

Ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima

Perković, Nikola

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:060208>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Nikola Perković

**PONAŠANJE PROŠUPLJENIH
LIJEPLJENIH LAMELIRANIH DRVENIH
ELEMENTA U AMBIJENTNIM I
POŽARNIM UVJETIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Vlatka Rajčić

Zagreb, 2022.



University of Zagreb
Faculty of Civil Engineering

Nikola Perković

**MECHANICAL AND FIRE
PERFORMANCE OF GLUE-LAMINATED
HOLLOW TIMBER ELEMENTS**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
prof. Vlatka Rajčić, Ph.D.

Zagreb, 2022.

IZJAVA O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.



Nikola Perković, mag.ing.aedif.

INFORMACIJE O MENTORU

Vlatka Rajčić je diplomirala 1991. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za Konstrukcije na temu „FEM modeli lijepljenih lameliranih konstrukcija“. Tijekom studija više puta je nagrađivana Rektorovom nagradom. Akademski stupanj magistra znanosti stekla je 1996. obranivši rad „Vrednovanje mehaničkih svojstava drveta NDT tehnikama“ i akademski stupanj doktora znanosti 2000. obranivši doktorsku disertaciju „Karakteristike kompozitnih konstrukcija drvo-laki beton“, obje na Fakultetu Sveučilište građevinarstva u Zagrebu. Predaje na Građevinskom fakultetu u Zagrebu od 1992. godine na Zavodu za konstrukcije, prvo kao mladi znanstveni istraživač i asistent na predmetu Drvene i čelične konstrukcije i temeljenje konstrukcija. Bila je docentica od 2000.-2003. i izvanredna profesorica od 2003.-2007. Od 2007. redovita je profesorica na Sveučilištu u Zagrebu. Voditeljica je Zavoda za konstrukcije i Katedre za drvene i lagane konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Trenutno drži predavanja o drvenim konstrukcijama I i II i Laganim konstrukcijama (aluminij, strukturno staklo, membranske konstrukcije) na sveučilišnoj diplomskoj razini studija i „Umjetna inteligencija“ u građevinarstvu i drvenim kompozitima kao i o strukturnim aspektima zaštite kulturne baštine na poslijediplomskom doktorskom studiju. Aktivno sudjeluje u nacionalnim, bilateralnim i europskim znanstveno-istraživačkim projektima.

Aktivna je u nekoliko tehničkih odbora Hrvatskog zavoda za normizaciju za usklađivanje hrvatskih normi s europskim normama: Očuvanje kulturne baštine, Drvene konstrukcije, Ljepila, Aluminijske konstrukcije i Konstrukcijsko staklo. Bila je MC članica Hrvatske za nekoliko COST akcija: E29 „Inovativni drveni i kompozitni elementi/komponente za zgrade, E55 „Modeliranje performansi drvenih konstrukcija, TU0701 „Poboljšanje kvalitete prigradskih građevinskih fondova i TU0905 „Strukturalno staklo-Novo metode projektiranja i proizvodi sljedeće generacije“, TU0601 - „Robustness of Structures“, koord. Michael Faber, ETH Zurich, FP1004 "Poboljšanje mehaničkih svojstava drveta, inženjerskih proizvoda od drva i drvenih konstrukcija", FP1101 "Procjena, ojačanje i nadzor drvenih konstrukcija", TU1207 "Smjernice za dizajn sljedeće generacije za kompozite u građevinarstvu", FP1 Osnove projektiranja konstrukcijskog drveta - od istraživanja do standarda“, Horizon 2020 AN - FP1402, TU1303 „Nove strukturalne obloge: Poboljšanje održivosti i učinkovitosti kroz nove strukturalne tekstilne materijale i dizajne“, TU1403 „Mreža adaptivnih fasada“, Horizon 2020 ANTU1403, TU1402 „Kvantificiranje vrijednosti nadzora stanja konstrukcije (SHM-2) 0“, Horizont 2020. TU1402., CA17107, Europska mreža za povezivanje istraživačkih i

inovacijskih napora na naprednim pametnim tekstilima (CONTEXT), CA18203 - Optimiziranje dizajna za inspekciju (ODIN), CA19139 - Modeli temeljeni na procesu za atribuciju klimatskih utjecaja u različitim sektorima, COST Action CA20139: Holistički dizajn visokih drvenih zgrada.

Upisana je na listu stručnjaka na CORDIS-u www.cordis.eu i sudjelovala u evaluaciji projekata pristiglih na pozive, H2020 EEB-01-2016 - Visoko učinkoviti izolacijski materijali s poboljšanim svojstvima, Large Scale Integrated Collaborative Project: FP7- EeB. NMP.2013-4” Integrirani sustavi upravljanja i metodologije za praćenje i poboljšanje energetske učinkovitosti zgrade; “FP7- EeB.NMP.2010-2 - Nove tehnologije za energetske učinkovitost na razini okruga”, 2010; "FP7- NMP – 2008 – LARGE2" - Industrijalizacija kroz nove integrirane građevinske procese", svi projekti iz područja: Nanoznanost, Nanotehnologije, Materijali i nove proizvodne tehnologije.

Sudjelovala je u izradi 294 rada, od čega su 92 rada u zbornicima skupova, 77 ocjenskih rada, 58 rada u časopisima, 44 sažetka sa skupova te 7 ostalih vrsta rada. Sve publikacije mogu se pronaći ovdje : <https://www.bib.irb.hr/pregled/profil/14816>

Riječima ne mogu izraziti svoju zahvalnost mojoj profesorici i mentorici prof. Vlatki Rajčić za svu podršku, savjete, usmjeravanje i neprocjenjivo strpljenje. Bez Vas bi ovaj rad bio nepotpun, nedorečen, a u konačnici, ne bi ni postojao. Osim toga, ovaj poduhvat ne bi bio moguć bez velikodušne potpore voditeljice projekta „Razvoj modularne kuće primjenom inovativnih drvenih elemenata“ prof. dr. sc. Vlatke Rajčić, trgovačkog društva „Tersa d.o.o“, i COST akcija CA18120 i CA20139, koje su sufinancirale moje istraživanje. Nadalje, ne bih mogao krenuti na ovo putovanje bez svog odbora za obranu disertacije, koji je velikodušno pružio svoje znanje i stručnost. Veliko hvala prof.dr.sc. Davor Skejiću i prof.dr.sc. Adriani Bjelanović na savjetima, korekcijama i motivaciji.

Hvala tvrtki „Tersa d.o.o“ na profesionalnosti i pomoći pri izradi uzoraka za laboratorijska ispitivanja u Hrvatskoj, Portugalu i Estoniji.

Hvala djelatnicima zavoda za tehničku mehaniku, djelatnicima zavoda za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, djelatnicima Instituta Superior Tecnico u Lisabonu, djelatnicima TalTech-a u Tallinuu, te djelatnicima tvrtke „LTM d.o.o“ koji su mi omogućili ispitivanja, ali ne i samo to. Omogućili su mi da se osjećam ispunjeno na profesionalnoj i osobnoj razini. Bez njih bi ovaj rad ostao samo ideja, a ja bi bio samo još jedan poslovni suradnik. Ovako sam postao znanstvenik, ali i prijatelj, što je meni i važnije od same disertacije, pa je slijedeći dio zahvale usmjeren meni najvažnijim ljudima.

Na vrhu, kao i uvijek, stavljam svoju obitelj i želim im zahvaliti na pravi način, no nažalost, to je jednostavno nemoguće. Tata, svi koji me poznaju, znaju na koji način pričam o tebi i što mi u životu predstavljaš. Nadam se da je ovo još jedan mali korak da budem makar sjena onog što si ti. Srećom, to mi je omogućila mama, koja kaže da sam baš na nju, a da je sve ostalo samo mala dorada. Nadam se da je tako. Hvala mojoj vječnoj motivaciji i inspiraciji, mojim dvjema sestrama, što ste bezuvjetna podrška, što nije lako, uzimajući u obzir moj karakter. Vaše vjerovanje u mene održalo je moj duh i motivaciju na visokom nivou na ovom putu. Hvala mojim nećacima Marku i Šimunu, što mi omogućuju da spoznam istinsku ljubav i čistu sreću, ali hvala i Hrvoju što je pravi primjer oca i prijatelja. Hvala i ostatku moje obitelji, a posebice hvala djedu Branku i baki Branki što su utkali u mene životne vrijednosti, kojima se i danas vodim. Nadam se da ste ponosni. Hvala mojoj novoj obitelji, mojoj Marini, koja je svemu u mom životu dala smisao. Neizmjerno sam zahvalan što pored sebe imam osobu koja me svojim djelovanjem, dobrotom i ljubavlju tjera da u svakom trenutku budem najbolja verzija

sebe. Neizmjereno cijenim tvoju beskompromisnu žrtvu, razumijevanje, toleranciju i poštovanje, posebno onda kada smo bili odvojeni. Bez tebe ništa ne bi imalo smisao.

Hvala prijateljima Kristijanu, Ivanu, Luki, Mariu, Tei, Filipu, Tvrtku, Domagoju, Tomislavu, Josipu i Lovri što su me svaki put pitali kada ću završit doktorat i na taj način ubrzali ovaj proces. Hvala prijateljima i kolegama Juri, Marinu, Ivanu, Dominiku, Mislavu, Tvrtku, Tomislavu i drugima što činite ovaj posao zabavnijim i smislenijim. Hvala prof. Damjanoviću što mi je podizao samopouzdanje prilikom izrade rada, ali i na sportskim terenima. Bez vas bi ovaj rad bilo puno teže dovršiti.

Na kraju, želim zahvaliti i sebi, jer sam vjerovao u sebe, jer sam bio vrijedan, marljiv, hrabar i pošten, zahtijevao poštovanje i što nikad nisam odustajao od sebe.

Zbog sve veće potrebe za očuvanjem našeg planeta i smanjenjem emisije ugljičnog dioksida (CO₂) tijekom gradnje, sve više se nameće korištenje jedinog materijala koji pohranjuje ugljik, a to je drvo. Osim zahtjeva za smanjenjem emisije štetnih plinova, javlja se potreba za što kraćim vremenom izgradnje i minimalnom upotrebom građevinskih strojeva, što je dovelo do razvoja sustava montažne gradnje.

Ovaj rad se bavi inovativnim prošupljenim lijepljenim lameliranim drvenim elementima koji su namijenjeni za montažni sustav gradnje. Uspoređujući ovaj inovativni sustav s postojećim montažnim sustavima, prikazane su glavne značajke i ponašanje konstitutivnih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima.

Otpornost konstrukcija na požar uvelike doprinosi osjećaju sigurnosti i važan je kriterij za odabir građevnog materijala. Zapaljivost drveta jedan je od glavnih razloga zašto regulativa strogo ograničava drvo kao građevinski materijal, posebno za gradnju višekatih objekata. Stoga, glavni preduvjet za uporabu drva u građevinama je osigurati adekvatnu požarnu otpornost, koristeći pasivne i aktivne mjere zaštite od požara. Zbog geometrije prošupljenih drvenih elemenata i tankih vertikalnih drveni stijenki između prošupljenja, djelovanje požara može dovesti do nepravilnih rezidualnih poprečnih presjeka sa većim dubinama pougljenja u usporedbi sa standardnim drvenim elementima. Mehaničko i požarno opterećenje zajedno sa geometrijskim i materijalnim karakteristikama drvenih konstrukcija, imaju presudnu ulogu u istraživanju njihove otpornosti. Ovaj rad daje pregled mogućnosti i izazova u postizanju tog cilja vodeći se principima požarnog inženjerstva.

U doktorskom radu provedena je eksperimentalna i numerička analiza utjecaja mehaničkog i požarnog opterećenja na prošupljene lijepljene lamelirane drvene elemente, te usporedna analiza ponašanja ovog tipa elemenata sa ponašanjem za praksu uobičajenih GLT elementa. Eksperimentalno istraživanje provedeno je u dvije glavne faze. Prva faza odnosila se na istraživanje ponašanja prošupljenih uzoraka u ambijentnim uvjetima (savijanje, tlak okomito na vlakanca, posmik, vlak paralelno s vlakancima), dok se druga faza odnosila na istraživanje u požarnim uvjetima (izloženost linijskih elemenata s jedne i tri strane, nosivi zid, te spojevi). Razvijen je novi pristup numeričkog modeliranja metodom konačnih elemenata (MKE), korišten za evaluaciju debljine pougljenog sloja, te su predloženi proračunski modeli za određivanje mehaničke i požarne otpornosti prošupljenih drvenih elemenata.

Ključne riječi: drvo, lijepljeno, lamelirano, požar, inovacija, prošupljeni, MKE.

1. INTRODUCTION

Due to the growing need to preserve our planet and to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions during construction, the use of the only CO₂-absorbing material, timber, is increasingly being imposed. Recently, the design and construction of mass-produced buildings using cross-laminated timber (CLT) and glued laminated timber (GLT) has risen sharply. In addition to the requirement of reducing CO₂ emissions, there is a need of minimizing construction time and usage of construction machinery, which has led to the development of prefabricated timber construction systems. This may ultimately result in reduced costs and higher construction speeds, compared to standard commonly non-combustible materials, and structures.

This doctoral thesis deals with innovative hollow glue-laminated timber elements intended for prefabricated construction systems. Comparing this innovative system with existing ones, the main system's features and behavior of the constituent elements i.e., the hollow glue-laminated timber elements, in ambient and fire conditions have been presented. Fire safety greatly contributes to the user's feeling of safety, and it is a key parameter for the selection of building materials. The combustibility of timber is one of the main reasons to have strict restrictions on timber for usage as a building material, especially for multi-storey buildings.

At the end of the life cycle, timber releases stored CO₂ into the atmosphere by decomposition or combustion. Therefore, the main prerequisite for the use of timber in buildings is to ensure adequate fire resistance, using passive and active fire protection measures. Due to the geometry of the hollow GLT elements and the thin vertical timber parts between the hollows, the fire load can lead to irregular residual cross-sections with greater charring depths in comparison to the standard GLT elements. Mechanical and fire load along with the geometrical and material characteristics of timber elements play a crucial role in researching their resistance. This thesis provides an overview of the possibilities and challenges in achieving this goal, guided by the principles of fire engineering.

The mechanical and fire performance of innovative hollow glue-laminated timber elements has not been investigated yet and is the main goal of this thesis.

The main hypotheses are as follows:

H₁: Experimental research and numerical analysis will enable the determination of the influence of the geometrical and material characteristics on the mechanical and fire performance of hollow glue-laminated elements.

H₂: By perforating the cross-section area of timber elements up to 35 %, a minimum of 60 % of the load-carrying capacity of the full cross-section timber elements can be reached.

H₃: By perforating the cross-section area of timber elements up to 35 %, a minimum of 30 % of the fire resistance capacity of the full cross-section timber elements can be reached, and by applying fire protection in the form of fire retardants, or non-combustible materials infill in the first row of hollows, favorable effects on fire resistance of hollow glue-laminated timber elements can be achieved compared to the fire resistance of the full cross-section timber elements.

2. LITERATURE REVIEW

2.1 Available prefabricated systems of timber construction

Currently, there are several available prefabricated systems of timber structures. „LUXHOME“ [30] has developed a prefabricated system of timber houses from “timber bricks” (Figure 2.4a). The production itself is automated so that by defining the dimensions of individual parts, the quantities of materials and costs are obtained immediately (Figure 2.4b), which can significantly reduce the amount of waste material.

The next system is „ECOCELL“ [31]. This is a SIP system (structural insulated panels) that consists of an insulating material that is placed between two boards, most often OSBs (Figure 2.6). The system is solid, energy efficient, and very affordable. Most SIP systems use oil-based foam insulation, while „ECOCELL“ has developed an innovative insulation system, the first that is non-oil based. Insulation makes up 75 % of the volume of the element. The insulating material is in the shape of a honeycomb and is made of 100 % recycled paper, in the form of corrugated cardboard, which is covered with a mineral coating (Figure 2.6).

Fabric Workshop is a company that designs a system of hollow-core, solid timber panels (Figure 2.13), columns, and walls, for which 50 % fewer wood fibers are being used, and the total cost is 10–35 % lower compared to CLT. Due to the cavities and box shape, this system has a better strength/weight ratio than comparable steel and concrete systems. Although the material is expensive, there are significant savings in execution speed and error prevention due to this design method.

„BRIKAWOOD“ [33] is a timber brick-building system, developed by the French company Catharhome, which allows one to quickly build a house without the use of nails, screws, or adhesive. Each unit consists of four parts: two side elements and two transverse spacers that fit into each other with the help of a classic dovetail joint (Figure 2.16).

Another modular system is „GABLOK“ (Figure 2.19), which represents insulated timber blocks, designed from recyclable materials [34]. Gablok has been using expanded polystyrene with a graphite additive (EPS) for its building system. An insulated timber block of 60 cm weighs only 7.5 kg, which makes it very easy to handle, with no cranes needed on the construction site. The combination of timber and EPS provides significant insulation value, which can be further increased by the use of insulating materials on the outside of the blocks.

Finally, STEKO is a modular building system developed in Switzerland [35]. It is easy to install, even without the use of adhesive, nails, or similar mechanical fasteners. It consists of five parts that are glued together with non-toxic adhesive (Figure 2.23). STEKO modular system is suitable for residential buildings, as well as for communal, agricultural, industrial, or business buildings up to 10 storeys high.

2.2 Fire performance of timber structures

The characteristic phases and phenomena that occur when timber is exposed to fire are shown in Figure 2.30.

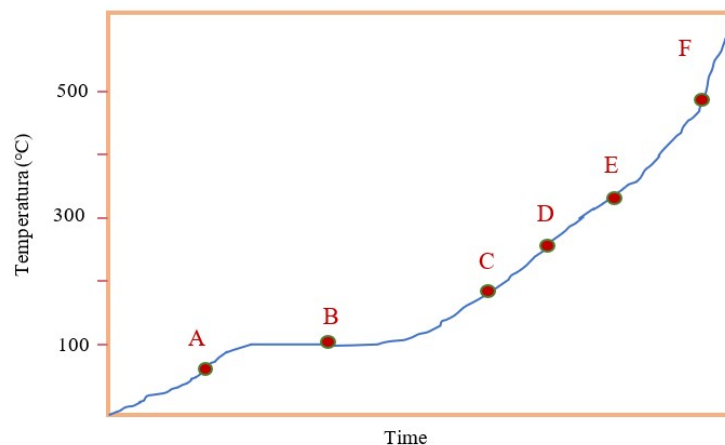


Figure 2.30 Characteristic phases of the behavior of timber structures in a fire event

Temperatures below 100 °C (point A in Figure 2.30), but above room temperature, cause drying of the timber and a slight decrease in strength and stiffness. At 100 °C (point B) the water starts to vaporize and following the lowest resistance path escapes from the timber. Temperature does not rise in timber until all the water has been evaporated, which represents the horizontal part of the curve in Figure 2.30. Between 150 °C and 200 °C (point C), gases are formed consisting of approximately 70 % carbon dioxide (CO₂), which is non-combustible, and

30 % carbon monoxide (CO), which is combustible. At 200 °C (point D), more gases are formed and the proportion of CQ reduces. When these gases are ignited, the surface temperature increases rapidly, continuing the combustion of timber. When a temperature of 300 °C is reached (point E), timber loses most of its strength. For temperatures above 500 °C (point F) gas production is greatly reduced and charcoal production increases which explains the appearance of timber (charcoal) after a fire. Figure 2.31a shows the characteristic layers and behavior of timber in fire conditions.

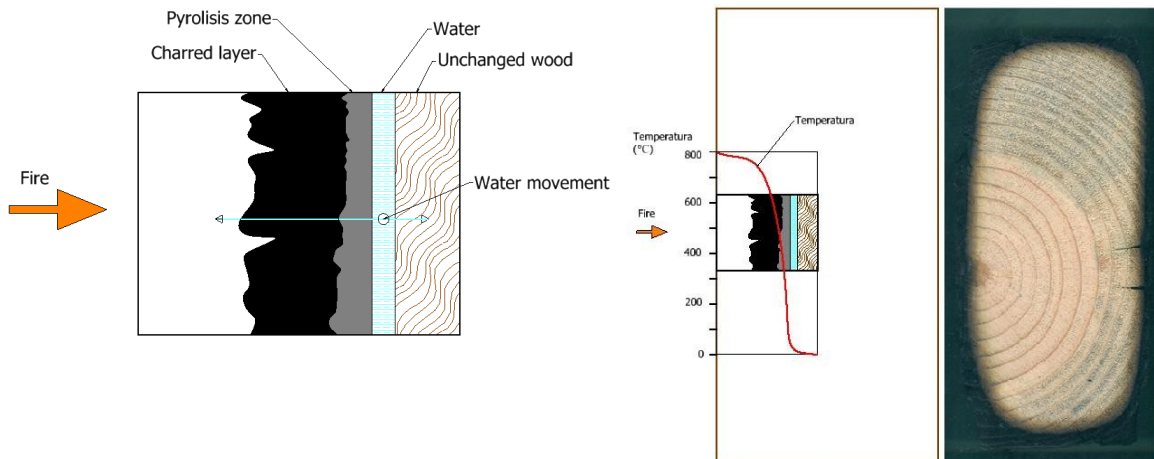


Figure 2.31 Fire behaviour of timber: (a) charring of timber; (b) temperature development towards the interior of the section

A charred layer plays a crucial role in preventing the propagation of heat toward the interior of the timber. In Figure 2.31b the temperature profile that remains unchanged over time at the moment of formation of the charred layer is shown. After the charred layer falls off, the temperature rises sharply again.

2.3 FEM – timber structures

Recently, the number of big and small-scale fire tests of timber elements has increased, but numerical models have been created only for a small number of tested elements. A review of the literature indicated that numerical modeling has been performed with several commercial software packages, but the instructions and reports are not extensive and detailed.

In general, the charred layer, deformations, failure times, and failure modes were in good agreement with experiments, but some specific phenomena such as sliding between lamellae or delamination of elements have not yet been investigated. All this indicates that the numerical modeling of timber elements in the fire still offers numerous opportunities for further development. In the instructions of the COST Action FP1404 [55], procedures for numerical modeling of the TCC construction with different commercial software packages are given; ANSYS, SAFIR, COMP - WOOD, and ABAQUS. Furthermore, the thermal properties of

timber can be taken in accordance with Eurocode standards [8], while the use of a bi-linear model is recommended for timber under tensile and compressive stress [56]. A key role is represented by the use of cohesive contacts, in order to reproduce the fracture mechanisms as consistently as possible.

This thesis employs the commercial finite element analysis package ANSYS to model the thermal and structural behavior of hollow GLT elements in a fire event.

3. MECHANICAL PERFORMANCE OF INNOVATIVE HOLLOW GLUED LAMINATED WOODEN ELEMENTS

Innovative, hollow, glue-laminated timber elements (Figure 3.71) have been developed in Croatia as a result of the cooperation of the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, and Tersa Ltd.

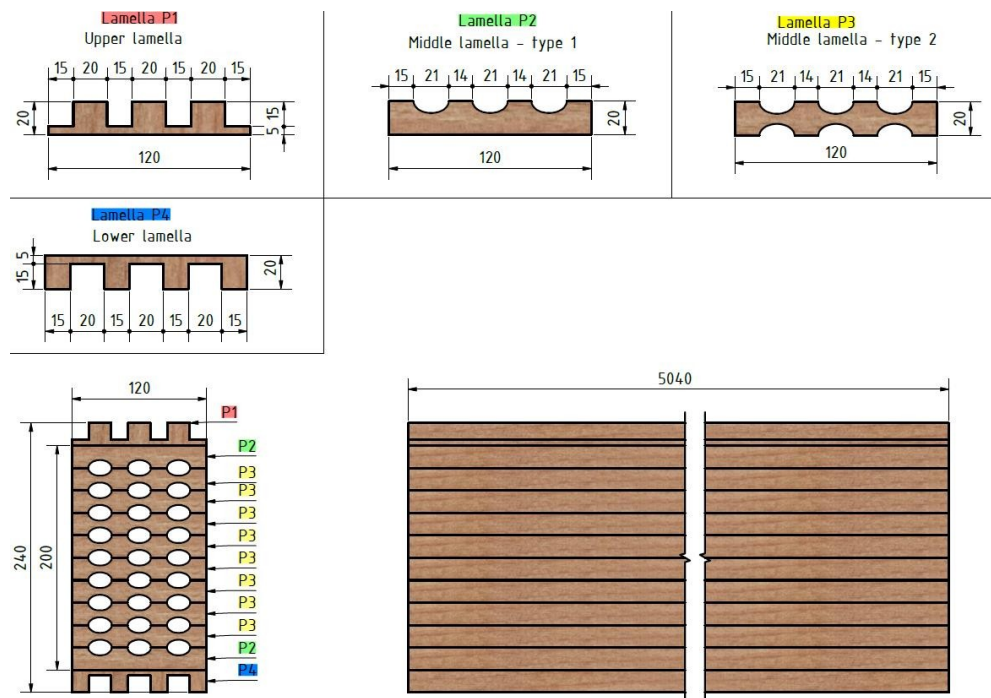


Figure 3.71 Innovative glue-laminated hollow timber beam

The innovative nature of the hollow GLT elements represents a new generation of timber products that enable easier construction, faster assembling, time and material savings, and global environmental sustainability. The first and last lamellae are shaped so that, when stacked on top of each other, the elements fit together. In this way, fast and efficient construction is enabled without the use of mechanical fasteners or adhesives. In the other lamellae, semi-elliptical or semi-circular shapes are cut and then glued together to obtain the desired cross-section with elliptical or circular cavities. Experimental research on hollow timber elements was performed to investigate the different possibilities of the type and arrangement of cavities that affect the load-carrying capacity and serviceability of the system. The research in

ambient conditions was carried out in two phases; preliminary research with initial specimens and final research with the improved specimens. For both test series, five types of tests in ambient conditions were conducted as follows: 4-point bending (weak and strong axis), compressive strength perpendicular to the grains (weak and strong axis), shear tests of the glue line, and tension tests parallel to the grains. All tests were carried out in accordance with the current EN standards.

Based on preliminary test results it can be concluded that cavities affect the behavior of glued-laminated timber elements, i.e. the limit states are reached earlier in comparison to the standard GLT elements. Furthermore, the adhesive used to connect the lamellas affects the behavior of hollow timber elements. Ultimately, the behavior of specimens with elliptical cavities is better compared to specimens with circular cavities. Experimental research of compression perpendicular to the grains indicated that samples with elliptical cavities can withstand almost twice the load compared to specimens with circular cavities. Following the conclusions stated above, only specimens with elliptical cavities have been investigated onwards.

Parametric analysis indicated that by combining different lamella thicknesses, materials of individual lamellae, and ultimately the arrangement of lamellae, positive effects on the deflection or stress distribution of the hollow GLT element can be achieved. Furthermore, by increasing the thickness of the edge lamellas, a positive effect can be achieved in the form of a reduction of vertical deformations and normal stresses. By increasing the class of internal lamellas, the vertical deformation of hollow GLT elements is reduced.

When investigating the compression perpendicular to the grain of improved specimens, the hollow hardwood specimens have a higher load-bearing capacity than the softwood samples without cavities due to approximately three times higher CSPG. The values prescribed for the coefficient $k_{c,90}$ in Eurocode 5 [1] are conservative.

Experimental analysis of the tension parallel to the grains showed that the ratio of modulus of elasticity parallel to the grains of hardwood and softwood is 1.63, while the ratio of tensile strength parallel to the grains of hardwood compared to softwood is 1.92.

Furthermore, the shear capacity of the glue line between 2 lamellas parallel to the grain is approximately 2 times greater than the capacity of the glue line of lamellas perpendicular to the grain for hardwood, and even 3 times greater for softwood.

Innovative hollow glue-laminated timber elements can be calculated according to the theory of jointed beams given in Eurocode 5. The correlation between the results obtained by manual calculation with the results of experimental tests is very good. In addition, FEM analysis

in ANSYS showed a very good correlation with the experimental test results. In the numerical parametric analysis, it was shown how the layout of the cavities affects the stress distribution. It has been proven that removing individual rows or columns of cavities, has a positive effect on stress distribution. If the first lamellae are without cavities, this has a positive effect on the overall behavior of the element, i.e. it breaks at a higher amount of force. By avoiding voids in each successive lamella, the stress concentration is reduced and the area between the two voids increases, which ultimately results in a higher load-bearing capacity of the element. If the central part of the cross-section is without cavities, the stress is reduced, but special attention should be paid to the distance of the holes from the edges so that local cracking does not occur. Ultimately, based on the conclusions mentioned in this chapter, the first hypothesis (H1) was confirmed.

4. FIRE PERFORMANCE - INNOVATIVE HOLLOW GLUED LAMINATED WOODEN ELEMENTS

4.1 Introduction

The main goal of this part of the research was to evaluate the fire performance of innovative hollow glue-laminated timber elements and to compare it with the fire performance of standard GLT elements.

The research is divided into several parts, defined by fire exposure of the timber beams (one side or three sides), bearing wall made of hollow GLT elements, and finally joints (finger joints and face bonds). For all tests, along with the fire load, a structural load was applied. For timber beams, it was 4-point bending, for the wall continuous loading on the upper edge, and the joints tensile and shear load.

4.2 Specimens exposed to fire on one side

In the case of a one-sided fire scenario, elevated temperature causes a reduction of the timber's stiffness, and the weakening surface adhesion, combined with the char formation. To preserve the composite action, bond lines must be able to resist not only the normal and shear stress redistribution in the reduced cross-section but also the increased temperatures within the adhesive. The goal was to compare the failure modes of specimens in a fire event, and the impact of different types of adhesives used for connecting lamellae. The type and quality of adhesives play a big role in preventing these phenomena, especially during the fire load.

The research consists of an experimental part and FEM analysis. A total of 10 specimens were tested, 5 types of timber specimens with variations of different protection and adhesives

between the lamellas. Two types of adhesives were used to connect the lamellae; K.510 and K.501.

It was concluded that the bond line behavior is dictated by both the adhesive performance and the adhesive-timber interaction. The behavior of adhesives at elevated temperatures used for the bond line between the lamellas has little influence on the fire resistance of the GLT elements. The effect of the perforation of the GLT elements and the reduced glued surface due to the perforation affect delamination.

FEM simulation and the nonlinear thermo-mechanical analysis were performed to predict the behavior of GLT elements exposed to fire. A simplified calculation model was developed to determine the charring depth and the zero-strength layer. Calculation model based on the reduced cross-section method according to EN 1995-1-2 [8]. Investigation shows the presence of different charring phases. In each stage of charring, a linear increase in charring depth has been assumed. During the second phase of charring of hollow elements with stone wool, increased charring of the vertical walls occurs due to the two-dimensional heat flux. For this reason, during the second stage of charring, the zero layer d_0 , which takes into account the decrease in strength and modulus of elasticity depending on temperature, must be increased to 19 millimeters. For timber surfaces protected with intumescent paint, the one-dimensional charring was delayed until time t_{ch} . Charring started before the separation of intumescent paint, but at a lower rate than the charring rates of unprotected wood. A simplified calculation model is proposed.

4.3 Specimens exposed to fire on three sides

To expand knowledge about the behavior of hollow timber beams in a fire, big-scale fire tests of timber beams exposed from 3 sides were carried out. This section contains the results of fire experimental tests of both normal and innovative hollow GLT beams. A total of 3 timber beams were tested in fire conditions, which differed in cross-section type but also the applied fire protection system. The first beam was a normal unprotected GLT beam, the second was a hollow GLT beam covered by intumescent paint, and the third was also a hollow GLT beam, additionally protected by stone wool infill inside the cavities. Fire tests indicated that hollow timber beams with both intumescent paint and mineral wool infill failed at a similar time as a normal GLT beam without fire protection. One-dimensional β_0 and notional charring rates β_n were obtained.

When comparing normal glue-laminated beams with hollow ones, the difference in failure modes could be seen, primarily because the appearance of delamination could be seen in the hollow GLT elements. The main cause of the failure of hollow beams was the appearance

of delamination due to the reduction of the lamella bonding surface and the finger joint failure (Figure 4.33).

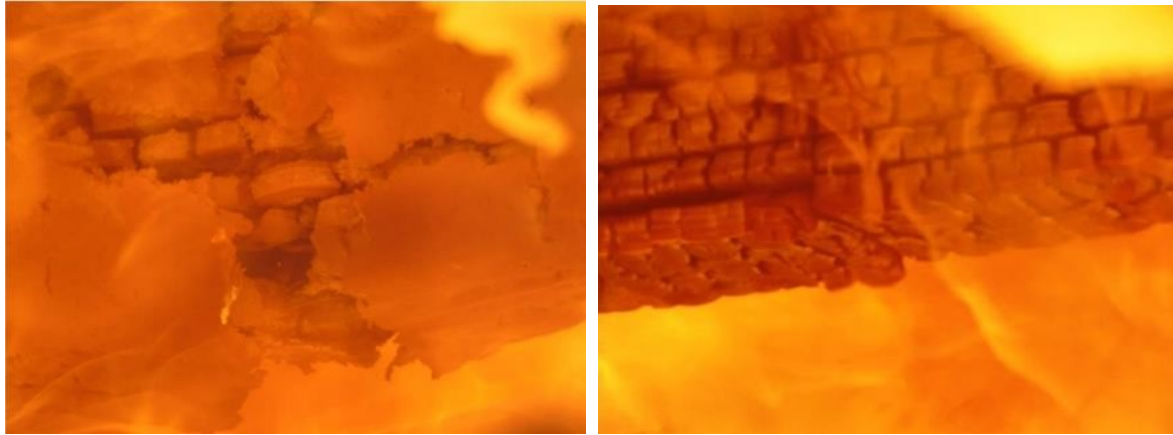


Figure 4.33 Failure due to the delamination and finger joint failure

When it comes to the specimen with stone wool insulation inside the cavities, there was a positive effect on fire resistance, since there was no air in the cavities, but there was a two-dimensional heat flux, resulting in higher temperatures near rockwool. Intumescent paint allowed a great improvement in the behavior and fire resistance of glue-laminated timber elements.

4.4 Evaluation of charring depth using FEM - implementation of the newly developed numerical modeling approach

In the doctoral thesis, an innovative way of simulating the charring of timber has been developed, in such a way that when a temperature of 300 °C occurs in the timber, the finite elements disappear. In this way, the behavior of timber is simulated according to EN1995-1-2 [8], according to which timber no longer has a load-bearing capacity, i.e. the values of the mechanical characteristics (strength) is approaching zero at a temperature of 300°C. A new programming code was developed in APDL (Ansys Parametric Design Language), which enables the specified simulation and "killing" of elements according to a designed scripture. The new simulation method brings the advantages of evaluating the temperature at certain points of the finite element mesh, and in the subsequent structural analysis only the actual remaining cross-section, which can further transfer the load, is taken into account. The validation of this complex simulation was made on tested timber specimens, for one-dimensional and multi-dimensional charring processes. The results showed a very good correlation.

3.4 Small-scale tests with adhesive bonds with GLT, and finger joints

Fire safety is important, but the adhesive properties in fire conditions are not fully understood. This applies in particular to new adhesive systems but also to existing ones that exhibit poor load-carrying capacity in a fire. Cone heater tests with finger-jointed specimens and face-bonded specimens were made with 4 selected adhesives and two types of wood. A total of forty-eight specimens were tested in fire. Based on the results, the influence of elevated temperatures of different types of adhesive was determined.

3.5 Fire performance of bearing wall made of hollow GL timber elements

The last experimental research referred to the assembly of individual innovative hollow timber elements, i.e. the load-bearing wall. The dimensions of the bearing wall are $2980 \times 2985 \times 120$ mm (width \times height \times thickness). The sample of the load-bearing wall made of hollow glue-laminated timber elements consists of a total of 14 interconnected elements and was protected by gypsum fibreboard panels. The test was carried out in accordance with the standards HRN EN 1363-1:2020. The fire resistance of the bearing hollow GLT wall was determined REI 90.

CONCLUSIONS

Based on the experimental research of the second series of (improved) specimens, it can be concluded that the load-bearing capacity of the improved specimens was increased by an average of 50 % compared to the initial specimens. Hollow GL softwood timber elements, with a cross-sectional perforation of 28 %, reached 69.65 % of the full cross-section GLT element's load-bearing capacity. Hollow GLT elements made of hardwood reached an average of 72.63 % of the load-bearing capacity of the full cross-section GLT elements (see Figure 3.44a). This confirms the second hypothesis (H2).

The CSPG of softwood hollow GLT elements loaded in the direction of the stronger axis, decreases by an average of 55 %, and for hardwood by an average of 50 % in comparison to the standard GLT elements. The percentage of perforation is proportional to CSPG, regardless of the type of wood. Furthermore, perforation does not affect the load transfer with respect to the boundary conditions and load position, i.e. the factors $k_{c,90}$ are approximately similar for hollow and solid cross-sections. In the numerical parametric analysis, it was shown how the layout of the cavities affects the stress distribution.

An experimental and numerical study of the influence of cavities on the fire performance of hollow GLT elements has been carried out. The influence of different fire protection systems on the fire resistance of solid and hollow GLT elements was considered. The type of adhesive

(K.501 and K.510) has no significant influence on the fire resistance of GLT. The fire resistance of unprotected hollow GLT elements (perforation 25 %) exposed to fire on one side is on average 23 % lower compared to solid GLT elements. This confirms the first part of the third hypothesis (H3). Stone wool placed in the cavities of the samples has a positive effect on the fire resistance of hollow GLT elements, and it was increased by an average of 27 % compared to unprotected hollow GLT elements. In the case of the first solid lamella (instead of a perforated lamella), the failure time increased by an average of 20 % compared to the hollow specimens. Applying intumescent paint to solid and hollow specimens increases the fire resistance by 52 % (33 minutes) in the case of solid GLT specimens, or 67 % (33 minutes) in the case of hollow GLT elements. This confirms the second part of the third hypothesis (H3).

Numerical simulations can provide more detailed insight into the behavior of hollow GLT elements in a fire. Thermo-mechanical analysis was performed in the ANSYS software package, where the simulations confirmed the experimental results. An innovative approach to the evaluation of the char depth using FEM was developed.

Tension tests of finger joints under the cone heater and at ambient temperatures differ in terms of the type of stress that is impacting the specimen. For specimens tested under the cone heater, additional bending happens when the height of the cross-section decreases.

The face bond tests under the cone heater showed the difference between different adhesive groups. Some of the adhesives tend to be less effective in the fire than others due to the softening of the adhesive at higher temperatures, causing the specimen to fail earlier and/or lower strength. Both small-scale methods showed a good correlation with each other.

The allowable increase in the average temperature (140 K) on the non-exposed side of the specimen was not exceeded until the 91st minute of the test, while the allowable increase in the maximum temperature on the exposed side (180 K) was exceeded on the 90th minute of the test at measuring point T9. The integrity failure occurred in the 90th minute of the test.

Then, the load-bearing capacity failure of the specimen occurred in the 90th minute of the test – vertical deflection $C > 29.85$ mm and vertical deflection rate $dC/dt > 8.95$ mm/min. The required load of 36 kN was maintained until the 88th minute when it was no longer possible to maintain it due to the increase in the horizontal and vertical deflection. The calculation model given in EN 1995-1-2 [1] did not match the results of the fire test. The expression for calculating the failure time of fire protection panels given in the regulations is conservative.

Keywords: timber, glue-laminated, fire, innovation, hollow, FEM

| | |
|--|-------|
| IZJAVA O IZVORNOSTI | I |
| INFORMACIJE O MENTORU | II |
| ZAHVALA | IV |
| SAŽETAK | VI |
| EXTENDED ABSTRACT | VII |
| SADRŽAJ | XVIII |
| LISTA SIMBOLA | XXIII |
| IZRAZI I DEFINICIJE | XXIX |
| | |
| Poglavlje 1. UVOD | 1 |
| 1.1 Motivacija za istraživanje | 1 |
| 1.2 Organizacija doktorske disertacije..... | 6 |
| | |
| Poglavlje 2. PREGLED STANJA PODRUČJA | 7 |
| 2.1 Dostupni sustavi montažne drvene gradnje | 7 |
| 2.1.1 Luxhome | 7 |
| 2.1.2 Ecocell | 10 |
| 2.1.3 Fabric workshop | 15 |
| 2.1.4 Brikawood | 17 |
| 2.1.5 Gablock | 19 |
| 2.1.6 Steko | 22 |
| 2.2 Požarna otpornost drvenih konstrukcija | 26 |
| 2.2.1 Uvod | 26 |
| 2.2.2 Osnovni pojmovi | 28 |
| 2.3 Ponašanje drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima | 31 |
| 2.3.1 Uvod | 31 |
| 2.3.2 Istraživanje pougljenja i nosivosti CLT elementa u požaru..... | 33 |
| 2.3.3 Istraživanje samogašenja CLT-a | 36 |
| 2.3.4 Istraživanje utjecaja različitih vrsta ljepila na delaminaciju | 41 |
| 2.3.5 Požarni odjeljci većih dimenzija otvorenog tipa | 43 |
| 2.4 Zaštita drvenih konstrukcija u požaru | 45 |
| 2.5 Metoda konačnih elemenata (MKE) u drvenim konstrukcijama | 51 |

| | |
|--|-----|
| Poglavlje 3. AMBIJENTNI UVJETI - INOVATIVNI PROŠUPLJENI LIJEPLJENO LAMELIRANI DRVENI ELEMENTI | 58 |
| 3.1 Uvod | 58 |
| 3.2 Preliminarno eksperimentalno istraživanje inicijalnih uzoraka..... | 60 |
| 3.2.1 Ispitivanje savijanjem oko jače osi | 61 |
| 3.2.2 Ispitivanje savijanjem oko slabije osi | 68 |
| 3.2.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru slabije osi 73 | |
| 3.2.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru jače osi | 78 |
| 3.2.5 Diskusija i zaključak | 82 |
| 3.3 Eksperimentalno istraživanje punih i prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata – druga serija uzoraka | 83 |
| 3.3.1 Određivanje osnovnih materijalnih karakteristika | 83 |
| 3.3.2 Ispitivanje savijanjem | 88 |
| 3.3.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca | 102 |
| 3.3.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima | 121 |
| 3.3.5 Posmična čvrstoća površine lijepljenja | 124 |
| 3.4 Teoretsko istraživanje inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata prema EC5 [1] | 133 |
| 3.4.1 Naprezanja uzrokovana savijanjem | 133 |
| 3.4.2 Naprezanja uzrokovana poprečnom silom | 143 |
| 3.4.3 Naprezanja uzrokovana tlakom okomito na vlakanca | 146 |
| 3.5 Metoda konačnih elemenata (MKE) – ambijentni uvjeti | 148 |
| 3.5.1 Uvod | 148 |
| 3.5.2 Abaqus | 148 |
| 3.5.3 Ansys | 149 |
| 3.6 Numerički model nosača opterećenog na savijanje u ANSYS-u | 151 |
| 3.6.1 Definiranje materijala | 151 |
| 3.6.2 Geometrija | 152 |
| 3.6.3 Model | 154 |
| 3.6.4 Rubni uvjeti | 156 |
| 3.6.5 Rezultati | 159 |

| | | |
|---|--|-----|
| 3.7 | Numerički model uzorka opterećenog na tlak okomito na vlakanca..... | 164 |
| 3.7.1 | Geometrija i rubni uvjeti | 164 |
| 3.7.2 | Rezultati | 166 |
| 3.8 | Usporedba rezultata ispitivanja, numeričkog proračuna i MKE | 168 |
| 3.8.1 | Savijanje uzoraka oko jače i oko slabije osi | 168 |
| 3.8.2 | Progib | 170 |
| Poglavlje 4. POŽARNI UVJETI - INOVATIVNI PROŠUPLJENI LIJEPLJENO LAMELIRANI DRVENI ELEMENTI | | |
| 4.1 | Uvod | 171 |
| 4.1.1 | Proračun drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima | 171 |
| 4.1.2 | Odvajanje lamela i delaminacija | 176 |
| 4.1.3 | Ciljevi istraživanja | 179 |
| 4.2 | Eksperimentalno istraživanje u požarnim uvjetima – ispitivanje uzoraka izloženih požaru s jedne strane | 180 |
| 4.2.1 | Uvod i priprema uzoraka | 180 |
| 4.2.2 | Rezultati ispitivanja uzoraka izloženih požaru s jedne strane | 186 |
| 4.2.3 | Numeričko modeliranje uzoraka izloženih požaru s jedne strane | 212 |
| 4.3 | Eksperimentalno istraživanje u požarnim uvjetima – ispitivanje drvenih greda izloženih požaru s tri strane | 230 |
| 4.3.1 | Uvod i priprema uzoraka | 230 |
| 4.3.2 | Rezultati ispitivanja uzoraka izloženih požaru s tri strane..... | 238 |
| 4.3.3 | Numeričko modeliranje uzroka izloženih požaru s tri strane | 264 |
| 4.4 | Evaluacija pougljenog sloja pomoću MKE – implementacija novo-razvijenog pristupa numeričkom modeliranju | 266 |
| 4.4.1 | Uvod | 266 |
| 4.4.2 | Termalna analiza – uzorci izloženi požaru s jedne strane..... | 267 |
| 4.4.3 | Termalna analiza – uzorci izloženi požaru s tri strane | 271 |
| 4.4.4 | Termo-mehanička simultana numerička analiza | 273 |
| 4.5 | Ispitivanje spojeva ljepilo-drvo kod lijepljenih lameliranih elemenata... .. | 277 |
| 4.5.1 | Uvod | 277 |
| 4.5.2 | Zupčasti spoj | 277 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| 4.5.3 | Ispitivanje lijepljene površine između lamela..... | 287 |
| 4.6 | Eksperimentalno istraživanje u požarnim uvjetima – ispitivanje nosivog zida od inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata | 293 |
| 4.6.1 | Priprema uzorka | 293 |
| 4.6.2 | Postupak ispitivanja | 295 |
| 4.6.3 | Opažanja tijekom požarnog ispitivanja | 302 |
| 4.6.4 | Rezultati ispitivanja | 303 |
| 4.6.5 | Diskusija i zaključak | 310 |
| Poglavlje 5. | DISKUSIJA I DOPRINOS ISTRAŽIVANJA | 313 |
| 5.1 | Ambijentni uvjeti | 313 |
| 5.1.1 | Preliminarno istraživanje inicijalnih uzoraka | 313 |
| 5.1.2 | Druga serija uzoraka – eksperimentalno istraživanje | 315 |
| 5.1.3 | Teoretsko istraživanje inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata prema EC5 | 318 |
| 5.1.4 | Metoda konačnih elemenata (MKE) | 320 |
| 5.2 | Požarni uvjeti | 323 |
| 5.2.1 | Uzorci izloženi požaru s jedne strane | 323 |
| 5.2.2 | Uzorci izloženi požaru s tri strane | 325 |
| 5.2.3 | Pojednostavljeni model proračuna dubine pougljenog sloja | 327 |
| 5.2.4 | Metoda konačnih elemenata (MKE) | 329 |
| 5.2.5 | Ispitivanje spojeva ljepilo-drvo kod lijepljenih lameliranih elemenata | 332 |
| 5.2.6 | Ispitivanje nosivog zida od inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata | 334 |
| 5.3 | Doprinos istraživanja | 335 |
| Poglavlje 6. | ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJE ISTRAŽIVANJE | 336 |
| 6.1 | Ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim uvjetima | 336 |
| 6.2 | Ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u požarnim uvjetima | 339 |
| 6.3 | Preporuke za daljnja istraživanja | 344 |

| | |
|------------------------|-----|
| LITERATURA | 346 |
| ŽIVOTOPIS AUTORA | 362 |

| | |
|--------------|--|
| A | površina poprečnog presjeka |
| $A1, A2$ | negorivi materijal |
| A_d | proračunska vrijednost neizravnih učinaka toplinskog djelovanja |
| A_i | površina poprečnog presjeka pojedinog dijela |
| a | udaljenost između položaja opterećenja i najbližeg oslonca u ispitivanju savijanjem |
| a_i | udaljenost težišta pojedinog dijela od težišta cijelog poprečnog presjeka |
| b | širina poprečnog presjeka |
| c | specifični toplinski kapacitet |
| D_1 | progib u sredini grede kod požarnog ispitivanja |
| d | promjer spojnog sredstva |
| d_0 | debljina nultog sloja čvrstoće |
| $d_{char,0}$ | dubina pougljenja za uzorak izložen požaru s jedne strane |
| $d_{char,n}$ | nominalna dubina pougljenja |
| d_{ef} | efektivna dubina pougljenja |
| $E_{c,0}$ | modul elastičnosti paralelno s vlakancima |
| $E_{c,90}$ | modul elastičnosti okomito na vlakanca |
| $E_{m,g}$ | globalni modul elastičnosti u savijanju |
| $E_{t,0}$ | modul elastičnosti u vlaku paralelno s vlakancima |
| $E_{t,90}$ | modul elastičnosti u vlaku okomito na vlakanca |
| $E_{0,05}$ | 5-percentilni modul elastičnosti |
| E_d | proračunska vrijednost odgovarajuće sile ili momenta za proračun uz uobičajenu temperaturu za osnovnu kombinaciju djelovanja |
| $E_{d,fi}$ | proračunski učinak djelovanja u požarnoj situaciji |
| E_{mean} | srednja vrijednost modula elastičnosti |
| E_i | modul elastičnosti pojedinog dijela |
| F_d | proračunska sila |
| F | sila |
| $F_{M,Ed}$ | proračunska sila od projektnog momenta savijanja |
| F_c | tlačna sila |

| | |
|--------------------|--|
| $F_{c,90}$ | tlačna sila okomito na vlakanca |
| $F_{c,90,max}$ | maksimalna tlačna sila okomito na vlakanca |
| $F_{c,90,max,est}$ | procijenjena sila okomito na vlakanca |
| F_{max} | maksimalna sila |
| $F_{max,est}$ | procijenjena maksimalna sila |
| $F_{t,90}$ | vlačna sila okomito na vlakanca |
| G | modul posmika |
| $G_{k,j}$ | karakteristična vrijednost stalnog djelovanja |
| G_{mean} | srednja vrijednost modula posmika |
| S | statički moment površine |
| $f_{c,0}$ | tlačna čvrstoća paralelno s vlakancima |
| $f_{c,90}$ | tlačna čvrstoća okomito na vlakanca |
| f_m | čvrstoća na savijanje |
| \bar{f}_m | srednja vrijednost čvrstoće na savijanje |
| f_k | karakteristična čvrstoća |
| $f_{t,0}$ | vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima |
| $f_{t,90}$ | vlačna čvrstoća okomito na vlakanca |
| $f_{v,k}$ | posmična čvrstoća, karakteristična vrijednost |
| f_v | posmična čvrstoća |
| h | visina poprečnog presjeka u ispitivanju savijanjem, ili veća dimenzija poprečnog presjeka, ili visina uzorka kod ispitivanja okomito na vlakanca i posmika |
| h_i | dimenzija presjeka pojedinog dijela, okomita na os za koju se računa naprezanje |
| I | moment tromosti presjeka |
| I_i | moment tromosti pojedinog dijela |
| $I_{y,ef}$ | efektivni moment tromosti poprečnog presjeka uzorka |
| K, k | koeficijenti ili koeficijent toplinske vodljivosti |
| k_ρ | koeficijent gustoće |
| k_0 | koeficijent |
| k_2 | koeficijent zaštite za fazu 2 |
| k_3 | koeficijent (post-protection) za fazu 3 |

| | |
|-----------------|--|
| k_4 | koeficijent konsolidacije za fazu 4 |
| k_{fi} | koeficijent modifikacije za čvrstoću ili krutost u požarnoj situaciji |
| k_h | koeficijent debljine panela |
| k_{mod} | koeficijent modifikacije |
| $k_{mod,E,fi}$ | koeficijent modifikacije za modul elastičnosti u požarnoj situaciji |
| $k_{mod,fi}$ | koeficijent modifikacije u požarnoj situaciji |
| $k_{mod,fm,fi}$ | koeficijent modifikacije savojne čvrstoće u požarnoj situaciji |
| k_n | koeficijent pretvorbe |
| k_Θ | temperaturno ovisan koeficijent redukcije za lokalnu čvrstoću i krutost |
| l | raspon kod ispitivanja savijanjem, ili duljina uzorka pri ispitivanju tlačne ili vlačne čvrstoće |
| l_{ef} | efektivna duljina |
| l_g | širina presjeka u ravnini za koju se računa posmično naprezanje |
| l_p | raspon panela |
| l_1 | duljina mjernog instrumenta za određivanje modula elastičnosti ili modula smicanja |
| m | masa |
| $m_{u,fi}$ | razina opterećenja za požarno ispitivanje |
| N | uzdužna sila |
| P | reprezentativna vrijednost sile prednapinjanja |
| p | opseg poprečnog presjeka izloženog požaru |
| $R_{d,t,fi}$ | odgovarajuća proračunska otpornost u požarnoj situaciji |
| S_y | statički moment površine dijela uzorka iznad ravnine za koju se računa posmično naprezanje |
| s_y | standardna devijacija |
| $Q_{k,1}$ | karakteristična vrijednost vodećeg promjenjivog djelovanja |
| $Q_{k,1}$ | karakteristična vrijednost pratećih promjenjivih djelovanja |
| V | volumen |
| V_S | posmična sila |
| t | vrijeme izloženosti požaru |
| t_a | vrijeme konsolidacije |

| | |
|-------------------|---|
| t_{ch} | početak pougljenja zaštićenih elemenata od požara (odgoda početka pougljenja zbog protupožarne zaštite) |
| $t_{d,5}$ | vrijeme požarne otpornosti nezaštićenih elemenata |
| t_f | vrijeme otkazivanja protupožarne zaštite |
| t_{fi} | vrijeme požarne otpornosti |
| t_{ins} | vrijeme povećanja temperature na neizloženoj strani elementa |
| $t_{p,min}$ | minimalna debljina panela |
| t_R | vrijeme požarne otpornosti vezano za nosivost |
| t_{req} | potrebno vrijeme požarne otpornosti |
| t_0 | vremenski period konstantne brzine pougljenja |
| t_1 | vrijeme početka faze 1 |
| t_2 | vrijeme početka faze 2 |
| t_3 | vrijeme početka faze 3 |
| u_x | pomak u x smjeru |
| u_y | pomak u y smjeru |
| u_z | pomak u z smjeru |
| ρ_k | karakteristična gustoća |
| ρ_m | srednja vrijednost gustoće |
| $\sigma_{c,0,d}$ | proračunska naprezanje paralelno s vlakancima |
| $\sigma_{m,y,d}$ | projektno naprezanje od savijanja oko y osi |
| $\sigma_{m,z,d}$ | projektno naprezanje od savijanja oko z osi |
| $\sigma_{t,0,d}$ | projektno vlačno naprezanje paralelno s vlakancima |
| $\sigma_{t,90,d}$ | projektno vlačno naprezanje okomito na vlakanca |
| σ_N | naprezanje od uzdužne sile |
| τ_d | proračunska posmična čvrstoća |
| W | moment otpora |
| β_0 | osnovna brzina pougljenja |
| β_n | nominalna brzina pougljenja |
| $\beta_{n,Faza2}$ | nominalna brzina pougljenja za fazu 2 |
| $\beta_{n,Faza3}$ | nominalna brzina pougljenja za fazu 3 |
| γ_M | parcijalni koeficijent za materijal |
| $\gamma_{M,fi}$ | parcijalni koeficijent za drvo u požaru |

| | |
|----------------|--|
| $\gamma_{Q,1}$ | parcijalni koeficijent za vodeće promjenjivo opterećenje |
| γ_i | koeficijent klizanja |
| λ | toplinska vodljivost |
| w | deformacija ili progib |
| ω | sadržaj vlage |
| φ | rotacija |
| χ, η | koeficijenti oblika |
| Θ | temperatura |
| $\psi_{1,1}$ | koeficijent kombinacije za karakterističnu kombinaciju za promjenjivo opterećenje |
| $\psi_{2,1}$ | koeficijent kombinacije za nazovi-stalnu kombinaciju za promjenjivo opterećenje |
| ψ_{fi} | koeficijent kombinacije za karakterističnu kombinaciju za promjenjivo opterećenje u požarnoj situaciji |

Akronimi

| | |
|-------------|---|
| <i>APDL</i> | ansys parametric design language |
| <i>CLT</i> | cross laminated timber |
| <i>CSPG</i> | compression strength perpendicular to grain |
| <i>DWD</i> | ploča od drvenih vlakana |
| <i>EC</i> | eurocode |
| <i>EPI</i> | emulsion polymer isocyanate |
| <i>ESP</i> | ploča od iverice |
| <i>EWP</i> | engineered wood products |
| <i>FEM</i> | finite element modeling |
| <i>GL</i> | glue-laminated |
| <i>HD</i> | horizontalna deformacija |
| <i>HRR</i> | heat release rate |
| <i>LVDT</i> | linear variable differential transformer |
| <i>LVL</i> | laminated veneer lumber |
| <i>MD</i> | meko drvo |
| <i>ME</i> | meko (drvo) elipsa |
| <i>MF</i> | melamine formaldehyde |

| | |
|------------|--------------------------------|
| <i>MKE</i> | metoda konačnih elemenata |
| <i>MP</i> | meko (drvo) puno |
| <i>OSB</i> | oriented strand bord |
| <i>PRF</i> | phenol–resorcinol–formaldehyde |
| <i>PU</i> | poliuretansko (ljepilo) |
| <i>RH</i> | relative humidity |
| <i>SIP</i> | structural insulated panels |
| <i>TCC</i> | timber concrete composite |
| <i>TD</i> | tvrd drvo |
| <i>TE</i> | tvrd (drvo) elipsa |
| <i>TP</i> | tvrd (drvo) puno |
| <i>VD</i> | vertikalna deformacija |
| <i>VOU</i> | vrijeme otkazivanja uzorka |

Otpornost na požar

Sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara.

Požarno opterećenje

Količina toplinske energije koja se može razviti u nekom prostoru, nastaje sagorijevanjem sadržaja građevine (pokretno opterećenje) i dijelova konstrukcije i elemenata građevine (stalno opterećenje), a razlikuje se ukupno požarno opterećenje (MJ) i specifično požarno opterećenje (MJ/m²)

Požarni odjeljak

Dio građevine koji je odijeljen od ostalih dijelova građevine pregradnom konstrukcijom i elementima određene otpornosti na požar.

Integritet linije ljepila u požaru

Sposobnost linije ljepila da osigura prijanjanje između slojeva u požarnoj situaciji.

Linije pougljenja

Granica između sloja pougljenog sloja i preostalog poprečnog presjeka, za koju se pretpostavlja da je jednaka položaju izoterme od 300 °C.

Dubina pougljenog sloja

Udaljenost od inicijalne površine drvenog elementa do linije pougljenja.

Faza pougljenja

Početna nezaštićena, zaštićena, post-zaštićena ili konsolidirana faza u okviru europskog modela pougljenja, definirana kao vremensko razdoblje.

Efektivni poprečni presjek

Poprečni presjek izvornog drvenog elementa reduciran za dubinu pougljenja i nulti sloj čvrstoće.

Nominalna dubina pougljenja

Dubina pougljenja uzimajući u obzir nominalne projektirane brzine pougljenja za sve relevantne faze pougljenja.

Nominalna brzina pougljenja

Brzina pougljenja unutar jedne faze pougljenja uzimajući u obzir učinke dimenzija, pukotina, spojeva itd. prema europskom modelu pougljenja.

Preostali poprečni presjek

Poprečni presjek inicijalnog drvenog elementa reduciran dubinom pougljenja na požaru izloženoj strani.

Početak pougljenja

Vrijeme početka izlaganja požaru za početno nezaštićene strane drvenih elemenata, odnosno vrijeme kada površinska temperatura za početno zaštićene strane drvenih elemenata dosegne 300 °C.

Nulti sloj čvrstoće

Dimenzija reduciranog poprečnog presjeka uzimajući u obzir smanjenje krutosti ili čvrstoće drvenog elementa kada je izložen požaru.

1.1 Motivacija za istraživanje

Zbog sve veće potrebe za očuvanjem našeg planeta i smanjenjem emisije ugljikova dioksida prilikom izgradnje, sve se više razmišlja o gradnji konstrukcija od jedinog materijala koji apsorbira ugljikov dioksid, a to je drvo. Osim potrebe za smanjenjem emisije štetnih plinova, teži se što kraćem vremenu građenja pa se poseže za uporabom predgotovljenih elemenata. Upravo je drvo materijal koji idealno odgovara kombinaciji ovih dviju, prethodno navedenih, potreba. Energetski je učinkovit, prirodan materijal, pogodan za izradu elemenata kojima se značajno pojednostavljuje gradnja i skraćuje njezino trajanje.

U ovom radu iskazane su prednosti drva kao materijala i mogućnosti modularne gradnje kuća drvenim elementima, odnosno, prikazano je koliko drvo kao materijal može olakšati gradnju, smanjiti troškove izvođenja, ali i troškove života, odnosno poboljšati kvalitetu boravka unutar drvenih konstrukcija zbog izuzetnih svojstava i mogućnosti gradnje pasivnih kuća. Glavni je cilj ovoga rada usporediti rezultate ispitivanja inovativnog sustava prošupljenih drvenih elemenata, razvijenog u Hrvatskoj, s općepoznatim lijepljeno lameliranim drvenim elementima te propisanim načinom proračuna [1] i numeričnom analizom (MKE), te u konačnici izvesti potrebne zaključke o primjenjivosti takvog sustava u praksi.

Tijekom posljednjeg desetljeća, projektiranje i izgradnja građevina od masovne drvene građe korištenjem križno lameliranog drva (CLT) i lijepljenog lameliranog drva (GLT) značajno su se povećali na globalnoj razini. Vodeći razlozi prednosti su drvene gradnje s niskim udjelom ugljika u globalnoj borbi protiv klimatskih promjena i globalnog zatopljenja [2]. Skladištenje ugljika u šumi događa se kroz nakupljanje biomase u drveću tijekom fotosinteze. Na kraju ciklusa drvo ispušta pohranjeni ugljik u atmosferu raspadanjem ili izgaranjem. Koristeći drvo pri izgradnji konstrukcija (i recikliranjem u namještaj, ploče ili ostalo, nakon što se zgrada sruši) može se maksimizirati učinak pohrane ugljika [3]. Količina ispuštenog ugljikova dioksida smanjila bi se za 25 % kada bi se u Europi gradilo samo 10 % drvenih kuća [4]. Da bi ugljik bio uskladišten, drvo se mora održavati i te se mora spriječiti izgaranje drva. Truljenje i požari sve su češći i glavna su posljedica globalnog zatopljenja pa je vidljiva važnost drveta u očuvanju našeg planeta [5]. Nadalje, gradnja drvom zadovoljava arhitektonske težnje, i u konačnici može rezultirati smanjenim troškovima i većom brzinom gradnje, u usporedbi s standardnim, uobičajeno nezapaljivim materijalima i oblicima gradnje. Kako bi se drvo razumno primjenjivalo u graditeljstvu bitno je razumijevanje ponašanja drva u požaru, a ono se zasniva na poznavanju fenomena požara, svojstava i prirodne otpornosti drva na požar,

poznavanju mehanizma sagorijevanja, kemijskih i fizičkih procesa pri požaru i povoljnom učinku aktivnih i pasivnih mjera zaštite od požara.

Posljedice požara ovise o materijalu od kojega je građevina izgrađena i o njenoj namjeni. Manje će posljedice biti ako požar zahvati negorivi materijal u odnosu na gorivi. Razlog znatnih posljedica prilikom požara su dva glavna produkta djelovanja požara; visoke temperature i velike količine dima. Visoke temperature utjecat će na samu konstrukciju tj. na njezinu nosivost i sigurnost, dok će dim utjecati na ljude smanjujući im vidljivost pronalaska izlaza i otežavajući im disanje. Za građevinu se može reći da je otporna na požar ako je sposobna kroz određeno vrijeme ispunjavati zahtijevanu nosivost (R) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara. Nadalje, svaki materijal/proizvod doprinosi razvoju požara uslijed vlastite razgradnje do koje dolazi izgaranjem tog materijala određenim ispitnim uvjetima (reakcija na požar). Za negorive materijale glavni su parametri: gubitak mase i porast temperature, dok su glavni parametri zapaljivih materijala: lakoća paljenja, širenje plamena, ispuštanje, dim i brzina otpuštanja topline. Drvo kao materijal i paneli na osnovi drva svrstavaju se u kategoriju D [6]. Ukoliko je drvo zaštićeno premazima koji usporavaju širenje požara, može biti svrstano u klasu B, no ne može se postići klasifikacija drvenog elementa kao negorivog, odnosno klase A1 ili A2. Reakcija na požar građevnog proizvoda može se u unutarnjem prostoru građevine smanjiti za jedan stupanj u slučaju kada će u građevini biti ugrađen sustav za automatsko gašenje požara [7].

Postojeće metode projektiranja zaštite od požara uglavnom se temelje na dinamici požara u požarnim odjeljcima. Ipak, drvo izloženo požaru mijenja dinamiku požara. Razumijevanje dinamike požara u požarnom odjeljku je neophodno kako bi se omogućilo projektiranje konstrukcijskih drvenih elemenata u požaru. U odjeljku s direktno izloženom drvenom građom, povećana je brzina otpuštanja topline (HRR).

Prilikom projektiranja drvenih konstrukcija u požaru, EN1995-1-2:2004 [8] daje osnovne smjernice i metode proračuna (reduciranog poprečnog presjeka i reducirane čvrstoće i krutosti), koji su utemeljene ispitivanjem koristeći standardnu požarnu krivulju. Požarna otpornost GLT greda obično se određuje prema danim metodama proračuna ili eksperimentalnim ispitivanjem. Evaluacija rezultata ispitivanja popraćena je nesigurnošću u pogledu svojstava materijala, koje je, međutim, neophodno znati da bi se rezultati ispitivanja mogli usporediti s metodom reduciranog presjeka prema EN 1995-1-2 [8]. Schmidt [9] je u svojim ispitivanjima pokazao ograničenja ovih metoda. Prvenstveno se to odnosi na vrijeme početka pougljenja, brzinu sagorijevanja i sloj nulte čvrstoće/krutosti. Razlika dubine pougljenja dobivenih modelom i požarnim ispitivanjem povećava se s povećanjem vremena

izloženosti požaru. EN 1995-1-2 [8] propisuje dubinu sloja nulte čvrstoće od 7 milimetara za GLT grede. Osnovne informacije i ograničenja u određivanju sloja nulte čvrstoće dobro su saželi Schmid i sur. [10,11]

Kamenicka i sur. ukazuju na razlike između pojednostavljenih i naprednih metoda te daju usporedbu rezultata [12]. Pogodno je koristiti modeliranje u MKE-programskim paketima gdje je moguće uzeti u obzir promjenu toplinskih i mehaničkih svojstava materijala s porastom temperature u vremenu. U slučaju analitičkih metoda potrebno je primijeniti parametre koji ovise o vremenu izloženosti požaru [13,14]. Prema najnovijim studijama, brzina sagorijevanja drva u prirodnom požaru može biti veća u odnosu na onu pri standardnoj požarnoj krivulji. Zbog svega navedenog, trenutno je u izradi novi Eurocode 5 (EN 1995-1-2:2025) [15] koji se odnosi na proračun drvenih konstrukcija u požaru. Glavni dodaci i poboljšanja odnose se na pravila dimenzioniranja CLT elemenata, kompozitnih sustava drvo-beton, drvenih okvirnih sustava, spojeva i detalja uključujući ljepila, zaštitu i konačno simplifikaciju i harmonizaciju metoda proračuna.

S obzirom na sve navedeno, opcije su ispitati drvene elemente prema europskim standardima ili projektirati koristeći nedavno razvijene metode proračuna. Ostman i suradnici [6] istražili su stanje područja vezano za dimenzioniranje CLT-a na požar u Europi.

Uvidom u trenutno stanje područja koje se bavi problematikom ponašanja GLT i CLT elementa u požaru, može se zaključiti da se ponašanje ovih elemenata prilikom sagorijevanja može uvelike razlikovati od ponašanja piljenje drvene građe [14]. Razlog leži u slojevitoj lijepljenoj strukturi i spojevima između lamela što može dovesti do lokalnog povećanja pougljenja [16]. Fragicomo i sur. [17] pokazali su da na sagorijevanje CLT ploče ne utječe orijentacija slojeva. Nadalje, utvrđeno je kako se javlja efekt delaminacije kod CLT elemenata. Delaminacija označava odvajanje jedne ili više lamela zbog otkazivanja ljepila dodirnoj plohi između ljepila i lijepljenog elementa. Utjecajem vrste ljepila na delaminaciju bavio se Menis [18], Friquin i sur. [19], Klippel i sur. [20]. Ako su lamele CLT ploče lijepljene PUR ljepilom, otpadanje pougljenje lamele događa se prilično često. Frangi i sur. ističu da na ovu pojavu [21] utječe položaj panela (vertikalni ili horizontalni), debljina pojedinih slojeva i svojstva ljepila pri povišenim temperaturama. Do delaminacije uobičajeno dolazi kada na spoju dviju lamela bude dosegnuta temperatura od 300 °C, koja odgovara temperaturi pougljenja, međutim, dugo vrijeme predgrijavanja može prouzročiti rizik otkazivanja na liniji ljepila, što bi moglo dovesti do kolapsa prije nego što započne pougljivanje [22]. Ovdje se krije razlog, nakon početka prirodnog gašenja požara, može ponovno doći do njegovog ponovnog intenziviranja [23]. Kako požar nastavlja trajati sve dok gorivi materijal postoji, a drvo gori, ne može se sa sigurnošću

reći hoće li sav materijal izgorjeti. Ispitivanjima je utvrđeno kako na vrhuncu stope gubitka mase plamtenje doprinosi čak 60 % ukupnom gubitku mase, dok oksidacija ugljena doprinosi između 9 % i 12 % [24]. Provedena su dva niza eksperimenata kako bi se istražio model samogašenja i kvantificirali uvjeti pod kojima se ono može dogoditi [25]. U istom ispitivanju pokazano je kako se delaminacija može izbjeći izvođenjem deblje prve lamele, no istražena je i druga mogućnost. Naime, korištenjem odgovarajuće vrste ljepila prilikom proizvodnje CLT elemenata, tj. tijekom lijepljenja slojeva lamela, može se spriječiti proces delaminacije, čime bi se izbjeglo ponovno intenziviranje požara, a ostvarila bi se mogućnost samogašenja.

Paralelno sa eksperimentalnim ispitivanjem, razvijaju se i napredne metode proračuna. Thi i sur. [26] izradili su numerički model za prijenos topline u drvenim konstrukcijama gdje su analizirali tri načina prijenosa topline koja se događaju u požaru: provođenje, konvekcija i zračenje. Nadalje, Okoni i sur. [27] su numeričkom analizom pokazali da s ispravno unesenim svojstvima materijala, termalno - mehaničko ponašanje drvenih konstrukcija može se analizirati pomoću ANSYS programskog paketa, bez potrebe za izvođenjem eksperimentalnih ispitivanja u većem ili manjem mjerilu. Naime, u ANSYS programskom paketu, moguće je simultano provoditi termalno-mehaničku analizu [28] i tako predvidjeti ponašanje drvenih elemenata u požaru.

Uvidom u stanje područja jasno je da postoji i nedostatak ispitivanja vezanih za zaštitu drvenih konstrukcija u požaru, bilo da se radi o uporabi odgovarajućih sredstava za impregnaciju ili površinsku zaštitu drva ili o primjena materijala i elemenata za oblaganje i izoliranje drva od utjecaja požara. Ručni ili automatski uređaji za gašenje požara koriste se za suzbijanje požara u prostorijama u početnim fazama [29]. U posljednje vrijeme sve češće se koriste protupožarne ploče ili drvene obloge koje formiraju zaštitne membrane. Najčešće se koriste ploče na bazi cementno-silikatnih veziva, vermikulitne ploče na bazi tekućeg stakla, negorive ploče od bazaltnih vlakana i ploče kamene vune [29]. U posljednje vrijeme razvija se zaštita raznim sredstvima i materijalima za zaštitu od požara. U literaturi je dan je pregled elemenata na čijoj su bazi napravljeni do sada korišteni usporivači požara te su dane njihove glavne karakteristike [29].

Niti u jednom od prikazanih radova nisu ispitivane prošupljeni lijepljenih lamelirani drvenih elementa. Uz adekvatne sustave zaštite i umetanje različitih materijala u šupljine i mogu se ostvariti povoljna svojstva u pogledu vlastite težine, tj. opterećenja, nosivosti, energetske učinkovitosti i požarne otpornosti. Sve ovo ukazuje na potrebu detaljnijeg istraživanja takvih elemenata.

U ovom radu će se provesti eksperimentalna i numerička analiza utjecaja prošupljenja na ponašanje drvenih lameliranih greda u požarnim i ambijentnim uvjetima.

Istraživanje će se provesti sa sljedećim ciljevima:

- eksperimentalnim istraživanjima i numeričkim analizama unaprijediti spoznaje o prirodi ponašanja prošupljenih drvenih elemenata u ambijentalnim i požarnim uvjetima,
- definirati utjecaj različitih sustava i metoda zaštite drvenih elemenata od požara, na lokalno i globalno ponašanje elemenata prilikom mehaničkom i požarnog opterećenja i
- procijeniti utjecaj različitih vrsta ljepila korištenih pri lameliranju, te integritet spojeva za međusobno povezivanje prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata.

Ostvarivanjem navedenih ciljeva omogućit će se procjena nosivosti i uporabivosti te požarne otpornosti prošupljenih drvenih elemenata te posljedično, prikladnost korištenja prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih greda u ambijentnim i požarnim uvjetima. Istraživanje provedeno u ovom radu predstavlja samo jedan korak u smjeru uporabe prošupljenih drvenih elemenata u montažnoj gradnji, a prijedlozi za nastavak istraživanja dani su na kraju rada.

U skladu s navedenim ciljevima te prethodnim istraživanjima predložene su sljedeće hipoteze:

H₁: Eksperimentalno istraživanje i numeričke analize omogućit će dobivanje podataka o utjecaju geometrijskih i materijalnih karakteristika elemenata na mehaničku i požarnu otpornost prošupljenih lijepljenih lameliranih elemenata.

H₂: Primjenom naizmjeničnog prošupljenja poprečnog presjeka do 35 % površine, može se doseći minimalno 60 % nosivosti punog poprečnog presjeka.

H₃: Primjenom naizmjeničnog prošupljenja poprečnog presjeka do 35 % površine, može se doseći 30 % nosivosti na požar punog poprečnog presjeka, a uz dodatak adekvatne zaštite ispunjenja prvog izloženog prošupljenja negorivim materijalima ili usporivačima, mogu se ostvariti povoljna svojstva u odnosu na požarnu otpornost punog poprečnog presjeka.

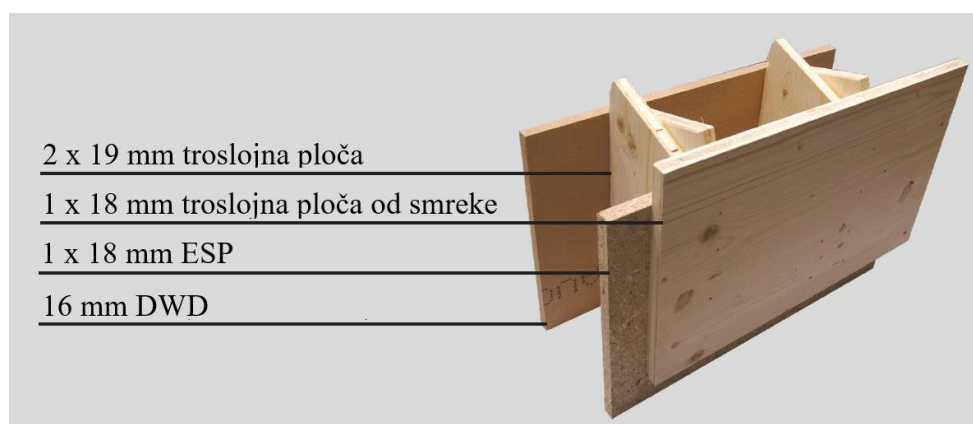
1.2 Organizacija doktorske disertacije

Kako bi struktura doktorske disertacije bila jasnija, ovo poglavlje daje kratak opis tema obuhvaćenih u svakom Poglavlju:

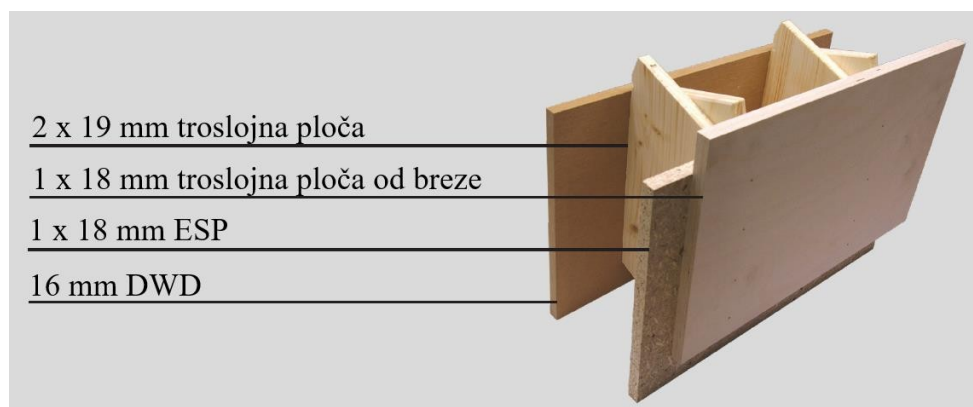
- U Poglavlju 2 dan je pregled stanja područja vezano za sustave modularne drvene gradnje. Nadalje, raspravlja se o osnovnoj teoriji proračuna (požarne) otpornosti drvenih konstrukcija. Shodno tome, prikazani su osnovni sustavi zaštite drvenih konstrukcija od požara. Na kraju, predstavljeni su benefiti numeričke analize (MKE), i trenutno razvijeni proračunski modeli.
- U Poglavlju 3 predstavljena je osnova ideja prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata, namijenjenih za montažnu gradnju. Raspravlja se o prednostima koji ovakav sustav donosi, ali i o potencijalnim problemima vezanim za ponašanje sustava u ambijentnim uvjetima. U ovom poglavlju dan je sažetak svih eksperimentalnih istraživanja u ambijentnim uvjetima, nakon čega se pristupilo teoretskom istraživanju i proračunu inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata temeljenom na metodi sastavljenih greda prema EC5. Naposljetku, predstavljeni su numerički modeli (MKE) prošupljenih drvenih elemenata, kasnije korišteni za parametarsku analizu utjecaja rasporeda prošupljena na nosivost i uporabivost sustava.
- Poglavlje 4 daje pregled svih uzoraka, postavki ispitivanja i parametara ispitivanih tijekom eksperimentalnog istraživanja u požarnim uvjetima. Poglavlje također uključuje opis protupožarnih mjera korištenih za poboljšanje požarne otpornosti prošupljenih drvenih elemenata. Nadalje, predstavljen je proračunski model za određivanje pougljenog sloja, zasnovan na metodama danim u EC5. Povrh toga, predložen je novo-razvijeni pristup numeričkom modeliranju (MKE) drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima, koristeći programski jezik (APDL).
- Poglavlje 5 sadrži raspravu o rezultatima ispitivanja iz prethodnih poglavlja. Osim toga, u ovom poglavlju prezentirani su ključni doprinosi istraživanja provedenih u sklopu doktorske disertacije.
- Konačno, u Poglavlju 6 dani su glavni zaključci i preporuke za buduća istraživanja.

Poglavlje 2.**PREGLED STANJA PODRUČJA****2.1 Dostupni sustavi montažne drvene gradnje****2.1.1 Luxhome**

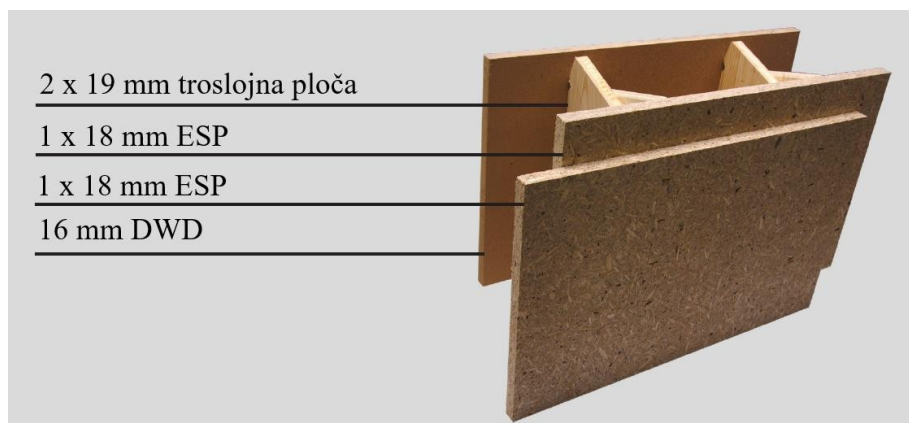
Tvrtka LUXHOME razvila je montažni sustav gradnje drvenih kuća od „drvenih blokova“ [30]. Sama proizvodnja je automatizirana, tako da se, uz definiranje dimenzija pojedinih dijelova, odmah dobiju količine materijala te troškovi, čime se može značajno smanjiti količina otpadnog materijala. Uz izradu drvene opeke, izrađuju se i podni i stropni elemente, prozori, vrata, izolacija i slično. Izrada počinje izrezivanjem pločastih elemenata željenih dimenzija uz pomoć strojeva te se svaka ploča kodira, kako bi se definiralo njezino mjesto prilikom ugradnje. Sama opeka sastoji se od vertikalnih uzdužnih i na njih okomitih ploča. Vertikalna uzdužna ploča, koja dolazi s vanjske strane, jest jednoslojna ploča od drvenih vlakana (DWD), dok su one koje dolaze s unutarnje strane dvoslojne, dostupne u tri varijante. U prvoj varijanti na ESP ploču dolazi troslojna ploča od smreke (Slika 2.1), a drugoj od breze (Slika 2.2). U trećoj su varijanti obje ploče ESP ploče (Slika 2.3), a u svim varijantama okomito na uzdužne ploče dolaze troslojne ploče.



Slika 2.1 Drveni blok s unutarnjim pločama ESP - troslojna ploča od smreke

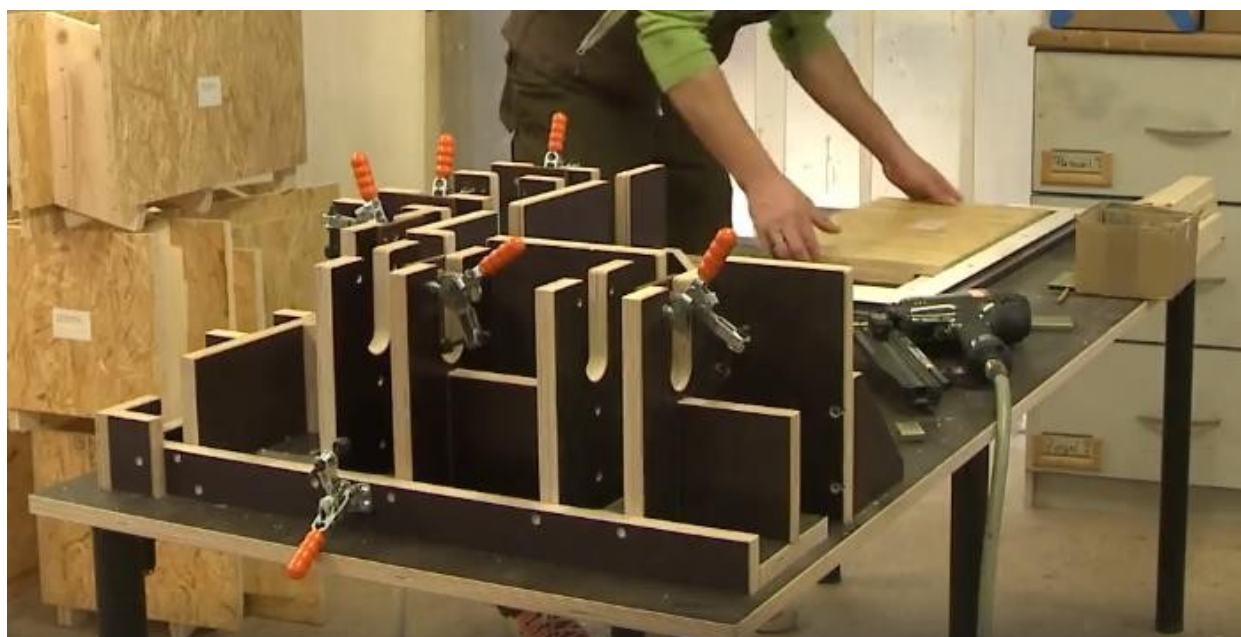


Slika 2.2 Drveni blok s unutarnjim pločama ESP - troslojna ploča od breze



Slika 2.3 Drvena cigla s unutarnjim pločama 2 × ESP

Kako bi se izradio element drvene opeke, svi se dijelovi postave u unaprijed napravljen i standardiziran kalup, kako bi se prilikom izrade minimalizirale greške, te se međusobno spajaju pneumatskim zabijačem čavala (Slika 2.4). Ovakav jednostavan načina izrade omogućuje korištenje malih proizvodnih pogona u kojima investitori mogu sudjelovati u samoj izradi.



Slika 2.4 Kalup za izradu drvenih blokova

Objekti od „Luxhome“ drvenih opeka mogu se podići na bilo kojoj vrsti temelja. Na mjestima zidova potrebno je na temeljnoj ploči postaviti sustav letvi u koje se postavlja prvi red drvene opeke (Slika 2.5), a dalje se u visinu slažu jedna na drugu. Kako je iznimno lagana, drvenu opeku može podizati samo jedna osoba, čime se isključuje potreba za kranovima i dizalicama, što donosi dodatno smanjenje troškova.



Slika 2.5 Prikaz sustava letvi na temeljnoj ploči za postavljanje prvog reda drvenih blokova

Zbog dvostrukog unutarnjeg sloja ploča uspostavljena je difuzijska nepropusnost bez uporabe folija te nije potrebna automatska ventilacija prostorija. Ovisno o zahtjevima, drvena se opeka može ispuniti različitim izolacijskim materijalima: prirodnim proizvodima poput celuloze, drvenim vlaknima ili ovčjom vunom. U šupljine se također mogu postavljati i instalacije, kako bi kasnije bile nevidljive. Moguće su raznolike fasadne obloge, ovisno o zahtjevima i željama investitora. Debljinom zida od 25 cm postižu se vrijednosti niskoenergetske kuće s koeficijentom prolaska topline U manjim od $0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$, dok je klasa požarne otpornosti REI30 [30].

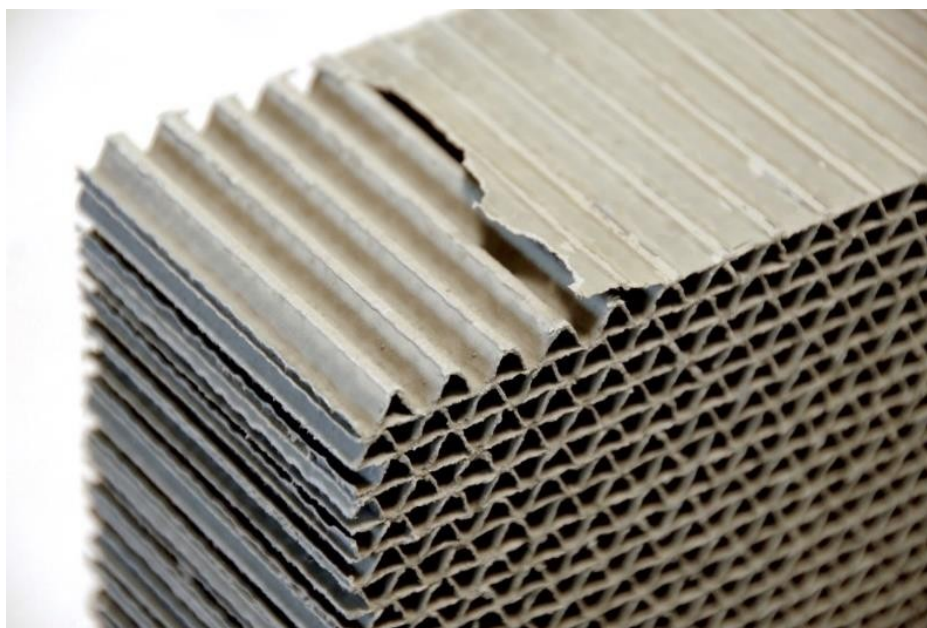
2.1.2 Ecocell

Ovo je SIP sustav (eng. Structural Insulated Panels) koji se sastoji od izolacijskog materijala smještenog između dviju ploča, najčešće OSB (Slika 2.6). Proizvode se u kontroliranim uvjetima i mogu biti prikladni u gotovo bilo kakvoj konstrukciji. Sustav je čvrst, energetske učinkovit i cjenovno prihvatljiv [31].



Slika 2.6 ECOCELL zidni element [31]

Većina SIP sustava koristi izolaciju od pjene na bazi nafte, dok je ECOCELL razvio inovativan sustav izolacije, prvi koji nije na bazi nafte. Izolacija čini 75 % volumena elementa. U obliku je saća načinjenih od 100 % recikliranog papira, u obliku valovitog kartona, koji je prekriven mineralnim premazom (Slika 2.7). Takav ga premaz čini vatrootpornim zbog čega jednoslojni nenosivi ECOCELL zidni element pripada u klasu požarne otpornosti EI-60.



Slika 2.7 ECOCELL izolacija od valovitog kartona [31]

Izolacijska ECOCELL ploča brtvi se transparentnim paropropusnim limom koji sprječava usisavanje toplog zraka između saća usisnim učinkom cirkulacije zraka. Zbog toga je

ova sačasta struktura, načinjena od 90 % zraka, izuzetan toplinski izolator, a uz to može i statički doprinijeti nosivosti samog zida.

ECOCELL izrađuje zidne te stropne, odnosno krovne elemente. Ovisno o njihovom položaju i potrebnoj nosivosti, mogu biti jednodijelni, dvodijelni ili trodijelni. Standardne dimenzije elemenata mogu se vidjeti u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Standardne dimenzije ECOCELL elemenata

| | | DEBLJINA (mm) | | | | ŠIRINA (m) | VISINA/ DULJINA (m) |
|-----------------------------|--------------|---------------|------------------|--------------------|-----------|---------------|---------------------------|
| | | Ukupno | Vanjska ploča | Unutarnja ploča | izolacija | | |
| Zidni elementi | jednodijelni | 95 | 2 × 15 | - | 65 | 0.61/1.22 | 2.44 |
| | dvodijelni | 175 | 2 × 15 | 15 | 2 × 65 | 0.61/1.22 | 2.44 |
| Stropni/ krovni elementi | jednodijelni | 95 | 2 × 15 | - | 65 | 1.22/2.44 | 6.1 |
| | dvodijelni | 195 | 2 × 25 | 15 | 2 × 65 | 1.22/2.44 | 6.1 |
| | trodijelni | 275 | 2 × 25 | 2 × 15 | 3 × 65 | 1.22/2.44 | 6.1 |

Osim zidnih, podnih i stropnih elemenata proizvode i prozore i vrata koji se savršeno uklapaju, s milimetarskom preciznošću. Uklopni elementi dostavljaju se proizvođačima stolarije, nakon čega se pričvršćuju na prozore i vrata kako bi se, kao moduli, mogli vrlo lagano složiti na gradilištu. Ovakav način proizvodnje elemenata omogućuje izgradnju objekta u samo nekoliko sati, minimizirajući neefikasan rad. Osim toga, građevina od ECOCELL elemenata može biti jednostavno demontirana i relocirana.

Gradnja ovakvim elementima je jednostavna. Prvi korak je postavljanje drvene letve na ploču kako bi u njih mogle biti uklopljene drvene spojne grede I profila, položene horizontalno (Slika 2.8). Na njih se zatim postavljaju zidni elementi koji se slažu jedan do drugoga, tako da se između njih ponovno postavlja drvena spojna greda I profila, ovoga puta vertikalno. U kutove se postavljaju posebno izrađeni kutni zidni elementi.

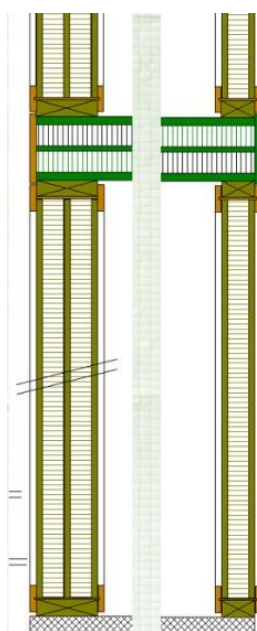
Drvene spojne grede I profila sastoje se od dviju pojasnica otpornih na izvijanje te hrpta koji ima značajnu posmičnu otpornost. Pojasnice su napravljene od LVL-a ili piljene građe, a hrbat od iverice ili OSB-a.



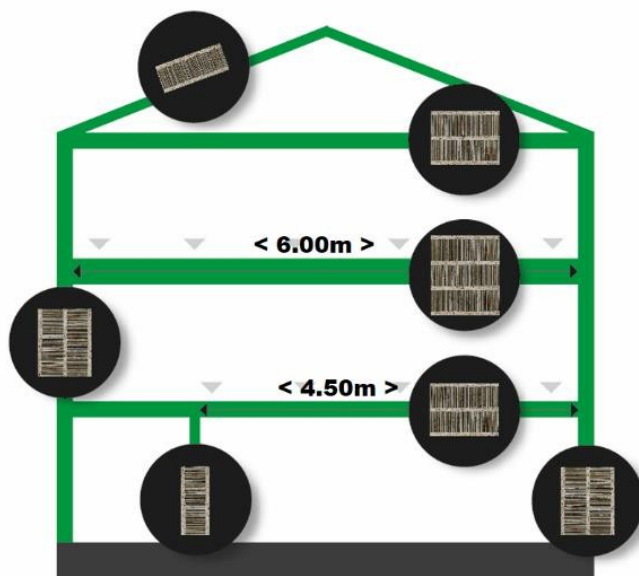
Slika 2.8 Drvene spojne grede I profila položene horizontalno u koje se postavlja zidni element [31]

Instalacije se mogu provoditi kroz stropne elemente ili biti prethodno ugrađene. Postoji i mogućnost postavljanja instalacija u prezidne elemente ili pak izrada sanitarnih modula.

Nakon što su postavljeni zidovi, na njih se postavljaju stropni elementi. Presjek kroz zidni i stropni element prikazani su na slikama 2.9 i 2.10. ECOCELL stropnim elementima mogu se ostvariti značajni rasponi, ovisno o broju slojeva takvog elementa (vidi sliku 2.10).



Slika 2.9 Presjek kroz ECOCELL zidni i stropni element



Slika 2.10 Mogući rasponi ECOCELL stropnim

Elementi koji su primarni za zaštitu od požara imaju ploče od cementa ili magnezijevog oksida, dok ostali mogu biti izrađeni s troslojnim OSB pločama, bambusovim pločama ili šperpločom. Elementima izvedenim od bambusovih ploča ostvarivi su veći rasponi, čak preko 6.1 m, zbog veće krutosti bambusa u odnosu na standardne vrste drva (Slika 2.11). Bambus donosi i brojne druge prednosti, kao što su: najveća proizvodnja kisika od svih ostalih biljaka te apsorpcija 4 puta više ugljikova dioksida, a raste do 1 metar dnevno, čak i nakon što je posječen. Također je zanimljivo je da ima veću vlačnu čvrstoću od čelika te da prilikom uzgoja nisu potrebni pesticidi i gnojiva.



Slika 2.11 Dvodijelni ECOCELL-BAMBOO element [31]

Ova je tvrtka razvila i ECO Solar modularne kuće koje proizvode više električne energije nego što je koriste jer su cjelokupne površine krova i fasade prekrivene fotonaponskim elementima (Slika 2.12). Prekomjerna električna energija pohranjuje se u baterije ili se unosi natrag u mrežu. Sunce zagrijava ljusku, proizvodi električnu energiju i smanjuje temperaturnu razliku između unutarnjeg i vanjskog prostora ili je čak uklanja. Kuća je čak i zimi u toplom okruženju i ne gubi toplinu prema van, dok se ljeti ne zagrijava jer saće sprječavaju pregrijavanje [31].



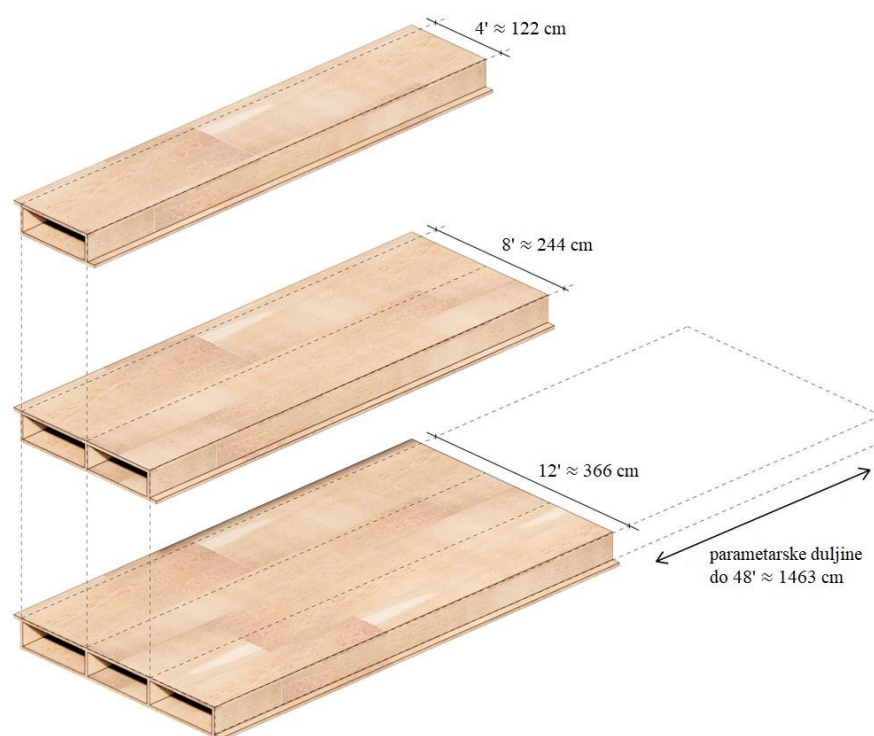
Slika 2.12 ECO Solar modularna kuća [31]

2.1.3 Fabric workshop

Fabric Workshop [32] tvrtka je koja dizajnira vlastiti sustav šupljih masivnih drvenih ploča (Slika 2.13), stupova i zidova za koje se koristi 50 % manje drvenih vlakana, a ukupni troškovi manji su 10 - 35 % u odnosu na CLT. Zbog samih šupljina i sandučastog oblika ovakav je sustav lakši i snažniji i od čelika i od betona. Elementi su unaprijed proizvedeni, tako da se izbjegava korištenje alata na gradilištu, a velike ploče se sastavljaju i povezuju metalnim spajalima. Iako je materijal skup, značajne su uštede postižu zbog brzine izvedbe i izbjegavanja pogrešaka zbog navedenog načina izvedbe.

Za razliku od uobičajenih drvenih građevina, u kojima se instalacija provodi uz površine zidova ili stropova te se onda naknadno zatvaraju pločama kako bi bile nevidljive, kod ovog se sustava mogu iskoristiti šupljine za njihovo smještanje. Na taj način ostvaruju se povoljna estetska svojstva jer drvene površine mogu ostati izložene. Osim instalacija, u šupljine je moguće ugraditi i razne izolacijske materijale. Može se postaviti toplinska izolacija koja povećava R vrijednost, ali i razni protupožarni i seizmički sustavi (Slika 2.14). Time se ostvaruju ploče znatno manje debljine, u odnosu na ploče od CLT-a, jer se one najčešće prekrivaju dodatnim betonskim slojem određene debljine i drugim izolacijskim materijalima.

Nedostatak ovakvog sustava je potreba za velikom preciznošću i koordinacijom osoba svih struka jer se izvođenje samih elemenata i ugradnja materijala unutar šupljina događa istovremeno.



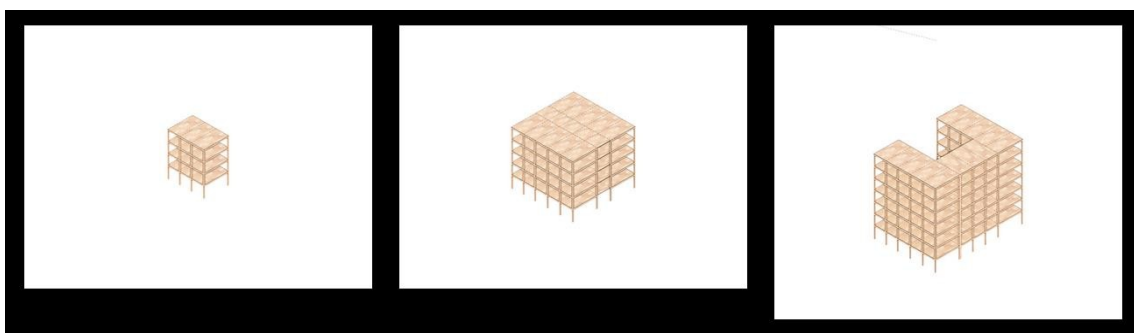
Slika 2.13 Sandučasti drveni elementi Fabric [32]



Slika 2.14 Dijelovi sustava Fabric

Drvene ploče od kojih se sastavlja ovaj sustav izrađene su od „viškova“ u šumama, odnosno od debala malog i srednjeg promjera koja zakrčuju šumu i povećavaju opasnost nekontroliranog širenja požara jer su puno osjetljivija na vatru, a dovoljno visoka da požar prošire u krošnje zdravih i jakih stabala, kojeg onda vjetar puno brže i jednostavnije širi. Takva debala bivaju inače uklonjena prirodnim požarima, no kako se takvi požari sprječavaju, šume sve više zarastaju pa je onda jako teško u takvim zaraslim područjima iskontrolirati i ugasiti požar, ukoliko se on dogodi. Inače se nakon krčenja šume takva debala ne koriste za neke vrijedne proizvode, a ovako bi dobila na važnosti.

Ovakvim se sustavima mogu izgraditi građevine visine tri do osam katova (Slika 2.15). Prvotna ideja prilikom razvoja ovog sustava bila je da se izgrade manje stambene jedinice za sve one građane koji si teško mogu priuštiti vlastiti dom te se zbog toga masovno iseljavaju.



Slika 2.15 Višekatne građevine izgrađene sandučastim drvenim elementima

2.1.4 Brikawood

Brikawood [33] je građevinski sustav drvene opeke, razvijen od strane francuske tvrtke Catharhome, koji omogućuje brzu izgradnju kuće bez uporabe čavala, vijaka ili ljepila. Svaka se jedinica sastoji se od četiri dijela: dva bočna elementa i dva poprečna odstojnika koji se uklapaju jedan u drugi pomoći klasičnog spoja lastinim repom (Slika 2.16). Elementi zida od su debljine 4 cm s vanjske i s unutarnje strane, dok je šupljina 8 cm ili 17 cm široka, što daje ukupnu širinu zida od 16 cm ili 25 cm. Opeka je 50 cm dugačka i 17 cm visoka. Elementi su izrađeni od Douglasove jele klase 3 koja ne zahtijeva njegu.



Slika 2.16 Elementi Brikawood drvene opeke [33]

Na početku gradnje postavi se nekoliko redova drvene opeke, a onda se u kutovima i po duljini zidova, na određenim razmacima, postavljaju vertikalno letve koje se spajaju pri vrhu, tvoreći okvire (Slika 2.17). Unutar okvira se nastavlja slagati drvena opeka, čime se postiže veća krutost zajedničkim međudjelovanjem. Takva struktura ima i značajna mehanička, zvučna i seizmička svojstva. Dizajnirana je za uporabu bez obloga, zaštite od kiše ili parne barijere pa je i s unutarnje i s vanjske strane vidljivo drvo, što je izrazito povoljno u pogledu regulacije vlažnosti u prostorijama i same estetike. Jedini dodatak jest za Brikawood, posebno dizajniran nepovratni ventil koji povećava nepropusnost konstrukcije.



Slika 2.17 Slaganje drvene opeke unutar vertikalna koje čine okvire [33]

Šupljine ovakvih elemenata popunjavaju se toplinskom izolacijom u obliku drvenih strugotina (Slika 2.18) ili vune. Strugotine koje se koriste zapravo su nusproizvod obrade elemenata od kojih se sastoji drvena opeka, čime se značajno smanjuje otpadni materijal. Ovakvim izolacijskim svojstvima Brikawood elementi ispunjavaju sve kriterije Propisa o grijanju donesenog 2012. godine kojima se želi postići tranzicija u nultu potrošnju energije u zgradama do 2020. godine. Dakle, u pasivnoj Brikawood kući vrijednost koeficijenta gubitka topline U manja je od $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ te se postižu dobri životni uvjeti bez konvencionalnog grijanja zimi i klimatiziranja ljeti. Dodatna energija potrebna za ovakvu kuću može se proizvoditi uz pomoć fotonaponskih panela.



Slika 2.18 Drvene strugotine kao toplinska izolacija

Kuće od Brikawood drvene opeke mogu se izvoditi na drvenoj ploči temeljenoj na pilotima ili na klasičnim betonskim temeljima, ovisno o lokalnim zahtjevima lokacije. Što se tiče krovišta, može biti rešetkasti sustav drvenog krovišta, kao što je uobičajeno za drvene kuće.

2.1.5 Gablock

Gablock [34] izolirani drveni blokovi dizajnirani su u Belgiji od materijala koji se mogu reciklirati. Kao izolacijski materijal odabran ekspanzirani polistiren s grafitnim dodatkom (EPS). Oko 98 % EPS-a čini zrak, a preostalih je 2 % materijala dobiveno preradom nafte. Osnovni proizvod ima oblik kuglica stirena čija zrnca povećavaju svoj volumen 40 puta u kontaktu s vodenom parom bez otapala ili drugih ljepila. Suprotno očekivanome, stiren je komponenta koja se prirodno nalazi u biljkama, nije štetan za zdravlje, s vremenom ostaje stabilan, nema negativan utjecaj na okoliš te nije toksičan niti zagađuje. U svakodnevnom se životu EPS nalazi u određenoj ambalaži za hranu jer ne uzrokuje alergije ili bolesti. Također ima veliku prednost jer je dobar izolator, a znatno manje zagađuje ugljikovim dioksidom u odnosu na zidane konstrukcije. Nakon što su izolacijski blokovi napravljeni, izrađuje se drveni okvir u koji se oni ugrađuju. Taj je okvir sastavljen od OSB ploča, debljine 18 milimetara. To su komprimirane ploče načinjene od prirodne smole i drvenih letvica (iver) čija je znatna prednost što naknadno ne mijenjaju svoj oblik. Ljepilo koje se koristi za izradu OSB ploča (klasa 3 i 4), koje se pak koriste za izradu izolacijskih blokova, ne sadrži formaldehid. Kombinacijom OSB ploča i izolacije od EPS-a dobiven je blok spreman za ugradnju (Slika 2.19).

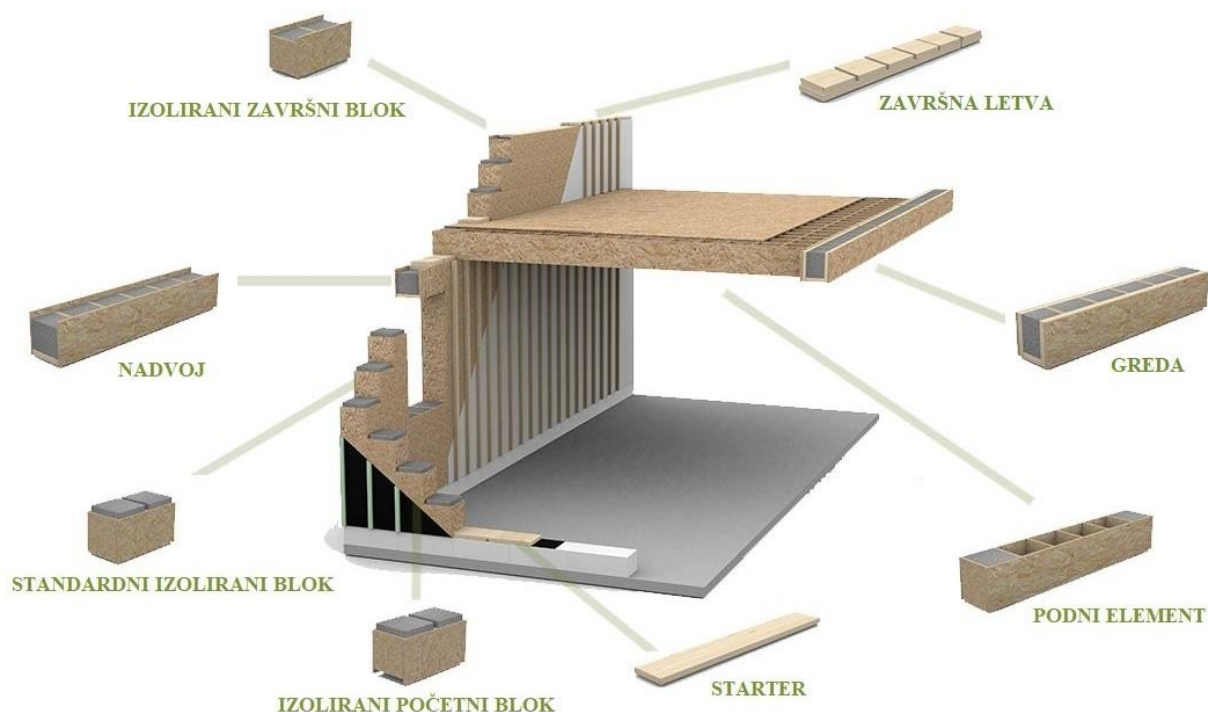


Slika 2.19 Gablock izolirani blokovi [34]

Gablokovi su dostupni u 3 različite duljine: 30 cm, 60 cm i 90 cm. Visina i širina pojedinih blokova uvijek je ista i iznosi 30 cm. Izolirani drveni blok od 60 cm teži samo 7.5 kg, što ga čini vrlo jednostavnim za rukovanje.

U procesu izgradnje s Gablokom nije potreban sustav spajanja, već se uklapanjem jednog bloka u drugi formiraju elementi kuće. Ovakav je način izgradnje vrlo jednostavan i

omogućuje vlasnicima samostalnu izgradnju kuće, uz upute proizvođača. Za gradnju je potrebno ukupno osam elemenata (Slika 2.20). Prvi korak je polaganje „starter-a“ na temeljnu ploču, odnosno greda od LVL-Q-a, posebno oblikovana kako bi u nju ulegao početni izolirani blok, koji formira prvi red. Nakon toga slijedi postavljanje standardiziranih blokova koji oblikuju zid duž njegove visine. Zadnji red ponovno formiraju posebno oblikovani završni izolirani blokovi na koje se postavlja završna letva, koja je posebno oblikovana kako bi na nju mogli uleći podni elementi i grede. Podni elementi dostupni su u najvećoj duljini od 4.8 metara. Iznad otvora postavljaju se elementi nadvoja, čija je najveća duljina 2.4 metra.



Slika 2.20 Elementi Gablock sustava [34]

Kada su svi zidovi izgrađeni blokovima, na njihove se bočne strane postavljaju drvene letve na razmaku od 40 cm (Slika 2.21) koje međusobno dodatno povezuju i stabiliziraju izolirane blokove. Udaljenost između dviju letvi naziva se „tehničkim kanalom“ i omogućuje postavljanje svih potrebnih instalacija. S donje strane podnih elemenata nalazi se prostor od 10 cm koji također omogućuje provođenje instalacija (Slika 2.22). Elementi se zatim zatvaraju gips kartonskim pločama ili sličnim sustavima, čime instalacije ostaju nevidljive, a opet lako dostupne.

Gablok izoliranim blokovima grade se uglavnom jednokatne kuće, no moguće je razmotriti i izgradnju dvokatne kuće, uz izrade studija o stabilnosti. Spoj drva i EPS-a

omogućuje ovakvim konstrukcijama značajne izolacijske vrijednosti, koje mogu biti dodatno povećane uporabom izolacijskih materijala i s vanjske strane blokova. Toplinska vodljivost (U vrijednost) zida ugrađenog u Gablok iznosi $0.15 \text{ W/ m}^2\text{K}$, a vrijednost toplinske vodljivosti (vrijednost λ) EPS-a je $R = 0.035 \text{ W/mK}$. Tlačna čvrstoća zida s izoliranim drvenim blokom iznosi 150 kN/m , dok podni elementi dopuštaju opterećenje od 250 kg/m^2 [34].



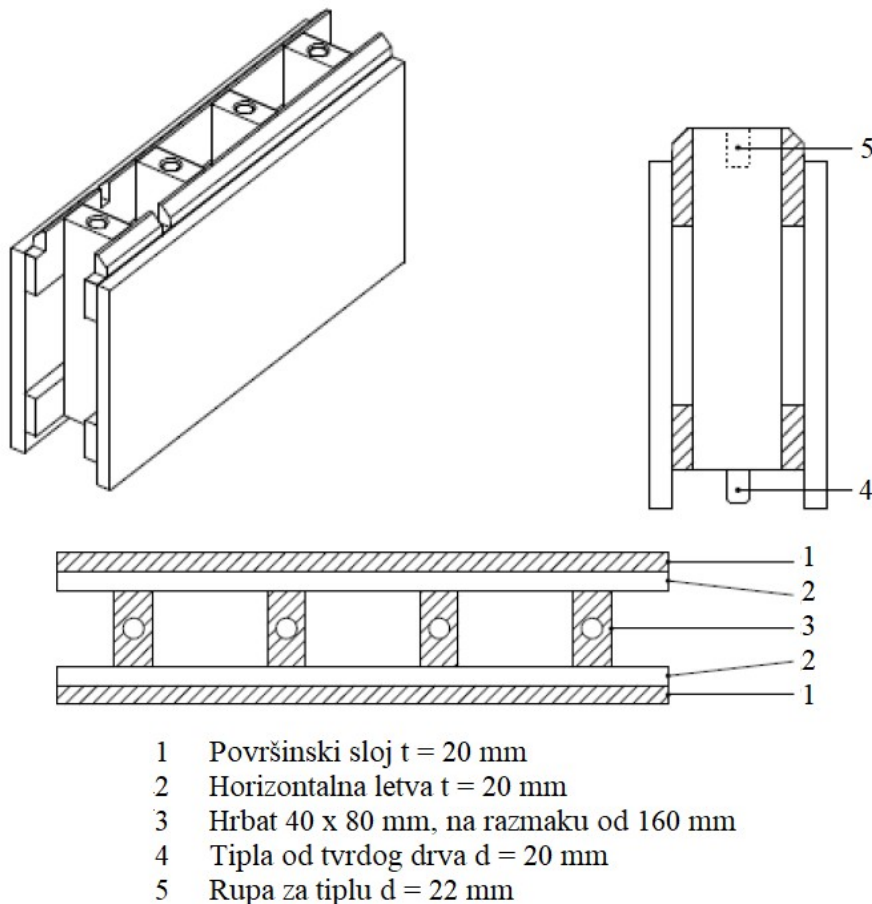
Slika 2.21 Sustav letvi koji stabilizira izolirane blokove



Slika 2.22 Provođenje instalacija u sklopu podnih elemenata ili na zidovima [34]

2.1.6 Steko

STEKO [35] je montažni sustav gradnje razvijen u Švicarskoj. Vanjski i unutarnji zidovi građeni su od standardiziranih, industrijski proizvedenih modula, odnosno od održivog plantažnog drveta s Baltika. Lako se montiraju, bez uporabe ljepila, čavala ili sličnih spajala. Sastavljeni su od 5 dijelova koji su međusobno zalijepljeni netoksičnim ljepilom (Slika 2.23). Dio 1 izrađen je od drva C24, ostali su dijelovi od drva C16, dok su tiplje od topole.

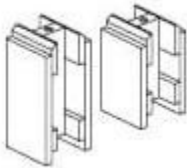
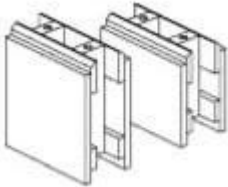
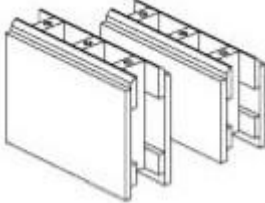
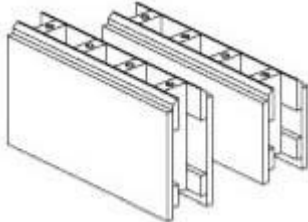


Slika 2.23 Steko element [35]

Planiranje je podržano CAD-om i omogućuje dimenzije vodoravno u inkrementima od 16 cm, a vertikalno od 8 cm. Ovo je posljedica elemenata koji dolaze u četiri različite dimenzije (Tablica 2.2).

Standardni STEKO moduli teže samo 6.5 kg, što ih čini laganima i jednostavnima za ugradnju. Izbjegava se upotreba teške mehanizacije i popratne opreme, što značajno pojeftinjuje izvedbu, a ostavlja i mogućnost da vlasnici samostalno, uz upute, izgrade svoju kuću. Korištenjem ovih unaprijed izrađenih modula značajno se smanjuje količina otpadnog materijala na gradilištu, čime se dodatno smanjuju troškovi.

Tablica 2.2 Dimenzije četiri različita STEKO modula [35]

| ZIDNI MODUL | PRIKAZ | DULJINA(mm) | VISINA(mm) | ŠIRINA(mm) |
|----------------|---|-------------|-------------|------------|
| jednodijelni |  | 160 | 320 ili 240 | 160 |
| dvodijelni |  | 320 | 320 ili 240 | 160 |
| trodijelni |  | 480 | 320 ili 240 | 160 |
| četverodijelni |  | 640 | 320 ili 240 | 160 |

Izgradnja zida može biti opisana jednostavnim koracima (Slika 2.24). Kada su svi zidovi izgrađeni, unutarne je zidove potrebno povezati s vanjskima vijcima. Uz to, kuća sagrađena STEKO-om može se demontirati, prilagoditi ili ponovno upotrijebiti po želji, što ju čini potpuno reciklabilnom.



1. Postavljanje tzv. praga, odnosno početnog elementa i njegovo pričvršćivanje za temelje vijcima (njegova je visina 8 cm)



2. Slaganje prvog reda zida STEKO® modulima



3. Slaganje zida u visinu jednostavnim uklapanjem elemenata unaprijed ugrađenim tiplama, pri čemu treba pripaziti da se vertikalne sljubnice ne poklapaju



4. Postavljanje završnog elementa za zatvaranje zida (njegova je visina 8 cm)

Slika 2.24 Koraci postavljanja STEKO® zida

Unutar ovih modula nalaze se šupljine koje imaju sličnu funkciju, kao što imaju prozori s dvostrukim ostakljenjem. Taj prostor pomaže u smanjenju prolaska toplog ili hladnog zraka između unutarnje i vanjske strane kuće. Može se ispuniti brojnim jednostavnim ili prirodnim izolacijskim proizvodima poput usitnjenog kartona, celuloze, izolacije od perlita ili pijeska koji apsorbira zvuk. Međutim, čak i bez dodavanja izolacije, drveni moduli koji se koriste za

STEKO kuću i dalje pružaju izvrsnu toplinsku izolaciju. Korištenjem sustava STEKO za izgradnju postiže se 38 % veća *R*-vrijednost, u usporedbi sa standardnim drvenim okvirnim konstrukcijama, a dodavanjem izolacije željene debljine na vanjskoj strani može se izgraditi pasivna kuća (Slika 2.25). Dodatna je pogodnost da za ovakve kuće nije potrebna difuzijska barijera.



Standardan STEKO® zid
R - vrijednost = 22

Energetski učinkovit STEKO® zid
R - vrijednost = 41,5

Pasivan STEKO® zid
R - vrijednost = 57

Slika 2.25 R - vrijednosti različitih izolacijskih mogućnosti

Kako bi se dodatno stabilizirali zidovi, unutar šupljina postavljaju se vertikalni elementi, tj. drvene letve, u uglovima, duž zida na određenim razmacima te oko otvora velikih dimenzija. Unutar formiranih otvora postavlja se stolarija.

Instalacije se također mogu postavljati unutar šupljina paralelno s građenjem samog zida, a unaprijed se mogu u elementima izraditi otvori kroz koje su lako dostupne. U drvenom se pragu mogu dijagonalno probušiti rupe za prolaz instalacija, od temelja kroz elemente dalje po visini zida.

Za strop se koriste posebno izrađene grede od punog drveta (Slika 2.26), dostupne u dvije veličine: (24 × 24 × 600) cm i (36 × 36 × 760) cm. Prednost ovog poprečnog presjeka je ostavljanje mogućnosti provođenja instalacija unutar njih. Krovnište se izvodi kao klasično, pomoću drvenih rešetkastih nosača.



