.

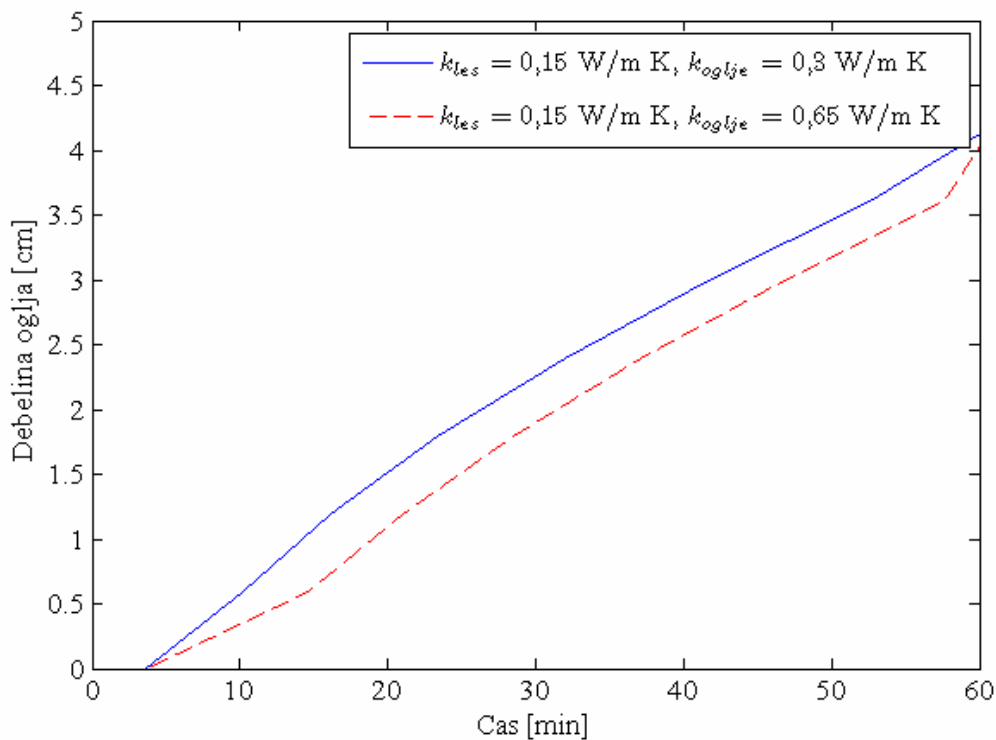


Slika 3.5: Vpliv izparilne toplote lesa na hitrost oglenjenja

3.1.4 Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti na hitrost oglenjenja

Rezultati študije pokažejo, da je hitrost oglenjenja odvisna od koeficienta toplotne prevodnosti.

Nižji kot je koeficient, hitrejšje je oglenenje lesa in začetek oglenjenja je krajši.

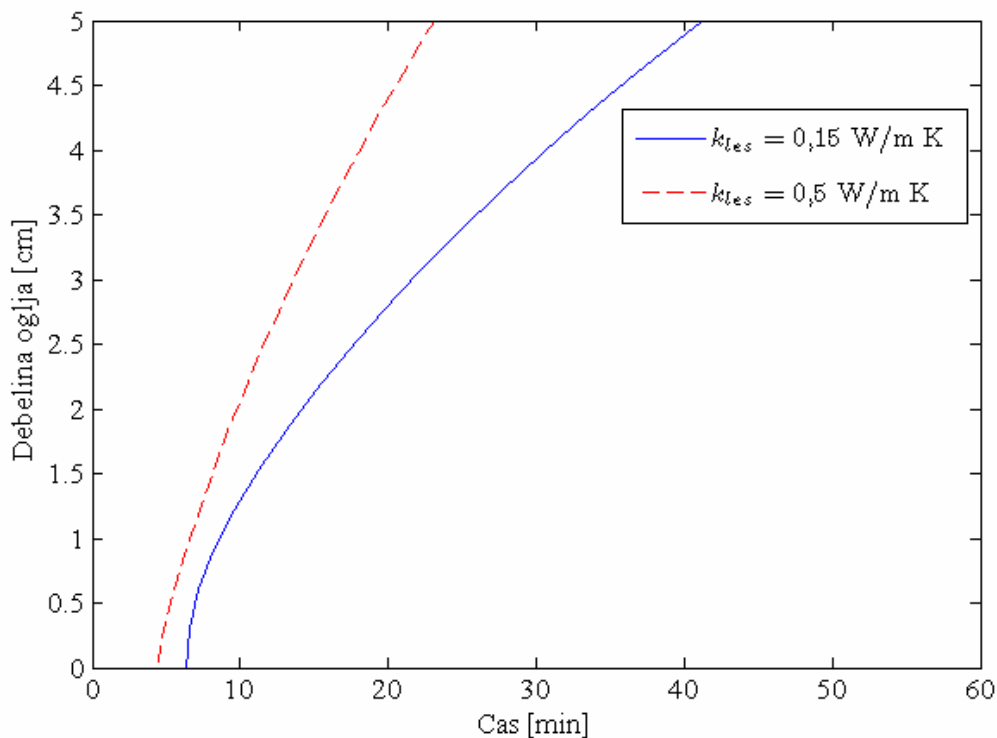


Slika 3.6: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti oglja na hitrost oglenjenja

Razlike po časih med največjo in najmanjšo vrednostjo so: 3 mm v 10-ih minutah, 4 mm v 20-ih minutah, 1 mm v 30-ih minutah, 3,7 mm v 45 minutah in 6 mm 60-ih minutah.

Slika 3.7 prikazuje primer, pri kateri je koeficient lesa višji od koeficienta oglja. Rezultati pokažejo, da se oglenenje nadaljuje vse do sredine prereza.

Slika 3.7 prikazuje pomembnost koeficienta prevodnosti. Zogleneli del lesa pomeni zmanjšanje trdnostnih in togostnih parametrov materiala in pojav razpok na celi črti zoglenelosti. Prav zaradi razpok vzamemo koeficient oglja višje vrednosti od lesa, čeprav v realnosti ni tako. Oglje služi kot toplotni izolator pri gorenju in povečuje čas odpornosti lesa pri gorenju.

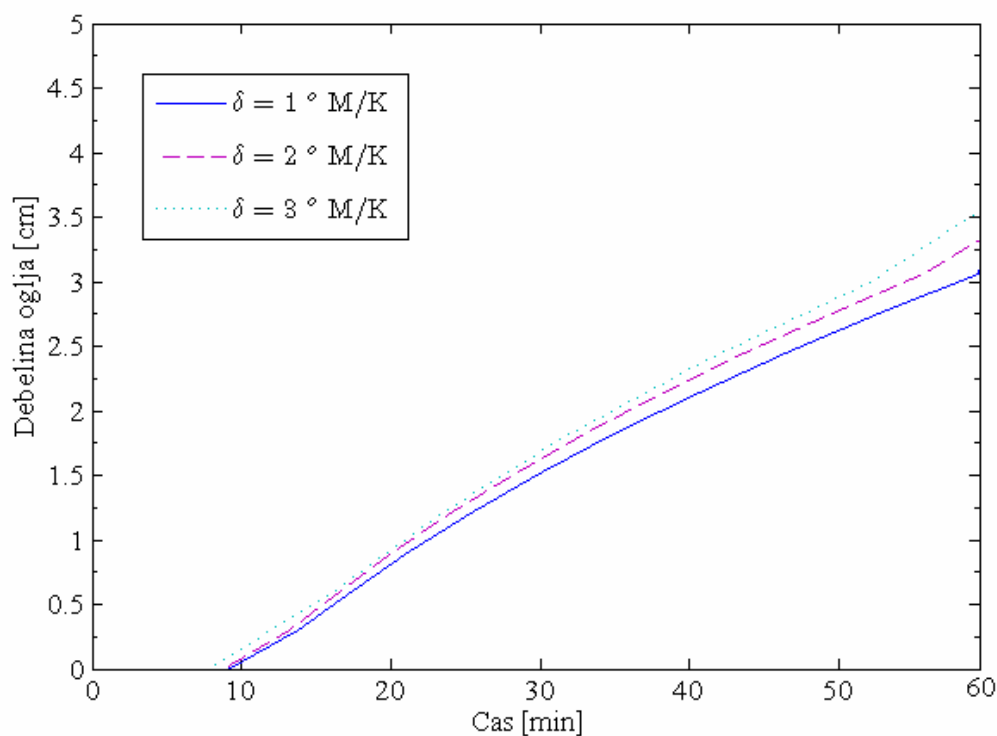


Slika 3.7: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti lesa na hitrost oglenenja

3.1.5 Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglečenja

Vpliv termogradientnega koeficienta se kaže s tem, da se z višanjem vrednosti koeficienta hitrost oglečenja zvišuje. Na začetek oglečenja pa nima bistvenega vpliva.

Razlike v debelini oglja med največjo in najmanjšo vrednostjo si sledijo: 1mm v 10-ih minutah, 1,3 mm v 20-ih minutah, 1,7mm v 30-ih minutah, 2,3 mm v 45-ih minutah, 4,1 mm v 60-ih minutah. Opazimo, da debelina oglja s časom narašča.

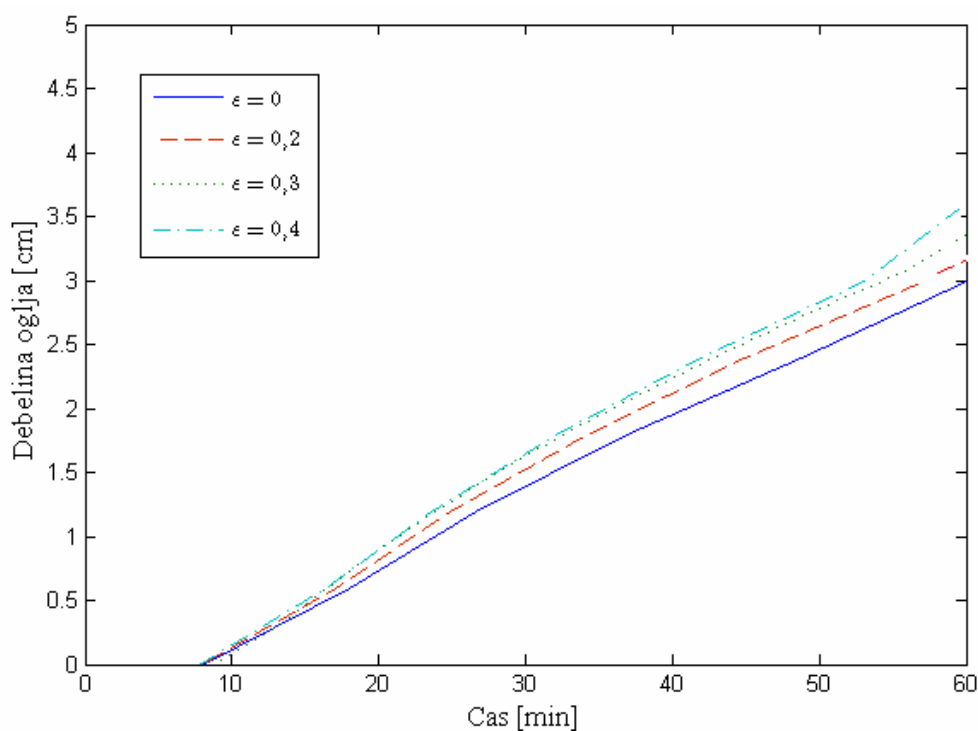


Slika 3.8: Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglečenja

3.1.6 Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja

Z večanjem deleža vlage se hitrost oglenjenja povečuje. Delež vlage v plinastem stanju pa ne vpliva na čas začetka oglenjenja. Oglenenje se začne v osmi minuti in nato postopoma narašča za posamezne deleže vlage.

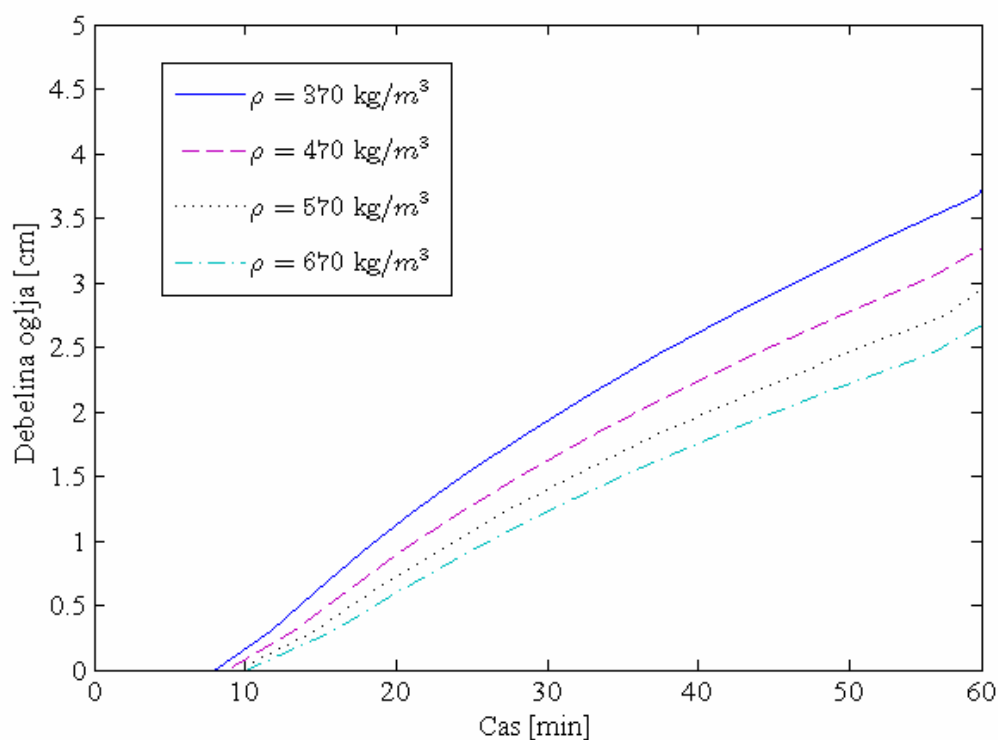
Razlike v debelini oglja med največjo in najmanjšo vrednostjo po časih si sledijo: 0,3 mm v 10-ih minutah, 1,6 mm v 20-ih minutah, 2,8 mm v 30-ih minutah, 4 mm v 45-ih minutah, 5 mm v 60-ih minutah. Debelina oglja s časom narašča.