Slika 2.26 Gredni element [35]

2.2 Požarna otpornost drvenih konstrukcija

2.2.1 Uvod

Požar je svako nekontrolirano gorenje koje uzrokuje i materijalne štete i/ili ljudske žrtve, a primjer jedne građevine prilikom požara dan je na slici 2.27. Uzroci su raznoliki, no mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine, a to su namjerno i nenamjerno uzrokovani požari. Namjerno uzrokovani požari posljedica su vandalizma, kojim se najčešće vidno želi naštetiti nekoj građevini, no mogući su i ostali, za mnoge nepoznati i neshvatljivi razlozi. S druge su strane nenamjerni požari koji mogu biti uzrokovani ljudskom nepažnjom, neispravnim instalacijama i slično.



Slika 2.27 Zgrada prilikom požara [36]

Posljedice požara ovise o materijalu od kojega je građevina konstruirana i o njoj namjeni. Manje će posljedice biti ako požar zahvati neki negorivi materijal u odnosu na gorivi. Također, unutar većine industrijskih postrojenja nalazi se vrlo malo gorivih predmeta i manji je broj ljudi u odnosu na, primjerice, uredske prostore u kojima je se nalazi znatan broj ljudi za koje je potrebno osigurati radna mjesta i sav uredski pribor, čime se gomila količina gorivih predmeta, ali i broj osoba čiji bi životi mogli biti ugroženi izbijanjem požara.

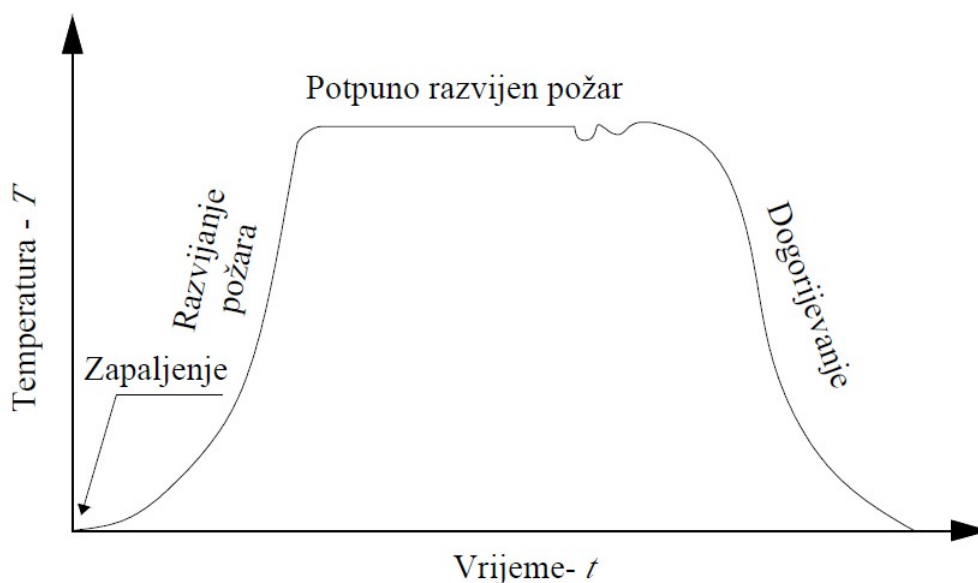
Razlog znatnih posljedica prilikom požara dva su glavna produkta djelovanja požara, a to su visoke temperature i velike količine dima. Visoke temperature utječu na samu

konstrukciju, tj. na njezinu nosivost i sigurnost, dok dim utječe na ljude smanjujući im vidljivost pronalaska izlaza i otežavajući im disanje (Slika 2.28). Time dim postaje najvećim krivcem za stradavanjem velikog broja ljudi u požarima.



Slika 2.28 Gusti dim koji nastaje prilikom požara [37]

Da bi uopće došlo do razvoja požara, potreban je goriva tvar, kisik i dovoljna količina topline koja uzrokuje zapaljenje. Kada požar nastane, prolazi kroz specifične faze prikazane na slici 2.29. Požar započinje zapaljenjem, a daljnji tijek ovisi o gorivom materijalu i njegovoj količini. U fazi zapaljenja bitno je započeti evakuaciju svih osoba iz prostora, no velik problem stvara dim koji smanjuje vidljivost. Većina ljudi ni ne pokušava izaći, ako nema osiguranu dovoljnu vidljivost, iako je vjerojatnost da će ih prilikom izlaska zahvatiti plamen jako mala. U ovoj je fazi važno i pokušati ugасiti požar jer se još nije razvio pa je taj postupak znatno jednostavniji, odnosno može biti postignut polijevanjem izvora zapaljena vodom, ili korištenjem aparata za gašenje požara, koji su dostupni u svakoj građevini, na za njih predviđenim mjestima. Nakon zapaljenja slijedi faza razvoja požara. Tada se naglo povećava temperatura i količina topline u prostoru te plamen zahvaća sve veći dio prostorije. Temperatura u ovoj fazi još nije dosegla svoj maksimum. Nakon desetak minuta dolazi do dosezanja maksimalne temperature i faze potpuno razvijenog požara. Tada je požar zahvatio sav gorivi materijal i, ovisno o njegovoj količini, može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana [38]. Kada izgori većina zapaljivog materijala i nakon što temperatura u prostoriji padne na 80 % od maksimalne razvijene prilikom požara, nastupa faza gašenja [29].



Slika 2.29 Faze razvoja požara

2.2.2 Osnovni pojmovi

Među sedam osnovnih zahtjeva za građevinu, prema *Zakonu o gradnji* [39], nalazi se zahtjev sigurnosti u slučaju požara. Da bi građevine ispunile ovaj zahtjev, one moraju biti projektirane i izgrađene tako da u slučaju izbijanja požara:

- nosivost građevine može biti zajamčena tijekom određenog razdoblja
- nastanak i širenje požara i dima unutar građevine je ograničeno
- širenje je požara na okolne građevine ograničeno
- korisnici mogu napustiti građevinu ili na drugi način biti spašeni
- sigurnost je spasilačkog tima uzeta u obzir.

Za građevinu se može reći da je otporna na požar ako je sposobna kroz određeno vrijeme ispunjavati zahtijevanu nosivost (R) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara.

Prema *Pravilniku o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara* [40] unutar određenog vremena konstrukcija i elementi moraju očuvati nosivost i druga svojstva pri požaru, čime se iskazuje otpornost konstrukcije i elemenata na požar. Vrijeme otpornosti na požar izražava se u minutama koje se označavaju brojevima 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 i 360.

Isto tako, svaki materijal/proizvod doprinosi razvoju požara uslijed vlastite razgradnje do koje dolazi izgaranjem tog materijala u određenim ispitnim uvjetima. Taj se doprinos prema

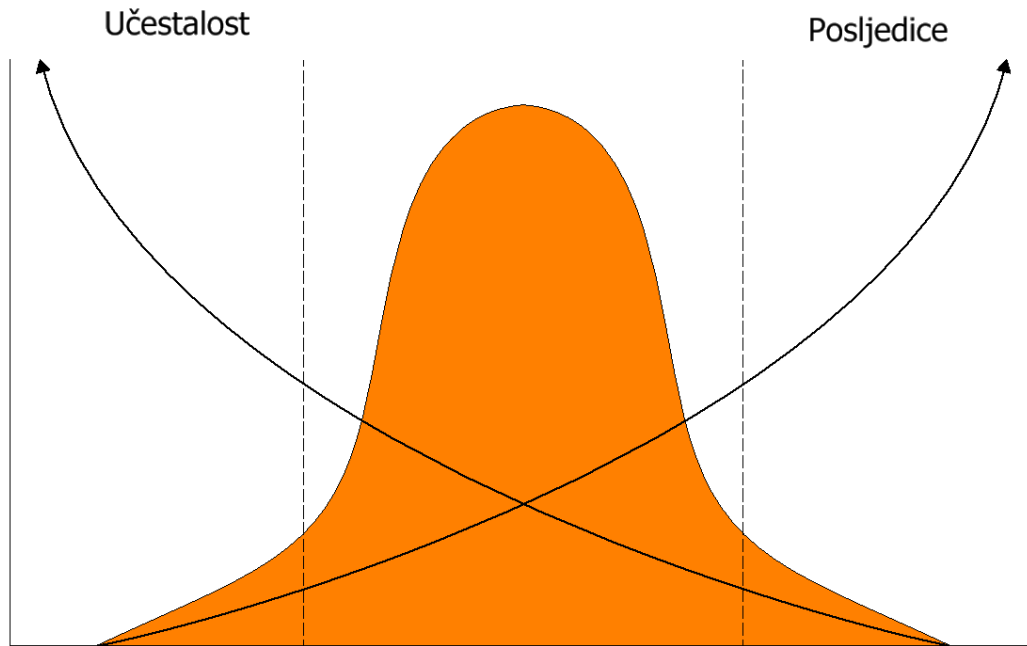
normi HRN EN 13501-1:2010 [41] naziva reakcija na požar. Unutar nje razrađena je klasifikacija, s jedne strane na negorive materijale, a s druge na gorive materijale. Negorivi materijali ne mogu se zapaliti, gorjeti, podržati gorenje ili otpustiti zapaljive plinove kada su izloženi požaru ili toplini. Takvi građevinski materijali razreda su izloženosti na požar A1 i A2. Gorivi građevinski materijali mogu se zapaliti, gorjeti, podržati gorenje ili osloboditi gorive plinove te su svrstani u razrede reakcije na požar B, C, D, E i F. Dodatna razredba materijala obuhvaća razredbu u obliku proizvodnje dima (s1-s3), a vezana je i uz gorivo otkapavanja materijala u slučaju požara (d0-d2) [40].

Drvo kao materijal i paneli na osnovi drva svrstavaju se u kategoriju D. Ukoliko je drvo zaštićeno protupožarnom zaštitom koja usporava širenje požara, može biti svrstano u klasu B, no ne može se postići klasifikacija drvenog elementa kao negorivog, odnosno klase A1 ili A2. U tablici 2.3 dan je pregled klasifikacije reakcije na požar za razne proizvode koji se mogu koristiti kao stropne i podne obloge [6]. Reakcija na požar građevnog proizvoda može biti u unutarnjem prostoru građevine smanjena za jedan stupanj u slučaju kada je u građevini ugrađen sustav za automatsko gašenje požara [40].

Tablica 2.3 Pregled europske klasifikacije reakcije na požar građevnih proizvoda korištenih za zidne i stropne obloge

| Klasifikacija reakcije na požar | Dodatna razredba vezana uz: proizvodnju dima gorivo otkapavanja materijala | | Tipični proizvodi |
|---------------------------------|--|---------------|--|
| A1 | - | - | Kamen i beton |
| A2 | s1, s2 ili s3 | d0, d1 ili d2 | Gipskartonske ploče i mineralna vuna |
| B | s1, s2 ili s3 | d0, d1 ili d2 | Gipskartonske ploče i drvo koje je zaštićeno usporivačima požara |
| C | s1, s2 ili s3 | d0, d1 ili d2 | Obloge na gipskartonskim pločama |
| D | s1, s2 ili s3 | d0, d1 ili d2 | Drvo i paneli na osnovi drva |
| E | - | - ili d2 | Neki sintetički polimeri |
| F | - | - | Ne zadovoljavaju klasu E |

Drvene konstrukcije igraju ulogu (uglavnom) u posljedicama požara, ali ne i u učestalosti. Broj požara u drvenim zgradama ne razlikuje se od broja požara u objektima izgrađenim od drugih materijala.



Slika 2.30 Ovisnost učestalosti i posljedica kod požara u drvenim konstrukcijama

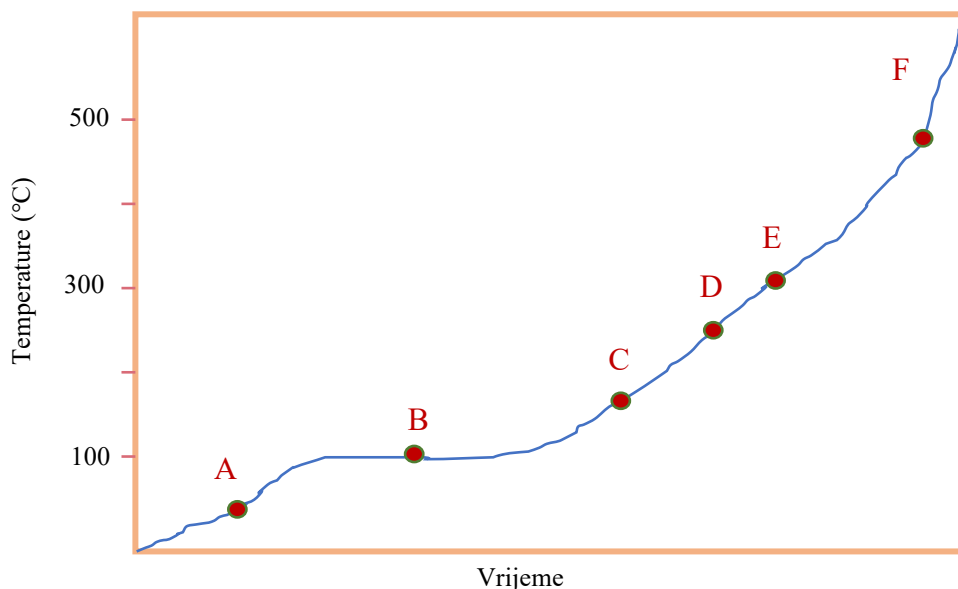
U odnosu na ostale građevinske materijale, posljedice mogu biti povećane zbog tri čimbenika:

- Drvo doprinosi požarnom opterećenju (pa su požari potencijalno jači)
- Prilikom požara, nezaštićene površine drvenih elemenata mogu degradirati, čak i u fazi prije rasplamsavanja (jer oštećenja počinju na nižoj temperaturi)
- Detalji veze su slabe točke (uglavnom slabije nego za ostale građevinske materijale)

2.3 Ponašanje drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima

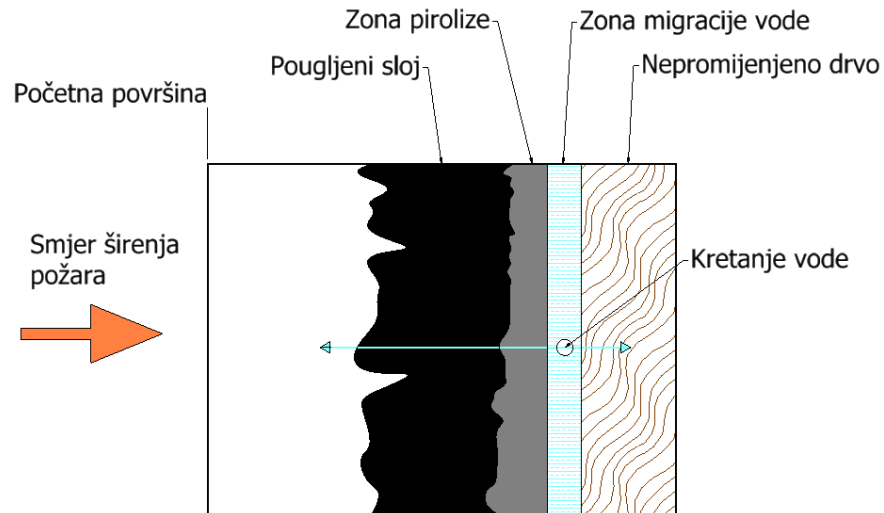
2.3.1 Uvod

Karakteristične faze i fenomeni koji se događaju kada je drvo izloženo požaru mogu se vidjeti na slici 2.31.



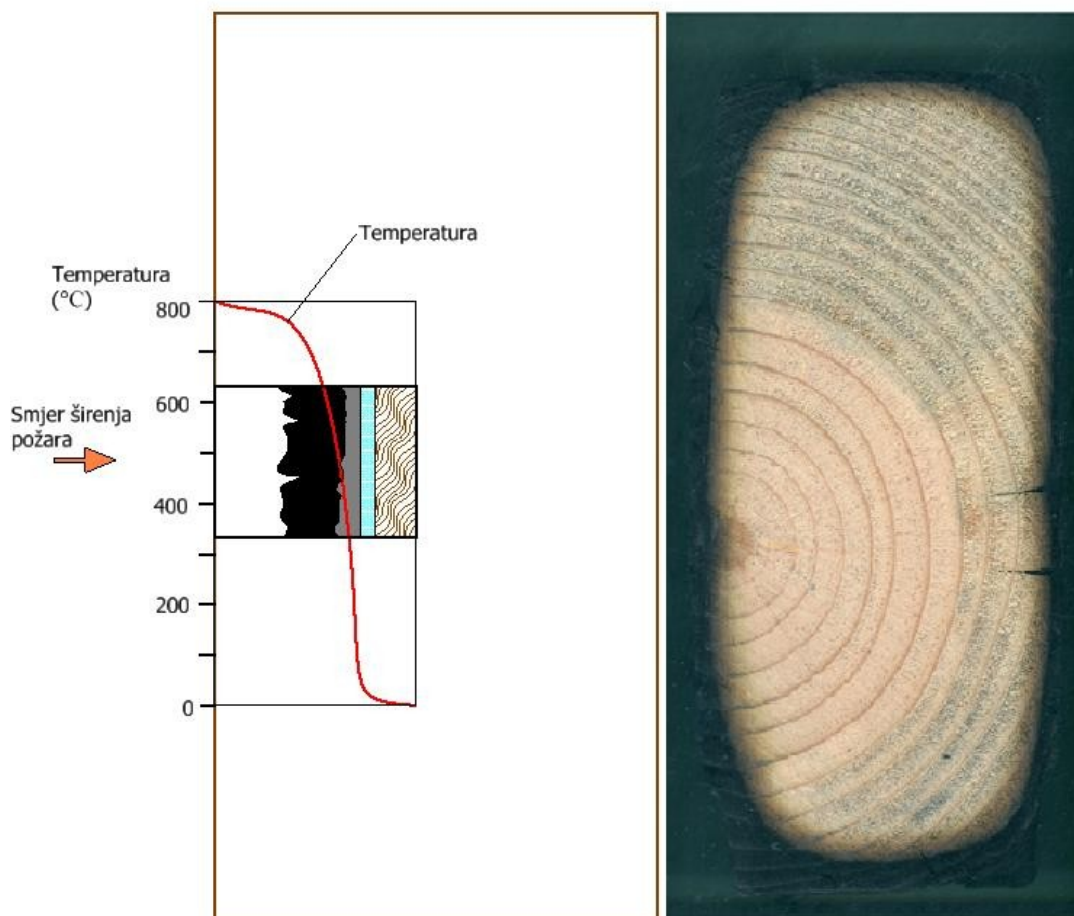
Slika 2.31 Karakteristične faze ponašanje drvenih konstrukcija u požaru

Temperature ispod 100 °C (točka A na slici 2.31), ali iznad sobne temperature uzrokuju sušenje drva i malo smanjenje čvrstoće i krutosti. Na 100 °C (točka B) voda počinje isparavati i prateći put najmanjeg otpora izlazi iz drveta. Temperatura u drvu ne raste dok sva voda ne ispari, što predstavlja horizontalni dio krivulje na slici 2.31. Između 150 i 200 °C (točka C) formiraju se plinovi koji se sastoje od približno 70 % ugljičnog dioksida (CO₂), koji je nezapaljiv, i 30 % ugljičnog monoksida (CO), koji je zapaljiv. Na 200 °C (točka D) nastaje više plinova i smanjuje se udio CO₂. Kada se ovi plinovi zapale, površinska temperatura se brzo povećava, te se nastavlja sagorijevanje drva. Kada se dosegne temperatura od 300 °C (točka E), drvo gubi većinu svojih svojstava (materijalne karakteristike). Za temperature iznad 500 °C (točka F) proizvodnja plina je uvelike smanjena, a proizvodnja drvenog ugljena se povećava što objašnjava izgled drveta (ugljen) nakon požara. Na slici 2.32 prikazani su karakteristični slojevi i ponašanje drva u požarnim uvjetima.



Slika 2.32 Karakteristični slojevi drva pri požarnom opterećenju

Pougljeni sloj koji ima presudnu ulogu i sprječavanju širenja topline prema unutrašnjosti materijala. Na slici 2.33 prikazan je temperaturni profil koji u trenutku stvaranja pougljenog sloja ostaje nepromijenjen u vremenu. Nakon otpadanja pougljenog sloja, temperatura ponovno naglo raste.



Slika 2.33 Razvoj temperature prema unutrašnjosti presjeka

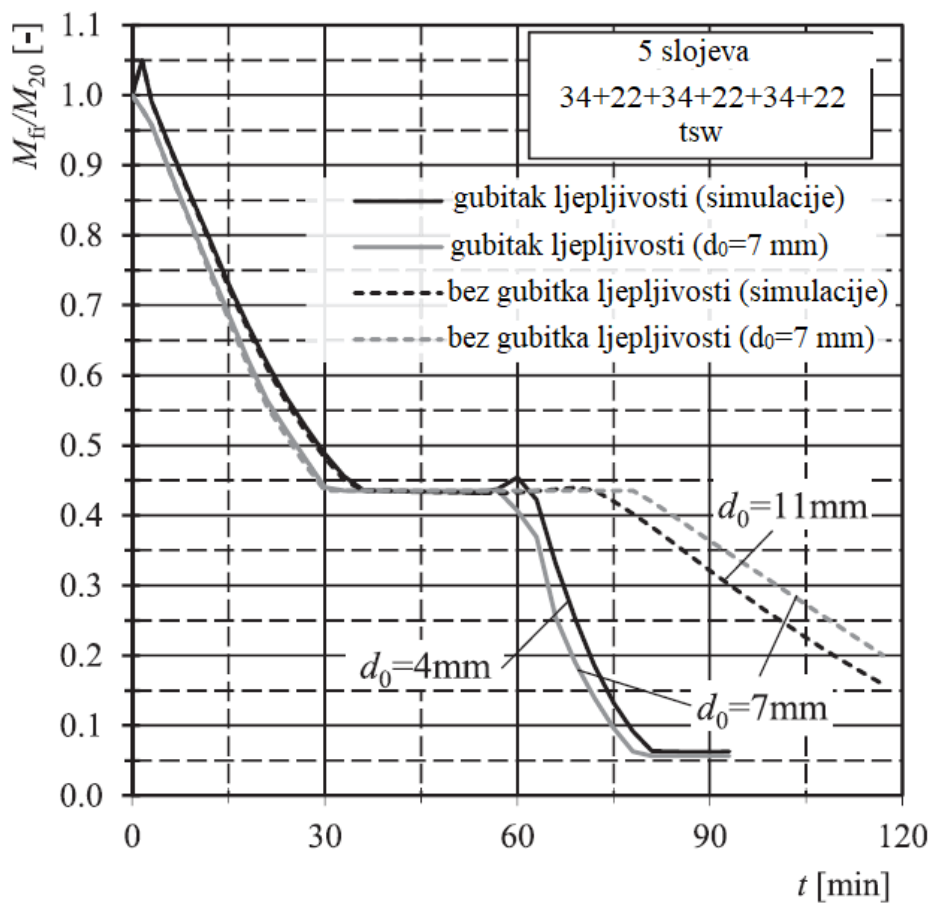
2.3.2 Istraživanje pougljenja i nosivosti CLT elementa u požaru

U istraživanju [6] CLT element bio je izložen standardnom požaru 60 – 130 minuta, a vrijeme između završetka testa i gašenja požara bilo je 90 sekundi. Nakon toga uklonjen je pougljeni sloj te su mjerene reducirane dimenzije poprečnog presjeka kako bi se utvrdila debljina pougljenog sloja. Ta je debljina podijeljena s vremenom izloženosti elementa požaru, kako bi se dobila brzina sagorijevanja. Rezultati mjerenja mogu se vidjeti u tablici 2.4. Može se vidjeti da je standardna devijacija brzine sagorijevanja najviše 9%, dok je najveća razlika srednje i maksimalne vrijednosti debljine pougljenja za test 02 čak 39.6 mm.

Tablica 2.4 Prikaz rezultata ispitivanja brzine sagorijevanja i debljine pougljenog sloja

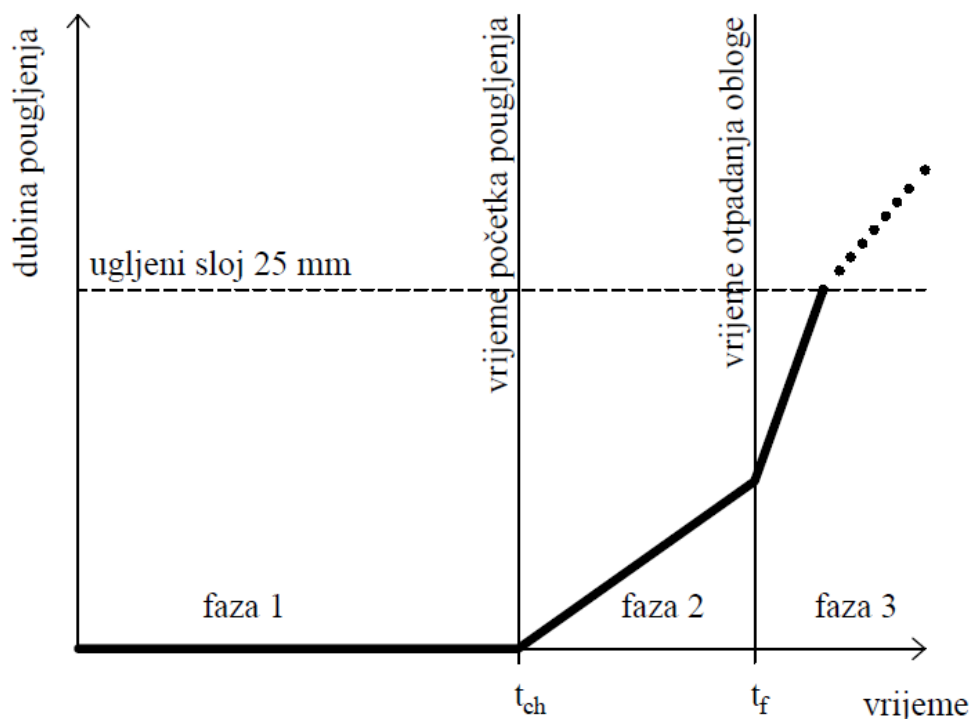
| Test | Vrijeme (min) | Vrijednost brzine sagorijevanja (mm/min) | | | Standardna devijacija | Debljina pougljenja (mm) | | | Broj točaka |
|------|------------------|---|------|---------|--------------------------|-----------------------------|-------|---------|----------------|
| | | Max | Min | Srednja | | Max | Min | Srednja | |
| | | 01 | 60 | 0.98 | | 0.58 | 0.77 | 0.09 | |
| 02 | 120 | 0.98 | 0.46 | 0.65 | 0.09 | 117.6 | 55.2 | 78.0 | 206 |
| 03 | 120 | 1.08 | 0.88 | 1.0 | 0.04 | 129.6 | 105.6 | 120.0 | 206 |

Na slici 2.34 je relativni kapacitet momenta savijanja M_{fi}/M_{20° crnom isprekidanom linijom. Simulacija je rezultirala da je sloj nulte čvrstoće 11 mm za CLT ploče, dok se prema EN 1995-1-2:2004 [8] uzima da je d jednak 7 mm, što prikazano sivom isprekidanom linijom. Razlika između ovih dviju krivulja je precjenjivanje požarne otpornosti za otprilike 10 minuta. Krivulje prikazane punim linijama predstavljaju relativni kapacitet momenta savijanja M_{fi}/M_{20° u slučaju otpadanja pougljene lamele. Uzimanje vrijednosti d jednake 7 mm je konzervativno, jer bi odgovarajuća vrijednost za stvarni temperaturni profil bila 4 mm. Međutim, kako otpadanje pougljene lamele ne može biti zajamčeno, snižavanje vrijednost debljine sloja nulte čvrstoće tamo gdje se ne pojavljuje otpadanje te lamele nije preporučljivo.



Slika 2.34 Prikaz odnosa nosivost - vrijeme za peteroslojni CLT element izložen požaru sa i bez otpadanja pougljenje lamele (gubitka ljepljivosti) [6]

Ako se CLT element zaštititi oblogama bit će spriječeno pougljenje na početku požara. Vidljivo je (Slika 2.35) da faza 2 ne nastupa odmah, nego nakon vremenskog odmaka označenog kao vrijeme početka pougljenja t_h . Nakon što je dosegnuto vrijeme t_f nastupa otpadanje obloge. Kada obloga otpadne, znatno je veći prirast brzine sagorijevanja (puna linija), nego u slučaju inicijalno nezaštićenog elementa (točkasta linija), što je vidljivo u fazi 3. Vremena pougljenja t_h i otpadanja obloga t_f su stoga vrlo važna kao parametri za požarnu otpornost CLT-a. Ona ovise o debljini, gustoći i tipu zaštitnih materijala.



Slika 2.35 Faze zaštite drvenog elementa iza obloge

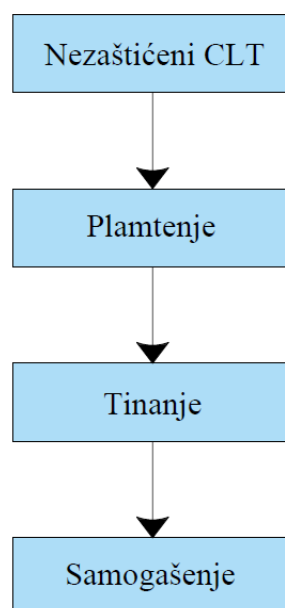
U novoj verziji EC-a početak pougljenja računat će se kao suma vremena zaštite primijenjenih obloga $t_{ch} = \sum t_{prot,i}$ gdje je ta suma zbroj vremena zaštite i -tih slojeva obloge i ovisi o debljini i gustoći materijala. Utjecaj prethodnog i pratećeg sloja uzet je u obzir koeficijentima položaja.

Ako se koristi jedan sloj gipsanih ploča tipa A, odnosno ploča koje nisu vatrootporne, pretpostavlja se da ne postoji zaštitna faza. To znači da se početak vremena pougljenja smatra jednakim vremenu otpadanja ploče. Međutim, primjenom više slojeva gipsanih ploča tipa A postoji jasno vrijeme između početka pougljenja i vremena otpadanja. Za izbjegavanje pougljenja mogu se koristiti ploče tipa K. Primjenjuju se najviše na nosivim strukturama, a definirane su za 10-, 30- ili 60-minutnu zaštitu [6].

2.3.3 Istraživanje samogašenja CLT-a

Za visoke se drvene konstrukcije kao materijal najčešće se odabire CLT pa se nameće pitanje požarne otpornosti zbog njegove zapaljivosti, dok arhitekti i investitori zahtijevaju što veću izloženost drvenih površina. Naime, temeljno je načelo požarne otpornosti da konstrukcija mora podnijeti izgaranje svega što može gorjeti unutar nje. Kako požar nastavlja trajati sve dok gorivi materijal postoji, a CLT gori, ne može sa sigurnošću biti rečeno hoće li sav CLT izgorjeti. Ako konstrukcija i dalje gori, ne može se očekivati da nosivost bude zadržana ili da bude pružena prihvatljiva funkcija razdvajanja, rezultat čega je otkazivanje i urušavanje konstrukcije. Stoga je glavno pitanje hoće li, kada sav gorivi materijal unutar konstrukcije nestane, CLT nastaviti gorjeti ili će se požar postepeno ugasiti?

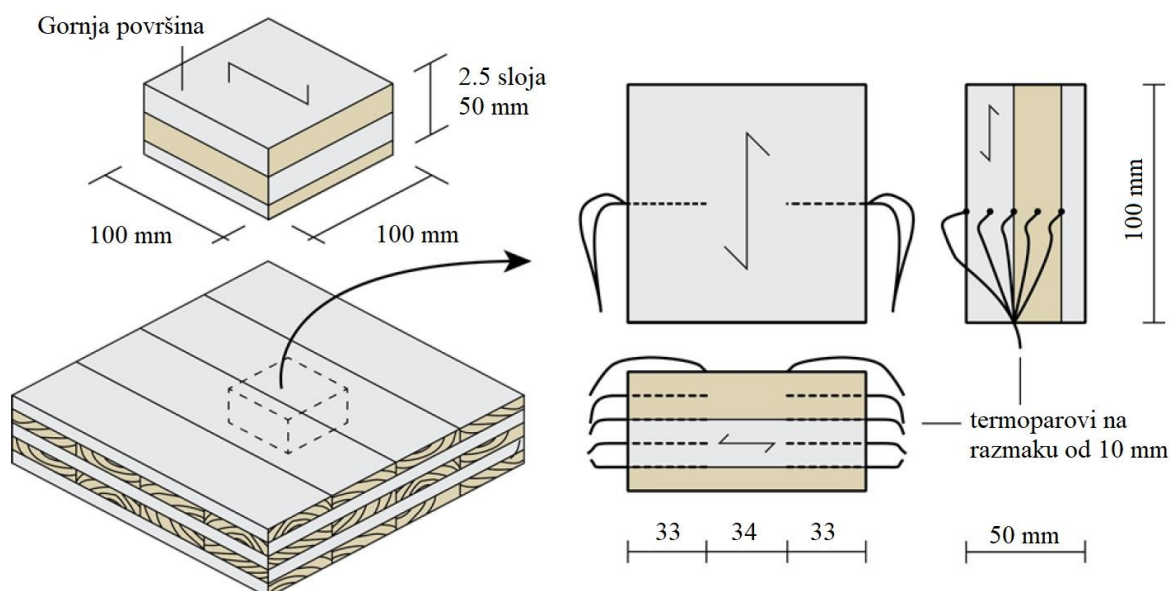
Samogašenje je pojam koji predstavlja postepeni prestanak gorenja CLT-a za čije je postizanje potrebno nekoliko koraka (Slika 2.36). Pod utjecajem "početnog" požara uslijed izgaranja sadržaja odjeljka, očekuje se sudjelovanje izložene CLT konstrukcije u plamenom izgaranju. Gašenje požara započinje nakon što se sadržaj odjeljaka većim dijelom potroši, što rezultira smanjenjem doprinosa CLT-a požaru, potičući njegovu transformaciju iz plamtenja u tinjajuće izgaranje. Nakon toga se CLT može transformirati iz tinjanja u samogasivo stanje. Ispitivanjima je utvrđeno kako na vrhuncu stope gubitka mase plamtenje doprinosi čak 60 % ukupnom gubitku mase, dok oksidacija pougljena doprinosi između 9 % i 12 % [42]. Provedena su dva niza eksperimenata kako bi se istražio model samogašenja i kvantificirali uvjeti pod kojima se ono može dogoditi [25].



Slika 2.36 Proces samogašenja CLT-a

2.3.3.1 Prvi niz eksperimenata

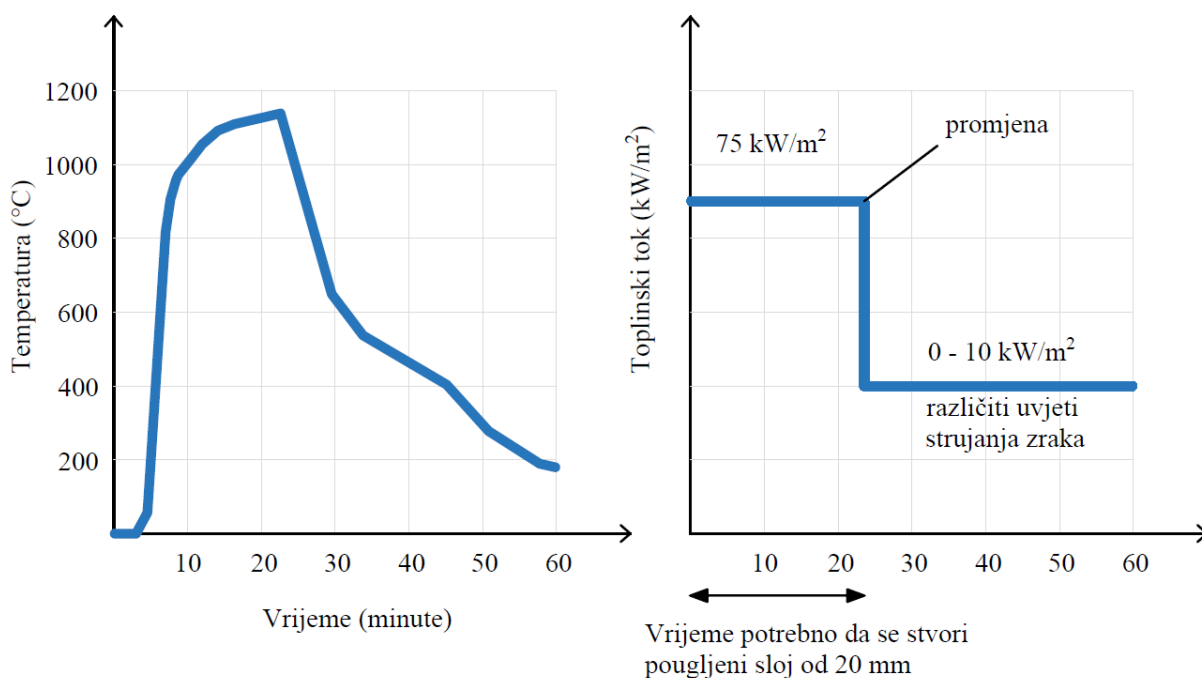
U prvom nizu eksperimenata [25] promatrali su se uvjeti toplinskog toka i protoka zraka kojima uzorak mora biti izložen kako bi došao u samogaseće stanje, ali bez mogućnosti delaminacije. Korišteni su mali uzorci veličine $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ koji su zapravo dio CLT ploče debljine 100 mm (Slika 2.37). Te su ploče izrađene od pet križno uslojenih lamela smreke, debljine 20 mm , razreda C24, zalijepljene poliuretanskim ljepilom. Na svakom su uzorku postavljeni termoelementi kako bi temperatura mogla biti očitana na udaljenostima $10, 20, 30$ i 40 mm od gornje površine. Na taj se način određivala brzina sagorijevanja i razmatrana je mogućnost samogašenja.



Slika 2.37 Uzorci za prvi niz eksperimenata samogašenja CLT-a [25]

Ovakvi su uzorci bili izloženi toplinskom toku u dva koraka koji simuliraju stvarne uvjete izloženosti CLT-a pri požaru (Slika 2.38). Prvi toplinski tok od 75 kW/m^2 predstavlja potpuno razvijen požar. Zadržavan je na istoj razini sve dok pougljeni sloj ne dosegne debljinu od 20 mm , tj. kada termoelementi na toj dubini očitaju temperaturu približnu 300 °C . Nakon toga je uzorak izložen drugom, ovaj puta promjenjivom toplinskom toku između 0 i 10 kW/m^2 , a u nekim slučajevima i dodatnom protoku zraka. Nagli skok u toplinskom toku predstavlja izgaranje cijelog sadržaja odjeljka, pri čemu preostaje samo zračenje svih vrućih predmeta unutar njega. Očekivano je da samogašenje započinje kada toplinski tok padne ispod određene granice. Smatralo se da je uzorak postigao samogašenje kada se izoterma od 300 °C ne bi više širila kroz uzorak i kada bi temperature bile ispod 200 °C te prilikom prestanka gubitka mase

uzorka, a da je uzorak izgorio kada bi termoelementi na dubini od 40 mm pokazivali temperaturu od 300 °C te onda kada bi uzorak konstantno gubio masu.



Slika 2.38 Pristup prvom nizu eksperimenata

Tijekom početne izloženosti toplinskom toku od 75 kW/m^2 uzorci počinju plamtjeti u roku od 10 sekundi. Temperature brzo rastu, no u dubljim slojevima razvoj temperature je sporiji, čime je dokazana pretpostavka da se drvo ponaša kao izolator topline. Nakon 5 minuta već je stvoren dovoljno debeo pougljeni sloj koji je stabilizirao početni strmi pravac gubitka mase i razvoja topline. Nakon 20-ak minuta temperature su na dubini od 20 mm prekoračile vrijednost od 300 °C pa se uzorak prebacio na izloženost drugom toplinskom toku, vrijednosti između 0 i 10 kW/m^2 . Nakon minute uzorak prestaje plamtjeti i počinje tinjati. Granični toplinski tok pri kojemu se postiže samogašenje je od 5 do 6 kW/m^2 . Ako bi uzorak pri toplinskom toku od 6 kW/m^2 bio izložen dodatnom protoku zraka od 0.5 m/s brže bi došlo do samogašenja, no dodatni protok zraka od 1.0 m/s doveo bi do intenzivnijeg tinjanja i izgaranja. Dakle, pri toplinskom toku manjem od 6 kW/m^2 i protoku zraka ograničenom na 0.5 m/s uzorak postiže samogašenje.

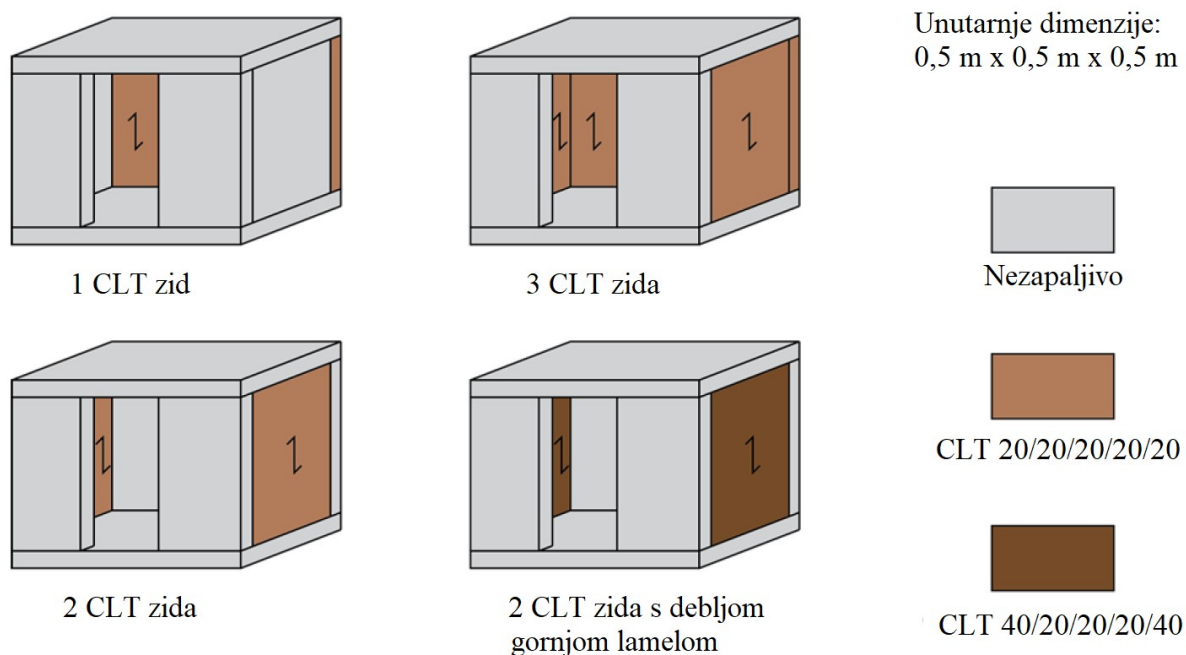
Kako su termoelementi postavljeni na četiri različite dubine u uzorku, u tablici 2.5 prikazane su brzine sagorijevanja na različitim dubinama u prvoj i u drugoj fazi eksperimenta. Kako bi se dobila brzina sagorijevanja i na dubinama od 30 mm i 40 mm, ti uzorci nisu prebačeni na niži toplinski tok [25].

Tablica 2.5 Vrijednosti brzine sagorijevanja na različitim dubinama uzorka od površine izložene požaru

| Iznos toplinskog toka (kW/m ²) | | Dodatni protok zraka u drugoj fazi (m/s) | Dubina (mm) | | | |
|--|------------|--|-------------|------|------|------|
| Prva faza | Druga faza | | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 75 | 75 | - | 1.67 | 0.78 | 0.7 | 0.67 |
| 75 | 10 | - | 1.67 | 0.78 | 0.20 | 0.28 |
| 75 | 8 | - | 1.67 | 0.78 | 0.16 | 0.21 |
| 75 | 6 | - | 1.67 | 0.78 | 0.15 | - |
| 75 | 0 - 10 | 1.0 | 1.67 | 0.78 | 0.48 | 0.56 |

2.3.3.2 Drugi niz eksperimenata

U drugom nizu eksperimenata istražen je model samogašenja, uključujući utjecaj delaminacije, odnosno otpadanja pougljenog sloja. Uzorci su bili oblika malih odjeljaka dimenzija 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m s otvorom širine 0.18 m po cijeloj visini. Pod, strop i prednja strana bili su izrađeni od nezapaljive ploče debljine 20 mm, dok su stražnji i bočni zidovi bili izrađeni ili od CLT elemenata ili od nezapaljivih ploča (Slika 2.39).

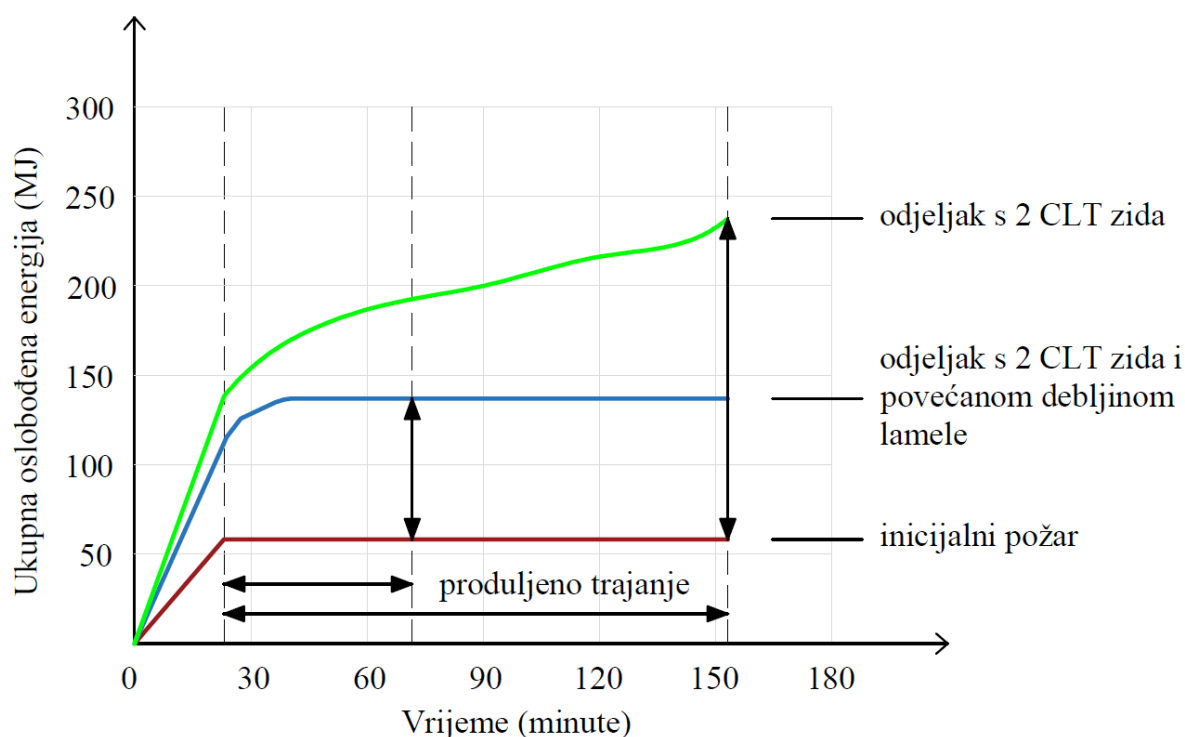


Slika 2.39 Uzorci za drugi niz eksperimenata samogasivosti CLT-a [25]

Odjeljak je bio izložen početnom požaru sve dok uzorci ne bi pougljenili do stupnja koji se očekuje u stvarnom požaru, što iznosi 20 mm, nakon čega je požar zaustavljen. To predstavlja iscrpljenje početnog požarnog opterećenja. Očekivalo se da će CLT neko kraće vrijeme tinjati te se onda ugaziti. Ako bi otpala lamela, CLT element bi ponovno počeo plamtjeti, a nastavio bi tinjati, ako je toplinski tok bio dovoljno visok. Zato su izrađeni odjeljci s različitim brojem CLT zidnih elemenata jer svaki takav element, nakon iščezavanja početnog požara i dalje zrači

toplinu, koja može biti dovoljno velika da uzrokuje nastavak tinjanja. Pomoću termoelemenata očitavala se temperatura na raznim dubinama, kako bi se moglo odrediti u koje vrijeme zaustaviti početni požar te odrediti je li se uzorak ugasio ili izgorio, kao u prvom nizu eksperimenata.

Za lamele debljine 20 mm, odjeljci s dva ili tri CLT zida nisu postigli samogašenje zbog ponovnog plamtenja izazvanog otpadanjem lamele, dok se u odjeljku s jednim CLT zidom postiglo samogašenje. Kada su bili postavljeni zidovi s gornjom lamelom debljine 40 mm, otpadanje lamele nije se dogodilo te je postignuto samogašenje. U ovom radu [25] pokazan je doprinos CLT elementa ukupno oslobođenoj energiji u požarnom odjeljku te trajanju požara (Slika 2.40). Vidljivo je da je doprinos značajan, a dodatno se povećava otpadanjem lamele.



Slika 2.40 Razlika ukupno oslobođene energije

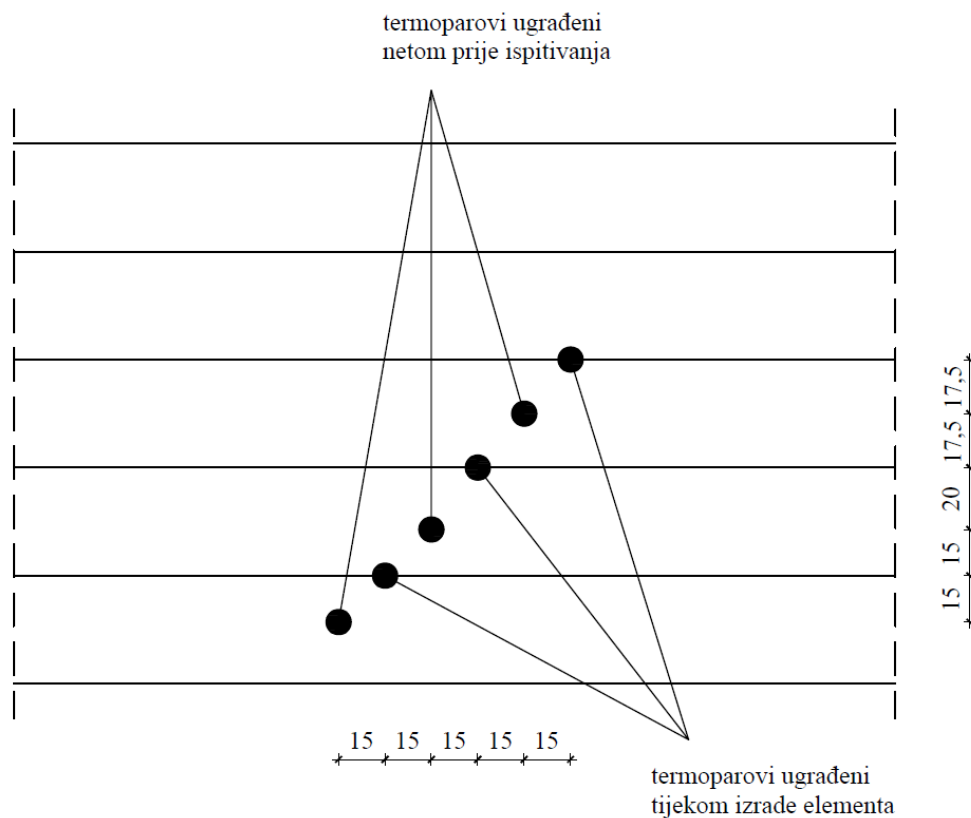
Prosječna brzina sagorijevanja za prvih 20 mm elementa bila je 0.76 mm/min, što je veće od brzine pougljenja od 0.65 mm/min propisane u EN1995-1-2 [8]. To se pripisuje relativno intenzivnom početnom požaru izazvanom u odjeljcima u usporedbi sa standardnim požarom. U onim odjeljcima u kojima nije postignuto samogašenje brzina izgaranja prosječno je iznosila 0.77 mm/min, što je ponovno veće u odnosu na vrijednost u normi, no pripisuje se povećanju pougljenja zbog delaminacije [25].

2.3.4 Istraživanje utjecaja različitih vrsta ljepila na delaminaciju

U prethodno prikazanom ispitivanju [25] pokazano je kako se delaminacija može izbjeći izvođenjem deblje prve lamele, no istražena je i druga mogućnost. Naime, korištenjem odgovarajuće vrste ljepila prilikom proizvodnje CLT elemenata, tj. tijekom lijepljenja slojeva lamela, može se spriječiti proces delaminacije, čime bi se izbjeglo ponovno intenziviranje požara, a ostvarila bi se mogućnost samogašenja [23].

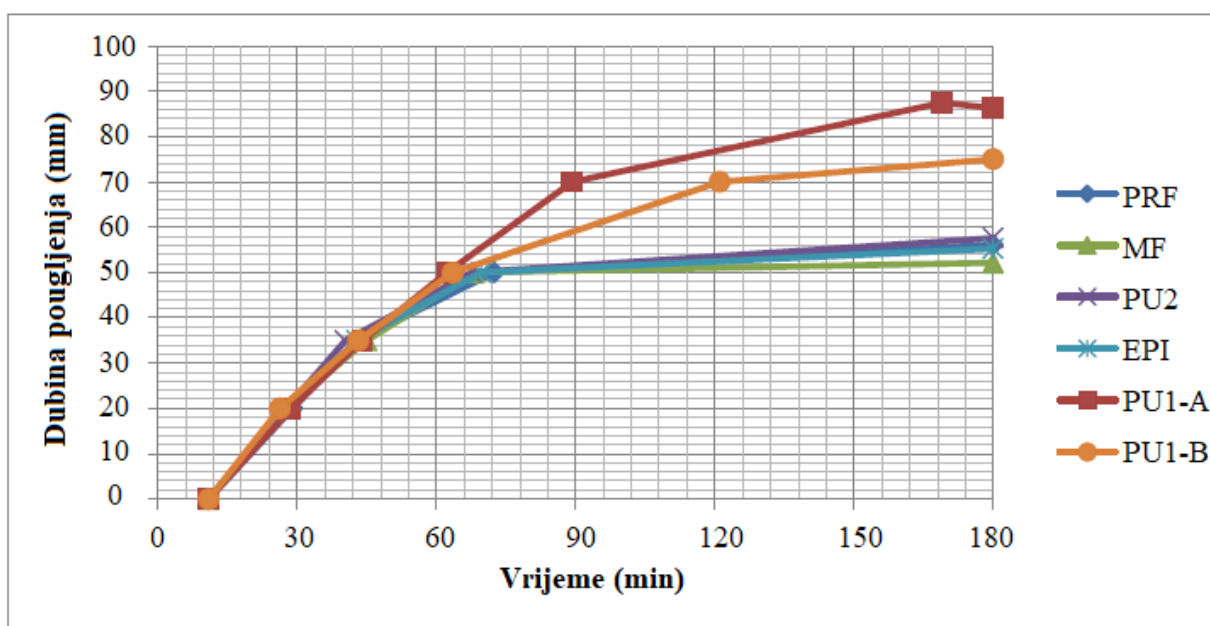
U ispitivanju je korišteno 5 vrsta ljepila: dva jednokomponentna poliuretanska ljepila (PU1 i PU2), melamin-formaldehidno ljepilo (MF), emulzijski polimer izocijanat (EPI) te resorcinol ljepilo (PRF). Uzorci s PU1 ljepilom komercijalne su proizvodnje, dok su uzorci s ostale četiri vrste ljepila napravljeni za potrebe ispitivanja. Sa svakim su ljepilom izrađena i ispitana dva uzorka.

Kako bi se mogla točno odrediti temperatura pri kojoj nastupa delaminacija, termoparovi su postavljeni unutar svake lamele te na dodirnoj plohi dviju lamela (Slika 2.41). Kako je prethodno ovom ispitivanju bilo provedeno ispitivanje jedne od ovih pet vrsta uzoraka u požarnom odjeljku pune veličine, ovi su uzorci ispitani u peći srednje veličine kako bi se uvidjelo dobivaju li se slični rezultati s obje metode.



Slika 2.41 Položaji i razmaci termoparova

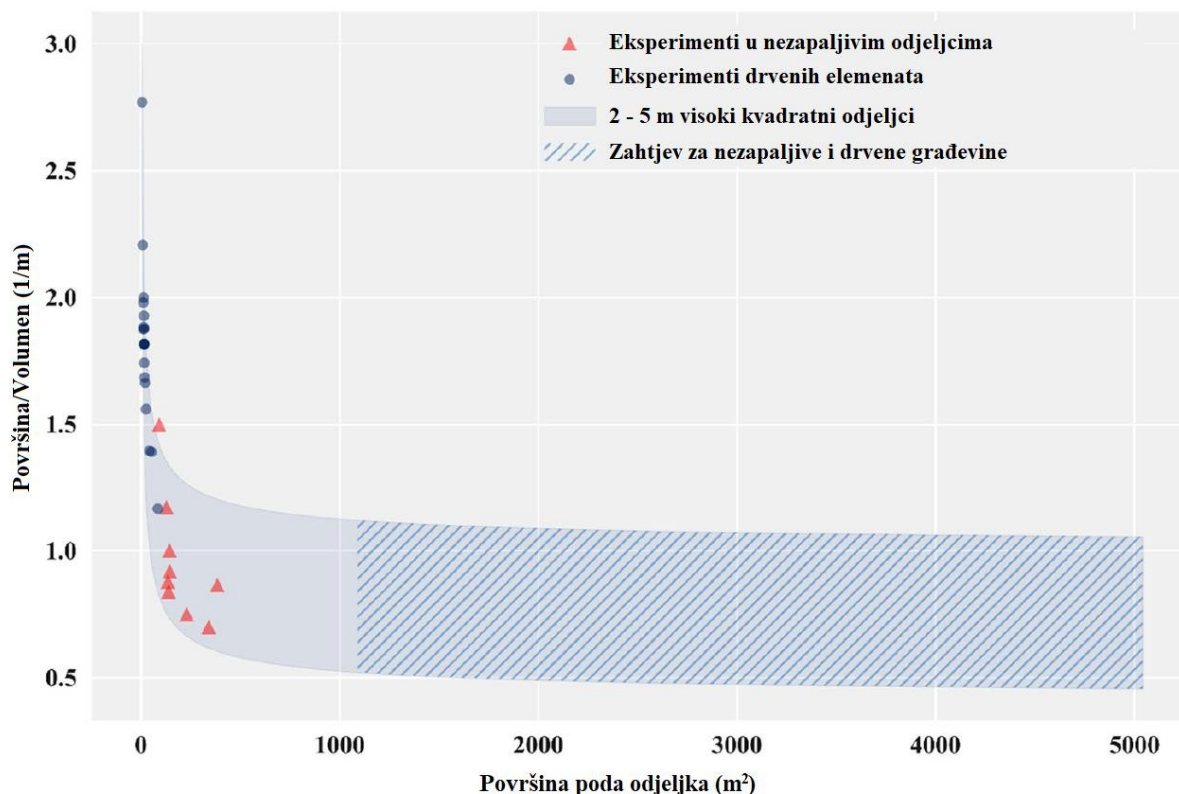
Kada je na spoju dviju lamela bio očit nagli porast temperature, vidljiva je pojava delaminacije. Temperatura naglo poraste jer termoelement nakon delaminacije biva direktno izložen požaru. Tako na uzorcima lijepljenim s PRF, MF i PU2 ljepilima nije uočena delaminacija ni porastom temperature, niti otpadanjem lamele. Na uzorcima lijepljenim s EPI ljepilom nije na prikazu temperature uočen skok koji bi ukazivao na otpadanje lamele, no na snimci se moglo vidjeti kako je veći dio lamele otpao nakon 90 minuta izloženosti. Razlog je tome što je otpadanje lamele nastupilo 40 – 60 minuta nakon što je pougljeni sloj dosegao spojnici lamela. Naime, kritična temperatura delaminacije izmjerena u termoparovima u zoni ljepila bila je između 200 °C i 400 °C, što pokazuje kako delaminacija uglavnom nastupa kada je temperatura blizu temperature pougljenja od 300 °C. Dakle, kod uzorka s EPI ljepilom otpadanje lamele nastupilo je kada je pougljeni sloj već značajno premašio spojnici lamela pa stoga nije očit nagli porast temperature kada je lamela otpala. Kod uzoraka s PU1 ljepilom najprije je otpala prva lamela tijekom faze potpuno razvijenog požara, 45 – 65 min nakon početka požara, dok je u jednom od uzoraka otpala i druga lamela nakon 140 minuta izloženosti. Istraživanje [23] je pokazalo debljinu pougljenja za svaki od uzoraka (Slika 2.42), pri čemu je jasno kako su uzorci s PU1 ljepilom najviše pougljenili, upravo zbog pojave delaminacije.



Slika 2.42 Dubina pougljenja uzoraka s različitim vrstama ljepila [23]

2.3.5 Požarni odjeljci većih dimenzija otvorenog tipa

Današnja ispitivanja u požarnim odjeljcima za drvene elemente ograničena su veličinom. Većina odjeljaka odgovara dimenzijama prosječne hotelske sobe, dok su sve veći zahtjevi za velikim otvorenim prostorima s izloženim drvenim elementima, primjerice uredski prostori. Rackauskaite i sur. [43] u svom istraživanju pokazali su (Slika 2.43) nesklad između danas dostupnih ispitivanja u požarnim odjeljcima te visokih zgrada koje se projektiraju.



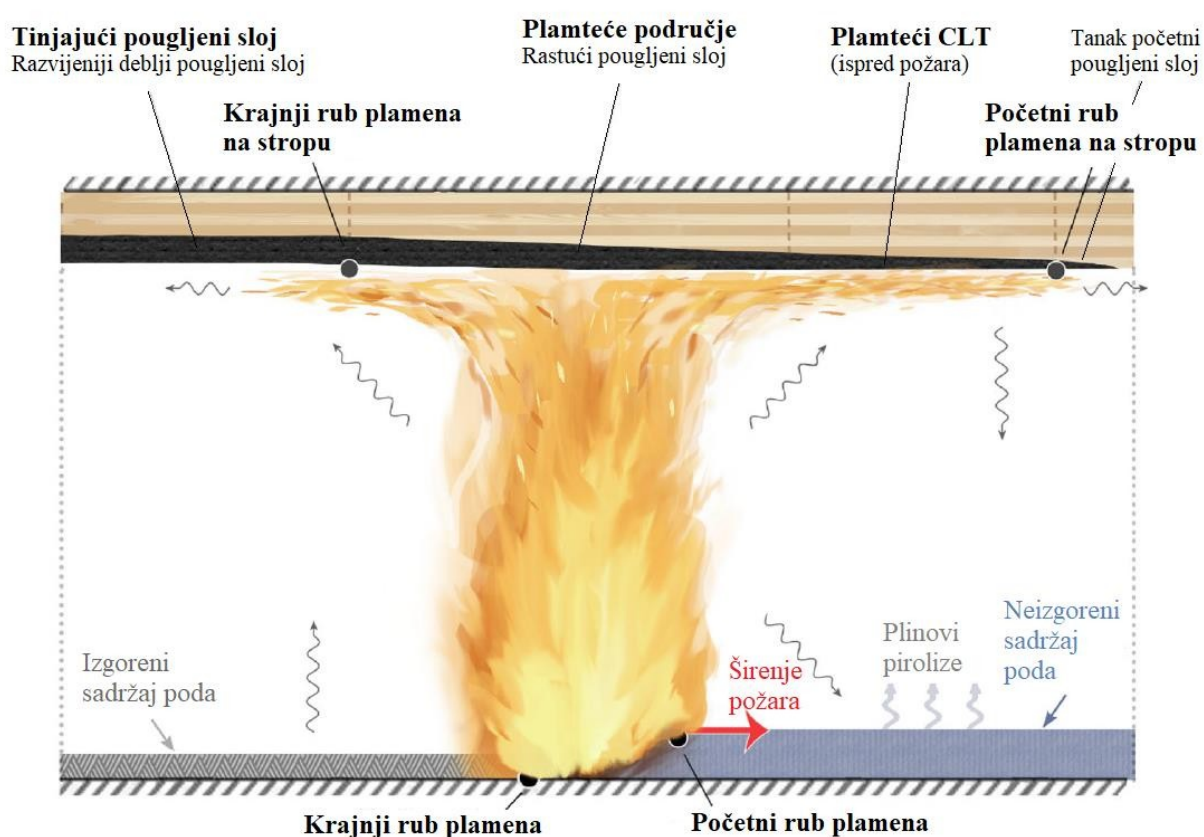
Slika 2.43 Usporedba odnosa površina/volumen drvenih i nezapaljivih odjeljaka, unutar kojih su provedena dosadašnja ispitivanja, s trenutnim zahtjevima za visoke građevine od negorivih materijala i drveta [43]

Ova slika predstavlja porast omjera površine odjeljka i volumena s povećanjem površine poda odjeljka. Što je veći omjer, to je veća vjerojatnost da će se „flashover“ razviti unutar zatvorenog prostora zbog povećanog zračenja zidova. Otvoreni prostori ($1000 - 4000 \text{ m}^2$) za trenutno predlagane drvene zgrade su od 10 do 55 puta veći od drvenih odjeljaka za koje postoje rezultati ispitivanja. Očekuje se da je za njih dinamika požara kompleksnija i drugačija u odnosu na ove manje odjeljke.

U velikim otvorenim odjeljcima promatrani su požari koji „putuju“, odnosno gore lokalizirano te se zatim šire duž odjeljka. U prošlom desetljeću razvile su se metodologije za uzimanje u obzir ovakvih požara i sada su prihvaćene za projektiranje, ali nijedna ne uzima u obzir odjeljke s izloženim drvenim elementima. Oni kao takvi doprinose gorivom materijalu i

povećavaju oslobađanje topline u odjeljku, što značajno utječe na sam tijek požara. Uz to, dodatan učinak ima i delaminacija te ponašanje drveta prilikom gašenja i tinjanja. Zato se nijedna od tih razvijenih metodologija ne može primijeniti na drvene konstrukcije te su potrebna dodatna istraživanja.

Dan je primjer (Slika 2.44) jednog takvog „putujućeg“ požara. Svaka metodologija koja uključuje konstrukciju s izloženim drvenim stropom morala bi uzimati u obzir širenje požara duž stropa. Također bi se trebala uzeti u obzir razlika položaja početnih i krajnjih rubova plamena na stropu u odnosu na one na podu. Uz to postoji mogućnost da se drvo zapali i ispred fronte plamena na podu [43].



Slika 2.44 Prikaz „putujućeg“ požara u odjeljku otvorenog koncepta s izloženim drvenim stropom [43]

2.4 Zaštita drvenih konstrukcija u požaru

Prilikom požara se na drvenim elementima stvara pougljeni sloj, koji je prirodna zaštita od požara, pa bi određena razina vatrootpornosti mogla biti postignuta primjenom elemenata većeg poprečnog presjeka, prema proračunu iskoristivosti nosivosti ili uporabivosti. Međutim, ovakav način požarne zaštite nije uvijek prikladan. Stoga su razvijene mjere zaštite od požara koje se mogu podijeliti u aktivne i pasivne. Aktivne mjere zaštite od požara uključuju opremu i instalacije čije je djelovanje povremeno, odnosno aktiviraju se nakon što se požar detektira. Jedan od primjera su ručni ili automatski uređaji za gašenje požara koji se koriste za suzbijanje požara u prostorijama u početnim fazama [29]. Kategoriji sustava aktivne zaštite od požara pripada sprinkler sustav (Slika 2.45) kojim se, prema tablici 2.3, može za jednu klasu povećati reakcija na požar.



Slika 2.45 Sustav sprinklera kao aktivna zaštita od požara [44]

S druge je strane pasivna zaštita od požara za koju se podrazumijeva kontinuirano i nepromijenjeno djelovanje tijekom uporabe samog objekta. Između ostalog, u sustav pasivne zaštite spadaju razne obloge i premazi. Jedan je način impregnacija drva usporivačima požara ili premazivanje požarno otpornim premazima. Iako brojni premazi omogućuju značajnu zaštitu drva od požara, osjetljivi su na mehanička oštećenja pa su proučavani brojni pristupi potpune impregnacije drva s usporivačima požara. Izazov razvoja prikladnog usporivača požara leži u brojnim zahtjevima njegovih svojstava. Mora biti trajan, odnosno ne smije doći do pogoršanja izdržljivosti ili mehaničkih svojstava, ne smije biti toksičan i doprinositi stvaranju dima te mora biti otporan na ispiranje pri korištenju na vanjskim ploham. Neke vrste usporivača požara sprječavaju izgaranje na način da oslobađaju inertni plin koji razgrađuje prethodno zapaljivu

smjesu plina, odnosno smanjuje se koncentracija kisika u zoni dodira s drvom, koji je potreban za izgaranje. S druge su strane oni usporivači požara koji potiču stvaranje pougljenog sloja, koji je zapravo prirodan način zaštite drva od požara jer smanjuje prodor kisika i topline u unutrašnjost, odnosno u područje netaknutog drveta. U tablici 2.6 dan je pregled elemenata na čijoj su bazi napravljeni do sada korišteni usporivači požara te su dane njihove glavne karakteristike [45].

Tablica 2.6 Pregled elemenata na čijoj su bazi napravljeni usporivači požara te njihove glavne karakteristike

| Baza usporivača požara | Karakteristike |
|-------------------------------------|--|
| Bor | Stvaranje zaštitnog sloja koji smanjuje prijenos topline, kisika i zapaljivih plinova Ispuštanje vode kristalizacije Štetnost za reproduktivni sustav |
| Halogeni elementi | Najčešće brom i klor Reduciraju toplinu Smanjuju širenje plamena Moguće bromiranje drva čime se povećava otpornost na ispiranje Štetnost zbog akumulacije elemenata u tijelu i okolini |
| Dušik | Razrjeđuje zapaljivi plin čime smanjuje koncentraciju kisika i reducira izgaranje Snižava temperaturu |
| Kombinacija dušika i fosfora | Ubrzavanje pougljenja čime se stvara zaštitni sloj Djelotvornost fosfornog spoja proporcionalna kiselosti, no veća kiselost reducira mehaničku stabilnost Učinkovitost organskih kemikalija fosfora |
| Hidroksidi i karbonati | Najčešće magnezij i aluminij Njihova endotermna razgradnja hladi drvo čime usporava proces izgaranja Oslobađanje CO ₂ ili vode čime se razrjeđuju zapaljivi plinovi Stvaranje zaštitnog sloja od ostataka oksida U kombinaciji sa silanima smanjeno ispiranje kalijevog karbonata |
| Silikati | Usporavanje požara punjenjem lumena nezapaljivim materijalom Prodiranjem u materijal stvaraju zaštitni sloj u slučaju povišenih temperatura |

Još jedna podjela usporivača požara je na organske i na topive u vodi. Organski topive impregnacije prodiru duboko u drvo, čime se postiže najbolji učinak. Usprkos tome, velik im je nedostatak što se sastoje od otapala koja su lako zapaljiva pa se koriste samo u proizvodnim pogonima. Uz to imaju nisku ekološku prihvatljivost jer mogu biti štetni za zdravlje pa se ne primjenjuju u stambenim prostorima. S druge su strane vodotopive impregnacije koje se najčešće koriste za stambene prostore jer se brzo suše, nemaju miris i ne štete zdravlju. Njihov je nedostatak što prodiru samo u površinski sloj drva i štite površinski te nemaju svoj učinak ako je konstrukcija u čestom kontaktu s vlagom [46]. Kada su izloženi velikoj vlazi, usporivači požara počnu migrirati iz unutrašnjosti drva prema njegovoj površini i u konačnici mogu u

potpunosti ispariti. Ovaj učinak najviše dolazi do izražaja na vanjskim ploham na kojima je obnovu ove vrste zaštite potrebno činiti svakih desetak godina [6]. Kako bi se spriječilo isparavanje usporivača požara pri povećanoj vlazi, preporuča se korištenje vodootpornih premaza kao dodatnog završnog sloja. Drugi je način povećanja otpornosti na vlagu dodavanje organskih i organoelementarnih tvari niske viskoznosti i vodoodbojnih svojstava u impregnacijske smjese [29].

Nedavna istraživanja pokazuju kako je kombinacija fosfora i dušika najprimjerenija za usporivače požara. Novim tehnologijama moguć je razvoj tretmana atmosferskom plazmom, odnosno impregnacije plazmom. Sljedeći prirodni pristup drvu kao materijalu, usporivači požara na bio bazi mogu biti održiva opcija u budućnosti [45]. Razvoj prikladnih usporivača požara važan je jer omogućuje prelazak u dvije stepenice veću klasu reakcije na požar prema tablici 2.3, a omogućuje i veliku estetsku prednost ostavljanjem drvenih ploha izloženima (Slika 2.46).



Slika 2.46 Primjena usporivača požara [47]

Druga je pak mogućnost korištenje protupožarnih ploča ili drvenih obloga koje formiraju zaštitne membrane. Zaštita koju pružaju negorivi paneli ovisi o nekoliko međusobno povezanih svojstava: toplinskoj izolaciji, sposobnosti ploče da se ne raspadne ili ne otpadne nakon dehidracije, otpornosti na skupljanje, sposobnosti osnovnog materijala da se odupire otklanjanju s površine izložene požaru tijekom ekstremne izloženosti. Zaštitno vrijeme je korišteno da se uzme u obzir i doprinos materijala funkciji razdvajanja. Otpadanje ploče obloge

ovisi o položaju i duljini pričvrstnih sredstava i termalnoj degradaciji same ploče. Sidrena duljina pričvršćivača u nepougljeno drvo može biti jednostavno izračunata korištenjem dubine pougljenja. Granična duljina sidrenja u nepougljeno drvo je 10 mm i pretpostavlja se da kao takva osigurava da ploča ne otpadne za zahtijevano vrijeme požarne zaštite [6]. Dodatno je za povećanje izolacijskog učinka moguće umetanje i izolirajućeg sloja od kamene, mineralne ili staklene vune [48]. Povećanjem broja slojeva ili debljine obloge povećava se požarna otpornost drvene konstrukcije. Najčešće su korištene ploče na bazi cementno-silikatnih veziva, vermikulitne ploče na bazi tekućeg stakla, negorive ploče od bazaltnih vlakana i ploče kamene vune [29].

Primjer je kalcij-silikatna ploča tvrtke PROMAT (Slika 2.47) dostupna u debljinama od 12 mm do 30 mm, koja se prema tablici 1 svrstava u klasu A1, odnosno u požaru se ponaša kao negorivi materijal.



Slika 2.47 PROMAT protupožarna ploča CLT

CLT (eng. Cross Laminated Timber) je kruti pločasti sustav sastavljen od uglavnom neparnog broja slojeva (3, 5 ili 7) (Slika 2.48). Svaki se sloj sastoji od lamela položenih jedna do druge, dok su lamele svakog sloja međusobno okomite, odnosno pod kutom od 90° . Ovakva mu struktura omogućuje veliku krutost i nosivost u ravnini i okomito na ravninu elementa zbog čega se sve više primjenjuje u gradnji drvenih konstrukcija. Uz to mu je velika prednost i jednostavnost uporabe [49].

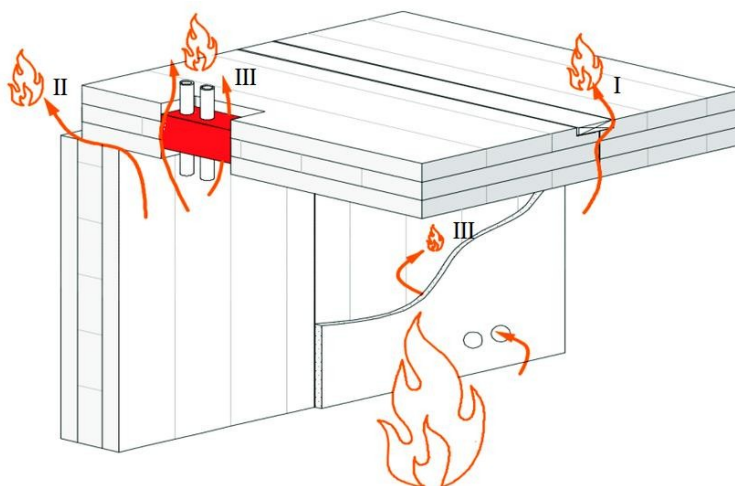


Slika 2.48 Križno lijepljeno lamelirano drvo (CLT) [50]

Uporabom CLT elemenata postižu se vrlo dobre funkcije razdvajanja i nosivosti što su dva vrlo bitna svojstva prilikom požara. Prema klasifikaciji reakcije na požar, danoj u tablici 2.3, CLT sustav može biti klasificiran kao D-s2,d0, dok je vrijeme otpornosti na požar uobičajeno 120 minuta.

Kako bi bila postignuta što bolja funkcija razdvajanja, odnosno kako bi širenje požara unutar građevine te na okolne objekte bilo spriječeno, potrebno je prilikom projektiranja obratiti pozornost na detalje spojeva elemenata. Za građevine od CLT-a mogu se identificirati tri načina širenja plamena [6], a to su (Slika 2.49):

- I. spojevi u i između elemenata,
- II. spojevi u kutnim i drugim priključcima građevine te
- III. spojevi zbog servisnih instalacija i prodora.



Slika 2.49 Putevi širenja plamena za građevine koje koriste CLT elemente [6]

Ponašanje CLT-a i GLT-a prilikom sagorijevanja može biti znatno drugačije od ponašanja piljene građe. Razlog leži u slojevitoj lijepljenoj strukturi i spojevima između dasaka što može dovesti do lokalnog povećanja pougljenja koje je kod ovakvog pločastog elementa zanemarivo pa je vrlo pogodan za ispitivanje varijabilnosti pougljenja. Pougljenje može biti mjereno nakon požarnog testa pri čemu treba paziti da vrijeme između prestanka i gašenja požara bude svedeno na minimum, kako bi se reduciralo pougljenje u nekontroliranim uvjetima. Drugi je način određivanje brzine izgaranja mjerenjem temperature pomoću termoelemenata. Ovdje je pozornost važno posvetiti broju i rasporedu žica za mjerenje. Kako je drvo slabo provodljiv materijal, a mjerenja se rade s provodljivim metalnim sensorima, ti senzori moraju biti orijentirani paralelno s izotermama kako ne bi došlo do odstupanja prilikom mjerenja [6].

2.5 Metoda konačnih elemenata (MKE) u drvenim konstrukcijama

U posljednje vrijeme, povećan je broj ispitivanja drvenih elemenata u požaru u velikom i malom mjerilu, ali numerički modeli izrađeni su samo za mali broj testiranih elemenata. Paralelno sa eksperimentalnim ispitivanjem, razvijaju se i napredne metode proračuna. Uvidom u stanje područja vidljivo je da je numeričko modeliranje provedeno s nekolicinom komercijalnih softverskih paketa, ali upute i izvješća nisu opsežna i detaljna. Općenito, izračunate deformacije, vrijeme otkazivanja i modovi loma prilično su se slagali s eksperimentima, ali neki specifični fenomeni poput klizanja između lamela ili delaminacije elemenata još uvijek nisu istraženi. Sve to upućuje da područje numeričkog modeliranja drvenih elemenata u požaru i dalje nudi brojne mogućnosti za daljnji razvoj. U uputstvima COST akcije FP1404 [51] dani su postupci numeričkog modeliranja TCC konstrukcije s različitim komercijalnim programskim paketima; ANSYS, SAFIR, COMP - WOOD i ABAQUS. Uz to, na kraju svakog odjeljka dan je kratki sažetak koji uključuje preporuke, smjernice i uobičajene pogreške za numeričko modeliranje odgovarajućim programskim paketom, kako bi se omogućila lakša uporaba za istraživače, studente i inženjere. Što se tiče SAFIR-a, posebnu pažnju treba obratiti na veličinu mreže konačnih elemenata u termalnoj analizi koji uvelike utječu na rezultate proračuna, dok se simulacija u COMP-WOOD programskog paketa treba temeljiti na detaljnom fizičkom opisu svi konstitutivnih elemenata. Nadalje, toplinska svojstva drva mogu se uzeti u skladu sa EC standardima [8], dok se za drvo pri vlačnom i tlačnom naprezanju preporuča uporaba bi-linearnog modela [52]. U Abaqusu pak treba uzeti u obzir termo-mehaničke rubne uvjete i opterećenja, kako bi se pravilno procijenile očekivana nosivost datog sustava. Ključnu ulogu predstavlja uporaba kohezivnih kontakata, u cilju što vjernije reprodukcije mehanizama loma. Jedan u glavnih problema je simulacija ponašanja ljepila pri povišenim temperaturama. Također je važno napomenuti da su proračuni za raspodjelu temperature iza pougljenog sloja, pokazali nižu temperaturu od temperature izračunate pomoću jednadžbe prijenosa topline.

Werther i sur. dali su pregled stanja područja [53] vezano za modeliranje drva u požaru sa različitim programskim paketima. Usporedba je napravljena između Ansys-a, Abaqus-a i Safira gdje je proučavan je utjecaj veličine mreže konačnih elemenata, vremenskog koraka i dvaju pristupa modeliranju utjecaja vlage na točnost modela. U SAFIRU je napravljena analiza konstrukcija pod ambijentalnim i povišenim temperaturama, a toplinske i mehaničke karakteristike materijala su već dostupne, no moguća je i samostalna izmjena. ANSYS rješava strukturalne probleme, dinamiku fluida, akustične, termodinamičke i elektro-magnetne

probleme te njihovu kombinaciju, a za toplinsku i strukturalnu analizu unose se materijalne karakteristike i uvjete prijenosa topline, opterećenja, geometriju, veličinu mreže konačnih elemenata, svojstva elementa i algoritme rješenja. Potrebno je vrlo iscrpno razumijevanje pozadine softwera i sistema koji se modelira. ABAQUS-u se može provesti jednostavna analiza prijenosa topline, a da se ne zahtijeva posebno specificiranje mnogih fizikalnih pojava poput izgaranja i pougljenja drva. Fenomeni poput migracije vlage, stvaranja ugljena, skupljanja i pucanja pougljenog sloja predstavljaju se prilagodbom efektivnih vrijednosti umjesto korištenjem stvarnih izmjerenih svojstava materijala koji bi zahtijevali komplicirane algoritme – velik napor za unos podataka. Utjecaj temperature na ponašanje uzorka implementiran je u alate programskih paketa definiranjem materijala preko njegovih termofizičkih parametara koji upravljaju postupkom provođenja topline. U sva tri programska paketa termalne karakteristike implementirane su dvjema odvojenim postupcima koji su različito razmatrali uključivanje početnog sadržaja vlage. Češći pristup je pomoću toplinske vodljivosti, specifične topline i gustoće s implicitnim razmatranjem sadržaja vlage od 12 % u funkciji gustoće kao topline isparavanja. Specifični toplinski kapacitet definira se kao količina topline koja je potrebna jediničnoj masi tvari za promjenu temperature od 1 °C, a jedinica je (kJ/kgK). U slučaju drva postoji maksimum u zabilježenim vrijednostima specifične topline, najčešće uzetog između 99 °C i 120 °C. Na taj način uzima se u obzir latentna toplina isparavanje vode iz drveta. Alternativno se sadržaj vlage može eksplicitno smatrati kao latentna toplina ili entalpija za sadržaj vlage koji je odredio korisnik. U ANSYS-u i ABAQUS-u unose se karakteristike materijala ručno, dok se u SAFIR-u ova značajka automatski implementira. Pokazalo se da povećanjem veličine mreže konačnih elemenata dolazi do odstupanja u rezultatima u različitim programskim paketima. Odstupanje je najizraženije za raspon temperatura od 100 do 500 °C i više na malim dubinama, u usporedbi s dubljim područjima unutar presjeka. Povećanje veličine mreže konačnih elemenata (1 mm do 6 mm) rezultiralo višim temperaturama za ANSYS i nižim temperaturama za ABAQUS u temperaturnom rasponu 100 - 150 °C. To pokazuje da različite tehnike rješavanja prisutne u svakom programu utječu na rezultate simulacije. Međutim, sve temperature su prihvatljiva aproksimacija stvarnih rezultata požarnih ispitivanja. Utjecaj veličine vremenskog koraka je također analiziran. Kada je porast temperature velik, potrebni su manji koraci za osiguranje konvergencije. Daljnje istraživanje pokazalo je da se vremenski koraci do 480 s mogu koristiti bez značajnog gubitka u točnosti. Neznatne razlike bile su najzastupljenije u ranoj fazi izloženosti požaru, gdje je porast temperature bio brz. Konačno, izbor programskog paketa može utjecati na izračun brzine pougljenja, ovisno o željenom vremenu otpornosti na požar. Pri numeričkoj simulaciji protoka

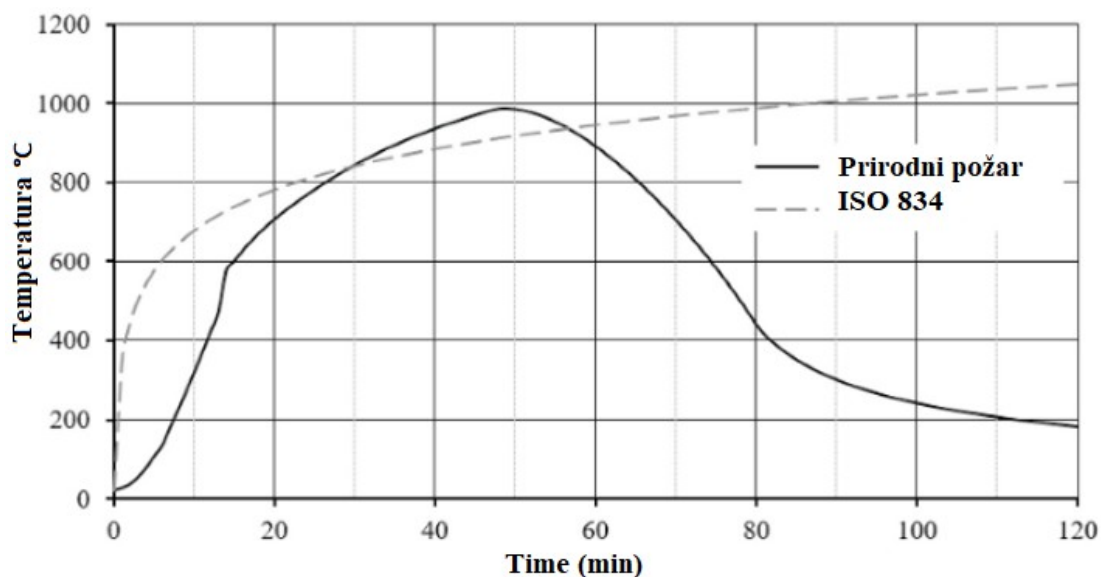
topline (1D) s veličinom mreže 6 mm i pristupom k - ρc pokazuje da ANSYS daje rezultate o dubini ugljena od 21 mm pri 30-minutnoj izloženosti požaru, dok ABAQUS pokazuje dubinu pougljenja od 24 mm. Nakon 60 minuta dubine pougljenja razlikuju se za oko 1 mm. Ovo odstupanje nestaje s malim veličinama mreža i povećanjem protoka topline.

Prilikom istraživanja drvenih kompozitnih sustava pri požaru [54], vidljivo je da iako sustavi rebrastih ili sandučastih ploča s oblogom podnose veća opterećenja, zbog redukcije veličine elemenata, imaju lošije ponašanje u požaru. Proračun metodom efektivnog poprečnog presjeka prema EC5 [8] dao je dobre rezultate u usporedbi s ispitivanjem. Ipak, numeričko modeliranje je poželjno za kompleksnije probleme jer su ispitivanja skupa i zahtijevaju puno rada. U studiji je napravljeno modeliranje u ABAQUS-u postepeno nadograđujući model od 1D do 3D sustava, a za potvrdu su korišteni ANSYS i SAFIR. Prvo je provedena termalna analiza da se dobije temperaturni profil, a zatim analiza naprezanja koristeći temperaturni profil kao ulazni podatak u strukturalni model. Ovo je moguće jer su naprezanja u drvu ovisna o temperaturnom profilu, no obrat ne vrijedi; temperaturni profil neovisan je o napreznjima pa se može izvesti kao zaseban korak. Prilikom modeliranja uzete su u obzir fizikalne i kemijske promjene koje nastaju prilikom izgaranja drva, poput kretanja vlage, pougljenja i skupljanja. Te efektivne vrijednosti također obuhvaćaju mnoge učinke drugog reda i omogućile su pojednostavljeno modeliranje prijenosa topline kroz drvo, a daju dobru aproksimaciju stvarnog ponašanja drva. Drvo se u vlaku ponaša krto, a u tlaku pokazuje elasto-plastično ponašanje. Utvrđeno je da se u ovoj fazi modeliranja predviđanje požarne otpornosti dobro poklapa s eksperimentalnim rezultatima.

Ponašanje tradicionalnog spoja lastinim repom u požaru proučavali su Regueira i sur., gdje su pokazali da pri požaru drveni elementi doživljavaju termalnu degradaciju koja transformira materijal [55]. U numeričkoj analizi, termalne karakteristike materijala preuzete su iz Annexa B, EC5 [8]. Mreža konačnih elemenata definirana je u obliku kvadratnih elemenata, s 8 čvorova i jednim stupnjem slobode (temperaturnim). Veličina konačnog elementa varirala je od 8 mm u središtu tijela do 2 mm u zonama klina i utora, gdje je primijenjeno automatsko prilagođavanje mreže, dok su kontakti između greda definirani su kao lijepljeni. Toplinska djelovanja zadana su kao toplinski tok koji je zbroj konvekcije i radijacije. Za strukturalni model uzeto je u obzir ovisnost modula elastičnosti i čvrstoće o temperaturi, dok Poisson-ov koeficijent, modul posmika i koeficijent trenja ne ovise o temperaturi. Zanimljiv zaključak je da se rezultati dobiveni toplinskim modelom vrlo malo mijenjaju ako se mijenja metodologija mreže, međutim razlikuju se prilično ako se promijeni formulacija kontakata.

Modeliranje ponašanja CLT-a u požaru koristeći ABAQUS moguće je koristeći vremenski i prostorno ovisan toplinski tok za 2D i 3D probleme [56]. Uz to, korištenje potprograma *Umatht* za definiranje termalne konstitutivne jednačbe zahtjeva sljedeće varijable; unutarnja toplinska energija po jedinici mase „ U^* “, varijacija „ U^* “ s obzirom na temperaturu, varijacija „ U^* “ s obzirom na prostorne gradijente temperature, vektor toplinskog toka $q=f.n$, varijacija „ f^* “ s obzirom na temperaturu. Ovako izrađen model pokazuje dobro poklapanje razvoja temperatura i pougljenog sloja s eksperimentalnim ispitivanjem.

U svojoj studiji [57] Szasz i sur. su analizirali ponašanje spojeva u drvenim elementima pri požarnom opterećenju. U analizi su korištena dva različita požarna opterećenja (Slika 2.50), prirodna krivulja požara kreirana programskim paketom „Ozone“ i standardna krivulja požara (ISO 834). U zadnjoj fazi modificirani su ulazni parametri i definiran je njihov utjecaj na rezultate. Na temelju analize procijenjen je učinak primijenjene krivulje požara na dimenzije drvenog elementa. Simulacije su pokazale da je prirodna krivulja požara koja je kreirana u skladu sa stvarnim parametrima i nižim temperaturama u ranim fazama požara, rezultirala većom otpornošću gdje je gotovo udvostručilo izračunate dobivene prema EC5 [8]. Standardi dopuštaju upotrebu ovih vrsta krivulja, a rezultati su pokazali da postoje slučajevi kada to može biti učinkovitiji način za projektiranje drvenih konstrukcija u požaru. To možda nije uvijek slučaj, jer se požarna opterećenja razlikuju ovisno o konstrukciji i samoj uporabi, ali ovo istraživanje pokazuje primjer takvog slučaja, kako bi se povećala svijest među inženjerima. Iako su simulacije s krivuljom požara ISO 834 nužne prilikom usporedbe ili optimizacije proračuna, upotreba specifičnih krivulja požara može biti nužna u nekim slučajevima kada je smanjenje težine ili troškova presudno.



Slika 2.50 Prirodna i ISO 834 požarna krivulja

U svom istraživanju [58] Abu i sur. opisuju analize koje provode na sekvencijalnom modelu kompozitnog drvenog poda izloženog požaru. Za drvo su definirana odgovarajuća toplinska svojstva, koja su određena eksperimentalnim rezultatima. Utvrđeno je da se numeričkim modeliranjem dobro predvidjelo deformiranje sustava, ali model je bio konzervativan pri predviđanju vremena otkazivanja. Zaključeno je da modifikacije materijalnih karakteristika u ulaznim podacima, poput smanjenja vlačne čvrstoće pri povišenim temperaturama, imaju značajan utjecaj na rezultate modeliranja.

Objavljeni su neki vrlo detaljni radovi u vezi s požarnim ispitivanjem i modeliranjem drvenih spojeva pomoću kapaciteta super-računala [59], gdje su predložene nove formule za predviđanje požarne otpornosti [60]. Novi cilj istraživača postao je korištenje umjetne inteligencije (AI) za procjenu otpornosti na požar [61]

U svom radu [62], Racher i sur. su izradili trodimenzionalni model konačnih elemenata koji je razvijen za analizu ponašanja spojeva trnovima u drvenim konstrukcijama. Ovaj pristup modeliranja proveden je u programskom paketu „Marc“, koristeći kvadratnu mrežu konačnih elemenata s 20 čvorova. Ovaj vrsta elementa odabrana je nakon provjere različitih tipova konačnih elementa s različitom gustoćom mreže konačnih elemenata. Na ovaj način ostvarena je ravnoteža između učinkovitosti (vrijeme proračuna) i preciznosti rješenja. Opisan je 3D mehanički i termalno-fizikalni model. U mehaničkom modelu razmatra se plastičnost materijala, koristeći Von Misesov kriterij za čelik i Hill-ov kriterij za drvo. Nakon toga vrši se termalna i mehanička validacija predloženog modela u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima u normalnim i požarnim situacijama. Dakle, veza drvo-drvo i čelik-drvo ostvaruje se trnovima promjera 12 do 20 mm, uzimajući u obzir vlačno opterećenje paralelno sa vlakancima. Parametarska analiza, temeljena na numeričkom modelu, radi se u cilju procjene utjecaja debljine drvenog elementa na smanjenje nosivosti spojeva. Zaključeno je da su razlike između izmjerenog i predviđenog vremena otkazivanja, manje od 10 %. Rezultati termalne analize također se podudaraju sa mjerenim podacima pomoću termoelemenata, posebno za spojeve drvo-drvo. Ova studija se može koristiti kao osnova za daljnji teorijski razvoj kako bi se opravdale pojednostavljene metode koje će inženjeri koristiti u praksi.

Slično istraživanje [63] proveli su Erchinger i sur. gdje su na temelju opsežne eksperimentalne i numeričke analize, predstavili model za izračun požarne otpornosti višereznih spojeva drvo-čelik prilikom vlačnog naprezanja. Model je u analogiji s metodom reduciranog poprečnog presjeka prema EN 1995-1-2 [8]. Predloženi proračunski model uzima u obzir različitu geometriju veze i utjecaj čeličnih elemenata na raspodjelu temperature u presjeku. Numerička analiza provedena je u ANSYS-u. Transfer vlage u drvu je zanemaren. U

termalnoj analizi, pougljenje drva (tj. smanjenje presjeka) uzimalo se u obzir postupnom promjenom toplinskih svojstava drva s porastom temperature. Opsežna numerička analiza pokazala je da čelične ploče s prorezima i čelični trnovi utječu na sagorijevanje drvnih dijelova i raspodjelu temperature u preostalom presjeku.

Performanse i ponašanje laganog drveta izloženog požaru istražio je Twomey [64]. Lagana drvena konstrukcija jedan je od najčešćih oblika stambene gradnje u SAD-u. Nezaštićeni lagani konstrukcijski elementi od drva su izuzetno osjetljivi na visoke temperature. U razvoju ovog modela, metoda konačnih elemenata i modeli konačnih razlika korišteni su za istraživanje pojave ugljenog sloja u požaru. Modeli konačnih razlika istraženi su kao alternativa modelima konačnih elemenata jer formulacije konačnih razlika nisu zahtijevale posebne programe. Numerička analiza provedena je u ANSYS-u. Nakon validacije oba numerička pristupa za izračunavanje dubine pougljenog sloja prilikom izloženosti ASTM E-119 krivulji, modeli MKE i MKR korišteni su za istraživanje performansi drvenih elemenata prilikom izloženosti prirodnom požaru. Utjecaj krivulje normalnog požara postaje sve očitiji kada se uspoređuje vrijeme otkazivanja (ASTM E-1119) za drvene grede i stupove. To ukazuje na osjetljivost modela sa porastom temperature u vremenu i ističe važnost preciznog definiranja intenziteta i trajanja izloženosti požaru za analizu mehaničkih karakteristika u požarnim uvjetima. U konačnici, izloženost požaru i početni uvjeti opterećenja odigrali su ključnu ulogu u predviđanju vremena otkazivanja laganih drvenih elemenata.

Provedeno je numeričko istraživanje [65] s ciljem utvrđivanja preostalog presjeka, čvrstoće i krutosti „I“ drvenih greda podvrgnutih ISO 834 standardnoj požarnoj krivulji. Parametri modela uzeti su iz EN 1995- 1-2 [8] za I-nosače prilikom savijanja gdje je vlačna pojasnica na požaru izloženoj strani. Pretpostavljalo se da su I-grede integrirane u podne sklopove koji se sastoje od greda, obloge od gipsanih ploča ili ploča na bazi drveta, šupljine potpuno ispunjene s izolacijom od stijena ili staklenih vlakana tipa „batt“ i podnom oblogom. Prijenos topline i strukturalna analiza su provedene kako bi se proučio utjecaj obloga na brzinu pougljenja i smanjenje čvrstoće drvenih I-nosača. Numerička analiza provedena je u SAFIRU-u. Može se zaključiti da za podne sklopove ispunjene staklenom vunom, model je konzervativan za razdoblje nakon kolapsa obloge; iz ispitivanja je vidljivo da postoji znatan vremenski period do kolapsa podnog sustava čak i nakon što se obloga odvojila od sklopa. U tom će pogledu potrebno je poboljšati model, predvidjeti i opisati ponašanje i degradaciju zaštitnog sustava.

Kada je drvena greda da izložena požaru sa tri ili četiri strane, pojavljuje se efekt pojačanog pougljenja [66]. Zahvaljujući utjecaju dvodimenzionalnog prijenosa topline, požarna ispitivanja i proračuni prijenosa topline pokazuju da pougljenje drva na bočnoj strani

pravokutnih presjeka drva može biti znatno veće od pougljenja na široj strani. Za drvene elemente nezaštićene tijekom izloženosti požaru, pokazano je da je odnos između vremena i pougljenja na bočnoj strani nelinearan. Da bi se uzelo u obzir pojačano ugljenje na bočnoj strani drvenih elemenata uveden je faktor presjeka k_s . Proračunom je pokazano da na otpornost na savijanje drvenog elementa, dvodimenzionalni prijenos topline beznačajno utječe, stoga se koeficijent k_s može zanemariti, što uvelike olakšava proračun. Kako bi se utvrdio utjecaj dvodimenzionalnog prijenosa topline na povećano pougljenje na bočnoj strani, provedene su brojne simulacije prijenosa topline pomoću programskog paketa SAFIR. U numeričkoj analizi, pougljenje drva (tj. smanjenje presjeka) uzeto je u obzir postupnim mijenjanjem gustoće, toplinske vodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta drva s porastom temperature. Iako je dubina pougljenja povećana za 20 % u proračunu, u konačnici tu nije imalo velikog značaja na otpornost grede na savijanje.

Pregledom stanja područja, uočava se nedostatak numeričkog istraživanja prošupljenih drvenih elemenata. U ovom radu istražen je utjecaj prošupljenja, negorive ispune u šupljinama, te protupožarnih zaštitnih sustava na brzinu pougljenja, i u konačnici, na požarnu otpornost prošupljenih drvenih elemenata.

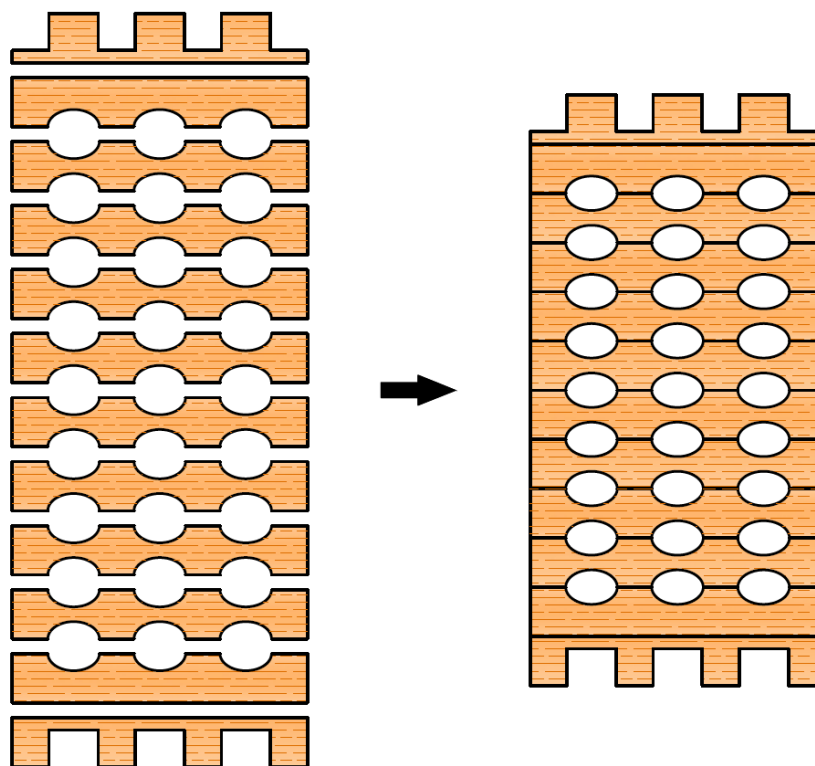
Poglavlje 3. AMBIJENTNI UVJETI - INOVATIVNI PROŠUPLJENI LIJEPLJENO LAMELIRANI DRVENI ELEMENTI

3.1 Uvod

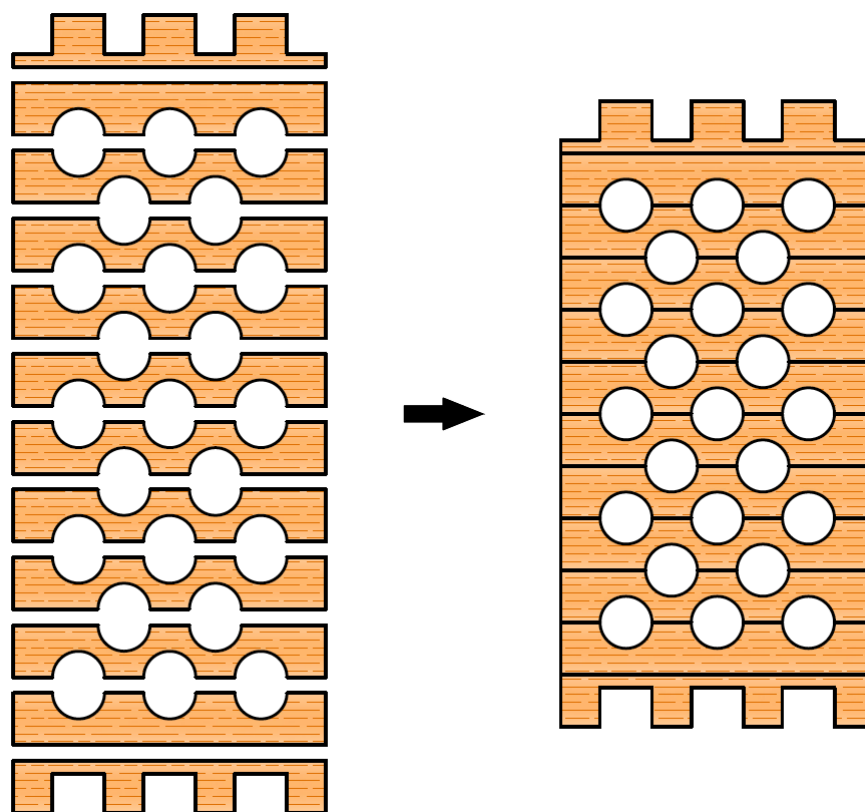
Iz prethodnog poglavlja vidljivo je kako se u svijetu sve više razvijaju inovativni sustavi za gradnju montažnih drvenih kuća. Cilj je većine proizvođača razviti elemente kojima će se izgradnja pojednostaviti, odnosno postići čim veća brzina i ekonomičnost. Vodeći se tom tezom, pojavila se ideja za inovativnim prošupljenim drvenim elementima. Šupljine značajno smanjuju težinu pojedinog elementa pa ih se može lako prenositi, čime se isključuje potreba za dizalicama i mehanizacijom, ali se i pojeftinjuje gradnja.

Drveni elementi se sastoje od lamela debljine 20 mm u kojima su urezane eliptične ili kružne šupljine. Lamelle su dobivene izrezivanjem iz debla mekog ili tvrdog drva. U svakoj su lameli vlakanca usmjerena duž njene duljine, a su međusobno su povezane lijepljenjem.

Prva i posljednja lamela oblikovane su tako da se, prilikom slaganja jednog na drugi, elementi međusobno uklapaju. Na ovaj je način omogućena brza i efikasna gradnja, bez upotrebe spajala. U ostalim lamelama su izrezane udubine u obliku polu-elipse ili polu-kružnice te su zatim međusobno zalijepljene kako bi se dobio traženi poprečni presjek s eliptičnim (Slika 3.1) ili kružnim šupljinama (Slika 3.2).



Slika 3.1 Prikaz pojedinih lamela elementa s eliptičnim šupljinama te poprečnog presjeka gotovog elementa



Slika 3.2 Prikaz pojedinih lamela elementa s kružnim šupljinama te poprečnog presjeka gotovog elementa

Novost i doprinos ogledaju se u sljedećem:

- Inovativna priroda drvenih elemenata, koji predstavljaju novu generaciju proizvoda od drva koji omogućuju lakšu gradnju, montažu, uštedu materijala i globalnu održivost okoliša, te bolja termalna i zvučna svojstva.
- Provedena su eksperimentalna ispitivanja šupljih drvenih elemenata kako bi se ispitalo različite mogućnosti vrste i rasporeda šupljina koje utječu na nosivost i uporabljivost prošupljenih drvenih elemenata.
- Izrada numeričkog modela u svrhu predviđanja ponašanja prošupljenih drvenih elemenata. Rezultati simulacije potvrdili su eksperimentalno istraživanje.
- Dimenzije pojedinih lamela i materijal od kojeg su izrađene mogu bitno utječu na vrijednosti naprezanja i deformacije, pa se oblik presjeka može prilagoditi ovisno o željenim karakteristikama.
- Šupljine značajno smanjuju težinu pojedinog elementa čineći ga prenosivim jednu ili dvije osobe, što eliminira potrebu za mehanizacijom i strojevima.

3.2 Preliminarno eksperimentalno istraživanje inicijalnih uzoraka

Eksperimentalno istraživanje podijeljeno je u dvije osnovne skupine ispitivanja. Prva skupina odnosi se na ispitivanje mehaničkih karakteristika proušupljenih drvenih elemenata pri ambijentnim uvjetima, dok se druga skupina odnosi na istraživanje utjecaja prošupljenja na požarnu otpornost istih.

U ovom poglavlju daju se osnovni podaci o preliminarnim ispitivanjima provedenim na 64 uzorka (16 serija po 4 uzorka) u ambijentnim uvjetima. Uzorci su izrađeni od mekog drva.

Prije preliminarnih ispitivanja izmjerena je gustoća materijala korištenog za izradu inicijalnih prošupljenih drvenih uzorka (Tablica 3.1)

Tablica 3.1 Gustoća drvenih uzoraka – preliminarno ispitivanje

| Uzorak | Duljina (mm) | Širina (mm) | Visina (mm) | Volumen (mm ³) | Masa (g) | Gustoća (kg/m ³) |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 1 | 99.80 | 100.20 | 21.35 | 213499 | 85.30 | 399.53 |
| 2 | 100.10 | 99.80 | 25.55 | 255243 | 93.55 | 366.51 |
| 3 | 99.80 | 100.90 | 23.33 | 234928 | 95.25 | 405.44 |
| 4 | 100.03 | 99.97 | 25.00 | 249999 | 99.65 | 398.60 |
| 5 | 99.81 | 99.91 | 24.36 | 242918 | 97.15 | 399.93 |
| 6 | 100.10 | 99.80 | 24.00 | 239759 | 90.20 | 376.21 |
| 7 | 100.38 | 99.85 | 24.72 | 247767 | 90.45 | 365.06 |
| 8 | 100.28 | 100.00 | 22.80 | 228638 | 81.40 | 356.02 |
| 9 | 99.80 | 100.35 | 22.20 | 222331 | 81.00 | 364.32 |
| 10 | 100.09 | 99.80 | 26.70 | 266705 | 93.90 | 352.07 |
| Prosjek | | | | | | 378.37 |

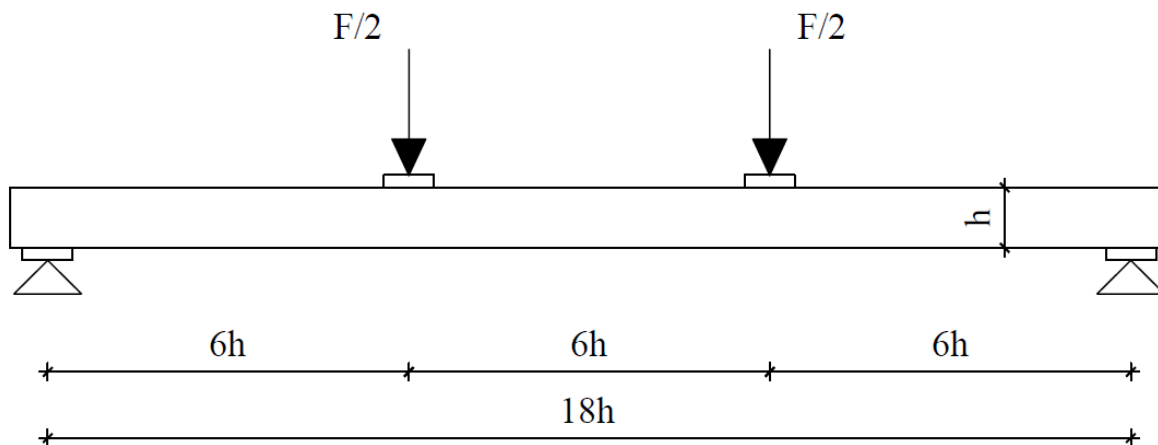
Uzorci su podvrgnuti ispitivanjima kako bi se odredile mehaničke karakteristike drva. U prvom je fazi provedeno šest vrsta ispitivanja:

- ispitivanje savijanjem uzoraka oko jače osi,
- ispitivanje savijanjem uzoraka oko slabije osi,
- ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca uzoraka u smjeru jače osi,
- ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca uzoraka u smjeru slabije osi
- ispitivanje vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima
- ispitivanje posmične čvrstoće linije lijepljenja

3.2.1 Ispitivanje savijanjem oko jače osi

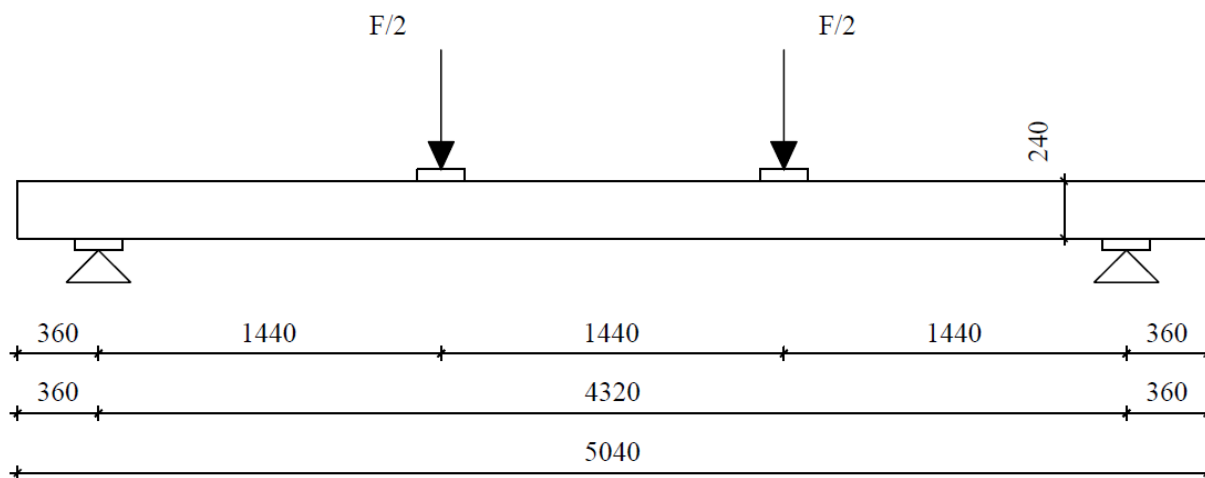
Za eksperimentalna ispitivanja savijanja korišten je dinamičko-statički univerzalni stroj tvrtke Zwick Roell GmbH test & Co. KG, Njemačka. Kapacitet stroja je 600 kN i 250 kN, a klasa 1, što znači da je odstupanje 1 %. Ovaj sustav omogućuje prikupljanje vrijednosti veličine sile, pomaka, ubrzanja, relativne deformacije i naprezanja. Sustav je prikladan za kratkotrajna i dugotrajna statička mjerenja visoke razlučivosti. Sustav za prikupljanje podataka je MGC plus proizvođača HBM—Hottinger Baldwin Messtechnik, Njemačka. Opterećenje je definirano kontrolom pomaka, a brzina pomaka je bila 6 mm/min. Opterećenje je uneseno preko čelične grede, s dodatnim I profilom, simulirajući savijanje uzorka u četiri točke. Korišteno je ukupno šest mjernih kanala; vrijeme, progib na osloncima i u sredini raspona, pomak doze i opterećenje. Za mjerenje deformacije korišteni su linearni varijabilni diferencijalni transformatori s preciznošću nominalnih vrijednosti od 10 mm (oslonci) i 100 mm (sredina raspona). Budući da na krajnjim lamelama uzoraka postoje utori, izrađeni su dodatni drveni elementi koji su postavljeni na mjestu unosa opterećenja. Pomoćni elementi izrađeni su od tvrdog drva i geometrijski odgovaraju obliku krajnjih lamela. Na taj način je omogućen pravilan unos opterećenja. S obzirom na cilj ovog istraživanja, potrebno je postaviti sustav za sprječavanje bočno-torzijskog izvijanja elementa na traženim pozicijama. Vitke grede (veliki omjer h/b) koje su opterećene u smjeru slabije osi obično imaju problema sa stabilnošću u tlačnoj zoni presjeka. U tom slučaju greda ima bočni pomak uz istovremenu rotaciju. Zbog toga, čelične stezaljke postavljaju se na nosače, pokrivajući najmanje dvije trećine visine uzorka.

Ispitivanje je vršeno sukladno normi EN 408 [67], a dimenzije poprečnog presjeka bile su $b \times h = 120 \times 240$ milimetara. Uzorci su slobodno oslonjeni s udaljenošću oslonaca jednakoj $18h$, gdje je h visina uzorka. Opterećeni su dvjema koncentriranim silama tako da je i udaljenost sile od oslonca i udaljenost sila međusobno jednaka $6h$ (Slika 3.3). Na područjima unosa sile te na ležajevima postavljene su čelične ploče, duljine ne veće od polovice visine uzorka, kako bi se spriječile lokalne koncentracije naprezanja, odnosno kako bi se postigla bolja distribucija sile, ravnomjernije po uzorku. Brzina opterećenja treba biti takva da se maksimalna sila dosegne nakon (300 ± 120) sekundi. Deformacije su mjerene u sredini raspona uzoraka te na osloncima.



Slika 3.3 Položaj oslonaca i sila prilikom ispitivanja uzoraka savijanjem

Za ispitivanje savijanjem oko jače osi uzorci su položeni na način da je veća dimenzija poprečnog presjeka jednaka visini prema normi EN 408 [67] i iznosi 240 mm. Time je određen međusobni razmak dviju koncentriranih sila te udaljenost sila od oslonaca i iznosi 1440 mm, dok je raspon 4320 mm. Ukupna duljina uzorka jednaka je 5040 mm. Sve su dimenzije prikazane su na slici 3.4, dok su postavke ispitivanja u laboratoriju prikazane na slici 3.5.



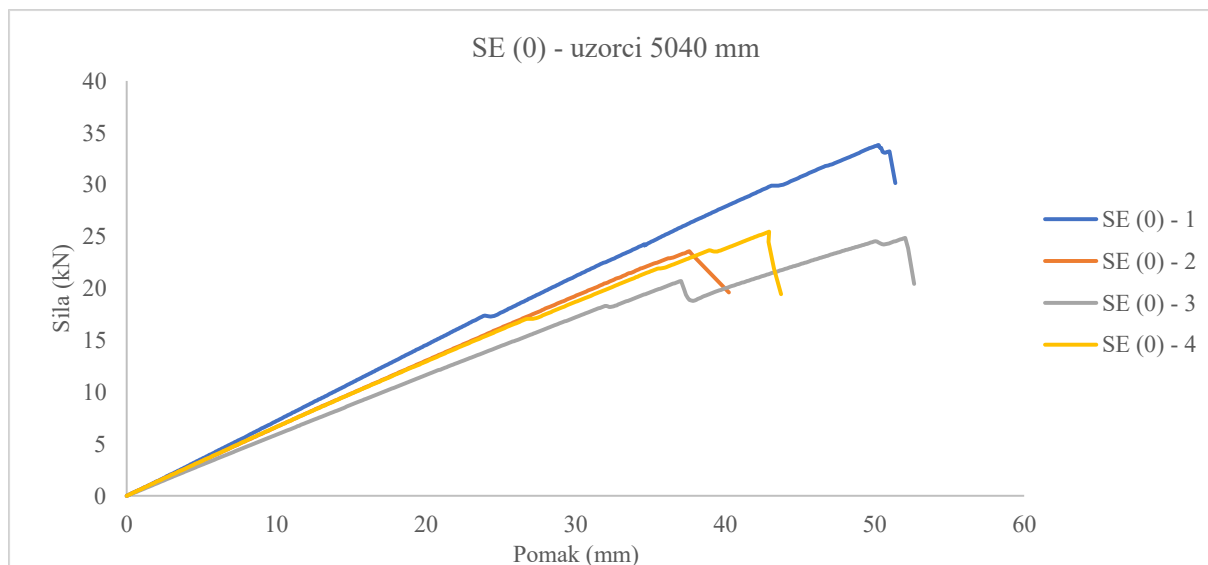
Slika 3.4 Ispitivanje uzoraka savijanjem oko jače osi – geometrija



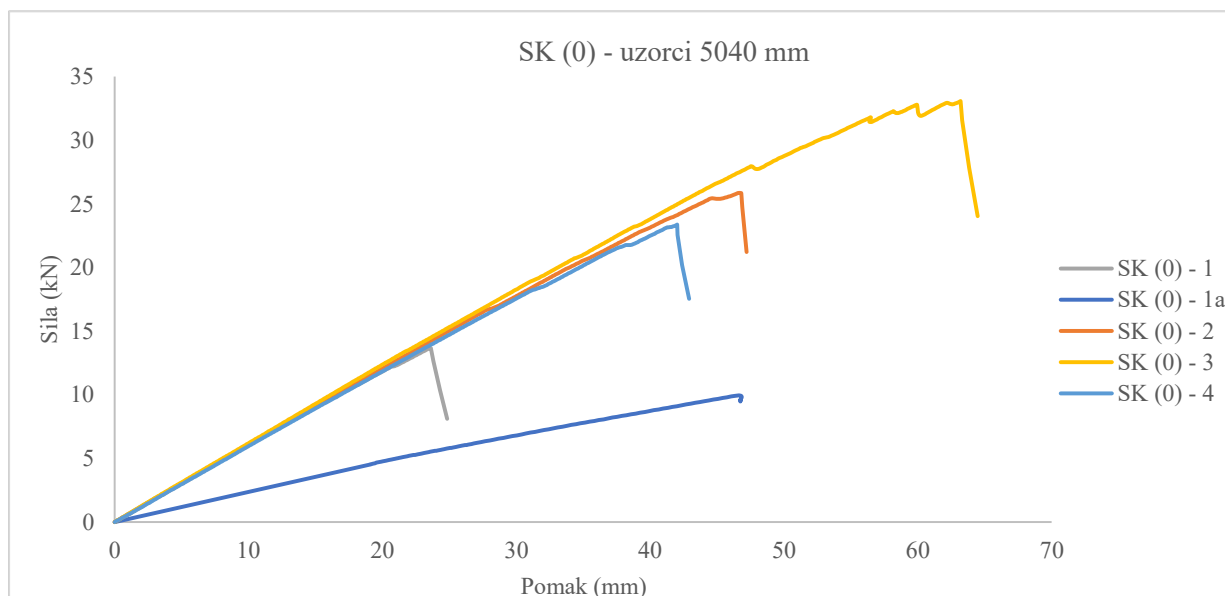
Slika 3.5 Ispitivanje uzoraka savijanjem oko jače osi - položaj na preši

Ispitivani su uzorci sa šupljinama oblika elipse, oznake SE (0) – n te kružnog oblika, oznake SK (0) – n. U oznakama (0) predstavlja savijanje oko jače osi, dok „n“ redni broj uzorka koji se ispituje.