Slika 3.9: Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja

3.1.7 Vpliv specifične gostote pri različnih vlažnostih na hitrost oglenjenja

Prikazan je primer oglenjenja v odvisnosti od gostote lesa. Vpliv specifične gostote lesa na oglenenje pokaže, da ima gostota pomemben vpliv na hitrost oglenjenja. Les z nižjo gostoto ogleni hitreje kot les z višjo gostoto. Začetek oglenjenja pri najnižji gostoti je najhitrejši, to je v osmi minuti. Z večanjem gostote se čas začetka oglenjenja nekoliko premakne. Razlike med oglenenjem z različnimi vlažnostmi lesa so zelo majhne. Bistveni prispevek k oglenjenju ima gostota lesa in ne toliko vlažnost lesa.



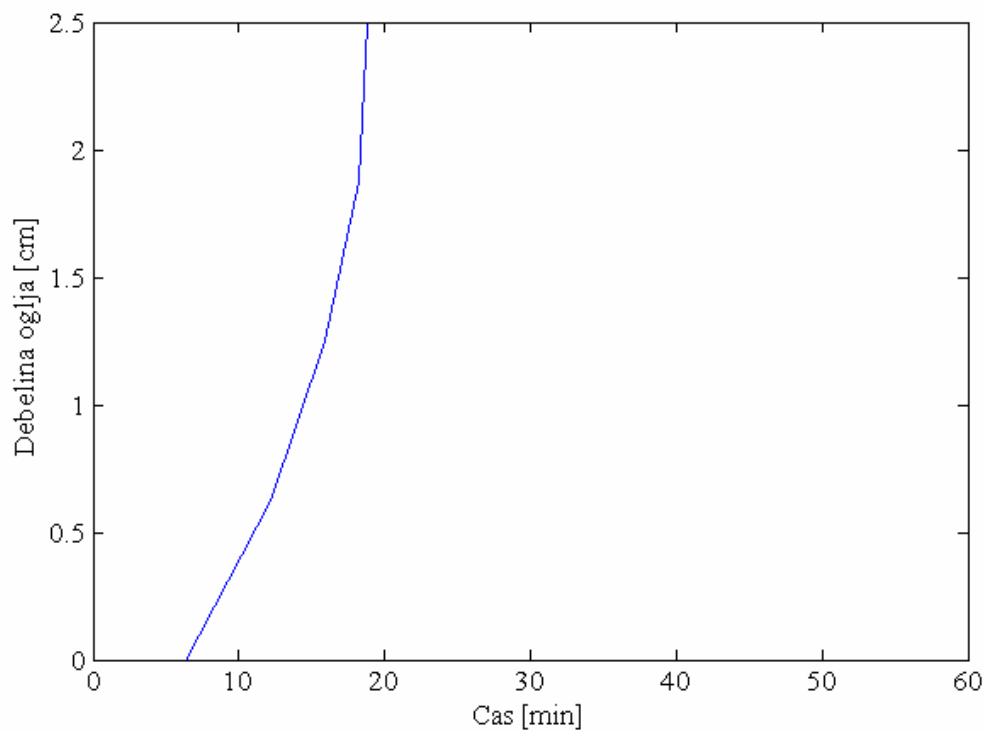
Slika 3.10: Vpliv specifične gostote materiala na hitrost oglenjenja pri vlažnosti $w = 13^\circ M$

Preglednica 1: Rezultati parametrične študije, to je debelina oglja v [cm], za posamezne parametre pri časih 10, 20, 30, 45, 60 min

	Čas [min]	10	20	30	45	60
c_p [J/kg K]	2000	0,16	1,11	1,92	2,91	3,7
	2500	0,09	0,9	1,63	2,54	3,35
	3000	0,04	0,74	1,42	2,26	3
c_m [Jkg/kg ° M]	0,00	0,15	0,87	1,63	2,54	3,31
	0,01	0,09	0,9	1,63	2,54	3,35
	0,02	0,15	0,86	1,58	2,46	3,2
h_{LV} [J/kg]	3500	0,15	0,91	1,67	2,61	3,4
	2500	0,14	0,9	1,63	2,54	3,35
	1000	0,13	0,79	1,48	2,33	3
	0	0,11	0,74	1,4	2,22	2,96
k [W/m K]	0,15	0,7	1,63	2,25	3,2	4,2
	0,65	0,4	1,23	2,15	2,83	3,6
δ [°M/K]	3	0,17	0,95	1,7	2,63	3,5
	2	0,09	0,9	1,63	2,54	3,35
	1	0,07	0,82	1,53	2,4	3,09
ε []	0,4	0,15	0,9	1,66	2,6	3,5
	0,3	0,14	0,9	1,63	2,54	3,35
	0,2	0,14	0,83	1,63	2,54	3,35
	0	0,1	0,74	1,38	2,2	3
ρ [kg/m ³]	370	0,2	1,15	1,95	2,9	3,75
	470	0,14	0,83	1,63	2,54	3,35
	570	0,05	0,75	1,4	2,2	3
	670	0	0,6	1,2	2	2,4

3.1.8 Primer tankega prereza

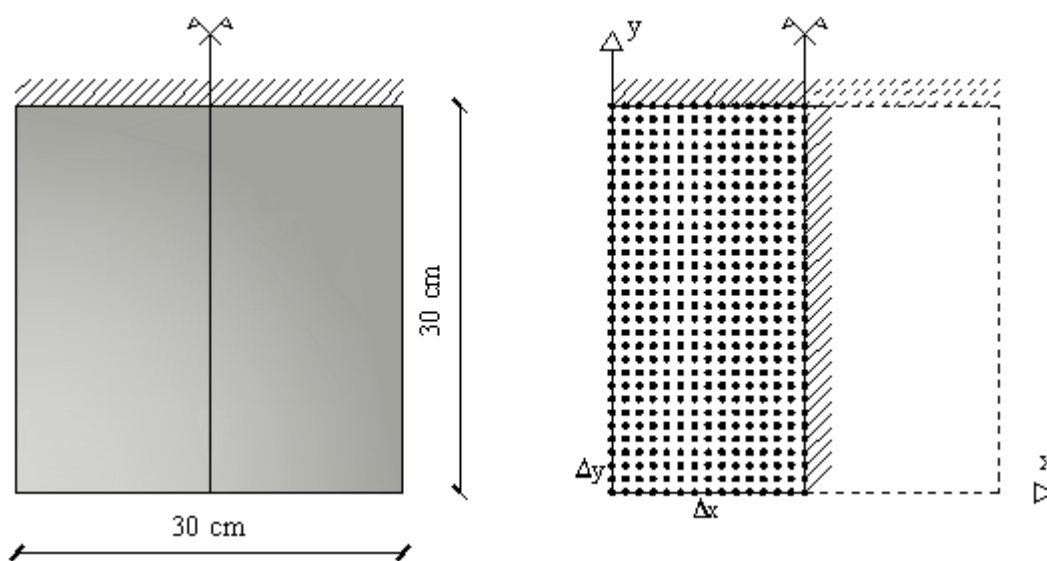
Na sliki je prikazan primer tankega prereza dimenzij 5 cm x 1 cm. Vhodni podatki so enaki kot pri enodimenzionalnem prehodu. Opazimo lahko, da se oglenenje ne ustavi, temveč zogleni cel prerez.



Slika 3.11: Debelina oglja pri zelo tankem prerezu

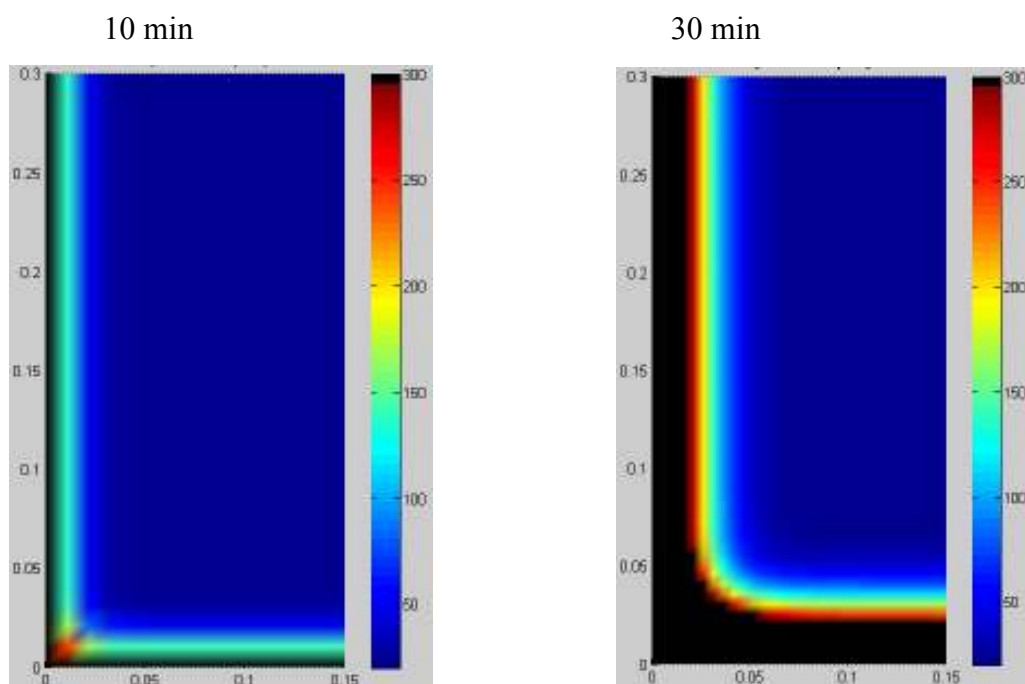
3.2 Dvodimenzionalno oglenenje lesenih nosilcev

Obravnavali smo dvodimenzionalno oglenenje smrekovih nosilcev, ki so izpostavljeni standardni požarni obtežbi ISO 834 s treh strani, zgornji rob nosilca je toplotno in vlažnostno izoliran. Dimenzije prereza so bile 30 cm x 30 cm. Upoštevali smo simetrijo prereza, zato smo obravnavali le polovico prereza. Diferenčna mreža je znašala 15 x 30 točk. Uporabili smo enake materialne lastnosti lesa kot pri enodimenzionalnem oglenenju.

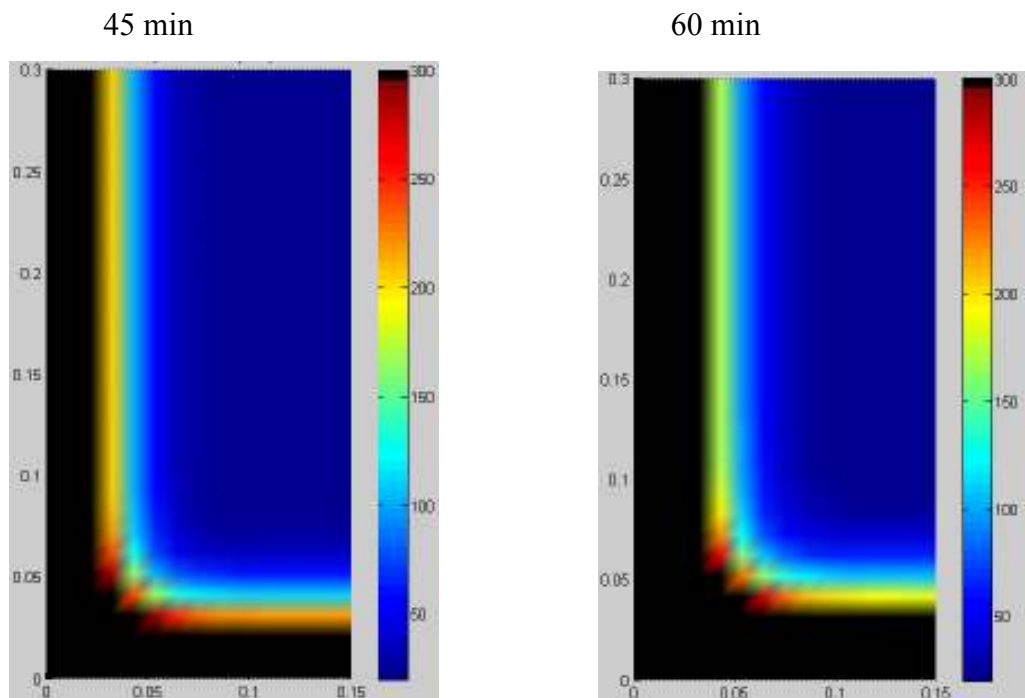


Slika 3.12: Geometrija dvodimenzionalnega prereza (leva slika) in diferenčna mreža (desna slika)

Najhitrejše oglenenje je v vogalih zaradi izpostavljenosti požara iz dveh strani. Temu pojavu rečemo zaokrožitveni efekt, kar pomeni, da kmalu po začetku gorenja prerez ni več pravokoten.



Slika 3.13: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 10 min in 30 min



Slika 3.14: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 45 min in 60 min

3.3 Dimenzioniranje prostoležečega nosilca

Obravnavamo smrekov prostoležeči nosilec, ki je poleg statične mehanske obtežbe obtežen tudi s standardno požarno obtežbo ISO 834. Predpostavimo, da je temperaturno stanje nosilca in okolice vzdolž nosilca nespremenjeno.

Dimenzionirali smo nosilec pri normalnih pogojih ($T = 20 \text{ °C}$) in nato na osnovi temperaturno-vlažnostne analize dvodimenzionalnega oglenenja iz poglavja 3.2. Odpornost nosilca smo preverili za čase 10, 30, 45 in 60 minut.

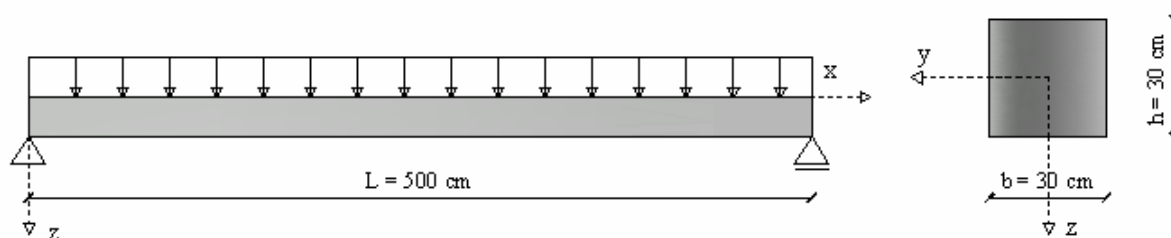
Nato smo nosilnost preverili po EC 5 s postopkom zmanjšane prečnega prereza. Prav tako smo odpornost nosilca preverili za čase 10, 30, 45 in 60 minut.