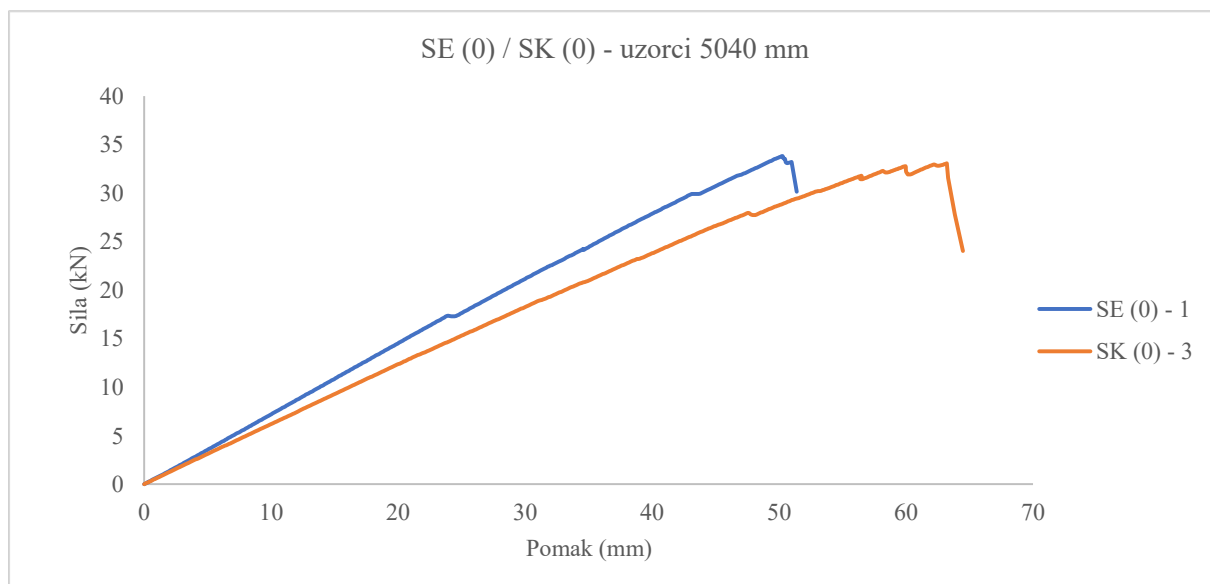
U nastavku su dani rezultati ispitivanja uzoraka sa šupljinama u obliku elipse (Slika 3.6), kružnim šupljinama (Slika 3.7) i konačno, prikazana je usporedba uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama (Slika 3.9) koji su podnijeli najveću silu tijekom ispitivanja. Na svim navedenim slikama prikazan je odnos sila – pomak prema podacima dobivenim ispitivanjima.



Slika 3.6 Odnos sila – pomak za uzorke duljine 5040 mm savijane oko jače osi s eliptičnim šupljinama



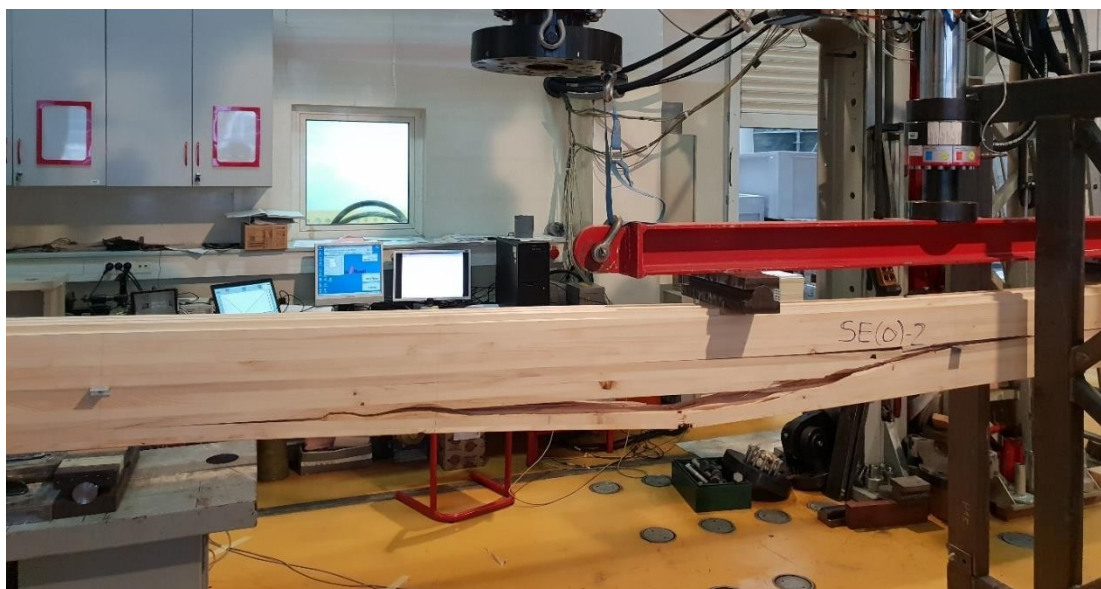
Slika 3.7 Odnos sila – pomak za uzorke duljine 5040 mm savijane oko jače osi s kružnim šupljinama



Slika 3.8 Usporedba odnosa sila – pomak za uzorke duljine 5040 mm savijane oko jače osi s eliptičnim i kružnim šupljinama

I za uzorke s eliptičnim i s kružnim šupljinama primjećuje se gotovo linearan odnos sila – pomak od početka pa sve do otkazivanja. Ovakvo je ponašanje karakteristično za krte materijala jer krivulja ne posjeduje područje popuštanja za vrijeme kojega bi bile uočene značajne deformacije, uz manji prirast sile, kao najava otkazivanja. Uz to, postoje i skokovi u samim dijagramima. Razlog zbog kojeg nastaju je taj što pri određenom opterećenju otkáže vlakance s najvećim naprežanjem pa se sila malo smanji. Nakon toga slijedi ponovni rast sile sve dok ne otkáže sljedeće vlakance i tako redom. Prilikom takvih skokova može se čuti pucketanje u uzorcima kao indikacija loma vlakancu pod kritičnim naprežanjem.

Može se zaključiti da se uzorci sa elipsastim i kružnim šupljinama ponašaju slično. Ipak, vidi se (Slika 3.7) kako se uzorci SK(0) – 1 te SK(0) – 1a ponašaju značajno drugačije u odnosu na ostale. Naime, uzorci jednakog ponašanja otkazali su savijanjem, na vlačnoj (donjoj) strani (Slika 3.9). Takav mod loma karakterističan je za opterećenje savijanjem. Uzorci čije ponašanje odstupa u odnosu na druge otkazali su uzdužno po ravni spoja lamela zbog nedovoljne kvalitete korištenog ljepila. Na slici 3.10 strelicama su označene ravnine sloma, dok su na slici 3.11 prikazani poprečni presjeci uzorka nakon otkazivanja. Ovi uzorci ne odražavaju konzistentnost ispitivanja, pa su zanemareni u daljnjoj analizi.



(a)



(b)

Slika 3.9 Otkazivanje uzoraka a) SE(0) – 2 i b) SK(0) – 2 na vlačnoj strani prilikom opterećenja savijanjem oko jače osi



Slika 3.10 Otkazivanje uzorka SK(0) - 1 uzdužno po ljepilu s naznačenim ravninama sloma



Slika 3.11 Poprečni presjek uzorka SK(0) - 1 nakon otkazivanja uzdužno po ljepilu

Kako bi se vidjela usporedba ponašanja uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama, na slici 3.8 izdvojen je po reprezentativan uzorak svakog tipa. U ovom se slučaju primjećuje veći nagib pravca sila – pomak za uzorak s eliptičnim šupljinama u odnosu na uzorak s kružnim šupljinama. Ovime se pokazuje kako uzorci s eliptičnim šupljinama imaju veću krutost.

Vidljivo je također na kako se uzorci istog tipa ponašaju različito, odnosno razlikuje se najveće opterećenje koje su podnijeli. U tablici 3.2 je stoga dan prikaz najveće sile koju je svaki

od uzoraka podnio, kao i koliki je postotak najveće sile određenog uzorka u odnosu na ukupno najveću silu koji je podnio uzorak određenog tipa. Uočeno je značajno odstupanje u najvećim podnesenim silama među uzorcima s istim oblikom šupljina. Razlog može biti u samim karakteristikama drva od kojega su izrađene lamele, odnosno radi prisutnosti određenih nepravilnosti drva, kvrgi i slično. Drugi uzrok može biti sam proizvodni postupak, odnosno različita kvaliteta pripremljenosti površina pojedinih lamela prije lijepljenja, neravnomjerno raspoređeno ljepilo i slično.

Tablica 3.2 Prikaz najvećeg podnesenog opterećenja za uzorke oba tipa te postotak u odnosu na najveće podneseno opterećenje za ispitivanje savijanjem oko jače osi

| Oblik šupljina | Oznaka uzorka | Najveće podneseno opterećenje [N] | % u odnosu na uzorak s najvećim podnesenim opterećenjem |
|----------------|---------------|-----------------------------------|---|
| elipsa | SE(0) - 1 | 33819 | 100 |
| | SE(0) - 2 | 23578 | 70 |
| | SE(0) - 3 | 24865 | 74 |
| | SE(0) - 4 | 25464 | 75 |
| kružnica | SK(0) - 1 | 13680 | 41 |
| | SK(0) - 1a | 9952 | 30 |
| | SK(0) - 2 | 25862 | 78 |
| | SK(0) - 3 | 33073 | 100 |
| | SK(0) - 4 | 23372 | 71 |

Progib nosača opterećenog dvjema koncentriranim silama može se odrediti koristeći izraz:

$$w = \frac{23 \cdot F \cdot l^3}{648 \cdot EI} \quad (3.1)$$

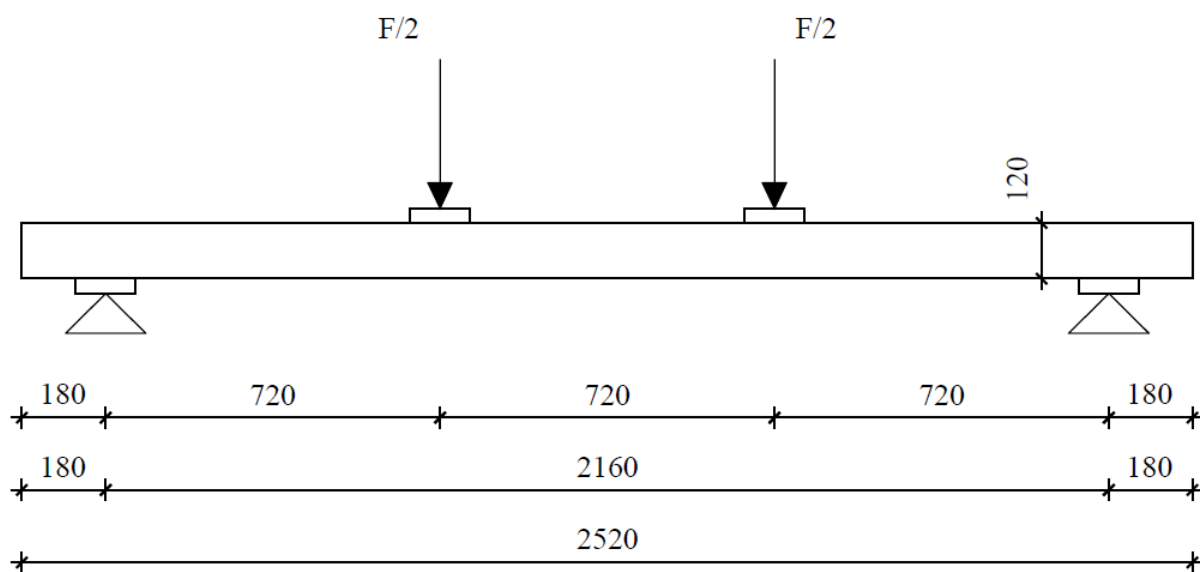
gdje je:

- w progib nosača u sredini raspona
- F koncentrirana sila u trećini raspona nosača
- l raspon nosača
- EI fleksijska (savojna) krutost.

Prema izrazu (3.1) progib i krutost međusobno su obrnuto proporcionalni. Time se može objasniti ostvarivanje većih progiba uzoraka s kružnim šupljinama, zbog njihove manje krutosti.

3.2.2 Ispitivanje savijanjem oko slabije osi

Kao i kod savijanja oko jače osi, dimenzije uzorka su 120×240 milimetara. Za ispitivanje savijanjem oko slabije osi uzorci su položeni na način da je manja dimenzija poprečnog presjeka jednaka visini prema normi EN 408 [67] i iznosi 120 mm. Time je određen međusobni razmak dviju koncentriranih sila te udaljenost sila od oslonaca i iznosi 720 mm, dok je raspon 2160 mm. Ukupna duljina uzorka je 2520 mm. Sve su dimenzije prikazane na slici 3.12, dok su postavke ispitivanja u laboratoriju prikazane na slici 3.13

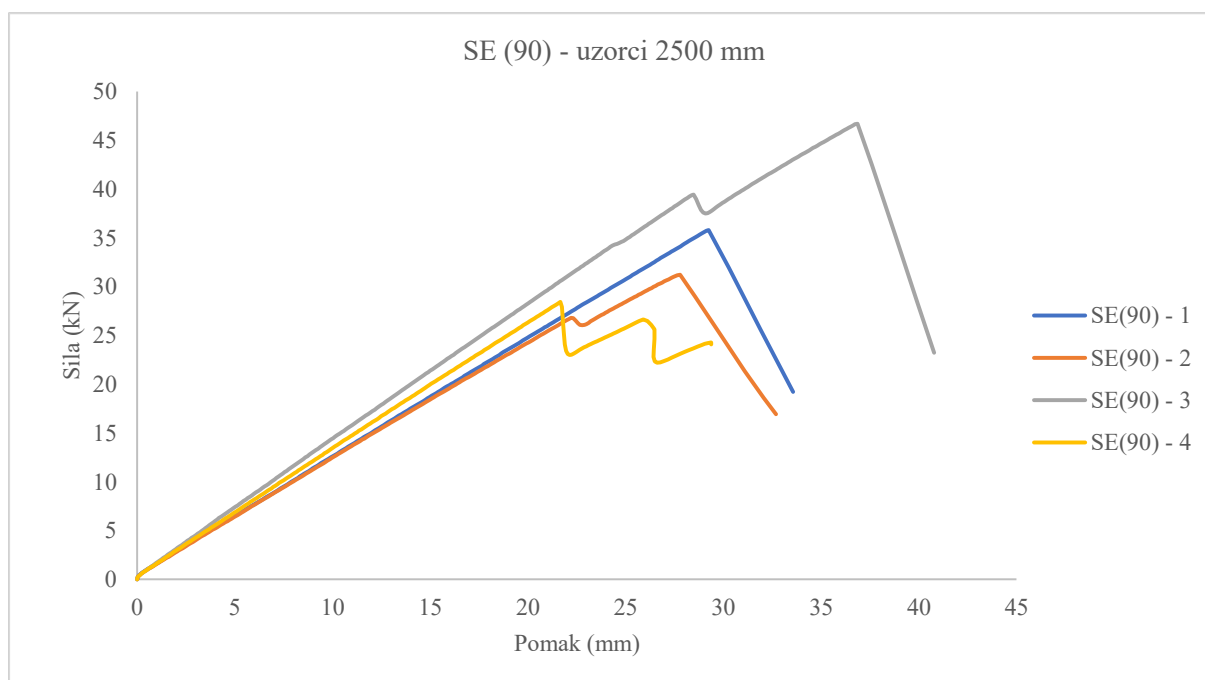


Slika 3.12 Ispitivanje uzoraka savijanjem oko slabije osi – geometrija

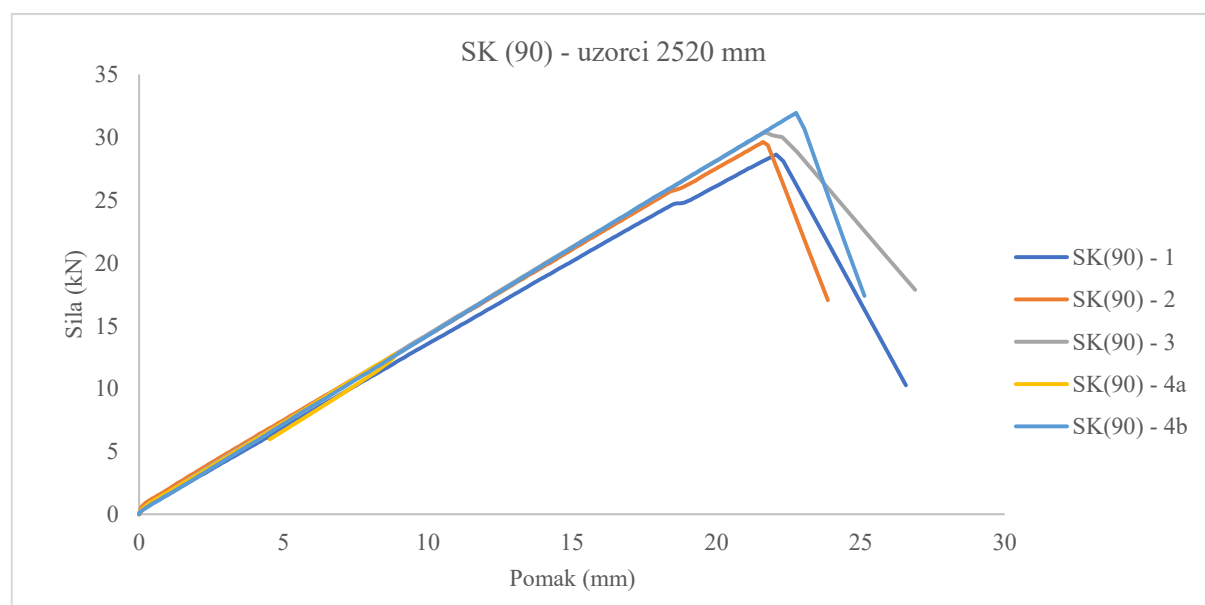


Slika 3.13 Ispitivanje uzoraka savijanjem oko slabije osi - položaj na preši

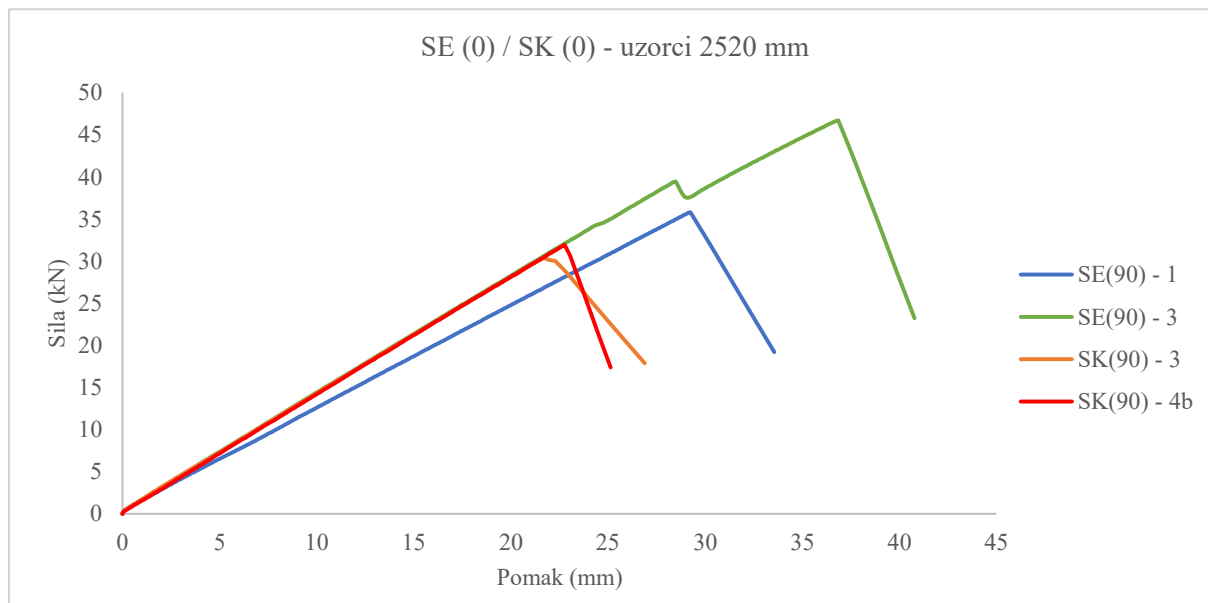
Kao i prilikom ispitivanja savijanjem oko jače osi, dvije su grupe uzoraka, one sa šupljinama u obliku elipse, ovdje oznake SE (90) – n te oblika kruga, oznake SK (90) – n. U oznakama (90) predstavlja savijanje oko slabije osi, dok „n” redni broj uzorka koji se ispituje. Na slici 3.14 prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka sa šupljinama oblika elipse, na slici 3.15 s kružnim šupljinama, dok je na slici 3.16 prikazana usporedba uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama koji su podnijeli najveću silu tijekom ispitivanja. Na svim je slikama prikazan odnos sila – pomak prema podacima dobivenim ispitivanjima.



Slika 3.14 Dijagram sila – pomak za uzorke duljine 2520 mm savijane oko slabije osi s eliptičnim šupljinama



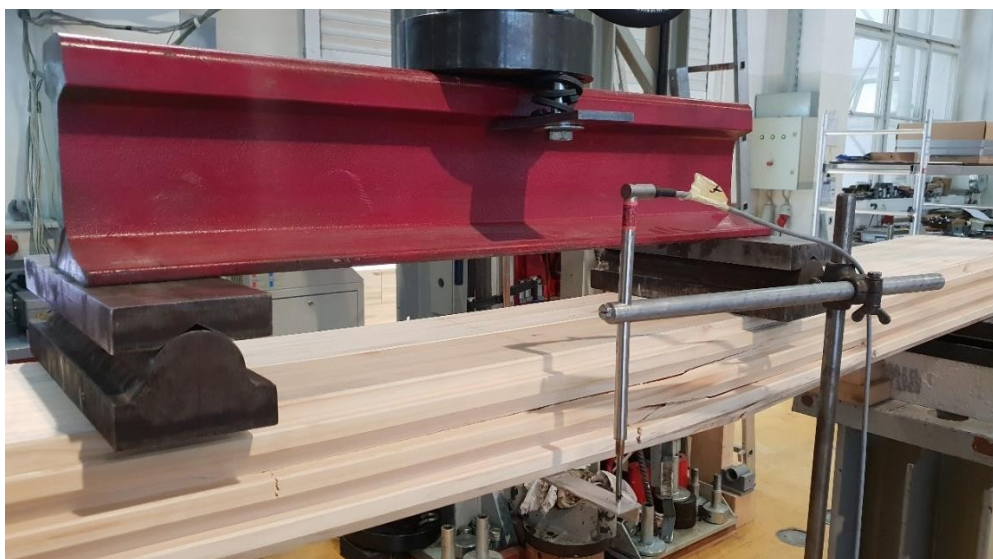
Slika 3.15 Dijagram sila – pomak za uzorke duljine 2520 mm savijane oko slabije osi s kružnim šupljinama



Slika 3.16 Usporedba odnosa sila – pomak za uzorke duljine 2520 mm savijane oko jače osi s eliptičnim i kružnim šupljinama

Kao i kod uzoraka savijanih oko jače osi, primjećuje se gotovo linearan odnos sila – pomak od početka pa sve do otkazivanja, što ponovno ukazuje na krto ponašanje. I ovdje se primjećuje skokovitost u odnosu sila – pomak, na sličan način kao i pri savijanju oko jače osi.

Prema slikama 3.14 i 3.15 može se zaključiti kako se uzorci prilično slično ponašaju. Razlog tome je što prilikom savijanja oko slabije osi ne može doći do otkazivanja duž linije ljepila jer su ravnine s lijepljenim spojem položene okomito na os oko koje se javlja savijanje. Dakle, uzorci otkazuju savijanjem, na vlačnoj (donjoj) strani, kao što se može vidjeti na slici 3.17. Jedino je uzorak SK(90) – 4a otkazao puno ranije od ostalih, zbog prisutnosti lokalnih nepravilnosti u drvu.



(a)



(b)

Slika 3.17 Bočni pogled: (a) te pogled odozdo; (b) na otkazivanje uzoraka u vlaku pri savijanju oko slabije osi

Na slici 3.16 izdvojena su po dva reprezentativna uzorka svake grupe uzoraka. U ovom je slučaju moguće primijetiti kako se od svih uzoraka s eliptičnim šupljinama samo uzorak SE (90) – 3 ponaša u početku gotovo jednako kao i uzorci s kružnim šupljinama, dok ostali uzorci s eliptičnim šupljinama imaju krivulju nagiba manjeg od krivulje uzoraka s kružnim šupljinama. Ovo ukazuje na manju krutost uzoraka s eliptičnim šupljinama u odnosu na uzorke s kružnim šupljinama, što je suprotno očekivanome, prema rezultatima savijanja oko jače osi. Razlog može biti u obliku šupljina, gledajući smjer unosa opterećenja. Naime, kada je uzorak položen na ovaj način, eliptične šupljine su puno šiljatije u odnosu na kružne, tj. luk elipse, gledajući od tjemena, puno je strmiji u odnosu na luk kružnice, što može pridonijeti boljem prijenosu opterećenja. Drugi razlog može biti u lokalno većoj površini drva uzoraka s kružnim šupljinama u području spoja lamela. Iako je prošupljenost uzoraka s kružnim šupljinama globalno veća, kružne su šupljine raspoređene naizmjenično na način da se u jednom redu nalaze tri, a u drugom samo dvije šupljine pa je veća površina drva u okolini tih šupljina.

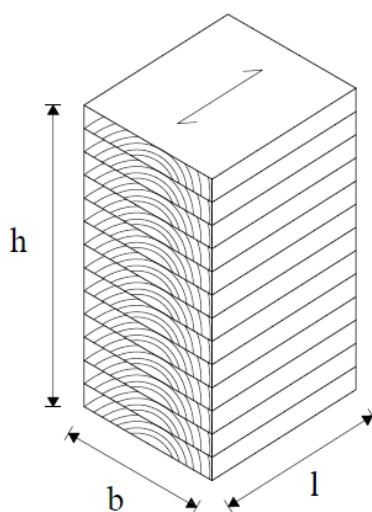
Pri savijanju uzoraka oko slabije osi također je vidljivo (vidi slike 3.14 i 3.15), kako se uzorci istog tipa ponašaju različito, odnosno razlikuje se najveće opterećenje koje su podnijeli. U tablici 3.3 dan je prikaz najveće sile koju je svaki od uzoraka podnio, kao i postotak u odnosu na onaj uzorak koji je podnio najveću silu. Ovdje je vidljivo konzistentnije ponašanje uzoraka s kružnim šupljinama, čije je odstupanje manje od 10 %, osim u slučaju uzorka SK(90) – 4a koji je zanemaren u daljnjom analizi.

Tablica 3.3 Prikaz najvećeg podnesenog opterećenja za uzorke oba tipa te postotak u odnosu na najveće podneseno opterećenje za savijanje oko slabije osi

| Oblik šupljina | Oznaka uzorka | Najveće podneseno opterećenje (N) | % u odnosu na uzorak s najvećim podnesenim opterećenjem |
|----------------|---------------|-----------------------------------|---|
| elipsa | SE(90) - 1 | 35802 | 77 |
| | SE(90) - 2 | 31215 | 67 |
| | SE(90) - 3 | 46706 | 100 |
| | SE(90) - 4 | 28431 | 61 |
| kružnica | SK(90) - 1 | 28629 | 90 |
| | SK(90) - 2 | 29624 | 93 |
| | SK(90) - 3 | 30363 | 95 |
| | SK(90) - 4a | 12737 | 40 |
| | SK(90) - 4b | 31941 | 100 |

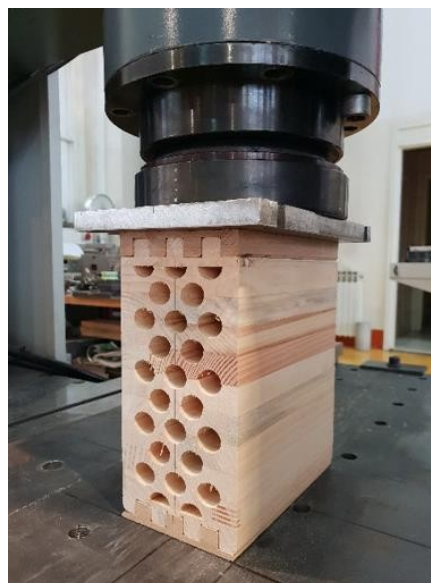
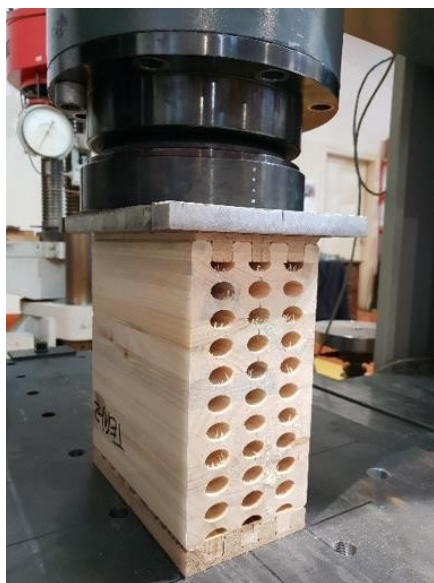
3.2.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

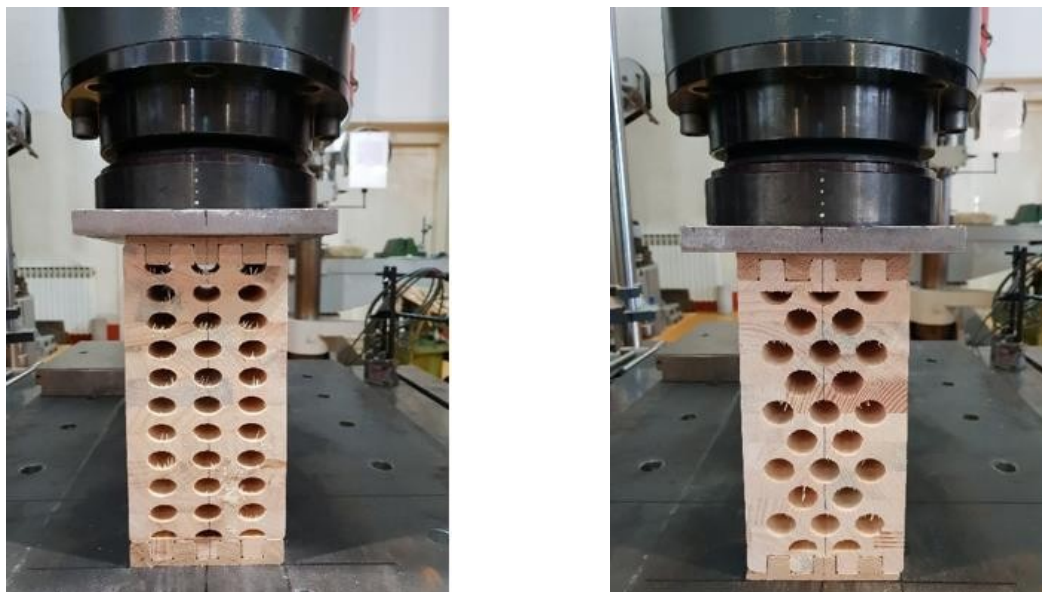
Tlačna čvrstoća ispitana je na uzorcima s eliptičnim i s kružnim šupljinama u smjeru jače i slabije osi. Postavke ispitivanja, tj. zadana brzina opterećenja bila je takva da u vremenu (300 ± 120) sekundi bude dosegnuta maksimalna sila, odnosno sila pri kojoj će uzorak otkazati. Duljina uzoraka korištena za potrebe ispitivanja (eng. gauge length) treba iznositi $0.6h$, biti locirana u središtu ispitivanog uzorka i ne bliže od $b/3$ rubovima uzorka. Prikaz primjera lameliranog uzorka s označenim dimenzijama dan je na slici 3.18.



Slika 3.18 Uzorak za ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca

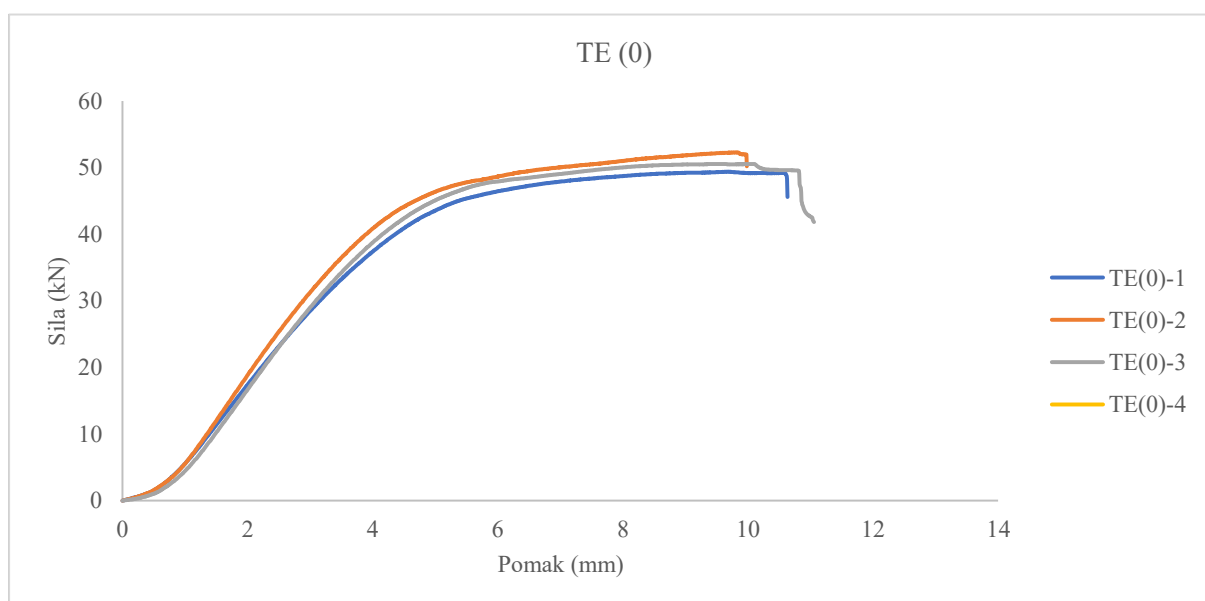
U ovom je slučaju uzorak položen na način da opterećenje djeluje u smjeru slabije osi presjeka. Visina uzorka (h) iznosi 240 mm, širina (b) 120 mm, a duljina (l) 209 mm. Prikaz uzoraka prilikom ispitivanja na preši dan je na slici 3.19.



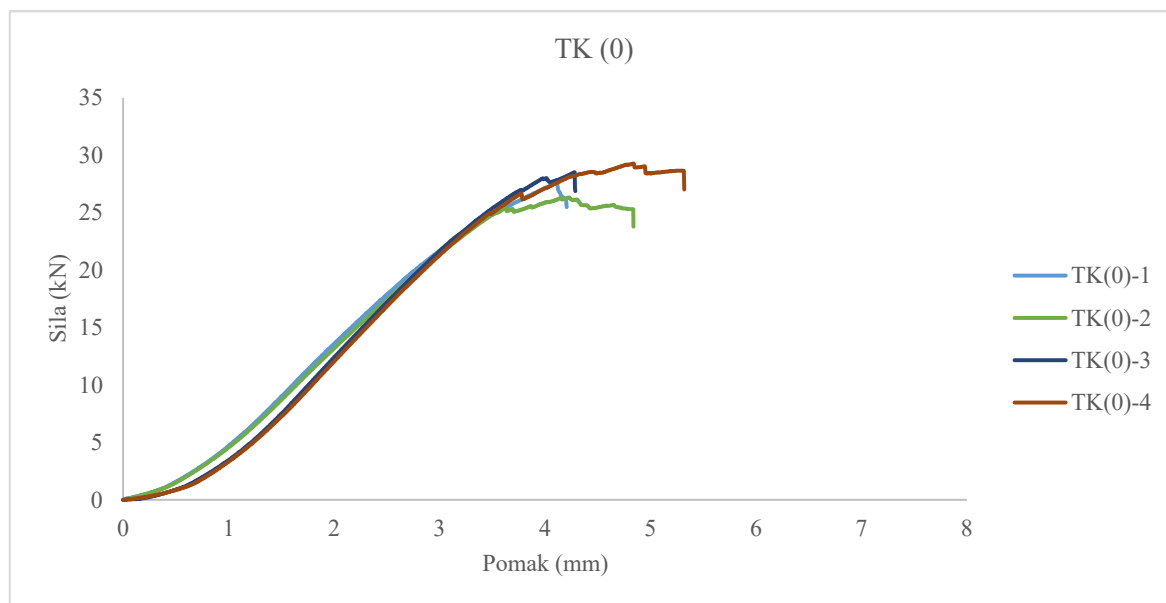


Slika 3.19 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru slabije osi uzoraka s eliptičnim (lijevo) i kružnim (desno) šupljinama

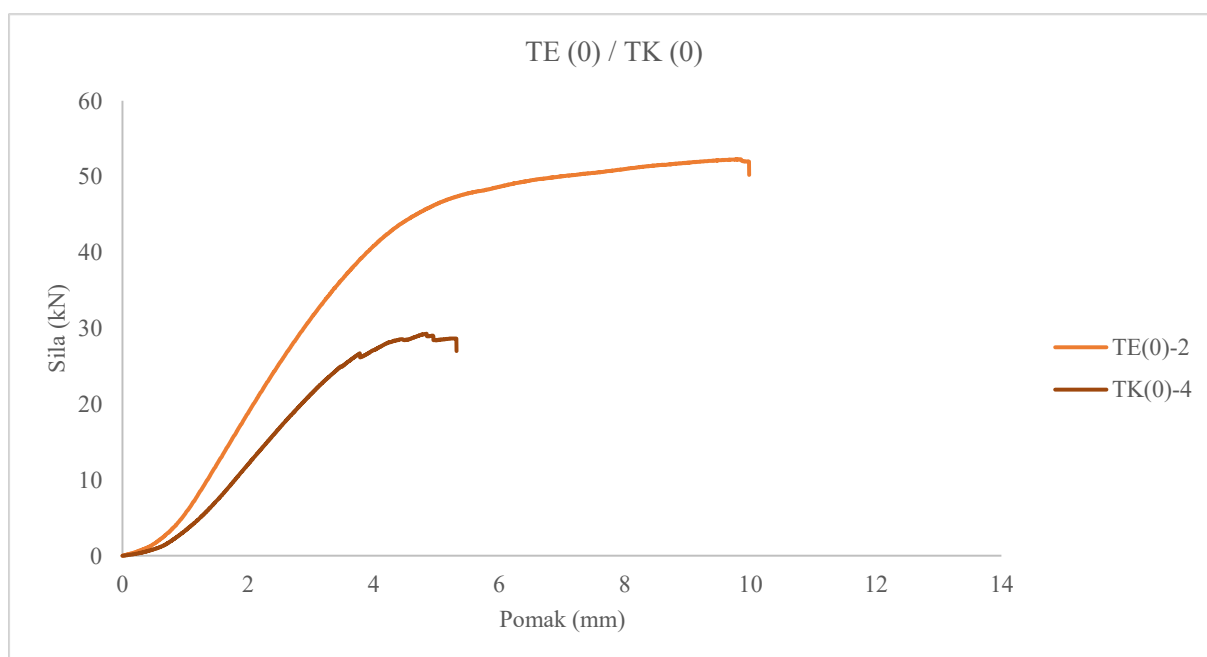
Kao što se vidi na 3.19 ispitane su dvije grupe uzoraka, jedna sa šupljinama u obliku elipse, oznake TE (0) – n, a druga sa šupljinama oblika kružnice, oznake TK (0) – n. U oznakama (0) predstavlja opterećenje u smjeru slabije osi, dok „n“ redni broj uzorka koji se ispituje. Na slici 3.20 prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka sa šupljinama oblika elipse, na slici 3.21 s kružnim šupljinama, dok je na slici 3.22 prikazana usporedba uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama koji su podnijeli najveću silu tijekom ispitivanja. Na svim je slikama prikazan odnos sila – pomak prema podacima dobivenim ispitivanjima.



Slika 3.20 Dijagram sila – pomak za uzorke s eliptičnim šupljinama tlačno opterećene okomito na vlakanca u smjeru slabije osi



Slika 3.21 Dijagram sila – pomak za uzorke s kružnim šupljinama tlačno opterećene okomito na vlakanca u smjeru slabije osi



Slika 3.22 Usporedba odnosa sila – pomak uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama tlačno opterećenih okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

Na prethodnim se slikama vidi kako se uzorci na početku ponašaju linearno, a zatim slijedi krivulja prema kojoj se može zaključiti kako dolazi do popuštanja materijala. Na slici 3.22 vidi se kako je početni nagib pravca veći za uzorke s eliptičnim šupljinama u odnosu na uzorke s kružnim šupljinama. Nadalje, može se primijetiti kako uzorak s eliptičnim šupljinama može podnijeti gotovo dvostruko veću silu u odnosu na uzorak s kružnim šupljinama. Razlog tome je način raspodjele šupljina. Eliptične šupljine postavljene su jedna ispod druge pa je put

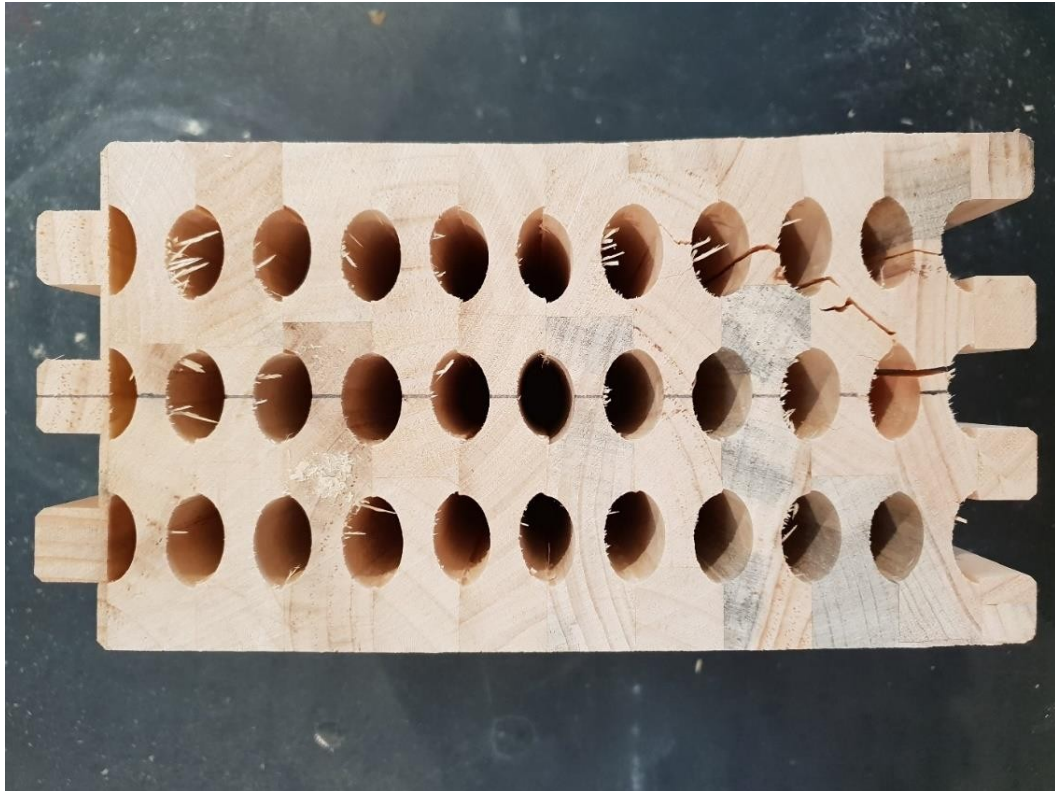
sile jednostavan, po hrptovima punog drva, dok su kružne šupljine izmaknute jedna u odnosu na drugu, gledajući po visini presjeka pa je i put sile nepravilan. Naime, kod uzoraka s kružnim šupljinama sila, koja ide hrptom punog drva, nailazi na šupljinu te u tom području dolazi do otkazivanja. Kada bi se kružne šupljine postavile jedna ispod druge, kao što su eliptične, tada se ne bi mogla postići dovoljna prošupljenost uzoraka s kojom bi se postigla zadovoljavajuća vrijednosti smanjenja vlastite težine.

U tablici 3.4 prikazane su najveće vrijednosti opterećenja koju je podnio pojedini uzorak te koliki je postotak tog opterećenja u odnosu na onaj uzorak koji je podnio najveću silu pojedine skupine, odnosno oblika šupljina. Najveće odstupanje opterećenja je 6 %.

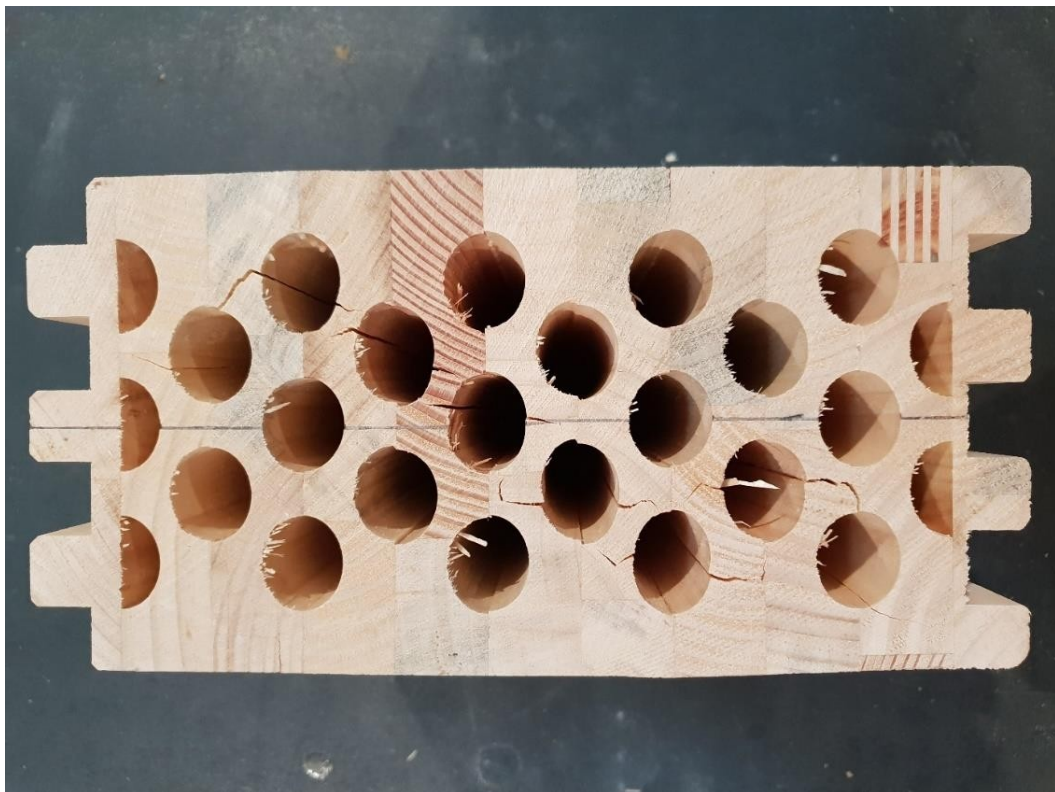
Tablica 3.4 Prikaz najvećeg podnesenog opterećenja za uzorke oba tipa te postotak u odnosu na najveće podneseno opterećenje ispitivanja tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

| Oblik šupljina | Oznaka uzorka | Najveće podneseno opterećenje (N) | % u odnosu na uzorak s najvećim podnesenim opterećenjem |
|----------------|---------------|-----------------------------------|---|
| elipsa | TE(0) - 1 | 49401 | 94 |
| | TE(0) - 2 | 52292 | 100 |
| | TE(0) - 3 | 50546 | 97 |
| | TE(0) - 4 | 49283 | 94 |
| kružnica | TK(0) - 1 | 27636 | 94 |
| | TK(0) - 2 | 26320 | 90 |
| | TK(0) - 3 | 28525 | 97 |
| | TK(0) - 4 | 29281 | 100 |

Na slici 3.23 prikazan je mod loma uzorka s eliptičnim šupljinama nakon ispitivanja na tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi, dok je na slici 3.24 prikazan uzorak s kružnim šupljinama nakon istog ispitivanja. Može se primijetiti kako bi se prilikom povezivanja pukotina na uzorku s kružnim šupljinama dobila zakrivljena linija. Upravo se tu potvrđuje prethodno objašnjena nepravilnost pri kretanju sile koju prenosi uzorak s kružnim šupljinama te manja podnesena najveća sila takvih uzoraka. Kada bi se spojile pukotine uzorka s eliptičnim šupljinama, dobila bi se približno ravna linija koja povezuje vrhove lukova elipsi. To ukazuje na pravilan put prijenosa sile te da je otkazivanje nastupilo prilikom drobljenja u području šupljina.



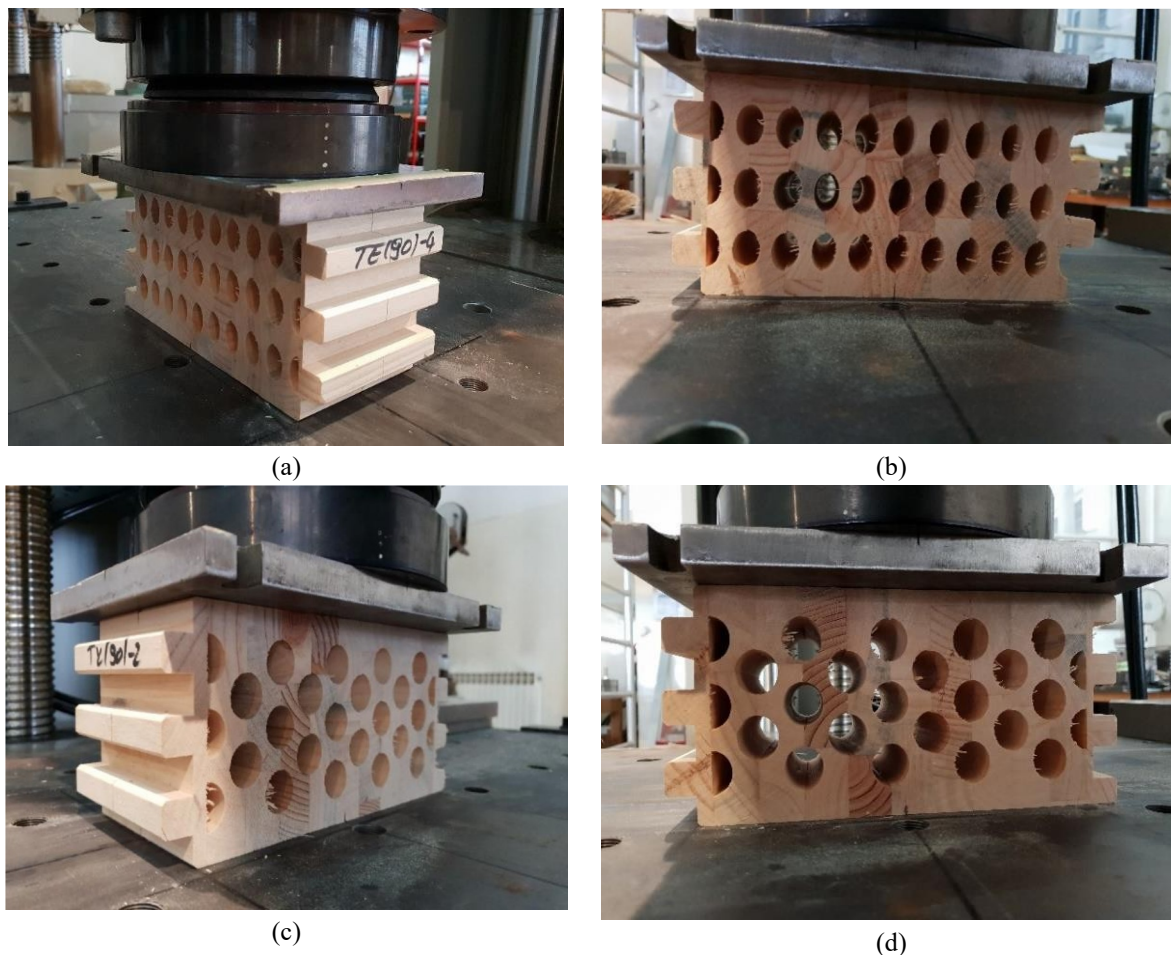
Slika 3.23 Otkazivanje uzorka s eliptičnim šupljinama nakon ispitivanja na tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi



Slika 3.24 Otkazivanje uzorka s kružnim šupljinama nakon ispitivanja na tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

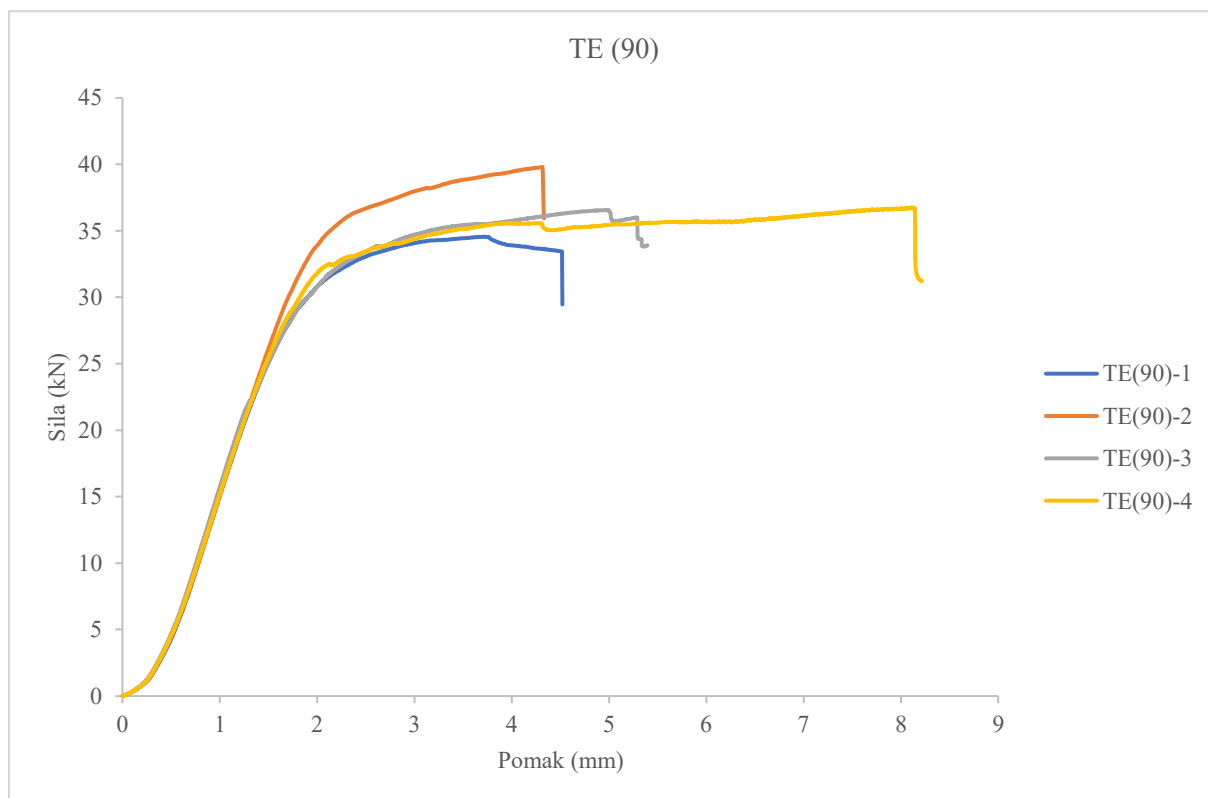
3.2.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru jače osi

U ovom je slučaju uzorak položen na način da opterećenje djeluje u smjeru slabije osi presjeka. Visina uzorka (h) iznosi 120 mm, širina (b) 240 mm, a duljina (l) 105 mm. Prikaz uzoraka prilikom ispitivanja dan je na slici 3.25.

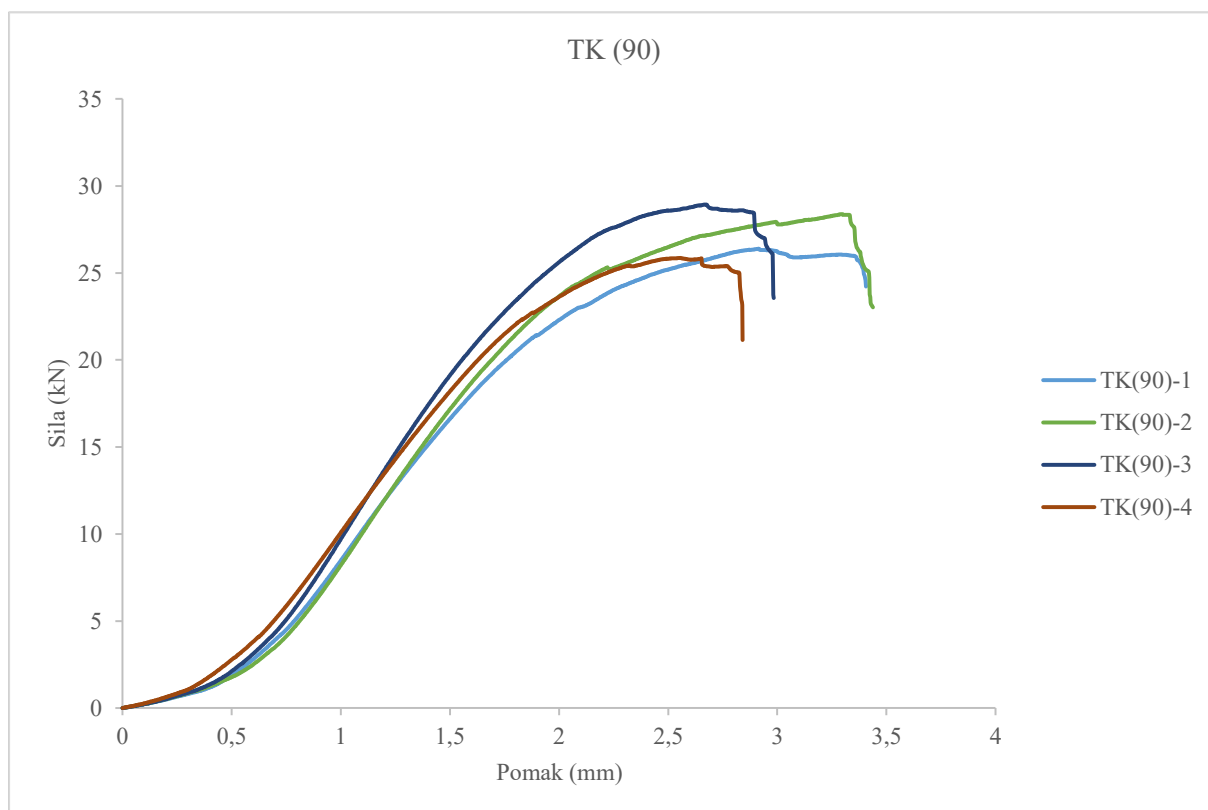


Slika 3.25 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru slabije osi uzoraka: (a) i (b) eliptičnim šupljinama; (c) i (d) kružnim šupljinama

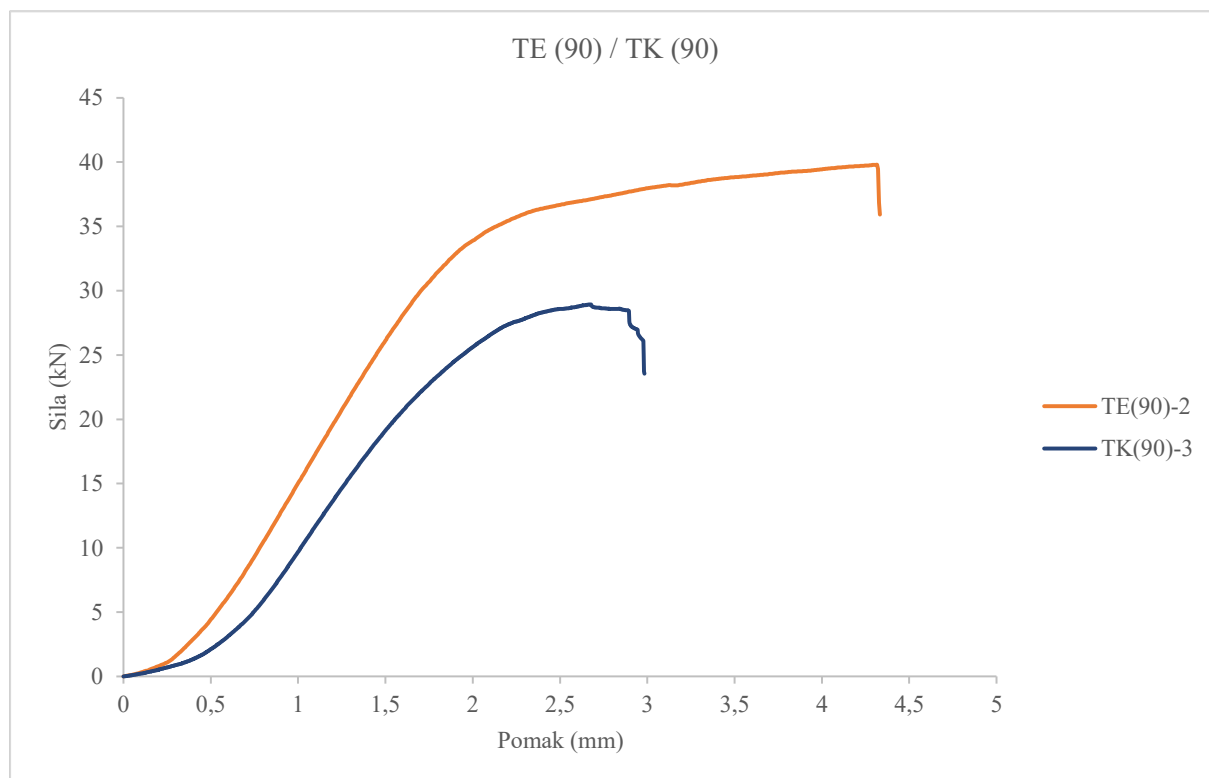
I u ovom su slučaju ispitane dvije grupe uzoraka, sa šupljinama u obliku elipse, oznake TE (90) – n te sa šupljinama oblika kruga, oznake TK (90) – n. U oznakama (90) predstavlja opterećenje u smjeru jače osi, dok „n” redni broj uzorka koji se ispituje. Na slici 3.26 prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka sa šupljinama oblika elipse, na slici 3.27 s kružnim šupljinama, dok je na slici 3.28 prikazana usporedba uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama koji su podnijeli najveću silu tijekom ispitivanja. Na svim je slikama prikazan odnos sila – pomak prema podacima dobivenim ispitivanjima.



Slika 3.26 Dijagram sila – pomak za uzorke s eliptičnim šupljinama tlačno opterećene okomito na vlakanca u smjeru jače osi



Slika 3.27 Dijagram sila – pomak za uzorke s kružnim šupljinama tlačno opterećene okomito na vlakanca u smjeru jače osi



Slika 3.28 Usporedba odnosa sila – pomak uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama tlačno opterećenih okomito na vlakanca u smjeru jače osi

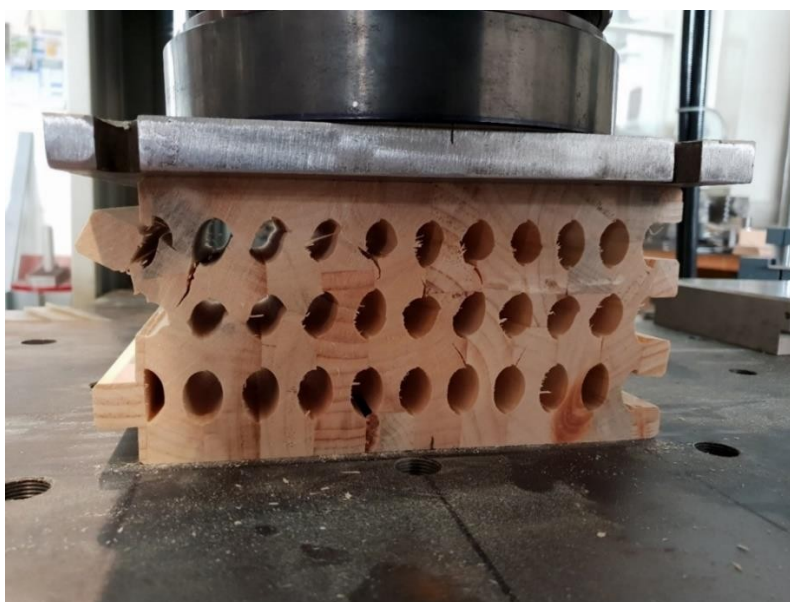
Prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru jače osi presjeka, ponašanje je slično, kao i u smjeru slabije osi. Ponovno se primjećuje linearno ponašanje koje prelazi u krivulju, odnosno iskazano je popuštanje materijala. Ponovno je veći nagib početnog pravca za uzorke s eliptičnim šupljinama, što ukazuje na njihovu veću krutost zbog čega podnose i veće opterećenje. Za ovaj smjer nanošenja opterećenja nije toliko značajna razlika u maksimalnoj sili, između uzoraka s eliptičnim i kružnim šupljinama, kao što je slučaj prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće u smjeru slabije osi, no i dalje je vidljiva. Razlog je što su u ovom smjeru, za obje vrste uzoraka, šupljine jedna ispod druge, ali je ipak manja širina punog dijela presjeka između kružnih šupljina, nego što je između eliptičnih šupljina pa se razlikuje i maksimalna sila.

U tablici 3.5 prikazane su najveće vrijednosti opterećenja koju je podnio pojedini uzorak te koliki je postotak tog opterećenja u odnosu na onaj uzorak koji je podnio najveću silu pojedine skupine, odnosno oblika šupljina. Najveće odstupanje opterećenja je 13 %.

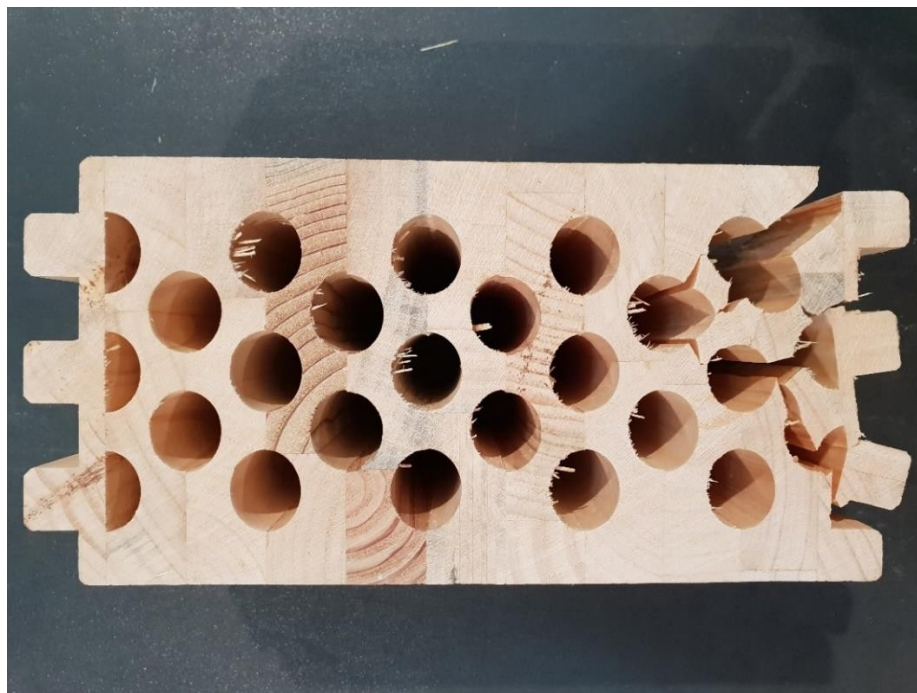
Tablica 3.5 Prikaz najvećeg podnesenog opterećenja za uzorke oba tipa te postotak u odnosu na najveće podneseno opterećenje ispitivanja tlačne čvrstoće okomito na vlakanca u smjeru jače osi

| Oblik šupljina | Oznaka uzorka | Najveće podneseno opterećenje (N) | % u odnosu na uzorak s najvećim podnesenim opterećenjem |
|----------------|---------------|-----------------------------------|---|
| elipsa | TE(90) - 1 | 34558 | 87 |
| | TE(90) - 2 | 39803 | 100 |
| | TE(90) - 3 | 36554 | 92 |
| | TE(90) - 4 | 36750 | 92 |
| kružnica | TK(90) - 1 | 26387 | 91 |
| | TK(90) - 2 | 28379 | 98 |
| | TK(90) - 3 | 28926 | 100 |
| | TK(90) - 4 | 25865 | 89 |

Na slici 3.29 prikazano mod loma uzorka s eliptičnim šupljinama nakon ispitivanja na tlak okomito na vlakanca u smjeru jače osi, dok je na slici 3.30 prikazan mod loma uzorka s kružnim šupljinama nakon istog ispitivanja. I u ovom se slučaju može primijetiti kako su pukotine kod uzoraka s eliptičnim šupljinama pretežno vertikalne, u smjeru sile i povezuju šupljine. Kod uzoraka s kružnim šupljinama pukotine su kose, ali i u ovom slučaju povezuju šupljine jer nisu u istoj ravnini. Drugi je razlog malen razmak među kružnim šupljinama, odnosno malena debljina punog drveta između šupljina koje bi prenosilo silu od vrha prema dnu uzorka.



Slika 3.29 Otkazivanje uzorka s eliptičnim šupljinama nakon ispitivanja na tlak okomito na vlakanca u smjeru jače osi



Slika 3.30 Otkazivanje uzorka s kružnim šupljinama nakon ispitivanja na tlak okomito na vlakanca u smjeru jače osi

3.2.5 Diskusija i zaključak

Na osnovu preliminarnog ispitivanja inicijalnih uzoraka mogu iskazati sljedeća opažanja:

- nezadovoljavajuća kvaliteta ljepila korištenog za spajanje lamela
- generalno bolje ponašanje uzoraka sa elipsastim šupljinama
- nepovoljan učinak prošupljenja u rubnim lamelama na ponašanje prošupljenih drvenih elemenata

Zbog svega navedenog, u nastavku rada proučavani su poboljšani uzorci prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata. Dodatno, druga serija uzoraka, osim u varijanti mekog drva, izrađena je i u varijanti tvrdog drva, kako bi odredio utjecaj različite klase drva na ponašanje prošupljenih drvenih elemenata. Konačno, proučavani su i standardni (puni) uzorci od lijepljeno lameliranog drva, istih geometrijskih karakteristika, ali bez prošupljenja, a sve s ciljem određivanja utjecaja prošupljenosti poprečnog presjeka na nosivost i uporabivost lijepljeno lameliranih drvenih elemenata.

3.3 Eksperimentalno istraživanje punih i prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata – druga serija uzoraka

3.3.1 Određivanje osnovnih materijalnih karakteristika

Prije samog ispitivanja uzoraka u srednjem i velikom mjerilu, pristupilo se ispitivanju osnovnih materijalnih karakteristika prema EN 408 [67]. Određena je gustoća, moduli elastičnosti paralelno i okomito na vlakanca, čvrstoća na savijanje, vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima, te posmična čvrstoća linije lijepljenja.

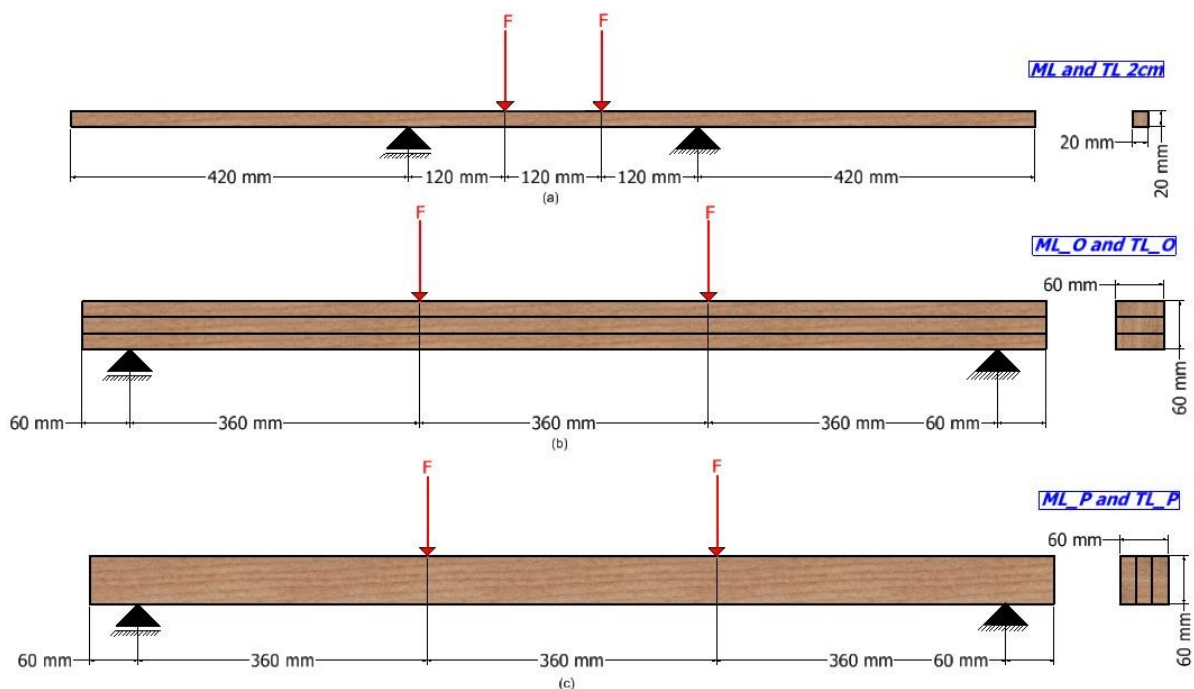
S ciljem određivanja modula elastičnosti paralelno s vlakancima i čvrstoće na savijanje, izrađene su dvije vrste uzoraka, dimenzija 20×20 mm (puno drvo) i 60×60 mm (lamelirano drvo). Nadalje, uzorci su reproducirani i za meko i za tvrdo drvo. Uzorci od 20 mm izrađeni su u svrhu ispitivanja materijalnih karakteristika materijala, tj. punog drva (jedna lamela), dok su uzorci od 60 mm sastavljeni od 3 međusobno povezane lamele i čine lamelirani drveni uzorak. Zbog toga, potrebno je ispitati lamelirane uzorke za ortogonalnu i paralelnu poziciju lamela, u odnosu na smjer opterećenja. U nastavku je dan tablični prikaz (Tablica 3.6) vrste uzoraka te pripadajući ispitni postupak.

Tablica 3.6 Osnovne materijalne karakteristike – pregled uzoraka

| Naziv | Dimenzija $b \times h$ (mm) | Broj uzoraka | Opis | Cilj |
|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| E _{f_m} _2cm_M* | 20 × 20 × 120 | 6 | Meko puno drvo | Određivanje E i f _m |
| E _{f_m} _2cm_T* | 20 × 20 × 120 | 6 | Tvrdo puno drvo | Određivanje E i f _m |
| E _{f_m} _6cm_ML_O* | 60 × 60 × 120 | 6 | Meko lamelirano drvo - Ortogonalno | Određivanje E i f _m |
| E _{f_m} _6cm_ML_P* | 60 × 60 × 120 | 6 | Meko lamelirano drvo - Paralelno | Određivanje E i f _m |
| E _{f_m} _6cm_TL_O* | 60 × 60 × 120 | 6 | Tvrdo lamelirano drvo - Ortogonalno | Određivanje E i f _m |
| E _{f_m} _6cm_TL_P* | 60 × 60 × 120 | 6 | Tvrdo lamelirano drvo - Paralelno | Određivanje E i f _m |

* M – meko puno drvo; T – tvrdo puno drvo; ML_O - meko lamelirano drvo ortogonalni smjer; ML_P meko lamelirano drvo poprečni smjer; TL_O – tvrdo lamelirano drvo ortogonalni smjer; TL_P – tvrdo lamelirano drvo poprečni smjer

Svi uzorci ispitivani su savijanjem u 4 točke do sloma prema [67]. Postavke eksperimenta za uzorke od mogu se vidjeti na slici 3.31.



Slika 3.31 Materijalne karakteristike - postavke eksperimenta: (a) 20×20 mm; (b) 60×60 mm ortogonalno; (c) 60×60 paralelno

Za ispitivanje je korišten univerzalni ispitni stroj Z600E kapaciteta 600 kN. Prema EN 408 [67], opterećenje se primjenjuje konstantnom brzinom. Brzina kretanja glave pistona ne smije biti veća od $(0.003 h)$ mm/s, gdje je h visina uzorka. Primjer eksperimentalnog ispitivanja dan je na slici 3.32.



Slika 3.32 Početak ispitivanja – uzorak dimenzija 20×20 mm

Ispitivanje se provedeno sve do sloma uzorka (Slika 3.33). Do loma je došlo u donjoj zoni presjeka usred dostizanja čvrstoće drva.



Slika 3.33 Slom uzorka i kraj ispitivanja – uzorak 60×60 mm

3.3.1.1 Globalni modul elastičnosti i karakteristična čvrstoća na savijanje

Globalni modul elastičnosti prema EN 408 [67], računa se prema sljedećem izrazu:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (3.2)$$

gdje je :

- a udaljenost između osi ležaja i koncentrirane sile
- l raspon
- b širina uzorka
- h visina uzorka
- $F_2 - F_1$ povećanje opterećenja u Newtonima na regresijskoj liniji s koeficijentom korelacije od 0,99 ili bolje
- $w_2 - w_1$ prirast deformacije u milimetrima koji odgovaraju $F_2 - F_1$

Modul elastičnosti izračunava se na točnost od 1 %. Za analizu je korišten dio dijagrama između $0.1 F_{max}$ i $0.4 F_{max}$. Definiira se najduži dio ovog dijela koji daje koeficijent korelacije od 0.99 ili više, pod uvjetom da taj dio pokriva barem raspon od $0.2 F_{max}$ do $0.3 F_{max}$.

Srednja vrijednosti modula elastičnosti \bar{E} računat će se iz sljedeće jednadžbe [68], koja uključuje prilagodbu čistog globalnog modula elastičnosti iz testa savijanjem :

$$\bar{E} = (\sum E_i/n) \cdot 1.3 - 2690 \quad (3.3)$$

gdje je

E_i i-ta vrijednost modula elastičnosti u rasponu od 1 do n izražena u N/mm².

Konačno, karakteristična vrijednost modula elastičnosti dobije se iz :

$$E_{0,mean} = \frac{\sum \bar{E}_j n_j}{\sum n_j} \quad (3.4)$$

Čvrstoća na savijanje određena je prema [67] :

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (3.5)$$

Srednja vrijednost \bar{f}_m i standardna devijacija s_y za stohastičku varijablu $f_m = \ln f_i$ određene su kao :

$$\bar{f}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln f_i \quad (3.6)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln f_i - \bar{f}_m)^2} \quad (3.7)$$

Karakteristična čvrstoća (5 % percentilna vrijednost) je izračunata prema normi BS EN 14358:2006 [69] :

$$f_{m,k} = \exp(\bar{f}_m - k_s s_y) \quad (3.8)$$

gdje je k_s dan u Tablici 1 u [69].

Vrijednosti globalnog modula elastičnosti i karakteristične čvrstoće na savijanje za sve uzorke dane su u nastavku (Tablica 3.7).

Tablica 3.7 Osnovni materijal – globalni modul elastičnosti i karakteristična čvrstoća na savijanje

| Naziv | $E_{0,mean}$ (N/mm ²) | $f_{m,k}$ (N/mm ²) |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| E_fm_2cm_M | 13111.5 | 28.3 |
| E_fm_2cm_T | 19487.3 | 60.3 |
| E_fm_6cm_ML_O | 11391.1 | 26.1 |
| E_fm_6cm_ML_P | 11333.3 | 24.7 |
| E_fm_6cm_TL_O | 18491.0 | 55.3 |
| E_fm_6cm_TL_P | 18503.2 | 60.1 |

3.3.1.2 Gustoća

Na posebno izrađenim uzorcima izmjerene je gustoća drva. Ukupno su napravljena 24 uzorka, po 12 od svake vrste drva, tj. jele i graba (vidi sliku 3.34 i tablicu 3.8.).



Slika 3.34 Uzorci za ispitivanje gustoće i vlage

Tablica 3.8 Gustoća

| | Širina (mm) | | | Duljina (mm) | | | Visina (mm) | | | Masa (g) | | | Gustoća (kg/m ³) | | |
|--------------------|-------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| | Avg | CoV. (%) | St. Dev. | Avg | CoV. (%) | St. Dev. | Avg | CoV. (%) | St. Dev. | Avg | CoV. (%) | St. Dev. | Avg | CoV. (%) | St. Dev. |
| M1– M12 | 119 | 0.19 | 0.22 | 120 | 0.30 | 0.36 | 119 | 0.22 | 0.27 | 657 | 1.52 | 10 | 385 | 1.42 | 5.47 |
| T1– T12 | 119 | 0.21 | 0.25 | 119 | 0.35 | 0.42 | 118 | 0.89 | 1.06 | 1337 | 1.35 | 18 | 789 | 1.60 | 12.6 |

Određena je karakteristična vrijednost gustoće uzoraka tvrdog i mekog drva prema [68] koja je prikazana u odjeljku 0 i tablici 3.8.

$$\rho_{05} = (\bar{\rho} - 1.65s) \quad (3.9)$$

gdje je $\bar{\rho}$ srednja vrijednost a s vrijednost standardne devijacije.

Konačno, karakteristična vrijednost gustoće određuje se prema izrazu :

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05,j} n_j}{\sum n_j} \quad (3.10)$$

Za meko drvo

$$\rho_{k,m} = 376.65 \text{ kg/m}^3 \quad (3.11)$$

a za tvrdo drvo

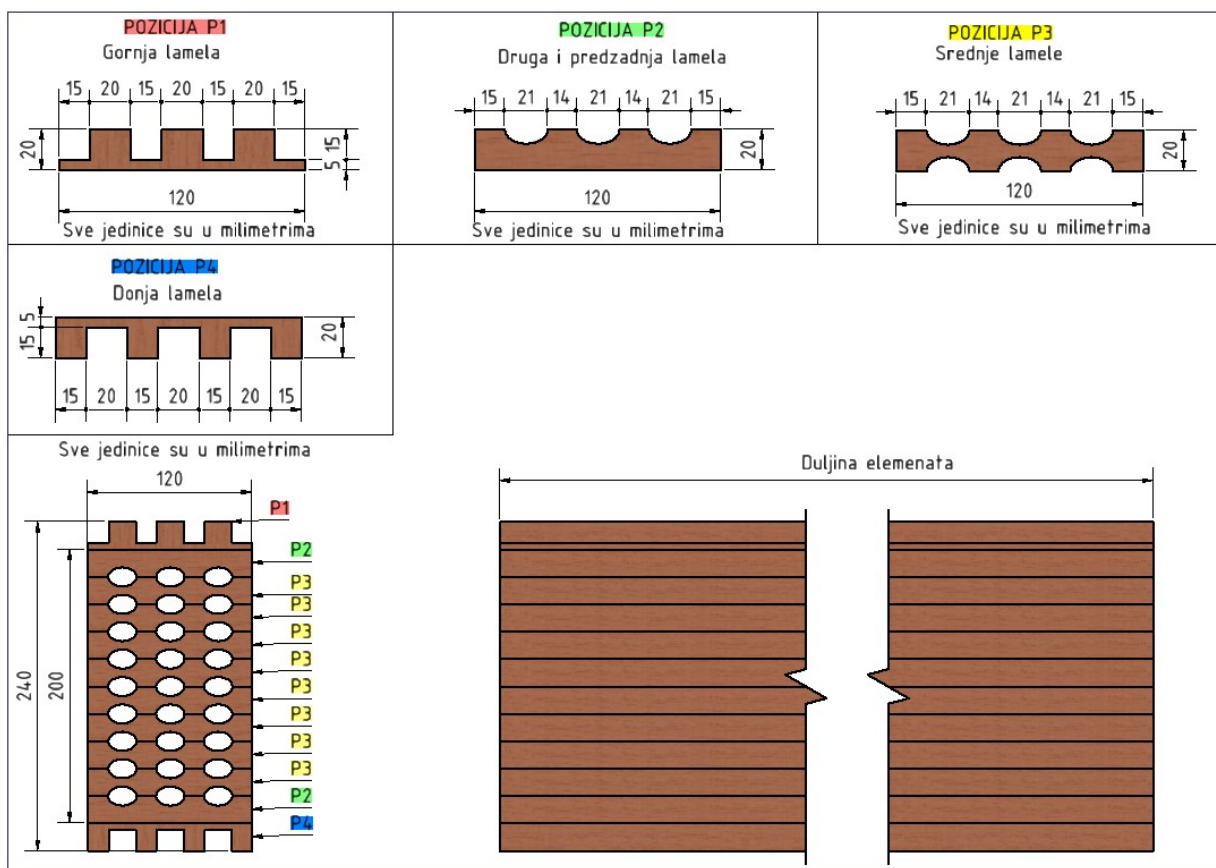
$$\rho_{k,t} = 768.89 \text{ kg/m}^3 \quad (3.12)$$

3.3.2 Ispitivanje savijanjem

3.3.2.1 Uvod

Ovo poglavlje je nastavak i unaprjeđenje istraživanja koje je opisano u poglavlju 3.2. Materijalne karakteristike uzoraka bile su iste kao i u preliminarnom istraživanju. Elementi su izrađeni od četinara s pretežnom uporabom mekog drva od jele (*Abies alba*), te tvrdog drva od graba (*Carpinus betulus*). Ispitivanje tvrdog drva je nadopuna prethodnom preliminarnom eksperimentalnom ispitivanju (poglavlje 3.2.1). U dosadašnjem istraživanju doneseni su osnovni zaključci o ponašanju ovih inovativnih elemenata, identificirani nedostaci i dane preporuke za daljnja istraživanja. Prije svega, to se odnosi na vrstu prošupljenja (kružne ili eliptične), raspored lamela, tj. rupa, te na ljepilo kojim se lamele spajaju. Slijedom toga, donesen je zaključak da uzorci s eliptičnim otvorima imaju veću i zadovoljavajuću nosivost i bolje ponašanje, stoga se nastavak istraživanja odnosi samo na tu vrstu uzoraka. Nadalje, u preliminarnom istraživanju korišteno je ljepilo nezadovoljavajuće kvalitete. Stoga, u daljnjem istraživanju korišteno je 1-komponentno poliuretansko ljepilo PUR K. 510 s ojačanim vlaknima [24]. Prema DIN EN 14080 [70] i DIN EN 15497 [71] ovo je jedno-komponentno certificirano PUR ljepilo za nosive drvene konstrukcije. Odobreno je prema SANS 10183-2 kao ljepilo za drvo za nosive drvene komponente u uporabnoj klasi S3, što znači da je prikladno za dugotrajnu vanjsku upotrebu, čak i uz izravan kontakt s tlom.

Konačno, rubne lamele izrađene su bez rupa, kako bi se izbjegla koncentracija naprezanja u rubnim zonama. Novi, poboljšani drveni elementi korišteni u ovom radu mogu se vidjeti na slici 3.35.



Slika 3.35 Poboľšani prošupljeni lijepljeno lamelirani drveni elementi

3.3.2.2 Savijanje oko jače osi

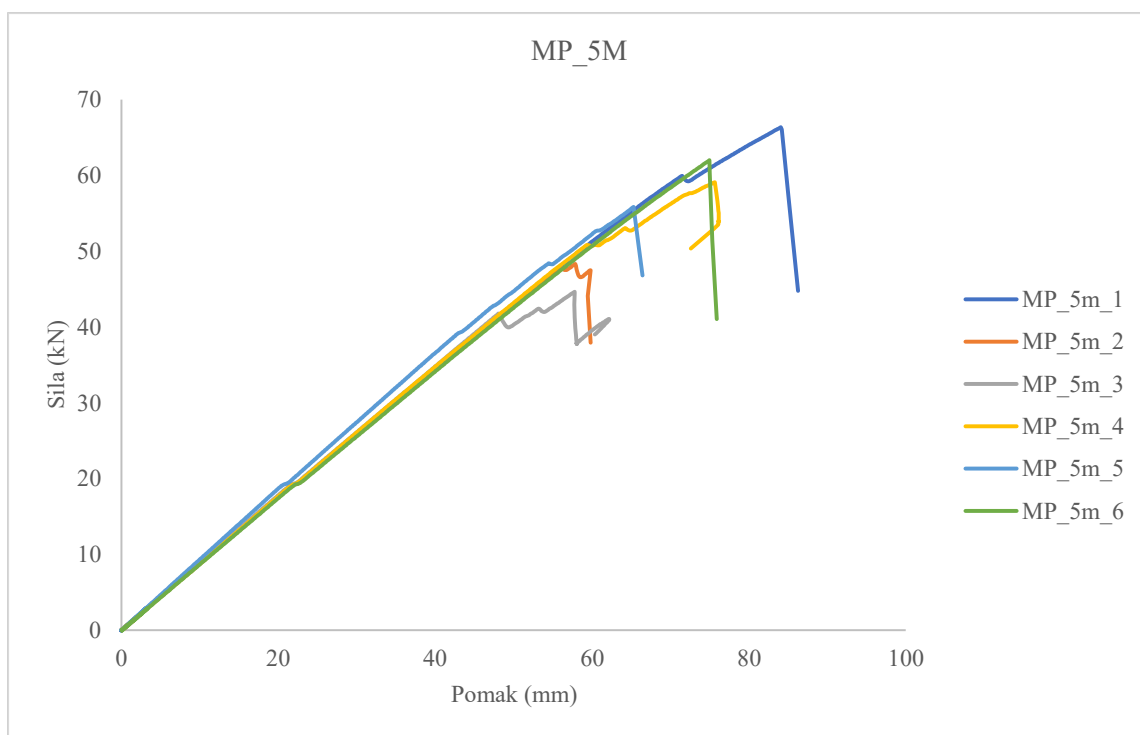
Postupak ispitivanja identičan je postupku preliminarnog ispitivanja kod inicijalnih uzoraka obrađenih u poglavlju 3.2.1., a sve prema normi EN 408 [67]. Neposredno prije svakog ispitivanja, izmjerena je vlažnost uzoraka. Prosječna vlažnost iznosila je 11 %. Postavke eksperimentalnog ispitivanja savijanjem oko jače osi mogu se vidjeti na slici 3.36.



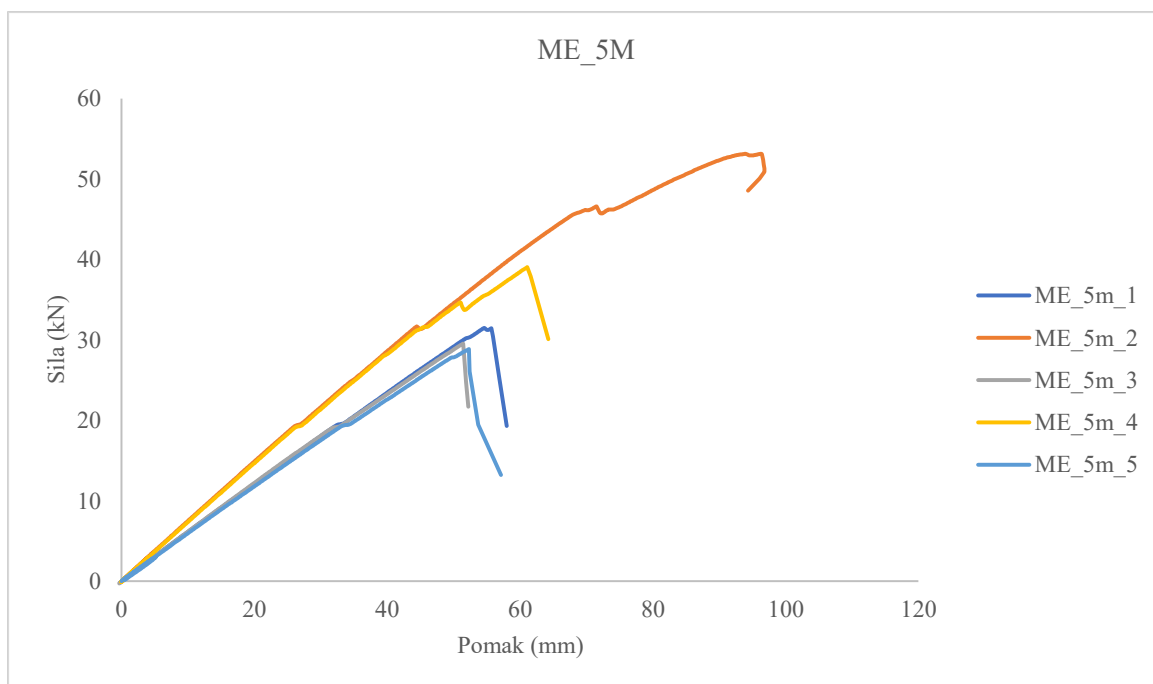
Slika 3.36 Ispitivanje grede savijanjem oko jače osi

Rezultati ispitivanja prikazani su u nastavku (Slika 3.37), a oznake uzoraka su sljedeće:

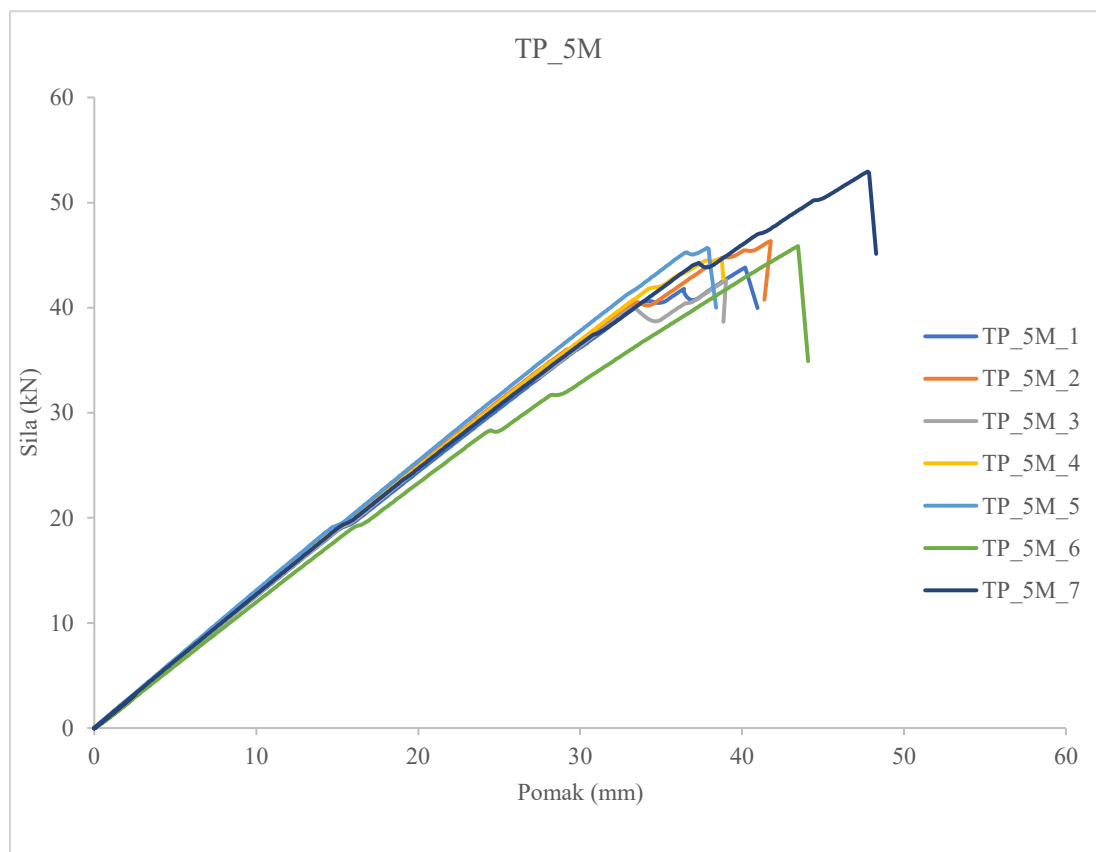
- MP – meko drvo, puni poprečni presjek (bez prošupljenja)
- ME – meko drvo s elipsastim prošupljenjima
- TP – tvrdo drvo, puni poprečni presjek (bez prošupljenja)
- TE – tvrdo drvo s elipsastima prošupljenjima



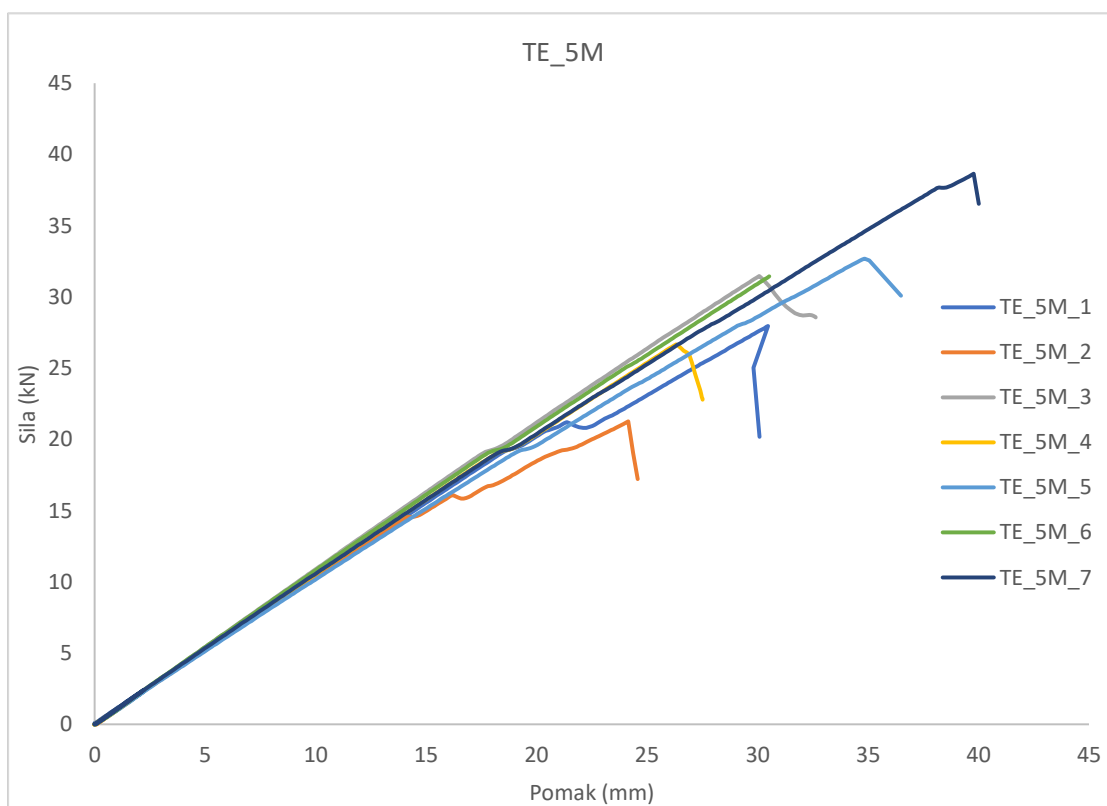
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 3.37 Dijagram sila – pomak za uzorke savijane oko jače osi: (a) MP_5m; (b) ME_5m; (c) TP_5m; (d) TE_5m

Na prikazanim dijagramima možemo vidjeti da je kod mekog drva ponašanje duktilnije, a lom je najavljen postepenim deformiranjem, dok je kod tvrdog drveta lom krta, drvo puca iznenadno, bez prethodne najave. Dodatan problem kod loma tvrdog drva je pucanje po zupčastom spoju, odnosno uzdužnom spoju lamela (Slika 3.38)



Slika 3.38 Savijanje oko jače osi- pucanje tvrdog drva po zupčastom spoju

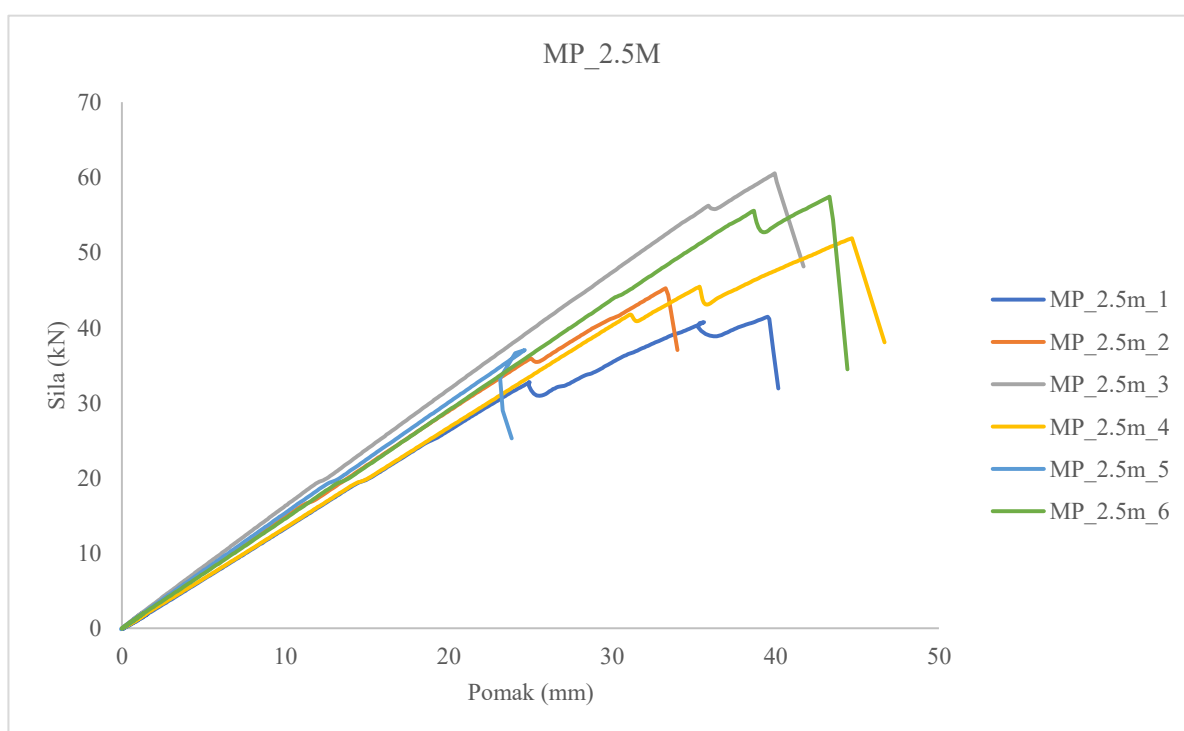
3.3.2.3 Savijanje oko slabije osi

Kao i kod savijanja oko jače osi, postupak ispitivanja grede oko slabije osi izvodio se identično kao u poglavlju 3.2.2 kod inicijalnih uzoraka. Novosti, razlike i poboljšanja su ista kao ona za savijanje oko jače osi opisana u prethodnom poglavlju. Postavke eksperimentalnog ispitivanja mogu se vidjeti na slici 3.39.

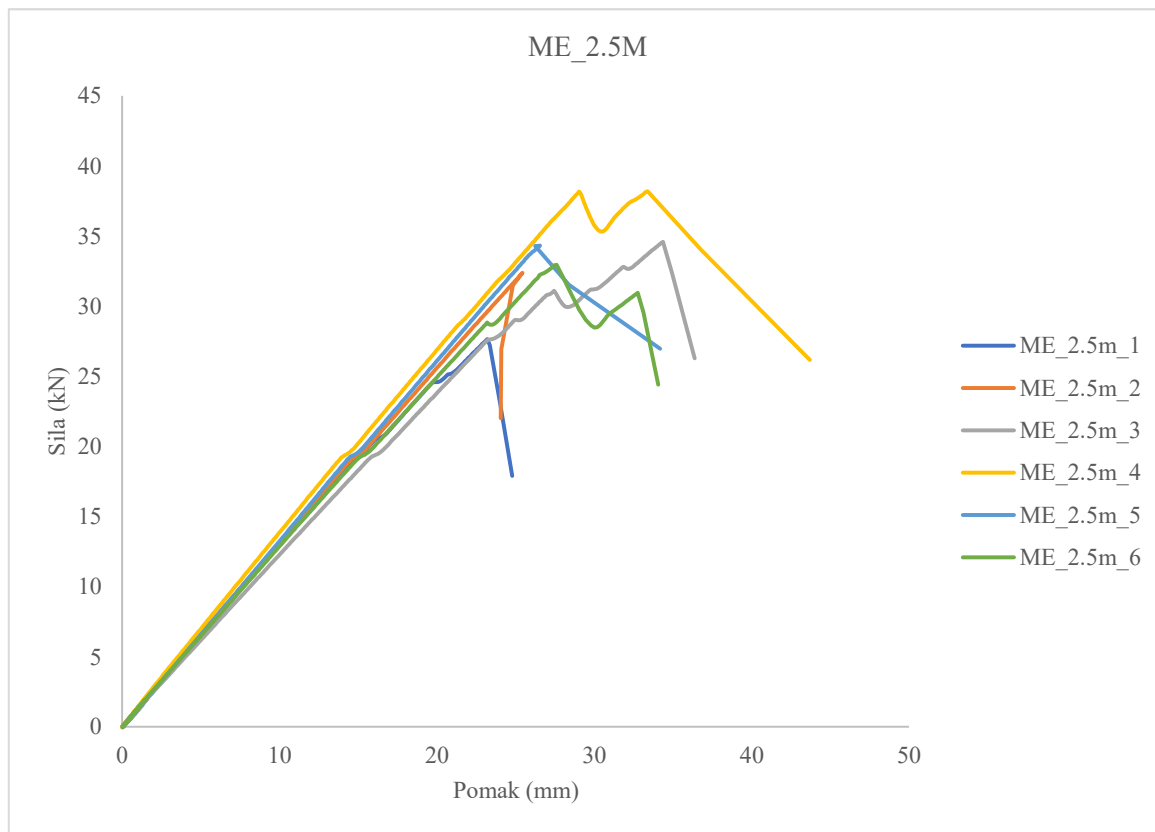


Slika 3.39 Ispitivanje grede savijanjem oko slabije osi

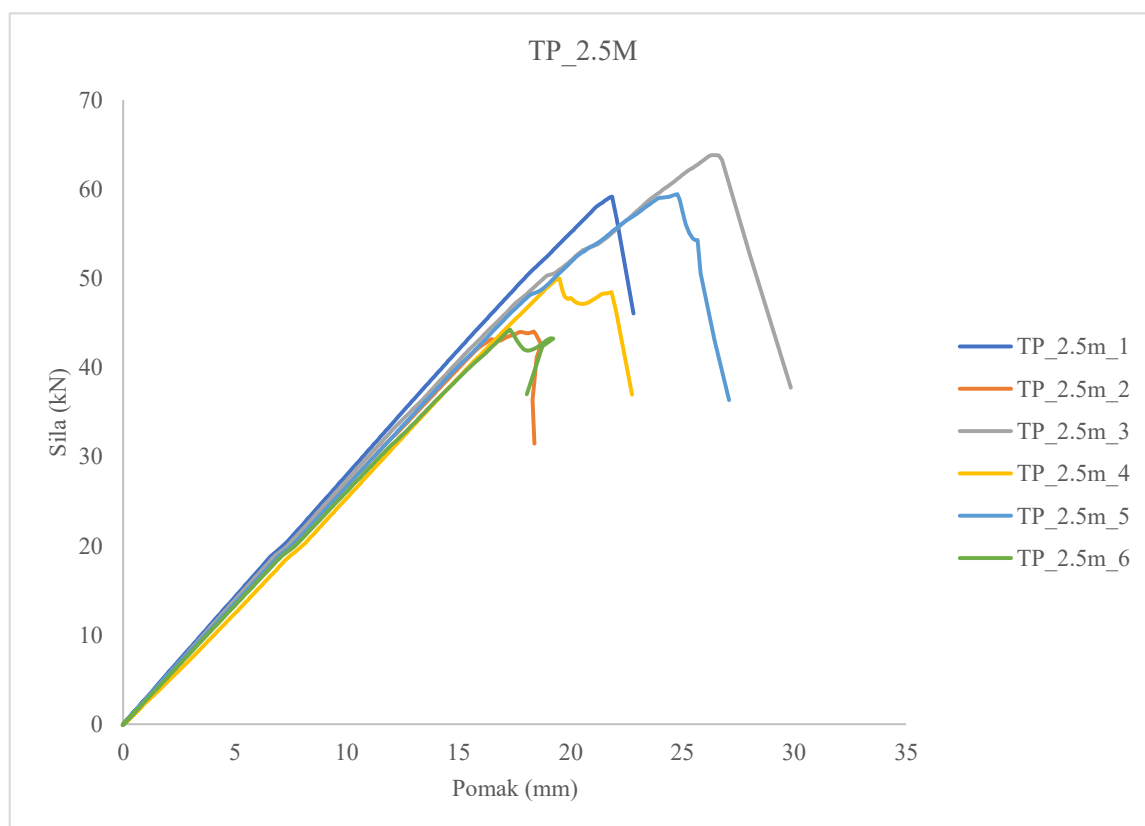
Rezultati ispitivanja prikazani su u nastavku (Slika 3.40).



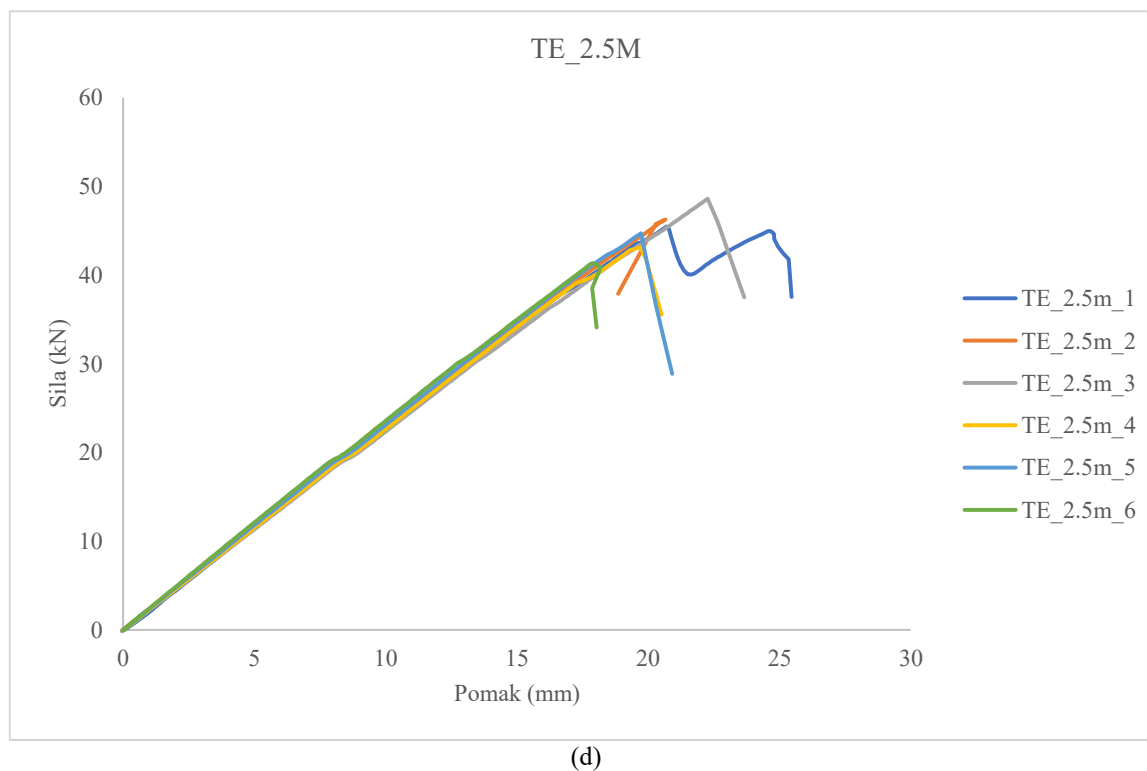
(a)



(b)



(c)



Slika 3.40 Dijagram sila – pomak: (a) MP_2.5m; (b) ME_2.5m; (c) TP_2.5m; (d) TP_2.5m

Može se uočiti analogija ponašanja elemenata savijanih oko slabije osi, sa onim oko jače osi. Uzorci mekog drva imaju duktilnije ponašanje, za razliku od uzoraka od tvrdog drva kod kojih dolazi do krtog loma i to po zupčastom spoju (Slika 3.41).



Slika 3.41 Savijanje oko slabije osi- pucanje tvrdog drva po zupčastom spoju

3.3.2.4 Karakteristična čvrstoća i globalni modul elastičnosti uzoraka opterećenih savijanjem

Prema postupku opisanom u poglavlju 3.3.1, a sve prema normi EN 408 [67] određena je karakteristična čvrstoća na savijanje, te globalni modul elastičnosti. Izrazi (3.2) i (3.5) ne mogu se koristiti u navedenom obliku za inovativne (prošupljene) lamelirane drvene elemente. Napravljena je prilagodba izraza, te su predložene novi izrazi za određivanje globalnog modula elastičnosti i karakteristične vrijednosti čvrstoće na savijanje. Novi izraz za određivanje globalnog modula elastičnosti inovativnih prošupljenih lameliranih elemenata dan je u nastavku.

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{24 \cdot I \cdot \left(\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (3.13)$$

gdje je

$$I_y = \frac{bh^3}{12} - n_{r0} \cdot I_{ye} - 2 \sum_{i=1}^{Nr} n_{ri} [I_{ye} + A_e \cdot (i \cdot d)^2] \quad (3.14)$$

moment tromosti za inovativne prošupljene drvene elemente, koji su simetrični oko obje osi, dok je

$$I_z = \frac{hb^3}{12} - n_{s0} \cdot I_{ze} - 2 \cdot \sum_{i=1}^{Ns} n_{si} [I_{ze} + A_e \cdot l_s^2] \quad (3.15)$$

moment tromosti oko slabije osi za inovativne prošupljene drvene elemente.

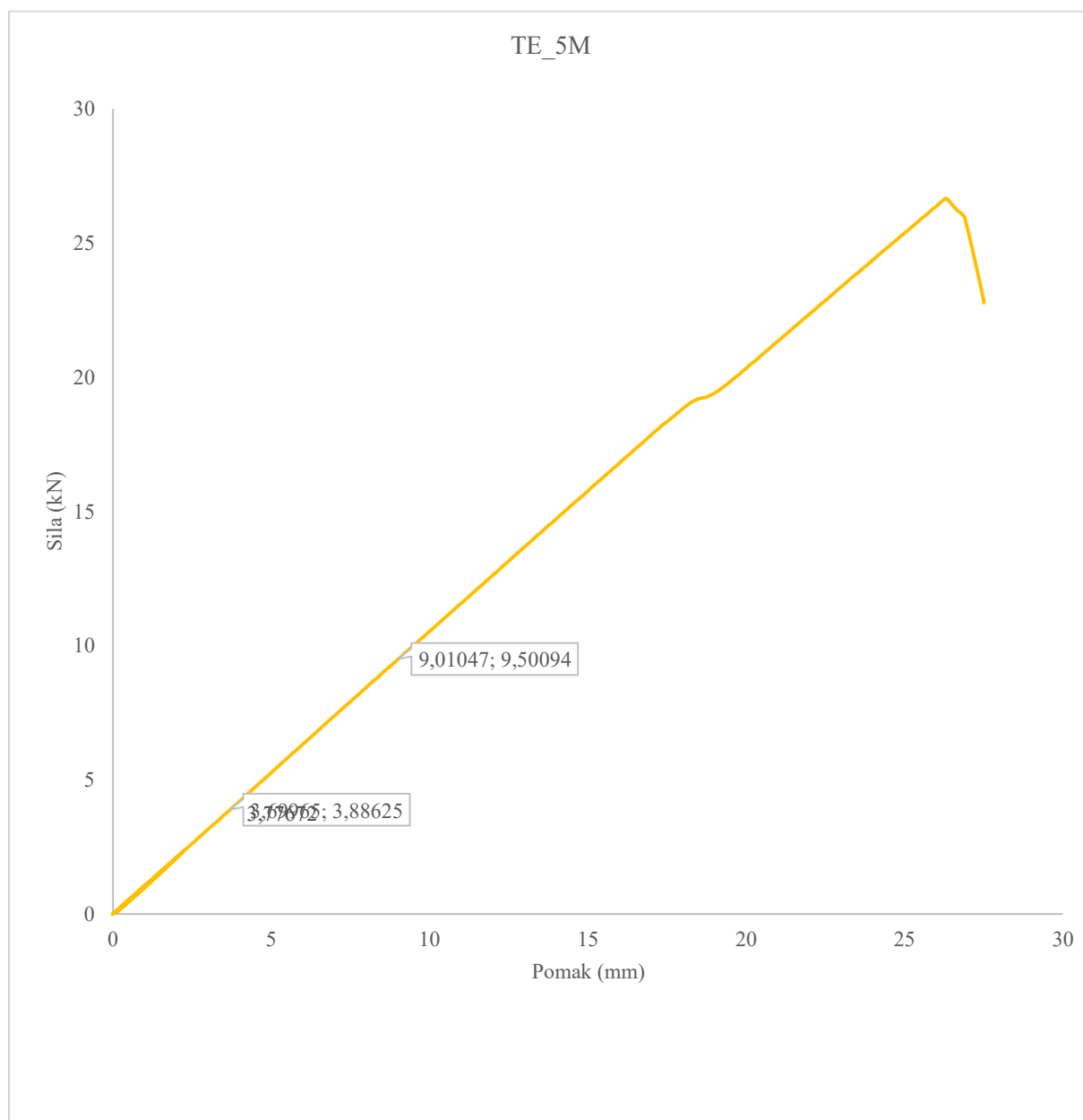
U izrazima (3.14) i (3.15) parametri su opisani prema tablici 3.9:

Tablica 3.9 Opis parametara korištenih u izrazima za modul elastičnosti

| Opis | Oznaka |
|--|--------|
| Debljina lamele | d |
| Visina poprečnog presjeka elementa | h |
| Širina poprečnog presjeka elementa | b |
| Broj redova od osi težišta prema gore/dolje | N_r |
| Broj stupaca od osi težišta prema lijevo/desno | N_s |
| Broj rupa u i-tom redu | n_r |
| Broj rupa u i-tom stupcu | n_s |
| Oсна udaljenosti redova rupa=debljina lamele | l_r |
| Oсна udaljenost stupaca rupa | l_s |
| Velika poluos elipse | a |
| Mala poluos elipse | b |

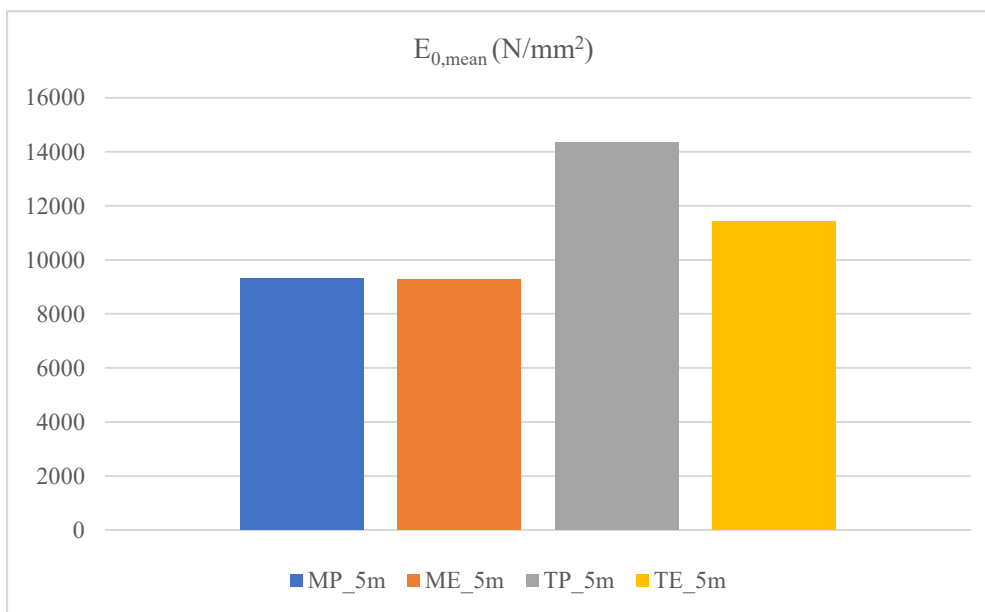
| Opis | Oznaka |
|----------------------------------|----------|
| Površina elipse | A_e |
| Moment tromosti elipse oko osi y | I_{ye} |
| Moment tromosti elipse oko osi z | I_{ze} |

Na slici 3.42 prikazan je primjer određivanja sila F_1 i F_2 , odnosno ω_1 i ω_2 s potrebnih za izračun globalnog modula elastičnosti prema izrazu (3.2) u poglavlju 3.3.1.1.

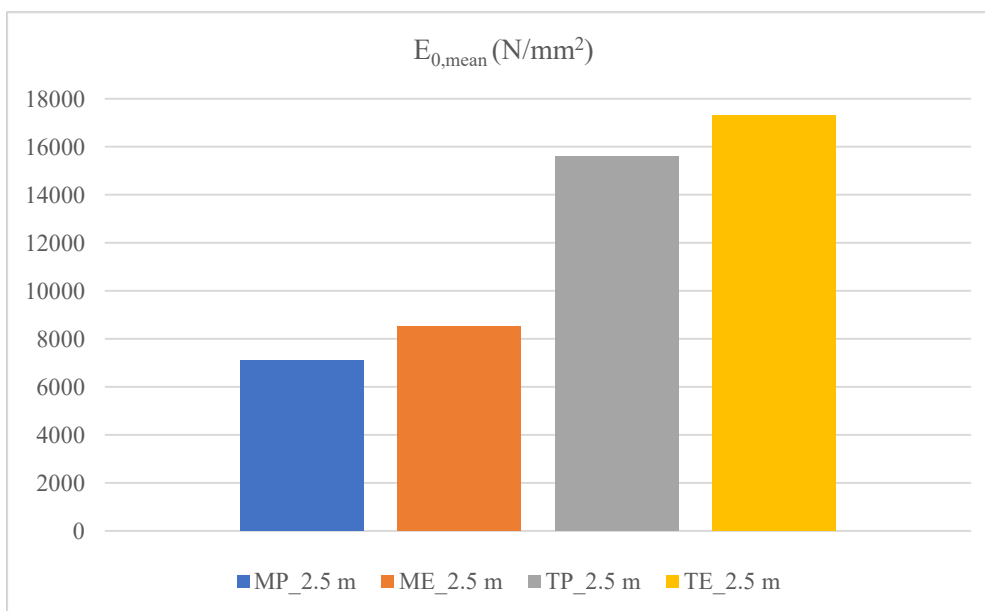


Slika 3.42 Primjer određivanja globalnog modula elastičnosti

Nakon statističke obrade rezultata svih ispitivanja prema [72–74], dobiveni su rezultati prikazani na slici 3.43a za uzorke savijane oko jače osi, te na slici 3.43b za uzorke savijane oko slabije osi.



(a)



(b)

Slika 3.43 Usporedba globalnog modula elastičnosti : (a) uzorci savijani oko jače osi; (b) uzorci savijani oko slabije osi

Na slici 3.43 vidimo da je kod tvrdog drva elastičnosti očekivano veći nego kod mekog. Prošupljeni elementi imaju manji modul elastičnosti od elemenata punog poprečnog presjeka, međutim razlika nije velika što je dobar pokazatelj vezano za krutost prošupljenih elemenata.

Nadalje, predloženi su i novi izrazi za određivanje karakteristične čvrstoće na savijanje inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata, kako slijedi:

$$f_m = \frac{Fa}{2W} \quad (3.16)$$

gdje je

$$W_y = \frac{bh^2}{6} - \frac{2 \cdot n_{r0} \cdot I_{ye}}{h} - \frac{4}{h} \cdot \sum_{i=1}^{Nr} n_{ri} [I_{ye} + A_e \cdot (i \cdot d)^2] \quad (3.17)$$

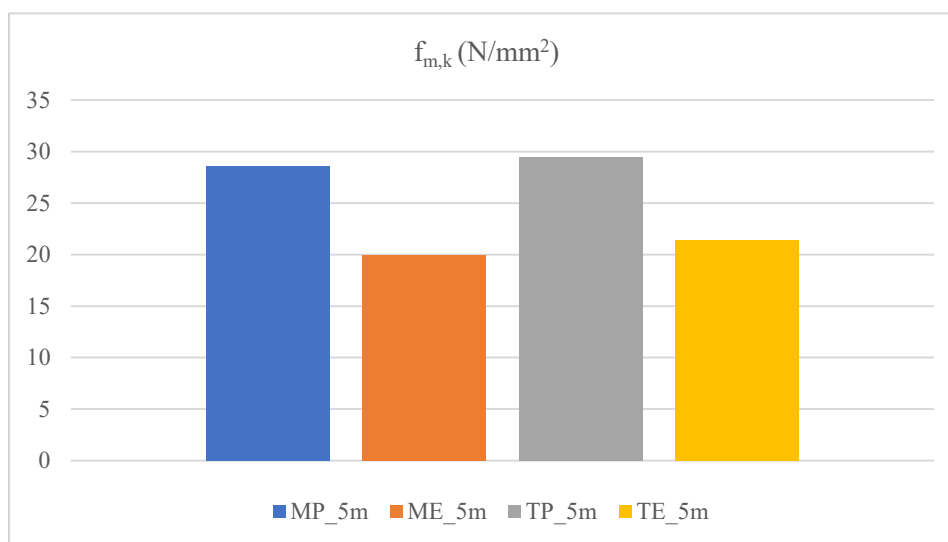
moment otpora presjeka oko jače osi, odnosno

$$W_z = \frac{hb^2}{6} - \frac{2 \cdot n_{s0} \cdot I_{ze}}{b} - \frac{4}{b} \cdot \sum_{i=1}^{Nr} n_{si} [I_{ze} + A_e \cdot l_s^2] \quad (3.18)$$

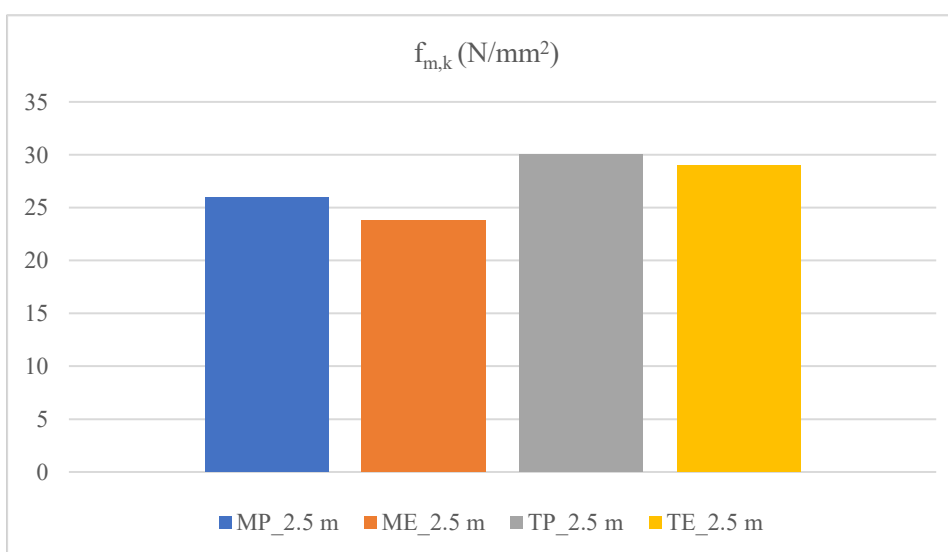
moment otpora presjeka oko slabije osi.

Objašnjenje pojedinih članova izraza dato je u tablici 3.9.

Usporedba dobivenih vrijednosti čvrstoće na savijanje dani su na slici 3.44.



(a)



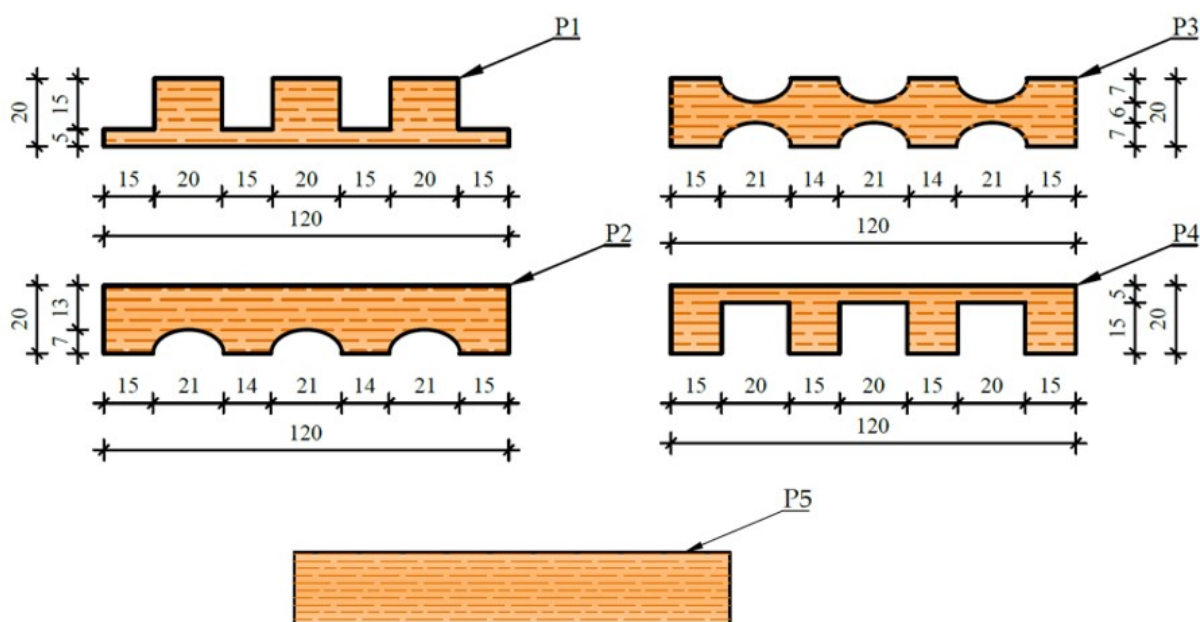
(b)

Slika 3.44 Usporedba karakterističnih čvrstoća na savijanje: (a) uzorci savijani oko jače osi; (b) uzorci savijani oko slabije osi

Može se zaključiti da pri savijanju oko jače osi, čvrstoća mekog i tvrdog drva je podjednaka, a uzrok tomu je prijevremeni kruti lom po zupčastom spoju kod elemenata od tvrdog drva, odnosno velika čvrstoća tvrdog drva u odnosu na čvrstoću ljepila. Stoga, potrebno je koristiti kompatibilniju vrstu ljepila za uzorke od tvrdog drva. Kod savijanja oko slabije osi, razlika između karakterističnih čvrstoća je veća zbog manjeg iznosa sile, odnosno statičke visine, pa je kasnije dosegnuta čvrstoća ljepila.

3.3.2.5 Parametarska analiza i diskusija

Ovo istraživanje daje drugačiji pristup zbog mogućnosti postizanja različitih karakteristika presjeka, ovisno o namjeni elementa. Kombinacijom različitih debljina lamela, materijala pojedinih lamela i u konačnici rasporeda lamela, mogu se postići pozitivni učinci na progib ili naprezanje nosača. Ukoliko je deformacija maksimalno prošupljene grede velika, može se povećati klasa drva svih lamela. Povećanje čvrstoće, uz približno iste vrijednosti deformacije, postiže se višim klasama drveta samo vanjskih lamela. Za smanjenje deformacije i naprezanja, klasa drva može se povećati za unutarnje lamele. To bi se moglo učinkovitije postići zamjenom lamela P3 lamelama P5 ili povećanjem debljine rubnih lamela (vidi sliku 3.45).



Slika 3.45 Vrste lamela

Za drastično smanjenje pomaka i naprezanja potrebno je uz gornji rub drvenog elementa dodati P5 lamele, veće debljine u odnosu na druge. Neke od mogućih kombinacija za standardni raspon i opterećenje prikazani su u tablici 3.10.

Tablica 3.10 Mogućnosti kombiniranja različitih klasa drva i lamela.

| Kombinacija | Lamela <i>visina (mm) / broj lamela / klasa drva</i> | | | | | Visina elementa (mm) | Raspon grede (mm) | Sila (kN) | Progib (mm) | Naprezanje na rubu (MPa) |
|-------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|-------------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | | | | | |
| 1 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 20 / 8 / C20 | 20 / 1 / C20 | 20 / 0 / C20 | 240 | 4.5 | 14 | 48.3 | 25.2 |
| 2 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C22 | 20 / 8 / C22 | 20 / 1 / C22 | 20 / 0 / C20 | 240 | 4.5 | 14 | 45.9 | 25.2 |
| 3 | 20 / 1 / C35 | 20 / 2 / C22 | 20 / 8 / C22 | 20 / 1 / C35 | 20 / 0 / C20 | 240 | 4.5 | 14 | 41.4 | 29.6 |
| 4 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C35 | 20 / 8 / C22 | 20 / 1 / C22 | 20 / 0 / C20 | 240 | 4.5 | 14 | 41.5 | 22.8 |
| 5 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C22 | 20 / 8 / C35 | 20 / 1 / C22 | 20 / 0 / C20 | 240 | 4.5 | 14 | 42.1 | 23.2 |
| 6 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 20 / 6 / C20 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 240 | 4.5 | 14 | 44.3 | 23.1 |
| 7 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C22 | 20 / 6 / C22 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C22 | 240 | 4.5 | 14 | 42.1 | 23.1 |
| 8 | 20 / 1 / C35 | 20 / 2 / C22 | 20 / 6 / C22 | 20 / 1 / C35 | 20 / 2 / C22 | 240 | 4.5 | 14 | 38.3 | 27.4 |
| 9 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C22 | 20 / 6 / C22 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C35 | 240 | 4.5 | 14 | 37.9 | 20.9 |
| 10 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C22 | 20 / 6 / C35 | 20 / 1 / C22 | 20 / 2 / C22 | 240 | 4.5 | 14 | 40.7 | 22.4 |
| 11 | 25 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 20 / 8 / C20 | 25 / 1 / C20 | 20 / 0 / C20 | 250 | 4.5 | 14 | 41.6 | 22.5 |
| 12 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 20 / 8 / C20 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 280 | 4.5 | 14 | 27.8 | 17 |
| 13 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 20 / 8 / C20 | 20 / 1 / C20 | 25 / 2 / C20 | 290 | 4.5 | 14 | 24.7 | 15.6 |
| 14 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 20 / 8 / C20 | 20 / 1 / C20 | 25 / 2 / C35 | 290 | 4.5 | 14 | 21.5 | 13.6 |
| 15 | 20 / 1 / C20 | 20 / 2 / C20 | 20 / 6 / C20 | 20 / 1 / C20 | 25 / 4 / C35 | 300 | 4.5 | 14 | 17.3 | 11.3 |

3.3.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca

3.3.3.1 Uvod i pregled stanja područja

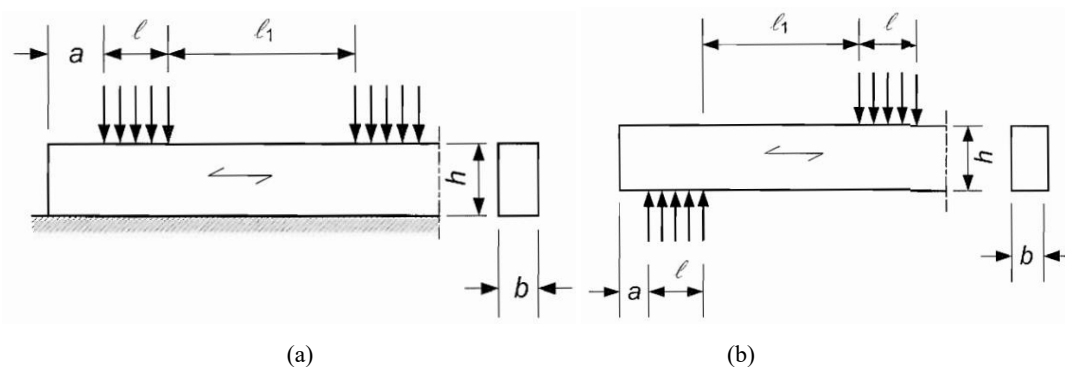
Tipični sustav drvene kuće (blokhaus, itd.) predstavlja tradicionalni sustav gradnje koji se koristi u sjevernim regijama kao i u urbanim regijama s visokim seizmičkim rizikom, kao što je područje Mediterana [75]. Konstitutivni elementi drvenog zida postavljeni su jedan na drugu i kao takvi su prepoznati kao vrlo pouzdane drvene konstrukcije. Prilikom projektiranja konstrukcija sa prošupljenim drvenim elementima jedan od najvažnijih problema je pravilna evaluacija stanja naprezanja na mjestima unosa koncentriranih sila, ali i u podnožju zida. Stoga postoji potreba za procjenom tlačnih naprezanja i deformacija okomito na vlakanca za različite rubne uvjete i orijentacije osi poprečnog presjeka prošupljenih elemenata. U ovom poglavlju napravljeno je eksperimentalno i numeričko istraživanje prošupljenih drvenih elemenata opterećenih tlačnom silom okomito na vlakanca. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s trenutnim pristupom danim u EN 1995-1-1 [1].

U znanstvenoj zajednici dosta rasprava se vodi da li standardi trebaju težiti održavanju dobro definiranih osnovnih materijalnih svojstava ili pak odražavati materijale koji se koriste u praksi. Europa se odlučila za prvi (znanstveni) pristup, s pretpostavkom da bi tada bilo moguće predvidjeti ponašanje u praktičnoj primjeni, dok su SAD/Kanada i Australija/Novi Zeland odabrali potonji (tehnološki) pristup [76].

Projektiranje i provjera tlaka okomito na vlakanca je predstavljen u Eurokodu 5 [1] i temelji se na eksperimentima Madsena i sur. [77]. Blass i Görlacher [78] predložili su modifikacije koje su i trenutno važeće. Prema ovom modelu, nosivost elementa dobiva se iz efektivne kontaktne površine A_{ef} , karakteristične tlačne čvrstoće okomito na vlakanca $f_{c,90,k}$ i koeficijenta $k_{c,90}$ koji uzima u obzir konfiguraciju opterećenja, mogućnost cijepanja i stupanj tlačne deformacije [1]. Efektivna kontaktna površina A_{ef} određuje se uzimajući u obzir efektivnu kontaktnu duljinu paralelnu sa vlakancima, gdje je stvarna kontaktna duljina l , na svakoj strani uvećana za 30 mm.

Prema EC5 [1], vrijednost $k_{c,90}$ treba uzeti kao 1.0, osim ako se ne primjenjuju uvjeti opisani u nastavku. U tim se slučajevima može uzeti viša navedena vrijednost $k_{c,90}$ s graničnom vrijednošću od 1.75. Za kontinuirano oslonjene nosače, pod uvjetom da je $l \geq 2h$ (Slika 3.46a), vrijednost $k_{c,90}$ treba uzeti kao 1.25 za masivno drvo četinara i 1.5 za lijepljeno lamelirano drvo od mekog drveta, gdje je h dubina elementa i l je duljina kontaktne plohe. Za elemente na diskretnim nosačima, pod uvjetom da je $l_l \geq 2h$ (Slika 3.46b), vrijednost $k_{c,90}$ trebala bi biti 1.5 za puno meko drvo i 1.75 za lijepljeno lamelirano meko drvo ako je $l \leq 400$ mm. Leijten i sur.

[76] ukazali su na nekonzistentnost navedenih vrijednosti i na temelju empirijskih rezultata odredili koeficijent $k_{c,90}$. Konačno, predložili su modificirane izraze za $k_{c,90}$ koristeći Van der Putov fizički model [79].



Slika 3.46 Elementi: (a) kontinuirano oslonjeni; (b) direktno oslanjanje

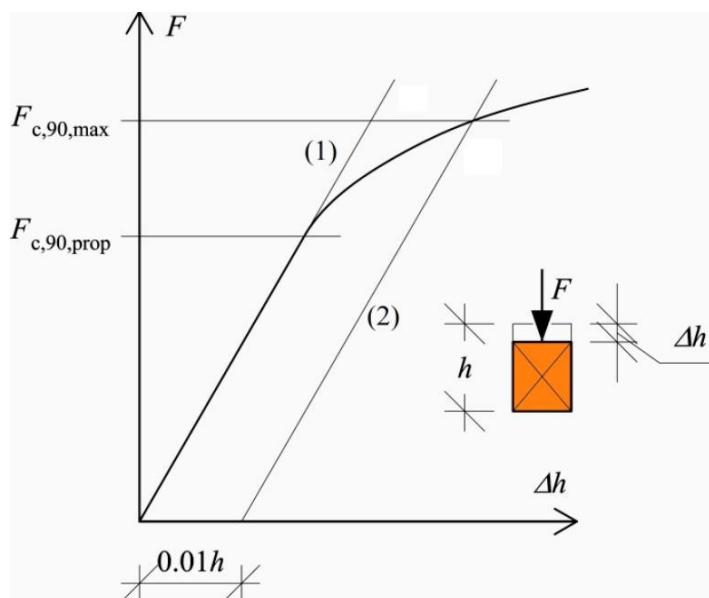
Tlačna čvrstoća drva okomito na vlakanca, $f_{c,90,k}$ (CSPG) igra važnu ulogu i često je mjerodavna provjera u graničnom stanju nosivosti. Očito, CSPG ovisi o vrsti drva i varira u radijalnom i tangencijalnom smjeru [80–82]. Hoffmeyer i sur. [83] zaključili su da se kombinirana uloga vlačnih i posmičnih naprezanja okomito na vlakanca pojavljuje u tlačnim uzorcima punog, kao i lijepjenog lameliranog drva, gdje se na projektnoj razini karakteristična čvrstoća okomito na vlakanca ne razlikuje značajno. Gehri [84] je predstavio studiju za provjeru odnosa između tlačne čvrstoće i gustoće drva, što je posebno vidljivo kada se uspoređuje zdravo drvo s trulim drvetom ili drvetom oštećenim insektima [85]. Iako je drvo prepoznato kao građevinski materijal visoko tehničko-materijalnih karakteristika u smjeru paralelnom s vlaknima, potrebno je napomenuti da su izdužene ćelije drva čvršće kada se opterećuju uzduž osi, nego kada su opterećene okomito na vlakanca [86,87]. Tako se modul elastičnosti u smjeru okomitom na vlakanca smanjuje za 30 puta, a čvrstoća za 8 puta za meko drvo i 3 puta za tvrdo drvo [68].

Da bi se odredila stvarna vrijednost $f_{c,90,k}$ europski (CEN) standard za ispitivanje EN408 [67] propisuje metodu u kojoj se drveni uzorak tlačno opterećuje ravnomjerno preko cijele površine. S druge strane, američki (ASTM) ispitni standard D143 temelji se na pristupu u kojem je ispitni drveni uzorak opterećuje u sredini pomoću čelične ploče, gdje je test prvenstveno namijenjen simulaciji ponašanje drvenog spoja koji se oslanja na zid ili temelj i nema tendenciju odrediti čvrstoću okomitu na vlakanca [76]. U nedostatku bilo kakvog fizikalnog modela za modificiranje rezultata i za objašnjenje odstupanja od rezultata ispitivanja, Kunesh je utvrdio i propisao faktore modifikacije [88]. Madsen i sur. [89] također su se istraživali odnos između deformacije i tlačne čvrstoće i prepoznali nedostatke ASTM metode. Nadalje, Leijten [90] je

istaknuo da u skandinavskim zemljama standardna karakteristična čvrstoća za element od drva smreke ima dvostruku ili čak trostruku vrijednost od naprezanja na granici proporcionalnosti određenoj ispitivanjem, čineći vrijednosti navedene u europskim standardima upitnima i vrlo konzervativnim. Daljnja istraživanja prikazana su u [91]. S obzirom na navedeno, očigledan je problem jedinstvenog pristupa određivanju tlačne čvrstoće okomito na vlakanca.

Kao posebno pitanje treba istaknuti tlačnu čvrstoću okomito na vlakanca u križno lijepljeno lameliranom drvu (CLT), gdje su značajni zaključci dani u [92–97].

Standardni europski ispitni postupak za određivanje CSPG definiran je standardom EN408 [67]. Ovaj se postupak temelji na prethodnim propisima o naprezanju vlakana na granici proporcionalnosti, ili naprezanju koje uzrokuje 1 % deformacije, koje su prvi predstavili Kolmann i Côté [98]. Korištenjem rezultata ispitivanja, na dijagramu opterećenje/deformacija ($F-\Delta h$), potrebno je definirati liniju (1) paralelnu s linearnim dijelom krivulje opterećenje-pomak i određena vrijednostima od $0.1 F_{c,90,max}$ i $0.4 F_{c,90,max}$ te pronaći sjecište sa krivuljom (Slika 3.47). Konačno, krajnja nosivost, $F_{c,90,max}$ definirana je kao sjecište krivulje i linije (2), koja je pomaknuta za 1 % standardizirane visine uzorka h i paralelna je s linijom (1). Sila koja odgovara gornjoj granici linearnog segmenta krivulje opterećenje/pomak ($F-\Delta h$) poznata je kao proporcionalna granica $F_{c,90,prop}$ [99].



Slika 3.47 Određivanje $F_{c,90,prop}$ prema [67]

S obzirom na moguću orijentaciju elemenata, a time i orijentaciju poprečnog presjeka, potrebno ispitati uzorke opterećene u oba smjera, jače i slabije osi. Kako bi se usporedila tlačna čvrstoća i faktor $k_{e,90}$ uzimajući u obzir konfiguraciju opterećenja, mogućnost cijepanja i stupanj tlačne deformacije itd., uzorci su bili opterećeni u sredini i na rubnom dijelu elemenata.

Varijantne kombinacije lamela omogućuju različite postotke perforacije poprečnog presjeka uzoraka. U ovom radu eksperimentalno je istražena maksimalno perforirana varijanta s eliptičnim rupama i uspoređena s normalnim (punim) drvenim elementima. U usporedbi s punim lijepljeno lameliranim elementima, površina poprečnog presjeka reducirana je za 26 %. Ostale varijante sa različitim postotkom perforacije istraženi su metodom konačnih elemenata, s ciljem pronalaženja optimalnog rasporeda rupa s obzirom na raspodjelu naprezanja.

Elementi su proizvedeni u dvije varijante, od četinara s pretežnom uporabom jele (*Abies alba*) i tvrdog drveta s pretežnom uporabom europskog graba (*Carpinus betulus*). Ispitivane su obje vrste prošupljenih elemenata, kao i elementi punog presjeka od četinarskog drva, što čini ukupno 120 uzoraka.

Postoje dokazi da kompresija metal-drvo ne predstavlja analognu kompresiju drvo-drvo često prisutnu u konstrukcijama [99,100]. Međutim, nije primijenjena uobičajena metoda kompresije metal na drvo [82,101,102]. Umjesto toga, između metalnog dijela laboratorijske opreme i uzorka umetnuti su elementi od tvrdog drva s propisanim kontaktnim površinama.

3.3.3.2 Materijali i metode

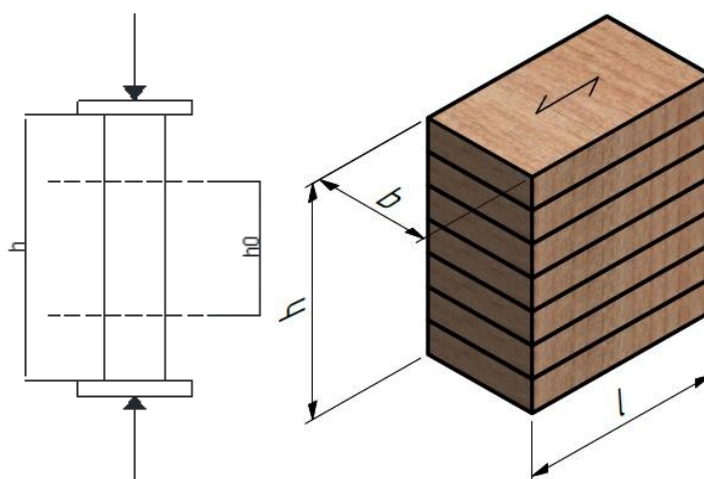
Preliminarno istraživanje napravljeno je u poglavlju 0 gdje su istražene različite vrste šupljina, kao i raspored samih šupljina. Osim eliptičnih šupljina, ispitivano je i ponašanje uzoraka s kružnim šupljinama, te je zaključeno da uzorci s kružnim šupljinama imaju značajno manju nosivost i nepovoljnije načine loma. Stoga je nastavak istraživanja proveden samo za uzorke s eliptičnim otvorima, kao i modificiranim rasporedom šupljina u odnosu na preliminarne uzorke istražene u poglavlju 3.2.

Prije svega, to se odnosi na prvu i posljednju lamelu, koje su drugačije oblikovane od unutarnjih lamela, s ciljem povećanja otpornosti, s obzirom da se najveća normalna naprezanja javljaju na rubovima poprečnog presjeka. Nadalje, zaključeno je da je povoljniji raspored rupa takav da su rupe postavljene u stupce, odnosno da postoji "hrbat" preko koje se opterećenje može prenositi odozgo prema dolje. Osim toga, promijenjena je i vrsta ljepila, s obzirom na to da je u preliminarnom istraživanju kod mnogih uzoraka došlo do loma na liniji ljepila, pa je narušena konzistentnost rezultata. U ovom istraživanju korišteno je PUR ljepilo K.510 namijenjeno za nosive drvene konstrukcije [103].

Za ocjenu CSPG-a korišten je europski standard EN 408 [67]. Izrada ispitnih uzoraka koncipirana je tako da odgovaraju stvarnom obliku elementa, a istovremeno zadovoljavaju sve uvjete propisane normom. Opterećene površine pažljivo su pripremljene kako bi se osiguralo

da su ravne i paralelne jedna s drugom te okomite na os ispitnih uzoraka. Ova priprema je obavljena nakon kondicioniranja drveta. U slučaju lijepljeno lameliranih elemenata, ispitni uzorci predviđeni za određivanje osnovne vrijednosti CSPG, izrađuju se u skladu s EN 408 [67]. Kod lijepljeno lameliranih drvenih elemenata definirana je visina h od 240 mm, minimalna širina b_{min} od 100 mm, a površina koja je potpuno opterećena $b \times l$ od 25000 mm², za postizanje volumena od 0.01 m³ za ispitivane uzorke. Uz uzorke propisane standardom, definirane su dodatni uzorci koji su opterećeni na rubu i u središnjem dijelu elementa, kako bi se odredila raspodjela sile duž uzoraka.

Uzorci su postavljeni okomito između čeličnih ploča ispitnog stroja. Zbog utora krajnjih lamela kod djelovanja opterećenja u smjeru slabije osi, izrađeni su dodatni drveni elementi koji s jedne strane odgovaraju utorima na uzorku, a s druge strane su ravni i čime se omogućuje pravilnu primjenu opterećenja po cijeloj površini uzorka. Duljina LVDT-a, h_0 (približno $0.6h$), nalazi se u sredini visine uzorka i ne bliže od $b/3$ opterećenih krajeva uzorka, kao što je prikazano na slici 3.48.



Slika 3.48 Priprema uzoraka : Pozicija opterećenja i LVDT-a (lijevo); dimenzije uzorka (desno)

Oprema za unos opterećenja koja se koristila pri ispitivanju, može mjeriti opterećenje do točnosti od 1 % opterećenja primijenjenog na ispitni uzorak ili, za opterećenja manja od 10 % maksimalnog opterećenja, do točnosti od 0.1 % maksimalnog opterećenja. Za ispitivanje je korišten univerzalni ispitni stroj Z600E kapaciteta 600 kN. Ispitni uzorak opterećen je bez ekscentriciteta. Prema standardu [67], kontrola pomaka je korištena pri različitim brzinama od 3 do 6 mm/min, ovisno o materijalu i položaju uzorka (opterećen u smjeru jake ili slabe osi). Brzina opterećenja je podešena tako da je maksimalno opterećenje $F_{c,90,max,est}$ ili $F_{c,90,max}$ postignuto unutar (300 ± 120) sekundi. Ispitivanje je prekinuto nakon dostizanja tlačne čvrstoće drvenih elemenata. Brzina je određena na temelju rezultata preliminarnih ispitivanja.

Tlačna čvrstoća $f_{c,90}$ određena je iz jednadžbe:

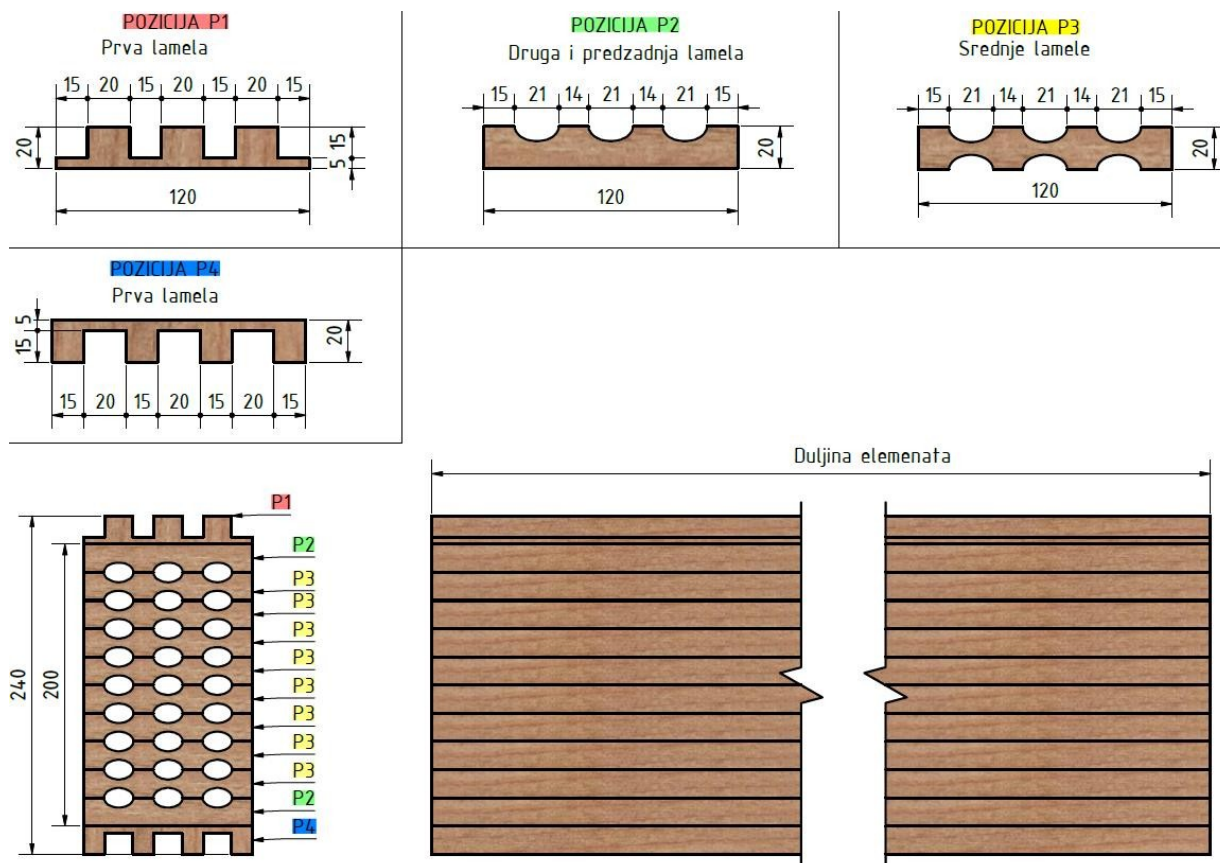
$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{bl} \quad (3.19)$$

gdje je :

| | |
|----------------|--|
| $f_{c,90}$ | tlačna čvrstoća okomito na vlakanca (N/mm ²) |
| $F_{c,90,max}$ | maksimalno tlačno opterećenje okomito na vlakanca (N) |
| b | širina (mm) |
| l | duljina (mm) |

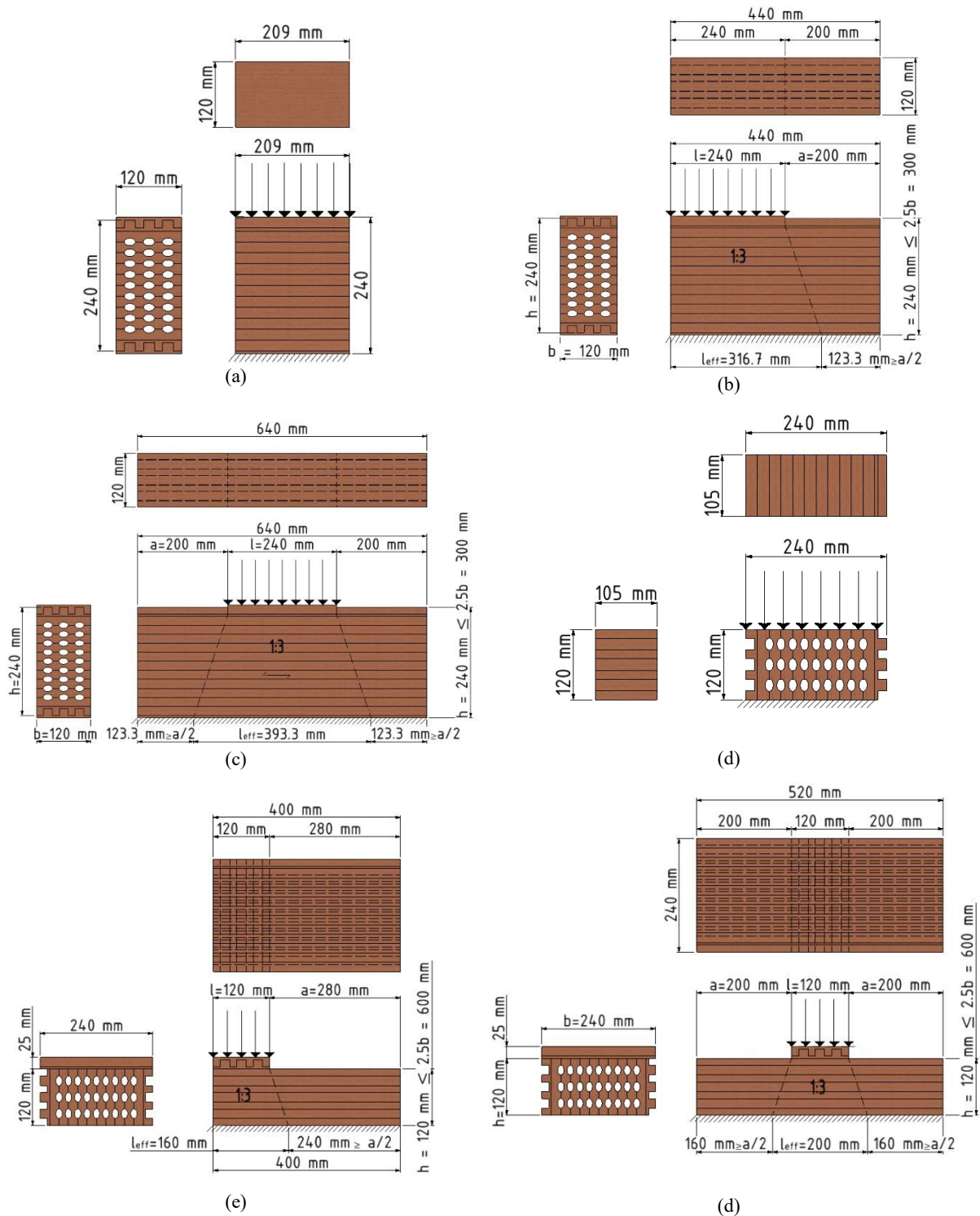
3.3.3.3 Vrsta i broj uzoraka

Kako bi se u potpunosti razmotrilo ponašanje inovativnih šupljih lijepljenih drvenih elemenata, ispitane su sve kombinacije položaja uzoraka i opterećenja. To se odnosi na položaj i opterećenje uzoraka u smjeru jače i slabije osi, kao i na položaj sile (opterećeno na rubu ili u sredini). Provedena je usporedna analiza za pune i prošupljene drvene presjeke izrađene od četinara (jele). Nadalje, analizom su obuhvaćeni prošupljeni drveni poprečni elementi od tvrdog drva (grab). Da bi se dobila informacija o osnovnoj vrijednosti CSPG za poprečne presjeke punog drveta od tvrdog drva, analizirani su i uzorci punog tvrdog drva, ali samo za osnovnu postavku ispitivanja, bez ispitivanja utjecaja položaja opterećenja (sredina i rub). Što se tiče geometrije (vidi sliku 3.49), dimenzije poprečnog presjeka za sve uzorke bile su 120 × 240 mm, dok su duljina uzoraka bile sljedeće : 105, 209, 400, 440, 520 i 640 mm.



Slika 3.49 Lamele i sastavljeni uzorak

Ukupno je izrađeno 120 uzoraka, pri čemu je za svaku od 20 skupina napravljeno po 6 uzoraka. Pojedina grupa uzoraka karakterizirana je vrstom drva, vrstom presjeka i duljinom uzorka, pri čemu duljina uzorka predstavlja da li je uzorak opterećena u smjeru jače ili slabije osi. Prema shemama na slici 3.50 ispitivani su uzorci presjeka punog i šupljeg drveta četinarara, te uzorci šupljeg drveta tvrdog drva (ukupno 18 skupina). Dodatno, prema shemama na slici 3.50a,b, ispitani su uzorci punog drva tvrdog drva (ukupno dvije skupine).



Slika 3.50 Pozicioniranje i opterećenje uzoraka, s obzirom na smjer osi i rubne uvjete: (a) Uzorak opterećen cijelom površinom u smjeru jače osi (četiri skupine); (b) uzorak opterećen rubom u smjeru jače osi (tri skupine); (c) uzorak opterećen u sredini u smjeru jače osi (tri skupine); (d) uzorak opterećen preko cijelog lica u smjeru osi slabije (četiri skupine); (e) uzorak opterećen na rubu u smjeru slabije osi (tri skupine); (f) uzorak opterećen u sredini u smjeru slabije osi (tri skupine).

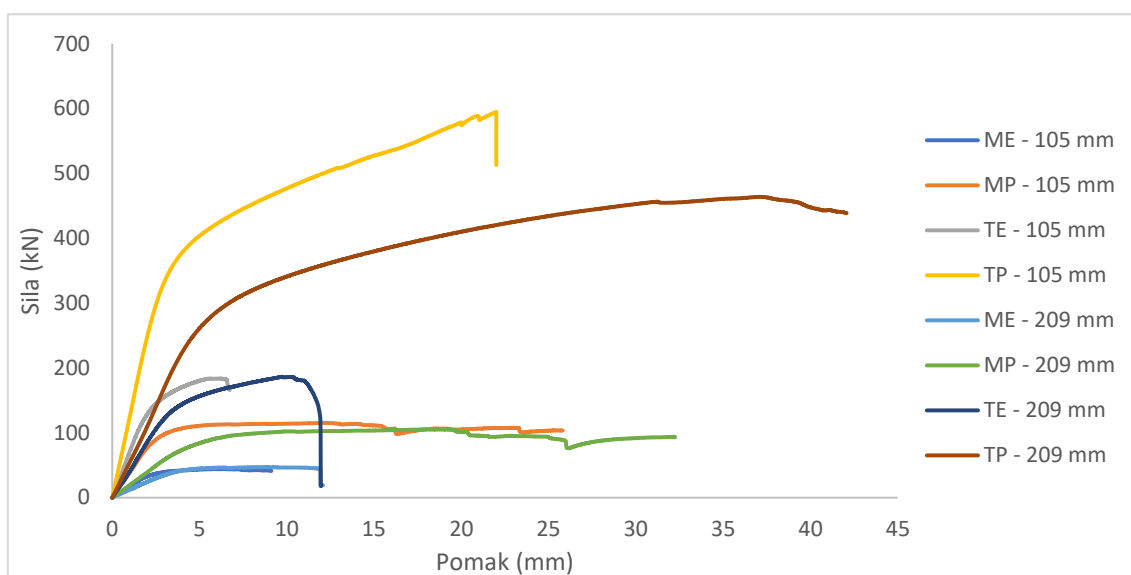
Dok se prošupljeni drveni elementi mogu vidjeti na gornjoj slici, normalni lijepljeni lamelirani uzorci su iste geometrije, ali bez elipsastih rupa. Kao što se može vidjeti na slici 3.49, prva i zadnja lamela su nazubljene, pa je potrebno umetnuti dodatne elemente kako bi vanjske površine bile ravne; donji zbog oslanjanja, a gornji zbog unosa sile. Ovi dodatni elementi potpuno su istog oblika kao lamele P1 i P4 (Slika 3.49), ali su izrađeni od tvrdog drveta kako bi se izbjeglo lokalno utiskivanje. Na dodatne elemente postavljene su čelične ploče preko kojih se unosilo opterećenje (Slika 3.51).



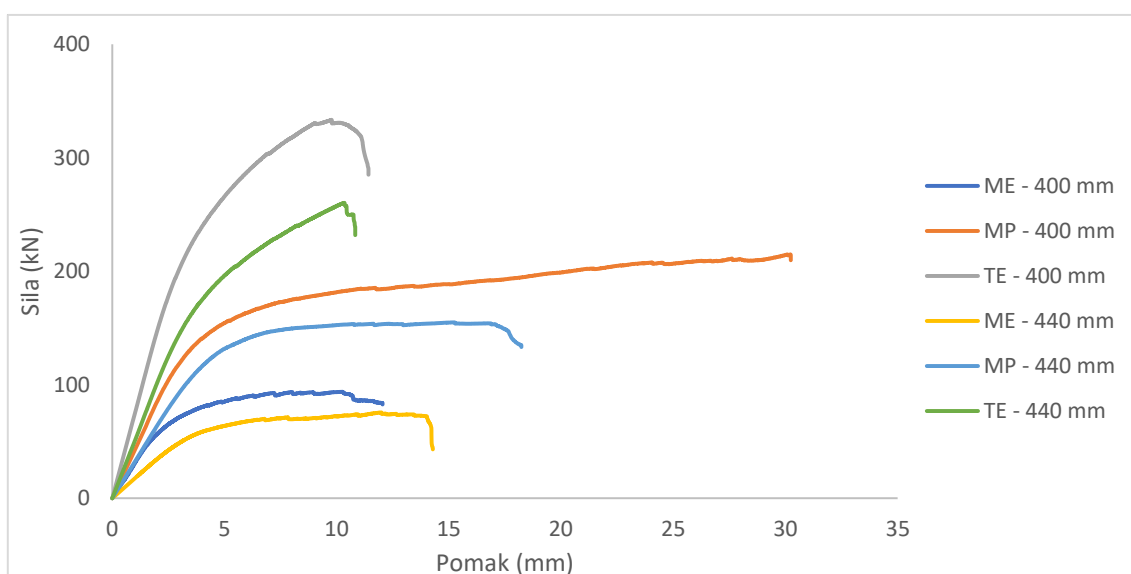
Slika 3.51 Unos opterećenja: (a) u smjeru jače osi; (b) u smjeru slabije osi

3.3.3.4 Rezultati eksperimentalnog istraživanja

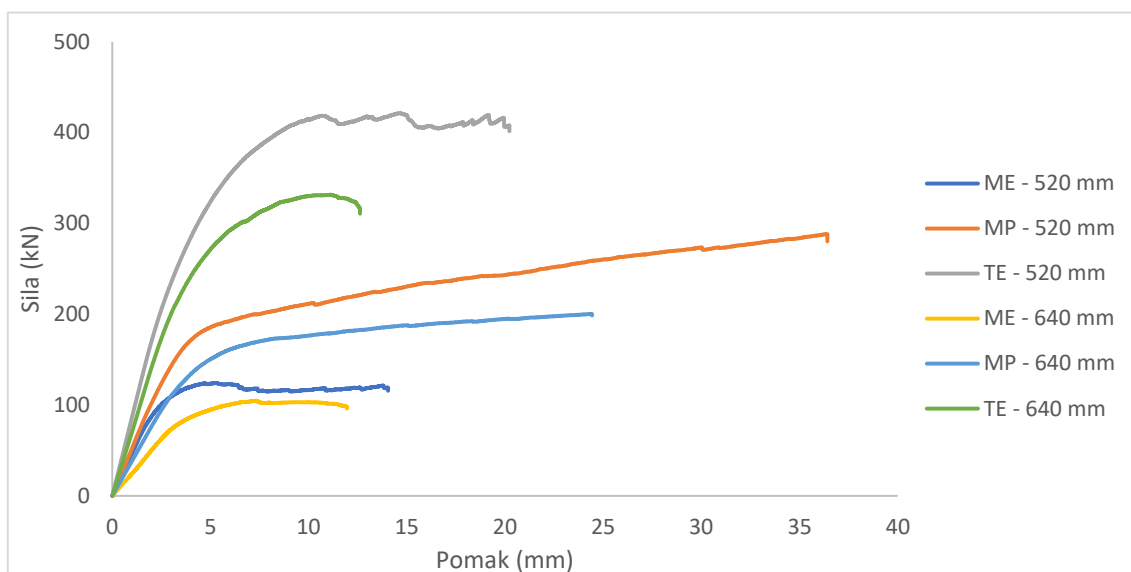
S obzirom na veliki broj uzoraka i ispitivanja, nije razumno prikazivati sve dijagrame u ovom odjeljku. Stoga, prikazani su samo karakteristični rezultati u obliku krivulja opterećenje-pomak za svaku skupinu uzoraka (vidi sliku 3.52), a ostali rezultati prikazani su tablično. Konačni cilj za sve skupine uzoraka bio je usporediti nosivost i ponašanje inovativnih šupljih drvenih elemenata s normalnim drvenim elementima. To se prije svega odnosilo na uzorke izrađene od četinara, kao sirovine koja se više koristi u praksi. Ipak, važan cilj bio je usporediti karakteristike šupljih uzoraka mekog i tvrdog drva, kao i odrediti osnovnu vrijednost CSPG tvrdog drva.



(a)



(b)



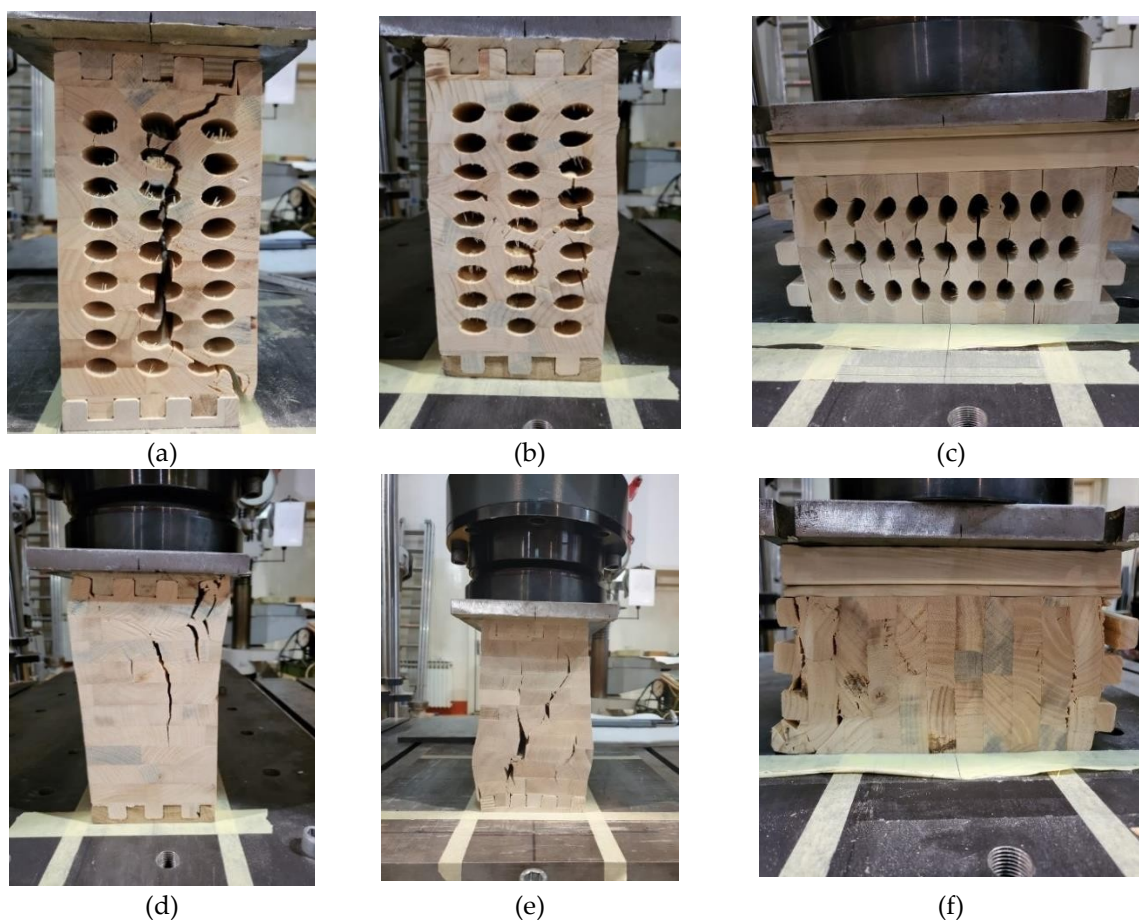
(c)

Slika 3.52 Karakteristične krivulje opterećenje-pomak za svaku skupinu uzoraka: (a) standardizirani uzorci; (b) uzorci opterećeni na rubu elementa; (c) uzorci opterećeni u sredini elementa.

Na slici 3.52 vidi se gotovo linearno ponašanje uzoraka do granice popuštanja, nakon što se nagib krivulje smanji, deformacija raste bez povećanja sile i na kraju dolazi do loma drveta. Takvo ponašanje bilo je zajedničko svim vrstama uzoraka, međutim, postoje različiti modovi loma za različite vrste uzoraka. U slučaju prošupljenih uzoraka, slom se dogodio na najslabijem ili najtanjem dijelu poprečnog presjeka između dvije eliptične šupljine. U slučaju normalnih punih uzoraka drva, drvo je napuknulo kada je dosegnuta tlačna čvrstoća.

Nadalje, uzorci mekog drva s eliptičnim šupljinama (ME) imaju najmanju krutost, što se može vidjeti iz nagiba krivulje. Uspoređujemo li ga s normalnim uzorcima četinara, bez rupa (MP), krutost i čvrstoća koje postižu (ME) uzorci znatno su niže. Štoviše, zbog punog presjeka, vodoravni dio krivulje koji predstavlja (MP) uzorke ukazuje na veću duktilnost. Fizička manifestacija toga je utiskivanje laboratorijske opreme u drveni element. Konačno, najveću krutost i silu loma dosegnuli su uzorci tvrdog drva, a uzrok tome je veća gustoća drveta, odnosno tlačna čvrstoća. Međutim, nepoželjna posljedica toga je krti lom. Iako su principi koji dovode do loma uzoraka tvrdog drva s eliptičnim šupljinama (TE) ili bez rupa (TP) isti kao kod onih izrađenih od mekog drva, može se uočiti još jedna razlika. Uzorci tvrdog drva su popucali na spoju utora zbog velike čvrstoće drveta, u odnosu na ljepilo. Osobito je to uočeno na uzorcima opterećenim rubom i sredinom. Ovime je potvrđena nekompatibilnost ovog tipa ljepila i tvrdog drva, koja se očitovala i u poglavlju 3.3.2.2.

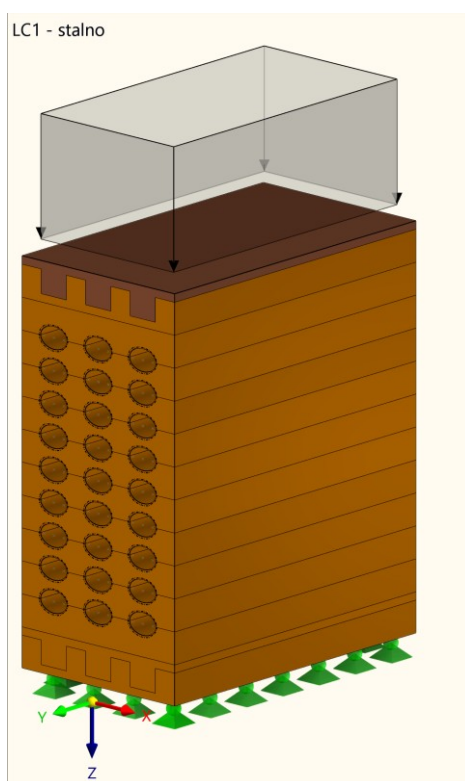
Uz usporedbu krivulja opterećenje-pomak, analizirani su i uspoređeni modovi loma uzoraka. Vrste sloma mogu se podijeliti u dvije karakteristične skupine, ovisno o tome radi li se o šupljem ili punom drvenom presjeku. Glavni način loma inovativnih šupljih drvenih elemenata bio je slom drvene grede u području između rupa, u smjeru primijenjenog opterećenja (Slika 3.53 a,b). Budući da su eliptične šupljine raspoređene u stupce, prijenos opterećenja je jednostavan, duž hrpta od punog drva. Pukotine su uglavnom ravne linije koje spajaju vrhove lukova elipsa. To ukazuje na pravilan put prijenosa opterećenja i da je do loma je došlo tijekom gnječenja u području šupljine. U slučaju punih drvenih elemenata, lom se dogodio kada je postignuta tlačna čvrstoća okomito na vlakanca, a lom je slijedio putanju naprezanja (Slika 3.53 d,e). Ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca za uzorke opterećene u smjeru jače osi (Slika 3.53 b,d,e) pokazalo je da je ponašanje ovih uzoraka bilo slično uzorcima opterećenim u smjeru slabije osi (Slika 3.53 c,f). Ponovno je uočeno gotovo linearno ponašanje, a zatim je deformacija rasla bez porasta opterećenja, što ukazuje na popuštanje materijala. I u ovom se slučaju moglo uočiti da su pukotine u prošupljenim drvenim uzorcima pretežno vertikalne, u smjeru djelovanja sile, povezujući šupljine.



Slika 3.53 Modovi loma karakteristični za skupinu uzoraka: (a) ME-209 mm; (b) TE-209 mm; (c) ME-400 mm; (d) MP-209 mm; (e) TP-209 mm; (f) MP-400 mm.

3.3.3.5 Metoda konačnih elemenata

Numerička analiza provedena je pomoću programskog paketa Dlubal RFEM [104], točnije modula RSECTION [105]. Parametarsko sučelje omogućilo je unos dimenzija presjeka i unutarnjih sila na način da ovise o određenim varijablama. Cilj numeričke analize bio je napraviti parametarsku analizu, čiji bi rezultati pokazali mjesto najvećih naprezanja. Posljedično, određuje se optimalni presjek koji se nalazi između dva ekstrema, punog i prošupljenog poprečnog presjeka. Radi jednostavnosti i lakše usporedbe, sve varijante modela su opterećene pritiskom od 1 N/mm^2 . Shema opterećenja i rubni uvjeti za MKE mogu se vidjeti na slici 3.54.



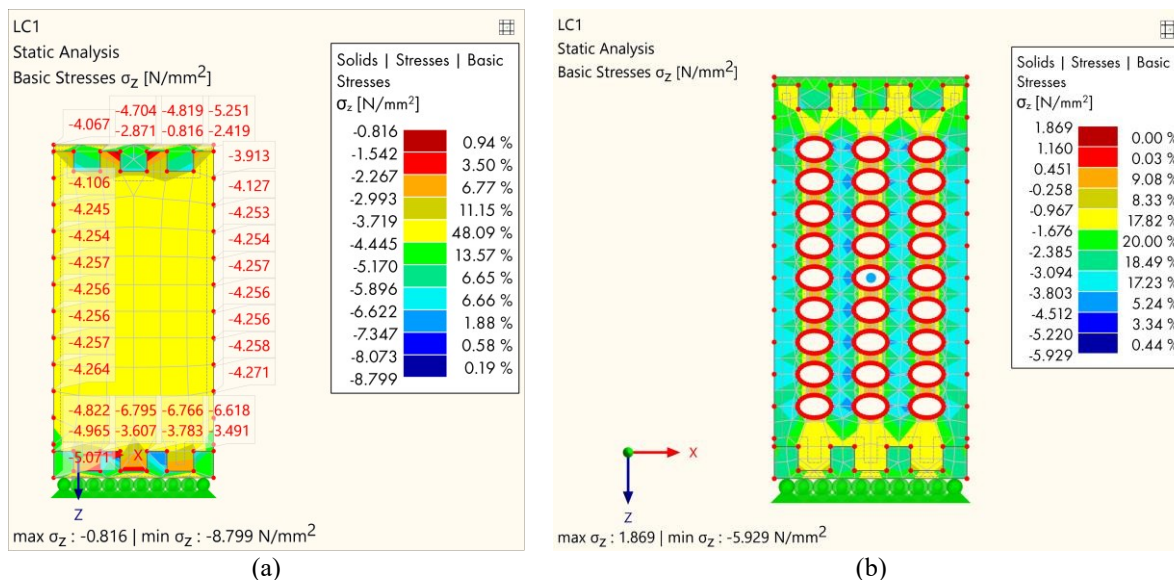
Slika 3.54 MKE – shema opterećenja

Materijalne karakteristike korištene za modeliranje drvenih elemenata prikazane su u tablici 3.11.

Tablica 3.11 Materijalne karakteristike - MKE

| Moduli | Oznaka | Vrijednost (N/mm^2) |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Modulus of elasticity parallel | $E_{0, \text{mean}}$ | 11.500 |
| Modulus of elasticity perpendicular | $E_{90, \text{mean}}$ | 300 |
| Shear modulus | G_{mean} | 650 |
| Modulus of elasticity parallel | $E_{0,05}$ | 9600 |
| Modulus of elasticity perpendicular | $E_{90,05}$ | 250 |
| Shear modulus | G_{05} | 540 |

Na samom početku bilo je važno verificirati MKE analizu, kako bi se mogla provesti parametarska analiza. U tu svrhu analizirani su eksperimentalno ispitani uzorci, a rezultati su prikazani na slici 3.55.



Slika 3.55 MKE verifikacija: (a) MP-209 mm; (b) ME-209 mm

Kao što se vidi u tablici 3.12, $f_{c,90,k}$ za MP-209 mm iznosi 4.07 MPa (u gornjem kutu), a za ME-209 mm $f_{c,90,k} = 1.83$ MPa. Naprezanja su se u početku pojavila u gornjem kutu i na obodu rupa u slučaju prošupljenih uzoraka, što je također potvrđeno u MKE analizi (Slika 3.55). Procjenom rezultata MKE analize početno σ_z naprezanje za MP-209 mm iznosilo je 4.067 MPa (Slika 3.55a), za vrijednost opterećenja pri lomu od 106.7 kN (Tablica 3.13) i 1.869 MPa (3.55b) za uzorak MP-209 mm za vrijednost opterećenja 47.7 kN (vidi tablicu 3.13). Nadalje, na prethodnoj slici prikazan je mod loma i inicijalne pukotine (Slika 3.53). To je potvrđeno i MKE analizom (putanje naprezanja na slici 3.55).

Omjer sila loma svih uzoraka prikazan je u tablici 3.13. Očekivano, najveću silu loma imale su skupine uzoraka prošupljenog tvrdog drva, zatim skupine uzoraka mekog drva bez rupa i na kraju skupine uzoraka prošupljenog mekog drva. Uzorci prošupljenog tvrdog drveta pokazali su veću nosivost čak i od uzoraka mekog drveta bez rupa zbog približno tri puta većeg CSPG-a. Razlog što su skupine uzoraka šupljeg drva četinara imale najmanju nosivost leži u malom razmaku između šupljina, odnosno maloj debljini drveta između šupljina, koja bi prenosila opterećenje s gornje na donju stranu.

Konačno, tlačna čvrstoća okomito na vlakanca za svaku skupinu uzoraka, s pripadajućim $k_{c,90}$ faktora dana je u tablici 3.12.

**AMBIJENTNI UVJETI - INOVATIVNI PROŠUPLJENI LIJEPLJENO LAMELIRANI DRVENI
ELEMENTI**

Tablica 3.12 Popis CSPG-ova za različite načine opterećenja i rubne uvjete s pripadajućim faktorima $k_{c,90}$.

| Tip poprečnog presjeka | MP* | | ME* | | TE* | | TP* | |
|------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|
| Duljina uzoraka (mm) | $f_{c,90,k}$ (MPa) | $k_{c,90}$ | $f_{c,90,k}$ (MPa) | $k_{c,90}$ | $f_{c,90,k}$ (MPa) | $k_{c,90}$ | $f_{c,90,k}$ (MPa) | $k_{c,90}$ |
| 105 | 4.17 | 1.00 | 1.90 | 1.00 | 6.75 | 1.00 | 15.08 | 1.00 |
| 209 | 4.07 | 1.00 | 1.83 | 1.00 | 6.58 | 1.00 | 12.96 | 1.00 |
| 400 | 5.90 | 1.42 | 2.67 | 1.40 | 9.59 | 1.42 | / | / |
| 440 | 5.03 | 1.24 | 5.90 | 1.45 | 8.16 | 1.24 | / | / |
| 520 | 6.08 | 1.46 | 2.95 | 1.55 | 10.42 | 1.54 | / | / |
| 640 | 5.90 | 1.45 | 2.78 | 1.51 | 9.72 | 1.48 | / | / |

*ME—meko drvo elipsa, MP—meko puno drvo, TE—tvrdo drvo elipsa, TP—tvrdo puno drvo.

Tablica 3.13 Sila loma - usporedba

| Duljina (mm) | Tip poprečnog presjeka | Prosječna sila loma (kN) | CoV. (%) | St. Dev. | F_{max} -postotak u odnosu na ME | F_{max} -postotak u odnosu na TE |
|--------------|------------------------|--------------------------|----------|----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 105 | ME | 45.2 | 9.07 | 4.1 | 1.00 | 0.54 |
| | MP | 118.4 | 7.09 | 8.4 | 2.62 | 1.41 |
| | TE | 185.2 | 8.26 | 15.3 | 4.10 | 2.21 |
| | TP | 622.19 | 6.22 | 38.7 | 13.77 | 7.43 |
| 209 | ME | 47.7 | 5.03 | 2.4 | 1.00 | 0.54 |
| | MP | 106.7 | 9.09 | 9.7 | 2.24 | 1.22 |
| | TE | 184.1 | 1.90 | 3.5 | 3.86 | 2.10 |
| | TP | 453.80 | 2.29 | 10.4 | 9.51 | 5.17 |
| 400 | ME | 87.3 | 9.51 | 8.3 | 1.00 | 0.31 |
| | MP | 219.3 | 8.76 | 19.2 | 2.51 | 0.78 |
| | TE | 320.2 | 6.09 | 19.5 | 3.67 | 1.15 |
| | TP | / | / | / | / | / |
| 440 | ME | 75.3 | 1.73 | 1.3 | 1.00 | 0.39 |
| | MP | 157.4 | 8.64 | 13.6 | 2.09 | 0.82 |
| | TE | 255.3 | 10.77 | 27.5 | 3.39 | 1.33 |
| | TP | / | / | / | / | / |
| 520 | ME | 126.5 | 5.06 | 6.4 | 1.00 | 0.24 |
| | MP | 282.4 | 5.24 | 14.8 | 2.23 | 0.54 |
| | TE | 413.7 | 3.50 | 14.5 | 3.27 | 0.79 |
| | TP | / | / | / | / | / |
| 640 | ME | 106.9 | 8.70 | 9.3 | 1.00 | 0.31 |
| | MP | 196.0 | 4.23 | 8.3 | 1.83 | 0.57 |
| | TE | 323.8 | 6.61 | 21.4 | 3.03 | 0.94 |
| | TP | / | / | / | / | / |

*ME—meko drvo elipsa, MP—meko puno drvo, TE—tvrdo drvo elipsa, TP—tvrdo puno drvo.

Iz prikazanog istraživanja može se zaključiti da je CSPG mekog drva, za puni presjek opterećen u smjeru jače osi, jednak 4.07 MPa, a CSPG tvrdog drva 12.96 MPa, s koeficijentom

$k_{c,90}$ jednakom 1.0. Prilikom opterećenja na rubu elementa dobiven je faktor $k_{c,90} = 1.24$, koji je za 20 % niži od vrijednosti propisane u Eurokodu 5 [1] koja iznosi 1.55. Prilikom opterećenja u sredini elementa dobiven je faktor $k_{c,90} = 1.45$, što je za 12 % manje od vrijednosti propisane u [1] koja iznosi 1.66. CSPG mekog drva, za prošupljeni presjek opterećen u smjeru jače osi, smanjuje se za oko 55 % u odnosu na puni presjek, s vrijednošću od 1.83 MPa, a za tvrdo drvo smanjuje se za oko 50 %, na vrijednost od 6.58 MPa, s koeficijentom $k_{c,90}$ jednakim 1.0. Za djelovanja opterećenja na rubu i sredini elementa dobiveni su faktori $k_{c,90}$ s vrijednošću bližom onima dobivenim za puni presjek, što ukazuje na istu fenomenologiju, bez obzira na prošupljenje poprečnog presjeka.

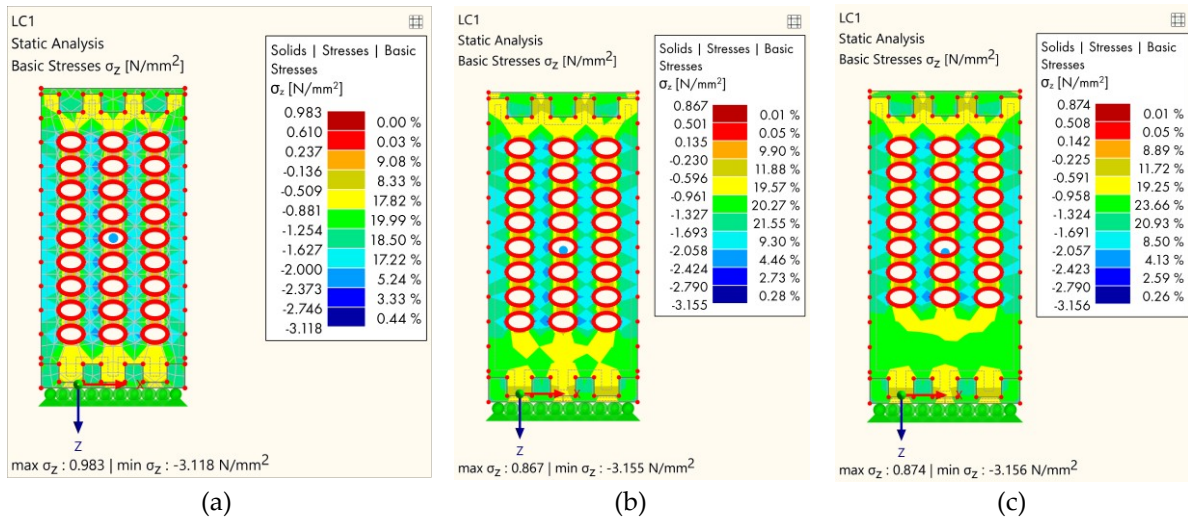
Osim toga, može se zaključiti da je CSPG četinara, za puni presjek opterećen u smjeru slabije osi, jednak 4.17 MPa, a CSPG tvrdog drva jednak 15.08 MPa, s koeficijentom $k_{c,90}$ jednakim 1.0. Za djelovanje opterećenja na rubu elementa dobiven je faktor $k_{c,90} = 1.42$, koji je za 30 % manji od vrijednosti propisane u [1] od 2.07. Za djelovanje opterećenja na sredini elementa dobiven je faktor $k_{c,90} = 1.46$, što je za 35 % manje od vrijednosti propisane u [1] od 2.21. CSPG mekog drva, za prošupljeni presjek opterećen u smjeru slabije osi, smanjuje se za oko 55 % u odnosu na puni presjek, s vrijednošću od 1.90 MPa, a za tvrdo drvo smanjuje se za oko 55 %, na vrijednost od 6.75 MPa, s koeficijentom $k_{c,90}$ jednakim 1.0. Može se zaključiti da su pravila ponašanja slična situaciji kada je presjek opterećen u smjeru jače osi.

Štoviše, može se zaključiti da je stupanj prošupljenja proporcionalan CSPG-u bez obzira na vrstu drva. Nadalje, prošupljenje ne utječe na prijenos sile s obzirom na rubne uvjete i položaj opterećenja, tj. faktori $k_{c,90}$ približno su slični za prošupljenje i pune presjeke. No, da bi se dobio još bolji i detaljniji uvid u ponašanje elemenata, potrebno je detaljnije proučiti raspodjelu naprezanja i putanje sile DIC metodom mjerenja. Kao što je spomenuto u uvodu, faktor $k_{c,90}$ teško je jednoznačno odrediti za različite rubne uvjete. Ovo istraživanje pokazalo je da se vrijednosti dane u europskim standardima [1] još uvijek ne mogu jednoobrazno primijeniti. Dakle, potrebna su daljnja istraživanja za korekciju faktora vezanih uz vrstu drva, vrstu presjeka itd.

U sljedećem koraku napravljena je parametarska analiza. Svi rezultati parametarske analize procijenjeni su i vizualizirani u grafičkom obliku (vidi slike 3.56 - 3.59). Kao što se može vidjeti na slikama, analiza je provedena korak po korak, od modela s najvećim postotkom perforacije poprečnog presjeka do modela bez šupljina.

Analiza je rađena na nekoliko skupina modela, a svi se modeli odnose na meko drvo. Cilj je napraviti komparativnu analizu naprezanja varijacijom geometrijskog rasporeda

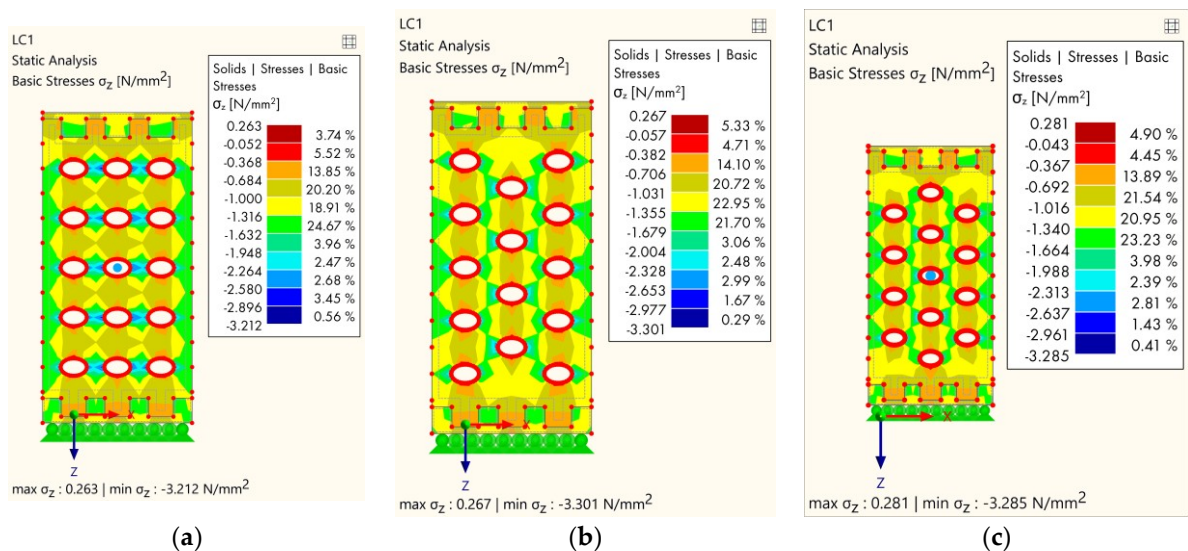
šupljina. Prva skupina modela odnosi se na modele kod kojih su šupljine postupno uklanjane u redovima, počevši od donje lamele (vidi sliku 3.56).



Slika 3.56 Rezultati MKE analize – naprezanje: (a) potpuno perforirani drveni element; (b) prva lamela bez šupljina; (c) druga lamela bez šupljina.

Prvi model (vidi sliku 3.56a) u prvoj skupini prikazuje koncentraciju naprezanja gdje se najveće naprezanje javlja u području između rupa i iznosi 3.118 N/mm^2 . Kada je uklonjen prvi red šupljina (vidi sliku 3.56b), to je minimalno utjecalo na raspodjelu naprezanja; iako je na dnu uzorka naprezanje manje, maksimalno naprezanje bilo je slično prvom (3.155 N/mm^2). Uklanjanjem rupa na sljedećoj lameli (vidi sliku 3.56c) raspodjela naprezanja bila je povoljnija i lokalno i globalno, posebice na donjem dijelu uzorka.

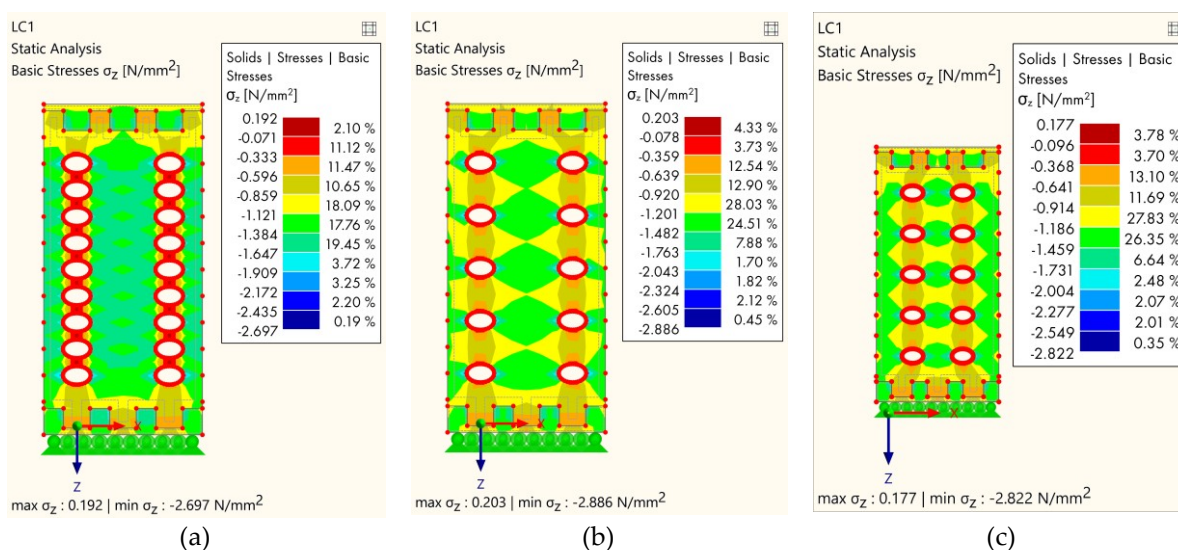
Sljedeća skupina modela (Slika 3.57) ogleda se u varijabilnosti rupa u izmjeničnim redovima.



Slika 3.57 Rezultati MKE analize – naprezanje: (a) Svaka sljedeća lamela bez šupljina; (b) naizmjenični raspored rupa, tip 1; (c) naizmjenični raspored rupa, tip 2.

Slika 3.57a prikazuje raspodjelu naprezanja kada su uklonjene šupljine na svakoj uzastopnoj lameli. Naprezanje je bilo manje na hrptovima između šupljina, ali je zato naprezanje bilo nešto veće na horizontalnim područjima drveta između šupljina u usporedbi s prvom skupinom modela. Drugi (Slika 3.57b) i treći model u ovoj skupini bili su vrlo slični, iako je treći model (Slika 3.57c) u ovoj skupini bio nešto povoljniji zbog nepostojanja šupljina na vanjskim dijelovima. Maksimalno naprezanje za prvi model u ovoj skupini iznosilo je 3.212 N/mm², dok je naprezanje za drugi model bilo 3.301 N/mm².

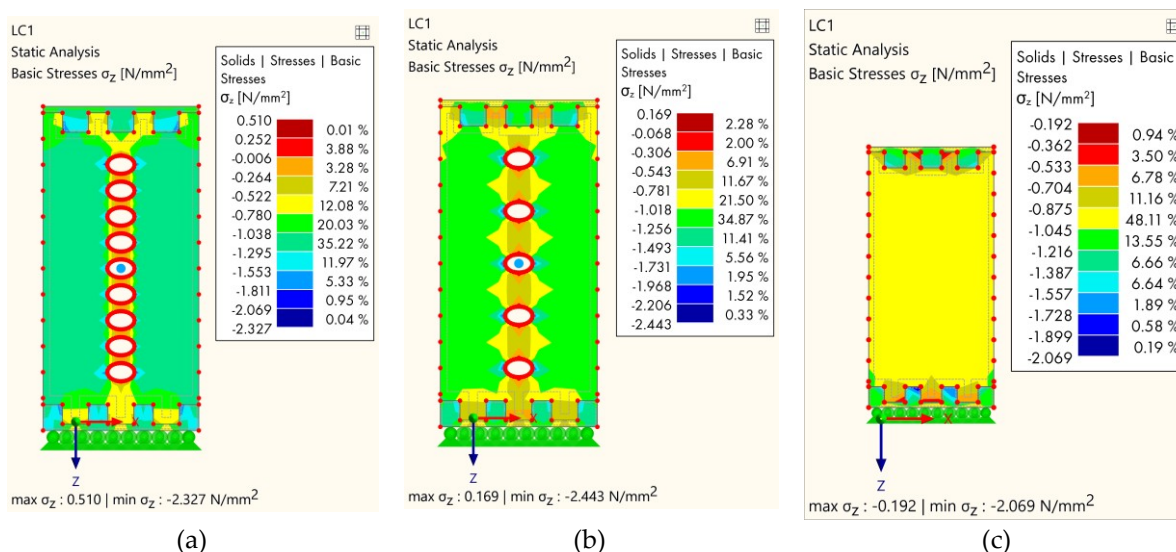
Treća skupina modela (Slika 3.58) prikazuje varijaciju šupljina u stupcima.



Slika 3.58 Rezultati MKE analize – naprezanje: (a) Središnji dio bez šupljina; (b) središnji dio i svaka sljedeća lamela bez šupljina; (c) vanjski dio i svaka sljedeća lamela bez rupa.

U prvom modelu (Slika 3.58a) izostavljanje šupljine u središnjem dijelu poprečnog presjeka. Maksimalno naprezanje je niže u odnosu na prethodne modele (2.697 N/mm²) a raspodjela naprezanja je povoljnija jer nema koncentracije naprezanja u središnjem dijelu. Izostavljanjem rupa u svakoj sljedećoj lameli (Slika 3.58b,c) globalna raspodjela naprezanja bila je povoljnija, no zbog manjeg broja rupa dolazi do nešto većeg naprezanja na rubovima elipse uzrokovanog raspodjelom glavnih naprezanja.

Konačno, posljednja skupina modela (vidi sliku 3.59) odnosi se na uzorke koji su suprotni od prethodne skupine, tj. rupe prisutne samo u središnjem području, dok je zadnji model normalni puni uzorak drveta, bez rupa.



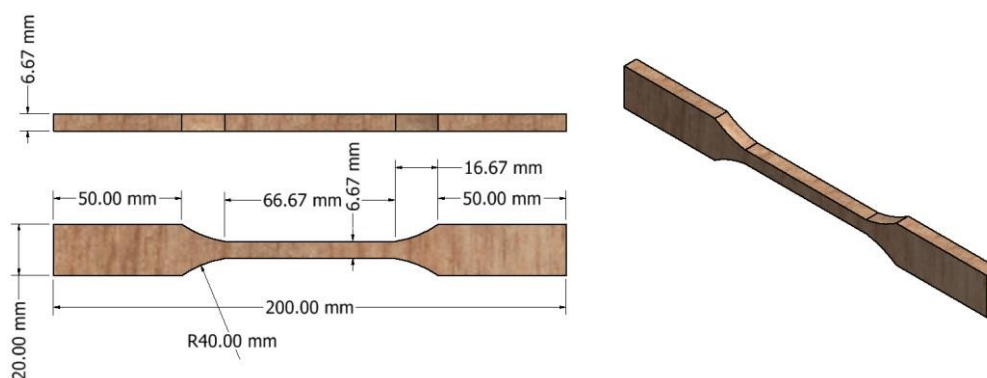
Slika 3.59 Rezultati MKE analize—naprezanje: (a) središnji dio sa šupljinama; (b) središnji dio i svaka sljedeća lamela sa šupljinama; (c) normalno—bez šupljina.

Za posljednju skupinu može se primijetiti da je najpovoljnija raspodjela naprezanja za normalni puni uzorak (vidi sliku 3.59c), dok je drugi uzorak (vidi sliku 3.59b) u ovoj skupini pokazao bolje ponašanje u odnosu na prvi (vidi sliku 3.59a), a razlog tome bila je manja perforacija uzorka i shodno tome manja koncentracija naprezanja.

Konačno, MKE analiza potvrdila je eksperimentalno istraživanje. Rezultati komparativne numeričke analize pokazali su kako raspored i raspored šupljina utječu na raspodjelu naprezanja. Dokazano je da uklanjanjem pojedinih redova ili stupaca rupa možemo povoljno utjecati na raspodjelu naprezanja. Ako su prve lamele pune, bez šupljina, to pozitivno utječe na cjelokupno ponašanje elementa, odnosno dolazi do loma pri većoj sili. Izbjegavanjem šupljina u svakoj sljedećoj lameli smanjuje se koncentracija naprezanja i povećava površina između dvije šupljine, što u konačnici rezultira većom nosivošću elementa. Ako je središnji dio poprečnog presjeka bez rupa, naprezanje se smanjuje, ali posebnu pozornost treba obratiti na udaljenost rupa od rubova kako ne bi došlo do lokalnog pucanja uzorka. Na kraju, ako su šupljine prisutne samo u središnjem dijelu elementa, ponašanje elementa je povoljnije, ali se postavlja pitanje koliko ima smisla izrađivati takve uzorke i kolike su to prednosti u usporedbi uzorku bez šupljina, s obzirom da je perforacija ovakvog uzorka znatno manja u odnosu na dosad proučavane uzorke. U nastavku istraživanja planira se provesti eksperimentalno ispitivanje varijantnih rješenja inovativnih prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata.

3.3.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima

Vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima određena je modificiranim postupkom ispitivanja u odnosu na postupak dan u EN 408 [67]. Razlog je nekonzistentnost rezultata ispitivanja zbog loma drvenih uzoraka na mjestu prihvata/unosa vlačne sile, zbog prevelikog pritiska na drvene uzorke. Ukoliko se definira manji pritisak prilikom prihvata drvenih uzoraka, dolazi do proklizavanja između uređaja za ispitivanje i uzoraka. Uvidom u stanje područja može se vidjeti da mnogi autori [106] daju preporuke za korištenje suženih („dog-bone“ oblik) uzoraka. Na taj način, sukladno cilju istraživanja, lom se događa u sredini uzorka i postiže se konzistentnost rezultata istraživanja. Smisao ovako oblikovanih uzoraka je dobivanje omjera širine uzorka u središnjem dijelu, i širine uzorka na mjestu prihvata, odnosno unosa sile, u iznosu 1:3. Geometrija uzorka prikazana je na slici 3.60.



Slika 3.60 Geometrija uzorka za ispitivanje vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima

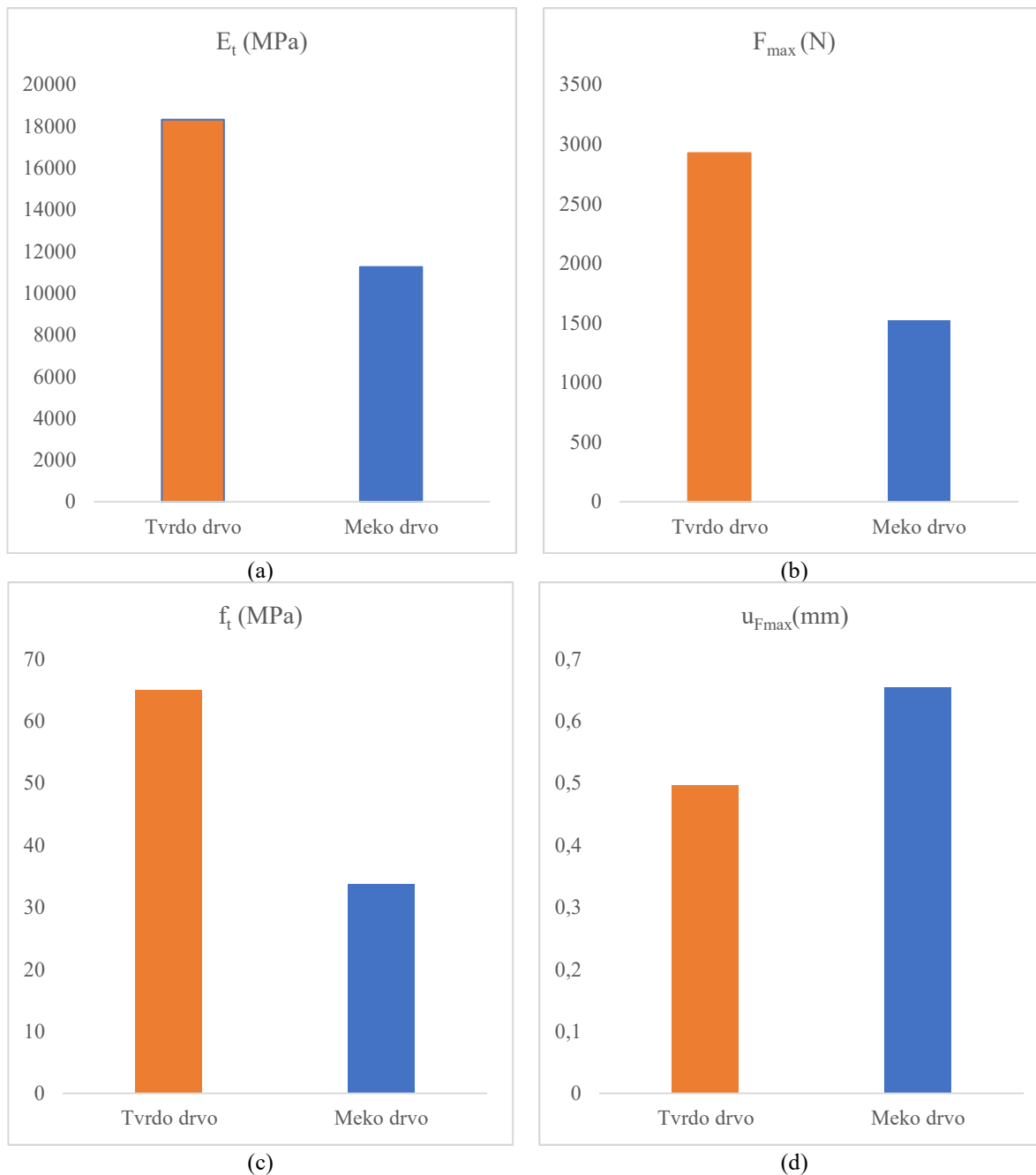
Ispitano je ukupno 20 uzoraka, po 10 od svake vrste drva (tvrdo i meko). Opterećenje se unosilo kontrolom pomaka, brzinom 0.5 mm/min, tako da se lom desi unutar 300 ± 20 sekundi. Na slici 3.61 predočene su postavke ispitivanja.



Slika 3.61 Ispitivanje vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima – postavke ispitivanja

3.3.4.1 Rezultati ispitivanja

Osim vlačne čvrstoće, izmjeren je modul elastičnosti, maksimalna sila, te deformacija pri maksimalnog sili. Rezultati ispitivanja predloženi su na slici 3.62.



Slika 3.62 Rezultati ispitivanja: (a) modul elastičnosti paralelno s vlakancima; (b) maksimalna vlačna sila; (c) vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima; (d) pomak pri maksimalnog vlačnoj sili

Očekivano, tvrdo drva ima značajno veću vlačnu čvrstoću paralelno s vlakancima. Modul elastičnosti dobiven vlačnim ispitivanjem, podudara se s onim koji je dobiven u poglavlju 3.3.1.

Konzistentnost rezultata potvrđena je modovima loma koji su vidljivi na slici 3.63.



(a)



(b)

Slika 3.63 Mod loma: (a) generalni prikaz; (b) detaljan prikaz

3.3.5 Posmična čvrstoća površine lijepljenja

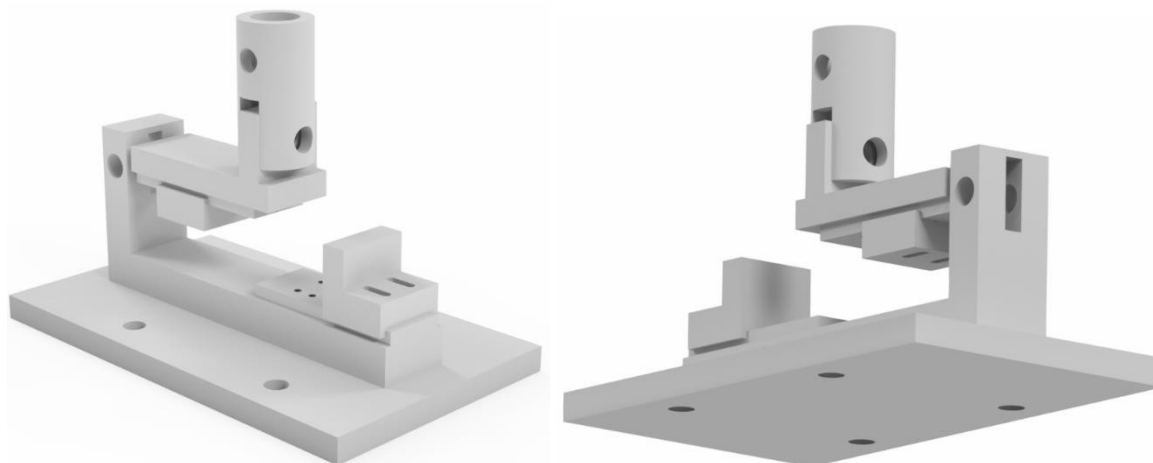
U laboratoriju Građevinskog fakulteta Zagreb istražena je čvrstoća linije lijepljenja drvenih elemenata prilikom posmičnog opterećenja.

Uzorci od punog lijepljenog lameliranog mekog i tvrdog drva testirani su prema normi EN 408 [67] u laboratoriju na posebno dizajniranom sustavu za unos opterećenja. Dimenzije uzoraka izmjerene su na preciznost od 1 %. Vlažnost uzorka određuje se u skladu sa normom EN 13183 [107]. Sva ispitivanja provodila se na uzorcima koji su očuvani u standardnom okruženju (20 ± 2) °C i (65 ± 5) % relativne vlažnosti. Površine uzorka pripremljene kako bi se osiguralo da su ravne i međusobno paralelne te okomite na os uzorka.

Opterećenje se nanosilo kontrolom pomaka, a brzina opterećenja određena je ispitivanjem preliminarnih uzoraka.

Ljepilo korišteno za spajanje lamela je K. 510 [103] poliuretansko ljepilo za nosive drvene konstrukcije. Ovo ljepilo ima vrlo visoku mehaničku čvrstoću te izvrsnu otpornost na toplinu i vlagu, a linija lijepljena je svijetle boje što pogoduje estetskim zahtjevima.

Uzorci su obrađeni, pripremljeni i numerirani prema normi [67] te je postavljena prethodno pripremljena aparatura (Slika 3.64). Uređaj se sastoji od pomičnog dijela koji se prilagođava dimenzijama uzorka, podložne ploče za prihvat na podlogu te spoja sa opremom za ispitivanje.

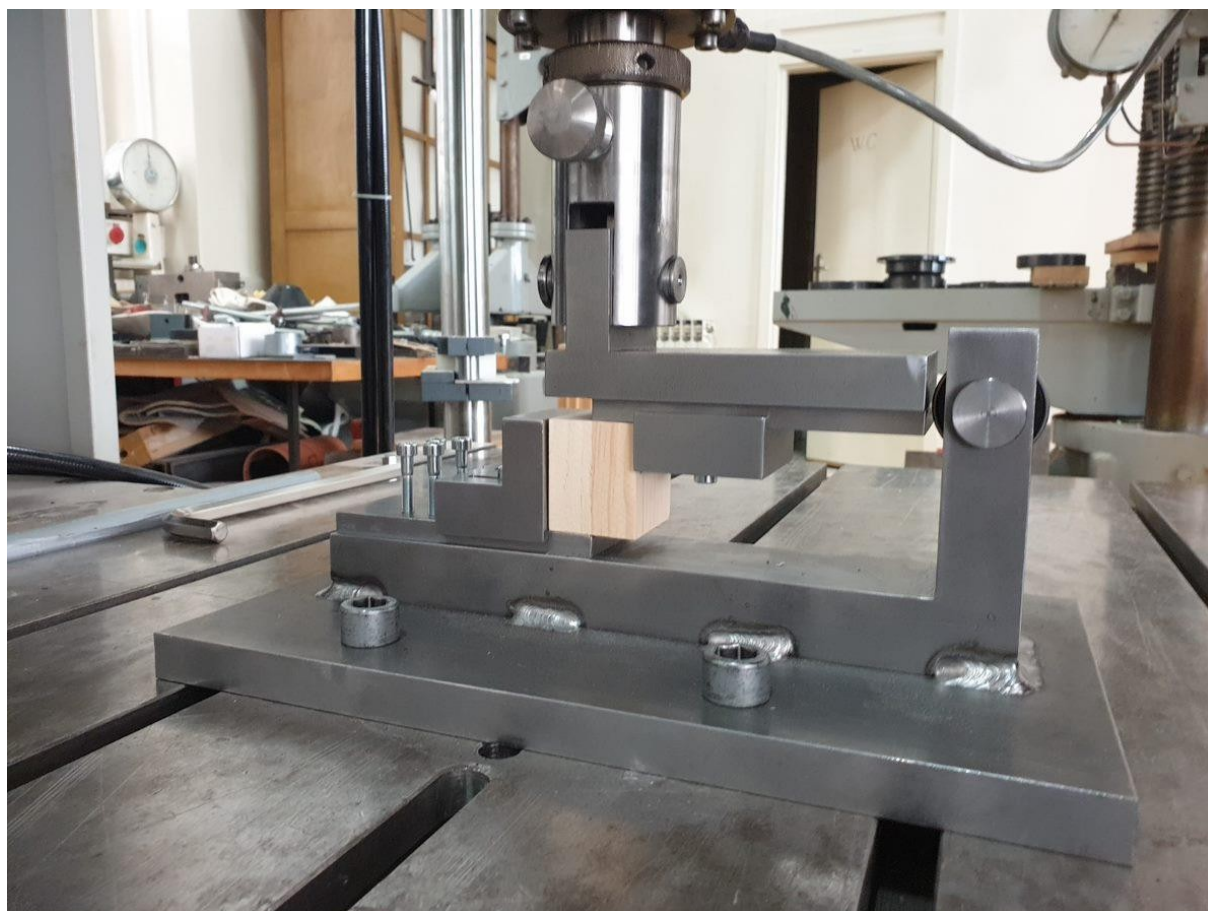


Slika 3.64 Uređaj za ispitivanje posmične čvrstoće

Za uzorke mekog drva korišteno je drvo iz razreda četinjača (jela), a za tvrdo grab. Dimenzije uzoraka su $b \times h \times l = 40 \times 50 \times 50$ mm.

Testiranje se radilo na uzorcima mekog i tvrdog drva sastavljenih od dviju lamela debljine 20 mm koje su međusobno zalijepljene. Površina smicanja poklapa se sa površinom po kojoj je uzorak lijepljen. Od obje vrste drva napravljeno je po 6 uzoraka koji su se izlagali

kontinuiranom porastu pomaka u određenom vremenu do sloma svakog uzorka. Napravljeno je uobičajeno jednostrano blok testiranje jer je ono jednostavno za izradu te je postupak ispitivanja jednostavan za provođenje (Slika 3.65). No, postoje i mane ove metode. Prema Steigeru [108] i Rongrong [109] kod blok posmičnih testova zbog nesavršenosti ispitne opreme, naprezanja u liniji lijepljenja nisu raspoređena ravnomjerno te se uz posmična, pojavljuju i normalna naprezanja. Eksperimentalne i teorijske metode dokazale su kako kod ove metode dolazi od neujednačene raspodjele naprezanja i pojave koncentracije naprezanja na rubovima presjeka [108].



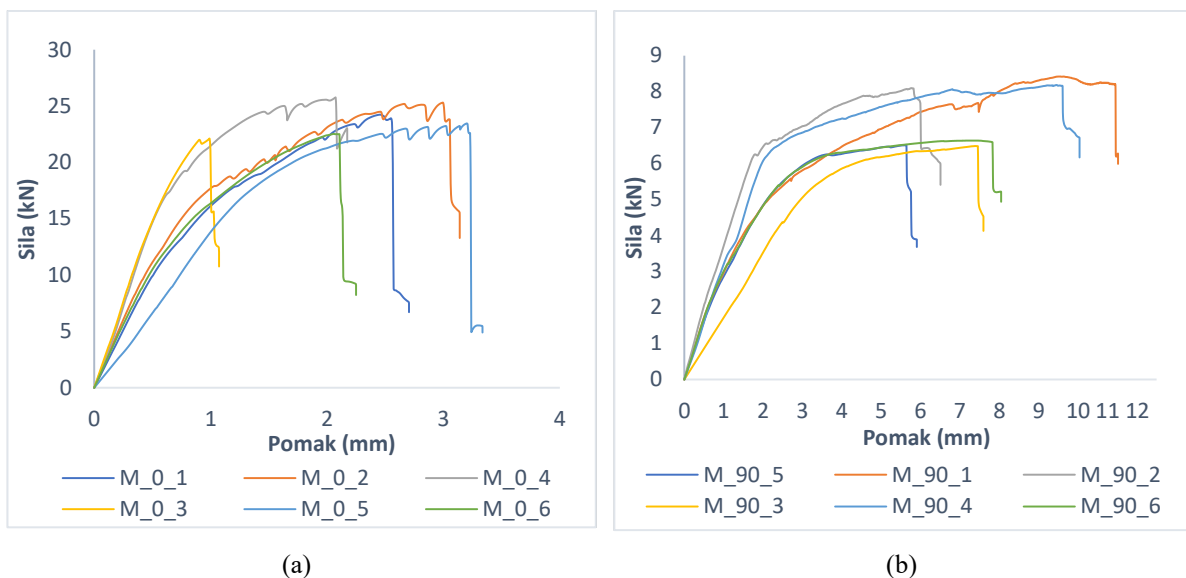
Slika 3.65 Postavke eksperimentalnog ispitivanja posmične čvrstoće površine lijepljenja

3.3.5.1 Rezultati

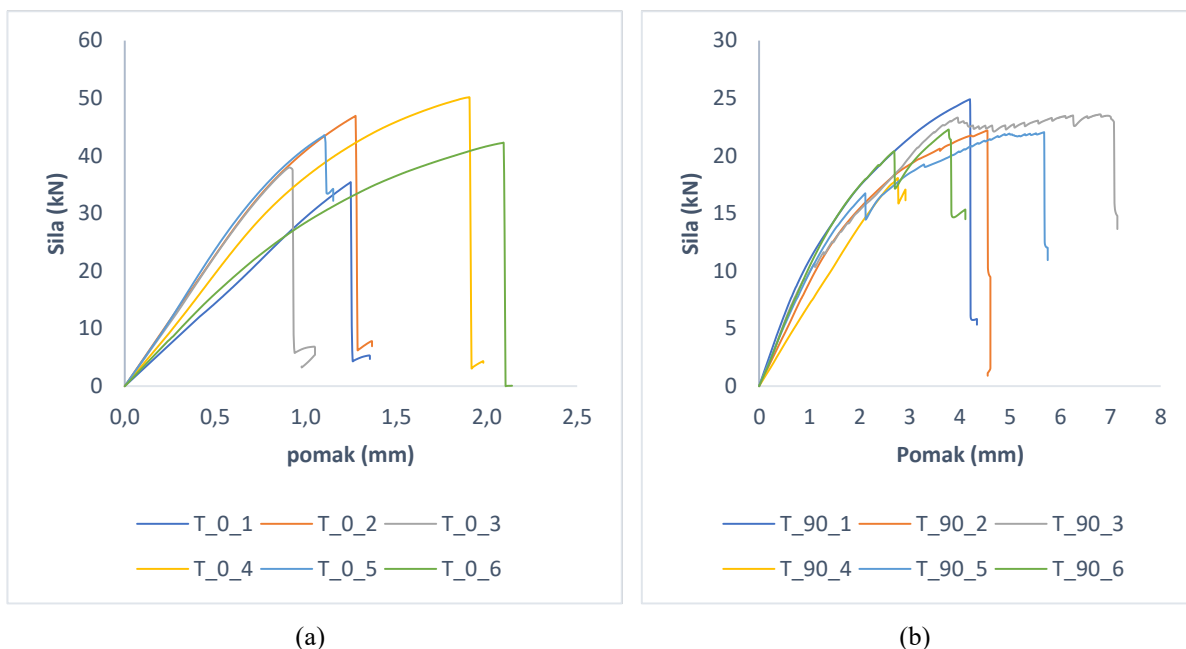
Rezultati pokazuju da su maksimalno dosegnute sile u uzorcima tvrdog drva puno veće od maksimalnih sila u uzorcima mekog drva. Lom se kod svih uzoraka tvrdog drva u smjeru paralelno s vlakancima dogodio po površini lijepljenja lamela uslijed dosezanja čvrstoće ljepila. U smjeru okomitom na vlakanca osim loma po površini lijepljenja lom se širio unutar materijala. Kod uzoraka mekog drva u oba smjera lom se nalazi u bližoj okolini površine lijepljenja, ali je mod loma je kombiniran, odnosno drvo-ljepilo.

U nastavku su prikazani dijagrami sila-pomak za meko drvo paralelno i okomito na vlakanca (Slika 3.66), te tvrdo drvo paralelno i okomito na vlakanca (Slika 3.67).

Prosječna vrijednost sile loma kod mekog drva paralelno s vlakancima iznosi 20.5 kN, a okomito na vlakanca 6.3 kN. Ponašanje je linearno do trenutka loma. Ipak, kod mekog drva nagib krivulje pada i postoje mali skokovi u dijagramu što ukazuje duktilnije ponašanje u odnosu na tvrdo drvo.



Slika 3.66 Posmik-meko drvo : (a) paralelno s vlakancima; (b) okomito na vlakanca

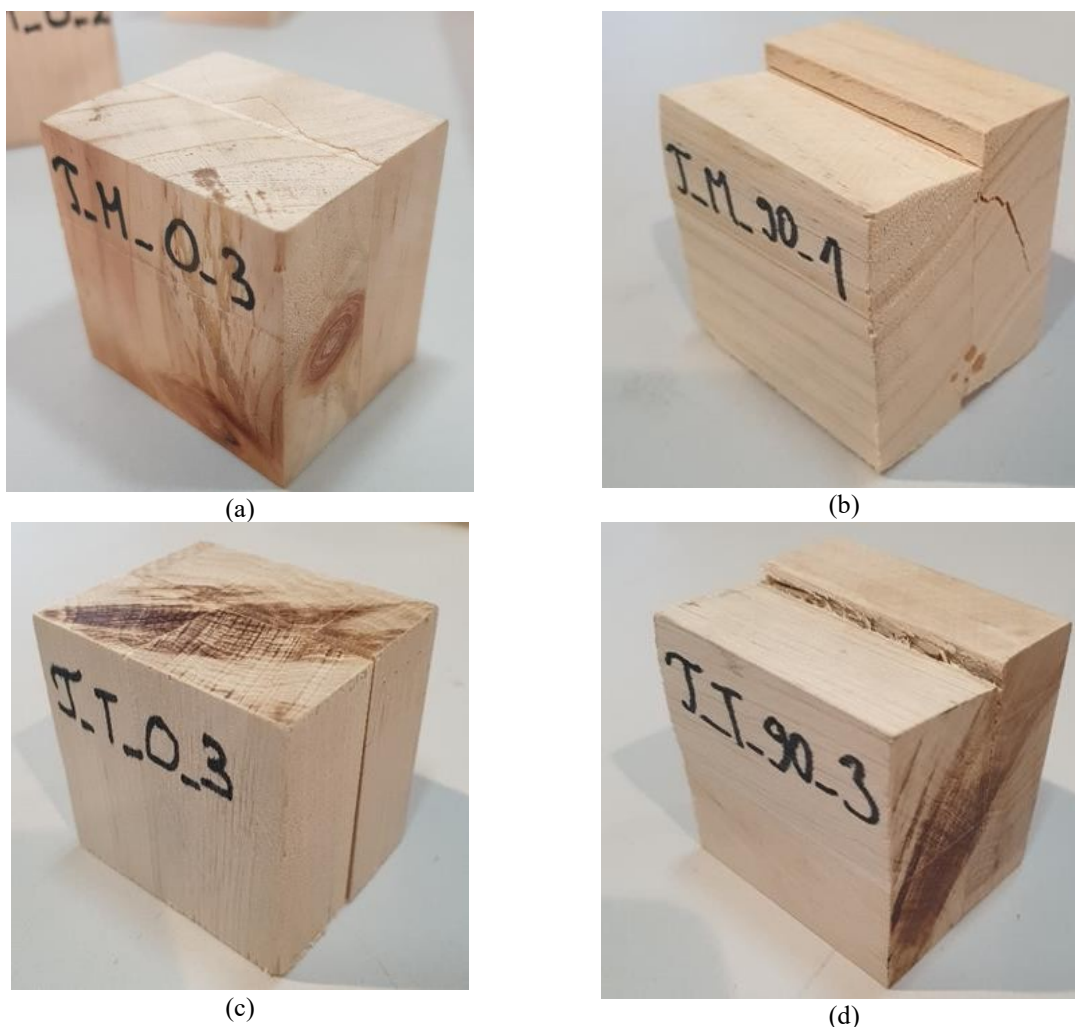


Slika 3.67 Posmik- tvrdo drvo : (a) paralelno s vlakancima; (b) okomito na vlakanca

U uzorcima T_90_5 i T_90_6 (Slika 3.67) ponašanje se razlikuje od ostalih uzoraka. Sila raste kontinuirano, zatim pada na nižu vrijednost pa ponovno raste do maksimalne

vrijednosti. U uzorku T_90_3 vrijednosti sile pri rastu osciliraju, tj. rast sile nije jednolik nego se uočavaju nagli padovi vrijednosti sve do dosezanja maksimalne sile. Najkonzistentnije ponašanje uočeno je kod testiranja paralelno s vlakancima (Slika 3.67a). Pomak kod svih testiranja na tvrdom drvu raste linearno i približno jednako u svim uzorcima. Prosječna sila loma kod tvrdog drva paralelno s vlakancima iznosi 36.6 kN, a okomito na vlakanca 19.01 kN.

Meko drvo paralelno s vlakancima otkazalo je pri 44 % manjoj sili u odnosu na tvrdo drvo paralelno s vlakancima. Nadalje, mod loma je drugačiji gdje se kod tvrdog drva otkazivanje desilo na površini lijepljenja (Slika 3.68c). Za uzorke okomito na vlakanca, sila loma kod mekog drva bila je manja za 67 % manja. Slom se kod mekog drva desio po materijalu drva i ljepila (Slika 3.68b), a kod tvrdog drva ponovno površini lijepljenja. Nadalje, kod mekog drva u pojedinim uzorcima prvotno je došlo do utiskivanja metalnog dijela u drvo, te je ispitivanje prekinuto zbog dosezanja tlačne čvrstoće materijala (Slika 3.68 b i d). Ovi uzorci nisu se uzimali u obzir prilikom određivanja čvrstoće ljepila.



Slika 3.68 Modovi loma: (a) meko drvo paralelno s vlakancima; (b) meko drvo okomito na vlakanca; (c) tvrdo drvo paralelno s vlakancima; (d) tvrdo drvo okomito na vlakanca

Konačno, posmična čvrstoća linije lijepljenja dane su u tablici 3.14 za meko drvo i tablici za tvrdo drvo.

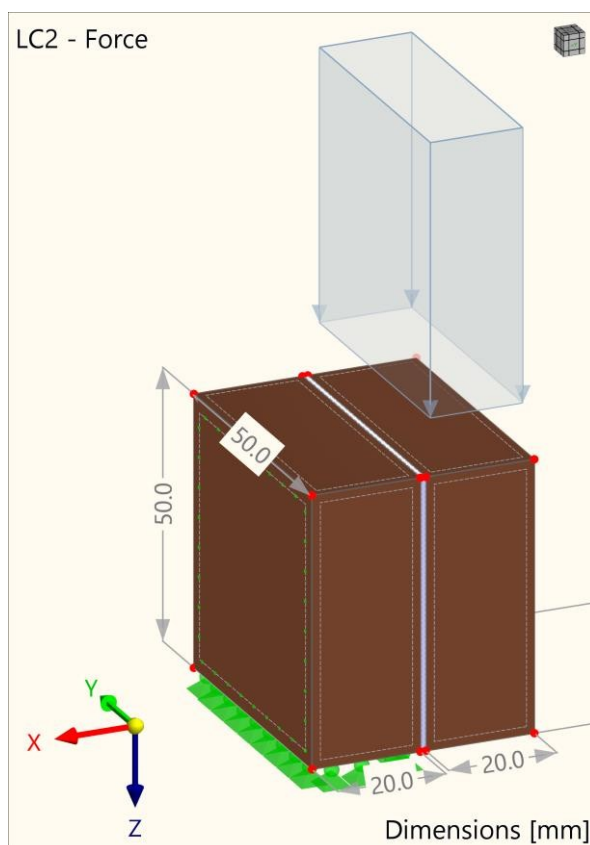
Tablica 3.14 Posmična čvrstoća linije lijepljenja

| Tvrdo drvo | F_{max} (kN) | $f_{v,a}$ (N/mm ²) | Meko drvo | F_{max} (kN) | $f_{v,a}$ (N/mm ²) |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|
| T_90_1 | 24.91 | 9.97 | M_90_1 | 8.42 | 3.37 |
| T_90_2 | 22.20 | 8.88 | M_90_2 | 8.09 | 3.24 |
| T_90_3 | 23.60 | 9.44 | M_90_3 | 6.49 | 2.60 |
| T_90_4 | 18.08 | 7.23 | M_90_4 | 8.18 | 3.27 |
| T_90_5 | 22.05 | 8.82 | M_90_5 | 6.51 | 2.60 |
| T_90_6 | 22.28 | 8.91 | M_90_6 | 6.64 | 2.66 |
| Average | 21.19 | 8.88 | Average | 7.38 | 2.96 |
| St.Dev. | 2.29 | 0.92 | St.Dev. | 0.93 | 2.96 |
| T_0_1 | 35.39 | 14.16 | M_0_1 | 24.23 | 9.69 |
| T_0_2 | 46.91 | 18.76 | M_0_2 | 25.29 | 10.12 |
| T_0_3 | 37.97 | 15.19 | M_0_3 | 22.11 | 8.84 |
| T_0_4 | 50.16 | 20.06 | M_0_4 | 25.76 | 10.30 |
| T_0_5 | 43.56 | 17.42 | M_0_5 | 23.45 | 9.38 |
| T_0_6 | 42.25 | 16.90 | M_0_6 | 22.53 | 9.01 |
| Average | 42.71 | 17.08 | Average | 23.90 | 9.56 |
| St.Dev. | 5.48 | 2.19 | St.Dev. | 1.47 | 0.59 |

Općenito, ispitivanja u malom mjerilu pokazuju dobru međusobnu korelaciju. Kapacitet nosivosti linije lijepljenja između 2 lamele paralelno s vlakancima je približno 2 puta veći od kapaciteta nosivosti linije lijepljenja lamela okomito na vlakanca za tvrdo drvo, a čak 3 puta veći za meko drvo.

3.3.5.2 Numerička analiza

Numerička analiza napravljena je u programskom paketu DLUBAL RFEM [104] s ciljem potvrđivanja rezultata eksperimenta. Definirani su rubni uvjeti i opterećenje sukladno eksperimentu (Slika 3.69), dok je lijepljenja površina simulirana pomoću „Contact Solid-a“ koji omogućuje kontrolu sila koje se prenose između paralelnih površina i načina na koji se to događa.



Slika 3.69 Postavke modela za posmik

Na taj način definirane su sile koje se prenose između čvrstih tijela, a opcije su sljedeće:

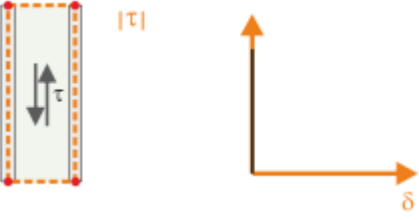
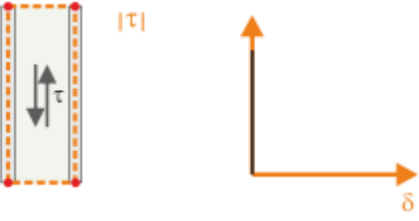
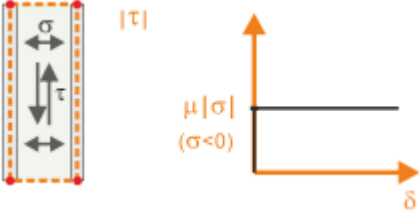
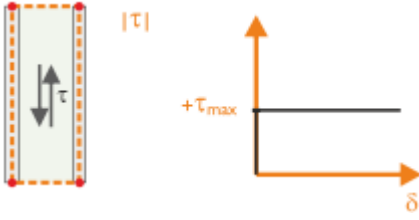
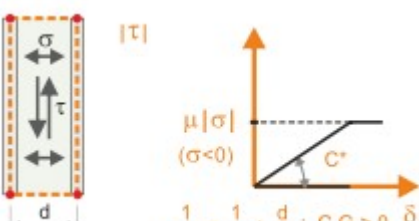
- Potpuni prijenos sile
- Otkazivanje pri pojavi vlačnog naprezanja
- Otkazivanje pri pojavi tlačnog naprezanja

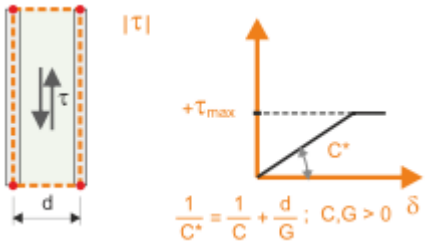
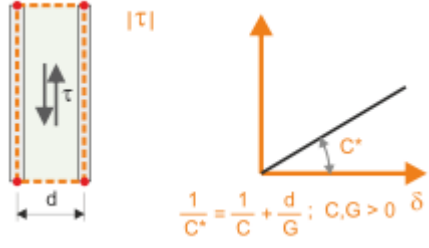
Kriteriji loma tlačno ili vlačno naprezanje uzimaju se u obzir u proračunu preko deformacija čvorova MKE mreže.

Kontakt u ravnini kontaktnih površina može se definirati neovisno o svojstvima kontakta koji djeluju okomito na kontaktne površine.

U tablici 3.15 ispod mogu se vidjeti dostupne opcije za definiranje kontakta paralelno sa kontaktnim površinama.