Preverili smo čas do katerega nosilec zadošča odpornosti po postopku na osnovi temperaturno-vlažnostne analize in po postopku zmanjšane prereza.

Rezultate primerjamo med sabo.

3.3.1 Dimenzioniranje pri normalni temperaturi

3.3.1.1 Geometrija nosilca



Slika 3.15: Geometrijski podatki nosilca

3.3.1.2 Materialne karakteristike

Izbrali smo smrekov les razreda C30.

Preglednica 2: Materialne karakteristike lesa.

Les	$E_{0,\text{mean}}$ [kN/cm ²]	G_{mean} [kN/cm ²]	$\varepsilon_{\text{mean}}$ [kN/cm ²]	$f_{m,d}$ [kN/cm ²]	$f_{v,d}$ [kN/cm ²]
C30	1200	75	460	1,846	0,185

3.3.1.3 Obtežba

Nosilec je obremenjen s stalno obtežbo g in s spremenljivo obtežbo q . Stalno obtežbo predstavlja lastna teža nosilca g , spremenljivo obtežbo predstavlja zvezna linijska obtežba q .

Lastna teža nosilca:

$$g = b h \rho = 0,3 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 460 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ kg/m s}^2 \cdot 0,001 = 0,414 \text{ kN/m}$$

Zvezna linijska obtežba:

$$q = 16,5 \text{ kN/m}$$

3.3.1.4 Projektna obtežba

Projektna obtežba za mejno stanje nosilnosti MSN

$$q_d = 1,35 g + 1,5 q = 1,35 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 16,5 \text{ kN/m} = 25,31 \text{ kN/m}$$

Projektna obtežba za mejno stanje uporabnosti MSU

$$q_d = 1,0 g + 1,0 q = 1,0 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,0 \cdot 16,5 \text{ kN/m} = 16,91 \text{ kN/m}$$

3.3.1.5 Obremenitve

Maksimalni moment:

$$M_d = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{25,31 \text{ kN/m} \cdot 5^2 \text{ m}^2}{8} = 7909,03 \text{ kNcm}$$

Prečna sila:

$$V_d = \frac{q_d L}{2} = \frac{25,31 \text{ kN/m} \cdot 5 \text{ m}}{2} = 63,27 \text{ kN}$$

Normalne napetosti:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{7909,03 \text{ kNcm}}{4500 \text{ cm}^3} = 1,76 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{\frac{2}{3} * A} = \frac{63,27 \text{ kN}}{\frac{2}{3} \cdot 900 \text{ cm}^2} = 0,11 \text{ kN/cm}^2$$

3.3.1.6 Dimenzioniranje

$$\text{Odpornostni moment } W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{300 \text{ cm} \cdot 300^2 \text{ cm}^2}{6} = 4500 \text{ cm}^3$$

$$\text{Vztrajnostni moment } I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{300 \text{ cm} \cdot 300^3 \text{ cm}^3}{12} = 67500 \text{ cm}^4$$

Mejno stanje nosilnosti MSN

Normalne napetosti

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$1,76 \text{ kN/cm}^2 \leq 1,846 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

$$0,11 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,185 \text{ kN/cm}^2$$

Mejno stanje uporabnosti MSU

Začetni pomiki:

$$u = \frac{5 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 500^4 \text{ cm}^4}{384 \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 \cdot 67500 \text{ cm}^4} = 10,05 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$P: k_{\text{def}} = 0,80$$

$$M: k_{\text{def}} = 0,25$$

$$u_{\text{inst}} = q_d u$$

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{inst}} (1 + k_{\text{def}})$$

$$g: \quad u_{1,\text{inst}} = 0,00414 \text{ kN/cm} \cdot 10,05 \text{ cm}^2/\text{kN} = 0,04 \text{ cm}$$

$$u_{1,\text{fin}} = 0,04 \text{ cm} \cdot (1 + 0,80) = 0,07 \text{ cm}$$

$$q: \quad u_{2,\text{inst}} = 0,165 \text{ kN/cm} \cdot 10,05 \text{ cm}^2/\text{kN} = 1,66 \text{ cm}$$

$$u_{2,\text{fin}} = 1,66 \text{ cm} (1 + 0,25) = 2,07 \text{ cm}$$

Kontrola trenutnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{inst,max}} \leq \frac{L}{300}$$

$$1,66 \text{ cm} \leq 1,67 \text{ cm}$$

Kontrola končnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{net,fin}} \leq \frac{L}{200}$$

$$2,15 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm}$$

3.3.2 Odpornost na požarno obremenitev na podlagi temperaturno-vlažnostne analize

Preverili smo ali je prerez dimenzioniran v poglavju 4.1 odporen na požarno obremenitev. Predpostavljeno je, da zogleneli del prereza nima nosilnosti. Podatke o zooglenelosti prereza smo vzeli iz poglavja 3.2. Preverili smo odpornost pri času 10 min, 30 min, 45 min in 60 min.

Prikažemo račun za čas 10 min po začetku požara.

Geometrija nosilca, materialne karakteristike in obtežba ostanejo enake kot pri obtežbi brez upoštevanja temperaturne obtežbe.

3.3.2.1 Obtežba

Lastna teža nosilca:

$$g = b h \rho = 0,3 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 460 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ kg/m s}^2 \cdot 0,001 = 0,414 \text{ kN/m}$$

Zvezna linijska obtežba:

$$q = 16,5 \text{ kN/m}$$

3.3.2.2 Projektna obtežba

Projektna obtežba za mejno stanje nosilnosti MSN

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q) = 0,6 \cdot (1,35 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 15,19 \text{ kN/m}$$

Projektna obtežba za mejno stanje uporabnosti MSU

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q) = 0,6 (1,0 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,0 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 10,15 \text{ kN/m}$$

3.3.2.3 Obremenitve

Maksimalni moment:

$$M_d = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 5^2 \text{ m}^2}{8} = 4745,42 \text{ kNcm}$$

Prečna sila:

$$V_d = \frac{q_d L}{2} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 500 \text{ m}}{2} = 37,96 \text{ kN}$$

Normalne napetosti:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{4745,42 \text{ kNcm}}{2773,93 \text{ cm}^3} = 1,71 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{\frac{2}{3} * A} = \frac{37,96 \text{ kN}}{\frac{2}{3} * 876 \text{ cm}^2} = 0,06 \text{ kN/cm}^2$$

3.3.2.4 Dimenzioniranje

Odpornostni in vztrajnostni moment smo izračunali s programom Gekar (2001), na osnovi temperaturno-vlažnostne analize.

$$W = 4322,39 \text{ cm}^3$$

$$I = 63971,37 \text{ cm}^4$$

Mejno stanje nosilnosti MSN

Normalne napetosti

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$1,08 \text{ kN/cm}^2 \leq 1,846 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

$$0,06 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,185 \text{ kN/cm}^2$$