Tablica 3.15 Vrste kontakta

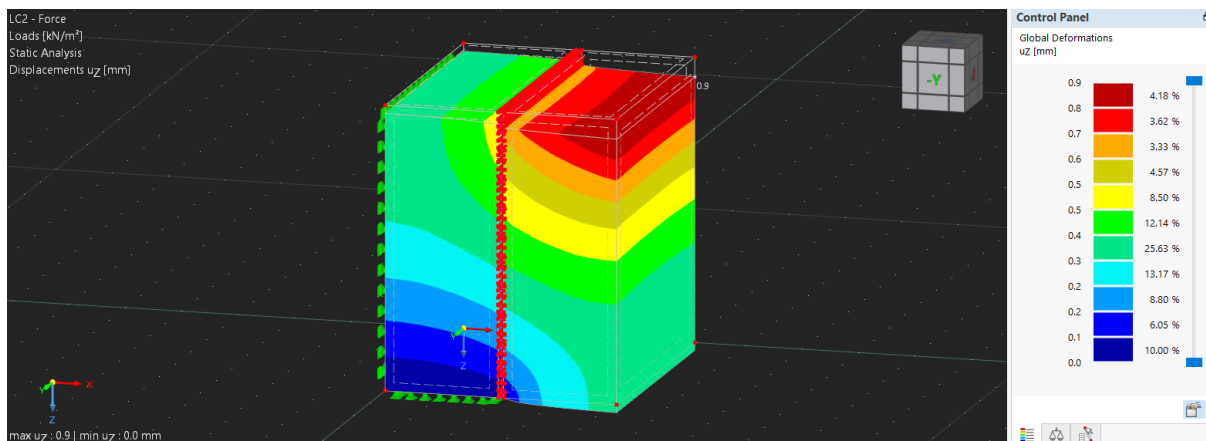
| Kontakt | Dijagram | Opis |
|---|--|--|
| Do otkazivanja dolazi u slučaju popuštanja kontakta okomito na kontaktne površine |  | Ako kontaktno tijelo otkáže pri pojavi tlačnog ili vlačnog napreznja, ne prenose se posmične sile. |
| Potpuni prijenos sile |  | Sve posmične sile se prenose. |
| Kruto trenje |  | Kruto trenje djeluje odmah. Posmično napreznje ovisi o normalnom napreznju. Mora se definirati 'Koficijent trenja' μ . |
| Kruto trenje sa ograničenjem |  | Čim se dosegne 'granično napreznje' τ_{max} , napreznje se ne povećava dalje povećanjem deformacije, već ostaje konstantno. |
| Elastično trenje |  | Trenje predstavlja elastično ponašanje gdje posmična sila raste proporcionalno deformaciji. Nema ograničenja za deformaciju. Parametri |

| Kontakt | Dijagram | Opis |
|----------------------------------|--|--|
| | | koje treba specificirati su „Posmična krutost“ C (sila za pomicanje površine od 1 m^2 puta 1 m) i „Koeficijent trenja“ μ . |
| Elastično trenje sa ograničenjem |  | Posmična sila raste proporcionalno deformaciji sve dok se ne postigne dopušteno posmično naprezanje. nakon čega ostaje konstantna. Potrebno je definirati „Posmičnu krutost“ C i 'Granično naprezanje' τ_{\max} . |
| Elastično ponašanje solid- a |  | Svojstva elastičnog prijenosa mogu se opisati parametrom „Posmična krutost“ C . |

U konkretnom slučaju odabrana je opcija *elastično trenje sa ograničenjem* i definirani su vrijednosti posmične krutosti i graničnog naprezanja.

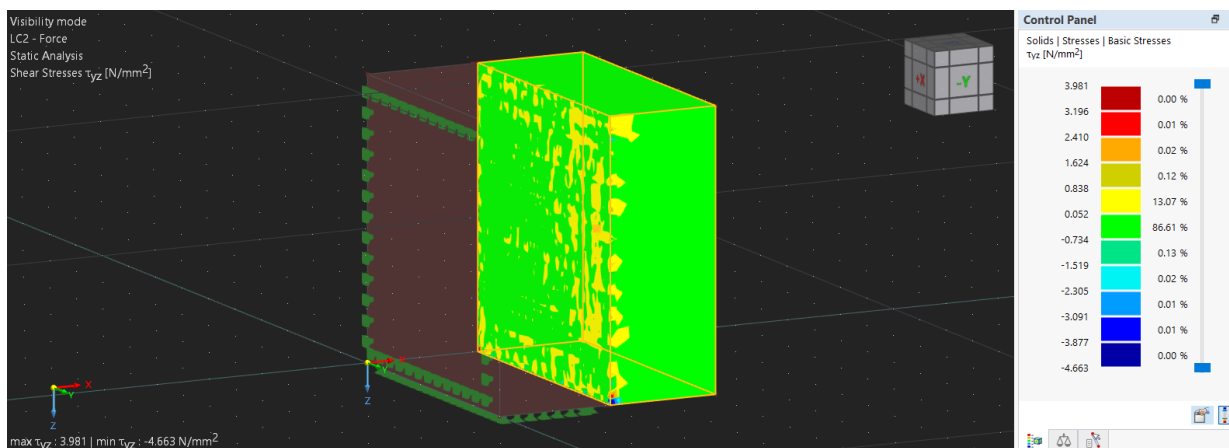
Simulirani su uvjeti oslanjanja, na taj su način spriječeni pomaci u neželjenim smjerovima. Određen je odnos dviju lamela, a sam je model podvrgnut realnim iznosima sila dobivenih laboratorijskim ispitivanjem.

Rezultati pomaka dobro oslikavaju stvarne pomake dobivene testiranjem u laboratoriju. Jasno je uočljivo pomicanje desne lamele i najveći pomak na gornjoj površini (vidi sliku 3.70).



Slika 3.70 MKE- pomak lame

Kao što je bilo i pretpostavljeno, uz posmična se u uzorcima javljaju i normalna naprezanja okomito na ravninu smicanja. Prisustvo takvih normalnih naprezanja utječe na smanjenje vrijednosti posmičnih naprezanja te se time dobivaju njihove manje vrijednosti nego što je to zapravo slučaj. Na slici 3.71 prikazana je koncentracija posmičnih naprezanja na rubovima presjeka na što upozorava Steiger [108].



Slika 3.71 Raspodjela posmičnih naprezanja

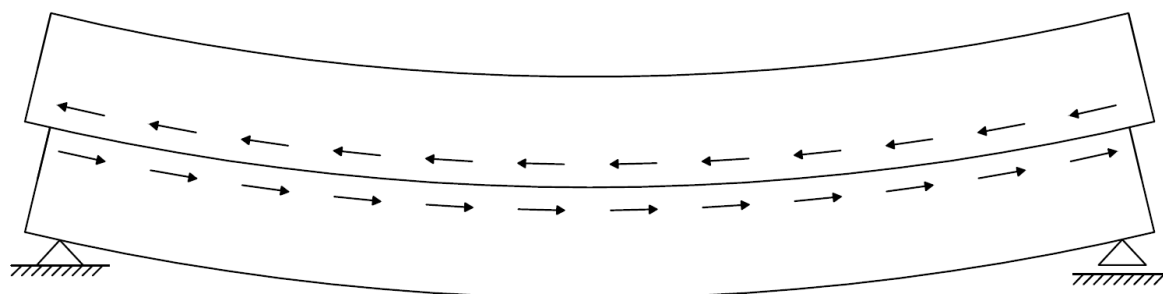
Da bi se izbjegla javljanja velikih vrijednosti normalnih naprezanja, Rongrong [110] daje prijedlog nestandardnog uzorka za ispitivanje posmične čvrstoće linije lijepljenja. Na takvom uzorku nema pojavljivanja normalnih naprezanja okomito na površinu smicanja te samim time vrijednosti posmične čvrstoće bivaju veće i točnije. Unatoč tome standardna ispitivanja dovoljno su dobra te često korištena metoda za procjenu posmičnih čvrstoća linije lijepljenja.

3.4 Teoretsko istraživanje inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata prema EC5 [1]

3.4.1 Naprezanja uzrokovana savijanjem

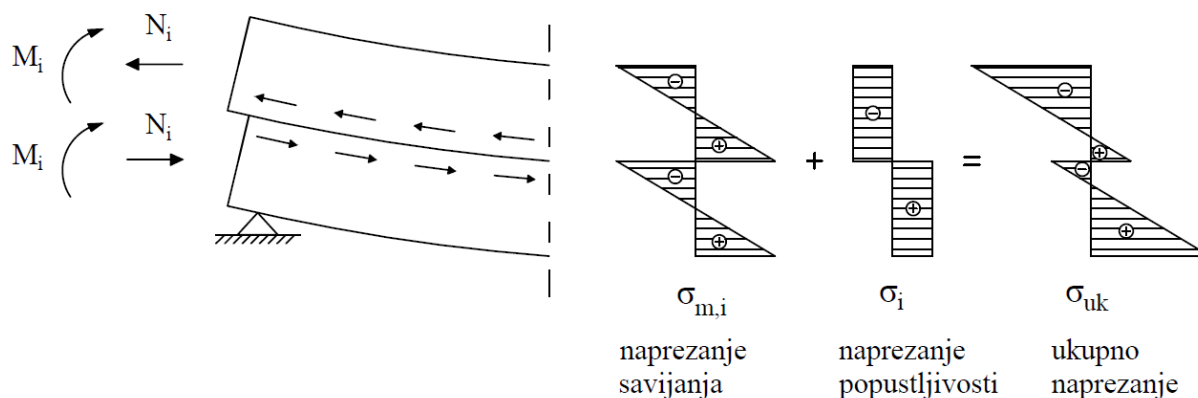
Kako su uzorci s eliptičnim šupljinama pokazali generalno bolje ponašanje tokom ispitivanja, objašnjen je numerički proračun upravo takovih elemenata. Za elemente s kružnim šupljinama analogija je jednaka, ali se u izrazima umjesto parametara za elipsu koriste parametri za kružnicu.

Na slikama 3.1 i 3.2 vidi se kako element čini 12 lamela međusobno povezanih ljepilom. Iz tog je razloga numerički proračun baziran na normi EN 1995-1-1 [1], tj. na Dodatku B za sastavljene grede, s manjim modifikacijama prilagođenim lijepljenom spoju. Osim što savijanje sastavljenog elementa uzrokuje naprezanja od savijanja u svakom od dijelova, u dodirnoj ravnini pojedinih dijelova pojavljuje se uzdužna posmična sila (Slika 3.72) koju preuzimaju spajala.



Slika 3.72 Uzdužna posmična sila uzrokovana savijanjem sastavljenih elemenata

Zbog te sile dolazi do popuštanja spojnih sredstava, odnosno dodatnih naprezanja uslijed popustljivosti. Veličina takvih naprezanja ovisi o vrsti upotrijebljenog sustava spajanja. Što je manja krutost sustava spajanja, to je gibanje jednog elemenata manje ovisno o gibanju drugog elementa, pa je i sila među njima manja, dok je nasuprot tome, za kruće spajalo veća i sila koja se javlja na dodirnoj plohi jer su svi dijelovi sastavljenog elementa tada „prisiljeni“ na zajedničko gibanje, bez međusobnih relativnih pomaka na krajevima sustava. Na slici 3.73 može se vidjeti raspodjela naprezanja od savijanja i popustljivosti te konačno raspodjela ukupnih naprezanja duž visine poprečnog presjeka sastavljenog elementa.



Slika 3.73 Prikaz komponenti ukupnog naprezanja sastavljenog elementa

Ukoliko je svi dijelovi sustava izrađeni od istog materijala punog poprečnog presjeka, naprezanje od savijanja za svaki od njih izgleda jednako, pri čemu su na jednom rubu tlačna, a na drugom vlačna naprezanja, dok je promjena naprezanja po visini poprečnog presjeka linearna. Naprezanja popustljivosti konstantna su po visini poprečnog presjeka pojedinog dijela, dok njihov predznak ovisi o položaju težišta poprečnog presjeka tog dijela u odnosu na težište poprečnog presjeka cijelog sastavljenog elementa. Ako je težište poprečnog presjeka pojedinog dijela iznad težišta poprečnog presjeka cijelog sastavljenog elementa, naprezanje popustljivosti za taj je dio tlačno, dok je naprezanje vlačno, ako je težište poprečnog presjeka pojedinog dijela ispod težišta poprečnog presjeka cijelog sastavljenog elementa. Ovakvi predznaci naprezanja vrijede ukoliko je element savijan pozitivnim momentom savijanja.

Kako bi se proračunale ove dvije vrste naprezanja, potrebno je odrediti efektivnu krutost prema [1] sljedećim izrazom:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (3.20)$$

gdje je:

- E_i modul elastičnosti pojedinog dijela
- I_i moment tromosti pojedinog dijela
- γ_i koeficijent klizanja, izraz dan u [1]
(za lijepljeni spoj se uzima jednak 1,0)
- A_i površina poprečnog presjeka pojedinog dijela
- a_i udaljenost težišta pojedinog dijela od težišta cijelog poprečnog presjeka.

Naprezanja pojedinog dijela od savijanja dana su izrazom (3.21), dok su naprezanja od popustljivosti dana izrazom (3.22). Prilikom zbrajanja ove dvije komponente naprezanja,

potrebno je posebnu pažnju posvetiti predznacima, kako je objašnjeno ranije, da bi se izračunala vrijednost ukupnog naprezanja.

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot M}{(EI)_{ef}} \quad (3.21)$$

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M}{(EI)_{ef}} \quad (3.22)$$

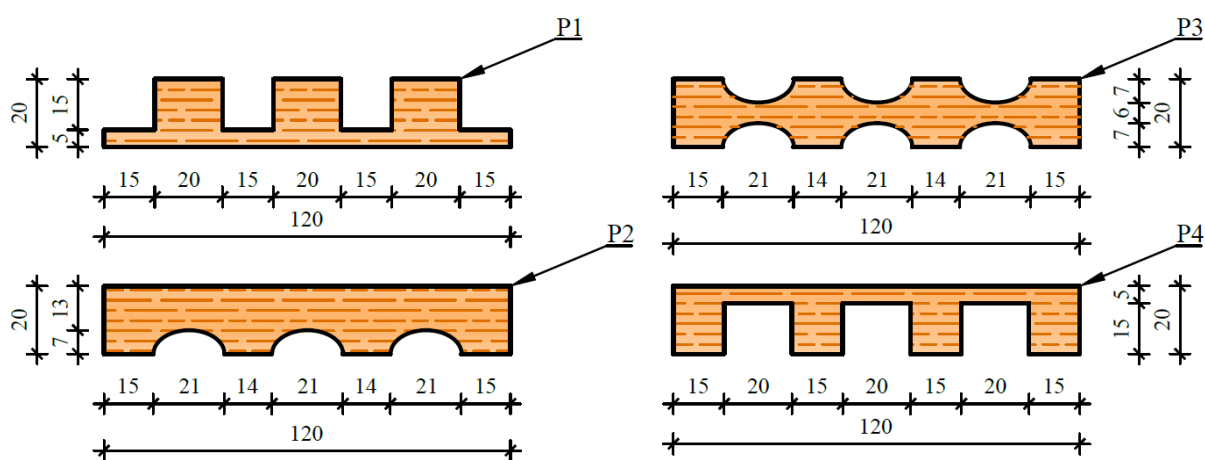
gdje je:

h_i dimenzija presjeka pojedinog dijela, okomita na os za koju se računa naprezanje

M moment savijanja.

3.4.1.1 Prikaz proračunatih vrijednosti

Zbog ovakvog koncepta proračuna, pri kojemu se svaki od dijelova poprečnog presjeka razmatra pojedinačno, za proračun karakteristika cijelog presjeka korisno je primijetiti da se za nosač (Slika 3.74) može razlikovati ukupno 4 tipa lamela. Kako je spomenuto u prethodnom poglavlju, prva i posljednja lamela oblikovane su na način da omogućuju uklapanje jednog elementa u drugi. Zbog razlike u geometriji, prva lamela ima oznaku P1, dok posljednja P4. Druga lamela prema unutrašnjosti presjeka, gledajući i od gornjeg i od donjeg ruba, na jednom je kraju ravna, dok na drugom ima rupe u obliku polu-elipse, te nosi oznaku P2. Ostale lamele u unutrašnjosti elementa, u ovom slučaju njih osam, simetrične su i imaju rupe u obliku polu-elipse s obje svoje strane te imaju oznaku P3. Sve lamele su prikazane na slici 5.39 s kotiranim dimenzijama potrebnim za proračun geometrijskih karakteristika, te karakteristika poprečnog presjeka cijelog nosača.



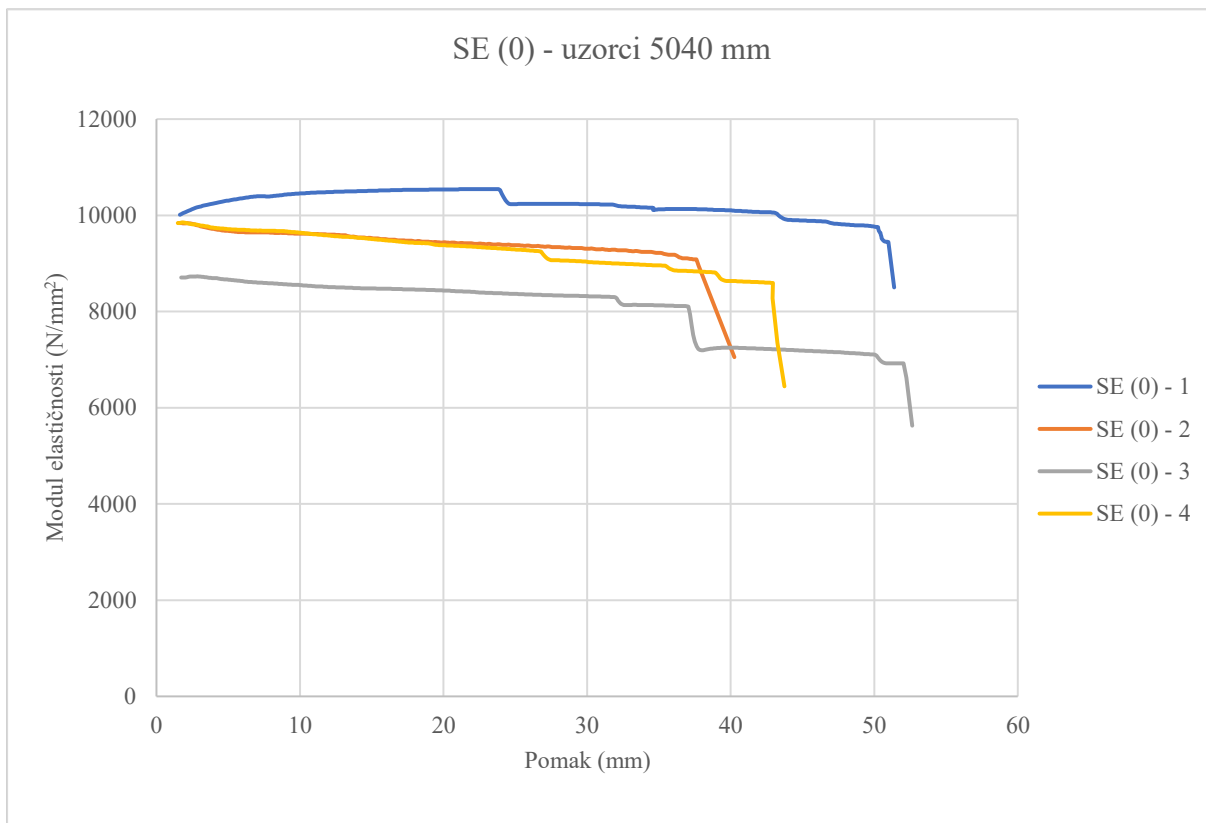
Slika 3.74 Tipovi lamela poprečnog presjeka elementa s eliptičnim šupljinama s kotiranim dimenzijama potrebnim za proračun karakteristika presjeka

Za proračun naprezanja potrebno je odrediti efektivnu krutost prema izrazu (3.20) u kojemu je vrijednost „n“ jednaka broju lamela i u ovom slučaju iznosi 12. Za svaku od lamela izračunate su površina poprečnog presjeka A_i , udaljenost težišta poprečnog presjeka pojedine lamele od njenog donjeg ruba $a_{i,dr}$, moment tromosti I_i oko jače osi (y) i oko slabije osi (z), udaljenost težišta poprečnog presjeka lamele od težišta poprečnog presjeka uzorka a_i te moment tromosti cijelog poprečnog presjeka oko obje osi. Svi podaci prikazani su u tablici 3.16. Kako su karakteristike lamela P1 i P4 jednake, presjek je simetričan pa mu se i težište nalazi u središtu.

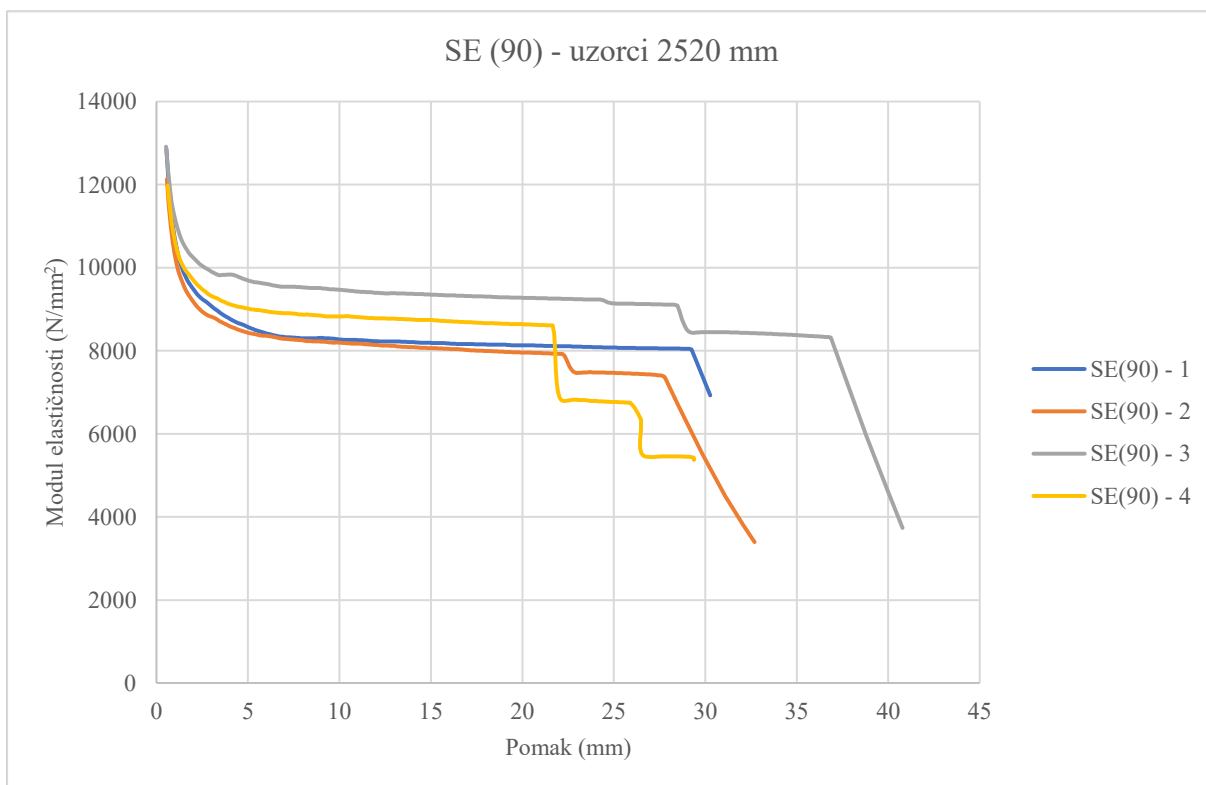
Tablica 3.16 Karakteristike svake od lamela potrebne za proračun efektivne krutosti

| Broj lamele od vrha prema dnu elementa | A_i (mm ²) | $a_{i,dr}$ (mm) | $I_{i,y}$ (mm ⁴) | $I_{i,z}$ (mm ⁴) | a_i (mm) |
|--|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 1 | 1500.00 | 8.50 | 54125.00 | 1485000.00 | 108.50 |
| 2 | 2053.64 | 11.19 | 58814.78 | 2594470.65 | 91.19 |
| 3 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 70.00 |
| 4 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 50.00 |
| 5 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 30.00 |
| 6 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 10.00 |
| 7 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 10.00 |
| 8 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 30.00 |
| 9 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 50.00 |
| 10 | 1707.28 | 10.00 | 43402.05 | 2308941.29 | 70.00 |
| 11 | 2053.64 | 11.19 | 58814.78 | 2594470.65 | 91.19 |
| 12 | 1500.00 | 11.50 | 54125.00 | 2115000.00 | 108.50 |
| Ukupno za cijeli presjek: | | | 98723319.16 | 27260471.63 | |

Modul elastičnosti proračunat je koristeći izraz (3.1) za svaki od ispitanih uzoraka. Promjena modula elastičnosti za savijanje oko jače osi za uzorke ukupne duljine 5040 mm te oko slabije osi za uzorke ukupne duljine 2520 mm dana je na slikama 3.75 i 3.76.



Slika 3.75 Promjena modula elastičnosti tijekom ispitivanja uzoraka s eliptičnim šupljinama savijanjem oko jače osi



Slika 3.76 Promjena modula elastičnosti tijekom ispitivanja uzoraka s eliptičnim šupljinama savijanjem oko slabije osi

Kao reprezentativan primjer poklapanja ručnog proračuna i rezultata ispitivanja uzet je uzorak SE (0) – 1 za savijanje oko jače osi te uzorak SE (90) – 1 za savijanje oko slabije osi. Usporedba je izvršena za silu blizu sili otkazivanja pa je modul elastičnosti za svaki od uzoraka uzet kao srednja vrijednost tijekom ispitivanja. Modul elastičnosti i efektivna krutost za svaki od dva odabrana uzorka dani su u tablici 3.17.

Tablica 3.17 Modul elastičnosti i efektivna krutost za savijanje oko jače i slabije osi

| | Oznaka uzorka | |
|---|---------------|-------------|
| | SE(0) - 1 | SE (90) - 3 |
| Modul elastičnosti (N/mm ²) | 9600 | 8000 |
| Efektivna krutost (Nmm ²) | 9.37872E+11 | 2.58974E+11 |

Zatim su za svaku od lamela izračunata naprezanja od savijanja i popustljivosti, prema izrazima (3.21) i (3.22), te ukupno naprezanje. Najveća su naprezanja na gornjem rubu prve lamele i na donjem rubu posljednje lamele te su kao takva kritična. Sve vrijednosti naprezanja dane su u tablici 3.18 za savijanje oko jače osi, a u tablici 3.19 za savijanje oko slabije osi, dok je promjena naprezanja po visini presjeka dana na slikama 3.77, 3.78 i 3.79.

Prilikom savijanja uzoraka oko jače osi prisutna su naprezanja i od savijanja i od popustljivosti. Naime, naprezanja od popustljivosti pojavljuju se za onu os poprečnog presjeka u smjeru koje su postavljena spojna sredstva jer se upravo u toj ravnini događa popuštanje spajala i eventualno popuštanje. Kako se u smjeru jače osi presjeka nalaze lijepljeni spojevi među lamelama, pojavljuju se i naprezanja od popuštanja. To s druge strane nije slučaj prilikom savijanja oko slabije osi jer se u smjeru te osi ne nalazi sredstvo spajanja. Zato su oko te osi prisutna samo naprezanja od savijanja, dok su naprezanja od popustljivosti jednaka nuli.

Tablica 3.18 Proračunate vrijednosti naprezanja za savijanje uzoraka oko jače osi

| Broj lamele od vrha prema dnu uzorka | a_i (mm) | Naprezanja (N/mm ²) | | | |
|--------------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|------------------|--------|
| | | položaj | od savijanja | od podatljivosti | UKUPNO |
| 1 | 108.50 | gore | -2.48 | -26.90 | -29.38 |
| | | dolje | 2.48 | -26.90 | -24.42 |
| 2 | 91.19 | gore | -2.48 | -22.61 | -25.09 |
| | | dolje | 2.48 | -22.61 | -20.13 |
| 3 | 70.00 | gore | -2.48 | -17.36 | -19.84 |

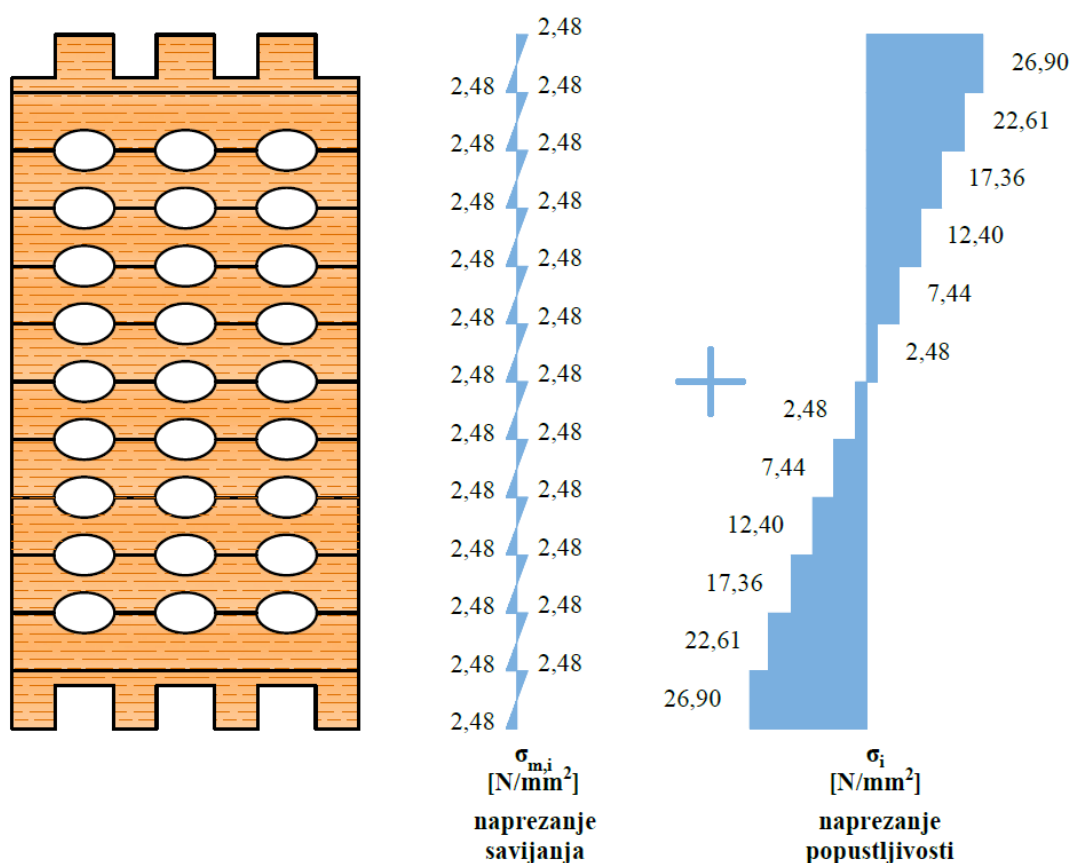
**AMBIJENTNI UVJETI - INOVATIVNI PROŠUPLJENI LIJEPLJENO LAMELIRANI DRVENI
ELEMENTI**

| Broj lamele od vrha prema dnu uzorka | a_i (mm) | Naprezanja (N/mm ²) | | | |
|--------------------------------------|------------|---------------------------------|--------------|------------------|--------|
| | | položaj | od savijanja | od podatljivosti | UKUPNO |
| 4 | 50.00 | dolje | 2.48 | -17.36 | -14.88 |
| | | gore | -2.48 | -12.40 | -14.88 |
| 5 | 30.00 | dolje | 2.48 | -12.40 | -9.92 |
| | | gore | -2.48 | -7.44 | -9.92 |
| 6 | 10.00 | dolje | 2.48 | -7.44 | -4.96 |
| | | gore | -2.48 | -2.48 | -4.96 |
| 7 | 10.00 | dolje | 2.48 | -2.48 | 0.00 |
| | | gore | -2.48 | 2.48 | 0.00 |
| 8 | 30.00 | dolje | 2.48 | 2.48 | 4.96 |
| | | gore | -2.48 | 7.44 | 4.96 |
| 9 | 50.00 | dolje | 2.48 | 7.44 | 9.92 |
| | | gore | -2.48 | 12.40 | 9.92 |
| 10 | 70.00 | dolje | 2.48 | 12.40 | 14.88 |
| | | gore | -2.48 | 17.36 | 14.88 |
| 11 | 91.19 | dolje | 2.48 | 17.36 | 19.84 |
| | | gore | -2.48 | 22.61 | 20.13 |
| 12 | 108.50 | dolje | 2.48 | 22.61 | 25.09 |
| | | gore | -2.48 | 26.90 | 24.42 |
| | | dolje | 2.48 | 26.90 | 29.38 |

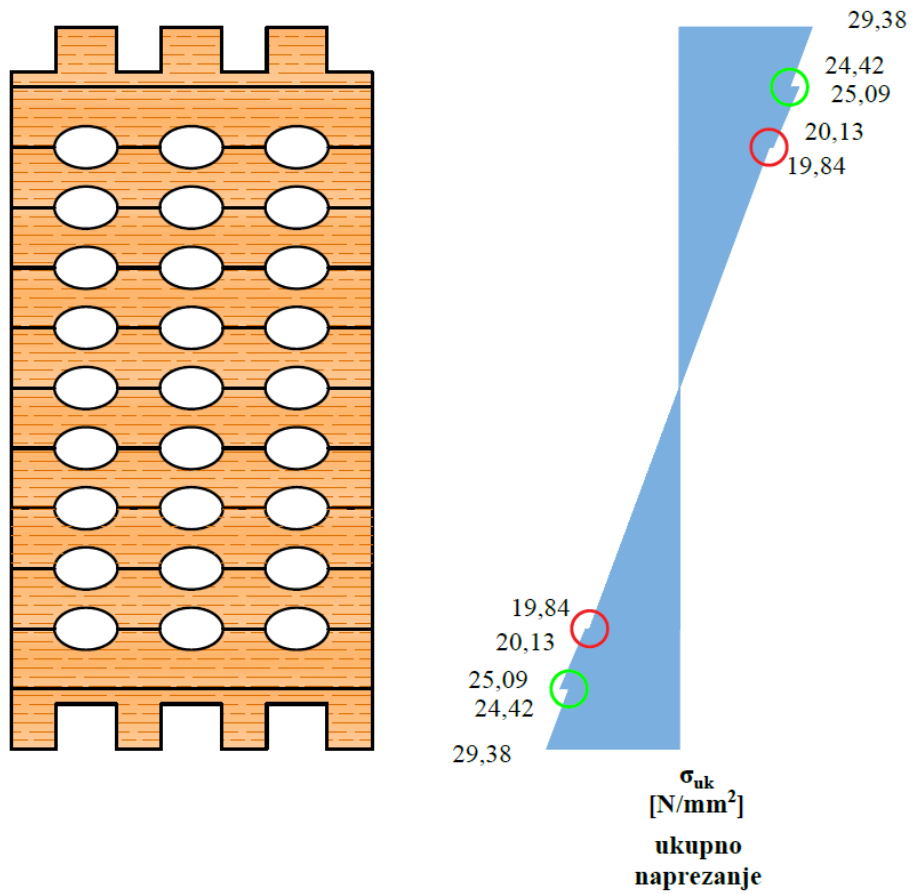
Tablica 3.19 Proračunate vrijednosti naprezanja za savijanje uzoraka oko slabije osi

| Broj lamele od vrha prema dnu uzorka | a_i (mm) | Naprezanja (N/mm ²) | | |
|--------------------------------------|------------|---------------------------------|--------------|--------|
| | | položaj | od savijanja | UKUPNO |
| 1 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 2 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 3 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 4 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 5 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 6 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |

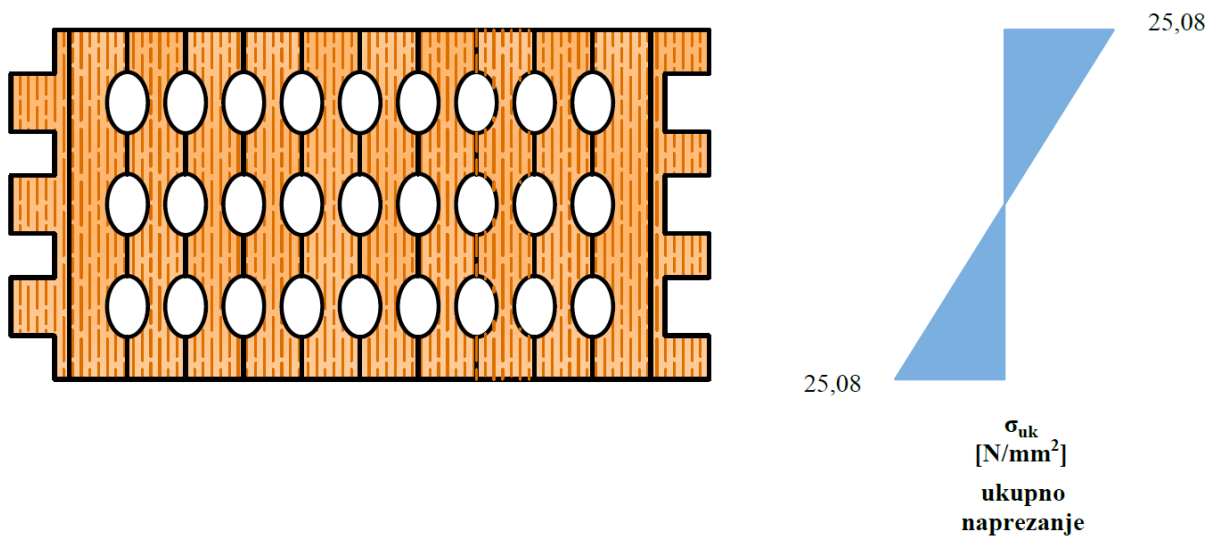
| Broj lamele od vrha prema dnu uzorka | a_i (mm) | Naprezanja (N/mm ²) | | |
|--------------------------------------|------------|---------------------------------|--------------|--------|
| | | položaj | od savijanja | UKUPNO |
| 7 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 8 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 9 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 10 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 11 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |
| 12 | 60.00 | gore | 25.35 | 25.35 |
| | | dolje | 25.35 | 25.35 |



Slika 3.77 Prikaz komponenti ukupnog naprezanja od savijanja uzorka oko jače osi



Slika 3.78 Prikaz ukupnog naprezanja od savijanja uzorka oko jače osi



Slika 3.79 Prikaz ukupnog naprezanja od savijanja uzorka oko slabije osi

3.4.1.2 Diskusija i objašnjenje dobivenih proračunatih vrijednosti

U prethodnom poglavlju vidi se kako su za svaku od lamela naprezanja od savijanja jednakog iznosa. Razlog tome je što su parametri, o kojima ono ovisi, jednaki za svaku od lamela za promatrani uzorak. Da su lamele različite visine ili od različite klase drva (drugačiji modul elastičnosti), naprezanja bi se razlikovala za svaku lamelu ovisno o vrijednostima navedenih parametara.

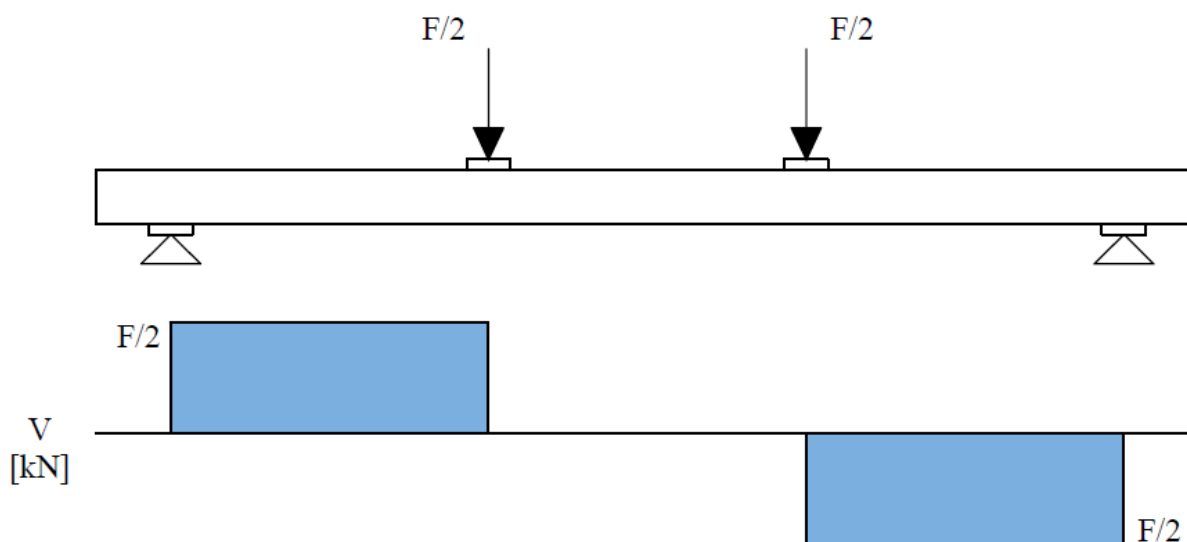
Zbog parametra a_i , odnosno udaljenosti težišta poprečnog presjeka pojedine lamele od težišta poprečnog presjeka uzorka, naprezanja od popustljivosti povećavaju se s udaljenošću od neutralne osi. Na slici 3.77 čini se kako se povećavaju proporcionalno, no na slici 3.78, na kojoj su prikazana ukupna naprezanja, vidi se kako to nije slučaj. Naime, ukupna naprezanja imaju očekivani oblik, odnosno izgledaju gotovo jednako kao za uzorak punog poprečnog presjeka. Najveća su naprezanja na rubovima, u težištu su jednaka nuli te se linearno mijenjaju po visini poprečnog presjeka, no za ovaj sastavljeni presjek mogu se uočiti skokovi u naprezanjima na rubovima. Razlog tome je što su rubne lamele drugačijeg tipa od onih u unutrašnjosti. U unutrašnjosti su lamele tipa P3 tako da se parametar a_i jednoliko povećava u središnjem dijelu, a time i naprezanja. Nakon lamela P3, gledajući od težišta presjeka prema rubovima, dolazi lamela P2 čije je težište pomaknuto prema njenom gornjem rubu, radi šupljina položenih samo s jedne strane. Skok je stoga takav da se naprezanja naglo povećaju za određeni iznos zbog naglog povećanja parametra a_i (crveno zaokruženo – slika 3.78). Zadnja je lamela tipa P1, odnosno P4, a obje imaju težište pomaknuto više prema rubu koji je s unutarnje strane presjeka pa je stoga skok takav da se naprezanja smanjuju zbog naglog smanjenja parametra a_i (zeleno zaokruženo – slika 3.78).

Kako se u smjeru slabije osi uzorka ne nalaze nikakva spojna sredstva, nema naprezanja od popustljivosti. Stoga su naprezanja za svaku od lamela jednaka i iznosa su jednakog naprezanjima od savijanja (vidi sliku 3.79).

Kako bi se provjerile pretpostavke opisanog proračuna, u sljedećem će poglavlju izrađen je numerički model u programskom paketu ANSYS. Dobiveni progib uspoređen je s progibom tokom ispitivanja, dok su naprezanja uspoređena s naprezanjima dobivenima ručnim proračunom.

3.4.2 Naprezanja uzrokovana poprečnom silom

Kako je uzorak opterećen koncentriranim silama u trećinama raspona, u rubnim se trećinama javlja poprečna sila (Slika 3.80). Ona uzrokuje posmična naprezanja čiji je iznos potrebno provjeriti u spojnim ravninama pojedinih dijelova. Naime, ta će naprezanja preuzimati spajala, u ovom slučaju ljepilo.



Slika 3.80 Raspodjela poprečne sile duž uzorka

Posmična naprezanja računaju se prema sljedećem izrazu:

$$\tau = \frac{V_z \cdot S_y}{I_{y,ef} \cdot l_g} \quad (3.23)$$

gdje je:

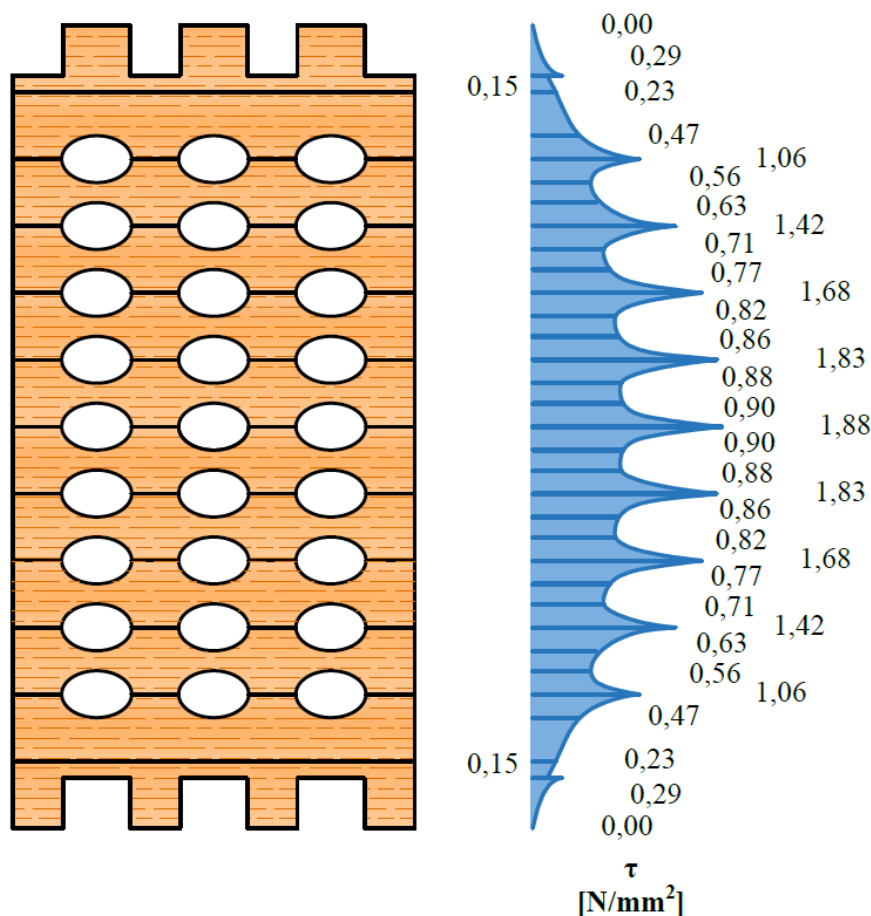
- V_z iznos poprečne sile
- S_y statički moment površine dijela uzorka iznad ravnine za koju se računa posmično naprezanje
- $I_{y,ef}$ efektivni moment tromosti poprečnog presjeka uzorka
- l_g širina presjeka u ravnini za koju se računa posmično naprezanje.

1.1.1.1 Prikaz proračunatih vrijednosti

U tablici 3.20 dane su vrijednosti svih parametara iz izraza (3.23), te vrijednost posmičnog naprezanja u svim spojnim ravninama lamela te u svakoj ravnini u kojoj dolazi do promjene u poprečnom presjeku prilikom savijanja oko jače osi. Takve su ravnine na vrhu i na dnu eliptičnih šupljina lamela P2 i P3 te pri vrhu i dnu utora lamela P1 i P4. Na slici 3.81 dan je grafički prikaz promjene posmičnog naprezanja po visini poprečnog presjeka uzorka.

Tablica 3.20 Vrijednosti posmičnih naprezanja u spojnima ravninama lamela te u ravninama promjene poprečnog presjeka lamela

| Posmična ravnina | V_z (kN) | S_y (mm ³) | $I_{y,ef}$ (mm ⁴) | l_f (mm) | τ (N/mm ²) |
|------------------|---------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------|--------------------------------|
| 1G | 17000 | 101250 | 9.9E+07 | 60 | 0.29 |
| 1D | 17000 | 101250 | 9.9E+07 | 120 | 0.15 |
| 2 | 17000 | 162750 | 9.9E+07 | 120 | 0.23 |
| 3 | 17000 | 326970 | 9.9E+07 | 120 | 0.47 |
| 4 | 17000 | 350012 | 9.9E+07 | 57 | 1.06 |
| 5 | 17000 | 387959 | 9.9E+07 | 120 | 0.56 |
| 6 | 17000 | 440437 | 9.9E+07 | 120 | 0.63 |
| 7 | 17000 | 469531 | 9.9E+07 | 57 | 1.42 |
| 8 | 17000 | 497596 | 9.9E+07 | 120 | 0.71 |
| 9 | 17000 | 535674 | 9.9E+07 | 120 | 0.77 |
| 10 | 17000 | 554895 | 9.9E+07 | 57 | 1.68 |
| 11 | 17000 | 573087 | 9.9E+07 | 120 | 0.82 |
| 12 | 17000 | 596765 | 9.9E+07 | 120 | 0.86 |
| 13 | 17000 | 606113 | 9.9E+07 | 57 | 1.83 |
| 14 | 17000 | 614432 | 9.9E+07 | 120 | 0.88 |
| 15 | 17000 | 623710 | 9.9E+07 | 120 | 0.90 |
| 16 | 17000 | 623186 | 9.9E+07 | 57 | 1.88 |
| 17 | 17000 | 623710 | 9.9E+07 | 120 | 0.90 |
| 18 | 17000 | 614432 | 9.9E+07 | 120 | 0.88 |
| 19 | 17000 | 606113 | 9.9E+07 | 57 | 1.83 |
| 20 | 17000 | 596765 | 9.9E+07 | 120 | 0.86 |
| 21 | 17000 | 573087 | 9.9E+07 | 120 | 0.82 |
| 22 | 17000 | 554895 | 9.9E+07 | 57 | 1.68 |
| 23 | 17000 | 535674 | 9.9E+07 | 120 | 0.77 |
| 24 | 17000 | 497596 | 9.9E+07 | 120 | 0.71 |
| 25 | 17000 | 469531 | 9.9E+07 | 57 | 1.42 |
| 26 | 17000 | 440437 | 9.9E+07 | 120 | 0.63 |
| 27 | 17000 | 387959 | 9.9E+07 | 120 | 0.56 |
| 28 | 17000 | 350012 | 9.9E+07 | 57 | 1.06 |
| 29 | 17000 | 326970 | 9.9E+07 | 120 | 0.47 |
| 30 | 17000 | 162750 | 9.9E+07 | 120 | 0.23 |
| 31G | 17000 | 101250 | 9.9E+07 | 120 | 0.15 |
| 31D | 17000 | 101250 | 9.9E+07 | 60 | 0.29 |



Slika 3.81 Promjena posmičnih naprezanja po visini poprečnog presjeka uzorka za savijanje oko jače osi

3.4.2.1 Objašnjenje dobivenih proračunatih vrijednosti

Za proračun posmičnih naprezanja vrijednost poprečne sile i efektivnog momenta tromosti konstantne su za sve posmične ravnine (vidi tablicu 3.20). Promjena posmičnih naprezanja time ovisi o statičkom momentu površine i o širini presjeka u ravnini za koju se računa naprezanje. Može se reći da statički moment površine približno proporcionalno raste, što je posmična ravnina udaljenija od neutralne osi, iako je rast manji u području šupljina. Stoga, za ovaj uzorak, promjena iznosa posmičnih naprezanja najviše ovisi o širini poprečnog presjeka u ravnini za koju se računa naprezanje. Može se primijetiti kako su promjene naprezanja po visini svake lamele značajne (vidi sliku 3.81). Razlog tome je što je iznos posmičnog naprezanja obrnuto proporcionalan duljini l_g , što znači da će posmično naprezanje biti veće što je manja širina poprečnog presjeka u toj ravnini. Širina presjeka najmanja je u ravnini lijepljenog spoja u kojoj je najveća širina eliptičnih šupljina pa je u toj ravnini i najveća vrijednost posmičnog naprezanja pojedine lamele. U rubnim lamelama vidljivi su skokovi u posmičnom naprezanju zbog toga što je u istoj ravnini različita duljina l_g ovisno o tome gleda li se gornja ili donja strana promatrane ravnine.

3.4.3 Naprezanja uzrokovana tlakom okomito na vlakanca

Prema normi EN 1995-1-1 [1] normalno naprezanje pri opterećenju tlakom okomito na vlakanca računa se izrazom:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (3.24)$$

gdje je:

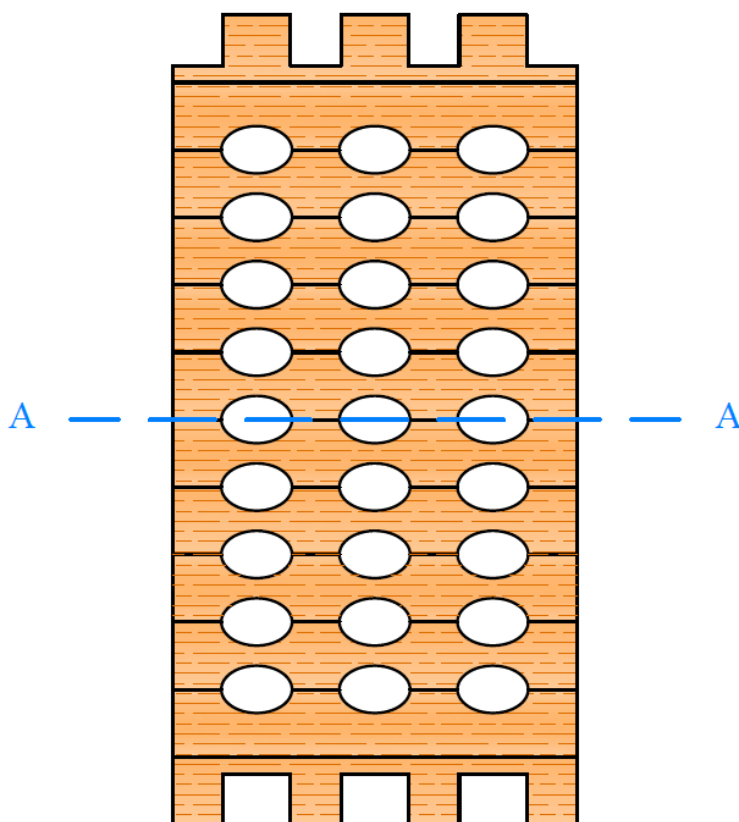
$\sigma_{c,90,d}$ proračunska vrijednost tlačnog naprezanja na efektivnoj površini okomito na vlakanca

$F_{c,90,d}$ proračunska vrijednost tlačnog opterećenja okomito na vlakanca

A_{ef} efektivna površina u tlaku okomito na vlakanca.

1.1.1.2 Prikaz proračunatih vrijednosti za tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

Kao iznos proračunske vrijednosti tlačnog opterećenja uzeta je maksimalna vrijednost sile koju je podnio uzorak TE(0)-2, a iznosi 52292 N. Efektivna površina proračunata je u presjeku koji je najviše oslabljen. Taj se presjek nalazi upravo na spojnici lamela (Slika 3.82).



Slika 3.82 Presjek A-A za koji se računa površina potrebna za proračun tlačnog naprezanja okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

Uzimajući u obzir geometriju elipsa, te dimenzije uzoraka ispitivanih na tlak okomito na vlakanca, tlačno naprezanje iznosi:

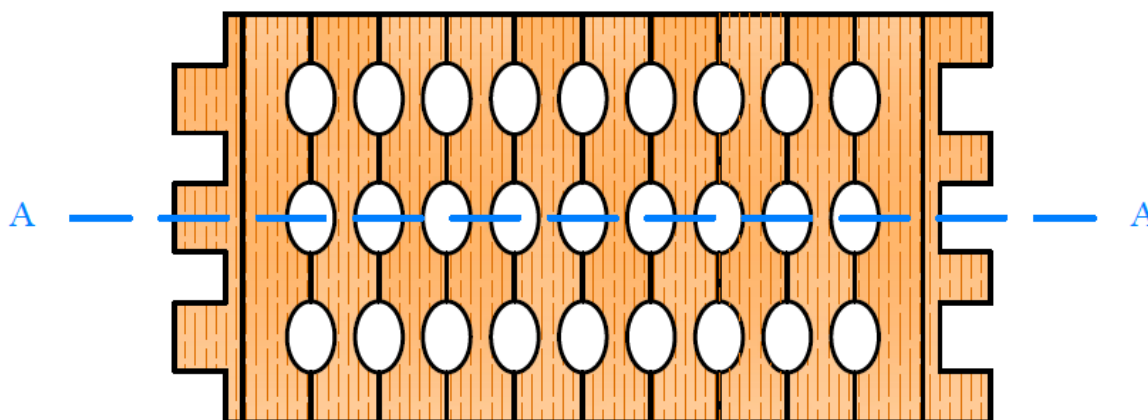
$$\sigma = \frac{52292}{210 \cdot (120 - 3 \cdot 21)} = 4,39 \text{ N/mm}^2 \quad (3.25)$$

1.1.1.3 Prikaz proračunatih vrijednosti za tlak okomito na vlakanca u smjeru jače osi

U ovom je slučaju za iznos proračunske vrijednosti tlačnog opterećenja uzeta maksimalna vrijednost sile koju je podnio uzorak TE(90)-2, a iznosi 39803 N. Efektivna površina proračunata je u presjeku koji je najviše oslabljen, odnosno onaj u kojemu su šupljine najšire. Presjek je okomit na djelovanje sile, dakle položen u smjeru slabije osi (Slika 3.83).

Ako se u proračunu naprezanja prema izrazu (3.24) izuzmu dijelovi lamela P1 i P4 koji oblikuju utore, tada naprezanje iznosi:

$$\sigma = \frac{39803}{105 \cdot (240 - 2 \cdot 15 - 9 \cdot 14)} = 4.51 \text{ N/mm}^2 \quad (3.26)$$



Slika 3.83 Presjek A-A za koji se računa površina potrebna za proračun tlačnog naprezanja okomito na vlakanca u smjeru jače osi

3.5 Metoda konačnih elemenata (MKE) – ambijentni uvjeti

3.5.1 Uvod

Danas se sve više teži modeliranju raznih problema na računalima kako bi se uštedila značajna novčana sredstva koja su potrebna za provedbu ispitivanja u laboratorijima. Uz to, ispitivanja zahtijevaju i duži vremenski period, potreban za izradu ispitivanih uzoraka, njihovu pripremu za ispitivanje, provedbu samog ispitivanja te obradu rezultata kako bi se donijeli zaključci. Zato se, pri pojavi nekog novog problema, prvo pristupi eksperimentalnom ispitivanju u laboratoriju, a zatim se izrađuju numerički modeli, koji se kalibriraju. Na taj se način otvara mogućnost da se daljnji tijek istraživanja veže samo uz numeričke modele, čime se znatno olakšava i pojednostavljuje sam postupak. Kako bi rezultati modela bili što točniji i vjerodostojniji, koriste se računalni FEM programi (eng. Finite Element Method), odnosno računalni programi na principu metode konačnih elemenata (MKE).

Kako je dostupan velik broj takvih programa, dan je pregled onih u kojima su modelirani elementi savijani u četiri točke, kao i pri ispitivanju provedenom u svrhu ovoga rada, objašnjenom u prethodnom poglavlju.

3.5.2 Abaqus

Abaqus je program za analizu metodom konačnih elemenata čije su glavne mogućnosti obuhvaćanje linearnih i nelinearnih analiza, velikih deformacija i simulacija kontakata, dostupnost različitih vrsta analiza, prilagodbe grafičkog sučelja te širok spektar nelinearnih mogućnosti materijala [111].

Koristeći analizu metodom konačnih elemenata Turnbull i Crocker [112] napravili su model u Abaqusu za proučavanje raspodjele naprezanja i deformacija na vlačnoj strani uzorka, od nehrđajućeg čelika, savijanog u četiri točke. Analiza je provedena kako bi se pronašla metoda najprikladnija da vrijednost ukupne deformacije bude jednaka 0,2 % vrijednosti plastične deformacije. Na kontaktu grede i elemenata za unos opterećenja definirano je vrlo malo trenje, ali je i varirano kako bi se provjerio utjecaj na rezultate. Zaključeno je da trenje na mjestima unosa sile može izazvati povećanje naprezanja na vlačnoj strani koja mogu dovesti do puknuća. Korištena je kvadratna mreža konačnih elemenata.

Ovaj je računalni program korišten i u istraživanju Jordaan, JP-a [113] zbog složenosti geometrije, također pri modeliranju grede savijane u četiri točke kako bi se ispitala otpornost na zamor. Kako je uzorak dvoosno simetričan, u Abaqusu je modelirana samo polovica, dok je mreža konačnih elemenata heksaedarskog oblika. Na kontaktnim plohama, normalno na

površine, definiran je eksponencijalni tlak, a tangencijalno ponašanje bez trenja. Razlika između izmjerenih i izračunatih deformacija (a time i naprezanja) je oko 7 %.

Khorsandnia, Valipour i Crews [114] modelirali su kompozitnu drveno-betonsku gredu metodom konačnih elemenata te su naknadno proveli ručni proračun prema Eurokodu 5 kako bi usporedili rezultate. Drvo je za početak modelirano tako da su za tri glavna smjera (longitudinalni, tangencijalni i radijalni) moduli elastičnosti i posmika te Poissonov koeficijent imali različite vrijednosti. Naknadno je spoznano da mehanička svojstva drva u smjeru okomito na vlakanca imaju malen utjecaj na odziv grede na globalnoj razini, a izotropne karakteristike materijala za grede bez čvorova i nedostataka te s dominantnim savijanjem pružaju pogrešku manju od 5 % u odnosu na ortotropne. Većina mehaničkih karakteristika drva preuzeta je iz rezultata ispitivanja. Betonski i drveni dio modelirani su kao dva zasebna tijela, a na mjestima mehaničkih spajala modelirane su opruge kojima je samo vertikalni pomak onemogućen.

Istražena je i mogućnost modeliranja loma savijanjem mekog drva primjenom ABAQUS FEM koda [115]. Primjenjuje se Hill-ova funkcija kojom se opisuje anizotropno plastično ponašanje materijala nakon što je dosegnuta granica tečenja. Kako ova funkcija ne razlikuje tlačnu i vlačnu čvrstoću, teorijski se razdvaja zona tlaka i vlaka. Za potrebe modela određen je modul elastičnosti duž vlakanca, jer ima najveći utjecaj na deformacije, čak i u ortotropnom modelu, te modul puknuća, odnosno savojna čvrstoća. Numerički model sastoji se od grede savijane u 3 točke, gdje u točkama oslonaca nije omogućen pomak, dok je na mjestu unosa sile definiran koeficijent trenja. Mreža konačnih elemenata sastoji se od elemenata s 20 čvorova i 27 integracijskih točaka (C3D20). Četiri takva elementa nalaze se po visini uzorka, čime se dobivaju rezultati identični analitičkim.

3.5.3 Ansys

Kako bi se pronašlo najoptimalnije rješenje za primjenu sendvič panela kao pokrova prikolice provedeno je istraživanje [116] u kojemu su najprije ispitani različiti tipova panela. Nakon toga je napravljen numerički model u ANSYS-u, za kojeg su podaci dobiveni ispitivanjima na vlak. 2D modelom simulirano je savijanje panela u četiri točke pa su rezultati uspoređeni s ispitivanjima tako da je dobiveno vrlo dobro poklapanje. Materijal lameliranog elementa definiran je kao linearan ortotropan, dok je materijal jezgre linearan izotropan. Jedan oslonac ima fiksirane pomake u svim smjerovima, dok drugi ima fiksiran samo vertikalni pomak. Mreža konačnih elemenata veličine je 1 mm. Dobiveni rezultati korišteni su za

optimalno oblikovanje sendvič panela. 3D model napravljen je za testiranje panela u stvarnim radnim uvjetima.

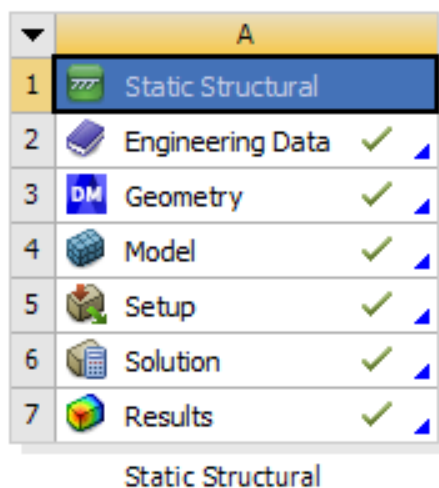
Bastola, Souliman i sur. [117] modelirali su gredu savijanu u četiri točke u ANSYS-u kako bi procijeni ponašanje asfaltnog materijala pod zamorom. U području sve četiri točke savijanja modelirane su pločice, debljine 5 mm, a duljine 25 mm, preko kojih je nanoseno opterećenje te su definirani oslonci. Kontakti među tijelima definirani su na način da nisu dopušteni ni pomaci, ni klizanje jednog elementa po drugome. Sile su zadavane kao konstantne, dok su rubni uvjeti simulirali slobodno oslonjenu gredu.

Bano i sur. [118] analizirali su različite modele drvenih greda s čvorovima metodom konačnih elemenata kako bi predvidjeli opterećenje otkazivanja i mjesto puknuća u odnosu na veličinu i položaj čvorova te otklona vlaknaca u području oko čvora. Ortotropno i elasto-plastično ponašanje drva modelirano je uporabom ANSYS Parametric Design Language (APDL) naredbe. Geometrija je definirana prema EN 408 za savijanje u četiri točke tako da su na mjestima oslonaca modelirane čelične pločice za izbjegavanje lokalne koncentracije naprezanja, dok je opterećenje uneseno kao pritisak duž linije, odnosno kao koncentrirana sila u trećinama raspona. Mreža konačnih elemenata četverokutnog je oblika (Plane 42) kako bi bila što ujednačenija. Opterećenje je zadano da se povećava u svakom koraku, sve dok iskorištenost ne bude 100 %. Rezultati numeričkih modela uspoređeni su s onima dobivenim ispitivanjima, što je rezultiralo razlikom manjom od 9.7 %.

Metodom konačnih elemenata, koristeći ANSYS, provedeno je i istraživanje [119] u kojemu je ispitan kapacitet nosivosti na savijanje drvenih greda s početnim nesavršenostima. Grede su uporabljivane osamdesetak godina, s jedne stare knjižnice te su im nedestruktivnim metodama ispitana mehanička svojstva. Ona su naknadno unesena u numerički model kada je drvo definirano kao anizotropan materijal s elasto-plastičnim ponašanjem. Prema rezultatima nedestruktivnih metoda grede su podijeljene u zone s različitim čvrstoćama te kao takve modelirane. Slobodno su oslonjene, a na sva četiri mjesta savijanja definirane su pločice kako bi se izbjegle koncentracije naprezanja. Ako je dio presjeka grede propao ili pak postoje pukotine ili čvorovi, kao takvi su modelirani. Dobivene vrijednosti numeričkog modela veće su 22 % od onih dobivenih ispitivanjima.

3.6 Numerički model nosača opterećenog na savijanje u ANSYS-u

Odabran je modul *Static Structural*, odnosno statička analiza. Ovaj se sustav sastoji od šest međusobno povezanih koraka koji logičkim redoslijedom slijede jedan drugoga (Slika 3.84).



Slika 3.84 Dijelovi sustava analize Static Structural

Dakle, prvotno je u *Engineering Data* definiran materijal, a onda se je definirana geometrija u *Geometry*. U dijelu *Model* pridruženi se materijali svim tijelima, definiran je oblik i veličina mreže konačnih elemenata, kao i veze između pojedinih tijela. Nakon toga su u *Model Setup* definirani rubni uvjeti i opterećenje, *Model Solution* omogućuje rješenje, dok *Model Results* prikazuje rezultate.

3.6.1 Definiranje materijala

ANSYS omogućuje samostalno kreiranje materijala, gdje su definirane sve materijalne karakteristike u skladu s prethodnim eksperimentalnim istraživanjem. Izrađena su dva zasebna modela u ANSYS-u. Jedan je za savijanje oko jače osi za uzorak SE(0) – 1 čija su karakteristike prikazane na slici 3.85, a drugi za savijanje oko slabije osi za uzorak SE(90) – 1 čije su karakteristike prikazane na slici 3.86. Kao i za ručni proračun, razmatrani su samo uzorci s eliptičnim šupljinama.

| Properties of Outline Row 4: Wood, Oak | | | | |
|--|---|--------------------------------|------------------------------------|-----|
| | A | B | C | D E |
| 1 | Property | Value | Unit | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | |
| 3 | Density | 350 | kg m ⁻³ | |
| 4 | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion | | | |
| 5 | Coefficient of Thermal Expansion | 4,69E-06 | C ⁻¹ | |
| 6 | Isotropic Elasticity | | | |
| 7 | Derive from | Young's Modulus and Poisson... | | |
| 8 | Young's Modulus | 9600 | MPa | |
| 9 | Poisson's Ratio | 0,3742 | | |
| 10 | Bulk Modulus | 1,2719E+10 | Pa | |
| 11 | Shear Modulus | 3,4929E+09 | Pa | |
| 12 | Tensile Yield Strength | Tabular | | |
| 13 | Tensile Ultimate Strength | Tabular | | |
| 14 | Isotropic Thermal Conductivity | 0,4528 | W m ⁻¹ C ⁻¹ | |
| 15 | Specific Heat, C _p | 1685 | J kg ⁻¹ C ⁻¹ | |

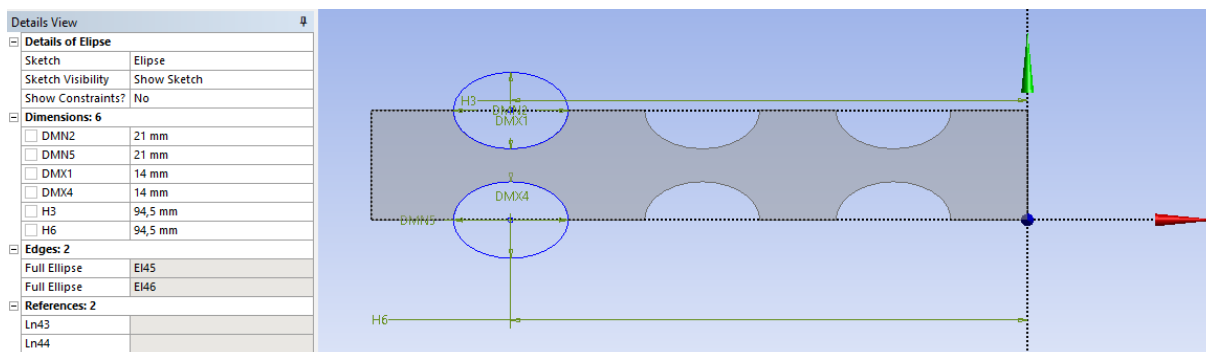
Slika 3.85 Definiranje materijala uzorka SE(0) - 1 za savijanje oko jače osi

| Properties of Outline Row 4: Wood, Oak | | | | |
|--|---|------------------------------|--------------------|-----|
| | A | B | C | D E |
| 1 | Property | Value | Unit | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | |
| 3 | Density | 350 | kg m ⁻³ | |
| 4 | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion | | | |
| 5 | Coefficient of Thermal Expansion | 4,69E-06 | C ⁻¹ | |
| 6 | Isotropic Elasticity | | | |
| 7 | Derive from | Young's Modulus and Poiss... | | |
| 8 | Young's Modulus | 8000 | MPa | |
| 9 | Poisson's Ratio | 0,3742 | | |
| 10 | Bulk Modulus | 1,0599E+10 | Pa | |
| 11 | Shear Modulus | 2,9108E+09 | Pa | |
| 12 | Tensile Yield Strength | Tabular | | |
| 13 | Tensile Ultimate Strength | Tabular | | |

Slika 3.86 Definiranje materijala uzorka SE(90) - 1 za savijanje oko slabije osi

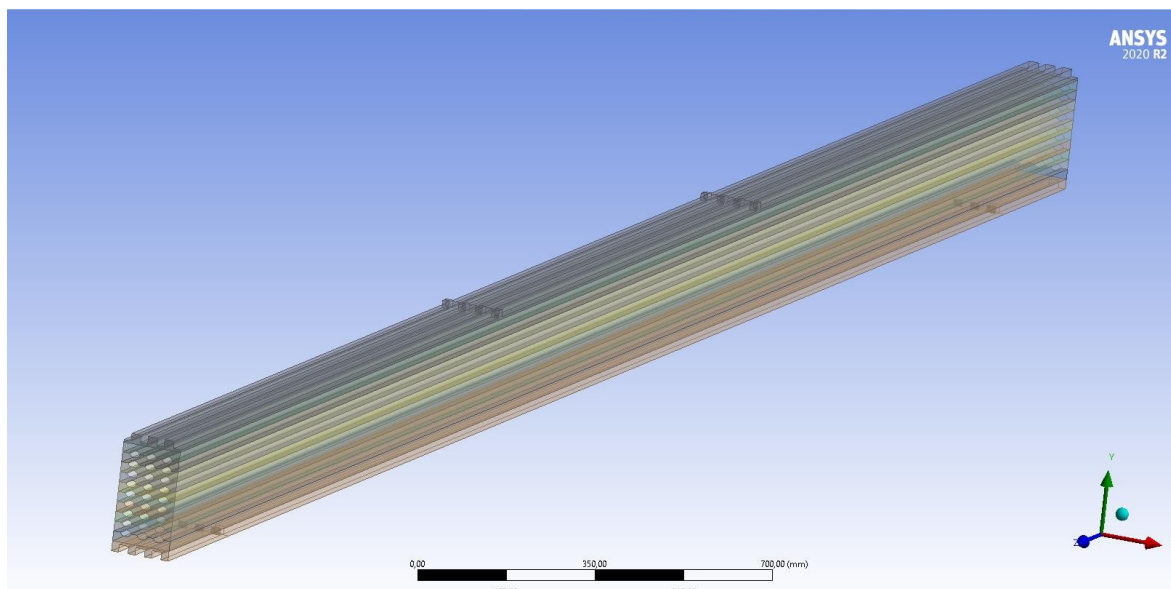
3.6.2 Geometrija

Geometrija je definirana drugim korakom u *Design Modeler-u*. Moguće je parametarski definirati sve dimenzije te ih naknadno mijenjati, ovisno o potrebi. Kako se uzorci smatraju sastavljenima, svaka je od lamela crtana kao zasebno tijelo (eng. Solid) tako da joj je prvo definiran poprečni presjek, a onda je definirana duljina po kojoj će se taj presjek „razvući“ (eng. Extrude). Prikaz poprečnog presjeka jedne od lamela dan je na slici 3.87. Geometrija samog uzorka jednaka je za savijanje oko obje osi, s jedinom razlikom u duljini lamela.

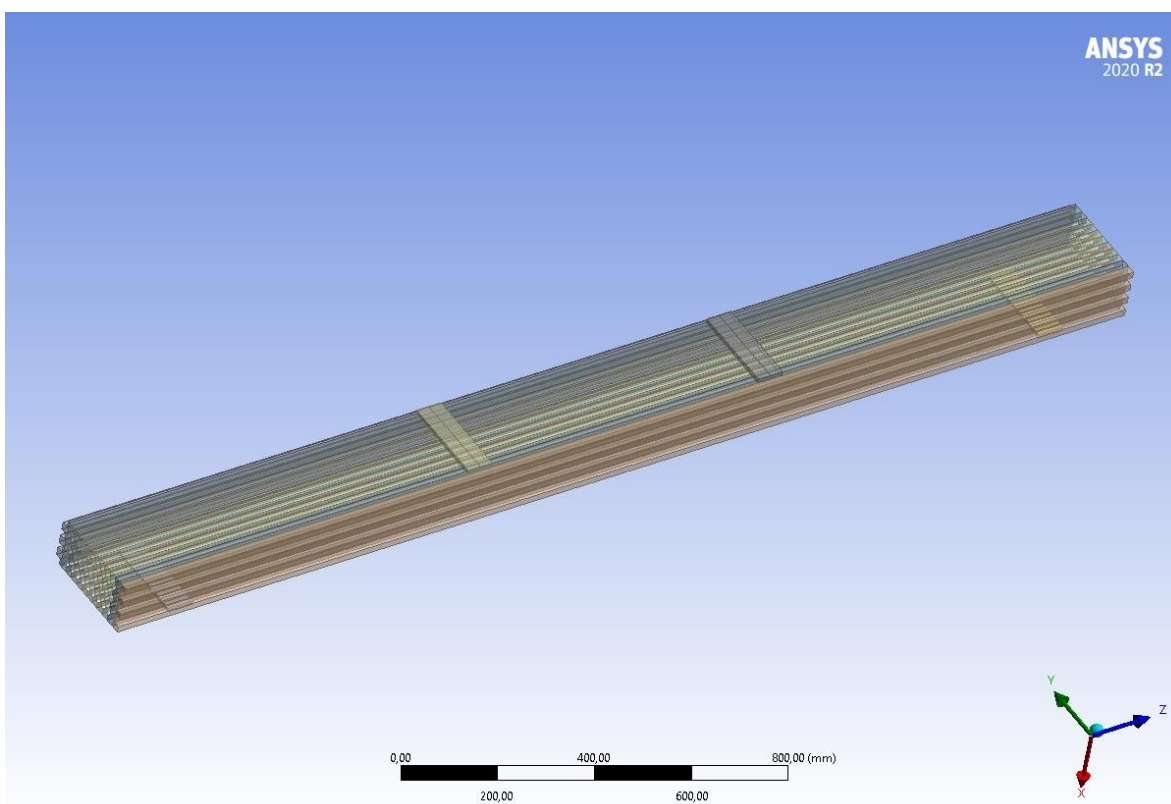


Slika 3.87 Prikaz parametarskog zadavanja geometrije lamela

Kako je statički sustav uzorka prosta greda opterećena koncentriranim silama, potrebno je definirati i geometriju oslonaca te elemenata preko kojih se opterećenje unosi. Ovaj se korak razlikuje ovisno o osi savijanja pa je geometrija oslonaca i područja unosa sile nadodana na osnovnu geometriju, za svaki model posebno. Na slici 3.88 prikazana je cjelokupna geometrija za savijanje uzorka oko jače osi, dok na slici 3.89 za savijanje oko slabije osi.



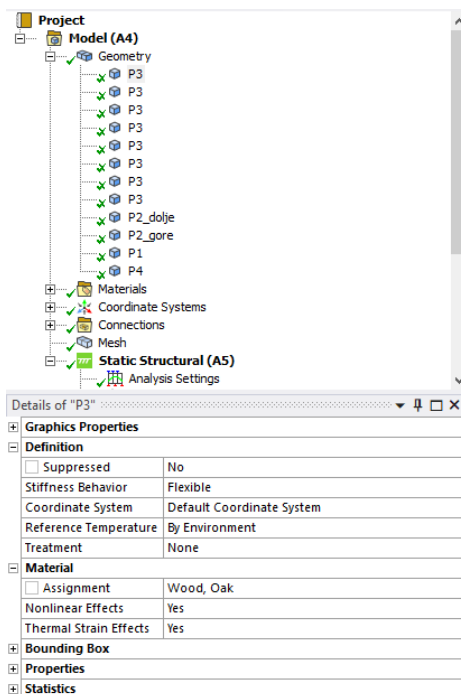
Slika 3.88 Cjelokupna geometrija uzorka za savijanje oko jače osi



Slika 3.89 Cjelokupna geometrija uzorka za savijanje oko slabije osi

3.6.3 Model

U ovom koraku je dodijeljen materijal svakoj od lamela koje su definirane kao zasebna tijela, u izborniku s opcijom *Geometry*, kako je prikazano na slici 3.90.



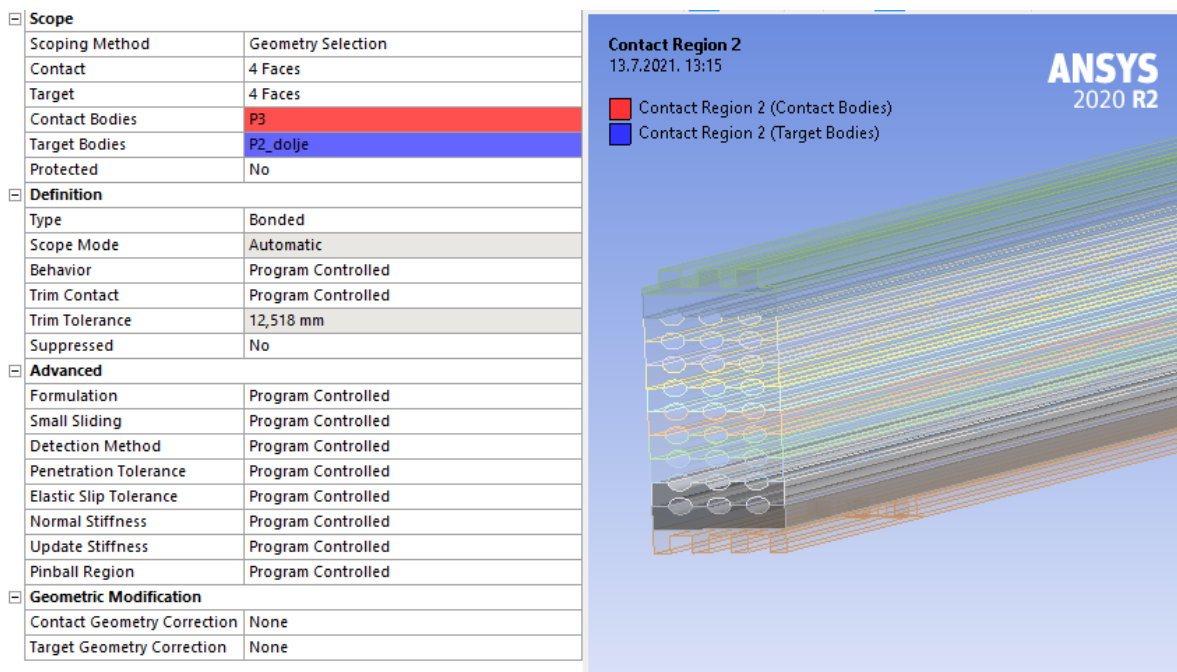
Slika 3.90 Dodjeljivanje materijala svakom od formiranih tijela u modelu

Nakon toga je u izborniku s opcijom *Connections* definiran tip kontakta između svakog tijela, odnosno između svake lamele. Ovdje je moguće odabrati između 5 različitih tipova kontakata. Svaki od njih razlikuje se ovisno o tome je li moguće odvajanje jednog tijela od drugoga te je li omogućeno klizanje jednog tijela po drugome [120]. U tablici 3.21 dano je objašnjenje svakog od 5 ponuđenih tipova kontakata.

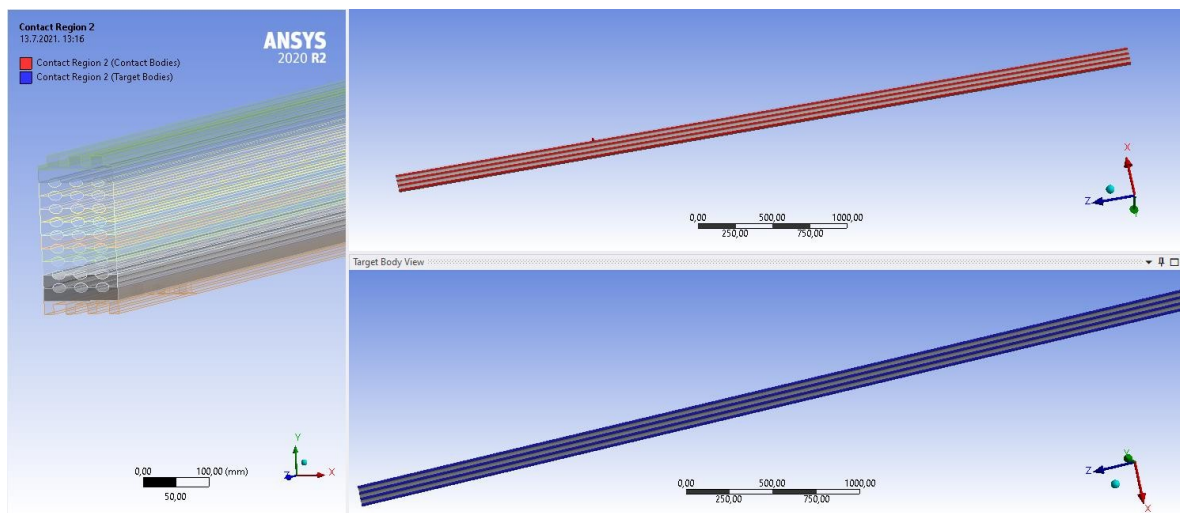
Tablica 3.21 Tipovi kontakata među tijelima u ANSYS-u

| Tip kontakta | Mogućnost odvajanja | Mogućnost klizanja |
|---------------|---------------------|--|
| Bonded | Ne | Ne |
| No Separation | Ne | Da, bez otpora (koeficijent trenja jednak nuli) |
| Frictionless | Da | Da, bez otpora (koeficijent trenja jednak nuli) |
| Frictional | Da | Da, s otporom, ako $F_{klizanje} > F_{trenje}$ (koeficijent trenja različit od nule) |
| Rough | Da | Ne (koeficijent trenja beskonačan) |

Kako su lamele međusobno lijepljene, odabran je kontakt tipa *Bonded*. Na slici 3.91 vidi se kako je između lamela P3 i P2_dolje odabrana *Bonded* veza. Svaku spojnu plohu u kontaktu moguće je u ANSYS-u prepoznati prema bojama. Na slici 3.91 vidi se kako je P3 crveno, a P2_dolje ljubičasto obojana, što ANSYS prikaže u zasebnim prozorima, što se vidi na slici 3.92.

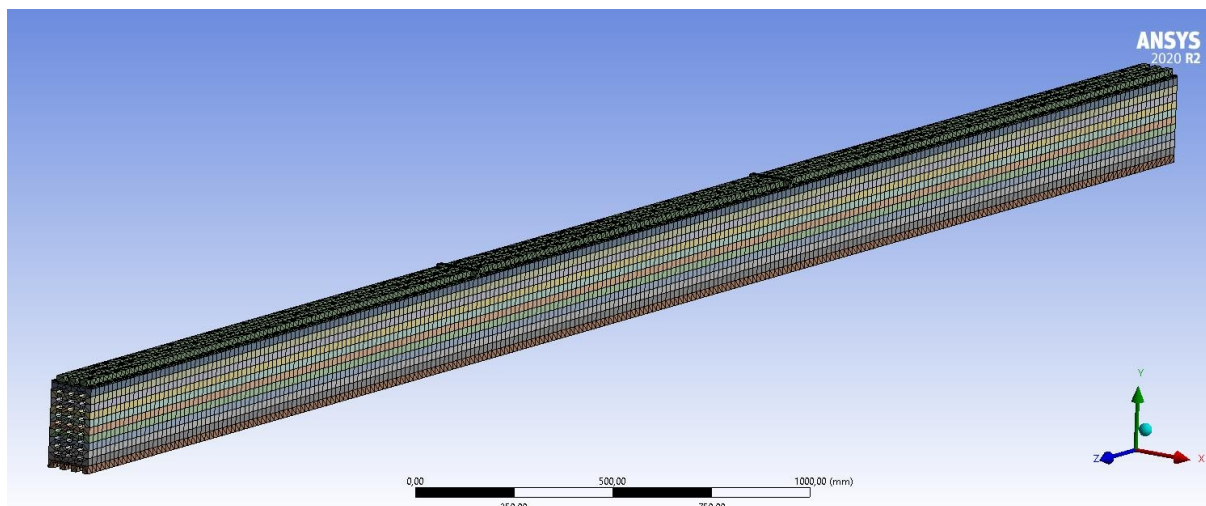


Slika 3.91 Prikaz definiranja „Bonded“ veze između lamela P3 i P2_dolje

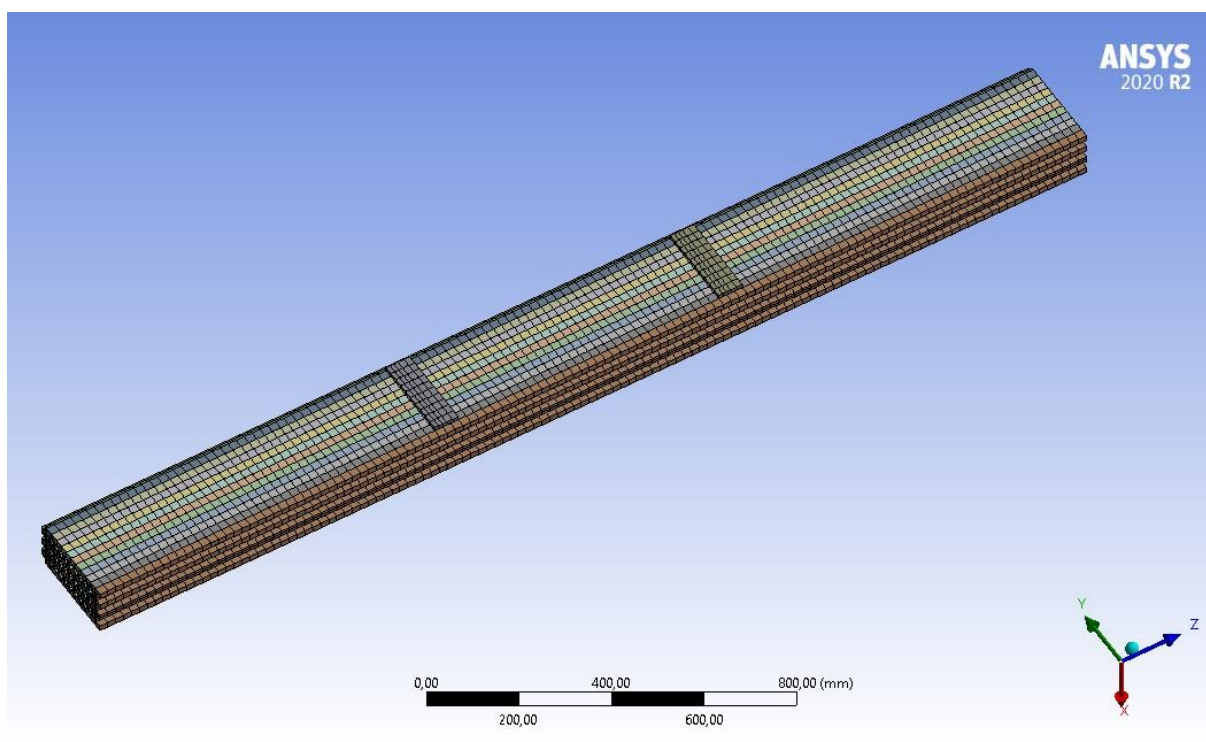


Slika 3.92 Bojama naznačene plohe kontakta dvaju tijela „Bonded“ veze

Sljedeći je korak definiranje veličine i oblika mreže konačnih elemenata (eng. Mesh). Kako je model jednostavan, odabran je kvadratičan oblik mreže konačnih elemenata, dok je za veličinu mreže za početak odabrana vrijednost od 20 mm. Na slici 3.93 prikazan je izgled mreže konačnih elemenata uzorka savijanog oko jače osi, a na slici 3.94 uzorka savijanog oko slabije osi.



Slika 3.93 Izgled mreže konačnih elemenata za model uzorka savijanog oko jače osi

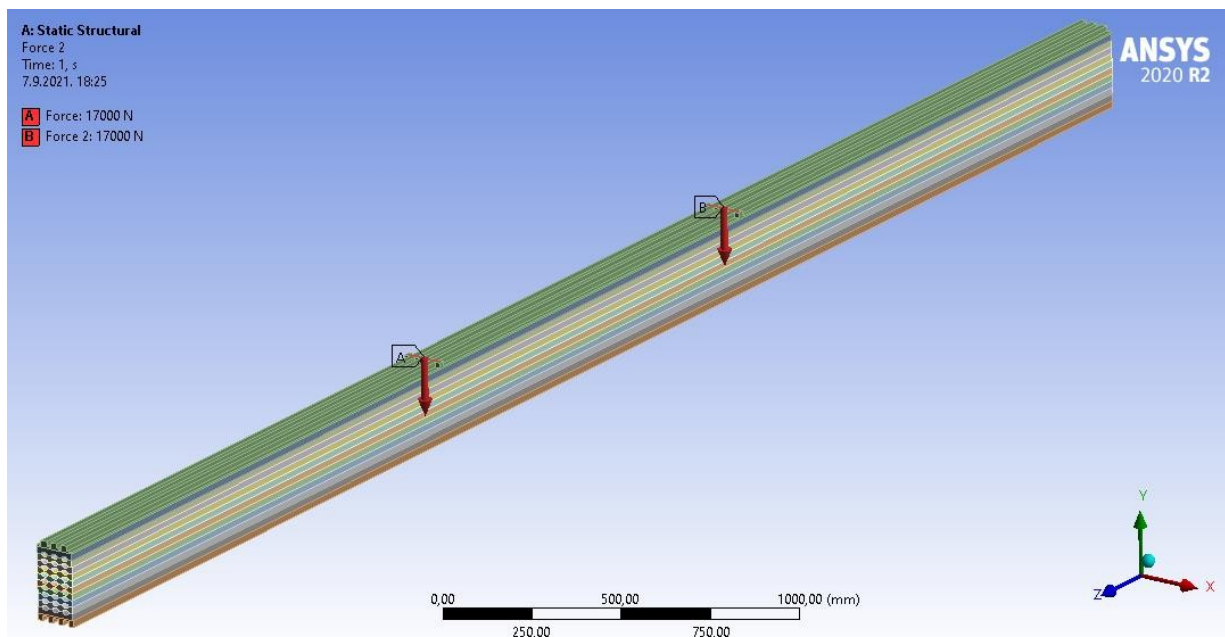


Slika 3.94 Izgled mreže konačnih elemenata za model uzorka savijanog oko slabije osi

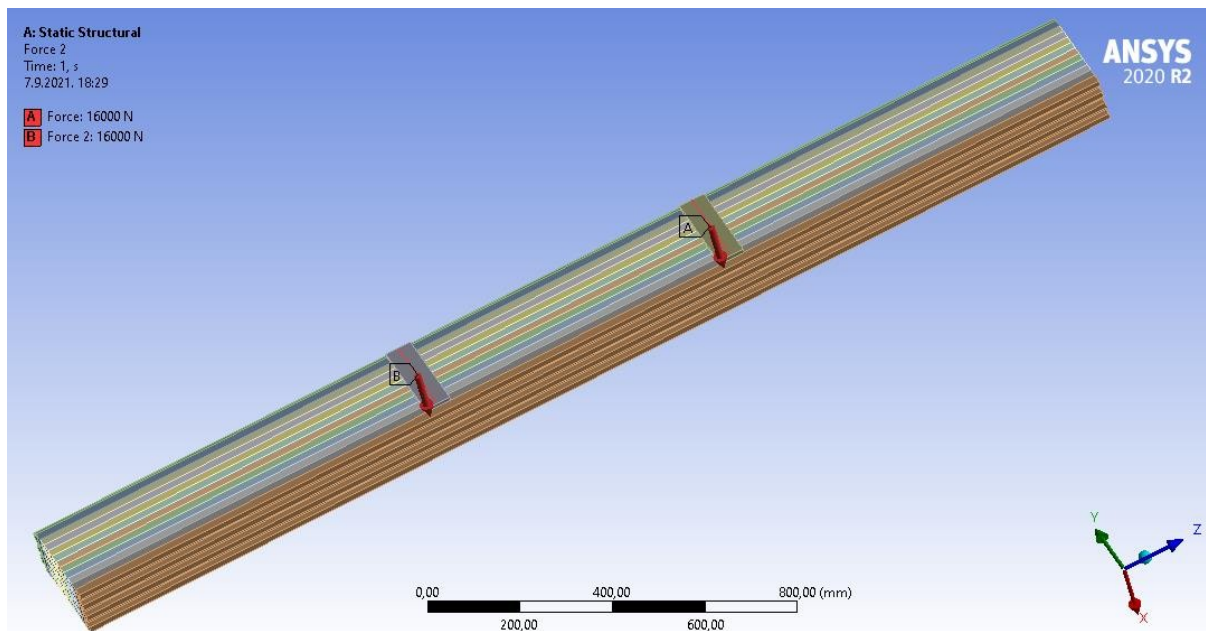
3.6.4 Rubni uvjeti

U ovom dijelu je definirano opterećenje, a zatim rubni uvjeti prema normi EN 408 [67]. Dakle, zadane su dvije koncentrirane sile, svaka iznosa 17000 N, u trećinama raspona uzorka za savijanje oko jače osi, dok je za savijanje uzorka oko slabije osi iznos koncentriranih sila 16000 N. Da bi opterećenje bilo u potpunosti zadano, odabire se geometrija preko koje će biti nanoseno, a opcije su da se definira preko točke, linije ili površine. U ovom je slučaju, radi jednostavnosti, odabran unos sila duž linije koja je položena u smjeru jedne od stranica poprečnog presjeka, ovisno o osi savijanja. Za savijanje oko jače osi ta je linija položena u

smjeru kraće dimenzije presjeka (Slika 3.95), dok je za savijanje oko slabije osi položena u smjeru duže dimenzije presjeka (Slika 3.96) .



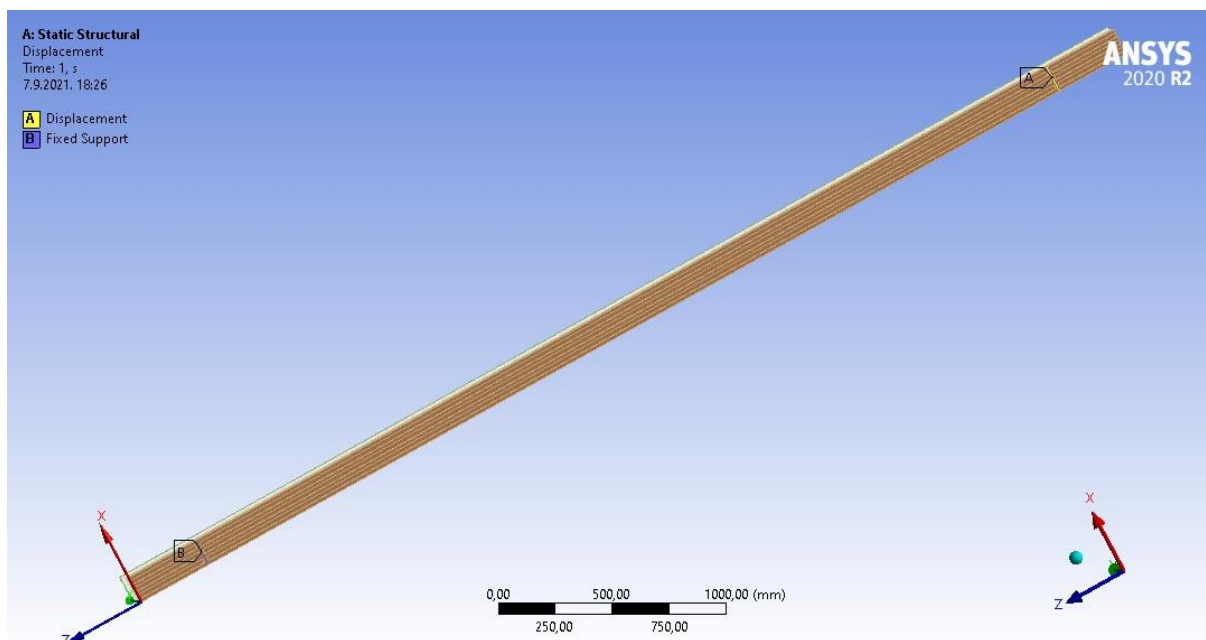
Slika 3.95 Opterećenje dvjema koncentriranim silama, svaka iznosa 17000 N, za savijanje uzorka oko jače osi



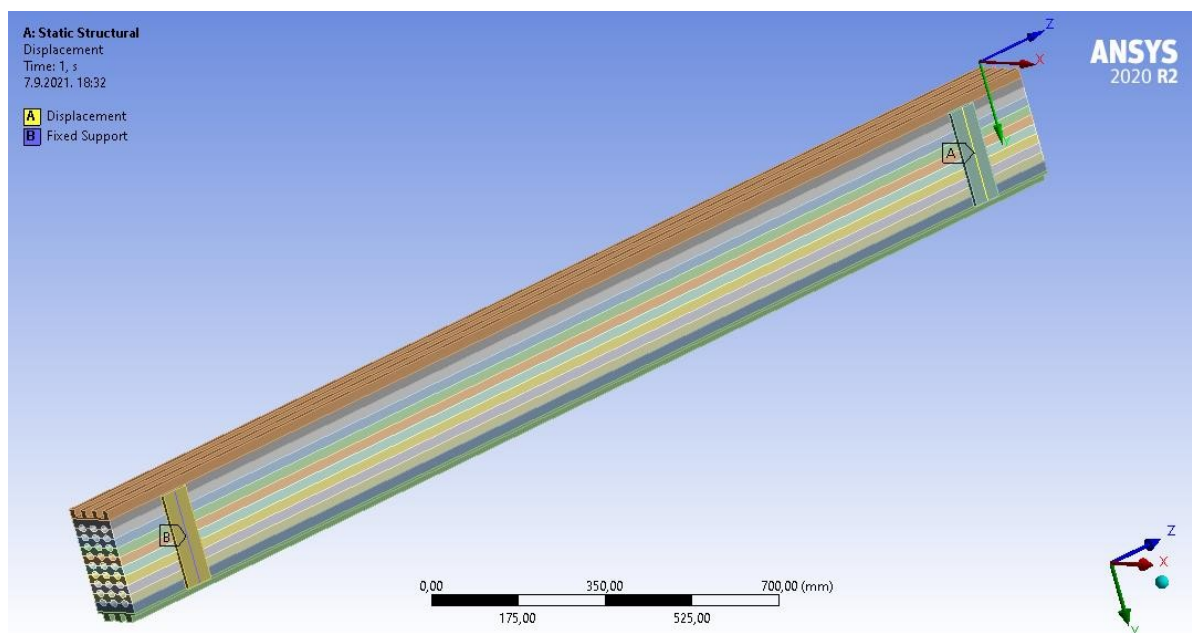
Slika 3.96 Opterećenje dvjema koncentriranim silama, svaka iznosa 16000 N, za savijanje uzorka oko slabije osi

Na isti je način zadani su rubni uvjeti. Ponovno su definirani preko linije koja se proteže duž jedne od dimenzija poprečnog presjeka, ovisno o osi oko koje se presjek savija (Slika 3.97

i Slika 3.98). Na jednom je kraju zadan nepomičan oslonac (eng. Fixed Support). Njime su onemogućeni pomaci u svim smjerovima, dok je zaokret dopušten. Na drugom je kraju omogućen pomak u smjeru uzdužne osi nosača pri čemu je zaokret također dopušten. Ovime je simuliran način oslanjanja slobodno oslonjene grede.



Slika 3.97 Definiranje oslonaca za uzorak savijan oko jače osi



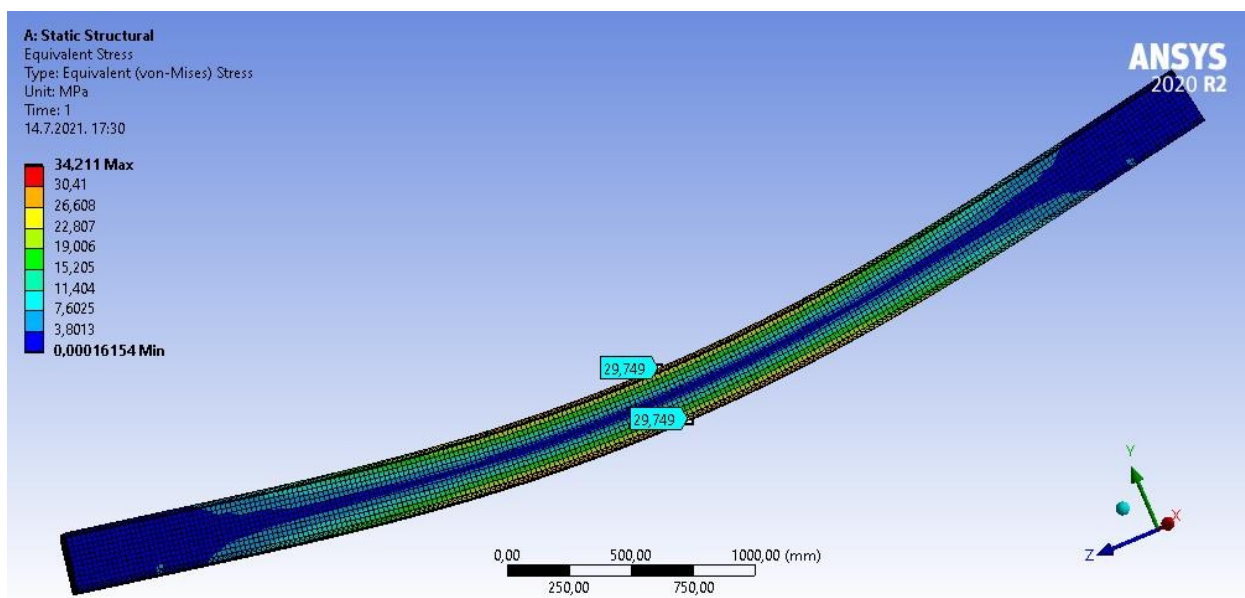
Slika 3.98 Definiranje oslonaca za uzorak savijan oko slabije osi

3.6.5 Rezultati

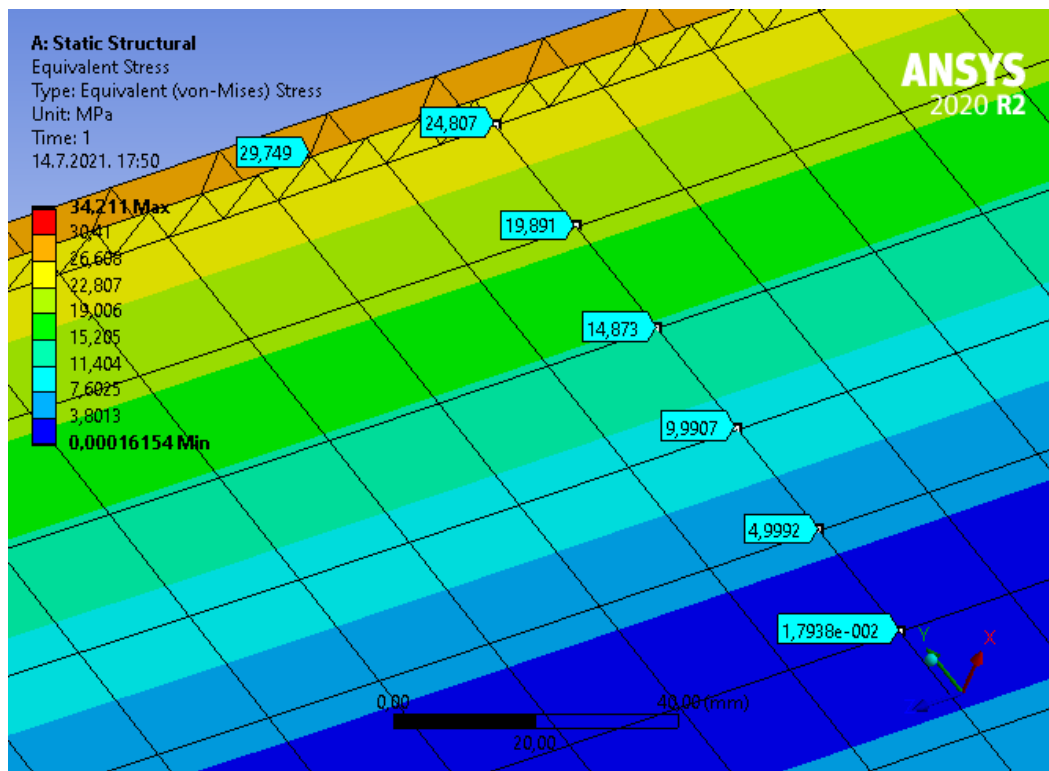
Moguće je odabrati razne vrste dostupnih parametara, ovisno o analizi koja se provodi. Kako se ovdje uspoređivanje vrši u odnosu na rezultate ispitivanja i ručnog proračuna, bit će prikazana normalna i posmična naprezanja te deformacije, ovisno o osi oko koje se uzorak savija.

3.6.5.1 Rezultati za uzorak savijan oko jače osi

Prikazana su naprezanja (Slika 3.99) na kojima se vidi mjesto najvećeg iznosa naprezanja crvenom bojom te položaj neutralne linije u kojoj su naprezanja jednaka nuli, prikazano plavom bojom. Odabrane su dvije točke za koje se predviđa najveći iznos naprezanja, jedna na gornjem, a druga na donjem rubu u sredini raspona uzorka kako bi se usporedila s onima dobivenima ručnim proračunom. Na slici 3.100 dan je bliži prikaz polovice visine uzorka s označenim vrijednostima naprezanja približno u spojnim ravninama lamela.

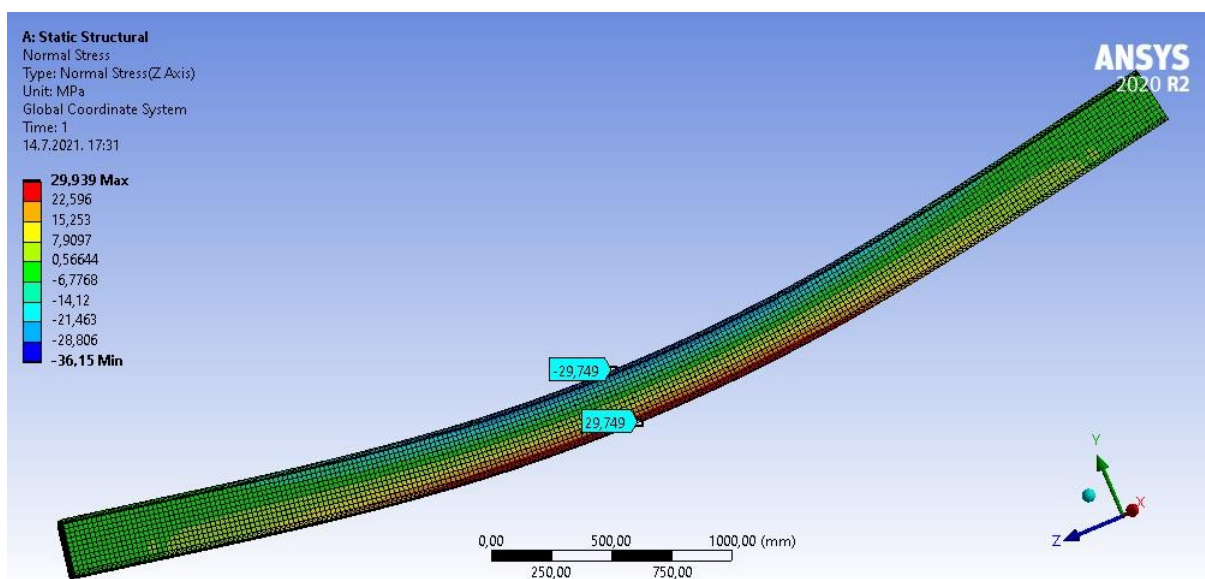


Slika 3.99 Grafički prikaz naprezanja s naznačenim najvećim iznosima naprezanja na gornjem i donjem rubu uzorka u sredini raspona



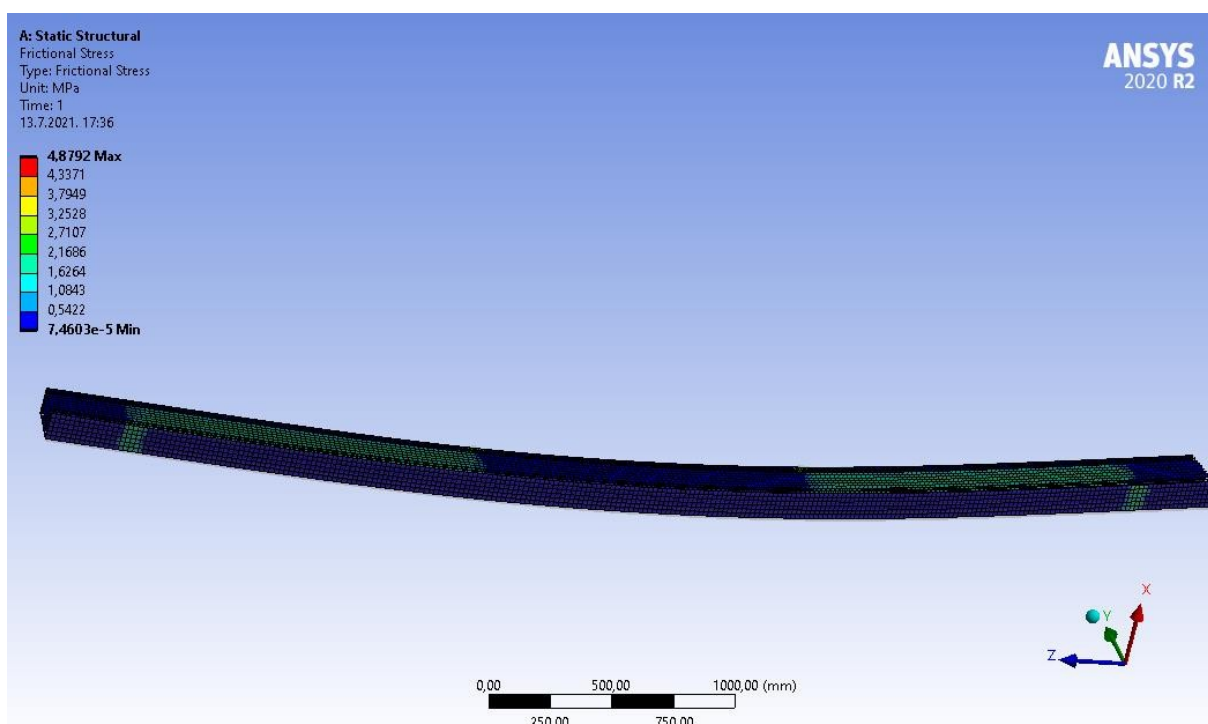
Slika 3.100 Grafički prikaz naprezanja uzorka savijanog oko jače osi s naznačenim iznosima naprezanja u spojnim ravninama lamela

Zatim su na slici 3.101 prikazana normalna naprezanja (eng. Normal Stress) kako bi se vidjelo koji je dio uzorka u tlaku, a koji u vlaku. Ovdje su plavom bojom i negativnim predznakom prikazana tlačna naprezanja, dok su crvenom bojom i pozitivnim predznakom prikazana vlačna naprezanja, a zelenom bojom područja u kojima je iznos naprezanja blizu nule.

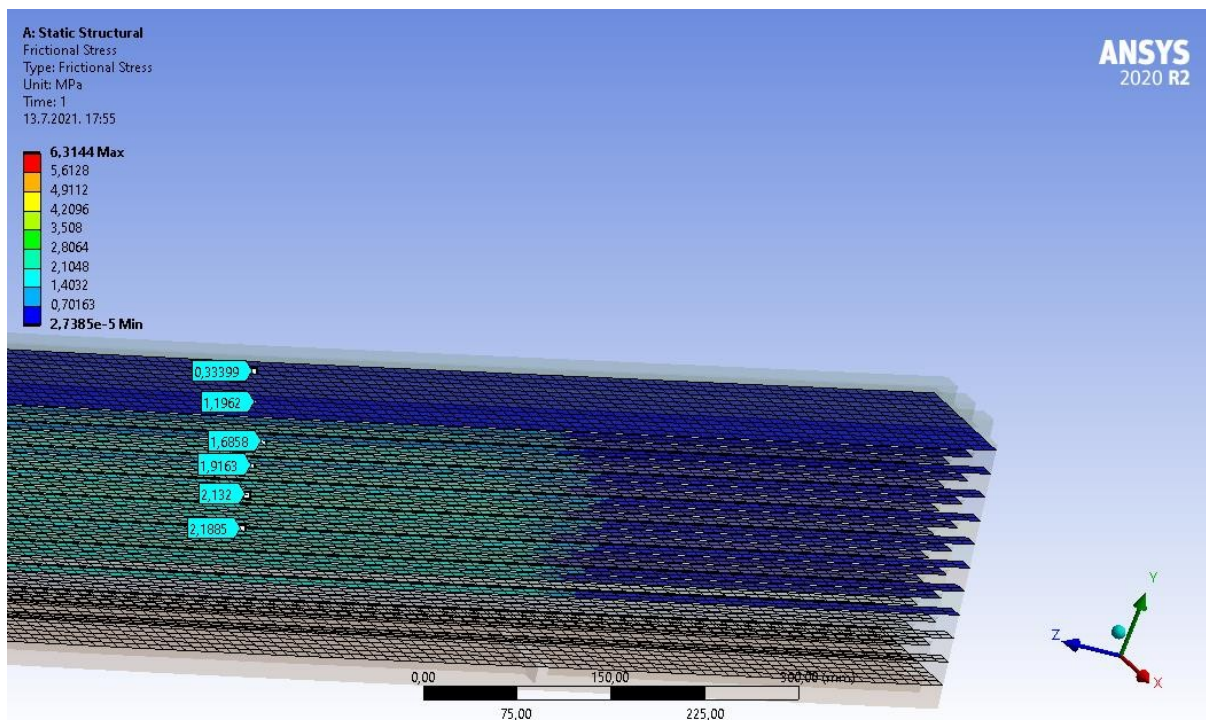


Slika 3.101 Normalna naprezanja uzorka savijanog oko jače osi

Osim navedenih napreznja prikazana su i posmična napreznja u dodirnoj ravnini dviju lamela, kako bi se vidjelo koliko napreznje prenosi ljepilo. Ova su napreznja prikazana pomoću opcije alata kontakata (eng. Contact Tool) u kojemu je kao tip odabrana sila trenja (eng Frictional Stress). Na slici 3.102 vidi se kako napreznja postoje samo u određenim dijelovima uzorka, upravo zato što posmična napreznja izravno ovise o vrijednosti poprečne sile, prema izrazu (3.23). Vidljivo je da se položaj zelene boje na slici 6.19 poklapa s područjima na slici 5.45 na kojima je poprečna sila različita od nule, dok se položaj plave boje poklapa s područjima na kojima je poprečna sila jednaka nuli. Na slici 3.103 prikazane su vrijednosti napreznja po dodirnim ploham lamela, kako bi se usporedile s onima dobivenim ručnim proračunom.

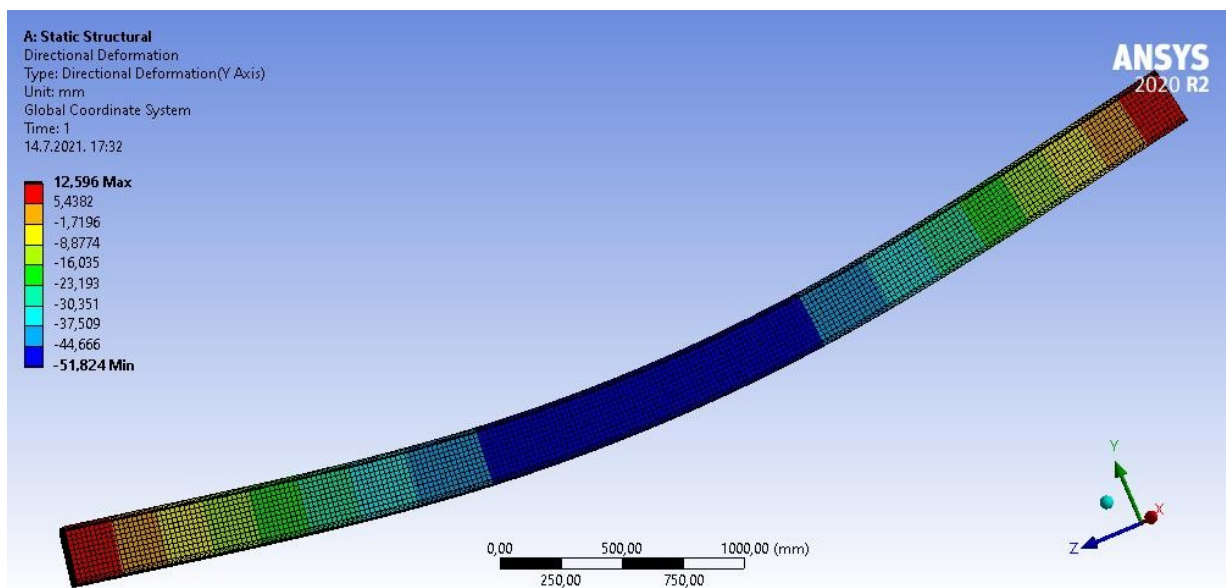


Slika 3.102 Prikaz položaja posmičnih napreznja duž uzorka



Slika 3.103 Vrijednosti posmičnih naprezanja na dodirnim ploham lamela

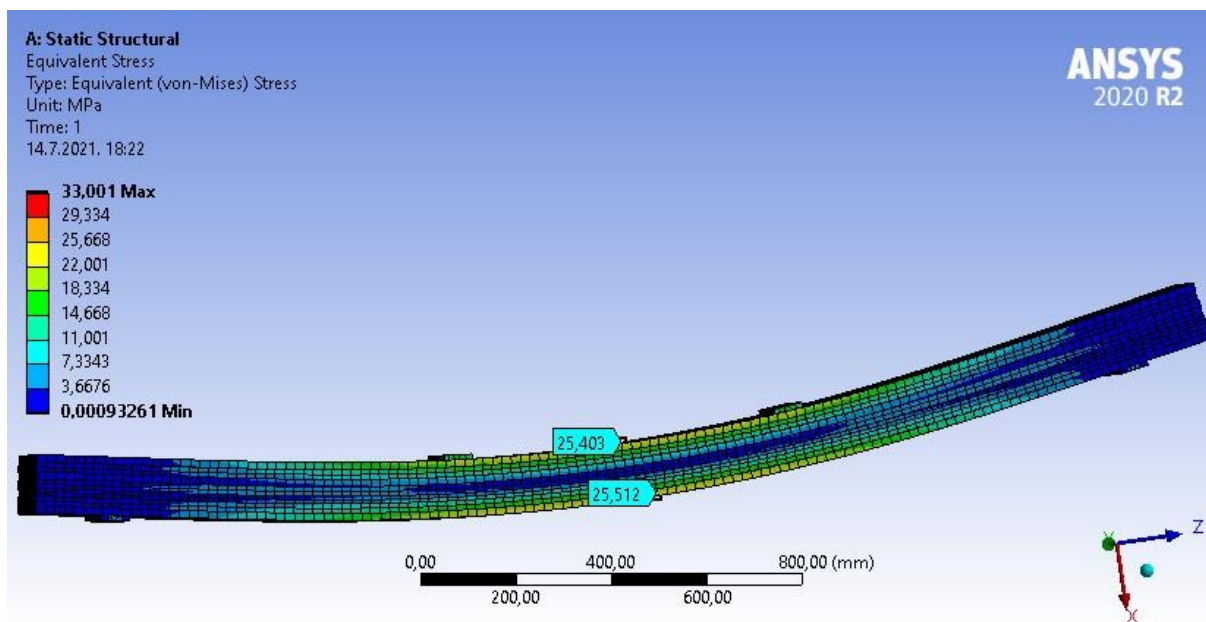
Konačno, prikazane su vrijednosti deformacije u smjeru vertikalne osi poprečnog presjeka, odnosno u smjeru opterećenja. Na slici 3.104 vidljivo je kako je najveći progib u sredini raspona uzorka, dok se rubovi pomiču prema gore, što se podudara sa statičkim sustavom proste grede s manjim prepustima na krajevima, opterećene dvjema koncentriranim silama u trećinama raspona.