Mejno stanje uporabnosti MSU

Začetni pomiki:

$$u = \frac{5 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 500^4 \text{ cm}^4}{384 \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 \cdot 63971,37 \text{ cm}^4} = 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$P: k_{\text{def}} = 0,80$$

$$M: k_{\text{def}} = 0,25$$

$$u_{\text{inst}} = q_d u$$

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{inst}} (1 + k_{\text{def}})$$

$$g: u_{1,\text{inst}} = 0,00414 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 0,03 \text{ cm}$$

$$u_{1,\text{fin}} = 0,03 \text{ cm} \cdot (1 + 0,80) = 0,05 \text{ cm}$$

$$q: \begin{aligned} u_{2,\text{inst}} &= 0,165 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 1,05 \text{ cm} \\ u_{2,\text{fin}} &= 1,05 \text{ cm} (1 + 0,25) = 1,31 \text{ cm} \end{aligned}$$

Kontrola trenutnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{inst,max}} \leq \frac{L}{300}$$
$$1,05 \text{ cm} \leq 1,67 \text{ cm}$$

Kontrola končnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{net,fin}} \leq \frac{L}{200}$$
$$1,36 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm}$$

Enake izračune naredimo še za 30 minut, 45 minut in 60 min. Rezultati so prikazani v preglednici 3.

3.3.3 Odpornost na požarno obremenitev na podlagi EC5

Za izračun odpornosti na požarno obremenitev na podlagi EC5, bomo uporabili postopek zmanjšanja prečnega prereza. Prikažemo postopek za čas 10 minut.

3.3.3.1 Globina zoglenelosti pri 10-ih minutah

Predvidena računsko hitrost oglenenja, ki upošteva vpliv zaokrožitve prereza in nastanka razpok [mm/min]:

$$\beta_n = 0,55$$

Za zaščitene površine je faktor k_0 v odvisnosti od časa izpostavljenosti požaru podan z izrazom:

$$k_0 = \begin{cases} t/20 & t < 20 \text{ min} \\ 1,0 & t \geq 20 \text{ min} \end{cases} = 0,50$$

$$d_0 = 0,7 \text{ cm}$$

$$d_{\text{char},n} = \beta_n t = 0,55 \cdot 10 = 0,55 \text{ cm}$$

Debelino oglja izračunamo po formuli:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 d_0 = 0,55 + 0,5 \cdot 0,7 = 0,59 \text{ cm}$$

3.3.3.2 Projektna obtežba

Projektna obtežba za mejno stanje nosilnosti MSN

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,35 g + 1,5 q) = 0,6 \cdot (1,35 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 15,19 \text{ kN/m}$$

Projektna obtežba za mejno stanje uporabnosti MSU

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q)$$

$$q_d = 0,6 (1,0 g + 1,0 q) = 0,6 (1,0 \cdot 0,414 \text{ kN/m} + 1,0 \cdot 16,5 \text{ kN/m}) = 10,15 \text{ kN/m}$$

3.3.3.3 Obremenitve

Maksimalni moment:

$$M_d = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 5^2 \text{ m}^2}{8} = 4745,42 \text{ kNcm}$$

Prečna sila:

$$V_d = \frac{q_d L}{2} = \frac{15,19 \text{ kN/m} \cdot 500 \text{ m}}{2} = 37,96 \text{ kN}$$

Normalne napetosti:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{4745,42 \text{ kNcm}}{3980 \text{ cm}^3} = 1,19 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{\frac{2}{3} * A} = \frac{37,96 \text{ kn}}{\frac{2}{3} * 821 \text{ cm}^2} = 0,06 \text{ kN/cm}^2$$

3.3.3.4 Dimenzioniranje

Odpornostni moment izračunamo:

$$W = \frac{(b - 2d_{ef})(h - d_{ef})^2}{6} = \frac{(30 \text{ cm} - 2 \cdot 0,9 \text{ cm}) \cdot (30 \text{ cm} - 0,9 \text{ cm})^2}{6} = 3980 \text{ cm}^3$$

$$I = \frac{(b - 2d_{ef})(h - d_{ef})^3}{12} = \frac{(30 \text{ cm} - 2 \cdot 0,9 \text{ cm}) \cdot (30 \text{ cm} - 0,9 \text{ cm})^3}{12} = 57909 \text{ cm}^4$$

Mejno stanje nosilnosti MSN

Normalne napetosti

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$1,19 \text{ kN/cm}^2 \leq 1,846 \text{ kN/cm}^2$$

Strižne napetosti:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

$$0,06 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,185 \text{ kN/cm}^2$$

Mejno stanje uporabnosti MSU

Začetni pomiki:

$$u = \frac{5 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 500^4 \text{ cm}^4}{384 \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 \cdot 57909 \text{ cm}^4} = 11,71 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$P: k_{\text{def}} = 0,80$$

$$M: k_{\text{def}} = 0,25$$

$$u_{\text{inst}} = q_d u$$

$$u_{\text{fin}} = u_{\text{inst}} (1 + k_{\text{def}})$$

$$g: \begin{aligned} u_{1,\text{inst}} &= 0,00414 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 0,03 \text{ cm} \\ u_{1,\text{fin}} &= 0,03 \text{ cm} \cdot (1 + 0,80) = 0,05 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$q: \begin{aligned} u_{2,\text{inst}} &= 0,165 \text{ kN/cm} \cdot 10,60 \text{ cm}^2/\text{kN} = 1,16 \text{ cm} \\ u_{2,\text{fin}} &= 1,05 \text{ cm} (1 + 0,25) = 1,44 \text{ cm} \end{aligned}$$

Kontrola trenutnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{inst,max}} \leq \frac{L}{300}$$

$$1,16 \text{ cm} \leq 1,67 \text{ cm}$$

Kontrola končnega pomika (samo zaradi koristne obtežbe)

$$u_{\text{net,fin}} \leq \frac{L}{200}$$

$$1,5 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm}$$

Preglednica 3: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale na osnovi temperaturno-vlažnostne analize.

Čas [min]	Normalne napetosti [kN/cm ²] $\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$	Strižne napetosti [kN/cm ²] $\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$	Začetni pomiki [cm] $u_{inst,max} \leq \frac{L}{300}$	Končni pomiki [cm] $u_{net,fin} \leq \frac{L}{200}$	Dimenzije prereza 30 x 30 [cm ²]
0	1,76 ≤ 1,85	0,11 ≤ 0,18	1,66 ≤ 1,68	2,15 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
10	1,09 ≤ 1,85	0,06 ≤ 0,18	1,05 ≤ 1,68	1,36 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
30	1,38 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,39 ≤ 1,68	1,8 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
45	1,55 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,61 ≤ 1,68	2,08 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
60	1,77 ≤ 1,85	0,09 ≤ 0,18	1,89 ≤ 1,68	2,45 ≤ 2,5	Ne ustreza dimenzijam

Preglednica 4: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale po EC 5.