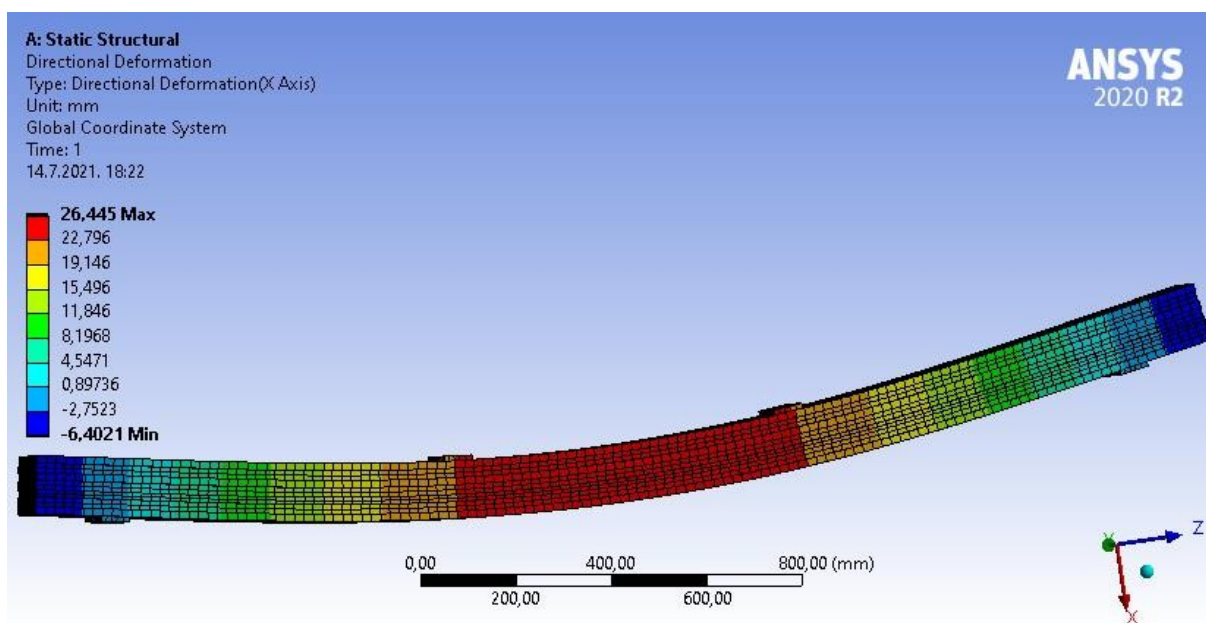
Slika 3.104 Prikaz deformiranog uzorka savijanog oko jače osi

3.6.5.2 Rezultati za uzorak savijan oko slabije osi

Kao i za uzorak savijan oko jače osi, prikazana su naprezanja (Slika 3.105). Ovdje je također maksimalna vrijednost naprezanja na području unosa sile, no prikazana su naprezanja u dvjema točkama, jednoj na tlačnoj strani uzorka te drugoj na vlačnoj strani. Plavom bojom obojana su područja u kojima je naprezanje jednako nuli. Na slici 3.106 prikazan je deformirani uzorak. Najveći su progibi u sredini raspona.



Slika 3.105 Grafički prikaz ekvivalentnih naprezanja uzorka savijanog oko slabije osi



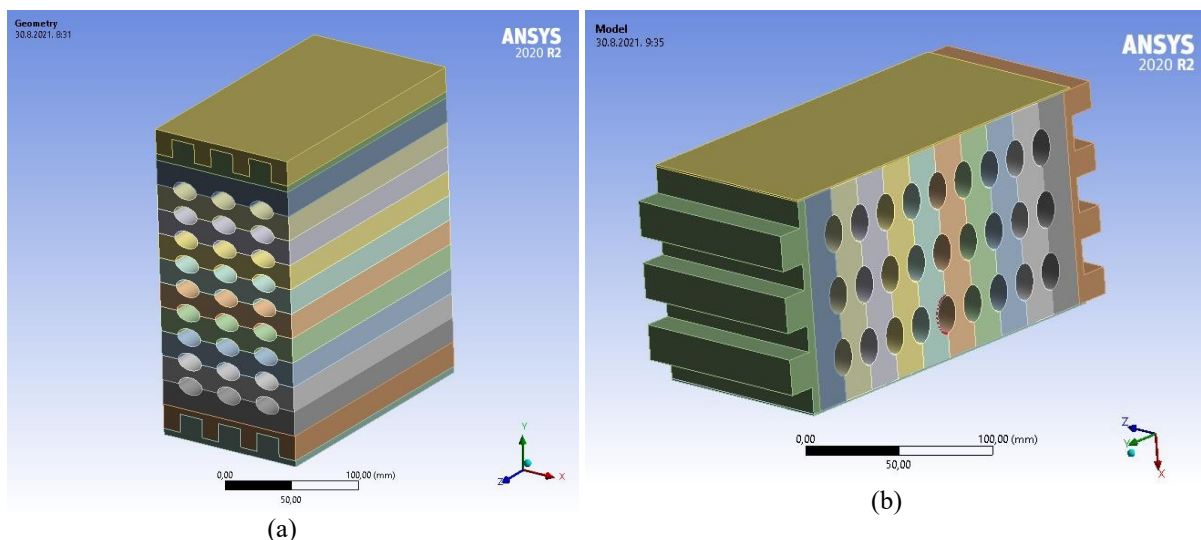
Slika 3.106 Grafički prikaz deformacije uzorka savijanog oko slabije osi

3.7 Numerički model uzorka opterećenog na tlak okomito na vlakanca

3.7.1 Geometrija i rubni uvjeti

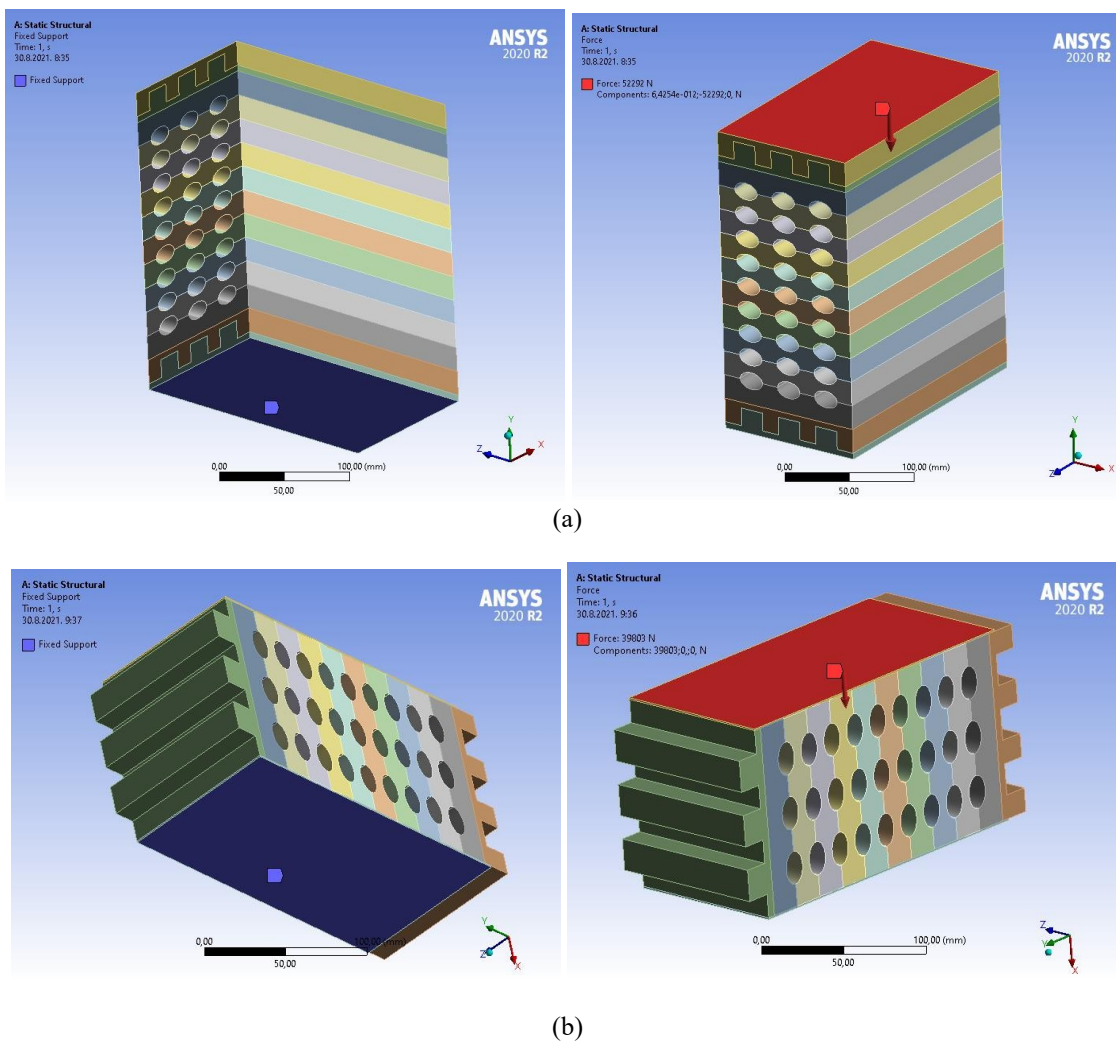
Kao što je prikazano u poglavlju 3.2, ispitivanje na tlak okomito na vlakanca vršeno je i u smjeru jače i u smjeru slabije osi poprečnog presjeka. Kao i za savijanje, kao reprezentativni uzorci za provjeru poklapanja ručnog proračuna s numeričkim modelom uzeti su oni koji su podnijeli najveće opterećenje, odnosno uzorak TE(0) - 2 za ispitivanje na tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi te uzorak TE(90) - 2 za ispitivanje na tlak okomito na vlakanca u smjeru jače osi.

Definicija materijala te osnovna geometrija poprečnog presjeka uzorka u ovom su slučaju jednaki, kao i za simulaciju savijanja greda. Razlika u geometriji, u odnosu na savijane uzorke, očituje se jedino u duljini lamela. Geometrija cijelog elementa u numeričkom modelu odgovara geometriji ispitivanih uzoraka, kako je objašnjeno u poglavlju 3.2. Na slici 3.107 prikazana je geometrija za ispitivanje na tlak okomito na vlakanca u smjeru obiju osi poprečnog presjeka.



Slika 3.107 Geometrija uzorka za ispitivanje na tlak okomito na vlakanca: (a) u smjeru slabije osi TE(0)-2; (b) u smjeru jače osi TE(90)-2

Na donjoj strani uzorka definiran je takav rubni uvjet da nisu dopušteni ni pomaci ni zaokret (eng. Fixed Support), dok je na gornjoj strani definirano opterećenje, što se vidi na slici 3.108.

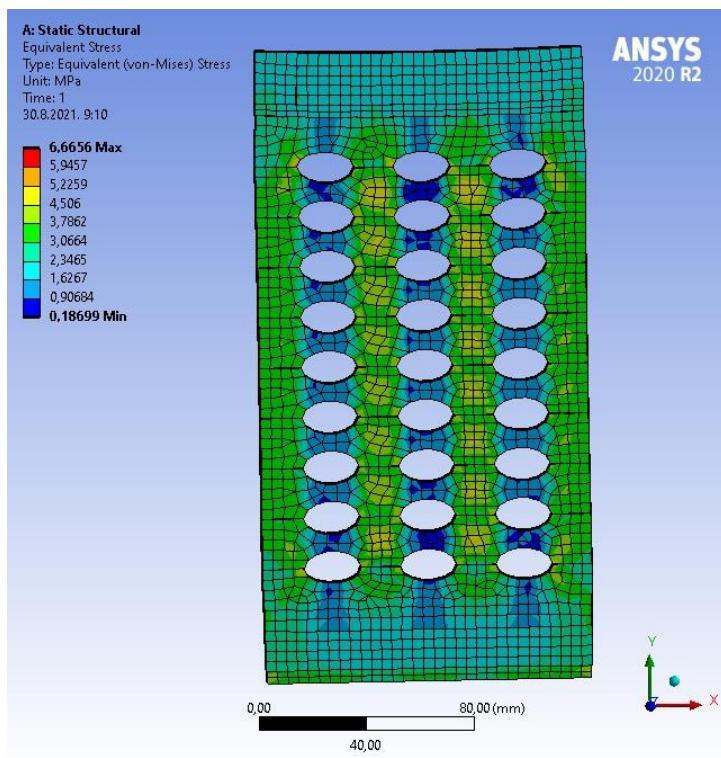


Slika 3.108 Rubni uvjeti i opterećenje za ispitivanje na tlak okomito na vlakanca: (a) i u smjeru slabije osi TE(0)-2; (b) u smjeru jače osi TE(90)-2; (c)

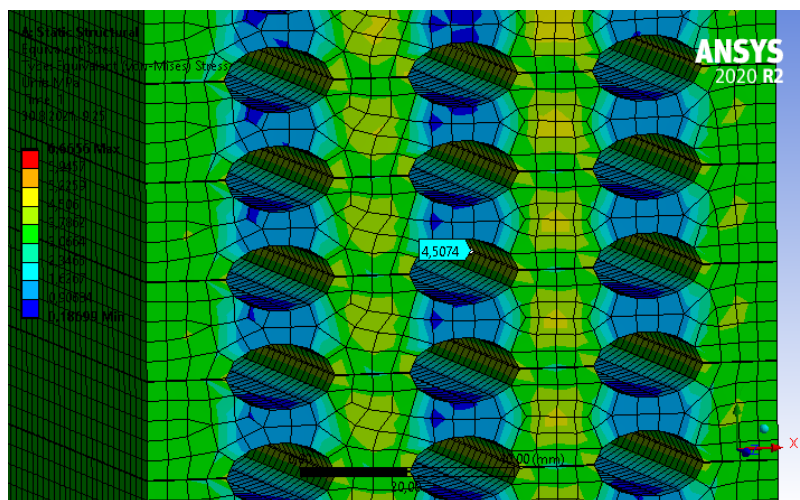
3.7.2 Rezultati

3.7.2.1 Tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

Na slici 3.109 prikazana je raspodjela napreznja za ispitivanje na tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi presjeka. Na slici se vidi kako je raspodjela napreznja sukladna raspodijeli napreznja dobivenoj u eksperimentalnom ispitivanju. Opterećenje se prenosi preko drva između šupljina.



(a)

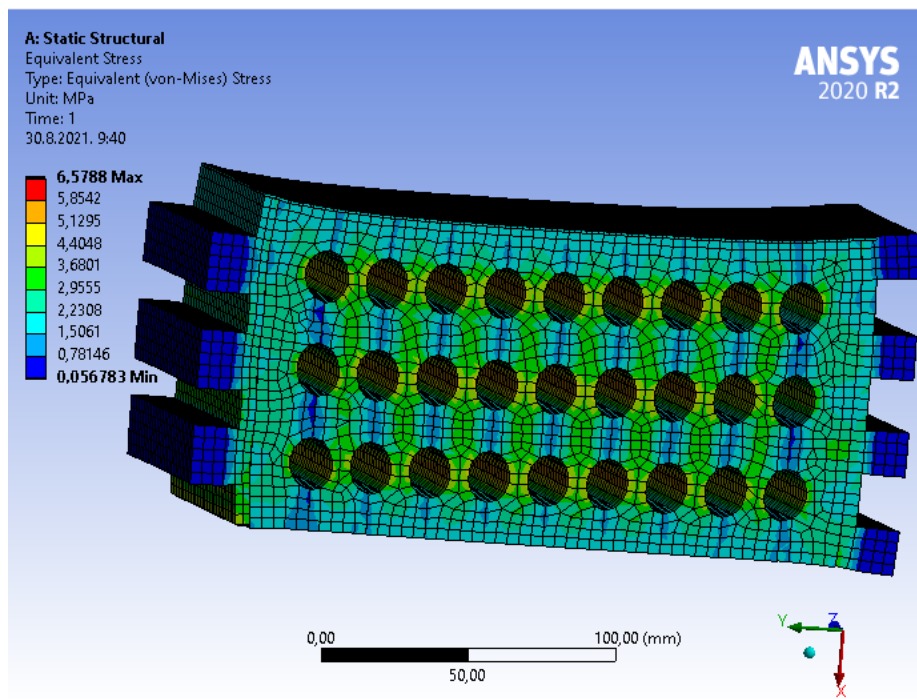


(b)

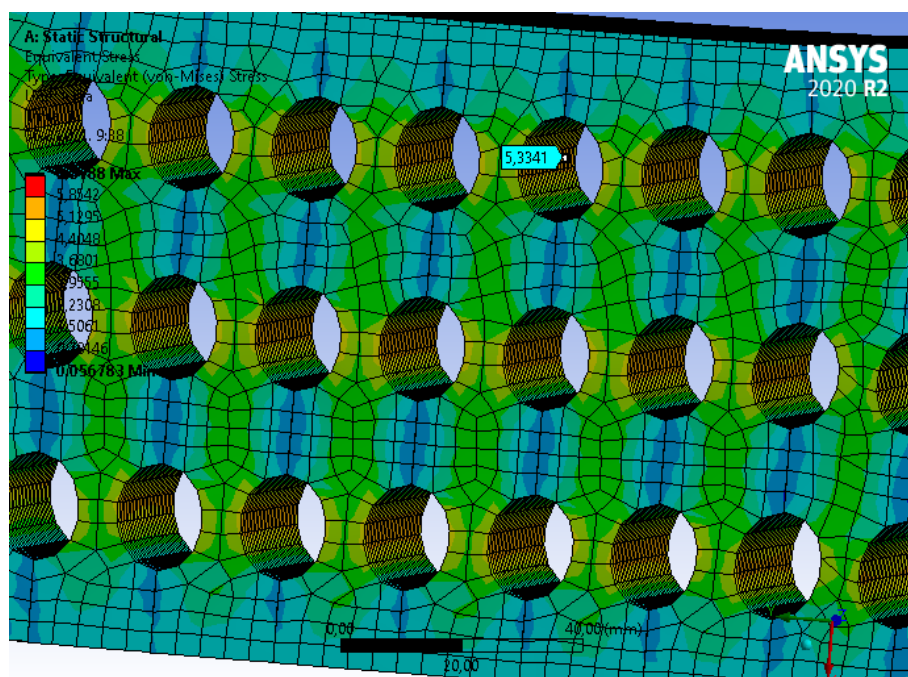
Slika 3.109 Prikaz napreznja prilikom opterećenja uzorka tlakom okomito na vlakanca u smjeru slabije osi: (a) opći prikaz; (b) iznos napreznja u maksimalno oslabljenom presjeku uzorka opterećenog na tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi elementa

3.7.2.2 Tlak okomito na vlakanca u smjeru slabije osi

Kao i u smjeru slabije osi, prilikom opterećenja uzorka u smjeru jače osi, vidi se kako se naprezanja prenose u područjima neoslabljenog dijela presjeka, odnosno između šupljina (Slika 3.110).



(a)



(b)

Slika 3.110 Prikaz naprezanja prilikom opterećenja uzorka tlakom okomito na vlakanca u smjeru jače osi: (a) opći prikaz; (b) iznos naprezanja u maksimalno oslabljenom presjeku uzorka opterećenog na tlak okomito na vlakanca u smjeru jače osi elementa

3.8 Usporedba rezultata ispitivanja, numeričkog proračuna i MKE

3.8.1 Savijanje uzoraka oko jače i oko slabije osi

U tablici 3.22 prikazane su vrijednosti normalnih napreznja za savijanje uzorka oko jače osi, na njegovom gornjem i donjem rubu te na svim spojnim ravninama (dodirnim plohamama lamela), koja su dobivena ručnim proračunom te modeliranjem u ANSYS-u. Prva spojna ravnina nalazi se između prve i druge lamele, druga spojna ravnina između druge i treće lamele i tako redom. Prema tablici 3.18 postoji razlika u napreznjima za prvu i drugu spojnu ravninu, kao i za desetu i jedanaestu, odnosno postoji skok u napreznjima između donjeg i gornjeg ruba lamela tih spojnih ravnina, kao na slici 3.78.

Tablica 3.22 Usporedba normalnih napreznja za savijanje uzorka oko jače osi

| Položaj rub uzorka/ spojna ravnina | Normalno napreznje (N/mm ²) | | Odstupanje (%) |
|--|--|-------|-------------------|
| | Ručni proračun | ANSYS | |
| gornji rub | 29.38 | 29.75 | 1.24 |
| 1 | 24.76 | 24.81 | 0.22 |
| 2 | 19.99 | 19.89 | 0.48 |
| 3 | 14.88 | 14.87 | 0.07 |
| 4 | 9.92 | 9.99 | 0.70 |
| 5 | 4.96 | 5.00 | 0.80 |
| 6 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| 7 | 4.96 | 5.00 | 0.80 |
| 8 | 9.92 | 9.99 | 0.70 |
| 9 | 14.88 | 14.87 | 0.07 |
| 10 | 19.99 | 19.89 | 0.48 |
| 11 | 24.76 | 24.81 | 0.22 |
| donji rub | 29.38 | 29.75 | 1.24 |

Vidljivo je kako napreznja vrlo malo odstupaju. Razlika je manja od 1.24 % u svim točkama, što ukazu na dobru korelaciju rezultata.

U tablici 3.23 prikazane su vrijednosti posmičnih napreznja u posmičnim ravninama uzorka, koja su dobivena ručnim proračunom te modeliranjem u ANSYS-u, za savijanje oko jače osi.

Tablica 3.23 Usporedba posmičnih naprezanja za savijanje uzorka oko jače osi

| Posmična ravnina | Posmično naprezanje (N/mm ²) | | Odstupanje (%) |
|------------------|--|-------|----------------|
| | Ručni proračun | ANSYS | |
| 1 | 0.23 | 0.33 | 30.30 |
| 2 | 1.06 | 1.20 | 11.67 |
| 3 | 1.42 | 1.69 | 15.98 |
| 4 | 1.68 | 1.91 | 12.04 |
| 5 | 1.83 | 2.13 | 14.08 |
| 6 | 1.88 | 2.19 | 14.16 |
| 7 | 1.83 | 2.13 | 14.08 |
| 8 | 1.68 | 1.91 | 12.04 |
| 9 | 1.42 | 1.69 | 15.98 |
| 10 | 1.06 | 1.20 | 11.67 |
| 11 | 0.23 | 0.33 | 30.30 |

U ovom je pak slučaju odstupanje veće. Kako se većinom proračunu ovih naprezanja ne pridaje tolika pažnja, detaljniji model, s kojim bi se postigla bolja poklapanja, ovdje neće biti razmatran. Naime, ukoliko tokom ispitivanja otkazivanje nastupi po lijepljenom spoju, veća će se pažnja posvetiti pripremi površine lijepljenja prilikom proizvodnje, a ljepilo će se odabrati na način da ima veću čvrstoću od drva od kojega je sastavljeni element napravljen.

U tablici 3.24 prikazane su vrijednosti normalnih naprezanja za savijanje uzorka oko slabije osi, na njegovom gornjem i donjem rubu, koja su dobivena ručnim proračunom te modeliranjem u ANSYS-u.

Tablica 3.24 Usporedba normalnih naprezanja za savijanje uzorka oko slabije osi

| Položaj | Normalno naprezanje (N/mm ²) | | Odstupanje (%) |
|------------|--|--------|----------------|
| | Ručni proračun | ANSYS | |
| Gornji rub | 25.35 | 25.403 | 0.21 |
| Donji rub | 25.35 | 25.512 | 0.63 |

I za sa savijanje uzorka oko slabije osi, razlika u naprezanjima između ručnog proračuna i modela u ANSYS-u jako je mala, manja od 1 %, što je vrlo dobro poklapanje rezultata.

3.8.2 Progib

U tablici 3.25 prikazane su vrijednosti progiba uzorka savijanog oko jače i oko slabije osi te vrijednosti progiba dobivenih ispitivanjem uzorka na preši.

Tablica 3.25 Usporedba deformacije ispitivanja i modela u ANSYS-u

| Os savijanja | Progib u sredini raspona (mm) | | Odstupanje (%) |
|--------------|-------------------------------|--------|----------------|
| | Ispitivanje | ANSYS | |
| Jača os | 50.266 | 51.824 | 3.01 |
| Slabija os | 26.013 | 26.445 | 1.63 |

Ponovo je odstupanje vrlo malo pa se može zaključiti da postoji dobra korelacija između rezultata dobivenih eksperimentom i rezultata dobivenih pomoću MKE.

Poglavlje 4. POŽARNI UVJETI - INOVATIVNI PROŠUPLJENI LIJEPLJENO LAMELIRANI DRVENI ELEMENTI

4.1 Uvod

4.1.1 Proračun drvenih konstrukcija u požarnim uvjetima

Prema EN 1995-1-2 [8] proračunom je potrebno dokazati da vrijedi:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (4.1)$$

gdje je:

$E_{d,fi}$ proračunski učinak djelovanja u požarnoj situaciji, određen u skladu s normom EN 1991-1-2 [8], uključujući učinke toplinskog širenja i deformiranja

$R_{d,fi}$ odgovarajuća proračunska otpornost u požarnoj situaciji.

Kako bi se odredio proračunski učinak djelovanja $E_{d,fi}$ koristi se sljedeći izraz:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (4.2)$$

gdje je:

η_{fi} faktor smanjenja odgovarajuće sile ili momenta savijanja za razinu proračunskog opterećenja u požarnom stanju

E_d proračunska vrijednost odgovarajuće sile ili momenta za proračun uz uobičajenu temperaturu za osnovnu kombinaciju djelovanja.

Kako bi se odredila proračunska vrijednost odgovarajuće sile ili momenta koristi se izvanredna proračunska situacija za koju EN 1990 [121] daje sljedeći izraz:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} " + "P" + "A_d" + "(\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1}" \quad (4.3)$$

$$+ " \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

gdje je:

E_d proračunska vrijednost učinka djelovanja

$G_{k,j}$ karakteristična vrijednost stalnog djelovanja

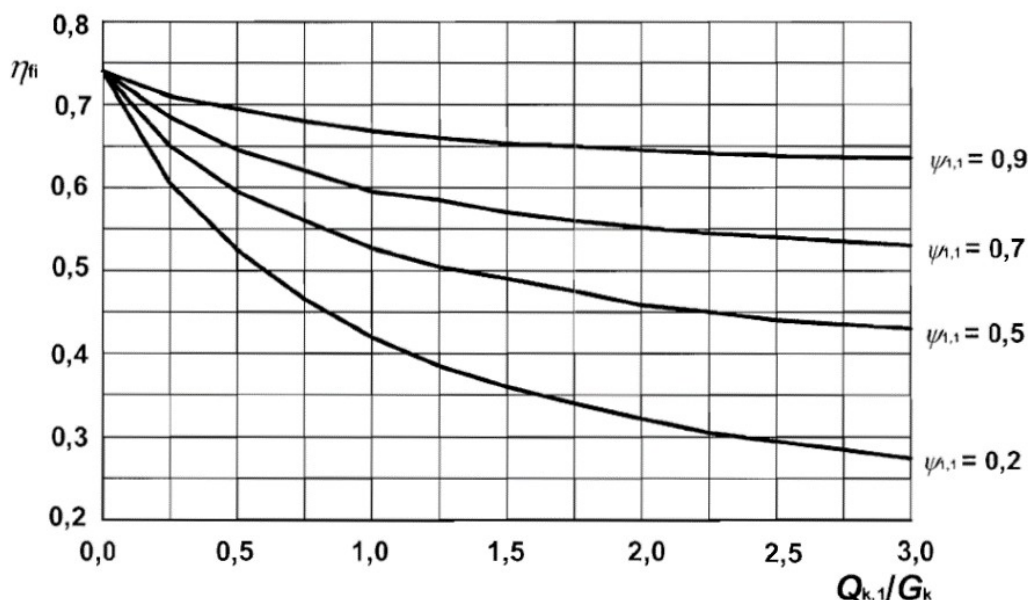
P reprezentativna vrijednost sile prednapinjanja

A_d proračunska vrijednost izvanrednog djelovanja (u slučaju požara predstavlja proračunsku vrijednost neizravnih učinaka toplinskog djelovanja)

- $Q_{k,1}$ karakteristična vrijednost vodećeg promjenjivog djelovanja
- $Q_{k,i}$ karakteristična vrijednost pratećih promjenjivih djelovanja
- $\psi_{1,1}$ faktor kombinacije za učestalu vrijednost
- $\psi_{2,i}$ faktor kombinacije za nazovistalnu vrijednost.

U ovoj se kombinaciji prema EN 1990 [121] u slučaju požara kao izvanredno djelovanje ne uzima niti jedno drugo izvanredno djelovanje, već samo požar.

EN 1995-1-2 [8] daje izraze za proračun faktora smanjenja η_{fi} , no pojednostavljeno se može očitati iz dijagrama prikazanog na slici 4.1 u ovisnosti o omjeru glavnog promjenjivog opterećenja $Q_{k,1}$ i stalnog opterećenja G_k za različite vrijednosti faktora kombinacije $\psi_{1,1}$.



Slika 4.1 Promjena faktora smanjenja η_{fi} ovisno o omjeru opterećenja $Q_{k,1}/G_k$ [8]

4.1.1.1 Proračunske vrijednosti karakteristika materijala

Kako se učinci djelovanja smanjuju u požarnoj situaciji, tako se reduciraju vrijednosti materijalnih karakteristika, odnosno u požaru se prema EN 1995-1-2 [8] koriste sljedeći izrazi:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.4)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.5)$$

gdje je:

$f_{d,fi}$ proračunska čvrstoća drva u požaru

| | |
|-----------------|--|
| $S_{d,fi}$ | proračunska vrijednost krutosti (modul elastičnosti ili modul posmika) |
| f_{20} | 20 % -tni fraktil čvrstoće pri normalnoj temperaturi |
| S_{20} | 20 % -tni fraktil krutosti (modul elastičnosti ili modul posmika) |
| $k_{mod,fi}$ | faktor modifikacije u požaru |
| $\gamma_{M,fi}$ | parcijalni faktor sigurnosti za drvo u požaru. |

20 % -tne fraktile čvrstoće i krutosti proračunavaju se na sljedeći način:

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_k \quad (4.6)$$

$$S_{20} = k_{fi} \cdot S_k \quad (4.7)$$

gdje je:

k_{fi} dan u tablici 4.1

Tablica 4.1 Vrijednosti faktora k_{fi}

| | k_{fi} |
|----------------------------|----------|
| Monolitno drvo | 1,25 |
| Lijepljeno lamelirano drvo | 1,15 |
| Paneli na osnovi drva | 1,15 |
| LVL | 1,1 |

4.1.1.2 Metoda reduciranog poprečnog presjeka

Na početku, važno je objasniti pojam dubine pougljenja d_{char} (Slika 4.2). Naime, prilikom požara se na površinama drva izloženim požaru javlja pougljeni sloj koji zapravo štiti unutrašnjost drveta od prolaska topline. Njegova debljina jest udaljenost od vanjskog ruba elementa prije požara do unutarnjeg ruba zdravog, neizgorenog drveta, nakon požara. Dubina pougljenja ovisi o tome je li element izložen požaru s jedne ili s više strana. Ako je element jednostrano izložen požaru, dubina pougljenja računa se na sljedeći način:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (4.8)$$

gdje je:

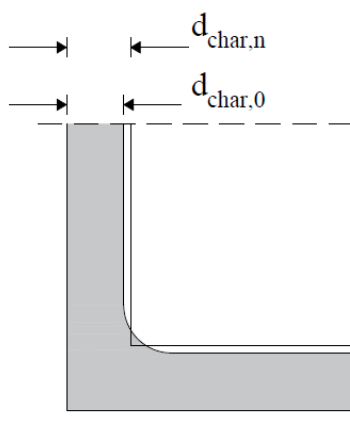
| | |
|--------------|--|
| $d_{char,0}$ | dubina pougljenja za jednostrani požar |
| β_0 | brzina sagorijevanja/pougljenja za jednostrani požar |
| t | vrijeme izloženosti požaru. |

Ako je element izložen požaru s više strana dubina pougljenja dodatno se povećava zbog učinka zaobljenja rubova i pukotina te se računa na sljedeći način:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (4.9)$$

gdje je:

- $d_{char,n}$ dubina pougljenja za višestrani požar
- β_n brzina sagorijevanja za višestrani požar koja uključuje učinak zaobljenja rubova i pukotine (vidi tablicu 4.2).



Slika 4.2 Debljina pougljenog sloja

EN 1995-1-2 [8] propisuje vrijednosti brzine sagorijevanja za najčešće korištene proizvode na bazi drva (vidi tablicu 4.2)

Tablica 4.2 Brzine sagorijevanja β_0 i β_n za drvo, LVL, drvene obloge i panele na bazi drva

| | β_0 (mm/min) | β_n (mm/min) |
|---|-----------------------|-----------------------|
| a) Meko drvo i bukva | | |
| Lijepljeno lamelirano drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ | 0.65 | 0.7 |
| Puno drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ | 0.65 | 0.8 |
| b) Tvrdo drvo | | |
| Puno ili lijepljeno lamelirano tvrdo drvo s karakterističnom gustoćom od 290 kg/m^3 | 0.65 | 0.7 |
| Puno ili lijepljeno lamelirano tvrdo drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ | 0.50 | 0.55 |
| c) LVL | | |
| drvo s karakterističnom gustoćom $\geq 480 \text{ kg/m}^3$ | 0.65 | 0.7 |
| d) Paneli | | |
| Drveni paneli | 0.9 ^a | - |
| Šperploča | 1.0 ^a | - |
| Paneli na bazi drva koji nisu šperploče | 0.9 ^a | - |

^a Vrijednosti koje se primjenjuju za karakterističnu gustoću od 450 kg/m^3 i panele debljine 20 mm: za ostale vrijednosti pogledati EN1995-1-2, poglavlje 3.4.2(9) [8]

Dakle, poprečni presjek pri požaru određuje se redukcijom njegovih početnih dimenzija za efektivnu dubinu pougljenja d_{ef} (Slika 4.3) koja je dana sljedećim izrazom:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (4.10)$$

gdje je:

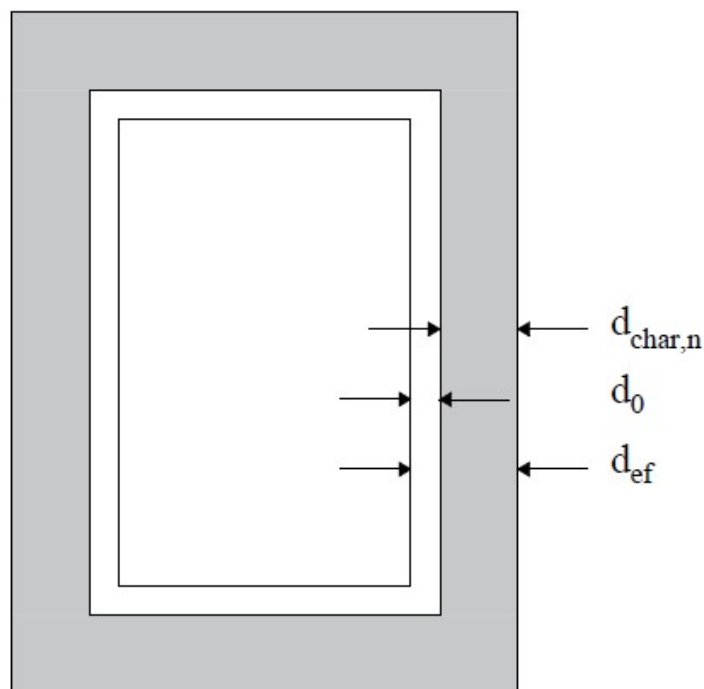
d_0 7 mm

k_0 faktor čije su vrijednosti dane u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Vrijednost faktora k_0

| | k_0 |
|-----------------|--------|
| $t < 20$ minuta | $t/20$ |
| $t > 20$ minuta | 1,0 |

Na vrijednost $d_{char,n}$ dodaje se debljina $k_0 \cdot d_0$ jer se smatra da je unutar nje vrijednost čvrstoće i krutosti jednaka nuli, dok su u unutarnjem dijelu vrijednosti nereducirane.



Slika 4.3 Prikaz efektivne širine pougljenja d_{ef}

4.1.1.3 Metoda reducirane čvrstoće i krutosti

Ova se metoda najčešće primjenjuje za pravokutne poprečne presjeke mekog drva izložene požaru s tri ili četiri strane te kružne poprečne presjeke izložene požaru duž cijelog opsega. Koristi se faktor modifikacije za požar $k_{mod,fi}$ za kojeg su definirani izrazi posebno za savojnu, tlačnu i vlačnu čvrstoću.

4.1.2 Odvajanje lamela i delaminacija

Važan korak u proizvodnji elemenata od lijepljeno lameliranog drveta (GLT i CLT) je slaganje i lijepljenje prethodno obrađenih lamela. Razmak između lamela potrebno je svesti na najmanju moguću mjeru kako bi se ispunili zahtjevi fizike građevine (vatrootpornost, zrakopropusnost i zvučna izolacija), estetike i tehnike spajanja ploča. Razdvajanjem lamela na dijelove i njihovim ponovnim spajanjem smanjuje se mogućnost nesavršenosti jer se smanjuje varijanca [122]. Kako bi se postiglo (ponovno) spajanje, tehnologija lijepljenja naširoko se koristi za drvene proizvode (EWP) [123].

Međutim, u mnogim tehničkim propisima, uključujući EN 16351 [124], dopušten je najveći razmak do 6 mm. U slučaju izrade CLT elementa bez razmaka, neki proizvođači prvo izrađuju pojedinačne slojeve CLT elementa lijepljenjem bočnih rubova lamela, nakon čega se tako izrađeni slojevi lijepe u konačni proizvod. Međutim, doprinos nanošenja ljepila na bočnim stranama lamela je upitan i u načelu se preporuča zanemarivanje ili u najboljem slučaju ograničenje samo na unutarnje slojeve elemenata.

Potrebno je analizirati ponašanje konstrukcije u ambijentnim uvjetima, ali i u uvjetima povišenih temperatura. Protupožarna sigurnost uvelike pridonosi cjelokupnom osjećaju sigurnosti, a ključni je parametar pri izboru građevinskog materijala. Mehaničko i požarno opterećenje, uz geometrijska i materijalna svojstva drvenih konstrukcija, imaju odlučujuću ulogu u teoretskom istraživanju požarne otpornosti drvenih elemenata. Čvrstoća drva određena je mnogim čimbenicima, kao što su sadržaj vlage, gustoća, nagib vlakana i prirodne nesavršenosti. Ponašanje EWP-a ovisi o kvaliteti ljepila i kvaliteti spoja s drvetom. U pravilu će u normalnim okolnostima brže doći do otkazivanja drveta nego samog ljepila [125]. U nosivim konstrukcijama, ljepila prenose velika statička i dinamička mehanička opterećenja. Prilikom požarnog opterećenja kojima bi lijepljeno lamelirano drvo moglo biti izloženo, u kombinaciji s drugim vanjskim opterećenjima, pitanje koje se postavlja odnosi se na reakciju ljepila u takvim uvjetima, odnosno utjecaj povišenih temperatura na ljepilo. Poznato je da dolazi do redukcije čvrstoće s porastom temperature [126].

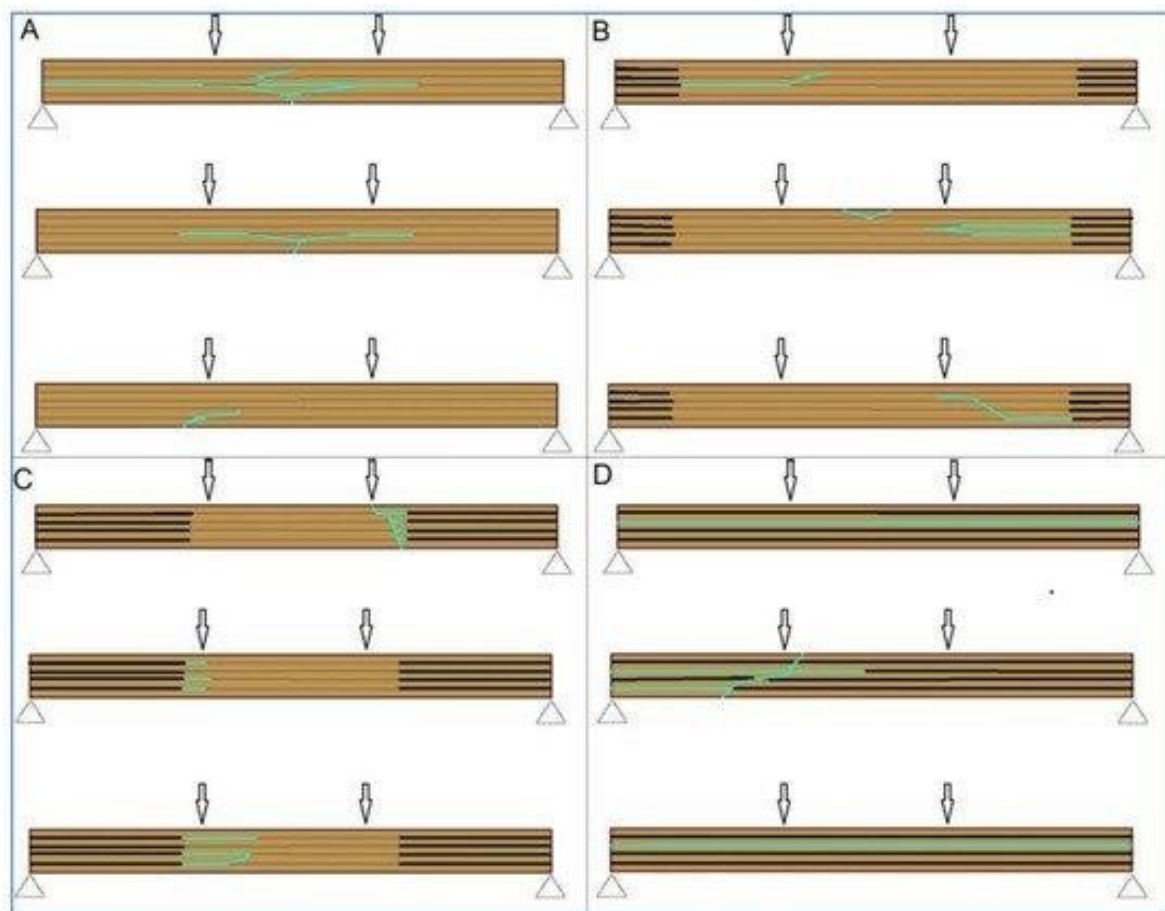
Do odvajanja lamela dolazi kada ljepilo prestane prianjati na drveni materijal [127]. Ako se to dogodi u slučaju požara, zajedno s opadanjem pougljenog sloja, osigurava se nova količina goriva, produžujući fazu raspadanja drva i odgađajući samogašenje [126]. Do odvajanja lamela dolazi ako su fizičke, kemijske ili mehaničke sile koje drže vezu na okupu, prekinute. Posebno zanimljiva pojava koja negativno utječe na ponašanje drva u slučaju požara je da prilikom delaminacije dolazi do otpadanja zaštitnog pougljenog sloja i drvo ponovno postaje

nezaštićeno. Drugim riječima, sloj samoizolacije je eliminiran. Uvidom u trenutno stanje područja vezano za ponašanje GLT i CLT elemenata u slučaju požara, može se zaključiti da se ponašanje lijepljeno lameliranih elemenata tijekom gorenja može uvelike razlikovati od ponašanja elemenata od punog drva [128]. Razlog leži u slojevitoj lijepljenoj strukturi i spojevima između slojeva, što može dovesti do lokalnog povećanja pougljenjivanja [16].

Postoji opća pretpostavka da na odvajanje lamela i brzinu pougljenja utječe ljepilo. Ako pougljeni sloj otpadne na liniji lijepljenja, konzervativni kriterij mogao bi biti da se otkazivanje dešava pri temperaturi od 300 °C jer se ne očekuje postojanje ugljenog sloja pri nižim temperaturama.

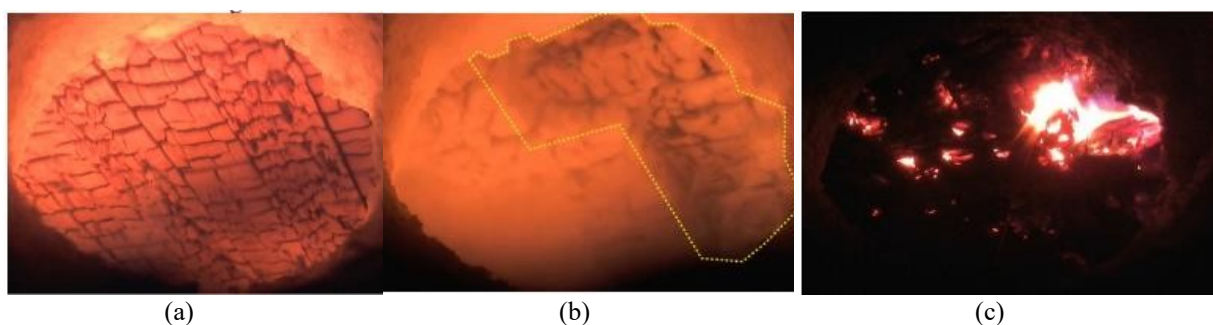
Sljedeći fenomen, koji je povezan s prethodnim, ali ga ipak treba razlikovati, jest delaminacija. Delaminacija je pojava u lameliranom materijalu, često kompozitu, koja dovodi do odvajanja konstituirajućih slojeva. Postoji nekoliko vrsta i manifestacija ove pojave, kao što je otkazivanje strukture ljepila, ili odvajanje ljepila od materijala koji se lijepi. U posljednjem slučaju, odvajanje lamele je ono što dovodi do delaminacije, što pomaže u ilustriranju razlike između odvajanja i delaminacije. Odvajanje je pojava kada dva materijala prestanu prijanjati jedan za drugi. Delaminacija je pojava kada se lamelirani materijal odvoji, izazvano lošom obradom tijekom proizvodnje, utjecaja prilikom uporabe ili na neki drugi način [127].

Na slici 4.4 prikazani su mogući načini otkazivanja, gdje plave linije predstavljaju linije otkazivanja, crne linije predstavljaju delaminaciju, a smeđe linije predstavljaju linije ljepila.



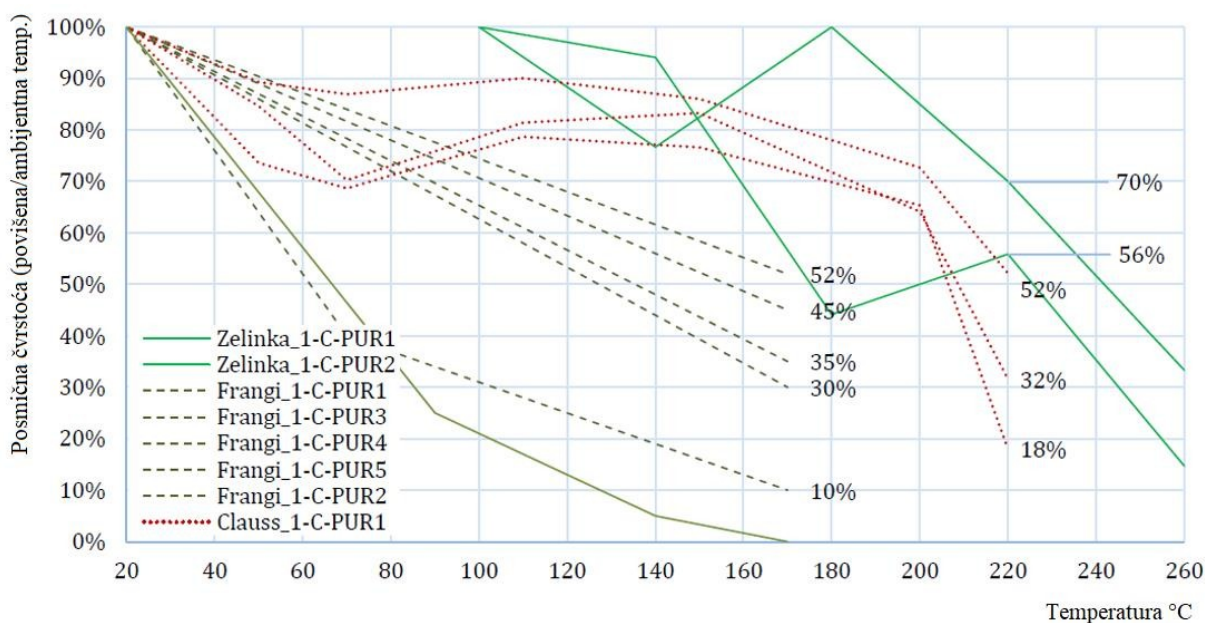
Slika 4.4 Mogući načini otkazivanja GL drvenih elemenata u požarnim uvjetima : (A) otkazivanje bez pojave delaminacije; (B) pojava delaminacije u okolini ležajeva; (C) djelomično razvijena delaminacija; (D) pojava delaminacije duž cijele grede

Vrsta i kvaliteta ljepila igraju važnu ulogu u sprječavanju ovih pojava, posebice tijekom požarnog opterećenja. Do delaminacije obično dolazi kada se na spoju dviju lamela postigne temperatura od 300 °C, što odgovara temperaturi pougljenja. EN 1995-1-2 [8] definira izoterme od 300 °C kao granicu između sloja pougljenog materijala i preostalog poprečnog presjeka. Ujedno, 300 °C je temperatura na kojoj drvo gubi svoja mehanička svojstva, stoga je istraživanje izoterme od 300 °C važno za definiranje preostale nosivosti drvenih elemenata nakon požara.



Slika 4.5 Delaminacija – PUR ljepilo: (a) inicijalna faza; (b) prva delaminacija; (c) druga delaminacija [129]

Ponašanje PUR ljepila ovisi o kemijskom sastavu, kao što je prikazano na slici 4.6. Zelinka i sur. [125] pokazali su da su rezultati ispitivanja ponašanja različitih vrsta ljepila u požaru raspršeni, nema trenda u opadanju čvrstoće, sve do 220 °C kada se uočava značajna redukcija čvrstoće ljepila.



Slika 4.6 Smanjenje posmične čvrstoće pri povišenim temperaturama za poliuretanska ljepila [130–133]

4.1.3 Ciljevi istraživanja

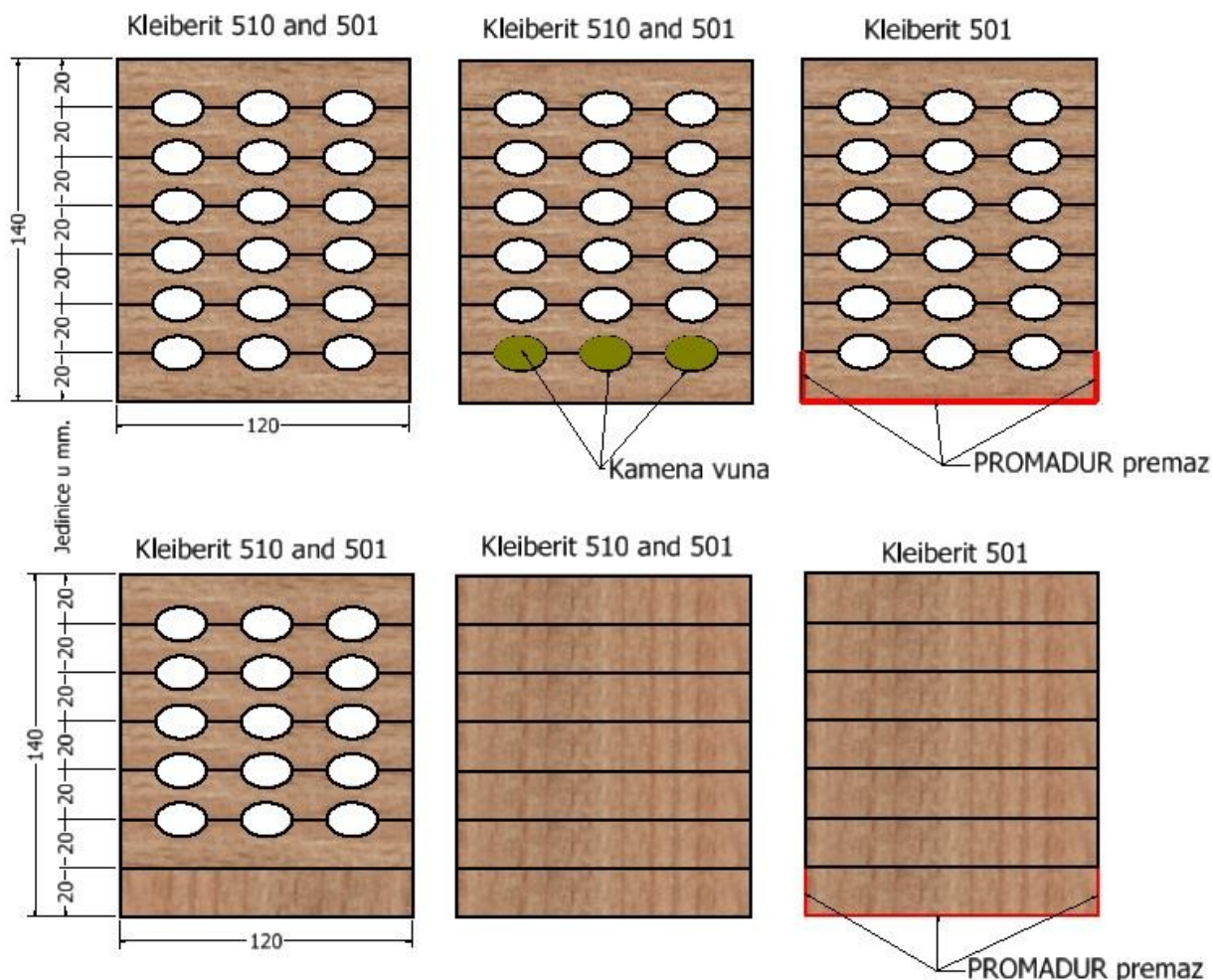
Glavni cilj ovog dijela istraživanja bio je procijeniti ponašanje inovativnih prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u požarnim uvjetima, te komparirati sa ponašanjem standardnih GL drvenih elemenata. Doprinos se ogleda u sljedećim točkama:

- definirati utjecaj ljepila na nosivost lijepljenih lameliranih prošupljenih drvenih elemenata;
- definirati utjecaj povišene temperature na ljepilo i nosivost lijepljenih lameliranih prošupljenih drvenih elemenata;
- istražiti utjecaj perforacije drvenih elemenata na razvoj temperature prema unutrašnjosti elementa;
- istražiti utjecaj reducirane površine lijepljenja kod prošupljenih drvenih elemenata na mogućnost pojave delaminacije;
- istražiti utjecaj pasivne protupožarne zaštite na požarnu otpornost lijepljenih lameliranih prošupljenih drvenih elemenata;
- uvođenje svih navedenih problema u obliku analitičkog ili numeričkog modela.

4.2 Eksperimentalno istraživanje u požarnim uvjetima – ispitivanje uzoraka izloženih požaru s jedne strane

4.2.1 Uvod i priprema uzoraka

Sukladno cilju istraživanja (utjecaj povišene temperature na prošupljene lijepljene drvene elemente), te zbog određenih ograničenja vezanih uz veličinu laboratorijske opreme (peći), uzorci su prilagođeni kako veličinom, tako i oblikom. Dimenzije poprečnog presjeka elemenata su 12×14 cm, a duljina 150 cm. Osim toga, prva i zadnja lamela (s utorima) su eliminirane radi jednostavnije primjene opterećenja na uzorke. S obzirom na cilj istraživanja, to nema utjecaj na konačne rezultate. Ukupno je ispitano 10 uzoraka, tj. 3 vrste uzoraka (puno, šuplje i samo prva puna lamela), s varijantama različitih protupožarnih sustava zaštita i ljepila između lamela (Slika 4.7).



Slika 4.7 Preliminarno ispitivanje - vrste uzoraka i ljepila

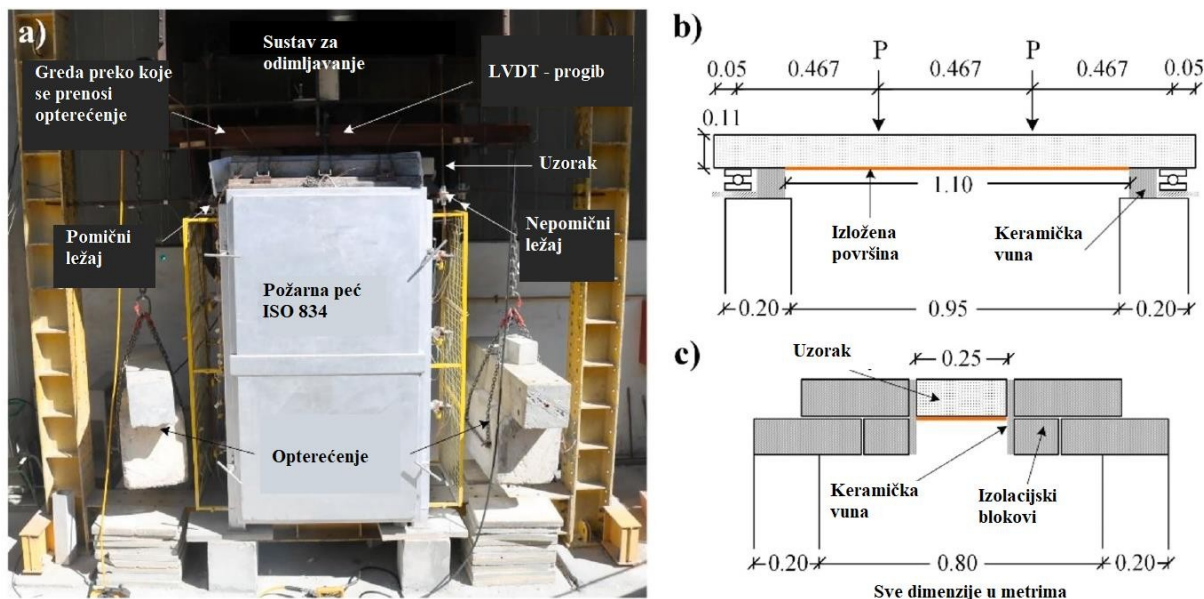
Maksimalni postotak prošupljenosti u odnosu na pune grede iznosi 25 %, a za uzorke sa prvom punom lamelom postotak prošupljenosti iznosi 21 %.

Pregled uzoraka može se vidjeti u tablici 4.4.

Tablica 4.4 Broj i vrsta uzoraka izloženih požaru s jedne strane

| Opis | Vrsta uzorka | Vrsta ljepila i broj uzoraka | $b \times h \times l$ (mm) | Razina opterećenja - $0.3 F_u$ (kN) | Požarna krivulja |
|-----------------------------------|--------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Puna greda | 1 | 1× Kleiberit 501 1× Kleiberit 510 | 120×140×1500 | 8 | ISO 834 |
| Prošupljena greda | 2 | 1× Kleiberit 501 1× Kleiberit 510 | 120×140×1500 | 5.6 | ISO 834 |
| Proušupljena sa kamenom vunom | 3 | 1× Kleiberit 501 1× Kleiberit 510 | 120×140×1500 | 5.6 | ISO 834 |
| Prošupljena s prvom punom lamelom | 4 | 1× Kleiberit 501 1× Kleiberit 510 | 120×140×1500 | 6 | ISO 834 |
| Prošupljena sa PROMADUR-om | 5 | 1× Kleiberit 501 | 120×140×1500 | 5.6 | ISO 834 |
| Puna sa PROMADUR-om | 6 | 1× Kleiberit 501 | 120×140×1500 | 8 | ISO 834 |

Na slici 4.8 prikazana je laboratorijska oprema i same postavke požarnog ispitivanja. Ispitivanja su provedena u peći srednje veličine, vanjskih dimenzija 2.10 m (visina) × 1.35 m (širina) × 1.20 m (dubina) i otvorom na vrhu, površine 0.95 m × 0.80 m (izložena površina). Greda je bila široka 0.12 m dok je preostali dio otvora peći obložen je negorivim sustavom toplinske izolacije (vidi sliku 4.8c), koji se sastoji od metalnih elemenata ispunjenih keramičkom vunom. Nadalje, dodatne trake od keramičke vune postavljene su u blizini ležajeva (vidi sliku 4.8b) i duž bočnih strana uzoraka. Kako bi se minimalizirao utjecaj konvekcije u prostoru iznad grede, uzorak je prekriven je nezapaljivom tkaninom. Grede su bile izravno izložene vatri na donjoj površini u duljini od 1.10 m, kao što je prikazano na slici 4.8b. Statički sustav je prosta greda koja se postavlja na vrh peći preko ležajeva (klizni i fiksni). Opterećenje je primijenjeno preko betonskih blokova koji su bili ovješeni, kao što je prikazano na slici 4.8a. Na ovaj način simulirano je savijanje grede u četiri točke, primjenom koncentriranih sila na trećinama raspona uzorka. Kombinirani sustav lanaca i hidrauličke dizalice korišten je za podizanje i potom polagano spuštanje betonskih blokova u željeni položaj. Na ovaj način, utjecaj vibracija sveden je na minimum.



Slika 4.8 Oprema za ispitivanje i pozicija uzoraka: (a) prikaz peći; (b) uzdužni pogled; (c) bočni pogled

Vrijeme požarne otpornosti može se procijeniti usporedbom stvarnog naprezanja prouzrokovanog savijanjem (u ambijentnim i požarnim uvjetima), koje ovisi o dimenzijama preostalog poprečnog presjeka u određenom trenutku:

$$I_{y.ef}(t) = \frac{(h - d_{ef}(t))^3 \cdot b}{12} \quad (4.11)$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{I_{y.ef}(t)} \cdot \frac{(h - d_{ef}(t))}{2} \leq f_{m.u.occ} \quad (4.12)$$

Vrijednosti za β_n , k_0 i d_0 preuzete su iz EN 1995-1-2, 2004 [8]:

$$\beta_n = 0.8 \frac{mm}{min}; \quad k_0 = 1; \quad d_0 = 7 \text{ mm} \quad (4.13)$$

Moment savijanja ovisi o razini opterećenja $m_{u.fi}$ i momentu tromosti poprečnog presjeka pri normalnoj temperaturi:

$$I_{y.20} = \frac{h^3 \cdot b}{12} \quad (4.14)$$

$$M_{Ed} = m_{u.fi} \cdot \frac{2 \cdot I_{y.20} \cdot f_{m.u.occ}}{h} \quad (4.15)$$

To znači da požarna otpornost ne ovisi o čvrstoći na savijanje, nego o razini opterećenja.

$$m_{u,fi} \leq \frac{(h - d_{ef}(t))^2 \cdot b}{h^2 \cdot b} = \frac{(h - d_{ef}(t))^2}{h^2} \quad (4.16)$$

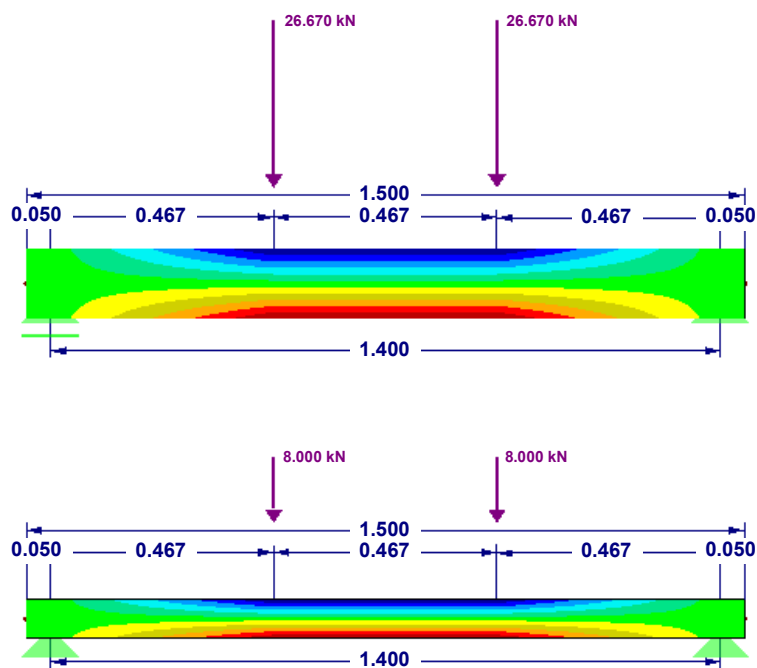
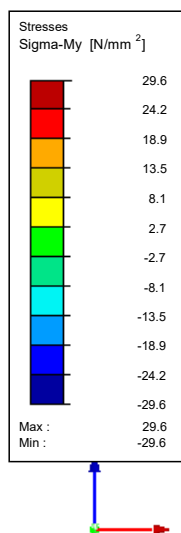
Razinu primijenjenog opterećenja potrebno je definirati prije požarnog ispitivanja. Dakle, vrijeme je jedina preostala nepoznanica u nejednadžbi (4.16), što znači da se može jednostavno izračunati za svaku razinu opterećenja. U ovom istraživanju razina opterećenja koja je primijenjena iznosila je 30 % vrijednosti sile loma pri ambijentnim uvjetima. Ako uzmemo u obzir vrijednosti za β_n , k_0 i d_0 prema [8], dobiju se sljedeće vrijednosti:

$$d_{ef}(t) = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 = 0.8 \cdot 65 + 1 \cdot 7 = 52 + 7 = 59 \text{ mm} \quad (4.17)$$

$$h - d_{ef}(t) = 140 - 59 = 81 \text{ mm} \quad (4.18)$$

Na slici 4.9 prikazano je vrijednosti normalnog naprezanja za razinu opterećenja $m_{u,fi} = 0.3$ za inicijalni (vidi sliku 4.9 gore) i preostali poprečni presjek (vidi sliku 4.9 dolje). Maksimalno naprezanje je jednako onom koje je prouzročila sila loma pri ispitivanju uzoraka u ambijentnim uvjetima.

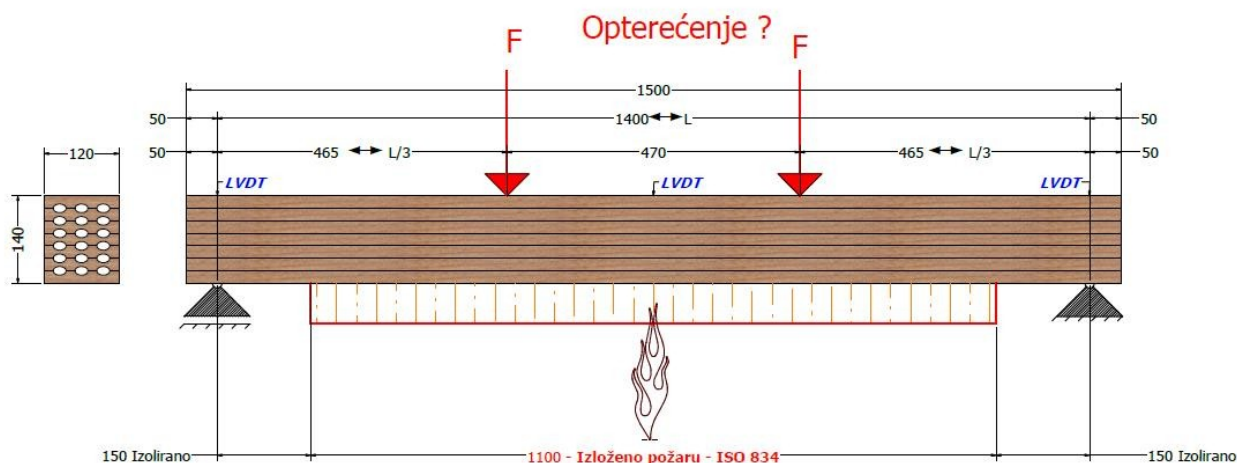
LC1 : stalno
Stresses Sigma-My



Max Sigma-My: 29.6, Min Sigma-My: -29.6 [N/mm²]
Filter Members: 9,11,13-15,19-23

ambijentnim uvjetima (ispod)

Opterećenje je određeno na temelju prijedloga istraživanja [134] da iznos opterećenja iznosi 30 % vrijednosti sile loma u ambijentnim uvjetima. Nadalje, razina opterećenja procijenjena je na temelju mjerenja deformacija dobivenih iz eksperimentalnog istraživanja uzoraka opterećenih savijanjem na sobnoj temperaturi, koji su provedeni u laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Iznos opterećenja za normalnu punu gredu određen je na 8 kN, a za elemente sa prošupljenim poprečnim presjekom 5.6 kN (Slika 4.10).



Slika 4.10 Požarno ispitivanje preliminarnih uzoraka – postavke ispitivanja

Četiri LVDT-a korištena su za mjerenje pomaka na polovici raspona uzorka, te na mjestu oslonaca. Unutar uzorka ugrađeno je ukupno 16 termoelemenata tipa K, u cilju praćenja razvoja temperature unutar drvenog elementa. Kako bi se dobio uvid u razvoj topline prema unutrašnjosti elementa, termoelementi su ugrađeni u polovici visine svake lamela, te na spoju dviju lamela, odnosno na liniji lijepljenja. Termoelementi su instalirani naknadno u drvene uzorke, a ne prilikom proizvodnje i lijepljenja lamela, kako bi se eliminirala mogućnost lošijeg međusobnog priranja lamela. Postupak ugrađivanja termoelemenata započeo je obradom (rezanje i spajanje) samih žica termoelemenata (vidi sliku 4.11a), zatim označavanjem pozicija termoelemenata, te konačno bušenjem rupa u drvenim uzorcima, promjera neznatno većeg od promjera žica termoelemenata, kako bi se reducirao utjecaj pogrešnog očitavanja temperature zraka koji se može pojaviti u prostoru između drva i termoelementa. Nakon umetanja termoelemenata (vidi sliku 4.11b), rupe su zapunjene vatrootpornim ljepilom i na taj način termoelementi su fiksirani i zaštićeni (vidi sliku 4.11c). Konačno, svaki termoelement je označen (vidi sliku 4.11d) u skladu s konfiguracijom sustava za prikupljanje podataka.



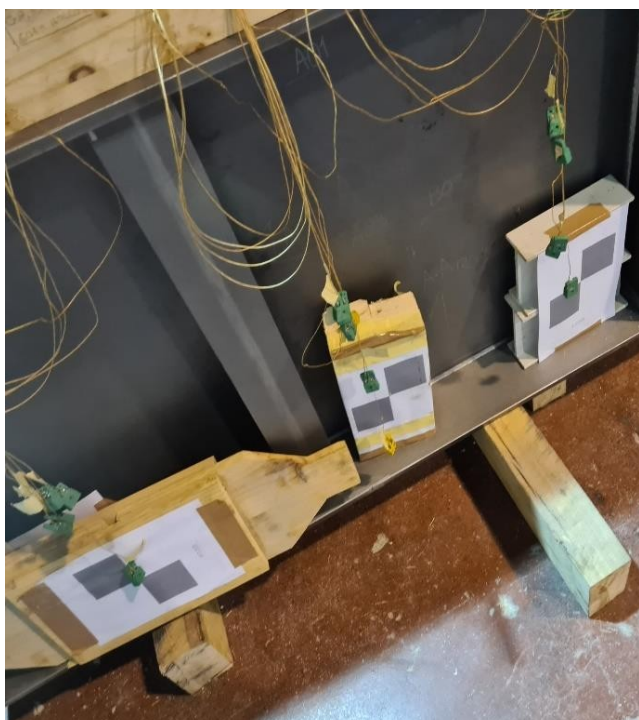
(a)



(b)



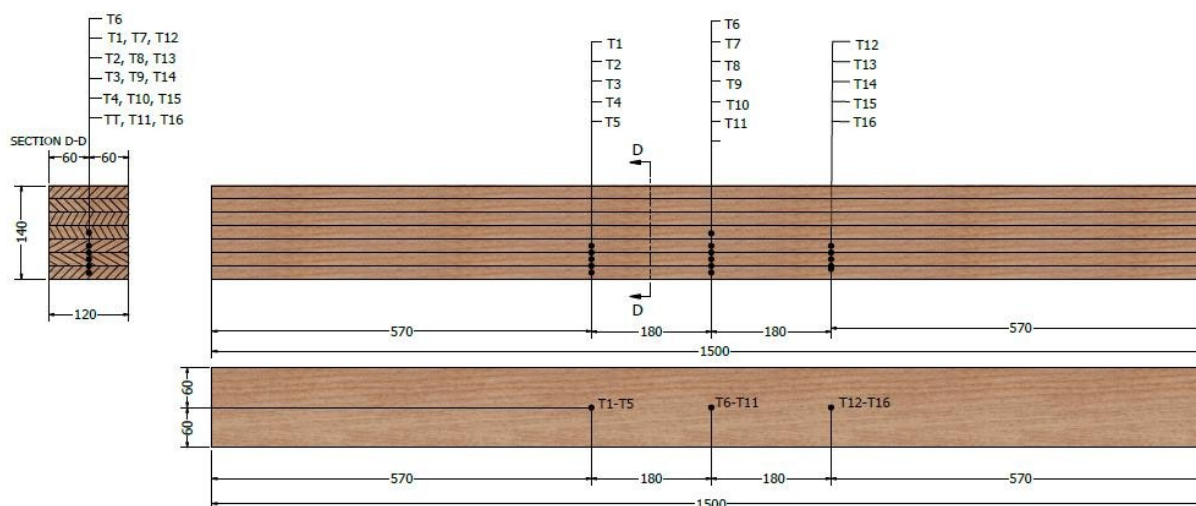
(c)



(d)

Slika 4.11 Postupak instalacije termoelemenata u drvene uzorke: (a) priprema i obrada termoelemenata; (b) označavanje pozicije i umetanje termoelemenata u drvene uzorke; (c) fiksiranje termoelemenata vatrootpornim ljepilom; (d) označavanje termoelemenata

Pozicija termoelemenata može se vidjeti na slici 4.12, gdje je prikazan raspored za punu gredu, ali su termoelementi analogno postavljeni u svim ostalim uzorcima.

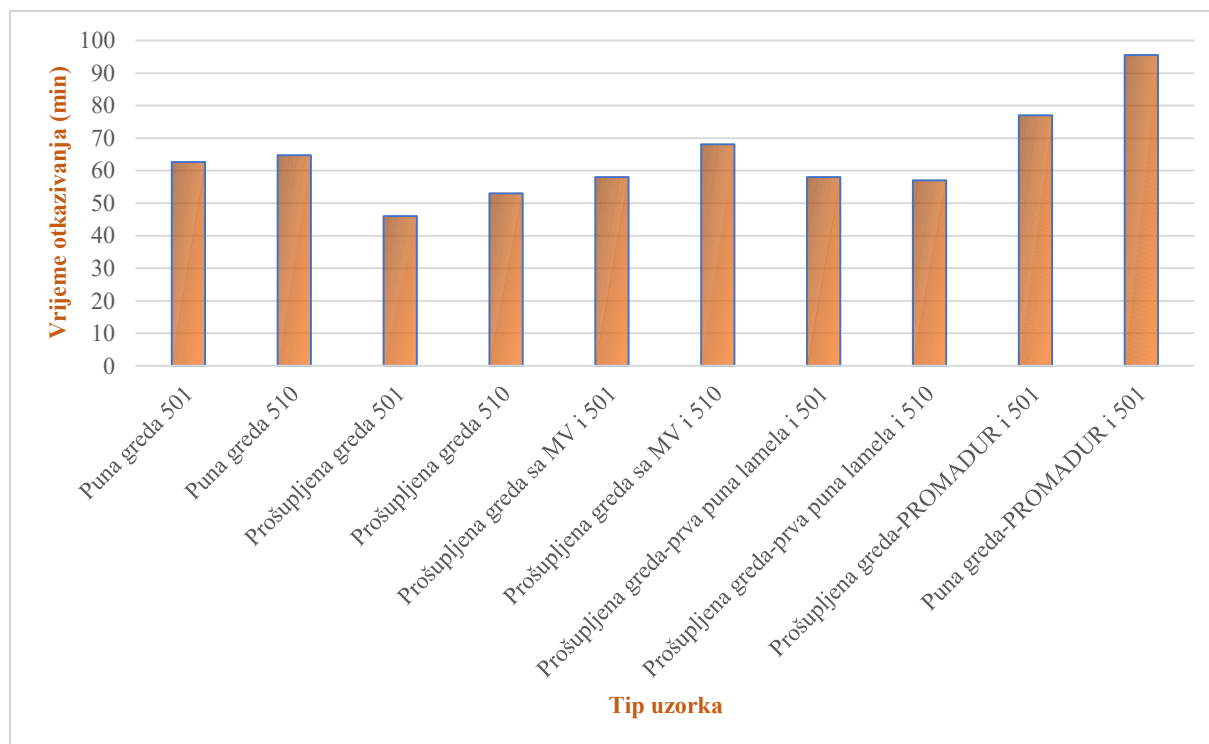


Slika 4.12 Pozicija termoelemenata u uzorcima izloženim požaru s jedne strane

Ispitivanja su započela primjenom vanjskog opterećenja, koje se održavalo konstantnim tijekom požarnog ispitivanja. Nakon 15 minuta, koliko je potrebno za postizanje stabilnosti deformacije uzorka, uzorci su izloženi požaru (požarna krivulja ISO 834) sve do sloma uzorka.

4.2.2 Rezultati ispitivanja uzoraka izloženih požaru s jedne strane

Prvi i glavni pokazatelj utjecaja različitih konfiguracija poprečnog presjeka uzorka, te protupožarne zaštite, je požarna otpornost uzorka, odnosno vrijeme otkazivanja uzorka. Na slici 4.13 prikazana je usporedba požarne otpornosti svih ispitanih uzoraka.



Slika 4.13 Usporedba vremena otkazivanja uzoraka

Osnovni, a ujedno i ekstremni tipovi uzoraka su uzorci s punim i prošupljenim poprečnim presjecima, koji su služili kao osnova za određivanja utjecaja različitih vrsta protupožarne zaštite, na konačno vrijeme otkazivanja, odnosno požarnu otpornost. Što se tiče punih uzoraka, vrijeme otkazivanja bilo je 63 minute za uzorke s ljepilom tip 501 (vidi sliku 4.14a), odnosno 65 minuta za uzorke s ljepilom 510 (vidi sliku 4.14b).



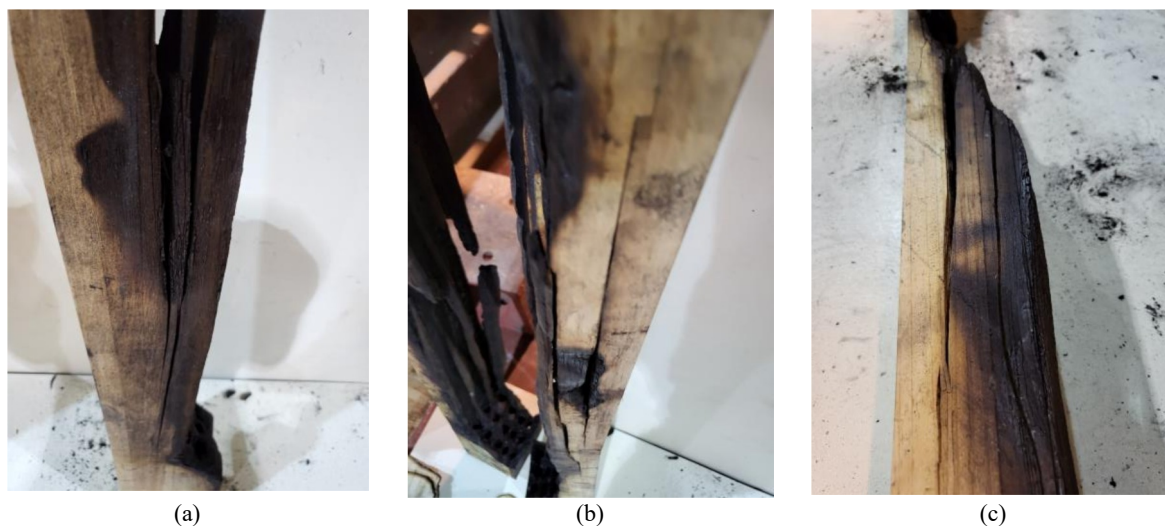
Slika 4.14 Uzorci pune grede; površine lijepljenja: (a) K. 501 ljepilo; (b) K. 510 ljepilo

Nadalje, do prekida ispitivanja uslijed kolapsa prošupljenih greda došlo je u 46. minuti (tip 501 ljepilo), odnosno 53. minuti (tip 510 ljepilo). Drugim riječima, požarna otpornost prošupljenih uzoraka u prosjeku je manja za 23 %. Kod svih uzoraka došlo je do sloma uslijed savijanja (vidi sliku 4.15), uslijed redukcije dimenzija poprečnog presjeka.



Slika 4.15 Modovi loma prošupljenih uzoraka

Kod prošupljenih uzoraka, uočena je pojava delaminacije (vidi sliku 4.16).



Slika 4.16 Odvajanje lamela i delaminacija (prošupljeni uzorci): (a) i (b) K.501; (c) K.510

Sljedeći korak bio je odrediti utjecaj kamene vune postavljene u prvi red šupljina (izložena strana) na ponašanje uzoraka. Vrijeme otkazivanja za uzorke sa kamenom vunom i ljepilom tipa 501 bilo je 58 minuta, odnosno 68 minuta za uzorke sa ljepilom tipa 510. Može se zaključiti da kamena vuna ima pozitivan utjecaj na požarnu otpornost prošupljenih uzoraka. Prvi razlog je taj da je kamena vuna negorivi materijal, čime se sprječava izravni doticaj požara

sa drvom, pa time i odgađa stvaranje pougljenog sloja. Uz to, nema slobodne cirkulacije zraka u šupljinama, koja pospješuje gorenje. Sve navedeno rezultiralo je povećanjem požarne otpornosti u prosjeku od 27 % u odnosu na nezaštićene prošupljene drvene elemente. Modovi loma prikazani su na slici 4.17.



Slika 4.17 Modovi loma prošupljene grede sa kamenom vunom: (a) K.501; (b) K.510

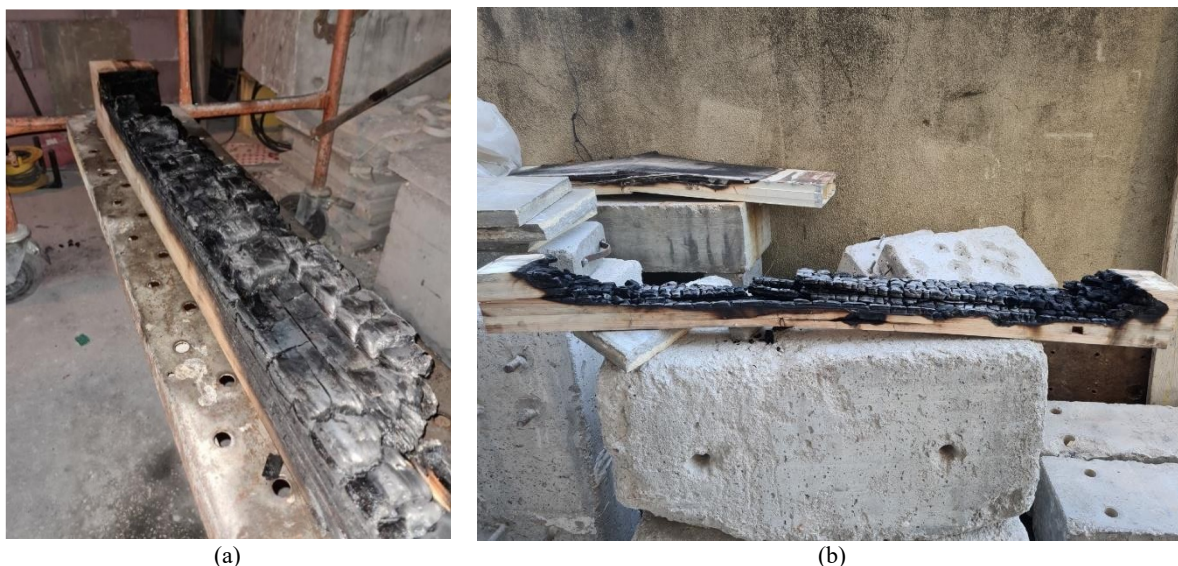
Kod nezaštićenih prošupljenih uzoraka uočila se pojava delaminacije, a jedan od načina za izbjeći delaminaciju je umetnuti prvu (izloženu požaru) deblju lamelu bez šupljina i na taj način povećati površinu lijepljenja. Rezultati (vidi sliku 4.13) ispitivanja ovog tipa uzoraka pokazuju da je na taj način ostvaren ima pozitivan utjecaj na požarnu otpornost uzoraka, jer se

vrijeme otkazivanja povećalo za 12 minuta za uzorke sa tipom ljepila K.501, odnosno 4 minute za uzorke s tipom ljepila K.510. Nadalje, mod loma je bio drugačiji, bez pojave delaminacije (vidi sliku 4.18)



Slika 4.18 Prošupljena greda sa prvom punom lamelom: (a) K501; (b) K.510

Zadnji tip uzoraka su puna i prošupljena greda zaštićene *PROMADUR* protupožarnim premazom. Ova vrste zaštite pokazala se kao najučinkovitija. Rezultati (vidi sliku 4.13) ispitivanja ukazuju na povećanje požarne otpornosti za 52 % (33 minute) u slučaju punog uzorka, odnosno 67 % (33 minute) kod prošupljenog uzorka. Modovi loma prikazani su na slici 4.19.



Slika 4.19 Modovi loma premazom zaštićenih greda: (a) puna greda; (b) prošupljena greda

Studija pokazuje da ponašanje lijepljeno lameliranih greda definiraju karakteristike samog ljepila kao i interakcija ljepilo-drvo. Različiti tipova ljepila (PUR) korišteni za spajanje lamela imaju utjecaj na požarnu otpornost lijepljenih lameliranih drvenih elemenata.

Uspoređujući normalne pune lijepljene uzorke sa prošupljenim uzorcima, može se uočiti razlika u modovima loma, prvenstveno zbog toga što se kod prošupljenih drvenih elemenata uočila pojava delaminacije. Prvo, razlog delaminacij je smanjena lijepljena površina zbog perforacije poprečnog presjeka elemenata. Nadalje, postojanje šupljina omogućuje veću cirkulaciju zraka (kisika) unutar elementa, a samim time potiče razvoj požara i porast temperature, pa je brzina sagorijevanja veća. Kada je u pitanju uzorak s izolacijom od kamene vune unutar šupljina, postoji pozitivan učinak na požarnu otpornost, budući da u šupljinama nema zraka, ali negorivi materijal zadržava prodor vatre prema površinama lijepljenja lamela.

Uzorci sa protupožarnim premazom pokazali su veliko poboljšanje u vidu odgode razvoja topline do linije lijepljenja i posljedično, delaminacije, i u konačnici, kolapsa.

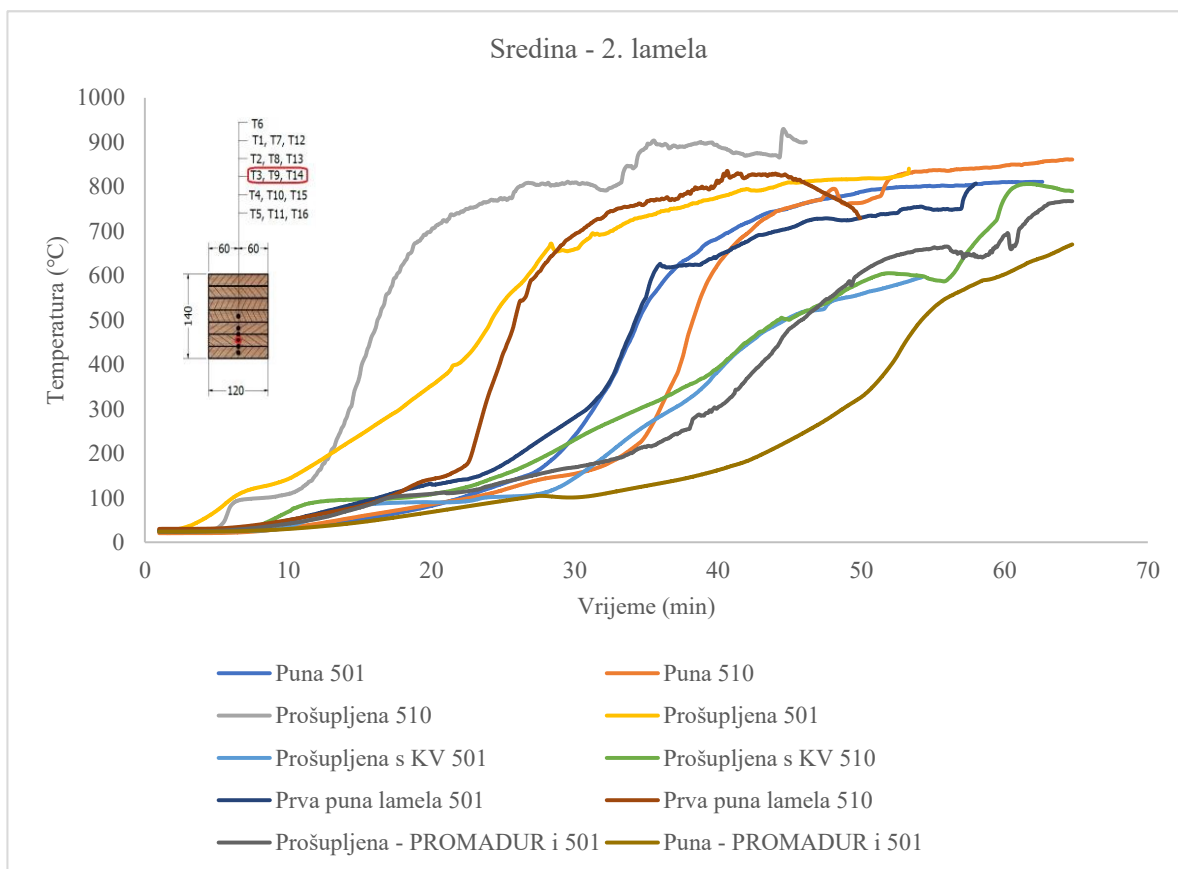
4.2.2.1 Usporedba razvijenih temperatura u uzorcima

Vrijeme do otkazivanja uzoraka je bitan parametar u procjeni ponašanja drvenih elemenata u požaru, no nije i jedini. U cilju poboljšanja i zaštite drvenih elemenata u uvjetima požara, bitno je razmotriti razvijene temperature u uzorcima tijekom vremena. Mjerno mjesto, odnosno termoelement postavljen u polovici visine druge lamele (odozdo), je prvi mogući pokazatelj razlike u temperaturama unutar uzoraka, jer je to mjesto koje se nalazi iza prve linije ljepila, ali i iza prvog prošupljenja.

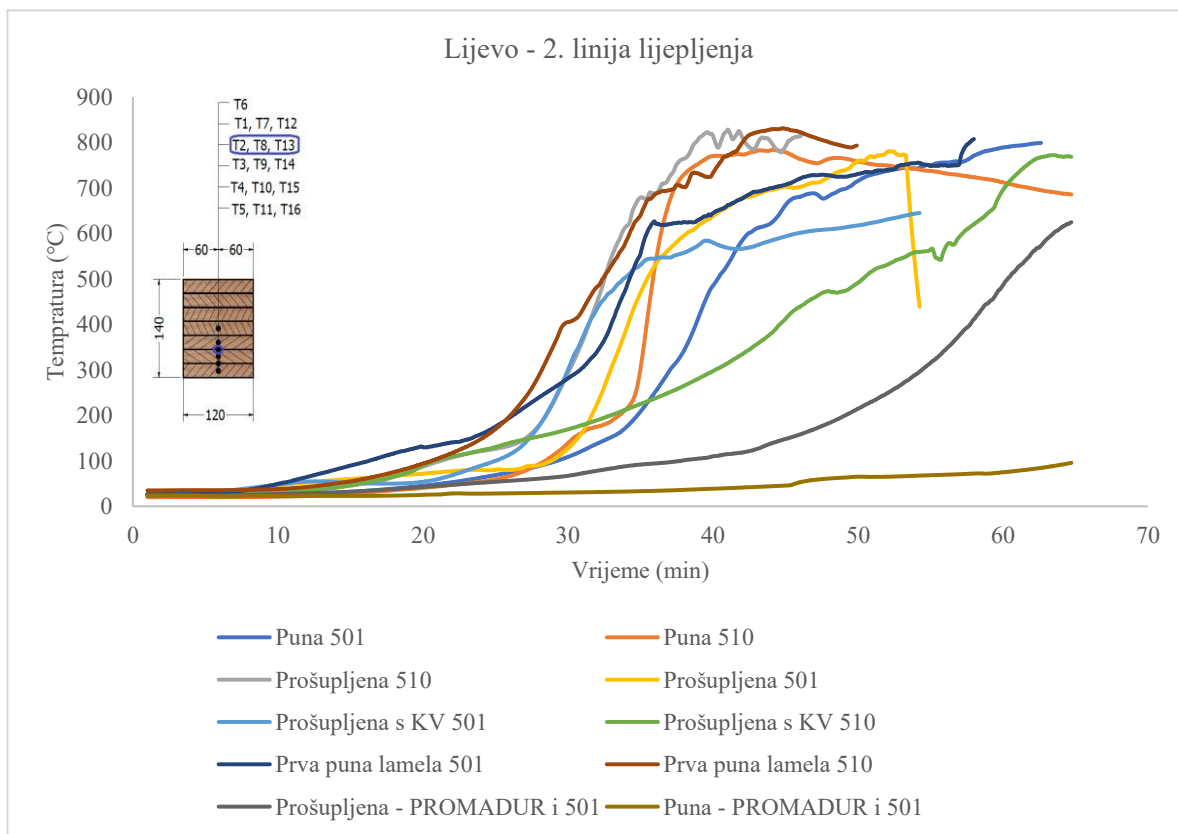
Na slici 4.20a, prikazana je usporedba razvijenih temperatura u sredini druge lamela, za sve uzorke. Temperatura se najbrže razvija u prošupljenim uzorcima, a zatim u prošupljenim uzorcima sa prvom punom lamelom. Nadalje, uočava se povoljan učinak kamene vune u prvom redu šupljina u vidu manje vrijednosti izmjerenih temperatura. Konačno, nasporniji razvoj temperature odvio se u uzorcima zaštićenim protupožarnim premazom.

Razvoj temperature na mjestu druge linije lijepljenja, prikazan je na slici 4.20b. Kod prošupljenih uzoraka, može se uočiti nagli porast temperature u određenom trenutku, što predstavlja trenutak kada je došlo do prodora plamena u prvi red šupljina. Slična pojava uočava se i kod uzoraka s prvom punom lamelom. Kod uzoraka sa kamenom vunom i ljepilom tipa K.501, došlo je do odvajanja vune od uzorka, dok kod uzorka sa ljepilom tipa K.510, to se nije dogodilo, što ukazuje na veću kvalitetu ljepila K.510. Razlika između premazom zaštićene prošupljene i pune grede uočava se sa porastom vremena izloženosti požarom, tj. kod prošupljenog uzorka vrijednosti temperature brže rastu.

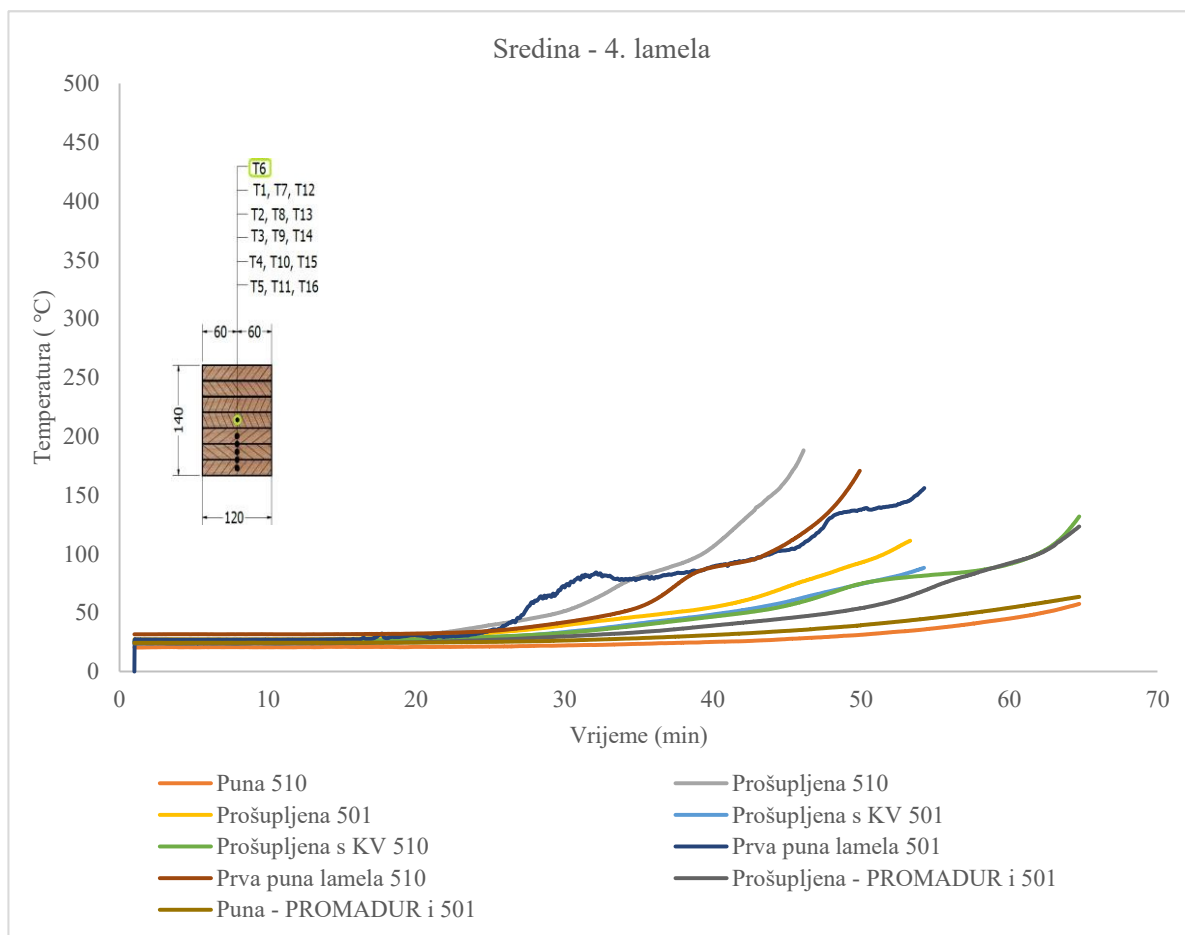
Termoelement postavljen u samom težištu presjeka, odnosno u sredini četvrte lamele ukazuje na prirodnu otpornost drva u požaru, gdje su razlike u temperaturama male za sve uzorke, a temperatura ne prelazi 200 °C ni u jednom uzorku (vidi sliku 4.20c).



(a)



(b)



(c)

Slika 4.20 Usporedba razvijenih temperatura : (a) 2.linija lijepljenja; (b) sredina 2. lamele; (c) sredina 4. lamele

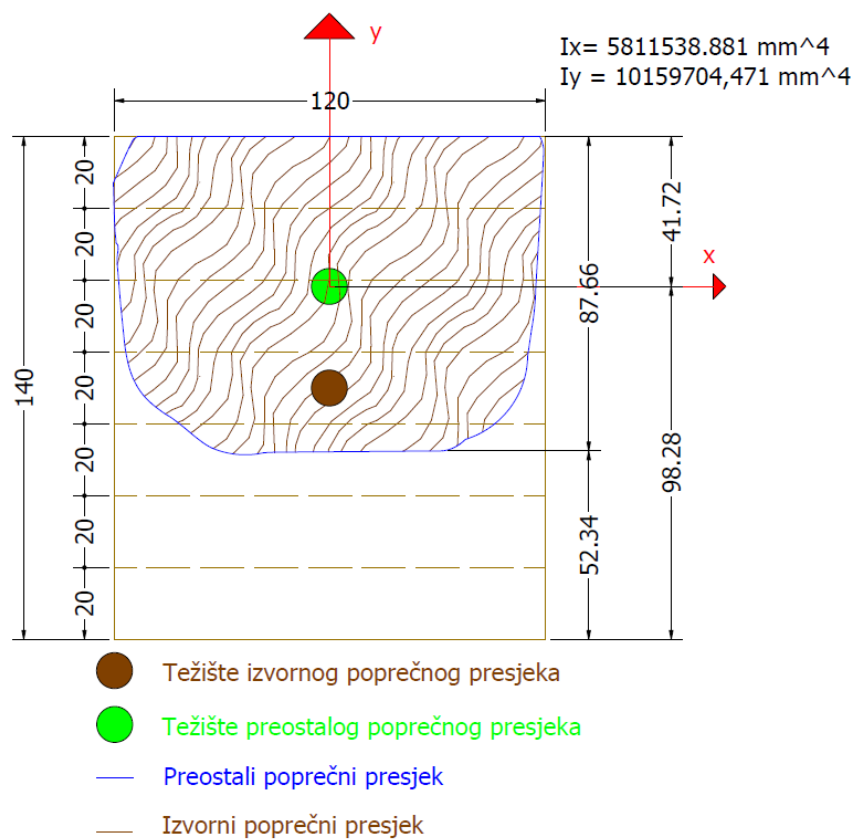
4.2.2.2 Analiza pougljenog sloja kod normalnih greda

Da bi se definirala požarna otpornost drvenih konstruktivnih elemenata, gubitak mase u zbog pougljenja drvenih površina, kao i smanjenje čvrstoće i krutosti u blizini pougljenjenog sloja zbog povišene temperature, moraju se uzeti u obzir. Za inicijalno nezaštićene drvene elemente tijekom izloženosti požaru, preostali presjek može se izračunati uz pretpostavku konstante brzine pougljenja u vremenu [135]. Osnovna vrijednost je jednodimenzionalnu brzinu pougljenja β_0 koja se obično uzima kao vrijednost opažana za jednodimenzionalni prijenos topline prilikom izlaganjem ISO 834 požarnoj krivulji. EN 1995-1-2 [8] propisuje vrijednost za $\beta_0 = 0.65$ mm/min za puno meko drvo što je potvrđeno u nekoliko istraživanja [136,137]. Kako bi se uzeli u obzir učinci rubova, zaobljenja i pukotina, te u svrhu pojednostavljenja proračuna geometrijskih karakteristika ekvivalentnog rezidualnog poprečnog presjeka (površina, moment tromosti, moment otpora) definira se brzina pougljenja veća od jednodimenzionalne brzine pougljenja. Brzina pougljenja uključujući ove učinke naziva se nominalna stopa pougljenja β_n prema EN 1995-1-2 [8], a za puno drvo (četinara) propisana vrijednost je $\beta_n = 0.8$ mm/min. Smanjenje čvrstoće i krutosti ovisno o temperaturi u blizini pougljenjenog sloja može se razmatrati na različite načine. EN 1995-1-2 [8], na primjer, daje dvije alternativne pojednostavljene metode: „Metoda reduciranog poprečnog presjeka“ i „Metoda reducirane čvrstoće i krutosti“. „Metoda reduciranog presjeka“ razmatra smanjenje čvrstoće i krutosti u blizini pougljenjenog sloja dodavanjem dodatne dubine $k_0 d_0$ na pougljeni sloj $d_{char,n}$, kao što je detaljno pojašnjeno u poglavlju 4.1.1. Ova metoda omogućuje korištenje čvrstoće i krutosti pri normalnoj temperaturi, ali za efektivni poprečni presjek drvenih elemenata. Stoga, uzima se redukcijski faktor ovisan o temperaturi kao $k_{mod,fi} = 1.0$ za efektivni poprečni presjek. Metoda reducirane čvrstoće i krutosti“ uzima u obzir utjecaj temperature na krutost i čvrstoće preostalog poprečnog presjeka pomoću redukcijskog koeficijenta koji je ovisan o temperaturi. Smanjenje vrijednosti čvrstoće i krutosti drveta dokazano je istraživanjima, ali ipak, metoda ne odražava u potpunosti fizikalno ponašanje drva u požarnim uvjetima [8]. Ova metoda je prikladna je za proračun greda i stupova izloženih požaru sa tri ili četiri strane, ali nije prikladna za pločaste elemente, izložene požaru samo s jedne strane [8].

Da bi odredili brzinu pougljenja osnovnih drvenih uzoraka (puni poprečni presjek), grede su nakon požarnog ispitivanja očišćene, te izrezane na manje dijelove, svakih 200 mm (u uzdužnom smjeru). Nakon označavanja izrezanih dijelova grede, svaki isječak je skeniran. Skenirane datoteke su potom obrađene i uvezene u CAD program u svrhu detaljne analize procesa pougljenja (vidi sliku 4.21).



(a)



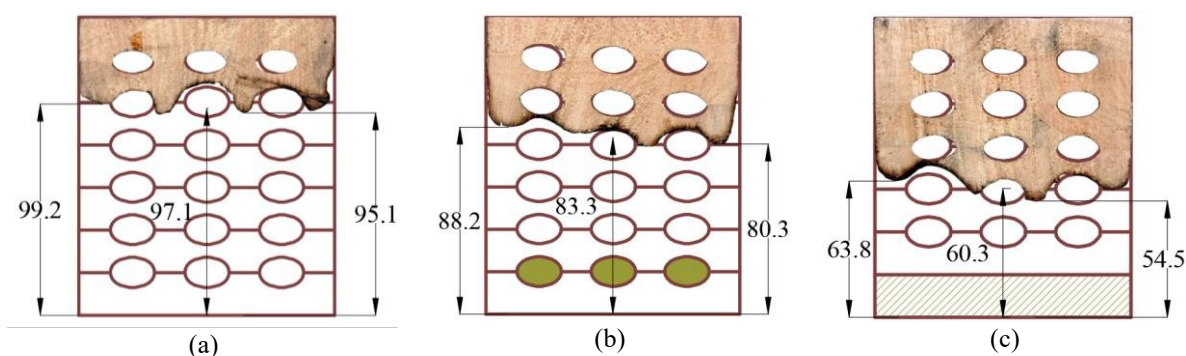
(b)

Slika 4.21 Preostali poprečni presjek pune GL grede nakon požarnog ispitivanja : (a) stvarni prikaz; (b) CAD verzija

Određena je jednodimenzionalna brzina pougljenja u vrijednosti od 0.8 mm/min za puni presjek, što odgovara vrijednostima propisan u EN 1995-1-2[8], odnosno tablici 4.2.

4.2.2.3 Analiza pougljenog sloja kod prošupljenih uzoraka

Dubina pougljenog sloja prošupljenih greda određena je na osnovu provedenih požarnih ispitivanja. Ispitani uzorci izrezani su na manje dijelove, svakih 200 mm (u uzdužnom smjeru). Nakon označavanja izrezanih dijelova, svaki isječak je skeniran. Skenirane datoteke su potom obrađene i uvezene u CAD program u svrhu detaljne analize procesa pougljenja. Na slici 4.22 su prikazani karakteristični preostali poprečni presjeci prošupljenih uzoraka nakon požarnog testa.



Slika 4.22 Preostali poprečni presjek prošupljenih drvenih uzoraka nakon 60 minuta izloženosti požaru: (a) prošupljena greda; (b) prošupljena greda sa kamenom vunom; (c) prošupljena greda s prvom punom lamelom

Ponašanje prošupljenih drvenih elemenata u požaru karakteriziraju različite faze pougljnjivanja. Nakon što je prvi puni sloj drva izložen požaru potpuno pougljenio i otpao, tanke vertikalne drvene stijenke prošupljenog elementa izložena su požaru s 3 strane, što dovodi do vrlo nepravilnih preostalih poprečnih presjeka s dubinom pougljenja većom nego kod normalnih drvenih elemenata. Na temelju eksperimentalnog i numeričkog parametarskog istraživanja razvijen je pojednostavljeni model proračuna požarne otpornosti prošupljenih drvenih elemenata. Predloženi model proračuna zasniva se metodi reduciranog poprečnog presjeka i uzima u obzir tri različite faze pougljenja.

Eksperimentalno istraživanje prošupljenih drvenih elemenata izloženih požaru s jedne strane, provedeno je na Institutu Superior Tecnico u Lisabonu. Istraživački rad bio je usmjeren na povećanje eksperimentalne pozadine prošupljenih drvenih elemenata koja bi omogućila razvoj pojednostavljenog modela proračuna za ovakve elemente. Nadalje, analizirani su različiti sustavi protupožarne zaštite, korištenih u cilju poboljšanja ponašanja prošupljenih drvenih elemenata u požaru. U nastavku ovog poglavlja diskutira se o pojednostavljenom modelu proračuna, a zatim uspoređuju rezultati ispitivanja s rezultatima dobivenih proračunskim modelom.

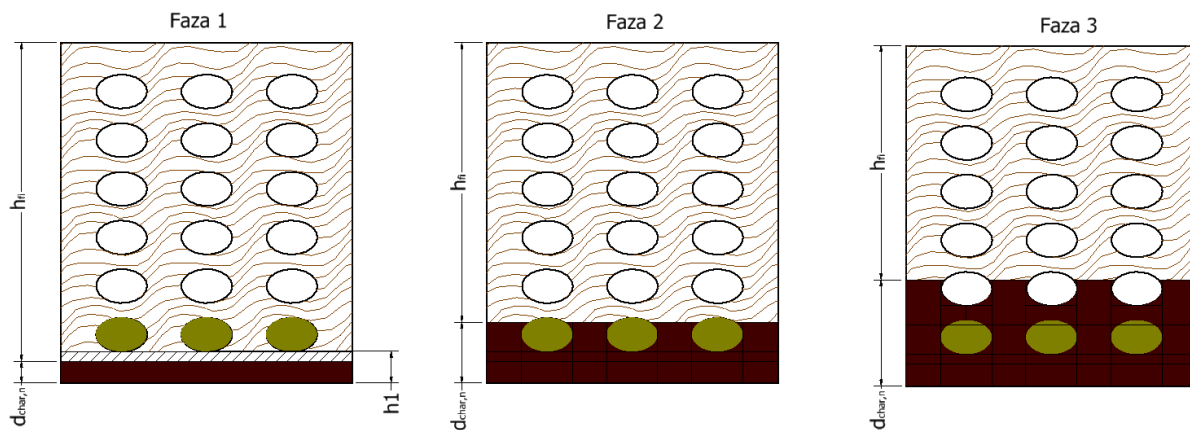
U radu su provedena požarna ispitivanja prošupljenih drvenih elemenata i pokazano je da ponašanje uglavnom karakteriziraju tri različite faze pougljenja. Prva faza odnosi se na ponašanje prošupljenih drvenih elemenata dok prvi izloženi puni sloj još nije potpuno izgorio, dok se druga faza događa kada vatra dospije do šupljina u kojima je izolacija, i konačno treća faza kada požar dođe do šupljina u kojima nema izolacije. Prije nego što prvi sloj drva izložen požaru potpuno pougljeni, uzorak je izložen požaru samo s jedne strane i jednodimenzionalnom pougljenju, kao i kod normalnih punih drvenih uzoraka. Nakon što prvi sloj drva izložen požaru potpuno pougljeni i počinje otpadati, tanke vertikalne drvene stijenke su izložene požaru s tri strane, što dovodi do vrlo nepravilnog preostalog poprečnog presjeka s dubinom pougljenja većom nego kod normalnih drvenih elemenata gdje je pougljeni sloj zaštita preostalog poprečnog presjeka drva.

Sa gledišta požarne otpornosti prošupljenih elemenata, poželjno je da su vertikalne drvene stijenke između šupljina, izložene požaru samo s jedne strane. Ovo se može postići na dva različita načina:

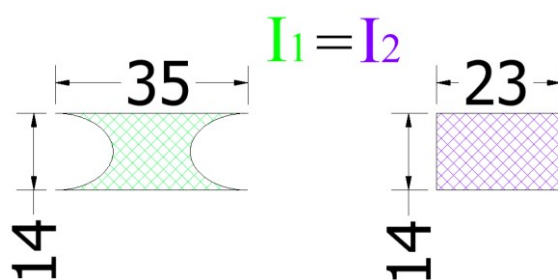
- prodiranje požara u šupljine mora biti spriječeno tijekom trajanja požara
- šupljine su ispunjene izolacijskim materijalom, čime se postiže da su nakon otpadanja prvog punog sloja drva izloženog požaru, bočne strane tankih vertikalnih stijenki zaštićene izolacijom.

Prvi način ostvaren je protupožarnim premazom i oblogama, dok je drugi način ostvaren postavljajući ispunu od kamene vune u šupljine drvenog uzorka. Razlog odabira kamene vune je točka taljenja ovog materijala (iznad 1000 °C), jer je preduvjet ovog načina zaštite, da ostane prisutna u šupljinama tijekom požarnog opterećenja uzoraka. U suprotnom, ukoliko bi došlo do taljenja materijala, ili odvajanja od uzorka, ideja zaštite drvenih površina, ne bi bila ostvarena. Rezultati ispitivanja pokazali su da kamena vuna štiti bočne strane vertikalnih stijenki između prošupljenja, tako da se može pretpostaviti jednodimenzionalni proces pougljenja. Važno je napomenuti da se protupožarna funkcija izolacije postavljene u šupljine može uzeti u obzir samo ako izolacija ostane na mjestu nakon otpadanja prvog sloja uzoraka.

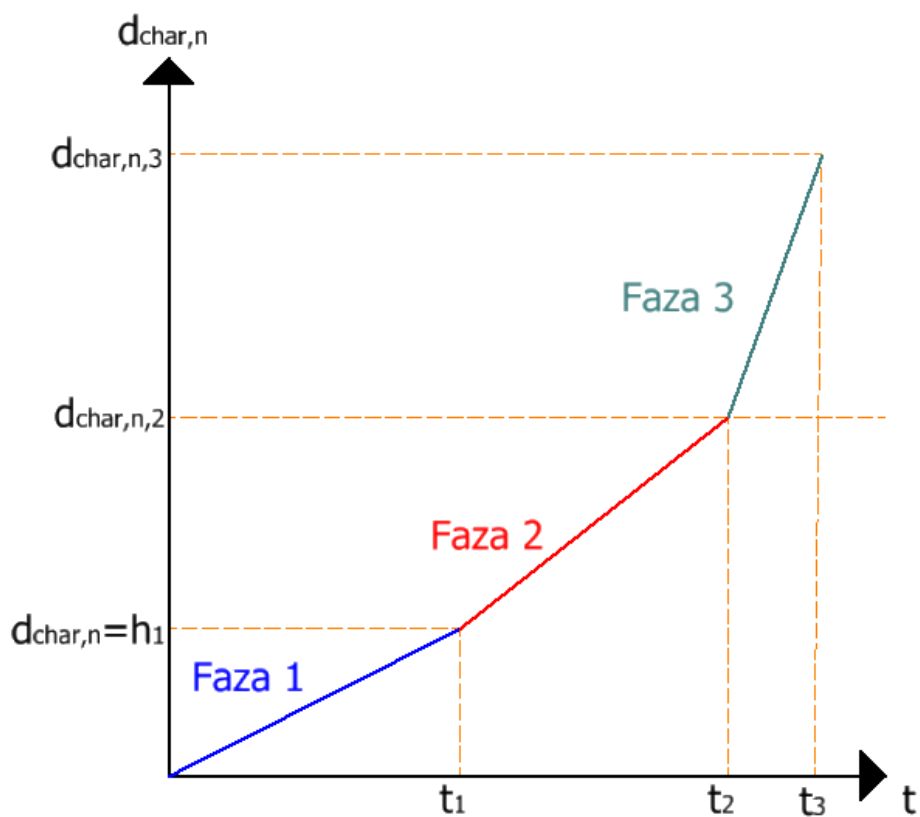
Razmatrane su tri različite faze pougljenja kao što je prikazano na slici 4.23. Zbog jednostavnosti, za svaku fazu pretpostavlja se linearni odnos između dubine pougljenja i vremena izloženosti požaru.



(a)



(b)



(c)

Slika 4.23 Faze pougljenja: (a) model za proračunavanje preostalog poprečnog presjeka prošupljenih elemenata; (b) debljina vertikalne stijenke; (c) brzine pougljenja po fazama pougljenja

Nadalje, pretpostavlja se da vertikalne drvene stijenke nisu izložene požaru s tri strane (u drugoj fazi), tj. spriječen je prodor požara u šupljine nakon što je pougljenjeni prvi sloj (vidi h na slici 4.23) drva izložen požaru, otpao. Prva faza započinje u trenutku primjene požarnog opterećenja, a završava u trenutku kada je dubina pougljenja jednaka debljini prve lamele izložene požaru drveni sloj ($d_{char,n} \leq h_1$). Brzina pougljenja za prvu fazu $\beta_{1,n}$ odnosi se na jednodimenzionalno pougljenje drvenih elemenata. Vrijeme t_1 , kada je dubina pougljenja dosegla debljinu prvog sloja drva izloženog požaru ($d_{char,n} = h_1$) može se izračunati na sljedeći način:

$$t_1 = \frac{h_1}{\beta_{1,n}} \quad (4.19)$$

U drugoj fazi javlja se pougljenje vertikalnih drvenih stijenki nakon što je dubina pougljenja dosegla debljinu punog sloja drva izloženog požaru ($d_{char,n} \geq h_1$). Brzina pougljenja definirana je debljinom vertikalnih stijenki. Zbog relativno male debljine vertikalnih stijenki (23 mm), javlja se pojačano pougljenje zbog utjecaja toplinskog toka sa bočnih strana i odozdo.

Nominalna dubina pougljenja prošupljenih drvenih elemenata za prvu fazu može biti određena na sljedeći način:

$$d_{char,n} = \beta_{1,n} \cdot t_{potr} \text{ za } 0 \leq t_{potr} \leq t_1 \quad (4.20)$$

Za drugu fazu, uzimajući u obzir dvodimenzionalni toplinski tok uzrokovan kameno vunom:

$$d_{char,n,2} = h_u + \beta_{2,n} \cdot (t_{potr} - t_1) \text{ za } t_{potr} \geq t_1 \quad (4.21)$$

I konačno, za treću fazu, kada su vertikalne stijenke izložene požaru s tri strane:

$$d_{char,n,3} = d_{char,n,2} + \beta_{3,n} \cdot (t_{potr} - t_2) \text{ za } t_{potr} \geq t_2 \quad (4.22)$$

Efektivni poprečni presjek dobije se reduciranjem početnog poprečnog presjek efektivnom dubinom pougljenja d_{ef} , koja je definira na sljedeći način:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (4.23)$$

Debljina sloja nulte čvrstoće $k_0 d_0$ uzima u obzir smanjenje čvrstoće i krutosti u ovisnosti o razvijenoj temperaturi. Tijekom prvih 20 minuta, koeficijent k_0 linearno raste od 0 do 1, koliko je inače potrebno vremena za postizanje stabilnih temperaturnih profila u toplinski u preostalom drvenom uzorku [8]. Vrijednosti $\beta_{n,1}$ i d_0 za prvu fazu pougljenja izravno su utvrđeni eksperimentalnim ispitivanjem punih greda. Vrijednosti $\beta_{n,2}$, $\beta_{n,3}$ i d_0 za drugu i treću drugu fazu pougljenja su analizirani u nastavku. Uspoređujući rezultate požarnih ispitivanja i pojednostavljenih proračunskih modela, određene su vrijednosti brzine pougljenja $\beta_{n,2}$ i $\beta_{n,3}$. Ipak, nulti sloj d_0 za drugu fazu i treću određen uspoređujući pojednostavljeni model proračuna s naprednim proračunskim modelom, tj. metodom konačnih elemenata. Koeficijenti $\beta_{n,2}$, $\beta_{n,3}$ i

d_0 za drugu i treću fazu pougljenja procijenjeni za prošupljene drvene elemente s debljinama vertikalnih stijenki od 23 mm (vidi sliku 4.23).