Čas [min]	Normalne napetosti [kN/cm ²] $\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$	Strižne napetosti [kN/cm ²] $\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$	Začetni pomiki [cm] $u_{inst,max} \leq \frac{L}{300}$	Končni pomiki [cm] $u_{net,fin} \leq \frac{L}{200}$	Dimenzije prereza 30 x 30 [cm ²]
0	1,76 ≤ 1,85	0,11 ≤ 0,18	1,66 ≤ 1,68	2,15 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
10	1,19 ≤ 1,85	0,06 ≤ 0,18	1,15 ≤ 1,68	1,5 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
30	1,47 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,51 ≤ 1,68	1,95 ≤ 2,5	Ustreza dimenzijam
45	1,67 ≤ 1,85	0,08 ≤ 0,18	1,76 ≤ 1,68	2,28 ≤ 2,5	Ne ustreza dimenzijam
60	1,91 ≤ 1,85	0,09 ≤ 0,18	2,08 ≤ 1,68	2,7 ≤ 2,5	Ne ustreza dimenzijam

Iz preglednice 3 je razvidno, da prerez dimenzij 30 cm x 30 cm, pri hkratni linijski obtežbi in požarni obtežbi, zadošča pogojem nosilnosti pri 10, 30 in 45-ih minutah. Pri 60-ih minutah prerez ne zadošča več pogojem nosilnosti, temveč ga je potrebno ponovno dimenzionirati. Ustreza do 39. minute.

Iz preglednice 4 je razvidno, da prerez dimenzij 30 cm x 30 cm, pri hkratni linijski obtežbi in požarni obtežbi, zadošča pogojem nosilnosti pri 10 in 30-ih minutah. Pri 45 in 60-ih minutah prerez ne zadošča več pogojem nosilnosti, temveč ga je potrebno ponovno dimenzionirati.

4 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo analizirali temperaturno-vlažnostno stanje lesenih nosilcev z upoštevanjem oglenenja lesa. Uporabili smo nelinearni parcialni diferencialni enačbi Luikova, ki se uporabljata za opis povezanega prehoda toplote in vlage skozi les.

Uporabili smo izdelan računalniški program v okolju Matlab, s katerim smo izvedli računske primere.

Naredili smo parametrično študijo vpliva različnih parametrov na hitrost oglenenja lesa. Parametrično študijo smo izvedli za enodimenzionalni prerez s konstantnimi parametri. Analizirali smo vpliv naslednjih parametrov: specifično toploto lesa c_p , specifično vlago lesa c_m , izparilno toploto lesa h_{LV} , koeficient toplotne prevodnosti lesa in oglja k , termogradientni koeficient lesa δ , delež vlage v plinastem stanju lesa ε in gostoto lesa ρ , na hitrost oglenenja lesa. Ugotovili smo, da imajo parametri velik vpliv na hitrost in debelino oglenenja. Vplivajo pa tudi na začetek oglenenja, ki ga definiramo, ko les doseže temperaturo 300 °C.

Prikazali smo tudi oglenenje dvodimenzionalnega homogenega prereza z enakimi konstantnimi vhodnimi podatki. Pri dvodimenzionalnem oglenenju pride do zaokrožitvenega pojava, kar pomeni, da prerez kmalu po začetku gorenja ni več pravokoten.

Razporeditev oglja po dvodimenzionalnem prerezu smo uporabili za dimenzioniranje homogenega prostoležečega nosilca, ki ga obtežimo z mehansko in požarno obtežbo. Preverili smo nosilnost tudi po metodi zmanjšanega prereza po EC 5 in rezultate primerjali.

Pomembna lastnost zoglenega dela lesa je, da zoglelost lesa pomeni drastično zmanjšanje trdnostnih in togostnih parametrov materiala in pojav razpok. Po drugi strani pa les slabo prevaja toploto po globini. Oglje, ki je na površini zгореlega lesa, je toplotni izolator. Zato se

kisik hitro porabi in možna je samougasnitev. Do te pogosteje pride pri prerezih velikih dimenzij.

VIRI

Budaiwi, I., El-Diasty, R., Abdou, A. 1999. Modeling of moisture and thermal transient behaviour of multilayer non-cavity walls. *Building and Environment* 34, 537-551.

Chang, W.J., Weng, C.I. 2000. An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43: 3621-3632.

Fredlund, B. 1993. Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire. *Fire Safety Journal* 20: 39-69.

Gams, M. 2003. Povezan prenos toplote in vlage v poroznem materialu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Gekar. 2001. Program za izračun osnovnih geometrijskih karakteristik ravninskih likov poligonalne oblike. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo.

Irudayaraj, K., Haghghi, K., Strohine, R.L. 1990. Nonlinear finite element analysis of coupled heat and mass transfer problems with an application to timber drying, *Drying Technology* 8, 4: 731-749.

Janssens, M.L. 2004. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. *Fire and Materials* 18: 199-207.

Kocafe, D., Wounsi, R., Chaudry, B., Kocaefer, Y. 2006. Modeling of heat and mass transfer during high temperature treatment of aspen. *Wood Science and Technology* 40: 371-391.

Križanič, F., Vidav., I. 1985. Navadne in parcialne diferencialne enačbe. Variacijski račun. Ljubljana. Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS. Zveza organizacij za tehnično kulturo Slovenije.

Lau, P.W.C., White, R., Van Zeeland, I. 1999. Modelling the charring behaviour of structural lumber. *Fire and Materials* 23: 209-216.

Liu, J. Y., Cheng, S. 1991. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 34, 7: 1747-1754.

Luikov, A.V., Mikhailov, Yu.A. 1966. Theory of energy and mass transfer. Oxford. Pergamon Press: 392 str.

Luikov, A.V. 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (Review). *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18: 1-14.

Nijdam, J.J., Langrish, T.A.G., Keey, R.B. 2000. A high-temperature drying model for softwood timber. *Chemical Engineering Science* 55: 3585-3598.

Mišmaš, B. 2004. Analiza lesenih nosilcev, izpostavljenih požaru. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Schaffer, E.L. 1967. Charring rate of selected woods-transverse to grain. Research paper FPL-69. USDA Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin, USA.

Schnabl, S. 2007. Mehanska in požarna analiza kompozitnih nosilcev. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Thomas, H.R., Morgan, K., Lewies, R.W. 1980. A fully nonlinear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies. *International Journal for numerical Methods in Engineering* 15: 1381-1393.

Turk, G. 1987. Programska oprema za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote z upoštevanjem raznih robnih pogojev in notranjega vira toplote zaradi hidratacije cementa. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Konstrukcijska smer.

Yang, L., Chen, X., Zhou, X., Fan, W. 2003. The pyrolysis and ignition of charring materials under an external heat flux. *Combustion and Flame* 133: 407-413.

White, R.H., Nordheim, E.V. 1992. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technology* 28, 1: 5-30.

Pravilniki

SIST EN 1995-1-2. 2004. Eurocode 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – Del 1-2: Splošna pravila – Projektiranje požarno odpornih konstrukcij.

Internet

Poon, L. 2003. Literature Review on the Contribution of fire resistant timber construction to heat release rate. Warrington fire research.

<http://wfra.com.au/20633.pdf> (3.9.2007)

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana ŠPELA BLATNIK izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:

»TEMPERATURNA IN VLAŽNOSTNA ANALIZA LESA«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 15.10.2007

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 614.84:624.011.1:691.1(043.2)

Avtor: Špela Blatnik

Mentor: izr. prof. dr. Goran Turk

Somentor: dr. Simon Schnabl

Naslov: Temperaturna in vlažnostna analiza lesa

Obseg in oprema: 53 str., 4 pregl., 19 sl.