Kao što je pokazano u prethodnom poglavlju (0), u prvoj fazi uzorak je izložen požaru samo s jedne strane. Prosječna brzina pougljenja za prošupljene elemente bez izolacije iznosila je 0.69 mm/min, dok je prosječna brzina pougljenja za prošupljene elemente sa izolacijom iznosila 0.8 mm/min, za prvu fazu.

Pojedinosti požarnog ispitivanja opisane su u odjeljku 4.2.1. za prošupljene drvene elemente sa ispunom od kamene vune, brzina pougljenja za prvi puni sloj izložen požaru bila je veća nego kod drvenih uzoraka bez ispune od kamene vune. Naime, kamena vuna postavljena u prošupljenja imala je generalno pozitivan utjecaj na ponašanje uzoraka, ali uočene su i neke negativne posljedice. Zbog kamene vune, prvi puni sloj izložen požaru se brže zagrijavao, što je utjecalo na brzinu pougljenja. Požarnim ispitivanjem utvrđeno je brzina pougljenja u ovom slučaju iznosila $\beta_{n,1} = 0.8$ mm/min, a sloj nulte čvrstoće $d_0 = 7$ mm.

Vrijednosti $\beta_{n,1}$ i d_0 potvrđene su provedenim požarnim ispitivanjem drvenih punih i prošupljenih drvenih elemenata (vidi odjeljak 0).

Druga faza pougljenja prošupljenih drvenih uzoraka je kompliciranija i nepredvidljivija. Uvidom u stanje područja može se vidjeti da su provedena opsežna istraživanja okvirnih drvenih konstrukcija izloženih požaru, te je razvijen proračunski model koji uzima u obzir različite faze pougljenja. [138,139]. Proračunski model uključen je u EN 1995- 1-2, Dodatak C [8]. Razmatrani sklopovi sastojali su se od elemenata punog drva (horizontale i vertikale), obloge i izolacije šupljina od kamenih ili staklenih vlakana. Požarna ispitivanja su pokazala da izolacija od kamenih vlakana štiti bočne strane drvenih elemenata, međutim, zbog dvodimenzionalnog prijenosa topline putem izolacijskog materijala koji je u kontaktu sa bočnim stranama drvenog okvira, došlo je do povećanog pougljenja. Ovo potvrđuje zaključke donesene u okviru ovog rada.

Razmatrajući ovaj učinak prilikom proračuna preostalog poprečnog presjeka, uvedeni su koeficijent poprečnog presjeka $k_s = 1.5$, te koeficijent pretvorbe k_n , koji su potrebni za određivanje brzine pougljenja u ovakvim slučajevima. Za linijske drvene elemente, faktor pretvorbe k_n uzima u obzir učinak zaobljenja, pukotina i pukotine na površini, omogućuje definiranje preostalog pravokutnog poprečnog presjeka.

Prema trenutnim propisima [8] $k_s = 1.0$, za drvene elemente standardnih širina. Sa smanjenjem širine, vrijednost koeficijenta se povećava, ali propisi trenutno daju vrijednost za elemente ne manje od 38 mm s pripadajućom vrijednošću od 1.4. Zbog svega navedenog, predlaže se

koeficijent $k_s = 1.5$. Koeficijent k_n služi za pretvaranje nepravilnog preostalog poprečnog presjeka u zamišljeni preostali pravokutni poprečni presjek. Vrijednosti za ovaj koeficijent prema trenutnim propisima je 1.5. S pretpostavkom jednodimenzionalnog pougljenjivanja, brzina pougljenja $\beta_{n,2}$ može se izračunati na sljedeći način:

$$\beta_{n,2} = k_n \cdot k_s \cdot \beta_0 \quad (4.24)$$

Stoga, za prošupljene drvene elemente s vertikalnim stjenkama debljine 23 mm brzina pougljenja je $\beta_{n,2} = 1.5$ mm/min prema jednadžbi (4.24). Nadalje, usprkos izbjegavanju direktnog kontakta požara sa drvenim površinama zbog ispune od kamene vune, pokazano je da su zbog malih dimenzija vertikalnih stijenki, temperature u blizini šupljina više u odnosu na temperature razvijene u uzorcima bez ispune od kamene vune. S obzirom da smanjenje čvrstoće i krutosti u blizini pougljenog sloja ovisi o temperaturi zone u blizini vertikalnih stijenki tijekom druge faze pougljenja, pretpostavljeno je da će sloj nulte čvrstoće biti veći u odnosu na prvu fazu pougljenja.

Što se tiče brzine pougljenja u trenutku kada izolacijski sloj otpadne, odnosno kada sljedeći red šupljina nije ispunjen izolacijskim materijalom, predlaže se uporaba koeficijenta k_3 s kojim se množi osnovna brzina pougljenja određena u prvoj fazi pougljenja:

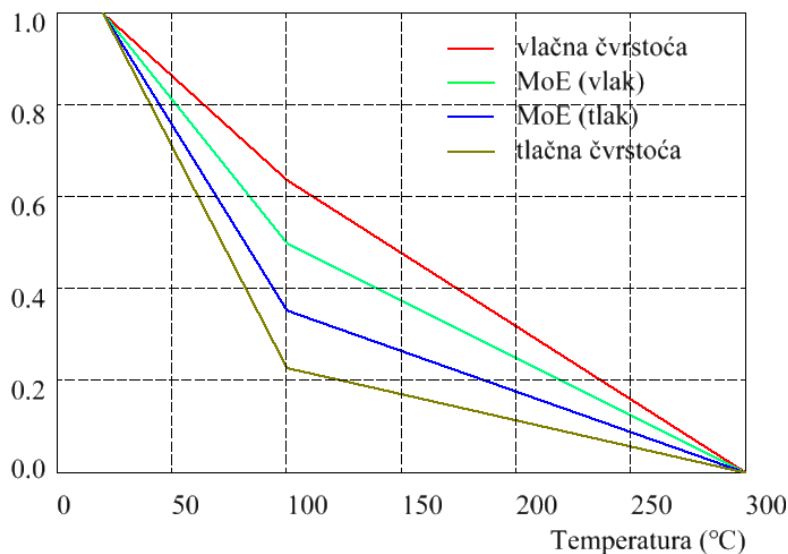
$$\beta_{n,3} = k_n \cdot k_s \cdot k_3 \cdot \beta_0 \quad (4.25)$$

Koeficijent k_3 definira se u odnosu na vrijeme zadržavanja, odnosno odvajanja zaštite od uzorka, i to kako slijedi :

$$k_3 = 0.036 \cdot t_f + 1 \quad (4.26)$$

Brzina pougljenja za treću fazu, prema izrazu (4.25) iznosi $\beta_{n,3} = 2$ mm/min.

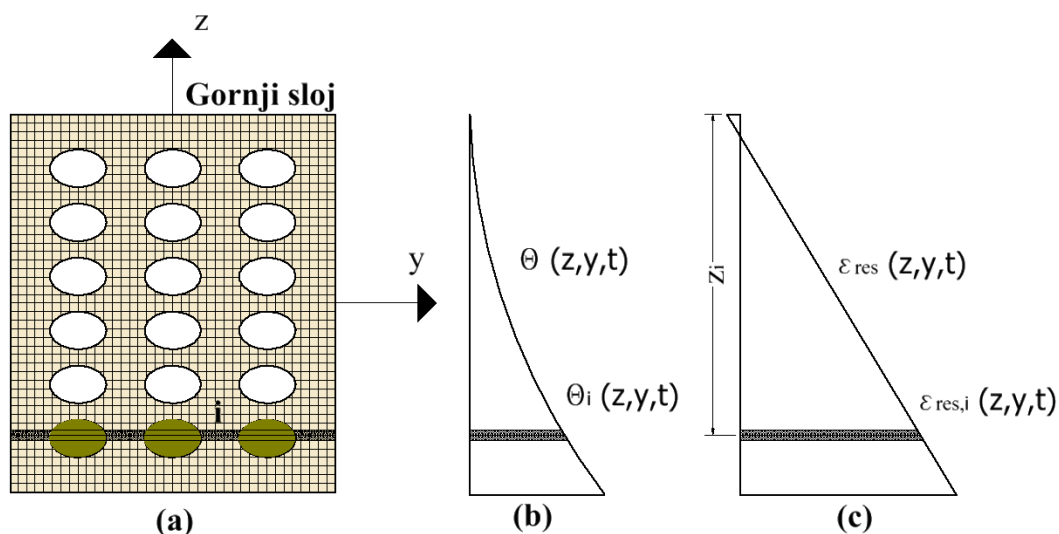
Budući da provedena požarna ispitivanja nisu omogućila određivanje vrijednosti d_0 za drugu i treću fazu pougljenja, korištena je napredna metoda proračuna, odnosno metoda konačnih elemenata. Drveni element je podijeljen na konačne elemente s pripadajućim vrijednostima krutosti i čvrstoće, koje su ovisne o prosječnoj temperaturi izmjerenoj prilikom požarnih ispitivanja. Naime, EN 1995-1-2 [8] predlaže model u kojem vlačna i tlačna čvrstoća, ali i krutost, opada s porastom temperature (vidi sliku 4.24).



Slika 4.24 Redukcija materijalnih karakteristika u ovisnosti o temperaturi

Čvrstoća na savijanje je izvedena veličina koja se koristi u pojednostavljenom proračunskom modelu. Vrijednosti redukcije ovisne o temperaturi dani u EN 1995-1-2 [8] izvedeni su iz velikog broja eksperimenata u velikom mjerilu, prilikom požarnog i mehaničkog opterećenja (savijanje) drvenih okvirnih sustava [140] i prikladni su za modeliranje ponašanja prošupljenih drvenih elemenata u požaru. Kako je požaru izložena strana elementa uglavnom u vlačnom stanju naprezanja, smanjenje krutosti (modul elastičnosti) u vlaku, dano u EN 1995-1-2 [8] je uzeto u prilikom modeliranja.

Temperatura, svojstva materijala, deformacija i naprezanja su definirana u težištu svakog elementa i konstantne su s obzirom na debljinu elementa. Nadalje, pretpostavlja se da vrijedi Bernoullij-eva hipoteza o ravnim presjecima vrijedi i u požarnim uvjetima (vidi sliku 4.25).



Slika 4.25 Pretpostavke proračunskog modela: (a) poprečni presjek; (b) temperaturni gradijent; (c) rezultirajuća deformacija

Ukupna vremenski ovisna deformacija $\varepsilon_{res,i}(t)$ može se izračunati uzimajući u obzir naprezanje gornjeg sloja $\varepsilon_0(t)$ zakrivljenost $\chi(t)$ poprečnog presjeka kako slijedi:

$$\varepsilon_{res,i}(t) = \varepsilon_0(t) + \chi(t) \cdot z_i \quad (4.27)$$

Učinak toplinskog širenja drveta može dovesti do zaostalih toplinskih naprezanja. Međutim, zaostala toplinska naprezanja su mala u usporedbi s naprezanjima uslijed vanjskih mehaničkih opterećenja i stoga se mogu zanemariti u proračunu požarne otpornosti prošupljenih drvenih elementa [141]. Pod pretpostavkom linearno-elastičnog ponašanja materijala, naprezanje ovisno o vremenu $\sigma_{res,i}(t)$, može biti izračunato na sljedeći način:

$$\sigma_{res,i}(t) = E_i(\Theta_i) \cdot [\varepsilon_0(t) + \chi(t) \cdot z_i] \quad (4.28)$$

Deformacija gornjeg sloja $\varepsilon_0(t)$ i zakrivljenost $\lambda(t)$ poprečnog presjeka se može dobiti iz uvjeta ravnoteže sila. Za prostu gredu podvrgnutu samo vanjskim momentom savijanja (uzdužna sila $N = 0$), uvjet ravnoteže je :

$$N_{\Theta}(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_{res,i,i}(t) \cdot A_i = 0 \quad (4.29)$$

$$M_{\Theta}(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_{res,i,i}(t) \cdot A_i \cdot z_i = M \quad (4.30)$$

Rješenja jednadžbi su :

$$\varepsilon_0(t) = \frac{-(\sum EA_i \cdot z_i) \cdot M}{(EA_i) \cdot (EA_i \cdot z_i^2) - (EA_i \cdot z_i^2)} \quad (4.31)$$

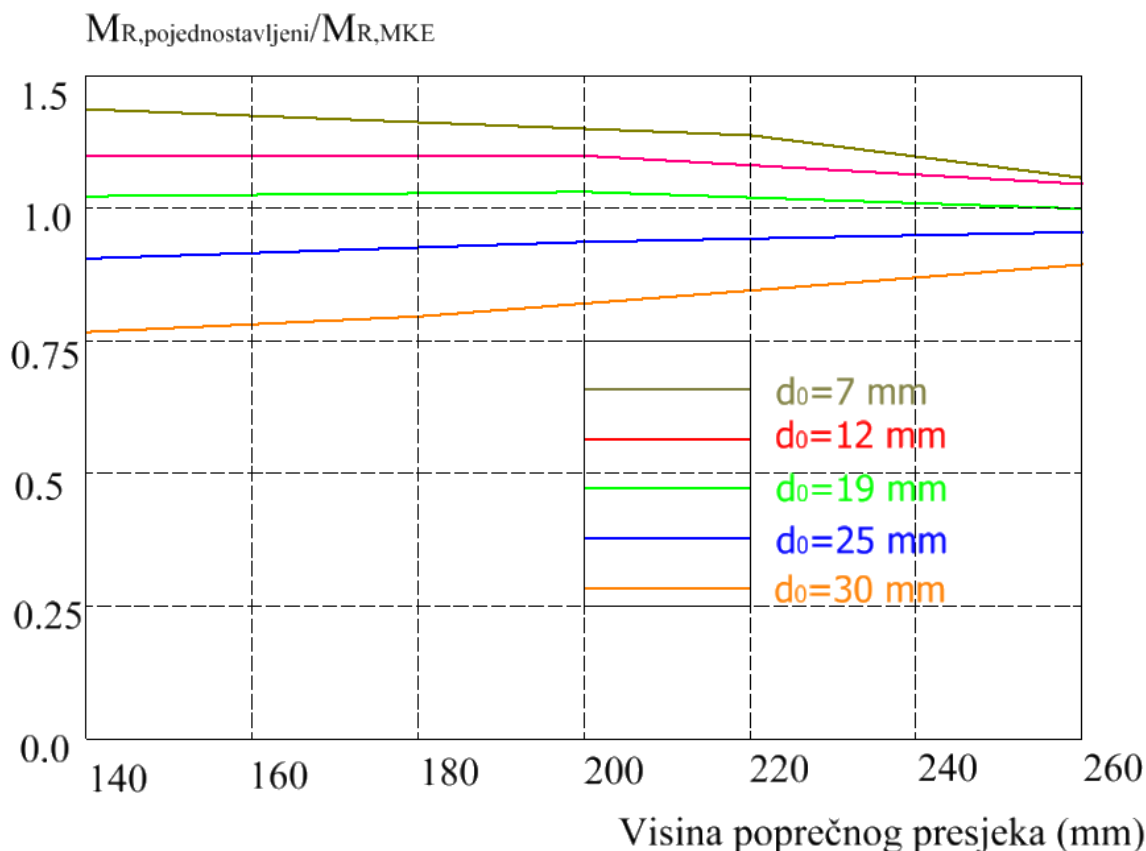
$$\chi(t) = \frac{(\sum EA_i \cdot z_i) \cdot M}{(EA_i) \cdot (EA_i \cdot z_i^2) - (EA_i \cdot z_i^2)} \quad (4.32)$$

Otpornost presjeka na savijanje M_R može se izračunati prema sljedećem kriteriju:

$$\sigma_{res,i}(M_R) = f_{d,f,i,i} \quad (4.33)$$

gdje je $f_{d,f,i,i}$ čvrstoća uzimajući u obzir redukciju zbog utjecaja temperature u skladu sa slikom 4.24.

Za proračun otpornosti na savijanje prošupljenih drvenih elemenata podvrgnutih standardnoj požarnoj krivulji, korištena je MKE. Iterativnom metodom, pretpostavljajući različite vrijednosti sloja nulte čvrstoće d_0 u proračunskom modelu te uspoređujući rezultate sa sa rezultatima dobivenih pomoću MKE (metoda reduciranog poprečnog presjeka), može se zaključiti da nulti sloj $d_0 = 19$ mm daje najbolje rezultate prilikom procjene požarne otpornosti prošupljenih drvenih elemenata (vidi sliku 4.26).



Slika 4.26 Usporedba požarne otpornosti nakon 60 min izlaganja požaru dobivene MKE i pojednostavljenim proračunskim modelom, u funkciji visine poprečnog presjeka i nultog sloja

Ukoliko se pretpostavi sloj nulte čvrstoće od 7 milimetara kao što je propisano u EN 1995-1-2 [8] za standardne drvene elemente, u pojednostavljenom proračunskom modelu, dobiju se od 15 % do 35 % veće vrijednosti otpornosti u usporedbi sa otpornošću dobivenom pomoću MKE. Glavni razlog je mala debljina vertikalnih stijenki na koje više utječe toplina u usporedbi s normalnim drvenim elementima. Na osnovu svega navedenog, predlože se upotreba sloja nulte čvrstoće $d_0 = 19$ mm, za pojednostavljeni proračunski model za prošupljene lijepljeno lamelirane drvene uzorke.

4.2.2.4 Analiza pougljenog sloja kod premazom zaštićenih greda

Analiziran je proces pougljenja kod drvenih uzoraka zaštićenih protupožarnim premazom, koji formira zaštitni sloj na površini uzorka i tako pridonosi požarnoj otpornosti drvenih greda. Doprinos se procijenio sa specifičnim požarnim ispitivanjem i analizom, u skladu sa EN 13381-7 [142]. Klasifikacija požarne otpornosti drvenog elementa uvijek je kombinacija izvorne požarne otpornosti nezaštićenog elementa i doprinosa zaštitnog materijala, kako je specificirano u EN 1995-1-2 [8]. Propisana je procedura za proračun klase požarne otpornosti konstruktivnih drvenih elemenata čije su površine inicijalno zaštićene. EN 1995-1-

2 [8] dijeli klasificirana vremenska razdoblja na različite intervale, s različitim brzinama pougljenja, ovisno o ponašanju zaštitnog materijala u odnosu na brzinu pougljenjivanja. Ipak, eksplicitno nisu dana pravila za protupožarne premaze, a glavni razlog je taj da su potrebna opsežna ispitivanja da bi se utvrdili parametri koji određuju, prije svega, brzinu pougljenja za različite faze tijekom izloženosti požaru. Nadalje, postoji velik broj različitih protupožarnih premaza, odnosno kemijskih sastava premaza, pa je teško unificirati pravila. Stoga, u nastavku su dani prijedlozi za određivanje osnovnih parametara koji utječu na proces pougljenja i požarnu otpornost drvenih elemenata inicijalno zaštićenih protupožarnim premazom.

Za proračun požarne otpornosti zaštićenog drvenog elementa, nužno je poznavati sljedeće:

- debljina pougljenog sloja: udaljenost od inicijalne površine drvenog elementa do pougljenog sloja
- vrijeme gubitka svojstava zaštite: t_f - vrijeme kod kojega nastupa gubitak svojstava sustava zaštite od požara, uslijed odvajanja značajne površine premaza od drvenog elementa ili naglog i značajnog porasta temperature na inicijalno zaštićenoj drvenoj površini.
- vrijeme početka pougljenja t_{ch} - početak pougljenja na površini drvenog elementa.
- brzina pougljenja β - brzina pougljenja drvenog elementa prilikom izlaganja požaru prema ISO 834 (vidi tablicu 4.5)

Tablica 4.5 Brzine pougljenja

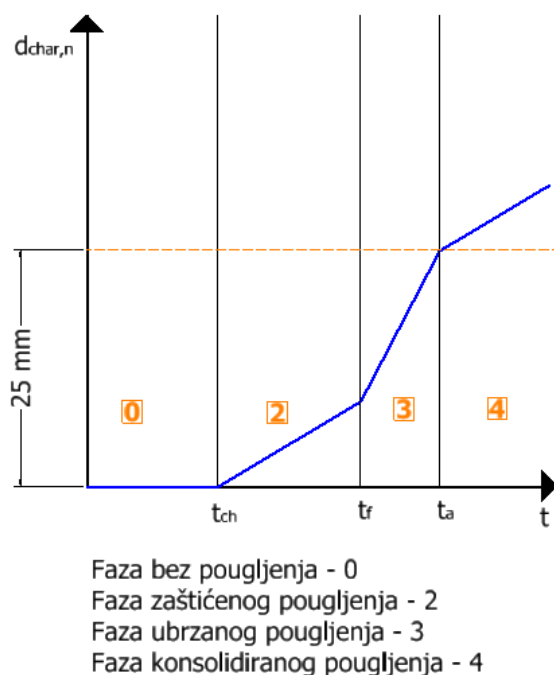
| Brzina pougljenja | Mjerna jedinica | Opis (prema EN 1995-1-2 [8]) |
|-------------------------|-----------------|---|
| β_0 | mm/min | Jednodimenzionalna brzina pougljenjivanja |
| β_n | mm/min | Nominalna brzina (više dimenzionalna – dvije ili više požaru izloženih strana) |
| β_2 ili β'' | mm/min | Brzina pougljenjivanja iza sustava zaštite od požara prema EN 1995-1-2 [8] |
| k_β | - | Omjer brzina pougljenja - β''/β_0 za jednodimenzionalnu ili β''/β_n za nominalnu. |

Za zaštićene drvene površine, potrebno je uzeti u obzir da je početak pougljenja odgođen do trenutka t_{ch} , ali pougljenje može početi prije trenutka gubitka svojstava protupožarnog premaza t_f , ali pri nižoj brzini od brzina pougljenjivanja nezaštićenog drveta, sve do vremena gubitka svojstava t_f zaštite od požara. Nakon toga, brzina pougljenja je veća od one propisane u EN 1995-1-2 [8] za inicijalno nezaštićene elemente, sve do trenutka kada debljina pougljenog sloja ne bude jednaka debljini pougljenog sloja istog drvenog elementa bez protupožarne zaštite, ili

25 mm (manja vrijednost), koji se definira kao t_a . EN 1995-1-2 [8] propisuje izraz za proračun vremena t_a kako slijedi:

$$t_a = \min \left\{ \frac{25 - (t_f - t_{ch}) \cdot \beta_{0,Faza2}}{\beta_{0,Faza3}} + t_f \right. \quad (4.34)$$

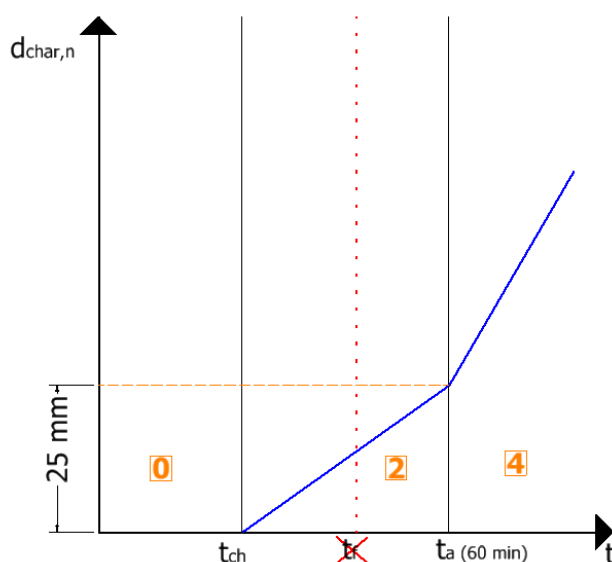
Nakon toga (faza 4), brzina pougljenjivanja se vraća na vrijednost inicijalno nezaštićenog drvenog elementa (β_0 u ovom slučaju). Faze pougljenja prikazane su na slici 4.27.



Slika 4.27 Faze pougljenja za grede zaštićene protupožarnim premazom

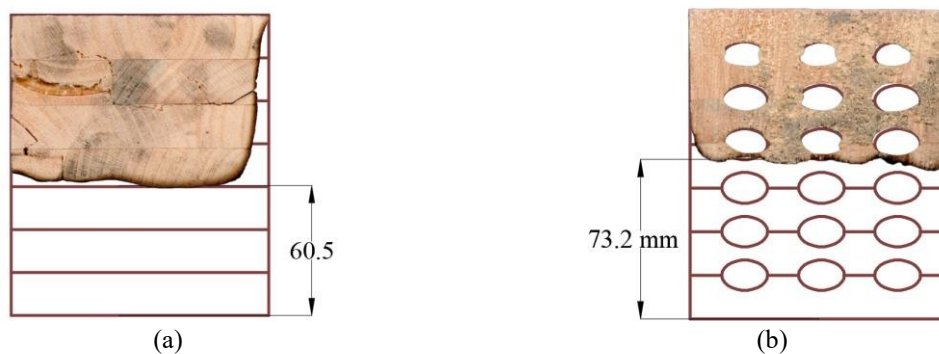
Faza 2 predstavlja fazu zaštićenog pougljenja, a vrijeme početka ove faze u ovom istraživanju iznosi $t_{ch} = 17$ minuta, određeno prema EN 13381-7 [142]. Za fazu 2, EN 1995-1-2 [8] propisuje pripadajući koeficijent s kojim se množi brzina pougljenja, i koji je propisan za određene sustave zaštite, ali ne i za protupožarni premaz. Eksperimentalnim istraživanjem određena je brzina pougljenja za fazu 2 koja je iznosila $\beta_h = 0.49$ mm/min, odnosno omjer brzina pougljenja (tablica 4.5), iznosio je $k_\beta = 0.71$. Prema pravilima koje daje EN 1995-1-2 [8], nakon odvajanje protupožarne zaštite u 27. minuti ispitivanja, brzina pougljenja iznosila je 1.39 mm/min, što je dvostruko veća brzina od brzine pougljenja istog ali inicijalno nezaštićenog uzorka. U ovom slučaju, vrijeme t_f određeno je na osnovi vizualne inspekcije, kombinirane sa analizom razvijenih temperaturama unutar uzorka. Konačno, u trenutku $t_a = 43$ min, prema izrazu (4.53), započela je faza konsolidiranog pougljenja, odnosno brzina pougljenja iznosila je 0.69 mm/min.

S obzirom da se vrijeme gubitaka svojstava t_f , ne može eksplicitno odrediti i trenutno ne postoje jasna pravila određivanja istog kod protupožarnih premaza, predlaže se pojednostavljeni model koji definira vrijeme početka pougljenja t_{ch} , te vrijeme početka konsolidacije t_a , dok se vrijeme gubitaka svojstava zaštite t_f , ne razmatra. Prijedlog modela može se vidjeti na slici 4.28.



Slika 4.28 Prijedlog model za premazom zaštićene grede

Vrijeme početka pougljenja t_{ch} definira se prema EN 13381-7 [142], dok izraz za t_f (4.53) treba modificirati. U nedostatku ispitivanja protupožarnih premaza, predlaže se da se početak konsolidiranog pougljenja odredi iz dva uvjeta; prvi je dosezanje debljine pougljenog sloja od 25 mm, a drugi je da je vrijeme t_a povezano za požarnom otpornošću samog elementa (30, 60 ili 90 minuta). Na taj način brzina pougljenja bi bila direktno povezana sa požarnom otpornošću elementa, odnosno projicirala stvarno stanje. Istom metodom kao i kod normalnih greda, opisanom u poglavlju 0, određena je dubina pougljenog sloja za normalne i prošupljene grede zaštićene protupožarnim premazom (vidi sliku 4.29).

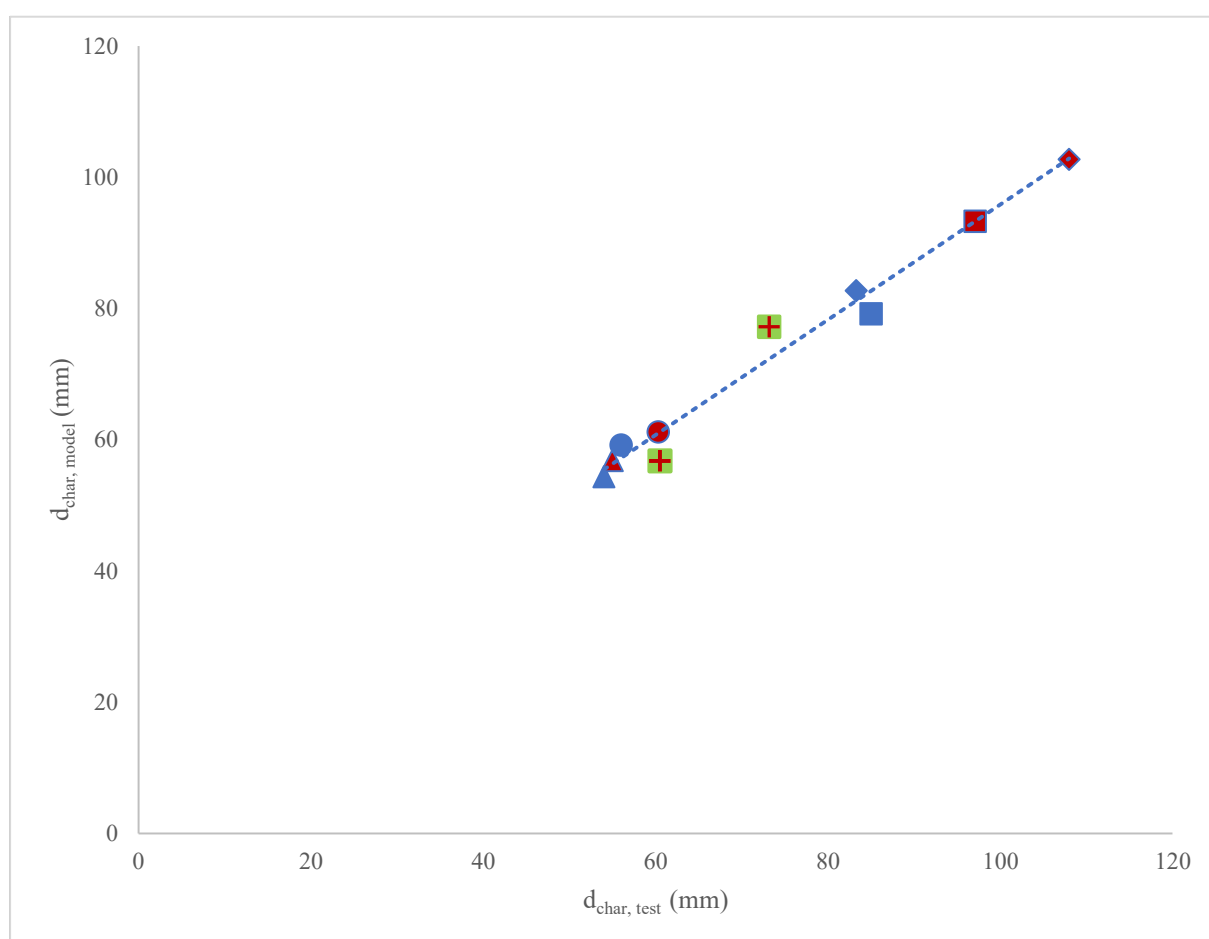


Slika 4.29 Debljina pougljenog sloja za uzorke zaštićene protupožarnim premazom : (a) normalna greda; (b) prošupljena greda

4.2.2.5 Usporedba pojednostavljenih modela sa eksperimentalnim ispitivanjem

Analiza pougljenog sloja napravljena u sklopu požarnih ispitivanja u srednjem mjerilu. U nizu požarnih ispitivanja, proučavan je utjecaj različitih konfiguracija poprečnog presjeka i sustava zaštite od požara, na stvaranje pougljenog sloja i u konačnici, na požarnu otpornost drvenih elemenata.

Razvijeni su proračunski modeli za određivanje dubine pougljenog sloja, te sloja nulte čvrstoće. Vrijednosti dobivene ovim modelom, potvrdile su eksperimentalno istraživanje. Na slici 4.30 uspoređene su izmjerene dubine pougljenja nakon požarnih ispitivanja, s dubinama pougljenja izračunatim pomoću pojednostavljenog modela proračuna.



Slika 4.30 Usporedba dubine pougljenja dobivene pojednostavljenim proračunskim modelima i eksperimentalnim istraživanjem

Zaključeno je da postoji dobro slaganje između rezultata dobivenih proračunskim modelom i rezultata požarnih ispitivanja. Omjer dubine pougljenja dobivene proračunskim modelom ($d_{char,model}$) u odnosu na dubinu pougljenja dobivenih požarnim ispitivanjem ($d_{char,test}$) je 1.03, što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata (3 %).

4.2.2.6 Progib

Jedan od glavnih parametara za kontrolu požarne otpornosti uzoraka je deformacija. Deformacija je uvjetovana i izravno povezana s razvojem temperature unutar uzorka, te izgaranjem drvenog uzorka kao fizikalnom manifestacijom djelovanja požara na drveni materijal. Povećanje temperature dovodi do redukcije materijalnih i geometrijskih karakteristika drvenih elemenata, što rezultira povećanjem progiba istih.

Da bi kriteriji (nosivost) koji definiraju požarnu otpornost greda bili ispunjeni, progib mora biti manji od:

$$D_{limit} = \frac{L^2}{(400 \cdot d)} = 1400^2 / (400 \times 140) = 35 \text{ mm} \quad (4.35)$$

Nadalje, brzina prirasta deformacije mora biti manja od:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit} = \frac{L^2}{9000 \cdot d} = \frac{1400^2}{9000 \times 140} = 1.56 \text{ mm/min} \quad (4.36)$$

Do otkazivanja prema kriterijima nosivosti dolazi kada su ispunjeni sljedeći uvjeti:

$$D_1 \geq 1.5 \times D_{limit} \geq 1.5 \times 35 = 52.5 \text{ mm} \quad (4.37)$$

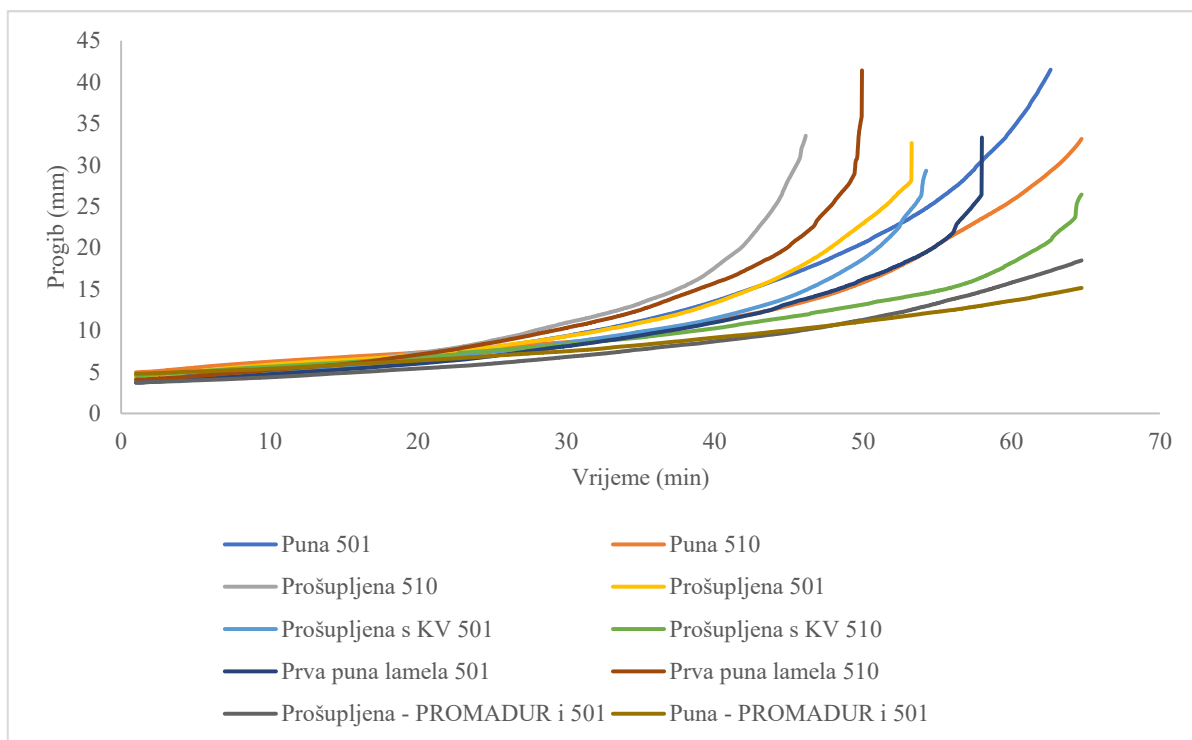
ili

$$D_1 > D_{limit} \rightarrow D_1 > 35 \text{ mm} \quad (4.38)$$

i

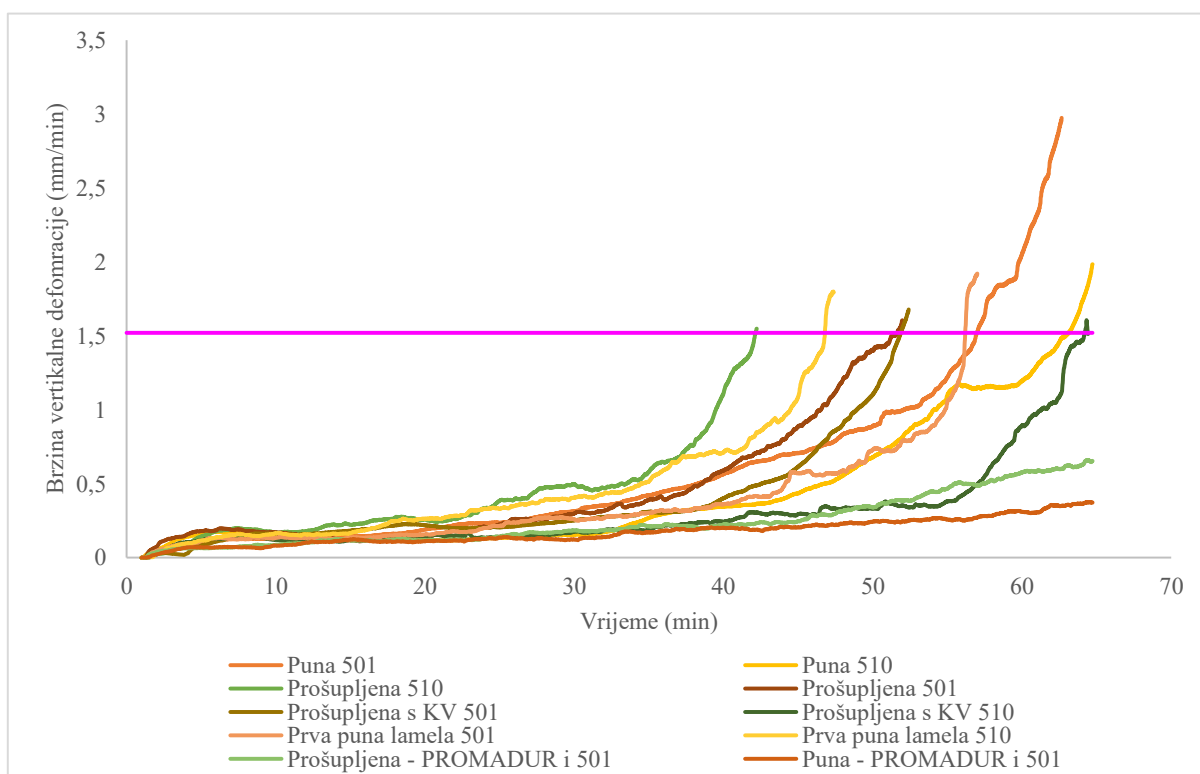
$$\left(\frac{dD_1}{dt}\right) > \left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit} \rightarrow \left(\frac{dD_1}{dt}\right) > 1.56 \text{ mm/min} \quad (4.39)$$

Na slici 4.31 prikazana je vrijednost progiba, a na slici 4.32 brzina prirasta progiba tijekom požarnih ispitivanja.



Slika 4.31 Usporedba progiba – uzorci izloženi požaru s jedne strane

Vrijednost graničnog progiba nije dosegnuta prije samog otkazivanja uzoraka.



Slika 4.32 Brzina vertikalne defomracije - uzorci izloženi požaru s jedne strane

Ispitivanja su prekinuta zbog prodora plamena na granici između izložene i neizložene strane uzorka i opasnosti za laboratorijsko osoblje i opremu.

4.2.3 Numeričko modeliranje uzoraka izloženih požaru s jedne strane

4.2.3.1 Uvod

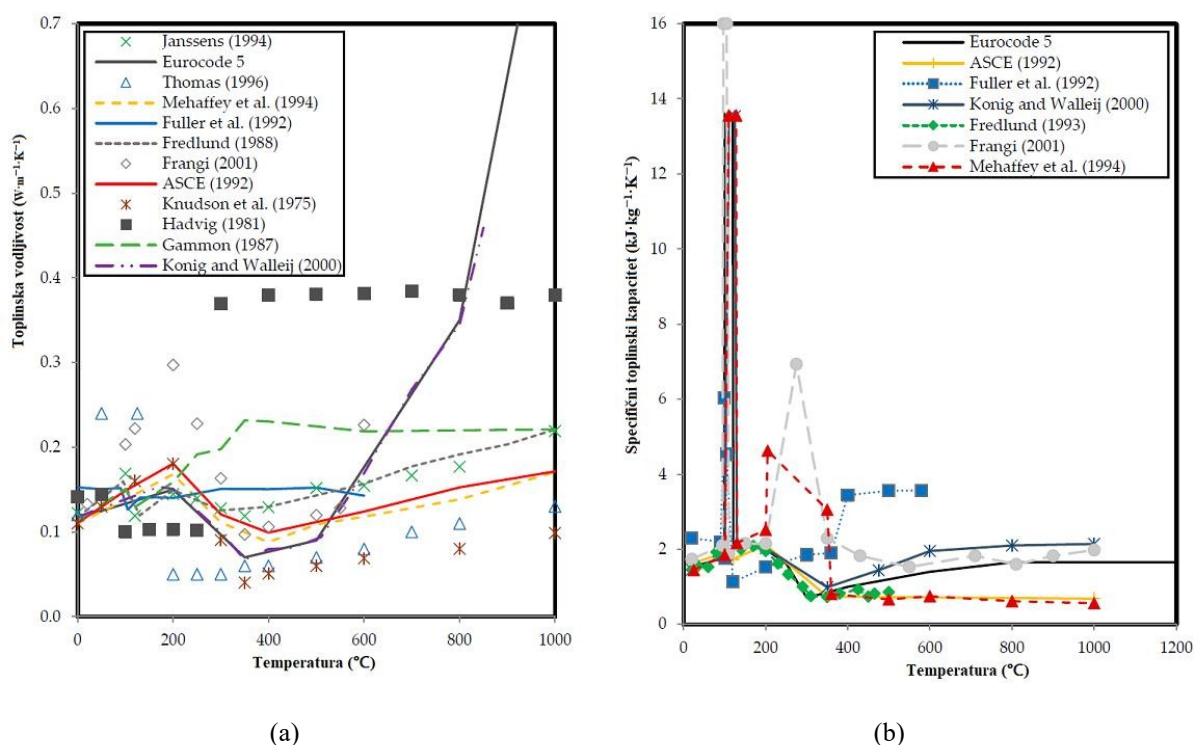
Požarna otpornost drvenih konstrukcija ovisi o brzini stvaranja pougljenog sloja, odnosno o efektivnom poprečnom presjeku koji je sposoban prenositi opterećenje. Hemiceluloza, lignin i celuloza su tvari koje čine lignoceluloznu biomasu [143–146]. Najmanje otporna na toplinsku razgradnju je hemiceluloza, a najviše lignin [147,148]. Kada je drvo izloženo dovoljnom toplinskom opterećenju, dolazi do procesa toplinske degradacije, a pri tome nastaju zapaljivi plinovi [137]. Kao što je objašnjeno u poglavlju 4.1.1, nakon izloženosti požaru, drvo se sastoji od pougljenog sloja, sloja pirolize i netaknutog materijala [149]. Iako je prema EN 1995-1-2 [8] granica pougljenja definirana pri temperaturi od 300 °C, neki autori predlažu druge vrijednosti [150]. Na osnovu požarnih ispitivanja, Osvald [151] je došao do zaključka da granicu pougljenja definira temperatura od 290 °C, dok je Shaffer [152] predložio temperaturu od 288 °C.

U posljednje vrijeme pojavljuju se novi progresivni i složeniji propisi za projektiranje drvenih konstrukcija i sve veći zahtjevi za osiguranje njihove sigurnosti u požaru. Simulacije požara predstavljaju vrlo složen proces, i potrebno je veliko znanje ne samo vezano za teoriju modeliranja, nego i za teoriju požarnog inženjerstva.

Danas se i dalje uglavnom koriste jednostavni računalni modeli, zbog same jednostavnosti i brzine rješavanja problema. Jedan od razloga je odbijanje naprednih metoda modeliranja prilikom projektiranja konstrukcija u požarnoj situaciji. Nadalje, pregledom stanja područja, uočen je nedostatak jednoobraznih pravila i tehničkih standarda za projektiranje drvenih konstrukcija u požaru [153]. Naposljetku, neprihvatanje MKE kao relevantnog načina projektiranja, onemogućava koncept učinkovitog projektiranja, koje se ne može u potpunosti postići korištenjem jednostavnih računalnih modela.

Prilikom razvoja modela zasnovanog na MKE, iznimno je važan pravilan odabir ulaznih podataka koji se odnose na materijalne karakteristike. S obzirom na kompleksnost i fenomenologiju požara, u većini slučajeva, teško je predvidjeti odgovor konstrukcije. Stoga, potrebna je verifikacija rezultata, koja se provodi eksperimentalnim ispitivanjem. S istim ciljem, provedena su mnoga istraživanja [154–158], koja su pokazala da to iziskuje ozbiljnu potrebu za sistematiziranim i detaljnim prikazom različitih svojstava građevnih materijala ovisnih o temperaturi. Sve navedeno omogućilo bi implementaciju unificiranog pristupa prilikom definiranja i procjene požarnih modela [153].

Toplinska vodljivost je jedan od osnovnih parametara koji definira termalna svojstva materijala [159]. Toplinska vodljivost drva u ambijentnim uvjetima ima nisku vrijednost i kreće se u granicama od 0.1 do $0.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Specifična pojava kod drva je smanjenje vrijednosti toplinske vodljivosti na temperaturama između $200 \text{ }^\circ\text{C}$ i $315 \text{ }^\circ\text{C}$. Nakon toga se toplinska vodljivost se ponovno povećava zbog stvaranja pougljenog sloja. Prema EN 1995-1-2 [8] toplinska vodljivost i specifični toplinski kapacitet poprimaju slične vrijednosti za sve vrste mekog i tvrdog drva. Ipak, provedena istraživanja [160–167] ukazuju na razlike u vrijednostima termalnih svojstava za različite vrste drva (Slika 4.33).



Slika 4.33 Karakteristike drva u ovisnosti o temperaturi: (a) toplinska vodljivost; (b) specifični toplinski kapacitet [168]

Prema slici 4.33a, postoje značajne razlike u vrijednostima u odnosu na vrijednosti preporučene u EN 1995-1-2 [8]. Može se zaključiti da je pravilan izbor ulaznih podataka ključan za pri korištenju (naprednih) metoda modeliranja.

Slijedeći bitan parametar je specifični toplinski kapacitet koji se definira se kao fizikalna veličina jednaka količniku količine topline Q dovedene nekome tijelu i promjene temperature ΔT koju je dovedena toplina prouzročila, jedinica je ($\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$). Specifični toplinski kapacitet pokazuje koliko topline treba dovesti kilogramu nekog materijala da mu se temperatura povisi za 1 K (1°C). Dijagram ovisnosti specifičnog toplinskog kapaciteta drva o temperaturi karakterizira nagli porast vrijednosti pri temperaturi oko $100 \text{ }^\circ\text{C}$, kada se toplina troši za promjenu stanja vode sadržane u drvu, a zatim krivulja ima oštar pad, nakon isparavanja

zaostale vode u drvu (slika 4.33b). Slika 4.33b prikazuje porast vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta s povećanjem temperature [161,162,167].

Gorenje drva jedan je od najdinamičnijih procesa, koje je teško simulirati računalnim programskim paketima. Pri izradi simulacije izgaranja potrebno je uzeti u obzir mnoge fenomene poput brzine oslobađanja topline, kemijskog sastava materijala, kemijske jednadžbe izgaranja, protok zraka itd.

Peng i sur. [169] istražili su ponašanje drva u požaru, a termalna analiza izrađena je u ABQUS-u, dok su u svom istraživanju Bedon i sur. [170,171] donijeli zaključke o ponašanju drvenih zidova u požaru, također u ABAQUS-u. Cachim i sur. [172] koristili su SAFIR pri analiziranju ponašanja drva izloženog požaru. U ovom radu, korišten je programski paket ANSYS, za kojeg se smatra da je jedan od najpouzdanijih programskih paketa [154,156–158,173].

Iako ANSYS pruža mogućnost kompleksnih simulacija u svojim modula (Ansys Fluent), poput izgaranja, za takve simulacije potrebna su moćnija računala. Jednostavnija, ali zadovoljavajuća solucija je korištenje modula za nestacionarnu toplinsku analizu. Prema EN1995-1-2[8], moguće je koristiti napredne metoda proračuna, a glavni parametri su specifični toplinski kapacitet, gustoća, i toplinska vodljivost (pristup zasnovan na specifičnom toplinskom kapacitetu). Druga opcija je koristiti entalpijski pristup, koji ima neke prednosti, a posebno se to odnosi na ponašanje drva pri temperaturi od 100 °C [174], kada dolazi do isparavanja vode.

4.2.3.2 Odabir i provjera prikladnih modela požara

Na temelju svega navedenog u prethodnom poglavlju, opravdano je korištenje pojednostavljenog modela za provođenje topline u drvu, gdje se na temelju razvijene temperature može napraviti analiza procesa pougljenja drva. U programskom paketu ANSYS toplina se kvantificira se pomoću Fourierovog zakona [175]:

$$q = -k(T)\nabla T \quad (4.40)$$

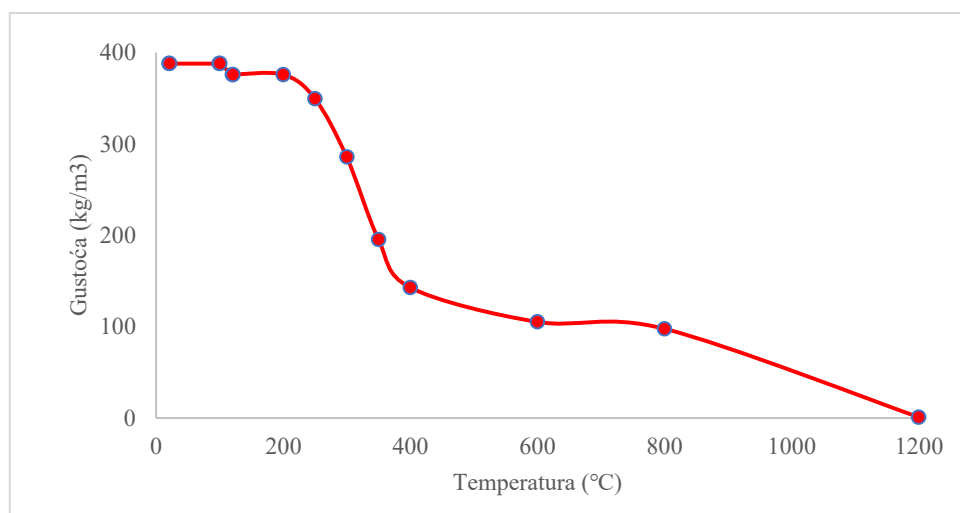
Jednadžba (4.40) opisuje provođenje topline u jednodimenzionalnom prostoru. U slučajevima višedimenzionalnog prostora koristi se Newton–Raphsonova metoda. S obzirom da se ovdje radi o nestacionarnom prijenosu topline, jasno je da postoji derivacija gustoće, specifične toplinskog kapaciteta, vodljivosti i temperature tijekom vremena. Jednadžba za provođenje topline kroz čvrsto tijelo dana je relacijom koja koristi toplinsku ravnotežu [176,177]:

$$k \times \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q = \rho + c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.41)$$

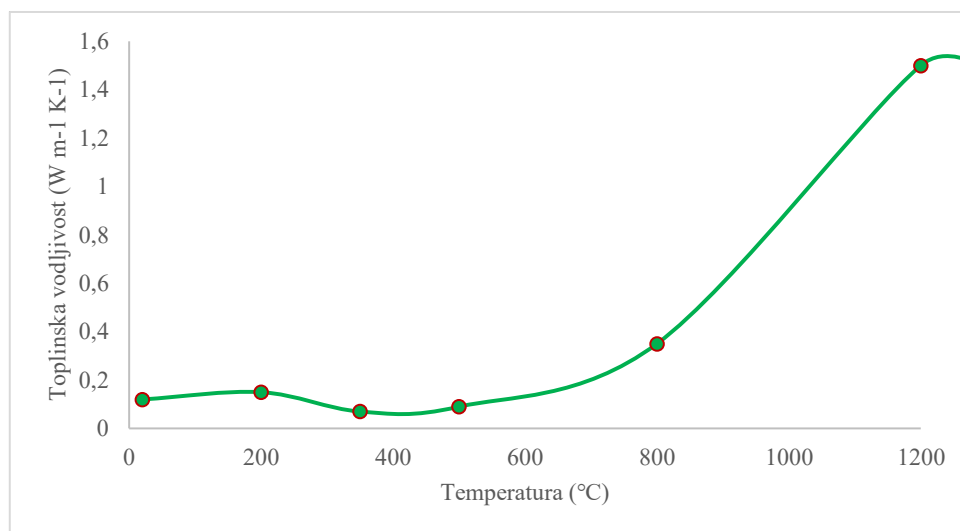
$$k\nabla^2 \times T + q = \rho \times c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.42)$$

Ovdje je ρ gustoća materijala, c je specifični toplinski kapacitet, k je toplinska vodljivost, q je toplinski tok i T je termodinamička temperatura. Izraz na desnoj strani jednadžbe $\rho + c \frac{\partial T}{\partial t}$ predstavlja brzinu skladištenja energije u tijelu. Nakon određenog vremena, proces je dosegao stabilno stanje, koje je ponovno regulirano Fourier-ovim zakonom [175].

Početna gustoća uzoraka od mekog drva na 20 °C određena je u poglavlju 3.3.1.2 uz sadržaj vlage od 11 %. Dijagram ovisnosti gustoće drva o temperaturi izrađen je prema EN1995-1-2 [8] (Slika 4.34a). Vrijednosti toplinske vodljivosti implementirane su u ANSYS prema pravilima danim u EN1995-1-2 [8] (Slika 4.34b).



(a)



(b)

Slika 4.34 Karakteristike drva: (a) gustoća; (b) toplinska vodljivost [168]

Nakon unosa ulaznih podataka o svojstvima materijala, kreirana je geometrija. Jednodimenzionalni model nije prikladan za ovu studiju jer ne daje informacije o obliku pougljenjenog sloja. Nadalje, primijenjena je izotropna toplinska vodljivost, s obzirom da su uzorci izloženi požaru s jedne strane.

U odjeljku "Model", kreirana je mreža konačnih elemenata. Za drvene elementa iznosio je 5 mm. "Metoda MultiZone" korištena je generiranje mreže konačnih elemenata.

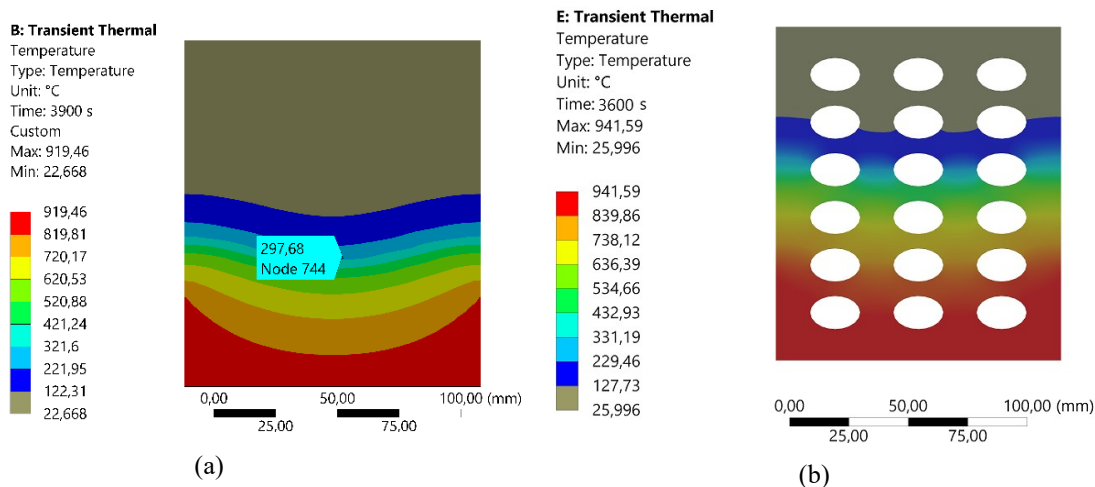
U odjeljku "Setup" postavljena je početna temperatura od 20 °C. Vrijeme simulacije bilo je 3600 sekundi, a trajanje vremenskog koraka je bilo 60 sekundi.

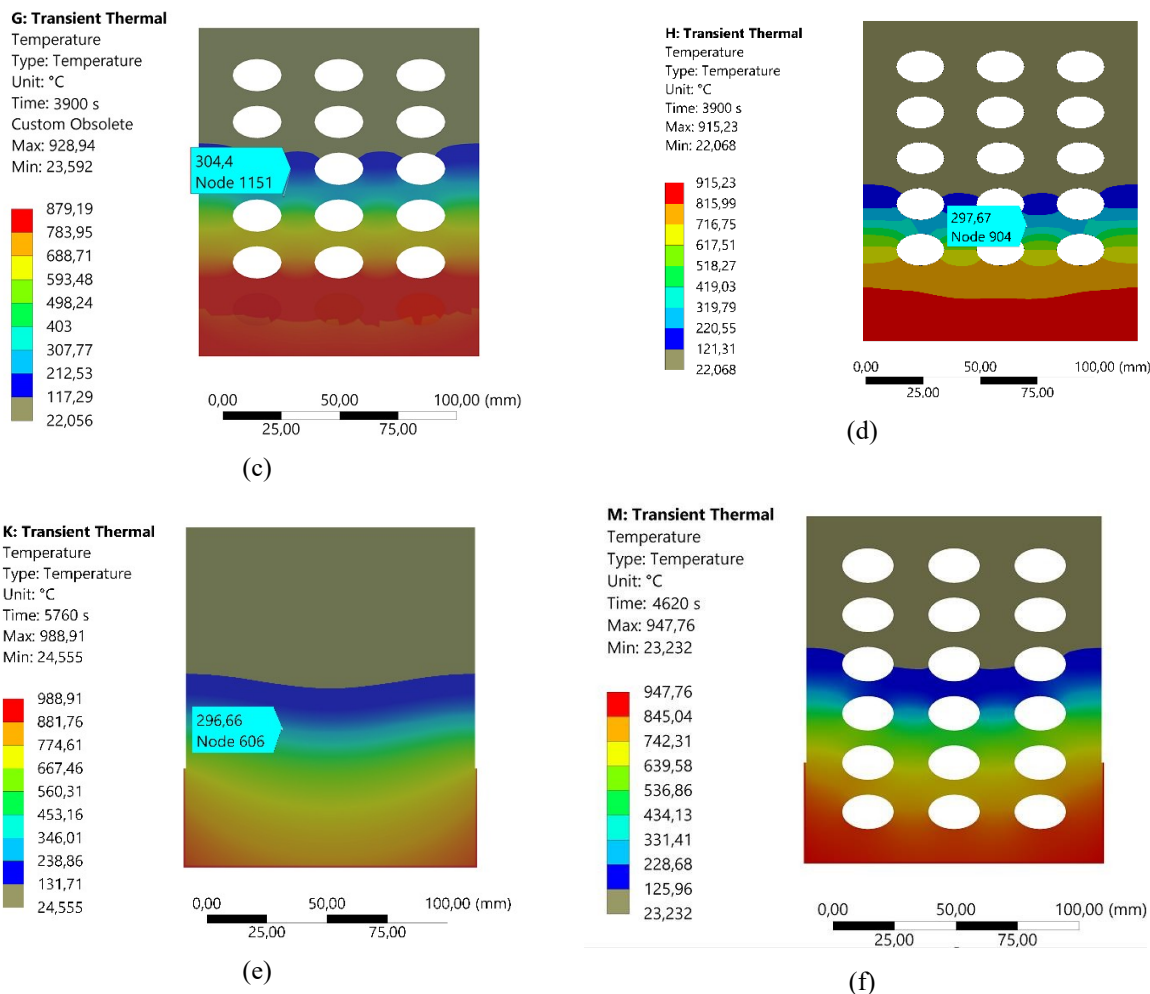
Rubni uvjeti zadani su u skladu sa eksperimentom, gdje su površine drva bilo izložene standardnoj požarnoj krivulji ISO 834. Uvjeti konvekcije od 25 W/m² zadani su na požaru izloženoj površini drvenih uzoraka, te 9 W/m² na neizložanim drvenim površinama, a sve prema EN 1995-1-2 [8].

Validacija modela predstavlja uspoređivanje kompjutorski dobivenih rezultata simulacije s eksperimentalno dobivenim rezultatima, tj. kvantificiranjem i analizom stvarne fizikalne pojave [178]. U nastavku je prikazana termalna analiza drvenih uzoraka izloženih požaru s jedne strane, a razvijene temperature unutar uzorka, i u konačnici, debljina pougljenog sloja, korišteni su kao parametri u procesu validacije.

4.2.3.3 Termalna analiza

Numeričkom simulacijom potvrđeno je eksperimentalno istraživanje. Na slici 4.35 prikazani su rezultati simulacija za sve uzorke, u trenutku završetka požarnog testa. Nadalje, označeno je mjesto gdje se razvila temperatura od približno 300 °C, koje služi za usporedbu stvaranja pougljenog sloja kod uzoraka.





Slika 4.35 Rezultati simulacije – razvijena temperatura u uzorcima : (a) puna greda; (b) greda sa maksimalnom prošupljenosti; (c) prošupljena greda sa ispunom od KV u prvom redu šupljina; (d) prošupljena greda sa prvom punom lamelom; (e) puna greda sa protupožarnim premazom; (f) prošupljena greda sa protupožarnim premazom

Na prikazanim rezultatima može se vidjeti utjecaj pojedinih promjena, odnosno protupožarne zaštite. Inicijalne simulacije provedene su na punim (vidi sliku 4.35a), i maksimalno prošupljenim elementom (vidi sliku 4.35b), koji su ekstremni slučajevi. Zatim, procjenjuje se utjecaj ispune kamenom vunom (vidi sliku 4.35c), te ukoliko prvi red šupljina zamijenimo punom, kao što je vidljivo na slici 4.35d. Konačno, na slici 4.35e prikazani su rezultati razvijene temperature punom poprečnog presjeka sa protupožarnim premazom, a na slici 4.35f prošupljenog presjeka sa istim protupožarnim premazom.

Validacija rezultata simulacije može se postići nizom mjera pogrešaka koje pokazuju razlike između predviđenih i stvarnih rezultata. Dvije uobičajene mjere pogreške prikazane su u jednadžbama (4.43) i (4.44):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - p_i)^2}{n}} \quad (4.43)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - p_i| \quad (4.44)$$

gdje je d_i stvarna vrijednost, a p_i predviđena vrijednost, a n broj vrijednosti uzetih u simulaciji. *RMSE* (*Root Mean Square Error*) predstavlja srednju kvadratnu pogrešku. Srednja apsolutna greška (*MAE*) predstavlja prosjek apsolutne razlike između svakog predviđenog i očekivanog rezultata.

Osim navedenih mjera pogreške, točnost simulacije također se može procijeniti pomoću koeficijenta determinacije R^2 , i srednjom apsolutnom postotnom pogreškom (*MAEP*) kako je opisano u jednadžbi (4.45), odnosno (4.46). U jednadžbi (4.45) predstavlja prosjek očekivanih rezultata.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (4.45)$$

$$MAEP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - p_i}{d_i} \right| \quad (4.46)$$

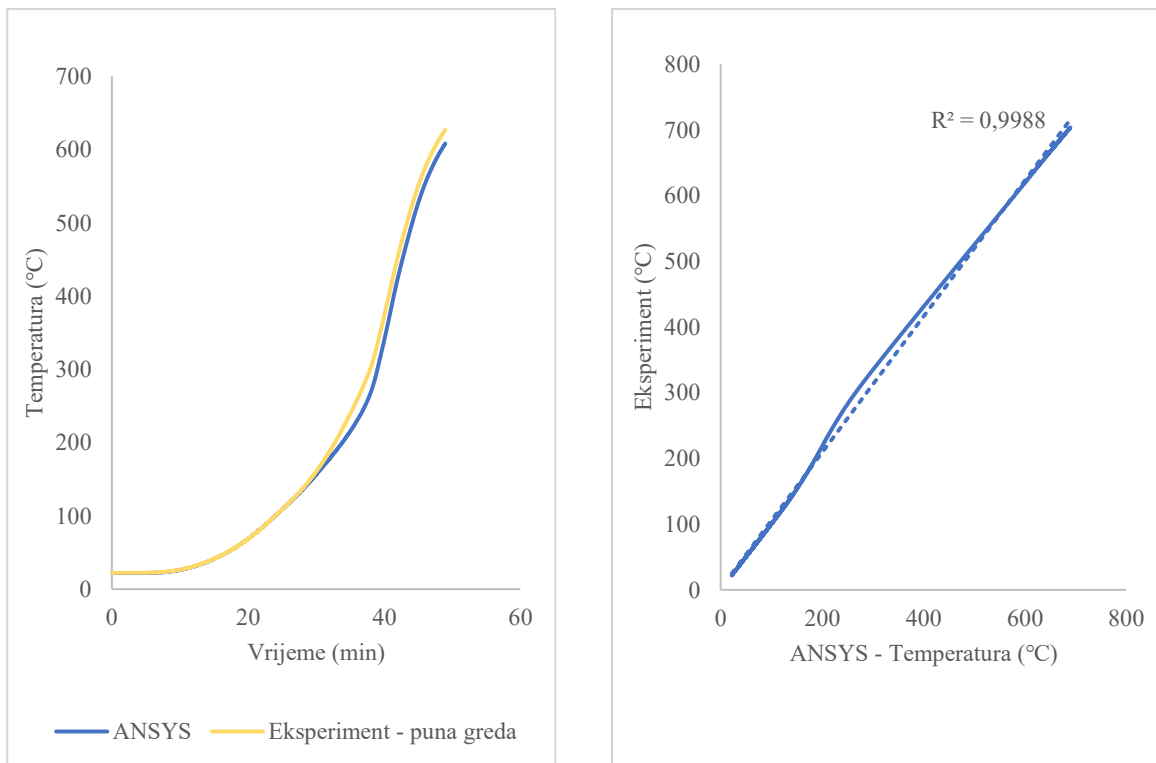
Pogreške simulacije za sve modele prikazane su u tablici 4.6, a sve prema jednadžbama (4.43) do (4.46).

Tablica 4.6 Prikaz mjere pogreške simulacije razvijenih temperatura

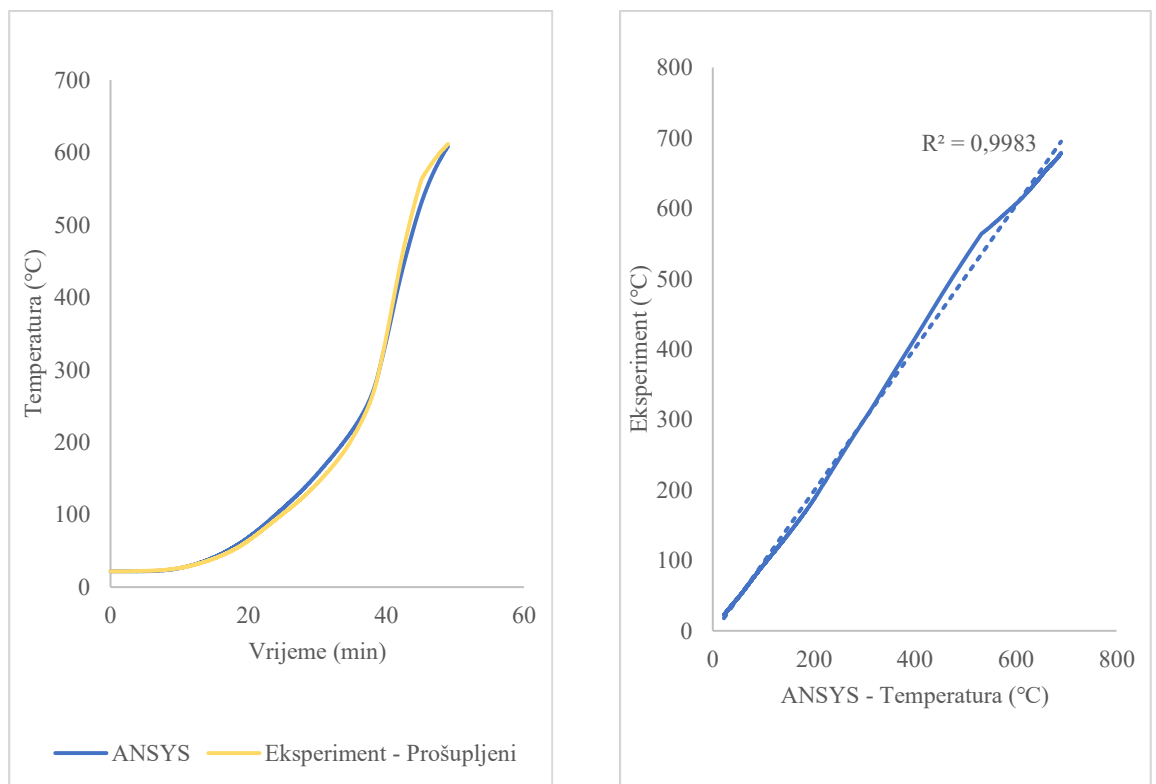
| Uzorak | n | RMSE (°C) | MAE (°C) | MAEP (%) | R ² |
|-----------------------------------|------|--------------|-------------|-------------|----------------|
| Puna greda | 3900 | 15.6 | 10.1 | 3.1 | 0.99 |
| Prošupljena greda | 3600 | 10.3 | 17.2 | 3.9 | 0.99 |
| Proušupljena sa kamenom vunom | 3900 | 15.7 | 13.4 | 5.5 | 0.99 |
| Prošupljena s prvom punom lamelom | 3900 | 27.3 | 20.8 | 7.9 | 0.99 |
| Prošupljenja sa PROMADUR-om | 4620 | 12.7 | 9.7 | 3.8 | 0.99 |
| Puna sa PROMADUR-om | 5760 | 27.3 | 19.5 | 6.3 | 0.99 |
| Prosjek | | 18.1 | 15.1 | 5.1 | 0.99 |

Što se tiče temperature, pogreška se u prosjeku mijenja od 15.1 do 18.1°C, dok je u vidu postotka, srednja postotna pogreška 5.1 %, a koeficijent R^2 pokazuje izvrsnu korelaciju

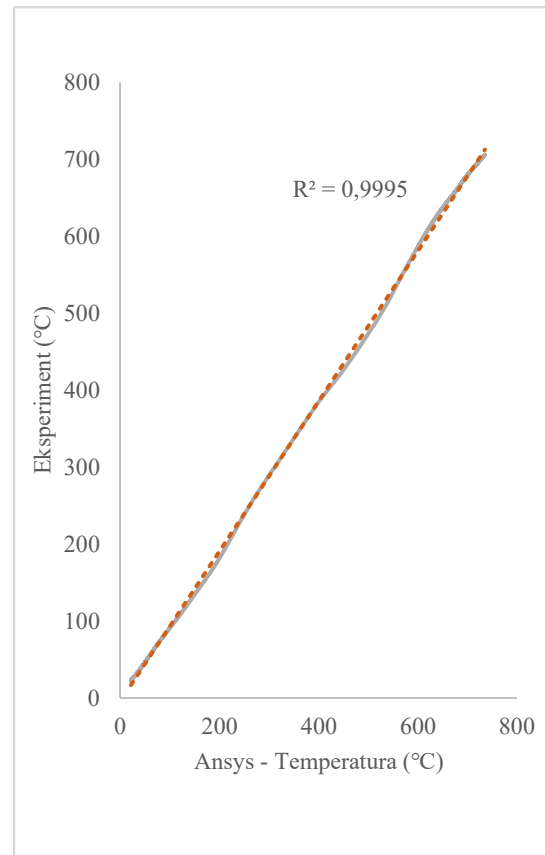
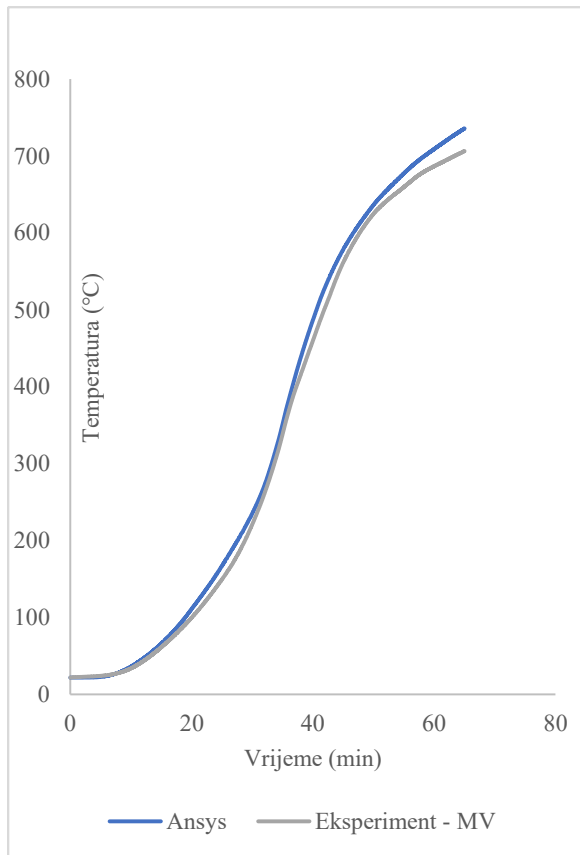
rezultata. Slika 4.36 prikazuje usporedbu temperatura svih uzoraka izračunatih pomoću ANSYS-a (apscisa) i temperature dobivenih eksperimentom (ordinata).



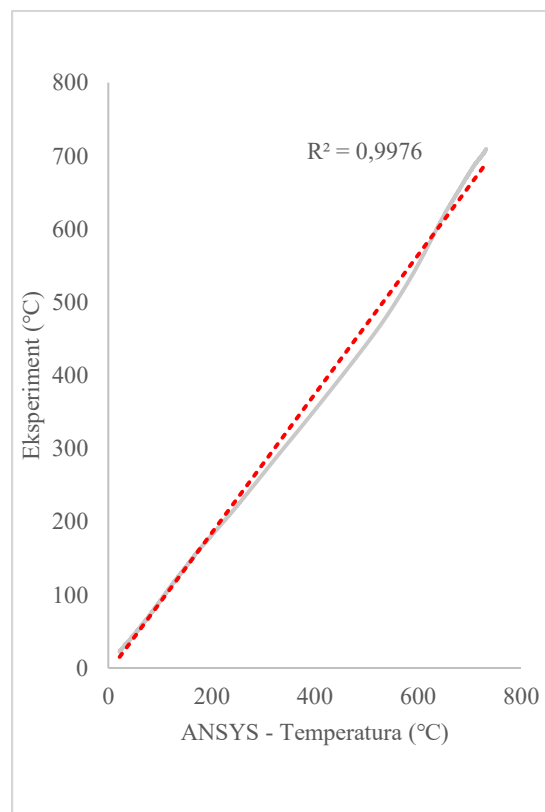
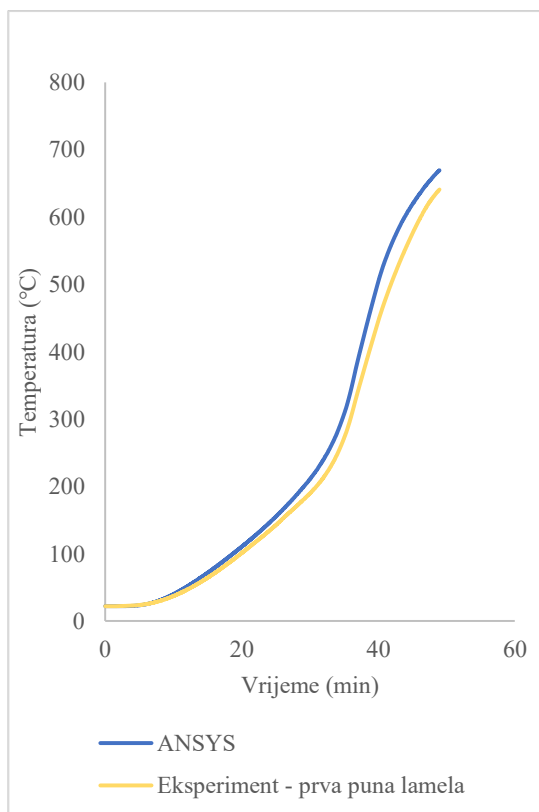
(a)



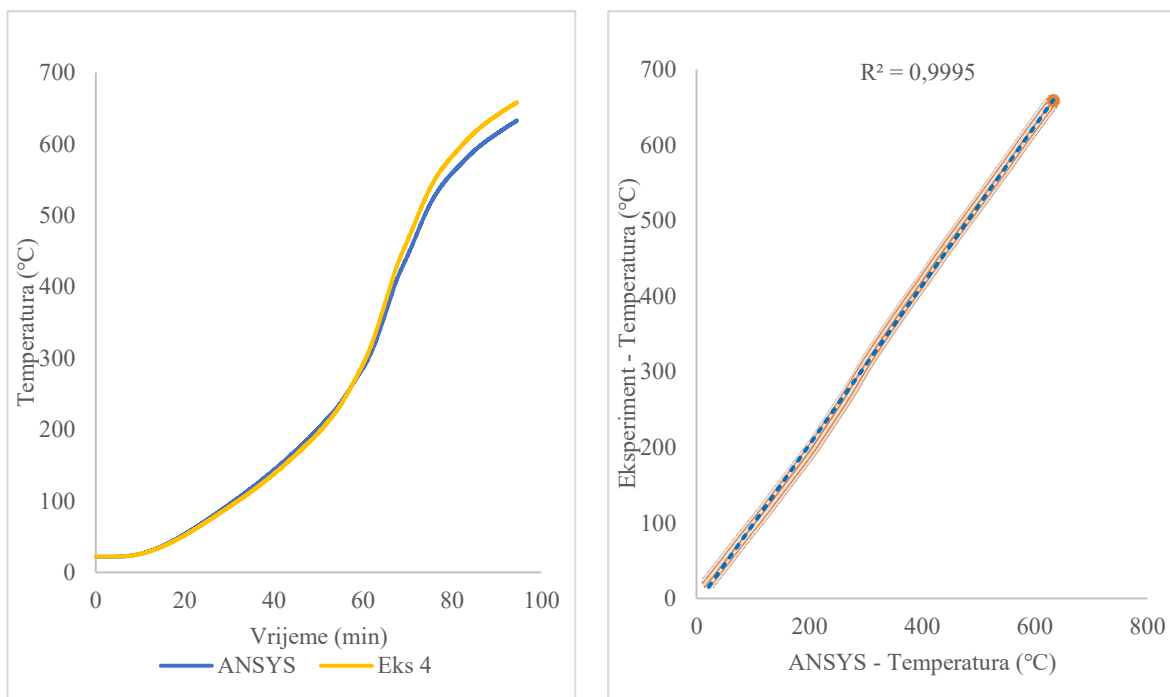
(b)



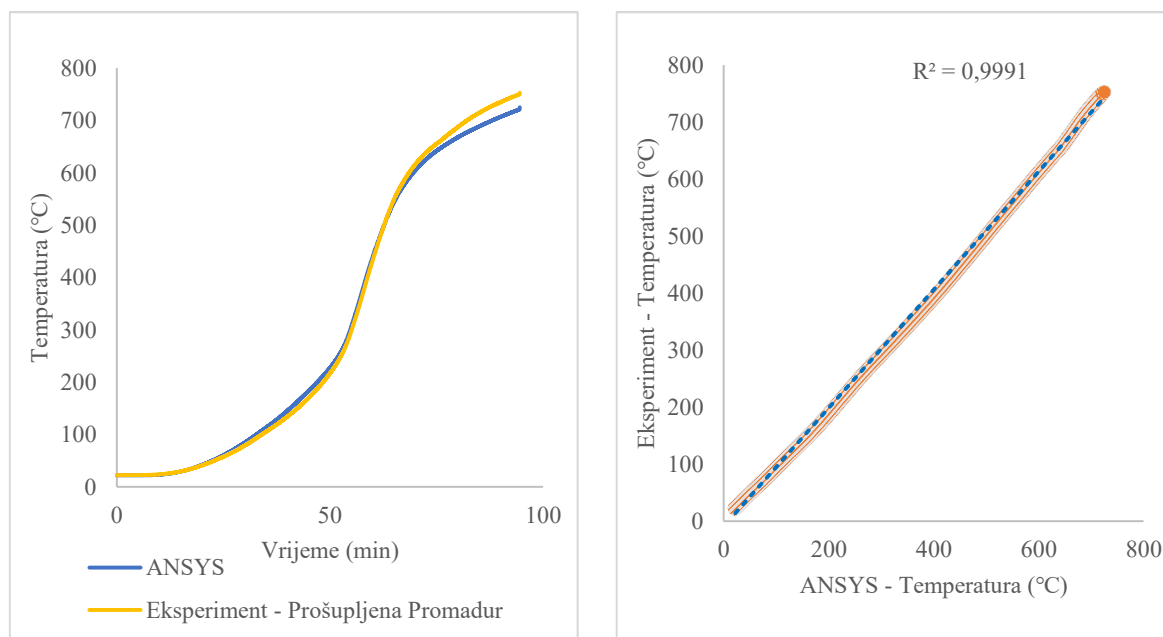
(c)



(d)



(e)



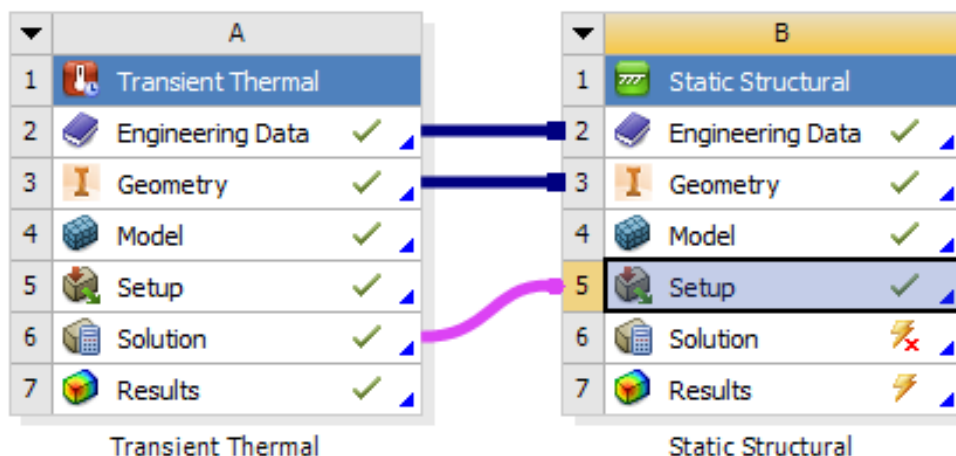
(f)

Slika 4.36 Usporedba razvijenih temperatura dobivenih ANSYS-om i eksperimentalnim istraživanjem: (a) puna greda; (b) greda sa maksimalnom prošupljenosti; (c) prošupljena greda sa ispunom od MV u prvom redu šupljina; (d) prošupljena greda sa prvom punom lamelom; (e) puna greda sa protupožarnim premazom; (f) prošupljena greda sa protupožarnim premazom

Vidljiva je dobra korelacija rezultata za sve uzorke. Svi rezultati ukazuju na pogreške u vidu temperature ispod 30 °C, te izvrsne koeficijente korelacije, što ukazuje na općenito vrlo dobru predikciju pomoću ANSYS-a. Treba naglasiti da ove greške mjere pokrivaju cijeli raspon temperatura.

4.2.3.4 Termo-mehanička numerička analiza

Nelinearna termo-mehanička analiza koristila se za procjenu ponašanja drvenih elemenata izloženih požaru. Termalna i strukturna analiza može se provesti na nekoliko načina. Prvi način je da se svaka analiza provodi zasebno (Slika 4.37).



Slika 4.37 Poveznica između termalne i strukturne analize

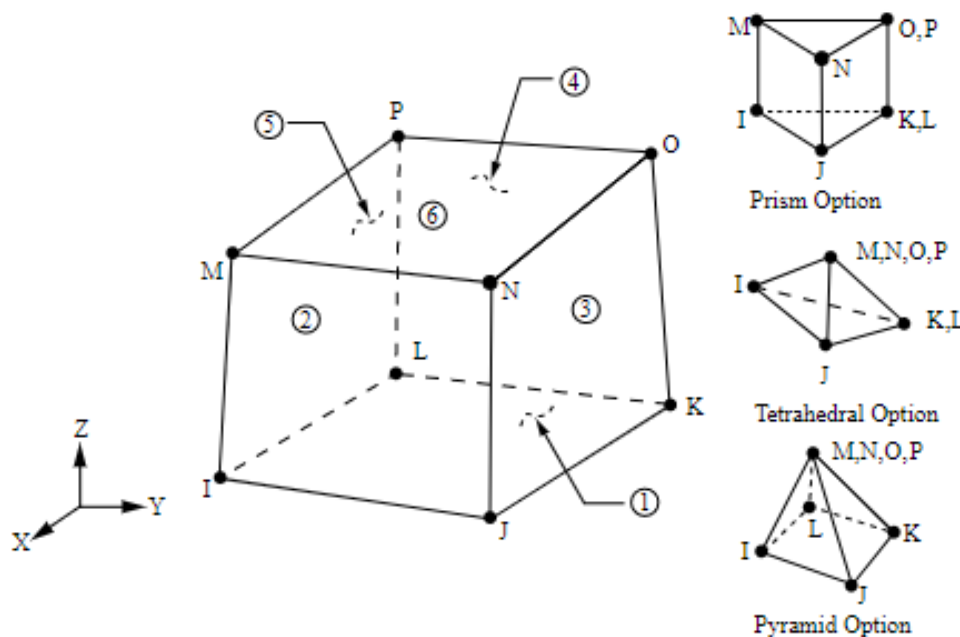
Pretpostavka je da je razvoj temperature unutar elementa neovisan o deformacijama uzrokovanim povećanjem temperature. Termalna analiza se provodi na nedeformiranom nosaču, a rezultati termalne analize se zatim implementiraju kao ulazni podaci za strukturnu analizu, kao unutarnja temperatura elementa, koja je funkcija vremena.

Razvijen je termo-mehanički numerički model za simulaciju ponašanja drvenih elemenata izloženih standardnoj ISO 834 krivulji požara, a sve kako bi se potvrdilo eksperimentalno istraživanje. Numerički model sastoji se od toplinskog i mehaničkog dijela koji su sekvencijalno povezani. Termalni model razvijen je za izračun prijenosa topline unutar elemenata (ISO 834), kondukcijom, konvekcijom i zračenjem, prema EN 1991-1-2 [8]. Na slici 4.38 prikazan je postupak numeričke analize.

| |
|--|
| <p>1. Transient thermal</p> <ul style="list-style-type: none"> •Izrada geometrije modela(" Autodesk Inventor 2021 ") |
| <p>2. Transient thermal</p> <ul style="list-style-type: none"> •Materijalne karakteristike- Engineering data •Rubni uvjeti i opterećenje - ISO 834 krivulja •Definiranje kontakata (bonded) - Connections |
| <p>3. Transient thermal</p> <ul style="list-style-type: none"> •Diskretizacija modela - Mesh •Postavke analize - Analysis settings |
| <p>4. Transient thermal</p> <ul style="list-style-type: none"> •Numerička analiza prema MKE •Rezultati termalne analize |
| <p>5. Structural Static</p> <ul style="list-style-type: none"> •Rezultati termalne analize - ulazni podaci za strukturalnu analizu kao unutarnja temperatura •Rubni uvjeti i opterećenje - vlastita težina i dodatno stalno opterećenje •Rezultati numeričke analize |

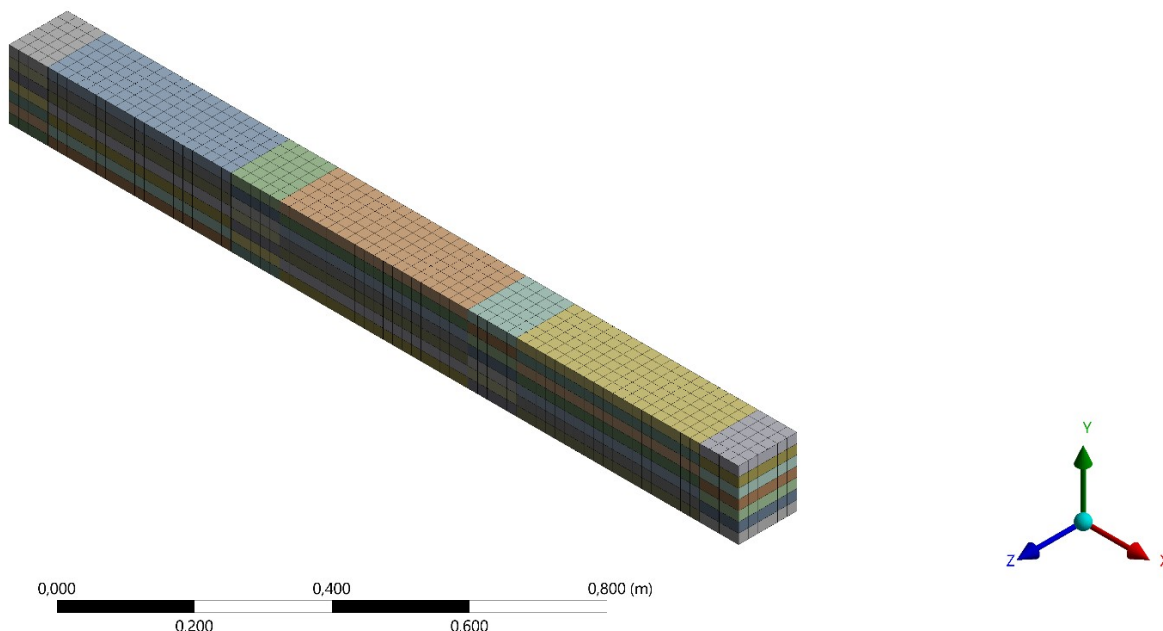
Slika 4.38 Procedura numeričkog modeliranja

Drveni element je prosta gređa na rasponu od 1400 mm. Poprečni presjek gređe je 120×140 mm. Cjelokupna geometrija modela kreirana je u softveru "Autodesk Inventor 2021" i uvezena u "ANSYS", gdje je formirana mreža konačnih elemenata i gdje su se provodile daljnje simulacije. Za model je odabran SOLID70 (vidi sliku 4.39) element s 8 čvorova i sa samo jednim stupnjem slobode (temperatura). SOLID70 ima mogućnost provođenja 3D toplinske vodljivosti.



Slika 4.39 SOLID 70

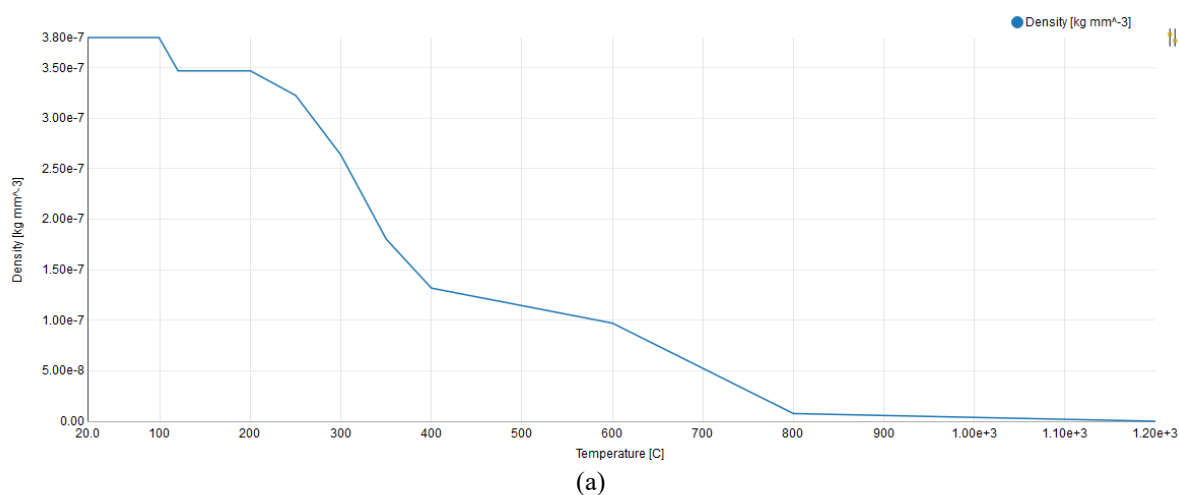
Kreirana je mreža konačnih elemenata (generirana metodom “MultiZone”) i prikazana je na slici 4.40.

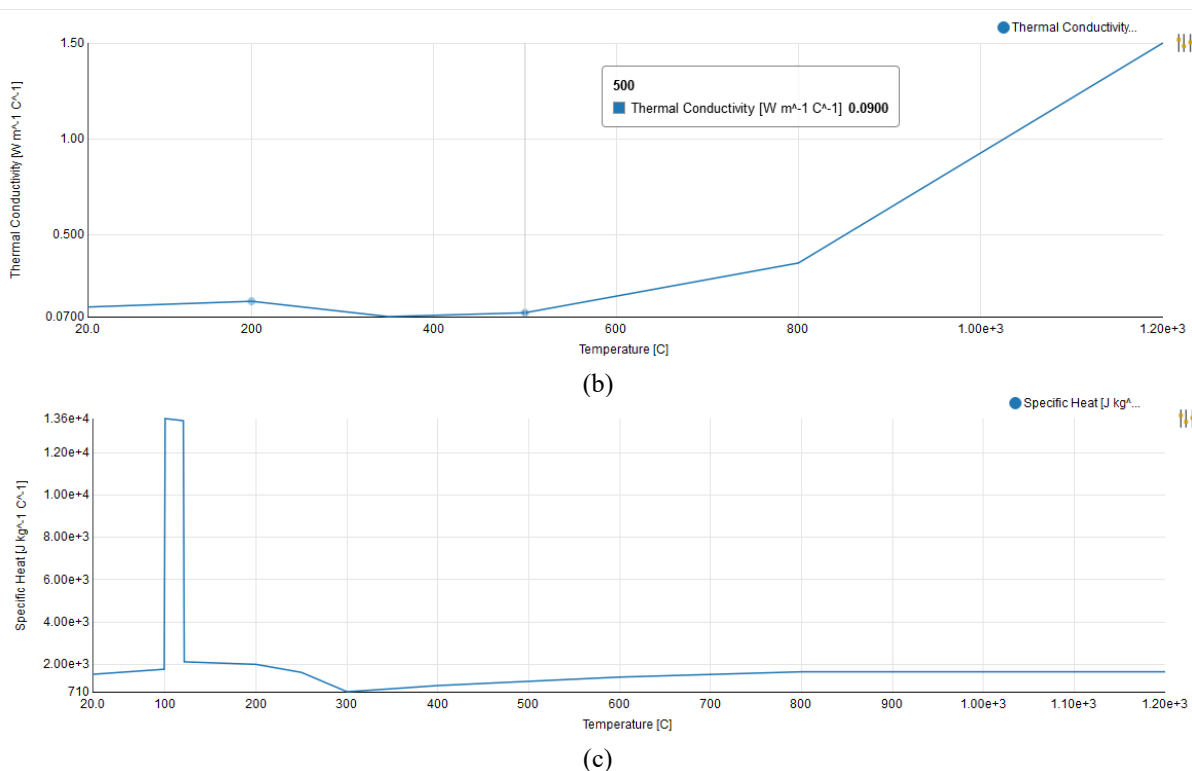


Slika 4.40 Mreža konačnih elemenata

Inverzija matrice sustava u svakoj je iteraciji računski zahtjevna, a optimizacija veličine matrice važna je u smislu praktičnosti modela, na što utječe geometrija mreže. Kvaliteta mreže može se procijeniti pomoću Mesh Metrics, u smislu kvalitete elementa, omjera, Jakobijevog omjera, faktor iskrivljenja, paralelnog odstupanja, maksimalnog kuta nagiba, iskrivljenost i kvalitete ortogonalnosti. S obzirom da se provodi nelinearna analiza, preporuča se detaljno definiranje mreže konačnih elemenata.

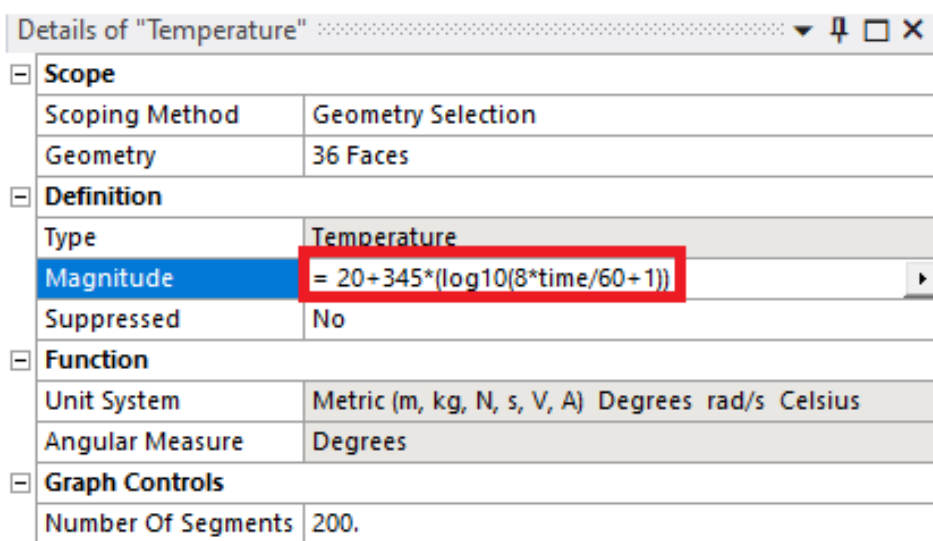
Toplinska svojstva (specifični toplinski kapacitet, gustoća i toplinska vodljivost) prikazana na slici 4.41 definirana su na sukladno EN 1995-1-2 [8].



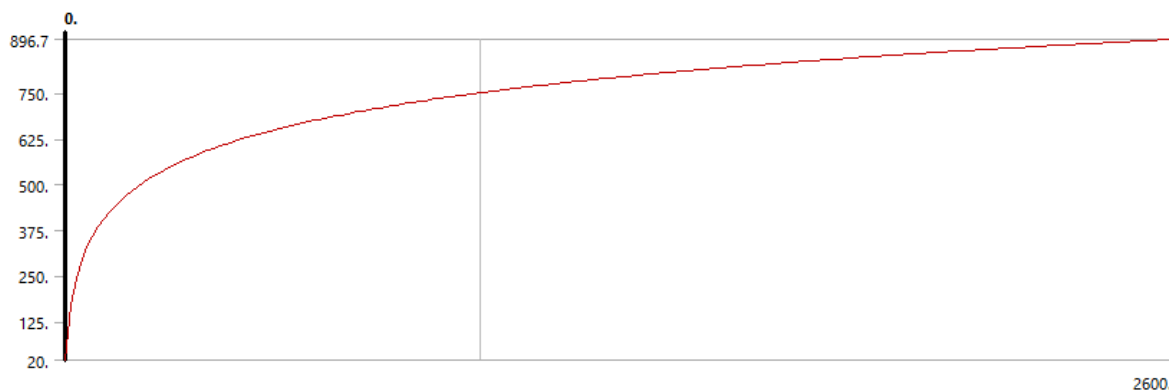


Slika 4.41 Svojstva materijala: (a) gustoća; (b) toplinska vodljivost; (c) specifični toplinski kapacitet

Prijenos topline može se provesti pomoću kondukcije, konvekcije i zračenja. Toplinska opterećenja, u smislu konvekcije i zračenja, primjenjuju se pomoću površinskih elemenata SURF152. Koeficijenti konvekcije za izložene i neizložene površine, kao i faktori emisivnosti mogu se uzeti iz EN 1995-1-2 [8]. Primijenjena je standardna požarna krivulja ISO 834 (vidi sliku 4.42)



(a)



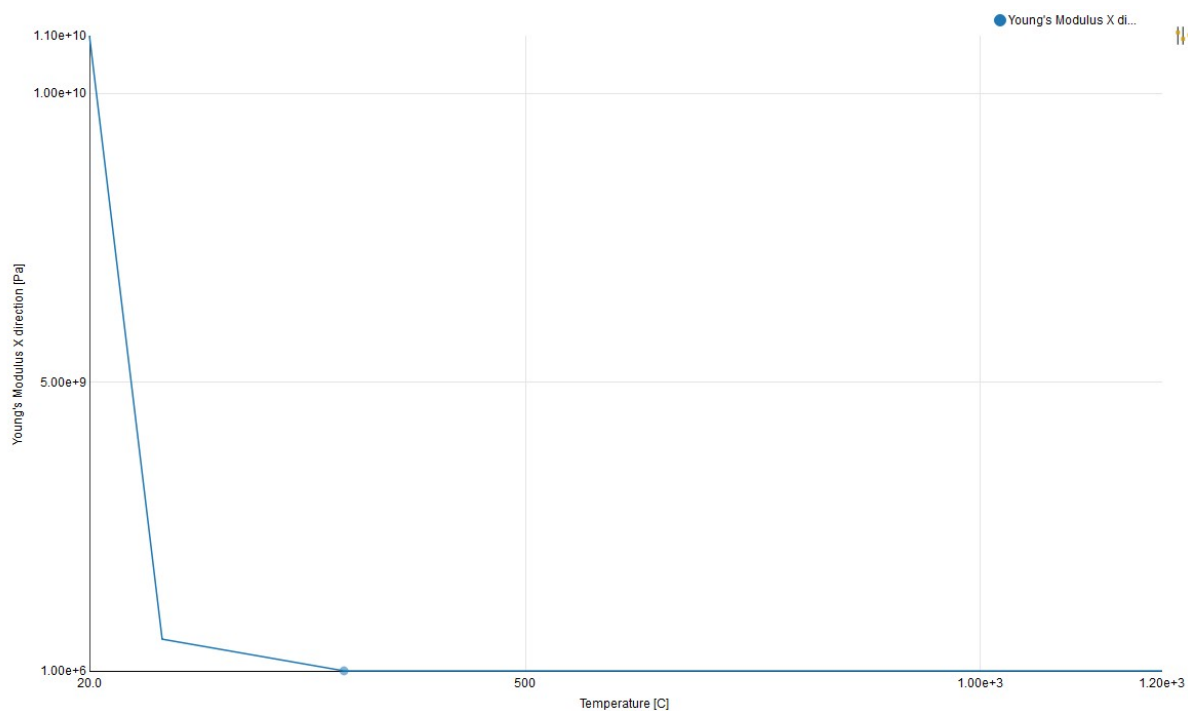
(b)

Slika 4.42 Termalno opterećenje – ISO 834 : (a) jednadžba požarne krivulje; (b) grafički prikaz

Za optimizaciju vremena proračuna, ukupno vrijeme trajanja požara treba podijeliti u nekoliko koraka opterećenja koji se sastoji od optimalnog broja podkoraka. Cilj je izračunati odgovor u što manje koraka, pod uvjetom da rješenje konvergira u svakom koraku analize. Ako je vremenski korak prevelik, bit će potrebne dodatne iteracije kako bi se pogreška smanjila ispod određene vrijednosti, pod uvjetom da je predloženi granični broj izvedenih iteracija dovoljan da rješenje konvergira. S druge strane, ako je vremenski korak premalen, može se dogoditi problem pojave prostornih oscilacija u smislu toplinskog udara [179]. U regijama s većim toplinskim gradijentom, najveći element u smjeru protoka topline treba biti povezan s najmanjom veličinom vremenskog koraka kako bi se dobili točni rezultati. Korištenje više elemenata u isto vrijeme manja veličina koraka obično daje bolje rezultate, ali koristeći više podkoraka za ista mrežu često može dovesti do manje točnih rezultata.

Za razliku od termalne analize, sa samo jednim stupnjem slobode na svakom čvoru (temperatura), u mehaničkoj analizi, postoje tri stupnja slobode na svakom čvoru elementa (x , y i z), što dovodi do dodatne kompleksnosti rješenja.

Što se tiče strukturalnog modela, geometrija i mreža konačnih elemenata su isti kao i kod termalnog modela, kao i vrsta kontakta, ali umjesto temperature definirani su pomaci u 3 smjera (u_x , u_y , u_z) kao stupnjevi slobode. Zbog toga je uvedena nova vrsta elementa. Za mehaničku analizu odabran je linearni tip SOLID45 elementa s 8 čvorova. Za drvo su korišteni zadani mehanički parametri iz EN 1995-1-1 [1], a temperaturni učinak izračunat je na temelju EN 1995-1-2 [8] koja propisuje da su modul elastičnosti i čvrstoća drva smanjeni gotovo na nulu na 300 °C, ali to može dovesti do divergencije u MKE, pa su mehanička svojstva na 280 °C primijenjena do 1200 °C. kao što je prikazano na slici 4.43 i tablici 4.7. Ove vrijednosti su značajno niže od početnih vrijednosti, pa to ne utječe značajno na rezultate.



Slika 4.43 Modul elastičnosti

Tablica 4.7 Materijalne karakteristike pri različitim temperaturama

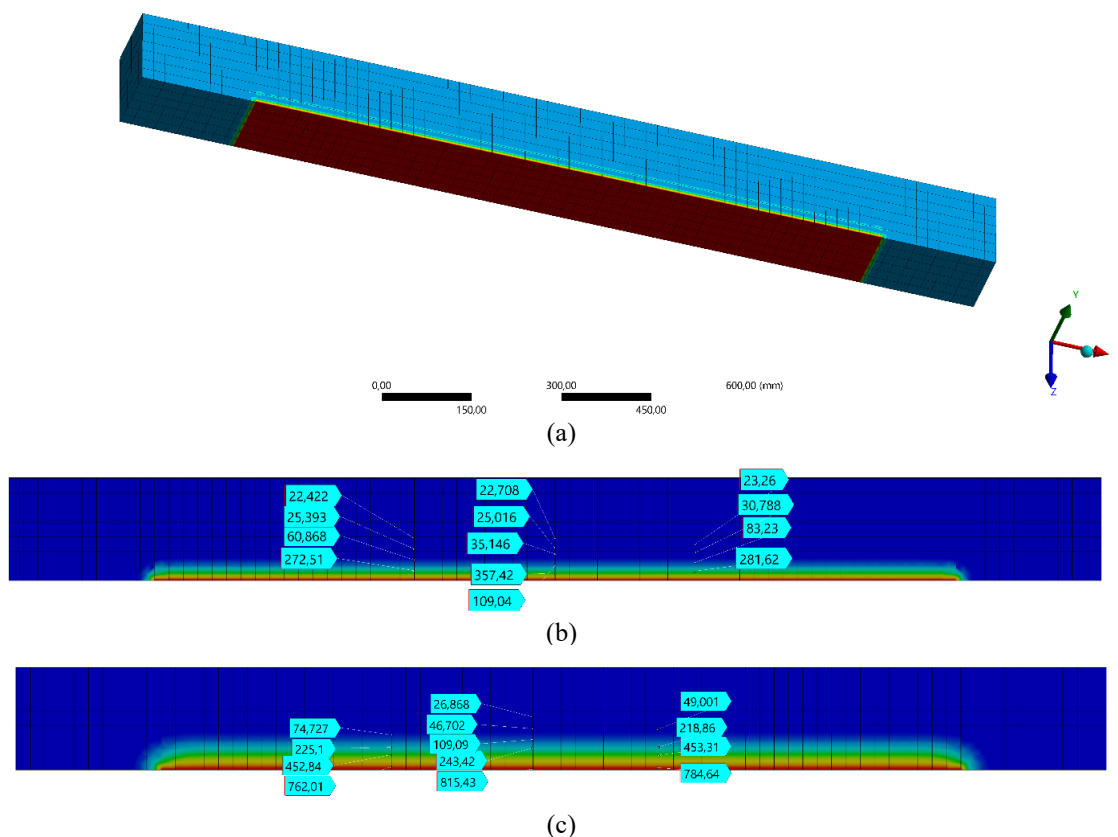
| Temperatura (°C) | Modul elastičnosti - X smjer (MPa) | Modul elastično sti - Y smjer (MPa) | Modul elastično sti - Z smjer (MPa) | Poisson-ov koeficijent XY | Poisson-ov koeficijent YZ | Poisson-ov koeficijent XZ | Modul posmika - XY (MPa) | Modul posmika - YZ (MPa) | Modul posmika - XZ (MPa) |
|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 22 | 11000 | 350 | 350 | 0.42 | 0.245 | 0.42 | 295 | 33 | 295 |
| 100 | 5500 | 175 | 175 | 0.42 | 0.245 | 0.42 | 148 | 16 | 148 |
| 300 | 1 | 1 | 1 | 0.42 | 0.245 | 0.42 | 1 | 1 | 1 |
| 1200 | 1 | 1 | 1 | 0.42 | 0.245 | 0.42 | 1 | 1 | 1 |

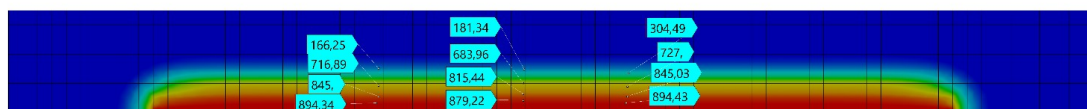
Strukturni odgovor analizira se u dva koraka. U prvom koraku primjenjuje se opterećenje koje se sastoji od vlastite težine i dodatnog stalnog opterećenja koje je održavanog konstantno tijekom eksperimenta. U drugom koraku pridružuje se unutarnja temperatura grede, izračunate u prethodnom koraku, simulirajući toplinski odgovor drvene grede tijekom požara (4.42).

Toplinski i mehanički modeli morali su biti povezani kako bi se uzeli u obzir rezultati toplinske analize (požara) u mehaničkom modelu. Kao što je prethodno prikazano, svojstva materijala definirana su na određenim temperaturama. Između njih, ANSYS koristi linearnu interpolaciju i odabire prava svojstva za trenutnu distribuciju topline. Nakon toplinske analize elementi su redefinirani (od SOLID70 do SOLID45), te su uvedeni pokretni kontaktni elementi. Za definiranje toplinskog opterećenja u mehaničkom modelu u svakom trenutku bili su dostupni

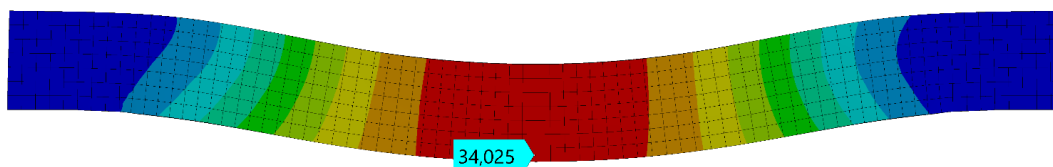
rezultati toplinske analize (uz automatsku interpolaciju između izračunatih podataka), pa je ono primijenjeno kao unutarnje opterećenje. Definiranjem podkoraka, unutarnja tjelesna temperatura i deformacija mogu se procijeniti u bilo kojem vremenskom koraku. Postavke analize pružaju informacije o opcijama rješenja koje će implementirati u „Solveru“ i tako se utječe na učinkovitost proračuna. Cjelokupna analiza izvodi se u više koraka opterećenja. Zbog prirode vanjskog toplinskog opterećenja (ISO 834 krivulja požara), početni nagli porast temperature treba riješiti manjim vremenskim koracima. Veličina vremenskih koraka može se definirati brojem podkoraka unutar određenog koraka opterećenja. Može se dodijeliti konstantna vrijednost ili vrijednosti gornje i donje granice, omogućujući SOLVERU da bira unutar utvrđenih granica, ovisno o konvergenciji. Ako ne postigne konvergencija, analiza će biti prekinuta.

Rezultati termo-mehaničke analize pokazuju dobro slaganje s rezultatima požarnog ispitivanja. Eksperimentalno istraživanje završeno u 63. minuti kada se desio kolaps grede. Početni vertikalna deformacija u sredini grede od konstantnog opterećenja bio je 4.67 mm, na osloncima prosječno 0.6 mm. Nakon 15 minuta konstantnog opterećenja greda je bila izložena požaru pri čemu se deformacija postupno povećavala (opadanje vrijednosti modul elastičnosti i čvrstoće) do vrijednosti od 34 mm, nakon čega se greda urušila.





(d)



(e)

Slika 4.44 Numerička analiza: (a) Početak simulacije; (b) Termalna analiza-temperatura u početku testa; (c) Termalna analiza-temperatura u 10. minuti; (d) Termalna analiza-temperatura u 30. minuti; (e) Termalna analiza-temperatura na kraju testa

Numeričke simulacije mogu pružiti detaljniji uvid u ponašanje lijepljenih drvenih elemenata u požaru. Termo-mehanička analiza provedena je u softverskom paketu ANSYS gdje su simulacije potvrdile eksperimentalne rezultate. Nadalje, moguće je napraviti parametarsku analizu za različite geometriju i uvjete opterećenja s točno definiranim karakteristikama opterećenja i materijala, a model može uključivati kretanje vlage, pukotine uzrokovane toplinom, odvajanje pougljenjenog sloja i konačno, pojavu delaminacije. Kako bi se izbjeglo dugo vrijeme proračuna, preporuča se koristiti model latentne topline ili entalpije za vlažnost. Budući da nema značajne razlike u veličini konačnih elemenata za 1 i 3 mm, preporučuje se 3 mm kako bi se smanjilo vrijeme izračuna. Postupci modeliranja su od velike pomoći u projektiranju takvih sustava i na njima se može temeljiti budući istraživački rad.

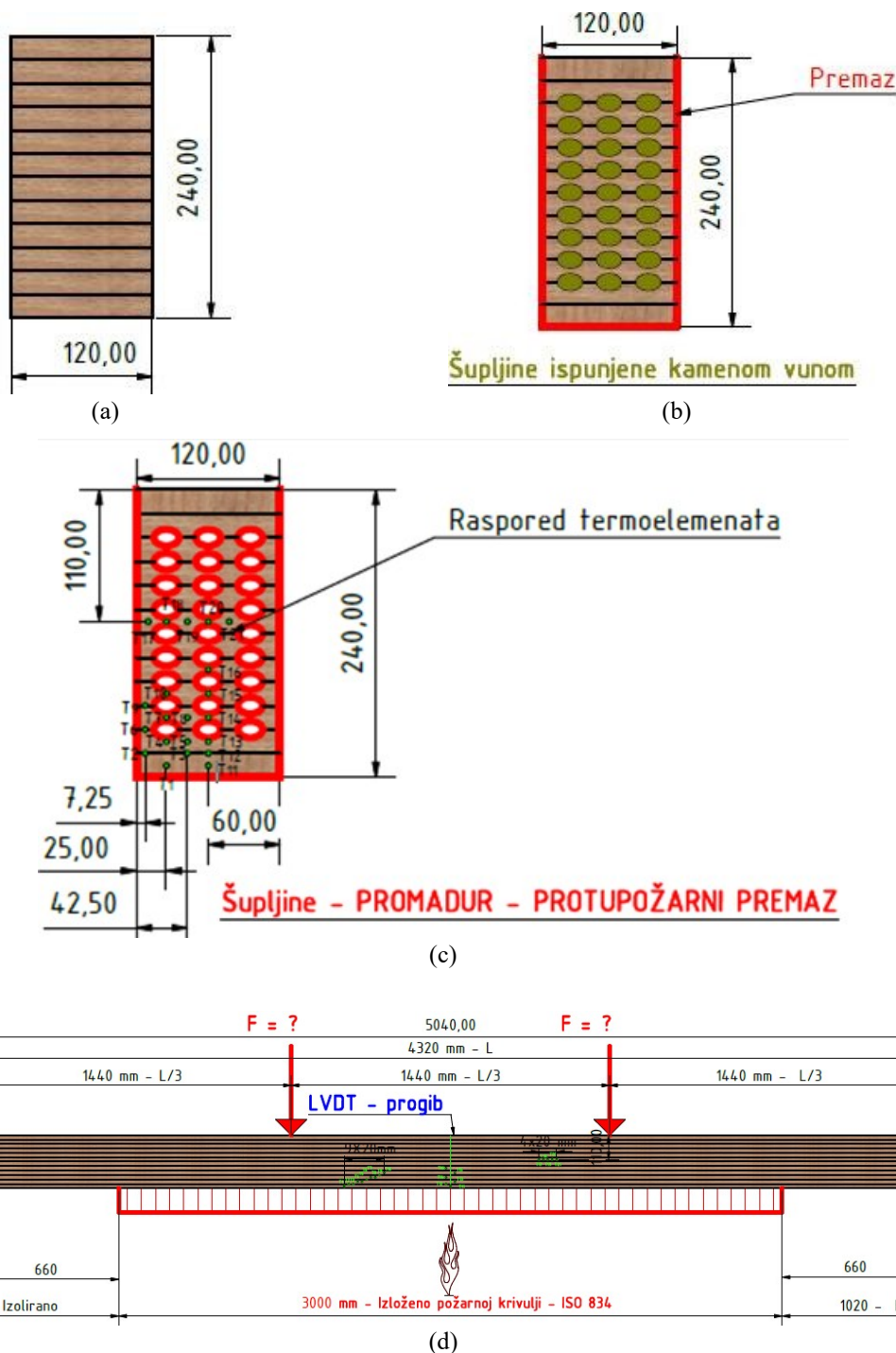
Potrebno je uskladiti metodologiju ispitivanja interakcije ljepila i drva u uvjetima okoline i požara. Ovo istraživanje je preliminarni korak koji može poslužiti budućem razvoju univerzalne metodologije, koja se odnosi na delaminaciju. Kako bi se utvrdilo ponašanja linije lijepljenja u uvjetima požara zajedno s fenomenima delaminacije i otpadanja pougljenog sloja, provedeno je daljnje istraživanje koje je objašnjeno u nastavku.

4.3 Eksperimentalno istraživanje u požarnim uvjetima – ispitivanje drvenih greda izloženih požaru s tri strane

4.3.1 Uvod i priprema uzoraka

Ovo poglavlje sadrži rezultate požarnog ispitivanja lijepljenih lameliranih drvenih elemenata sa punim i prošupljenim poprečnim presjekom, u skladu s postupcima referentnih normi EN 1363-1:2020 [28] i HRN EN 1365-3:2002 [29]. Dimenzije uzoraka bile su iste kao i kod ispitivanja u ambijentnim uvjetima ($b \times h \times l = 120 \times 240 \times 5040$ mm), opisanog u poglavlju 3.3.2. Vлага je izmjerena u svakom uzorku i prosječna ravnotežna vlažnost je bila 10.7 % za sve uzorke.

Uzorak lameliranog drveta sastojao se od ukupno dvanaest međusobno zalijepljenih lamela. Lamele su izrađene od mekog drveta (jelovine), debljine 20 mm i izrađene tako da su vlakna unutar drveta usmjerena u smjeru duljine grede (Slika 4.45). Lamele su lijepljene ljepilom K. 510.0 proizvođača Klebchemie-M.G. Becker GmbH [103]. Ispitana su tri različita tipa drvenih greda kako bi se usporedili inovativni prošupljeni lijepljeni lamelirani drveni elementi sa standardnom GL gredom. Stoga, prvi uzorak je bio standardna GL drvena greda, a druga dva su bile prošupljene GL grede s protupožarnom zaštitom. U prvoj prošupljenoj gredi zaštita je bila protupožarni premaz, Promadur [180], apliciran po obodu grede i unutar šupljina, dok je u drugoj kamena vuna postavljena u šupljine, a protupožarni premaz također je nanesen na vanjske, požaru izložene površine uzorka. U slučaju požar Promadur ekspandira stvarajući zaštitnu izolacijsku pjenu koja štiti površinu od kontakta sa zrakom (kisikom), smanjuje zapaljivost i usporava prijenos energije (topline) iz požara na drvene elemente, tako povećavajući požarnu otpornost drvenih greda. Generalna ideja bila je koristiti šupljine na način da se (djelomično) zaustavi prodor vatre i temperature prema unutrašnjosti grede. Na slici 4.45 prikazani su različiti tipovi poprečnih presjeka ispitivanih drvenih greda, te shema opterećenja i položaj termoelemenata unutar uzoraka.