Ključne besede: parametrična študija, enačbe Luikova, požar, oglenenje

Povzetek:

V diplomski nalogi je predstavljena analiza temperaturno-vlažnostnega stanja lesenih nosilcev z upoštevanjem oglenenja lesa. Uporabljeni sta nelinearni parcialni diferencialni enačbi Luikova, ki se uporabljata za opis povezanega prehoda toplote in vlage skozi les. Računski primeri so bili izvedeni s programom napisanim za okolje Matlab. Parametrična študija je izvedena za enodimenzionalen prerez s konstantnimi parametri. Prikazani so vplivi različnih parametrov na hitrost oglenenja. Prikazano je tudi oglenenje dvodimenzionalnega homogenega prereza s pojavom zaokrožitve. Izračunano razporeditev oglja po dvodimenzionalnem prerezu uporabimo za dimenzioniranje homogenega prostoležečega nosilca, ki ga obtežimo z zunanjo statično in požarno obtežbo.

BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**UDC: 614.84:624.011.1:691.1(043.2)****Author: Špela Blatnik****Supervisor: Assoc. prof. dr Goran Turk****Co-mentor: dr. Simon Schnabl****Title: Heat and moisture transfer analysis of wood****Notes: 53 p., 4 tab., 19 fig.****Key words: parametric study, Luikov equations, fire, charring****Abstract:**

The aim of the diploma thesis is to analyze the temperature and moisture transfer in timber beams where the charring rate is also taken into account. A simultaneous heat and moisture transfer in wood is represented by two second order non-linear partial differential equations derived by Luikov. Simulation results are performed by software programme written for Matlab environment. The software program models the Luikov equations, which are used for analysis and behaviour of two-dimensional section of timber exposed to fire. A parametric study with constant parameters is done for a one dimensional section through. The influences of different parameters on charring rate are shown. Charring of the homogeneous two-dimensional section twith effect of rounding is also represented. We use numerically calculated arranged charcoal in the two-dimensional section through case for dimensioning homogeneous simply supported beam, which is subjected with external static and fire load. For this case the calculations are made and compared with numerical calculations for two-dimensional case.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se najlepše zahvaljujem mentorju izr.prof.dr. Goranu Turku in somentorju dr. Simonu Schnablu.

Hvala družini za podporo in potrpežljivost.

Hvala Janezu za spodbudo in pomoč.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Opredelitev problema	1
1.2	Cilji naloge	1
2	OSNOVNE ENAČBE PREVAJANJA TOPLOTE IN VLAGE	3
2.1	Splošno	3
2.2	Enačbi Luikova	3
2.2.1	Materialni parametri	6
2.2.2	Druge spremenljivke	7
2.3	Reševanje enačb	7
2.3.1	Analitično reševanje enačb	8
2.3.2	Numerično reševanje enačb	9
2.4	Piroliza lesa	10
2.5	Modeli oglečenja	11
2.5.1	Empirični modeli oglečenja	11
2.5.1.1	Standardni požari	12
2.5.1.2	Nestandardni požari	16
2.5.1.3	Požari s konstantno temperaturo	18
2.5.2	Teoretični modeli oglečenja	19
2.6	Požarno projektiranje	22
2.6.1	Standardna požarna odpornost lesenih konstrukcij	22
3	RAČUNSKI PRIMERI	23
3.1	Parametrična študija enodimenzionalnega oglečenja lesenih nosilcev	23
3.1.1	Vpliv specifične toplote snovi na hitrost oglečenja	25
3.1.2	Vpliv specifične vlage snovi na hitrost oglečenja	26
3.1.3	Vpliv izparilne toplote snovi na hitrost oglečenja	27
3.1.4	Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti na hitrost oglečenja	28
3.1.5	Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglečenja	30

3.1.6	Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja.....	31
3.1.7	Vpliv specifične gostote pri različnih vlažnostih na hitrost oglenjenja.....	32
3.1.8	Primer tankega prereza	34
3.2	Dvodimenzionalno oglenenje lesenih nosilcev.....	35
3.3	Dimenzioniranje prostoležečega nosilca.....	37
3.3.1	Dimenzioniranje pri normalni temperaturi.....	37
3.3.1.1	Geometrija nosilca.....	37
3.3.1.2	Materialne karakteristike	37
3.3.1.3	Obtežba.....	38
3.3.1.4	Projektna obtežba.....	38
3.3.1.5	Obremenitve.....	38
3.3.1.6	Dimenzioniranje	39
3.3.2	Odpornost na požarno obremenitev na podlagi temperaturno-vlažnostne analize	40
3.3.2.1	Obtežba.....	41
3.3.2.2	Projektna obtežba.....	41
3.3.2.3	Obremenitve.....	41
3.3.2.4	Dimenzioniranje	42
3.3.3	Odpornost na požarno obremenitev na podlagi EC5.....	43
3.3.3.1	Globina zgošenosti pri 10-ih minutah	43
3.3.3.2	Projektna obtežba.....	44
3.3.3.3	Obremenitve.....	44
3.3.3.4	Dimenzioniranje	45
4	ZAKLJUČEK	49

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Rezultati parametrične študije, to je debelina oglja v [cm], za posamezne parametre pri časih 10, 20, 30, 45, 60 min.....	33
Preglednica 2: Materialne karakteristike lesa.	38
Preglednica 3: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale na osnovi temperaturno-vlažnostne analize.	47
Preglednica 4: Prikaz odpornosti na požarno obtežbo prereza 30/30 cm za posamezne časovne intervale po EC 5.....	47

KAZALO SLIK

Slika 1.1: Prikaz zmanjšanja prereza pri gorenju. Prerez A predstavlja prerez pred požarom, prerez B po pol ure gorenja in prerez C po eni uri gorenja	2
Slika 2.1: Robni pogoji	9
Slika 2.2: Posamezne faze pri procesu pirolize	10
Slika 2.3: Požarna krivulja ISO-834	13
Slika 3.1: Geometrija modela	23
Slika 3.2: Model enodimenzionalnega simetričnega prereza s prikazom diferenčne mreže	24
Slika 3.3: Vpliv specifične toplote lesa na hitrost oglenjenja	25
Slika 3.4: Vpliv specifične vlage lesa na hitrost oglenjenja	26
Slika 3.5: Vpliv izparilne toplote lesa na hitrost oglenjenja	27
Slika 3.6: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti oglja na hitrost oglenjenja	28
Slika 3.7: Vpliv koeficienta toplotne prevodnosti lesa na hitrost oglenjenja	29
Slika 3.8: Vpliv termogradientnega koeficienta na hitrost oglenjenja	30
Slika 3.9: Vpliv deleža vlage v plinastem stanju na hitrost oglenjenja	31
Slika 3.10: Vpliv specifične gostote materiala na hitrost oglenjenja pri vlažnosti $w = 13^{\circ}M$	32
Slika 3.11: Debelina oglja pri zelo tankem prerezu	34
Slika 3.12: Geometrija dvodimenzionalnega prereza (leva slika) in diferenčna mreža (desna slika)	35
Slika 3.13: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 10 min in 30 min	36
Slika 3.14: Porazdelitev temperature po prerezu pri izpostavljenosti standardnemu požaru pri času 45 min in 60 min	36
Slika 3.15: Geometrijski podatki nosilca	37