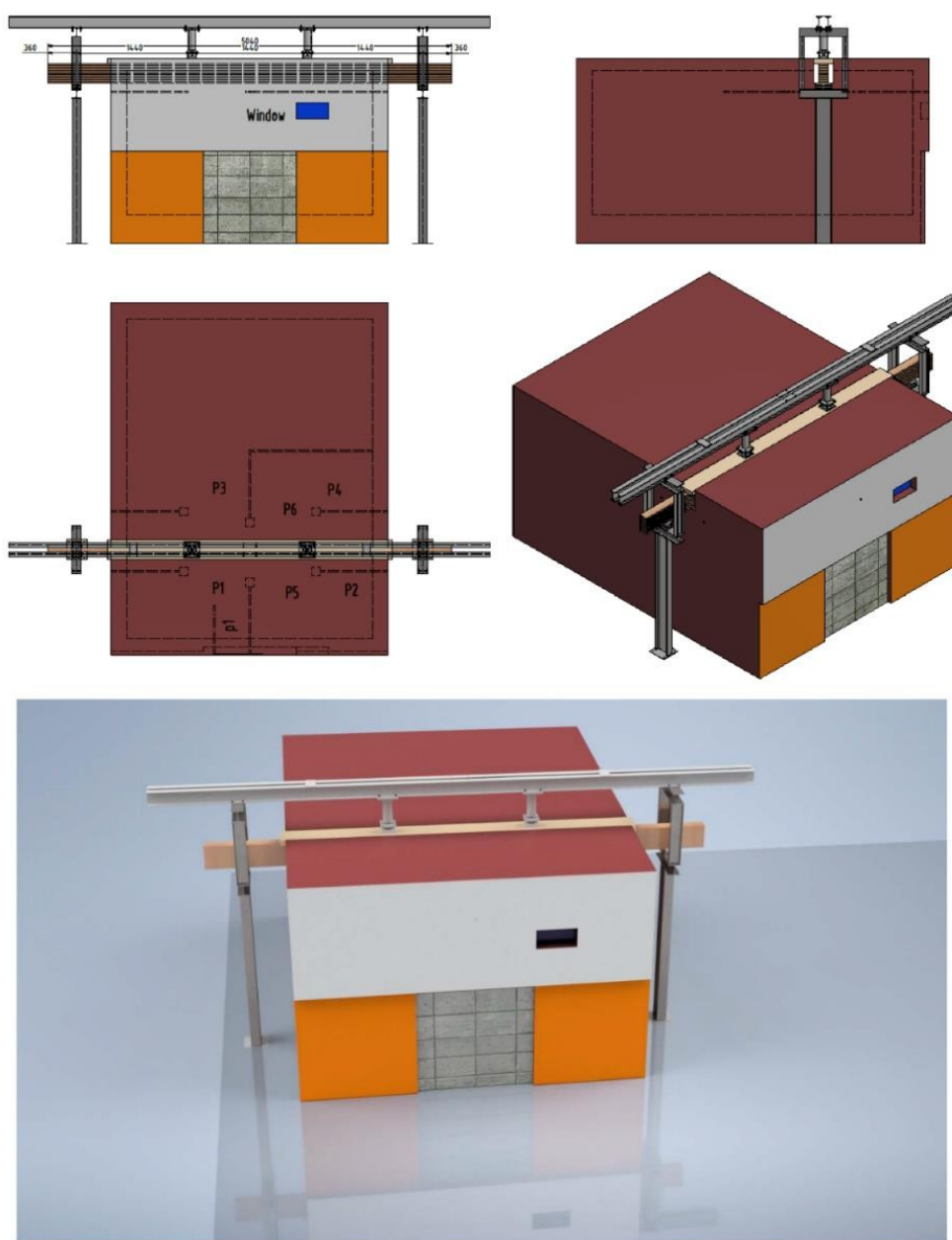


Slika 4.45 Postavke požarnog ispitivanja : (a) normalna greda; (b) prošupljena greda sa ispunom od kamene vune; (c) prošupljena greda sa protupožarnim premazom; (d) rubni uvjeti i opterećenje

Uzorci su izloženi požaru s tri strane (donja i bočne). Uzorci su postavljeni je na nosivu konstrukciju opremljenu hidrauličkim sustavom za unos opterećenja. Nosiva konstrukcija postavljena je u horizontalnu ispitnu peć na način da je požaru bio izložen samo dio grede duljine 3000 mm (vidi sliku 4.45d) . Statički sustav bila je prosta greda. Oslonci grede se nalaze

izvan ispitne peći na međusobnom razmaku od 4320 mm. S jedne strane grede je oslonac izveden kao nepomični, a s druge strane kao klizni.

Strop ispitne peći izveden je primjenom podnih ploča od porobetona debljine 150 mm. U središnjem dijelu peći je između ploča ostavljen otvor širine 320 mm unutar kojeg je ugrađen uzorak. Na taj način je omogućena izloženost požaru s tri strane uzorka. Na gornju površinu uzorka postavljena je ploča od kalcijevog silikata debljine 40 mm dovoljne čvrstoće da se preko nje može primijeniti opterećenje. Ploča je bila takve širine da zatvara otvor u stropu ispitne peći. Zazor između uzorka i rubova ispitne peći je zatvoren s keramičkom vunom. Konstrukcijski sustav i pozicija uzorka u ispitnoj peći prikazani su na slici 4.46.



Slika 4.46 Peć i opća shema ispitivanja požara

Prije ugradnje u ispitnu peć, ispitni uzorak je postavljen u laboratorij gdje su održavani ambijentalni uvjeti na približno 50 % relativne vlažnosti i 20 °C, u skladu s HRN EN 1363-1: 2020, točka 8.1 [181].

Požar je realiziran pomoću šest plamenika na tekuće gorivo (lož ulje), sukladno normi HRN EN 1363-1: 2020, poglavlja 4.1 i 4.2 [181]. Temperatura zraka u prostoriji za ispitivanje 24 sata prije ispitivanja požarom održavana je na 20 (±5) °C. Zagrijanost peći određena je standardnom temperaturnom krivuljom ISO 834, sukladno normi HRN EN 1363-1: 2020, 5.1 [181] i definirana prema sljedećoj formuli:

$$T = 345 \log(8t + 1) + 20 \quad (4.47)$$

gdje je T prosječna temperatura u peći (°C), a t vrijeme u minutama

Temperatura u peći mjerena je sa šest termoelemenata tipa K, čiji je vrući spoj učvršćen u geometrijskom središtu ploče u skladu s normom HRN EN 1363-1: 2020, 4.5.1.1 [181]. Termoelementi su ravnomjerno raspoređeni duž ispitnog uzorka i postavljeni tako da nisu u kontaktu s otvorenim plamenom iz plamenika i da su udaljeni 100 mm od požaru izložene strane ispitnog uzorka.

Statički predtlak u ložištu ispitne peći održavan je u rasponu od 15 ± 3 Pa. Senzor - mjerач postavljen je tako da je tlak mjeran 100 mm ispod razine ugrađenog ispitnog uzorka i reguliran zatvaranje dijela glavnog i rasteretnog dimnjaka peći.

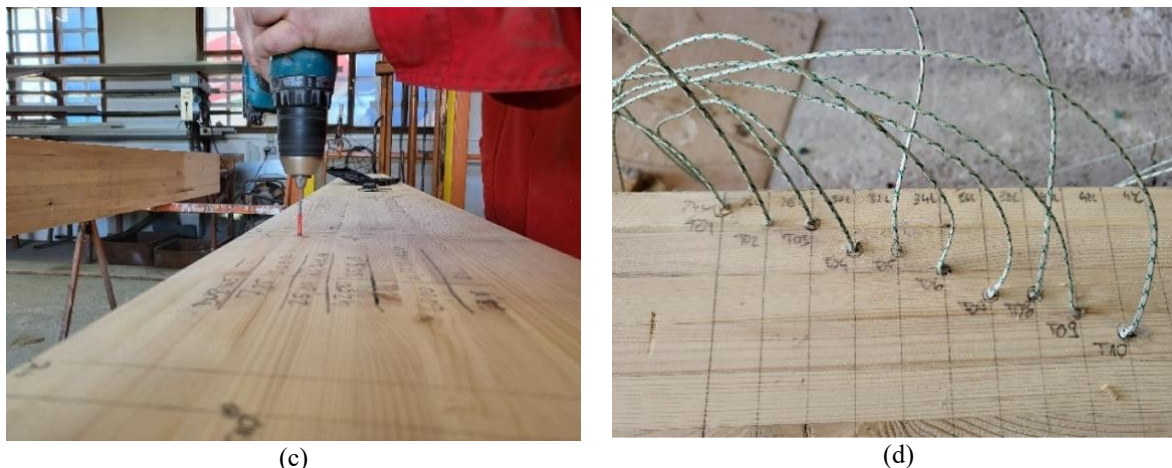
Temperature unutar ispitnog uzorka mjerene su s 21 NiCr-Ni termoelementom, (tip K) žica promjera $\varnothing 0,5$ mm. Postupak ugradnje termoelemenata vidljiv je na slici 4.47. Nakon umetanja, termoelementi su dodatno učvršćeni drvenim klinovima, a rupe su popunjene silikonom otpornim na toplinu. Na taj način je u potpunosti osiguran položaj i dubina ugradnje termoelemenata.



(a)



(b)

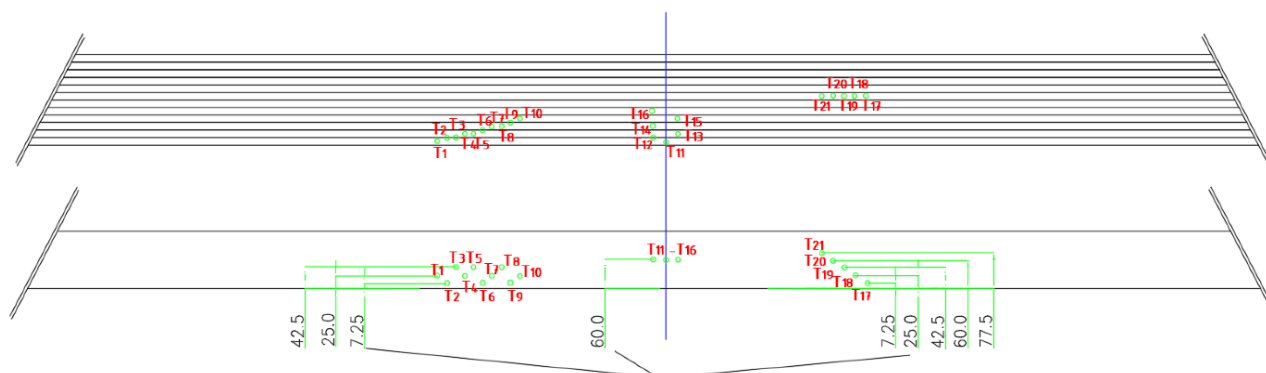


Slika 4.47 Postupak postavljanja termoelementa: (a) označavanje grede; (b) mjerenje i označavanje alata; (c) bušenje rupa; (d) ugradnja termoelemenata

Raspored termoelemenata prikazan je u tablici 4.8 i slici 4.48, dok je dubina ugradnje termoelemenata prikazana u tablici 4.9.

Tablica 4.8 Mjerne točke – raspored termoelemenata

| Mjerna točka | Pozicija |
|--------------|-----------------------------------|
| 1, 11 | sredina 1. lamele |
| 2, 3, 12 | linija lijepljenja—1. i 2. lamela |
| 4, 5, 13 | sredina 2. lamele |
| 6 | linija lijepljenja—2. i 3. lamela |
| 7, 8, 14 | sredina 3. lamele |
| 9 | linija lijepljenja—3. i 4. lamela |
| 10, 15 | sredina 4. lamele |
| 16 | sredina 5. lamele |



Slika 4.48 Raspored termoelemenata

Tablica 4.9 Dubina instalacije termoelemenata

| Termoelementi | Dubina instalacije; udaljenost od izložene strane |
|------------------|--|
| 2, 6, 9 i 17 | 7.25 mm |
| 1, 4, 7, 10 i 18 | 25 mm |
| 3, 5, 8 i 19 | 42.5 mm |
| 11–16 i 20 | 60 mm |
| 21 | 77.5 mm |

Raspored termoelemenata odabran je tako da obuhvati mjerenja temperature sa svih izloženih strana. Termoelementi su podijeljeni u tri skupine po sedam termoelemenata u svakoj seriji ovisno o njihovom položaju u snopu. Skupina termoelemenata T11 – T16 predviđena je za mjerenje razvoja temperature od utjecaja izloženosti požaru s donje strane, skupina T17 – T21 za mjerenje temperature za koje se pretpostavlja da uglavnom ovise o izloženosti požaru sa bočnih strana grede, dok je skupina termoelemenata T1 – T10 služila za određivanje brzine pougljenja (višestrani požar) i razvoja temperature u kutu elementa (utjecaj požara s donje i bočne strane), uzimajući u obzir zaobljenja i pukotine. Osim razvoja temperature, mjeren je i progib D_1 , u sredini raspona grede. Da bi kriteriji požarne otpornosti (nosivost) bili ispunjeni, progib mora biti manji od:

$$D_{limit} = \frac{L^2}{(400 \cdot d)} = 4320^2 / (400 \times 240) = 194.4 \text{ mm} \quad (4.48)$$

Nadalje, brzina prirasta deformacije mora biti manja od:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit} = \frac{L^2}{9000 \cdot d} = \frac{4320^2}{9000 \times 240} = 8.64 \text{ mm/min} \quad (4.49)$$

Do otkazivanja prema kriterijima nosivosti dolazi kada su ispunjeni sljedeći uvjeti:

$$D_1 \geq 1.5 \times D_{limit} \geq 1.5 \times 194.4 = 291.6 \text{ mm} \quad (4.50)$$

ili

$$D_1 > D_{limit} \rightarrow D_1 > 194.4 \text{ mm} \quad (4.51)$$

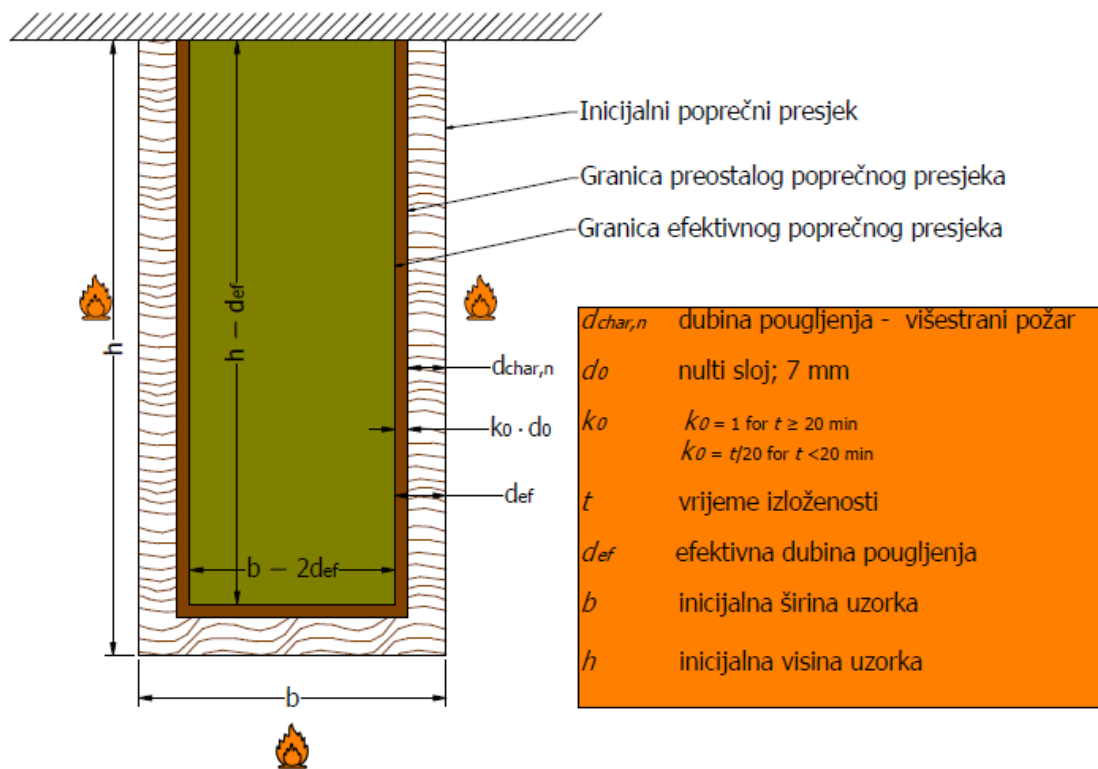
i

$$\left(\frac{dD_1}{dt}\right) > \left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit} \rightarrow \left(\frac{dD_1}{dt}\right) > 8.64 \text{ mm/min} \quad (4.52)$$

Uvjeti opterećenja primijenjeni su prema normi HRN EN 1365-3: 2002, točka 7.3 [182].

Požarna otpornost za normalnu GL drvenu gredu može se procijeniti definiranjem efektivnog poprečnog presjeka (vidi sliku 4.49) prema EN 1995-1-2 [8] i usporedbom stvarnog

naprezanja prouzročeno savijanjem, koje ovisi o preostalom poprečnom presjeku u određenom trenutku.



Slika 4.49 Definicija idealnog efektivnog poprečnog presjeka (EN 1995-1-2, 2004 [8]).

$$I_{y,ef}(t) = \frac{((h - d_{ef}(t))^3 \cdot (b - 2d_{ef}(t)))}{12} \quad (4.53)$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}/I_{y,ef}(t) \cdot h - d_{ef}(t)}{2} \leq f_{m,u,occ} \quad (4.54)$$

Vrijednosti za β_n , k_0 i d_0 preuzete su iz Eurokoda 5 (EN 1995-1-2, 2004) [8]:

$$\beta_n = 0.8 \frac{mm}{min}; k_0 = 1; d_0 = 7 mm \quad (4.55)$$

Moment (djelovanje) ovisi o razini opterećenja $m_{u,fi}$, koja ovisi o momentu otpora pri ambijentnoj temperaturi:

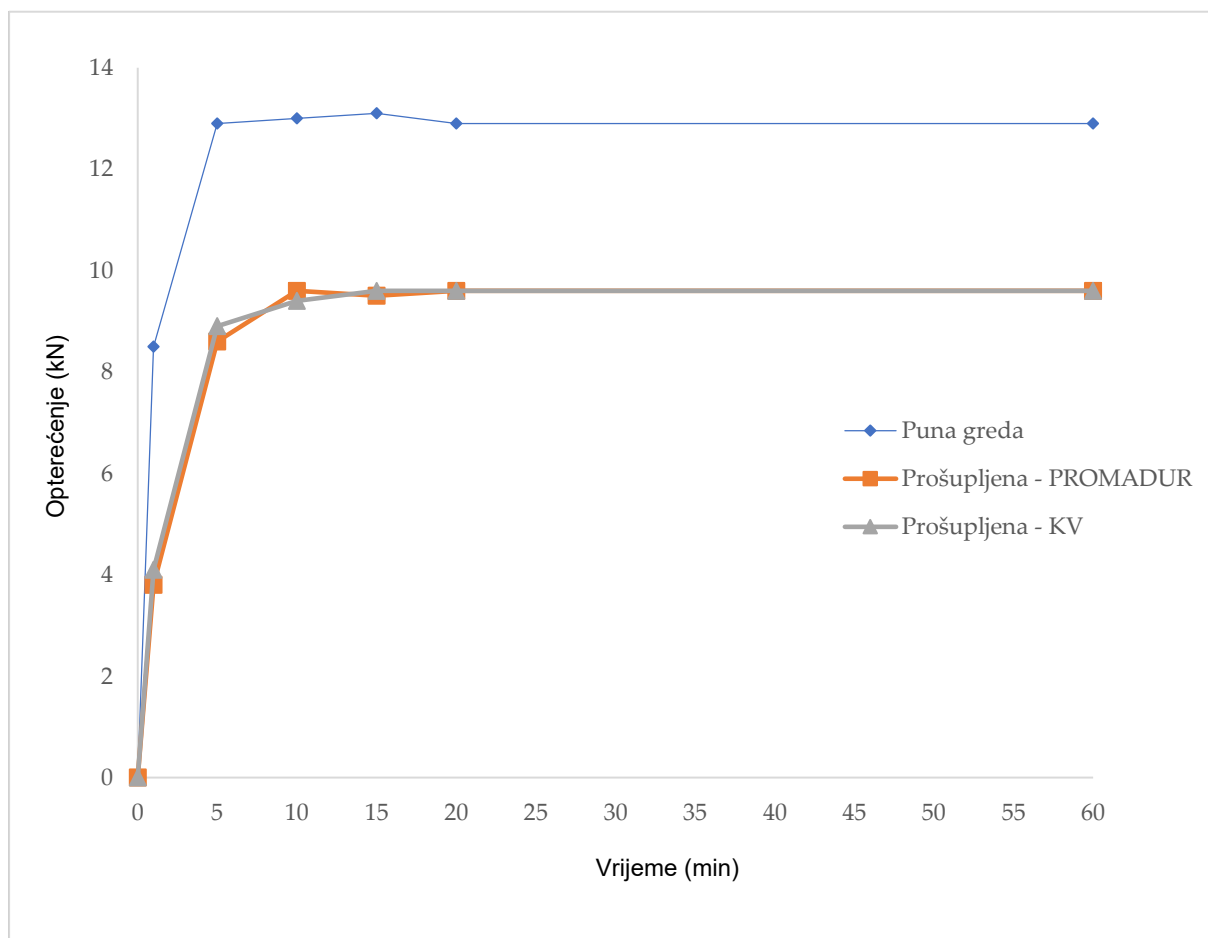
$$I_{y,20} = \frac{h^3 b}{12} \quad (4.56)$$

$$M_{Ed} = m_{u,fi} \cdot \frac{(2 \cdot I_{y,20} \cdot f_{m,u,occ})}{h} \quad (4.57)$$

To znači da požarna ne ovisi o čvrstoći na savijanje, već o faktoru razine opterećenja.

$$m_{u,fi} \leq \frac{(h - d_{ef}(t))^2 \cdot (b - 2d_{ef}(t))}{(h^2 \cdot b)} \quad (4.58)$$

Primijenjenu razinu mehaničkog opterećenja u požarnom ispitivanju potrebno je definirati prije požarnog ispitivanja. Vrijeme je jedini nepoznati parametar koji je ostao u nejednadžbi (4.58), što znači da se može lako izračunati za svaku razinu opterećenja. U ovom istraživanju opterećenje je definirano uvažavajući granično stanje uporabljivosti, odnosno uvjet dopuštenog progiba ($L/300$) koji za ovaj konkretan slučaj iznosi 14.4 mm. To odgovara približno 30 % vrijednosti sile loma uzoraka u ambijentnim uvjetima (poglavlje 3.6.5.1), što je razina opterećenja koju predlažu mnogi znanstvenici koji se bave ovom temom [134]. Uzorak je opterećen na pozicijama smještenim na trećini duljine grede između oslonaca, sa 6.5 kN (za punu gredu), što odgovara ukupnom opterećenju uzorka u iznosu od 13 kN za normalnu gredu. Za prošupljene grede opterećenje iznosi 4.8 kN (u trećinama), ukupno 9.6 kN. Opterećenje je primijenjeno pomoću hidrauličkog sustava sa dva cilindra. Uzorak se postupno opterećivao prije ispitivanja. Zahtijevano opterećenje postignuto je 15 minuta prije početka ispitivanja i održavano je tijekom cijelog testa (Slika 4.50).



Slika 4.50 Protokol opterećenja

4.3.2 Rezultati ispitivanja uzoraka izloženih požaru s tri strane

4.3.2.1 Normalna greda

S obzirom na prirodu ponašanja drvenih elemenata u požaru, na vanjskim zidovima peći predviđen je prozor kroz koji su se mogle promatrati i dokumentirati promjene u ponašanju uzoraka tijekom požarnog ispitivanja. Glavne promjene tijekom požarnog ispitivanja standardne pune grede prikazane su u tablici 4.10.

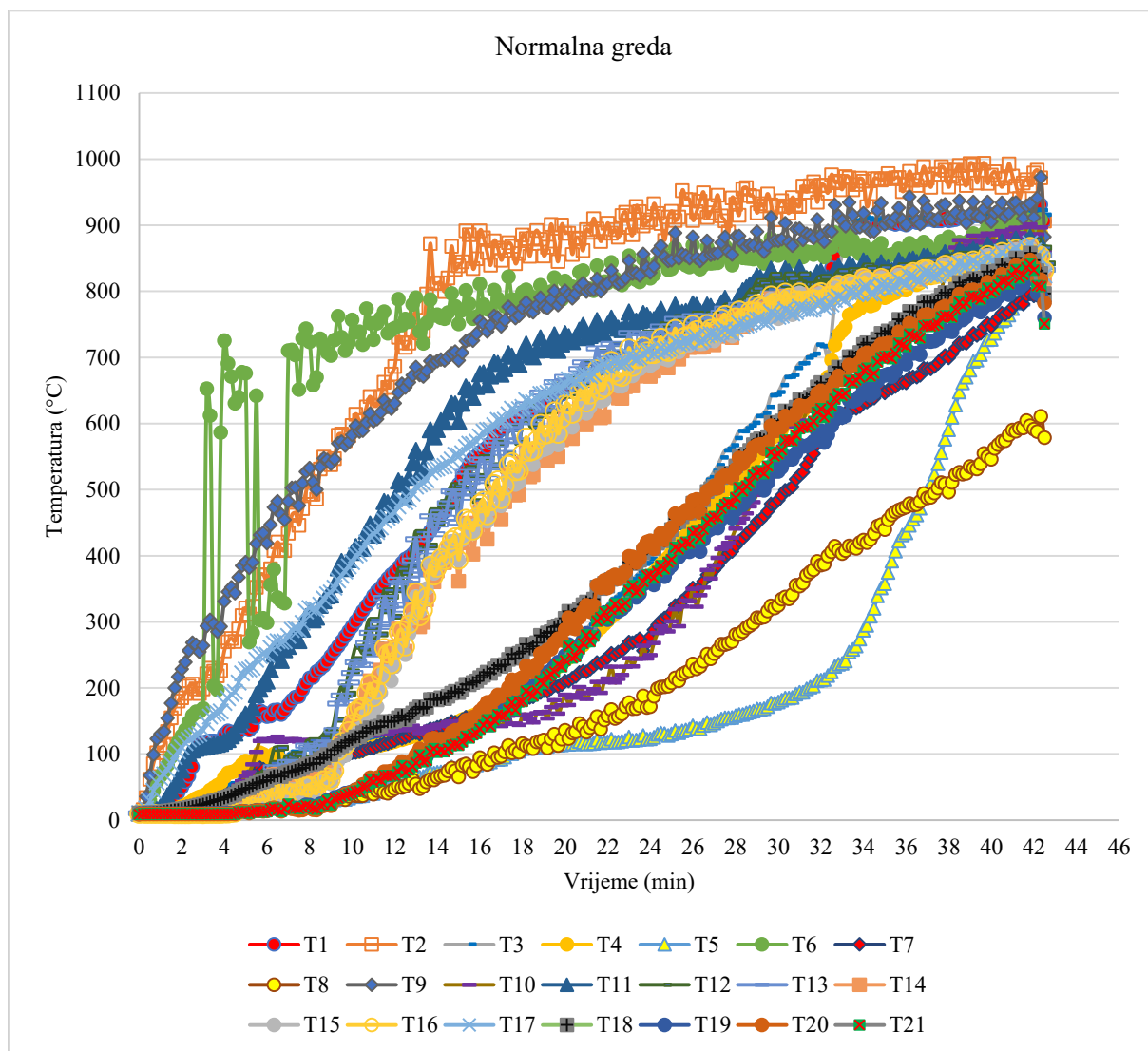
Tablica 4.10 Opažanje tijekom požarnog testa – puna greda

| Vrijeme (min:s) | Strana (PI ili PN)* | Opažanje |
|--------------------|------------------------|---|
| 00:00 | | Početak ispitivanja. |
| 05:10 | PI | Površina drvenog uzorka potpuno pougljenila i javlja se plamen. |
| 12:20 | PI | Počinje se odvajati lamela na mjestu zupčastog spoja – zazor od 3-5 mm. |
| 27:10 | PI | Odvajanje termoelementa postavljenih na unutarnju stranu prve lamele zbog njezinog izgaranja. |
| 31:20 | PI | Odvaja se dio lamela prvog sloja. |
| 36:10 | PI | Uočeno je odvajanje slijedećeg sloja lamela na mjestu zupčastog spoja. |
| 42:20 | PN | Izlazi plamen na obje strane uzorka u prostoru između uzorka i izolacije. Uzorak nagorio i izvan prostora požarne peći. |
| 42:30 | | Prekid ispitivanja |

*PI – požaru izložena strana
PN – požaru neizložena strana

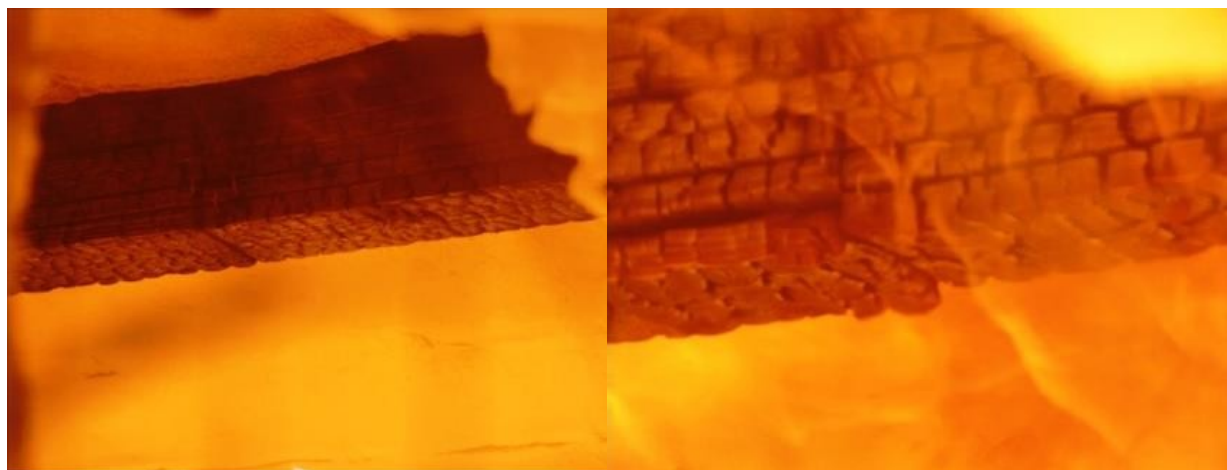
Osim promatranja fizikalnih promjena u uzorcima, pratio se i razvoj temperature prema unutrašnjosti drvenih elemenata. Raspored termoelemenata (vidi sliku 4.48) omogućio je praćenje razvoja temperature za sve tri izložene strane uzoraka. Na slici 4.51 prikazani su rezultati ispitivanja, odnosno razvoj temperature tijekom vremena.

Razvoj temperature unutar uzorka bio je vidljiv prema skupinama termoelemenata. Može se uočiti da najdublje ugrađena skupina termoelemenata ima blag nagib krivulje, što govori o prirodnoj otpornosti drva kao materijala, odnosno stvaranju pougljenog sloja. Kada su termoelementi bili izravno izloženi požaru, bili su pod utjecajem konvekcije i zračenja što može objasniti temperaturne fluktuacije u dijagramima (vidi T6 na slici 4.51). Od tog trenutka nadalje, rezultati mjerenja termoelemenata mogu se zanemariti.



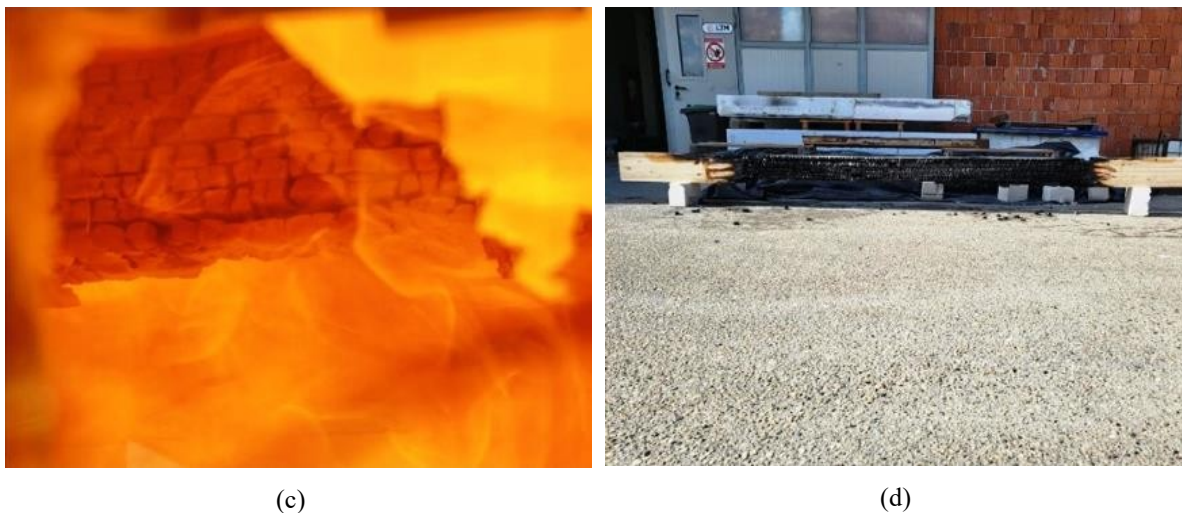
Slika 4.51 Razvoj temperature – normalna greda

Različite faze normalne GL drvene grede tijekom požarnog ispitivanja prikazane su na slici 4.52 (a, b i c), dok se greda na kraju ispitivanja može vidjeti na slici 4.52-d.



(a)

(b)



Slika 4.52 Normalna greda – faze prilikom požarnog ispitivanja : (a) 5. minuta; (b) 20. minuta; (c) 40. minuta i (d) kraj požarnog ispitivanja

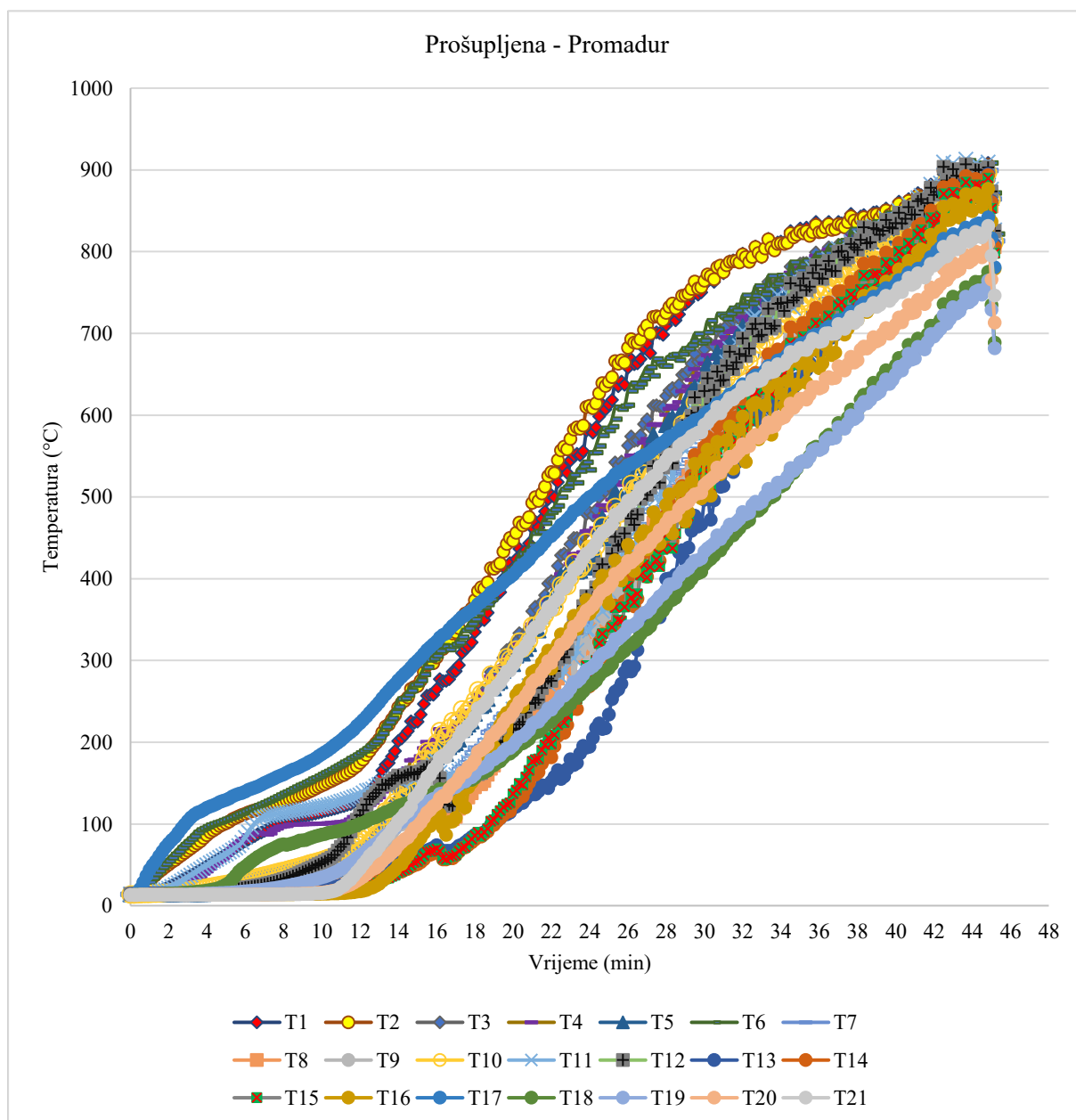
Da bi se dobio bolji uvid u preostali poprečni presjek, na slici 4.53 prikazana je greda nakon čišćenja pougljenog sloja.



Slika 4.53 Normalna greda nakon čišćenja pougljenog sloja

4.3.2.2 Prošupljena greda sa protupožarnom bojom – PROMADUR

Glavna razlika između standardne drvene grede i zaštićenih prošupljenih greda ogleda se u nagibu temperaturnih krivulja, odnosno brzini razvoja temperature prema unutrašnjosti uzorka (Slika 4.54). Nadalje, vidljiv učinak protupožarnog premaza, koji je štitio uzorke određeno vrijeme, što je utjecalo na konačno vrijeme požarne otpornosti uzoraka. Opći zaključak odgovara početnim pretpostavkama o sličnom vremenu požarne otpornosti ispitanih drvenih greda, što znači da je protupožarna zaštita ispunila svoju svrhu. Glavna zapažanja tijekom požarnog ispitivanja prezentirana su u tablici 4.11.



Slika 4.54 Razvoj temperature – prošupljena greda (PROMADUR)

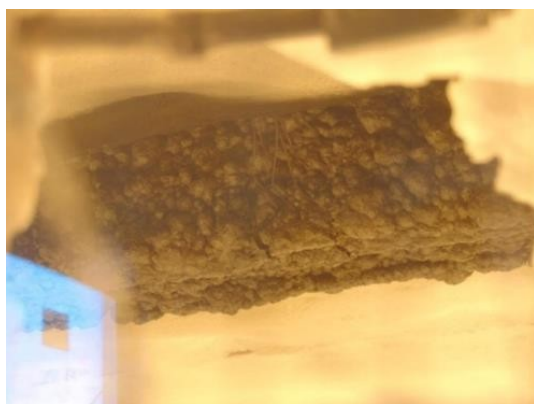
Tablica 4.11 Opažanje tijekom požarnog testa – prošupljena greda (PROMADUR)

| Vrijeme (min:s) | Strana (PI ili PN)* | Opažanje |
|--------------------|------------------------|---|
| 00:00 | | Početak ispitivanja. |
| 00:50 | PI | Početak tamnjenja površine uzorka (protupožarni premaz). |
| 01:30 | PI | Protupožarni premaz potpuno pocrnio te počeo bubriti. |
| 14:20 | PI | Vidljiv otvor u sloju protupožarnog premaza. |
| 15:30 | PI | Javlja se plamen po cijeloj izloženoj površini uzorka. |
| 17:10 | PN | Izlazi dim iz eliptičnih otvora na kraju grede. |
| 35:20 | PI | Otpadaju dijelovi nabubrenog protupožarnog premaza – najizraženije na krajevima izloženog dijela u zoni izlaska grede iz prostora peći. |
| 40:15 | PI | Na sredini uzorka je vidljiva delaminacija. |
| 45:10 | | Prekid ispitivanja. |

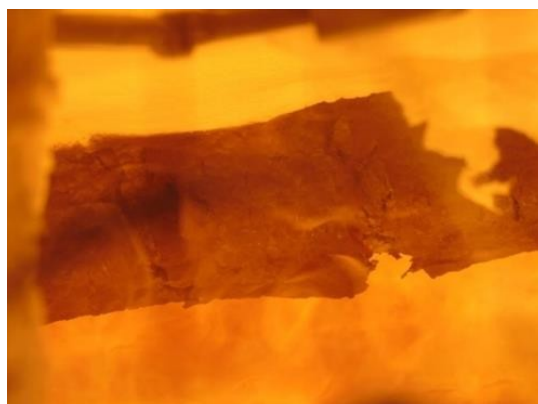
*PI – požaru izložena strana

PN – požaru neizložena strana

Različite faze prošupljene GL drvene grede zaštićene protupožarnim premazom tijekom požarnog ispitivanja prikazane su na slici 4.55 (a, b i c), dok se poprečni presjek grede na kraju požarnog ispitivanja, može vidjeti na slici 4.55-d.



(a)



(b)



(c)

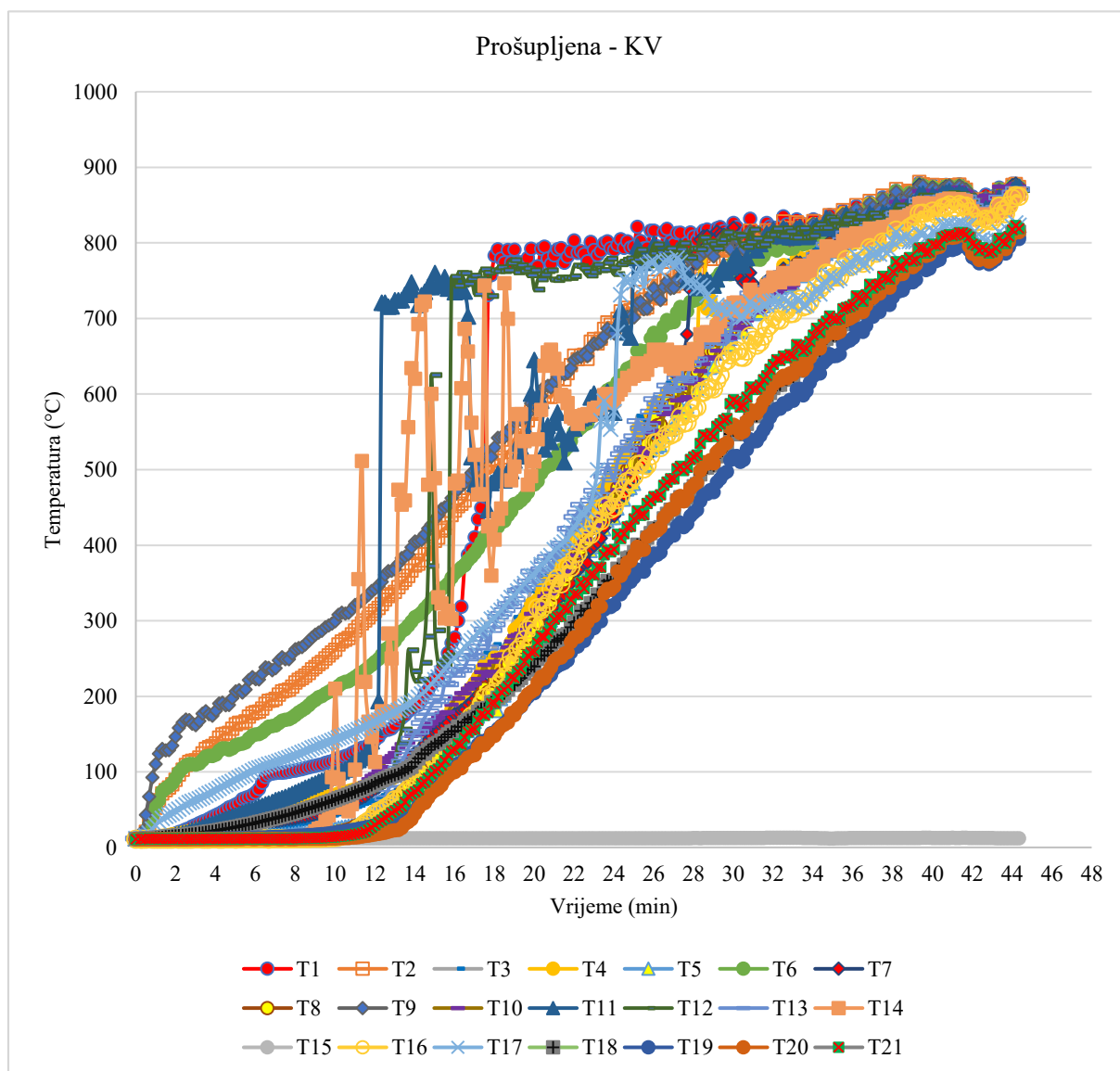


(d)

Slika 4.55 Prošupljena greda (PROMADUR) – faze prilikom požarnog ispitivanja : (a) 5. minuta; (b) 20. minuta; (c) 40. minuta i (d) kraj ispitivanja

4.3.2.3 Prošupljena greda sa ispunom od kamene vune

Ponašanje prošupljene grede s ispunom od kamene vune bilo je slično ponašanju prethodnog uzorka. Razlog tomu je što su oba uzorka imala protupožarni premaz na požaru izloženim površinama, a razlika se očitovala u tome što je kamena vuna ranije otpadala s uzorka i vatra je prije zahvatila neizloženi dio uzorka, u odnosu na protupožarni premaz koji je bio apliciran po obodu šupljina. Na slici 4.56 prikazan je razvoj temperature prema unutrašnjosti uzorka. Nadalje, uočeno je više "izgubljenih" termoelemenata (T11, T14, T17), koji su se odvojili od uzorka. Ovime je potvrđena pretpostavka o odvajanju kamene vune od uzorka.



Slika 4.56 Razvoj temperature – prošupljena greda s kamenom vunom

Glavna zapažanja tijekom požarnog ispitivanja prošupljenih uzoraka s ispunom od kamene vune prikazana su u tablici 4.12.

Tablica 4.12 Opažanje tijekom požarnog testa – prošupljena greda sa ispunom od kamene vune

| Vrijeme (min:s) | Strana (PI ili PN)* | Opažanje |
|--------------------|------------------------|---|
| 00:00 | | Početak ispitivanja. |
| 00:50 | PI | Početak tamnjenja površine uzorka (protupožarni premaz). |
| 01:30 | PI | Protupožarni premaz potpuno pocrnio te počeo bubriti. |
| 14:50 | PI | Vidljiv otvor u sloju protupožarnog premaza. |
| 16:50 | PI | Javlja se plamen po cijeloj izloženoj površini uzorka. |
| 33:30 | PI | Otpadaju dijelovi nabubrenog protupožarnog premaza – najizraženije na krajevima izloženog dijela u zoni izlaska grede iz prostora peći. |
| 39:50 | PI | U sredini uzorka vidljivo je otpadanje kamene vune i delaminacija. |
| 44:20 | | Prekid ispitivanja |

*PI – požaru izložena strana

PN – požaru neizložena strana

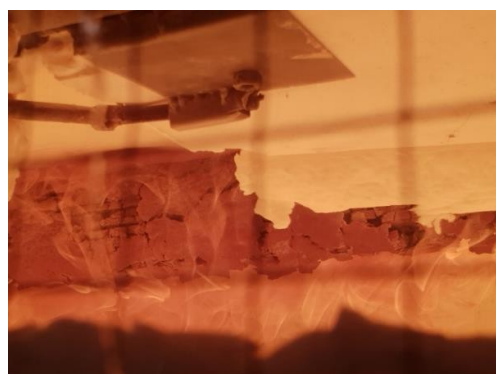
Različite faze prošupljene (KV) GL drvene grede tijekom požarnog ispitivanja prikazane su na slici 4.57 (a, b i c), dok je greda nakon požarnog ispitivanja prikazana na slici 4.57-d.



(a)



(b)



(c)

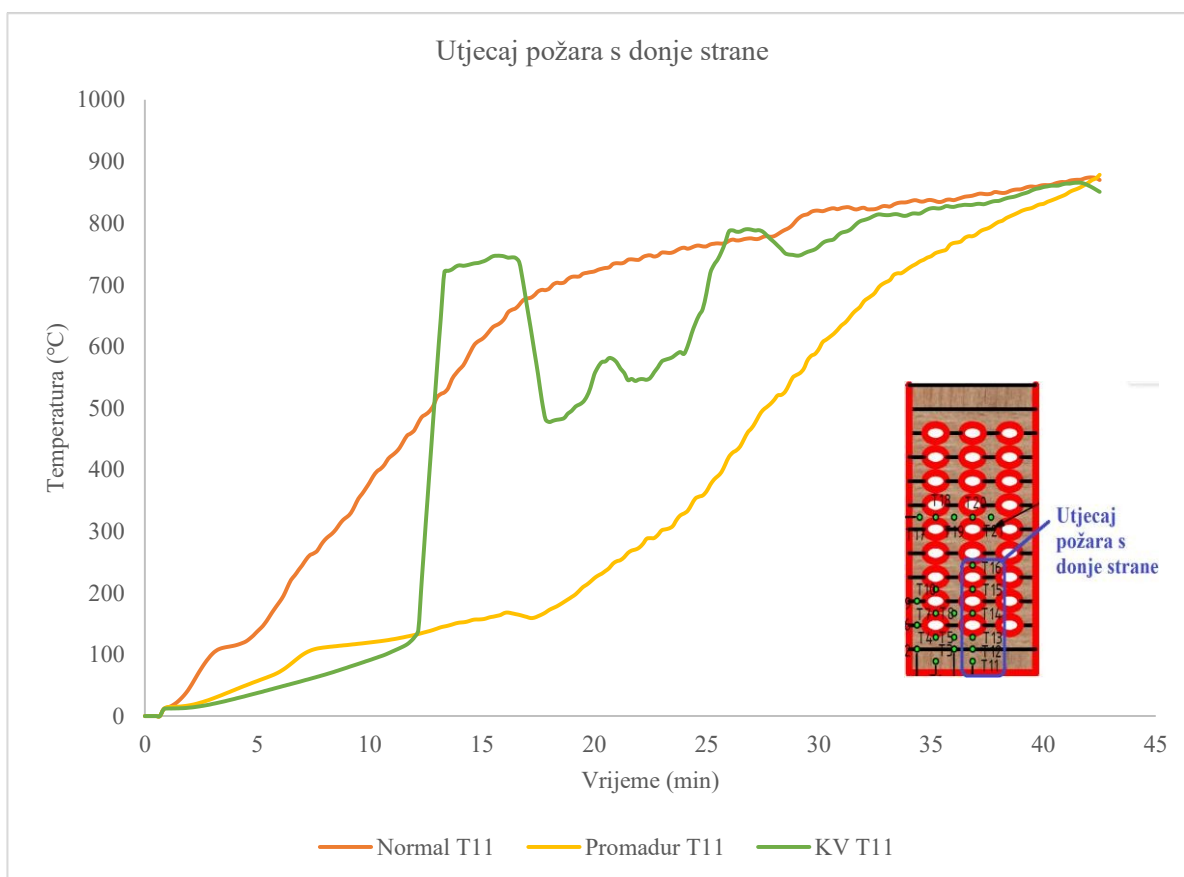


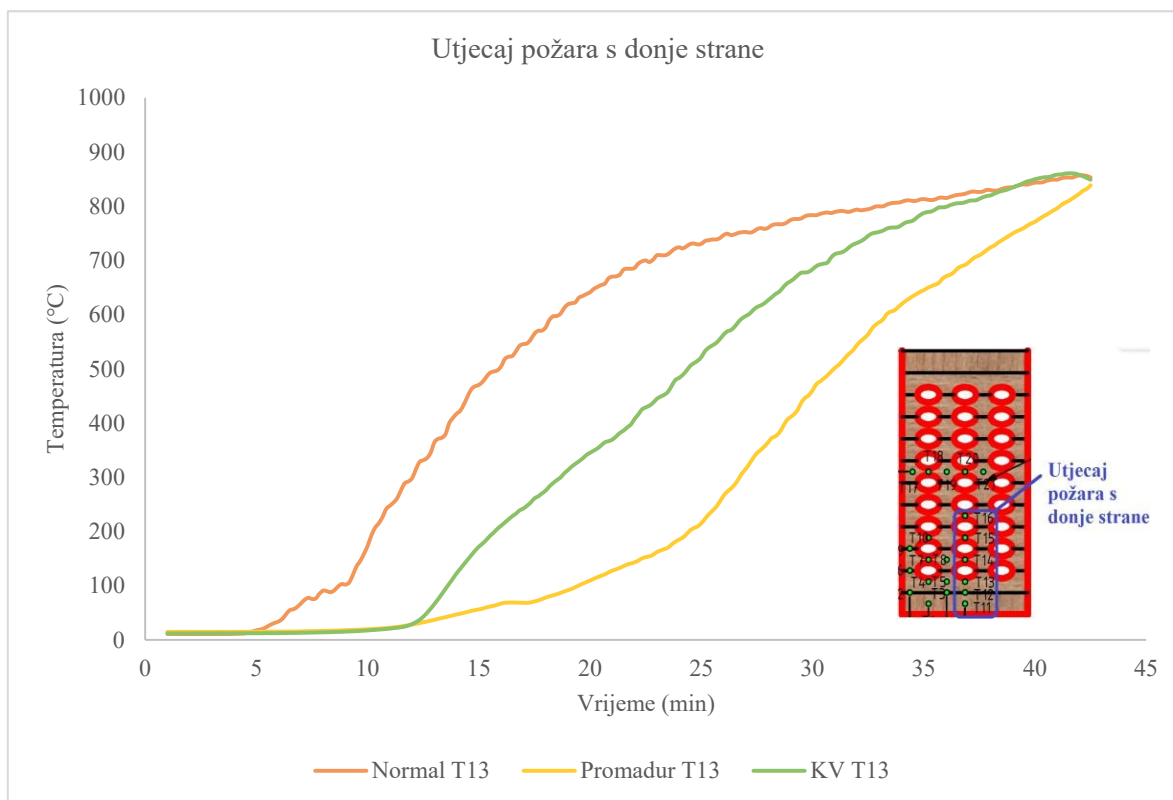
(d)

Slika 4.57 Prošupljena greda (KV) – faze prilikom požarnog ispitivanja : (a) 5. minuta; (b) 20. minuta; (c) 40. minuta i (d) kraj ispitivanja

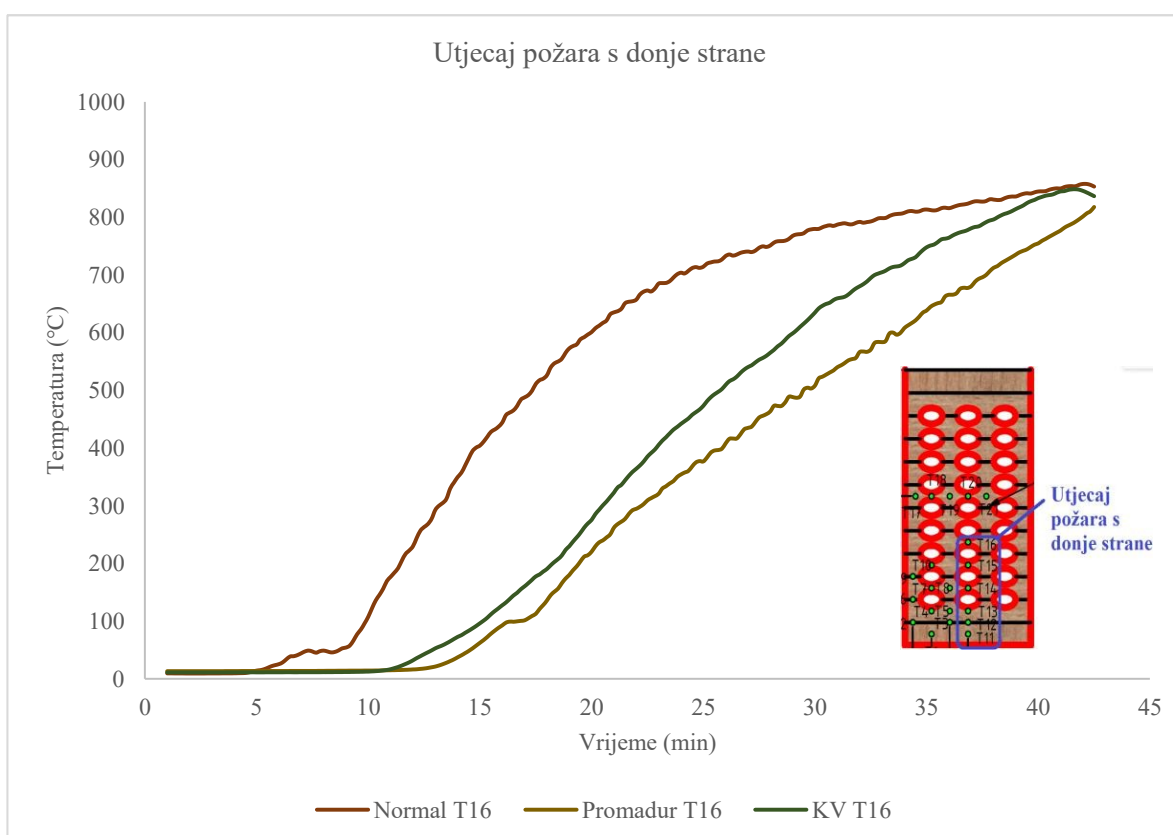
4.3.2.4 Usporedba razvijenih temperatura u uzorcima

Raspored termoelemenata definiran je s ciljem određivanja utjecaja požara sa donje strane, bočne strane, te zajedničkog utjecaja višestranog požara. Skupina termoelemenata od T11-T16 prikazuje utjecaj požara odozdo na drvene uzorke. Na ovaj način napravljena je usporedba i učinak različitih sustava protupožarne zaštite na razvoj temperature prema unutrašnjosti elementa. Na slici 4.58 prikazana je usporedba razvoja temperature u pojedinim lamelam od utjecaja požara s donje strane, počevši od prve izložene lamele.





(b)

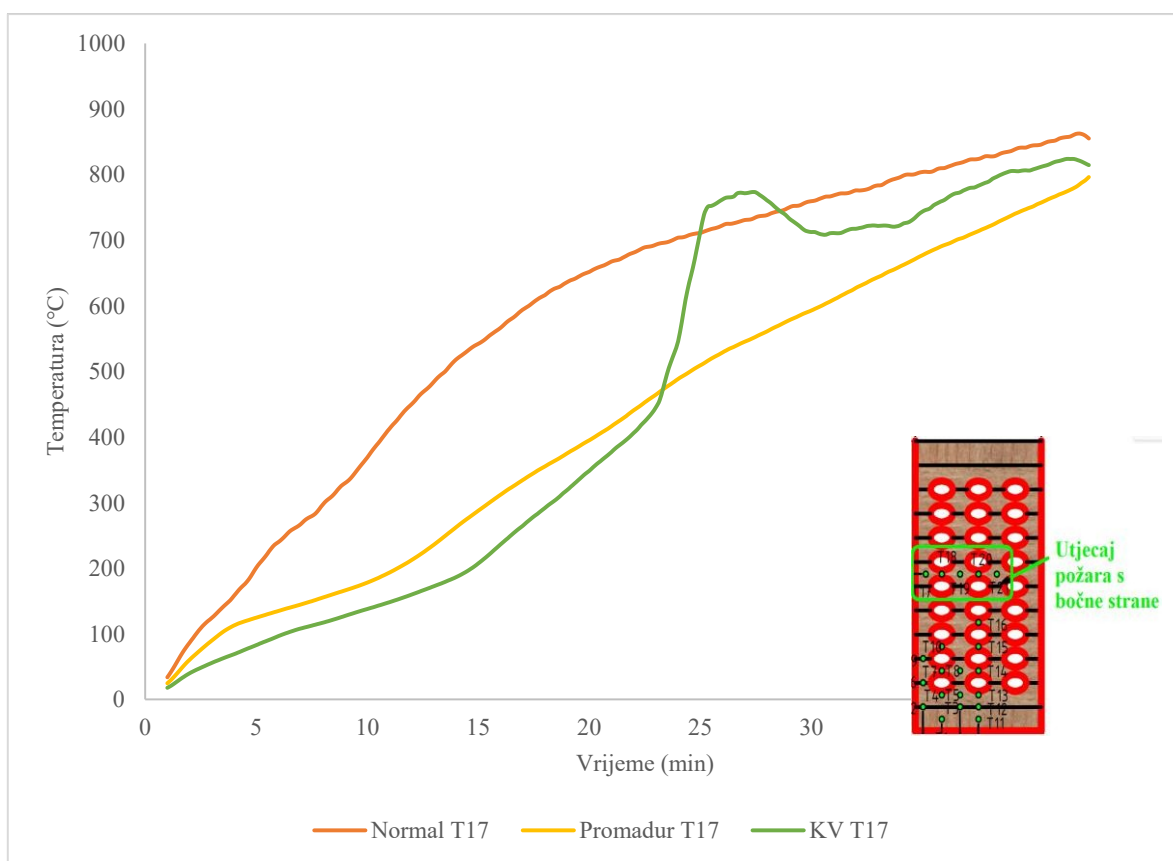


(c)

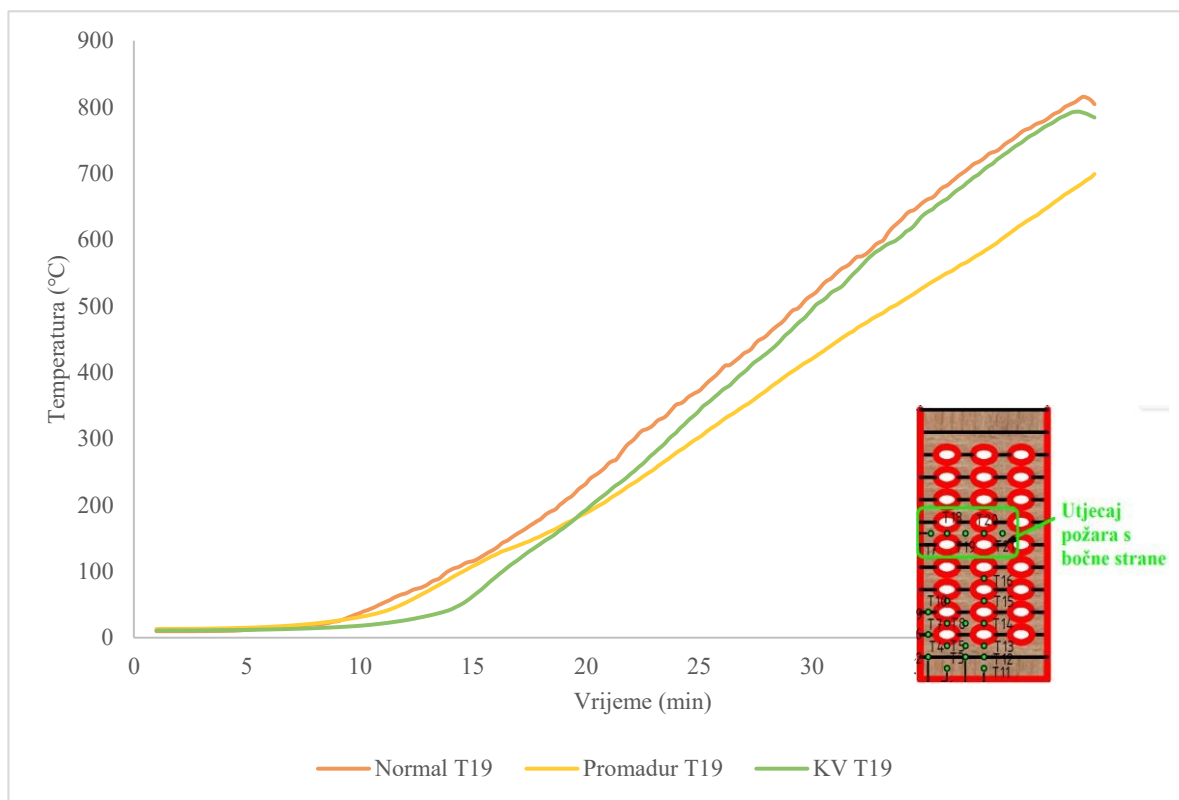
Slika 4.58 Utjecaj požara s donje strane -usporedba razvijenih temperatura: (a) T11 - sredina prve lamele; (b) T13 - sredina druge lamele; (c) T16 - sredina pete lamele.

Usporedbom razvijenih temperatura u sva tri uzorka, može se zaključiti da je protupožarni premaz odgodio porast temperature u uzorcima, a posljedično i stvaranje pougljenog sloja. Maksimalna vremenska odgoda uzrokovana protupožarnim premazom bila je 17 minuta. Odstojanje u krivuljama se smanjuje sa porastom vremena izloženosti uzoraka, što dovodi do zaključka da prošupljene grede brže gore. Razlika u brzini sagorijevanja je najveća u trenutku potpunog razvoja plamena unutar greda (oko 700 °C), kada je došlo do prodora požara u šupljine, gdje se došlo do kontakta vatre i do tada zarobljenog zraka (kisika) u šupljinama.

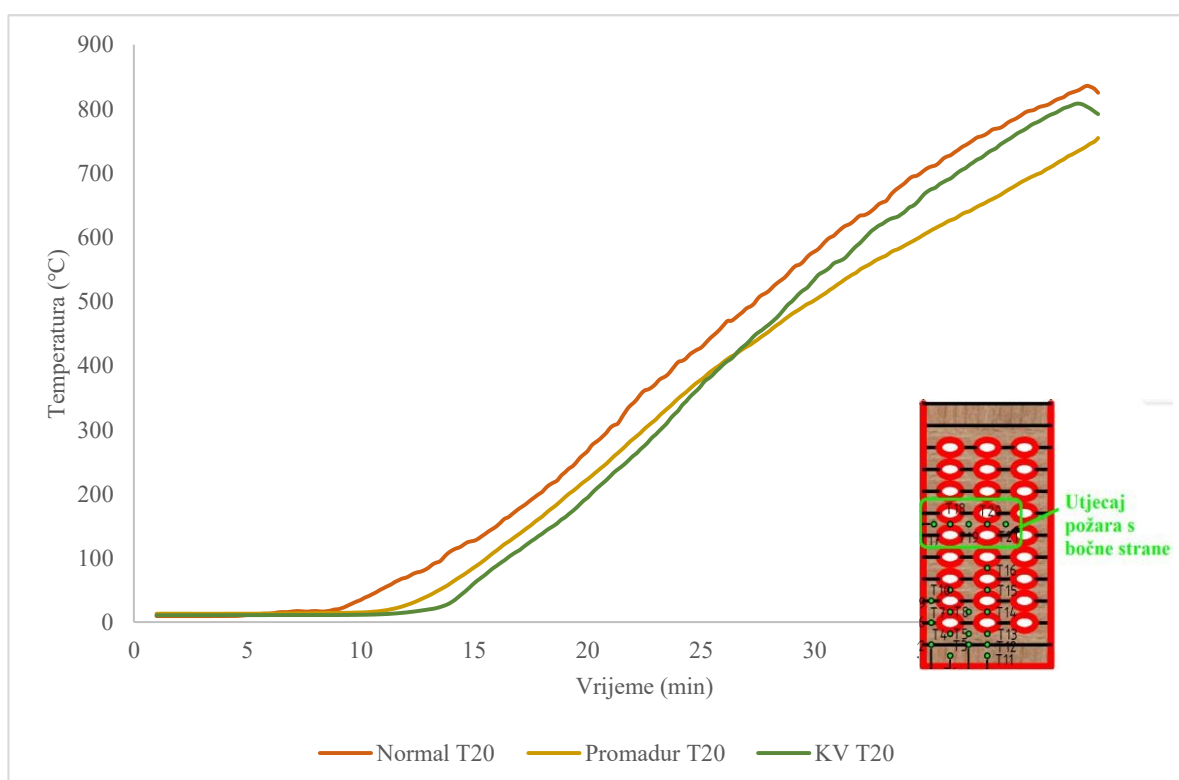
Nadalje, utjecaj požara sa bočne strane određen je evaluacijom temperatura očitanih iz skupine termoelemenata T17-21. Na slici Slika 4.59 prikazana je usporedba razvijenih temperatura prilikom požarnog ispitivanja, za sva tri uzorka.



(a)



(b)



(c)

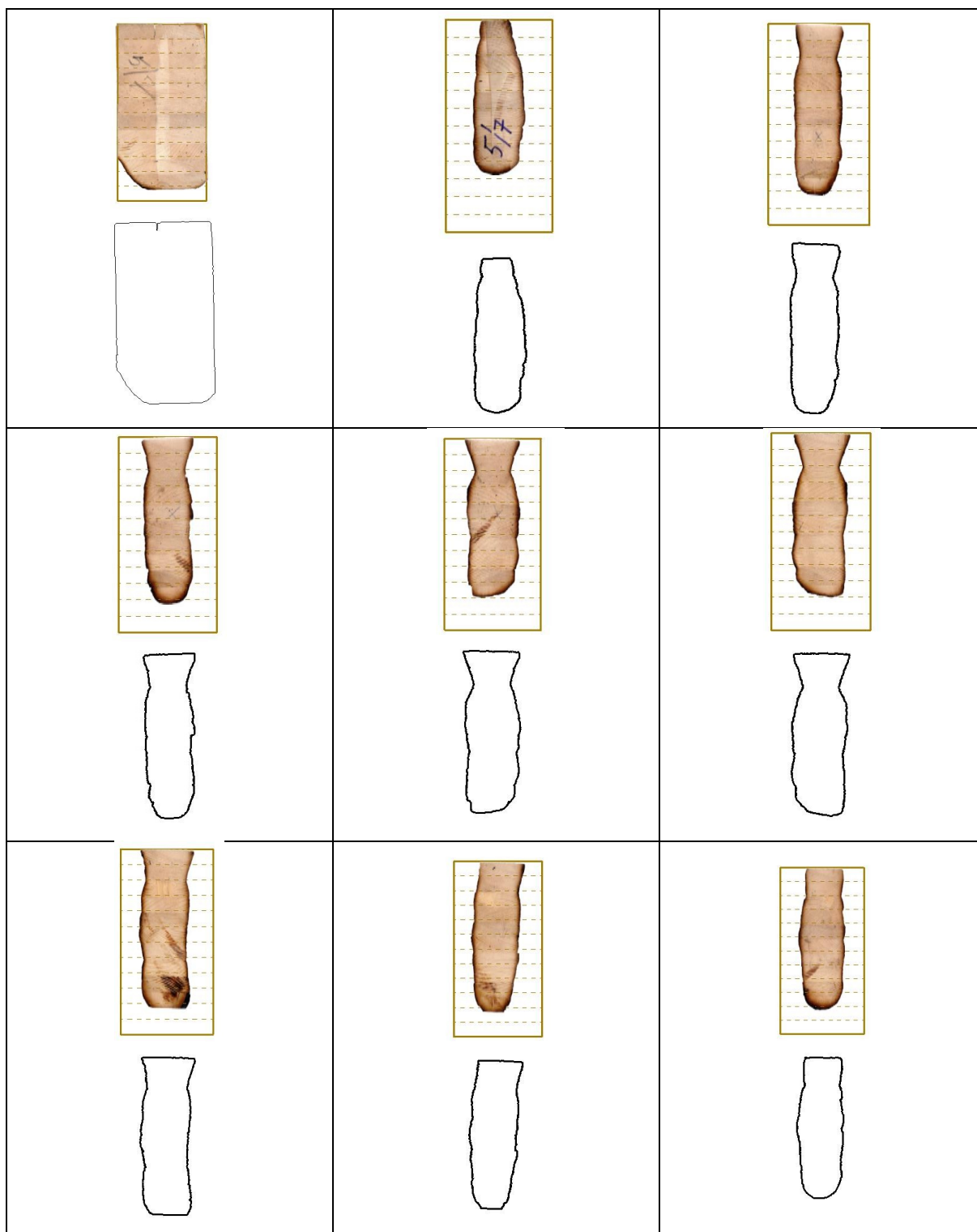
Slika 4.59 Utjecaj požara s bočne strane -usporedba razvijenih temperatura: (a) T17- termoelement udaljen 7.25 mm od izložene površine; (b) T19 - termoelement udaljen 25 mm od izložene površine; (c) T20 - termoelement udaljen 25 mm od izložene površine

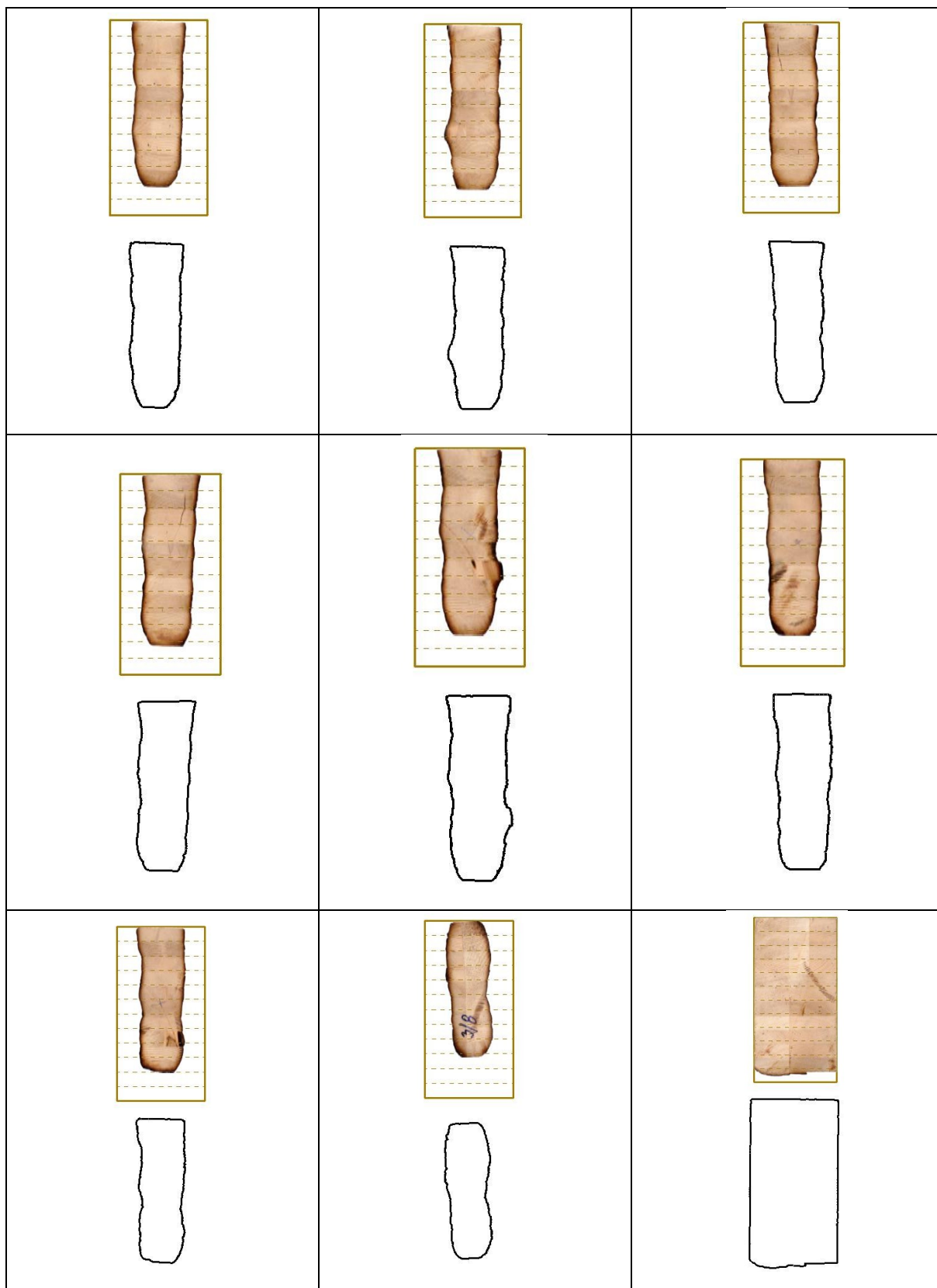
Prilikom razmatranja utjecaja požara s bočne strane na drvene uzorke, potvrđen je učinak protupožarnog premaza, koji je odgodio gorenje drvenih površina za maksimalno 17 minuta. S porastom vremena izloženosti uzoraka, temperaturne krivulje se približavaju jedna drugoj, što potvrđuje prije navedeni zaključak o ubrzanoj fazi sagorijevanja prošupljenih elemenata opisanoj u poglavlju 4.2.2.3. Ova pojava je još više vidljiva prilikom razmatranja utjecaja požara s bočne strane u odnosu na utjecaj požara s donje strane. Nadalje, može se uočiti nagli porasti temperature kod uzorka sa ispunom od kamene vune, a razlog tome je odvajanje termoelemenata od uzorka, zajedno s odvajanjem kamene vune od uzorka, u trenutku kada plamen dopre do gornje polovice prošupljenja (elipse).

Konačno, razmatrana je granica između pougljenog sloja i drva, koja se prema EN 1995-1-2 [8] podudara sa izolinijom koja predstavlja temperaturu od 300 °C. Detaljna analiza procesa stvaranja pougljenog sloja provedena je u nastavku ovo rada.

4.3.2.5 Analiza pougljenog sloja normalne grede izložene požaru s tri strane

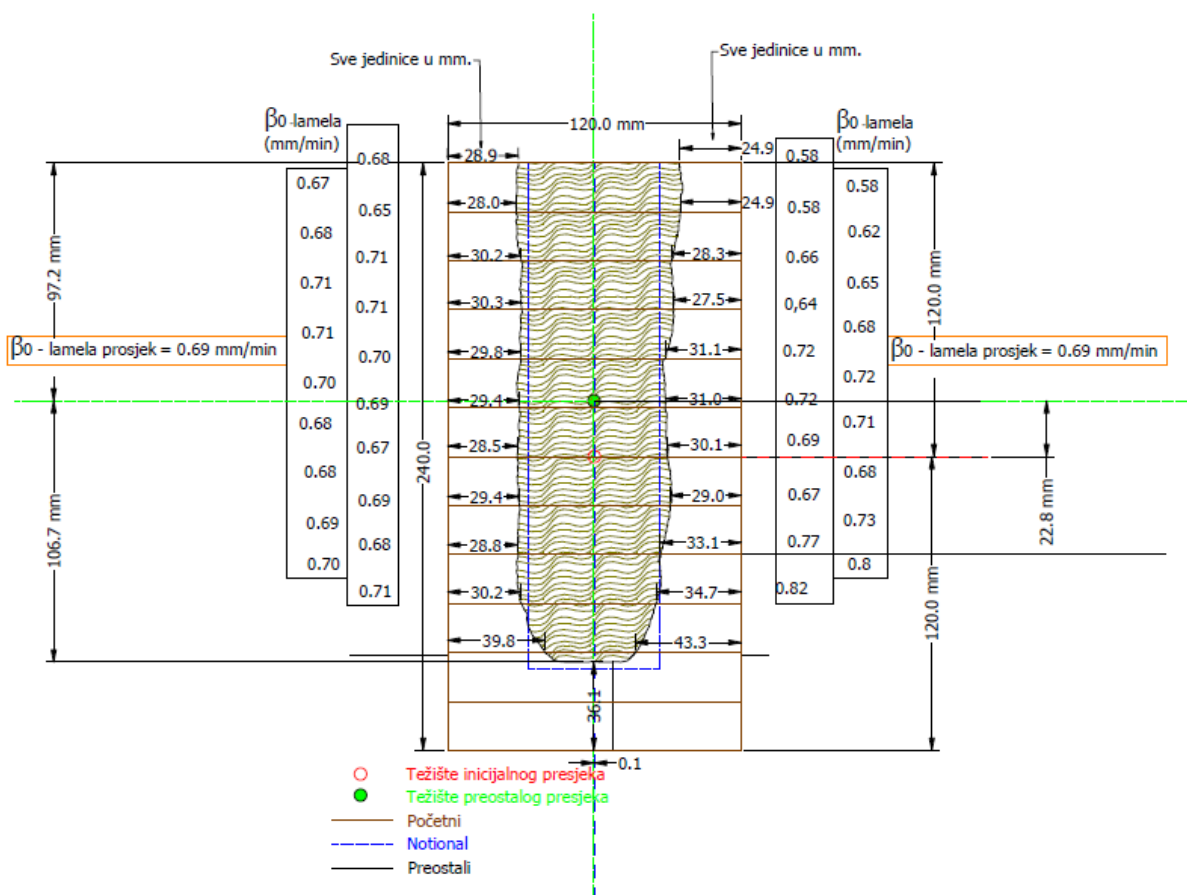
Da bi odredili brzinu sagorijevanja uzoraka, uzorci su nakon požarnog ispitivanja izrezani na manje dijelove, duljine 200 mm. Nakon označavanja izrezanih dijelova, svaki isječak je skeniran. Skenirane datoteke su potom obrađene i uvezene u CAD program u svrhu detaljne analize. Preostali poprečni presjeci za normalnu punu gredu prikazani su na slici 4.60.





Slika 4.60 Preostali poprečni presjeci normalne (pune) grede

Postupak određivanja prosječne vrijednosti brzine pougljenja i preostalog poprečnog presjeka prikazan je za reprezentativne isječke, odnosno poprečne presjeke grede (Slika 4.64). Kreiranjem CAD datoteka za svaki isječak omogućeno je precizno određivanje površine, momenta tromosti i momenta otpora preostale površine poprečnog presjeka, a sve u cilju određivanja više-dimenzionalne brzine pougljenja, te u konačnici efektivnog presjeka. Dodatno, za svaku lamelu izmjerene su jednodimenzionalne brzine pougljenja (Slika 4.64).

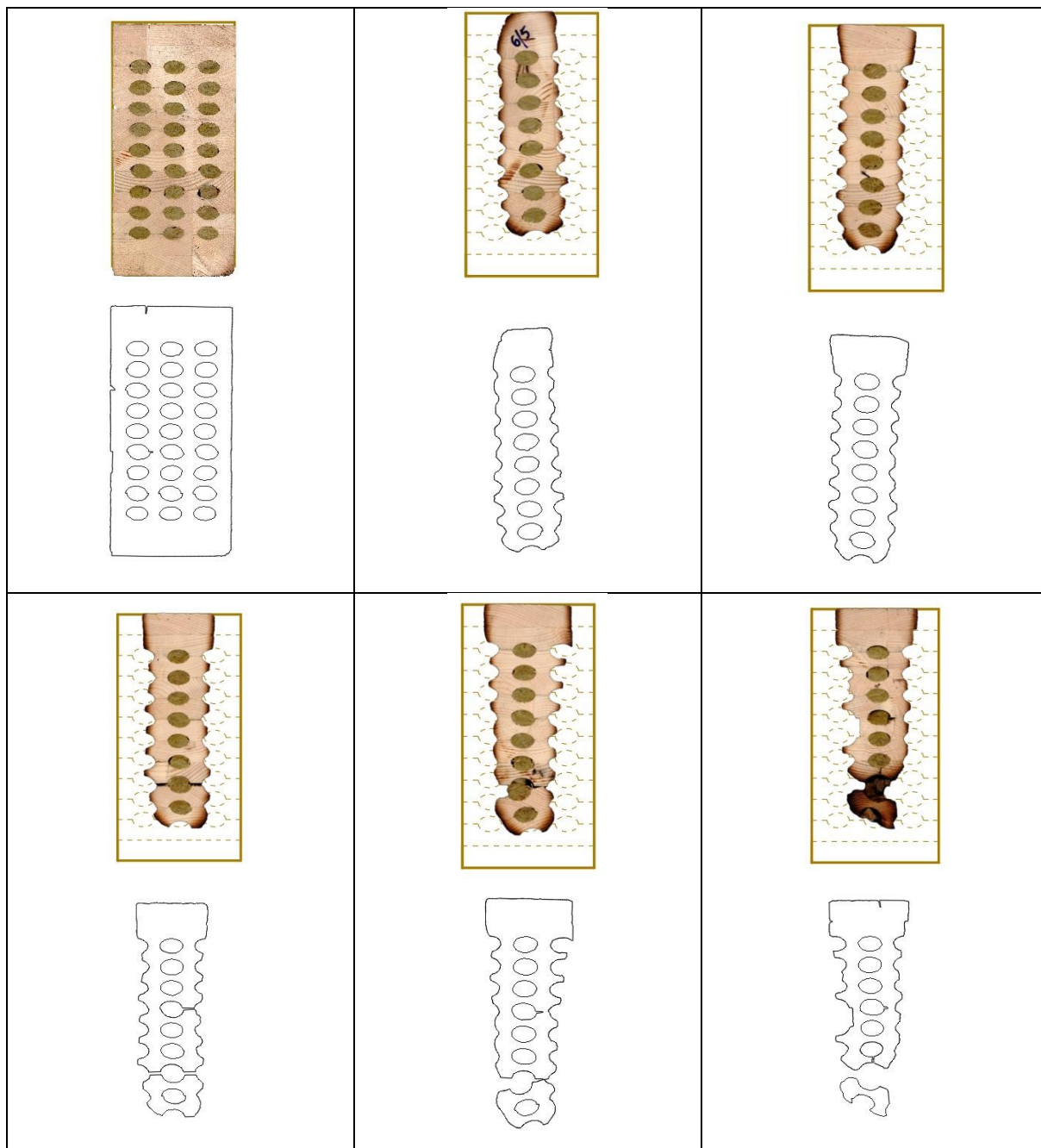


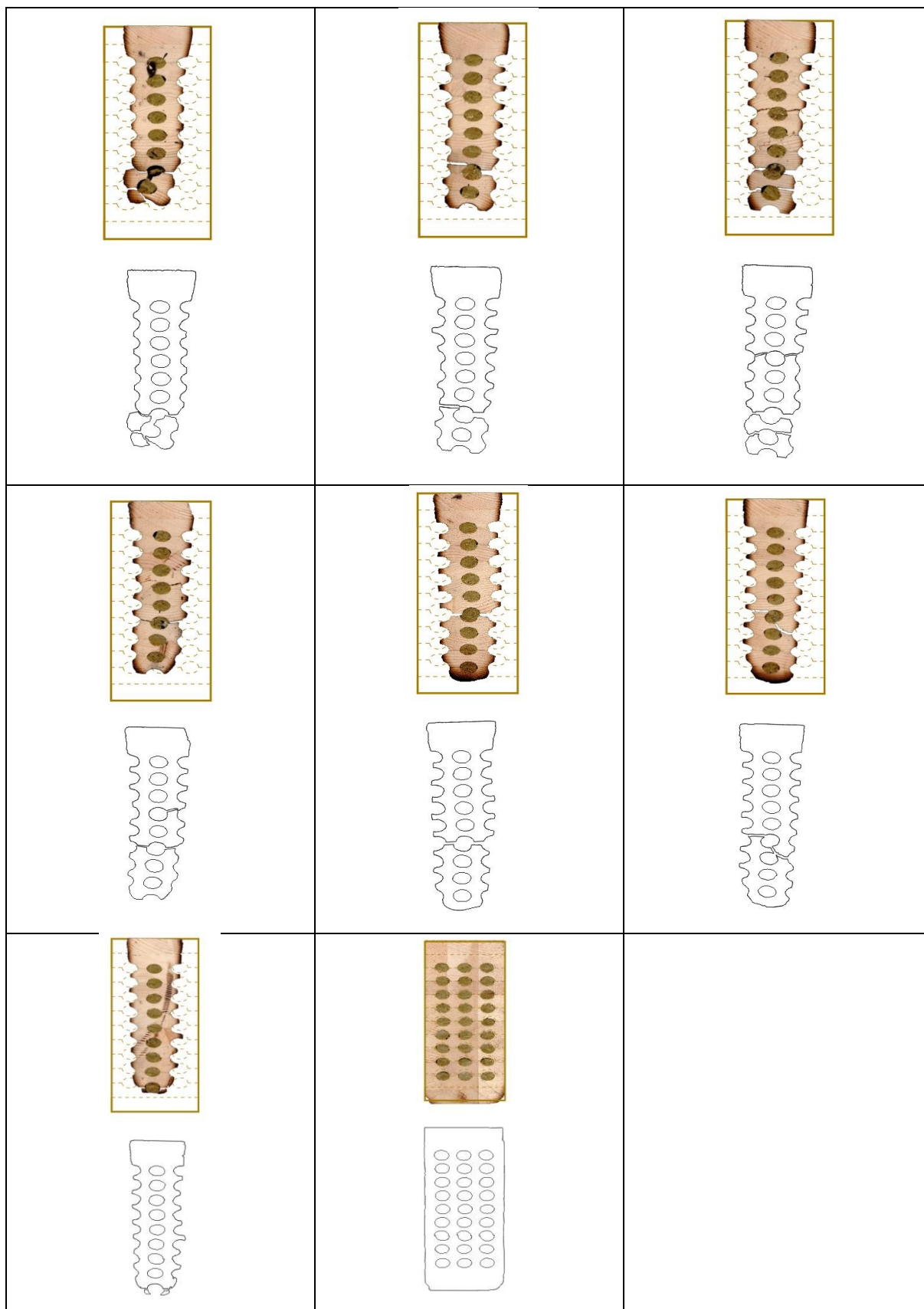
Slika 4.61 Preostali poprečni presjek normalne grede analiziran pomoću CAD softvera

Za normalnu GL gredu, prosječna jednodimenzionalna brzina pougljenja lamela β_0 bila je 0.69 mm/min, dok je brzina višedimenzionalna brzina pougljenja bila $\beta_n = 0.78$ mm/min.

4.3.2.6 Analiza pougljenog sloja prošupljene grede sa ispunom od kamene vune izložene požaru s tri strane

Isti postupak proveden je i za prošupljene grede, a preostali poprečni presjeci uzorka sa kamenom vunom, prikazani su na slici 4.62.



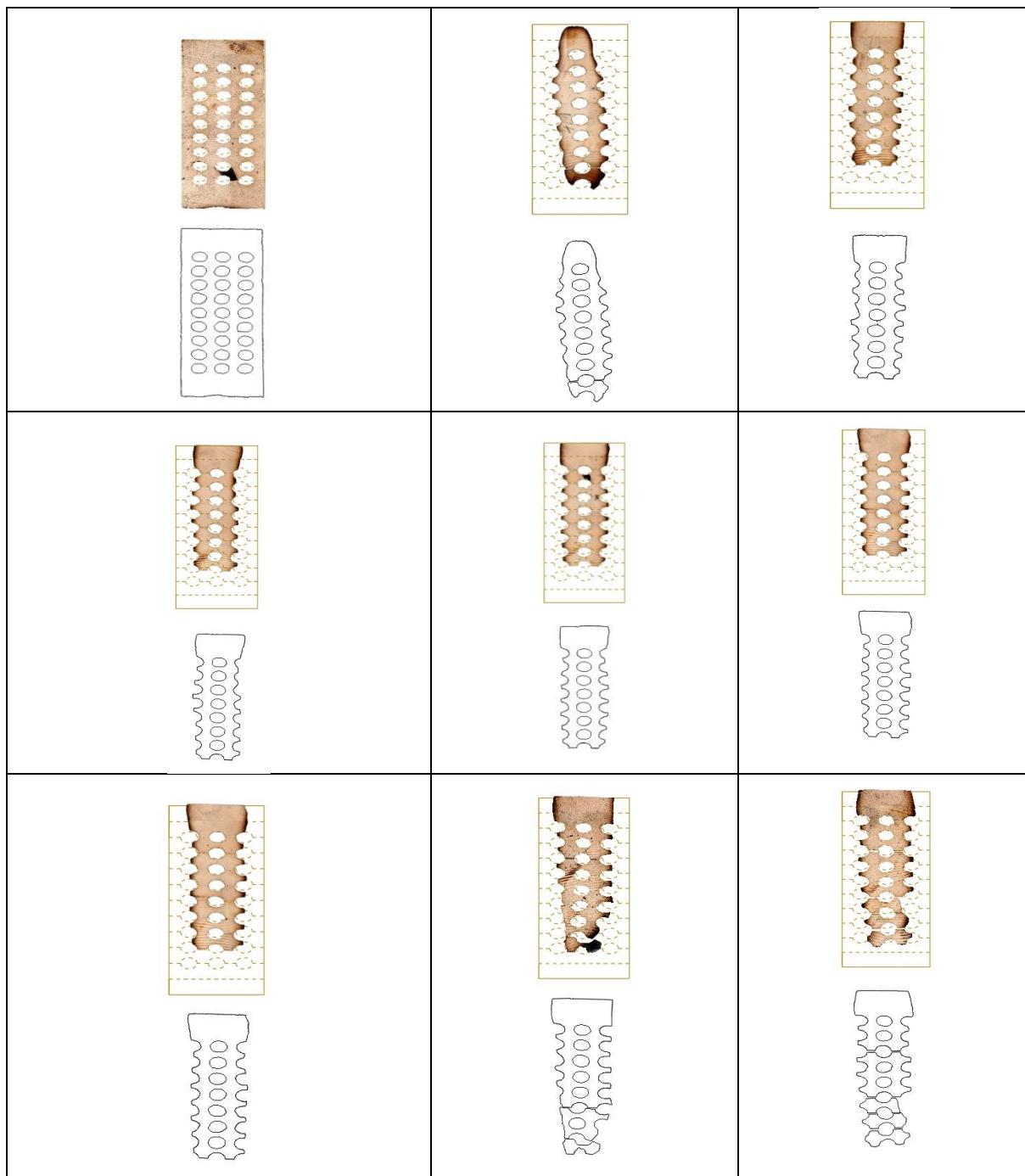


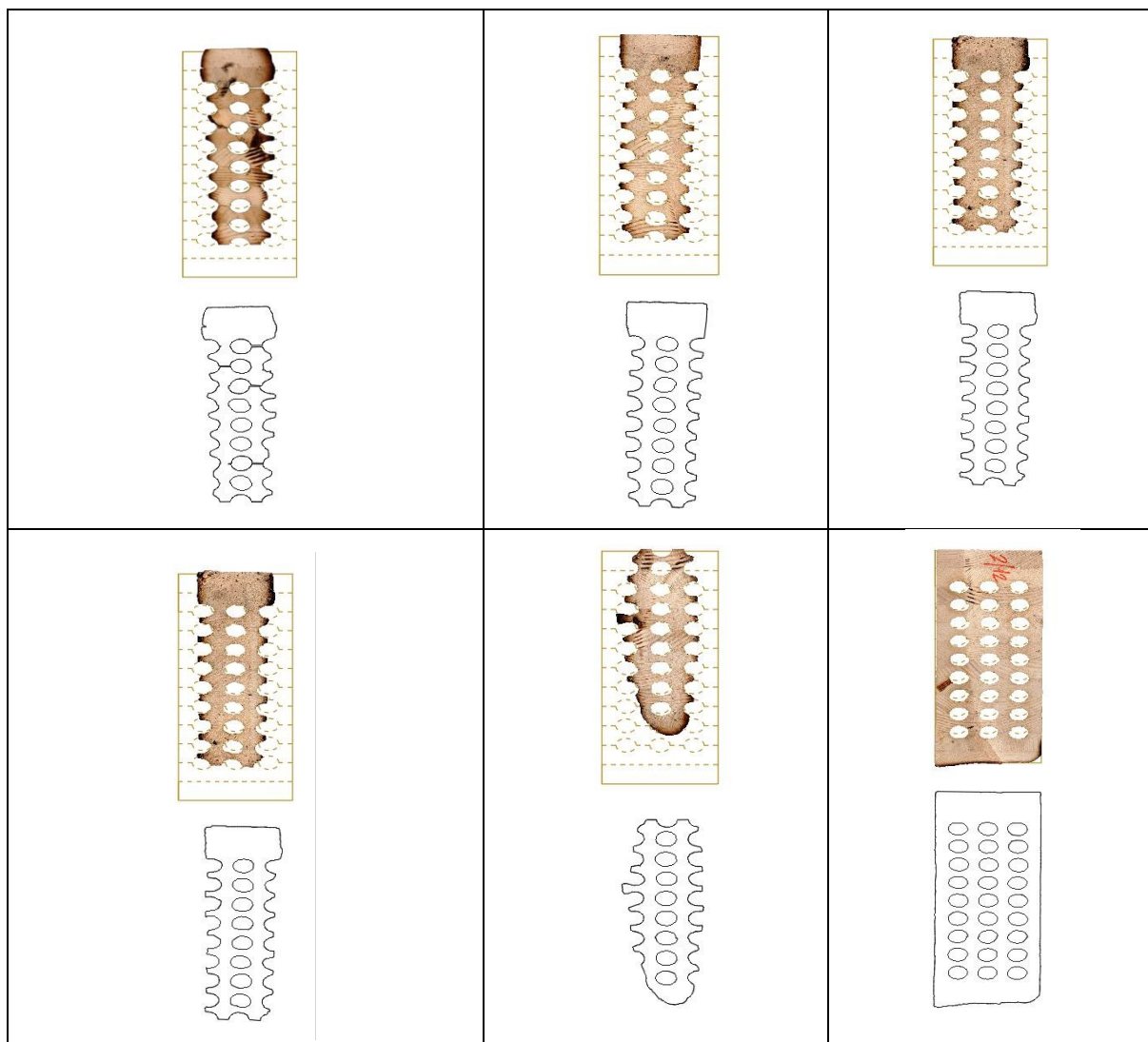
Slika 4.62 Preostali poprečni presjeci prošupljene grede s kamenom vunom

Ponašanje i evaluacija brzine pougljenja za prošupljene elemente objašnjena je u poglavlju 4.2.2.3. Kamena vuna ima dvojak učinak. S jedne strane štiti drvene elemente od izravnog doticaja sa požarom, te onemogućuje prodor i cirkulaciju zraka u šupljine, a s druge strane izaziva dodatan toplinski tok na vertikalne drvene stijenke između šupljina, zbog zagrijavanja materijala. Uzimajući sve navedeno u obzir, zaključeno je da postoji više faza pougljenja, te pripadajućih vrijednosti brzina pougljenja, kod prošupljenih drvenih elemenata. Razvijen je proračunski model za prošupljene drvene elemente, koji je prikazan u poglavlju 4.2.2.3, a koji je potvrđen i u ovom dijelu eksperimentalnog istraživanja.

4.3.2.7 Analiza pougljenog sloja prošupljene grede zaštićene protupožarnim premazom izložene požaru s tri strane

Konačno, preostali poprečni presjeci za prošupljenu gredu sa protupožarnim premazom prikazani su na slici 4.63.

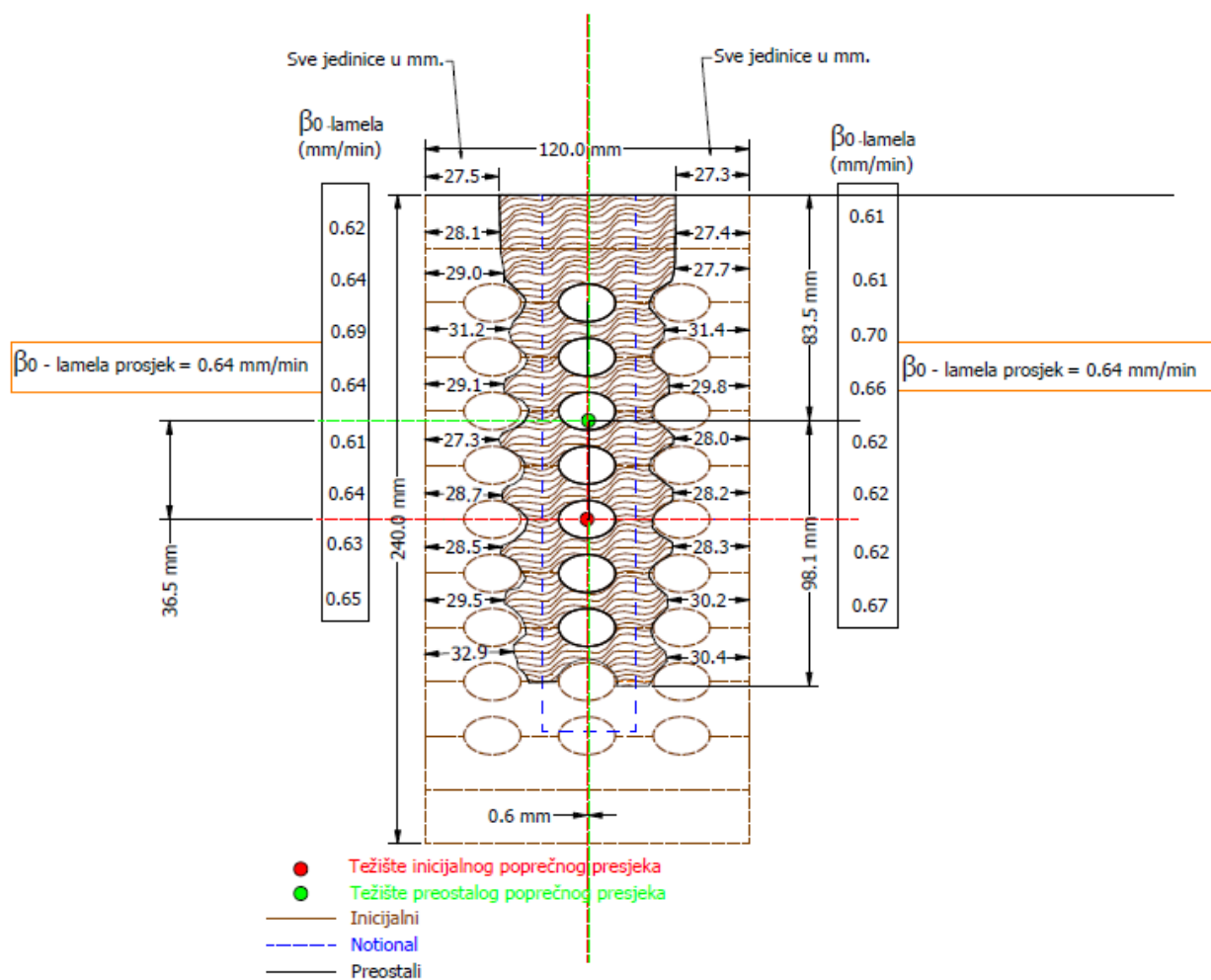




Slika 4.63 Preostali poprečni presjeci prošupljene grede s protupožarnim premazom

Zbog prisustva protupožarnog premaza na požaru izloženim površinama uzorka, za prošupljene GLT grede uočene su različite brzine pougljenja, tj. različite faze pougljenja. U početku ispitivanja nema pougljenja, koje se javlja u 17. minuti ispitivanja, ali s manjom brzinom od $\beta_0 = 0.49$ mm/min, sve do početka konsolidirane faze pougljenja, odnosno trenutka t_a , nakon čega je brzina pougljenja jednaka onoj inicijalno nezaštićenih greda. Prilikom određivanja efektivnog poprečnog presjeka za prošupljene GL elemente pojavio se slučaj koji nije pokriven normom EN 1995-1-2, zbog postojanja rupa, gdje je uzet u obzir moment tromosti preostalog presjeka, koji je bio značajno niži za prošupljene GL grede (zbog prisutnosti rupa) u usporedbi s normalnim GL gredama. Posljedično, prosječna brzina pougljenja za višestrani požar bila bi značajno viša (0.95 mm/min), ali ovaj pristup predstavlja značajno pojednostavljene i kao takav je upitan za korištenje u praksi. Stoga, razvijen je jednostavni proračunski model za prošupljene grede i grede s protupožarnim premazom koji je opisan u

poglavljima 4.2.2.3i 4.2.2.4. Prateći pravila objašnjena u odjeljku 4.3.1 i slici 4.49, idealni rezidualni presjek prikazan je plavom isprekidanom linijom na slici 4.64.



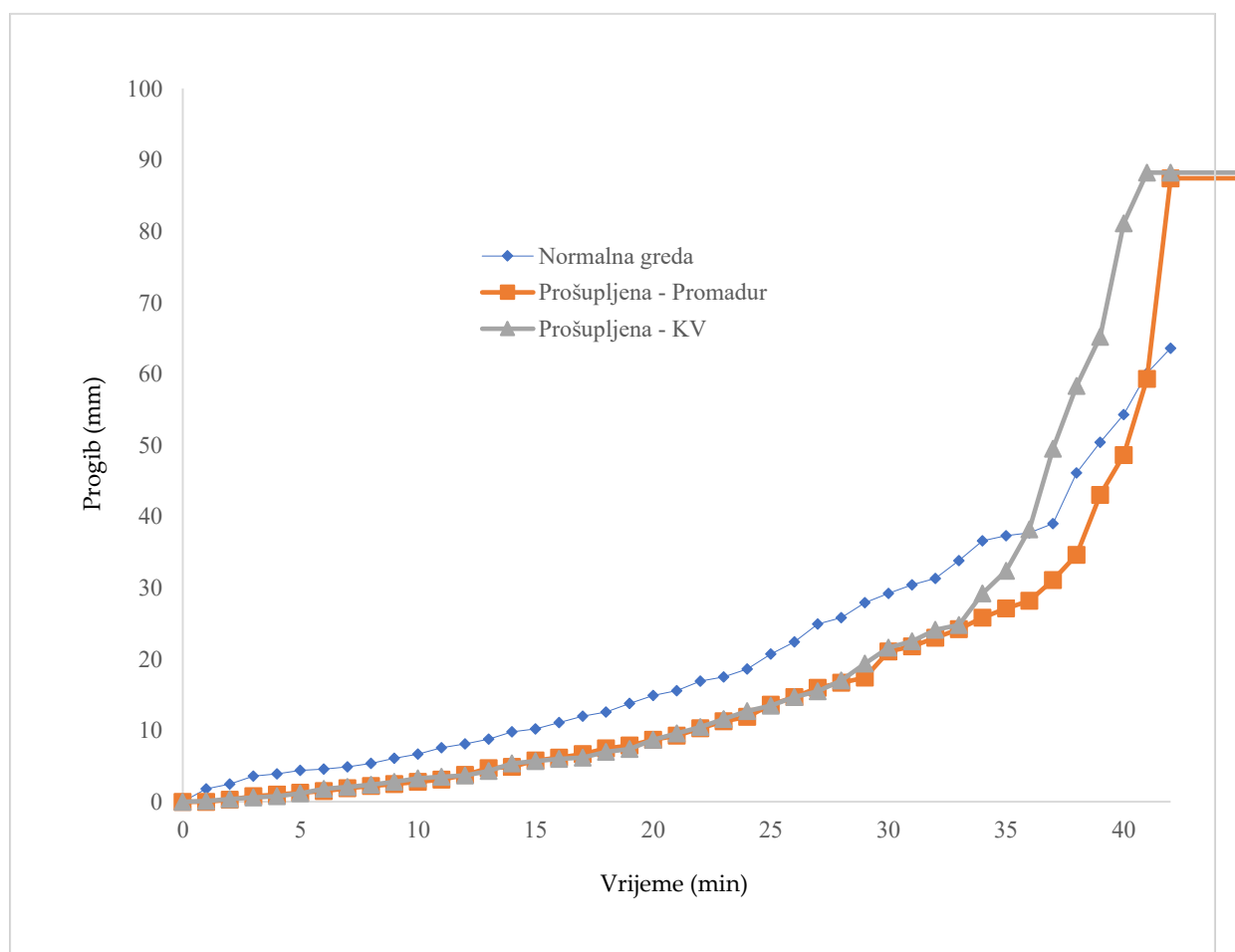
Slika 4.64 Preostali poprečni presjek analiziran pomoću CAD softvera šuplja GL greda zaštićena protupožarnim premazom

4.3.2.8 Progib

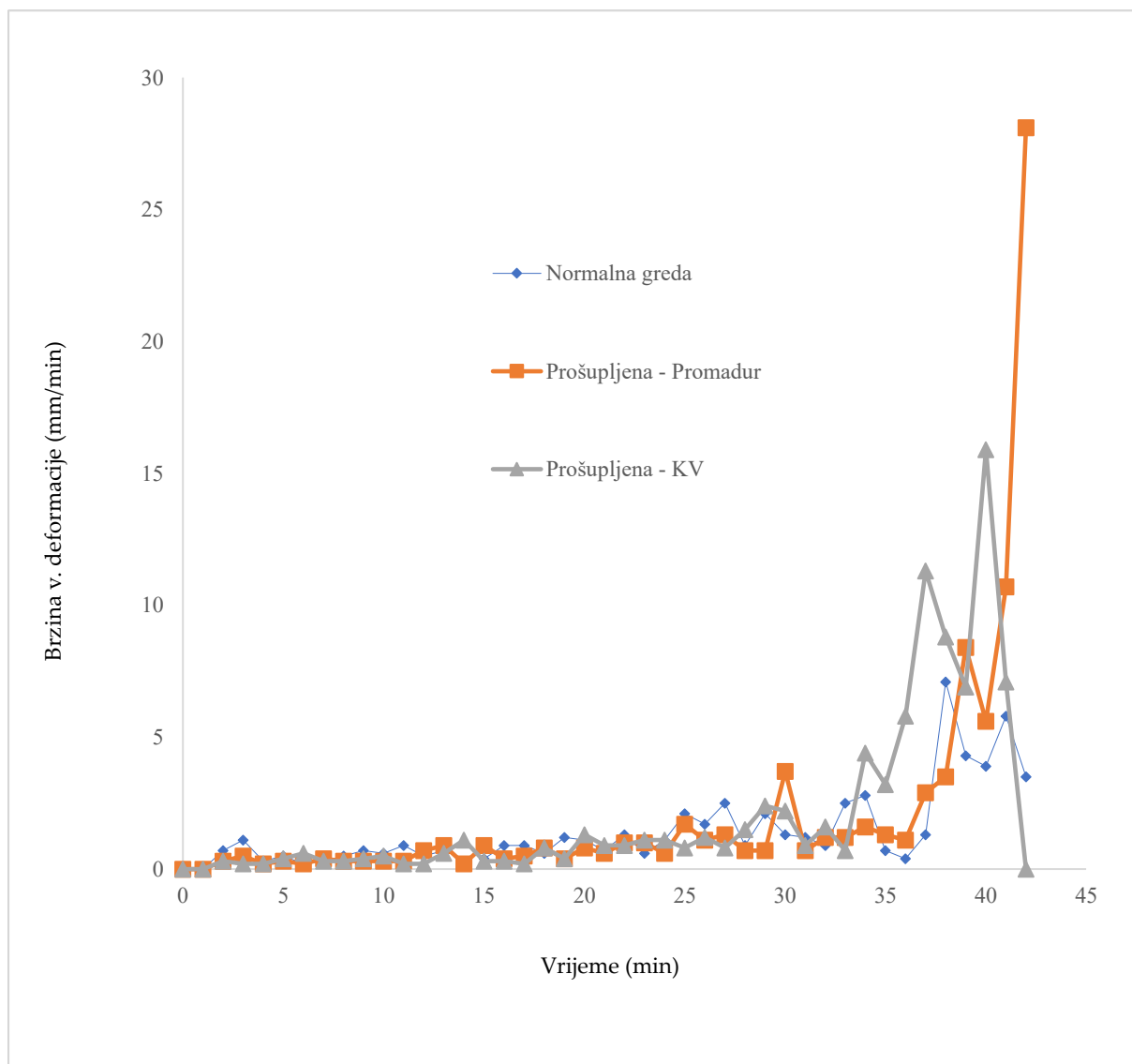
Jedan od glavnih parametara za definiranje požarne otpornosti grede je deformacija. Deformacija je uvjetovana i izravno povezana s razvojem temperature u uzorku, odnosno izgaranjem grede i gubitkom mase. Povećanje temperature dovodi do redukcije materijalnih i geometrijskih karakteristika, što rezultira povećanjem progiba. Veličina progiba i brzina prirasta progiba mjereni tijekom ispitivanja, prezentirani su nastavku (Tablica 4.13, Slika 4.65 i Slika 4.66).

Tablica 4.13 Progib i brzina prirasta progiba

| Uzorak | Brzina vertikalne deformacije dD/dt (mm/min) | Konačni progib - D1 (mm) | Prekid ispitivanja (min) |
|------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Normalna greda | 7.1 | 63.6 | 43. |
| Prošupljena - Promadur | 10.7 | 87.4 | 46. |
| Prošupljena - KV | 15.9 | 88.2 | 45. |



Slika 4.65 Progib u sredini grede

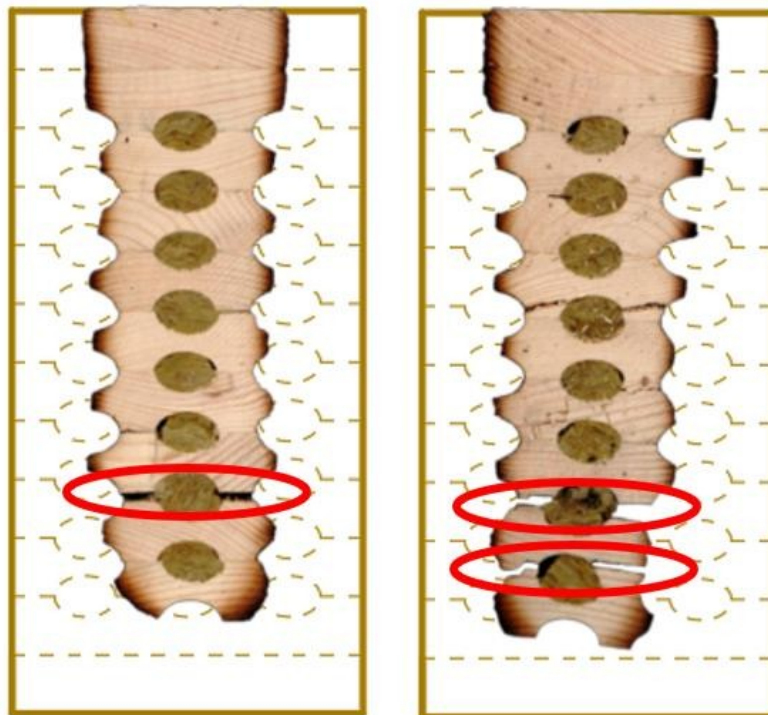


Slika 4.66 Brzina prirasta progiba

Požarna ispitivanja prekinuta su zbog prodora plamena na granici između izložene i neizložene strane uzorka i opasnosti za laboratorijsko osoblje i opremu.

4.3.2.9 Diskusija i zaključak

Inovativni prošupljeni drveni elementi imaju određene prednosti u odnosu na normalne, GL elemente. Prvenstveno se to odnosi na težinu, montažu, ugradnju i energetske učinkovitost, no mogu se uočiti i određeni nedostaci. Prije svega, to se odnosi na ponašanje prošupljenih uzoraka u požarnim uvjetima. Dva su ključna razloga za to: smanjena površina poprečnog presjeka drvenog elementa i mogućnost cirkulacije zraka kroz šupljine, što ubrzava proces gorenja. Nadalje, smanjena lijepljena površina u ravnini spoja lamela može rezultirati delaminacijom (vidi sliku 4.67), što se u ovom istraživanju pokazalo kao glavni razlog otkazivanja prošupljenih greda.

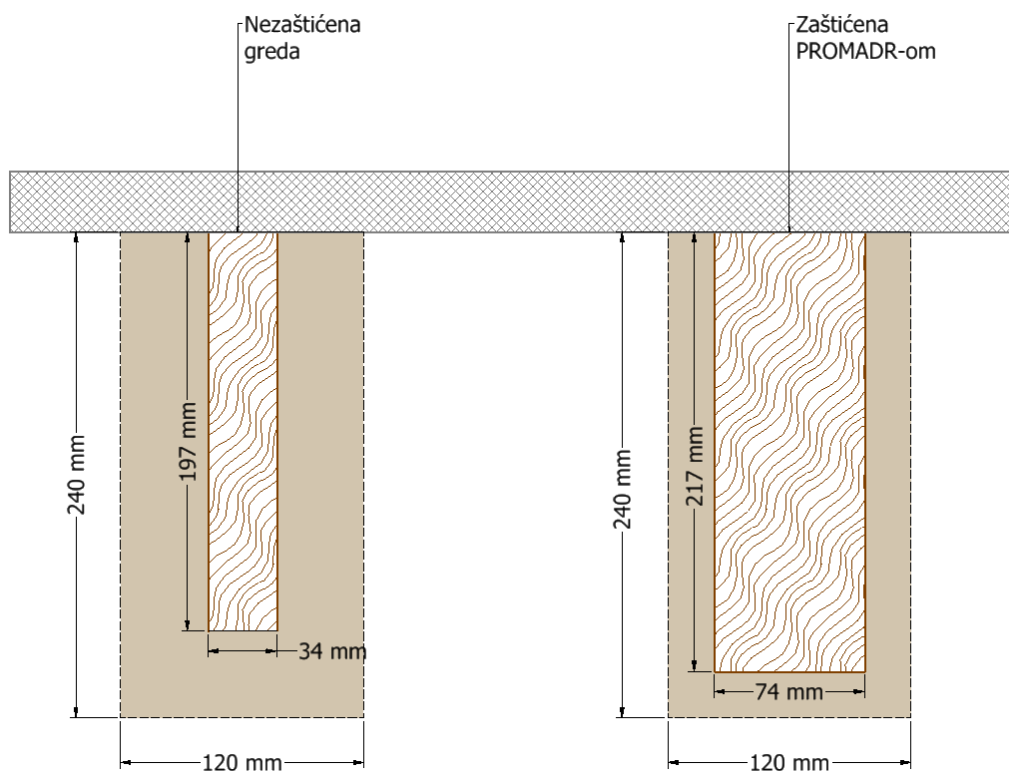


Slika 4.67 Delaminacija prošupljenih drvenih elemenata

Kod standardnih punih GLT greda, koje imaju lijepljenu površinu cijelom širinom elementa, ne dolazi do delaminacije. Za razliku od punih greda, kod prošupljenih uzoraka je došlo do delaminacije jer je lijepljena površina značajno manja. S obzirom na problem delaminacije prvih požaru izloženih lamela, u budućim istraživanjima ideja je napraviti prve lamele bez šupljina i time povećati lijepljenu površinu između lamela. Osim toga, za prvu lamelu može se koristiti drvo veće kvalitete i/ili deblja lamela, i na taj način izbjeći pojavu delaminacije.

Nadalje, protupožarni premaz i kamena vuna usporile su prodor požara prema unutrašnjosti elementa, pa je vrijeme otkazivanja bilo slično kao i kod normalnih greda. Eurokod 5 (EN 1995-1-2) [8] daje postupke za proračun požarne otpornosti drvenih konstrukcijskih elemenata sa protupožarnim sustavima zaštite. Procedura dana u normi dijeli vremenska razdoblja u različite intervale, s različitim brzinama pougljenja, ovisno o karakteristikama zaštitnog materijala. U ovom istraživanju, korišten je PROMADUR [180] protupožarni premaz. Protupožarni razred zaštićenih drvenih elemenata mora se izračunati na temelju dubine pougljenja dobivene iz vrijednosti $t_f \rightarrow t_{ch}$ (početak pougljenja) i k_β (koeficijent brzine pougljenja), a sve prema normi EN 13381-7 [142]. S obzirom na naneseu količinu premaza (1120 g/m^2) određen je trenutak početka pougljenja drva $t_h = 17 \text{ min}$, što je potvrđeno i eksperimentom. Nadalje, kada su izračunate i uspoređene dimenzije normalne grede sa i bez PROMADUR-a (4.68), rezidualne dimenzije poprečnog presjeka uzoraka nakon izlaganja

požaru od 45 min, bile su 197/34 milimetra za nezaštićenu GLT gredu, a 217/74 milimetra za zaštićenu GLT gredu (vidi sliku 4.68), što najbolje oslikava učinak protupožarnog premaza.



Slika 4.68 Usporedba preostalog presjeka nezaštićenih i zaštićenih greda s Promadur-om nakon 45 min izloženosti požaru

Ispuna od kamene vune nije pokazala značajnu razliku u odnosu na PROMADUR premaz. Razlog tomu je što nije došlo do potpunog prekida prijenosa topline prema unutrašnjosti elementa, cijelom širinom uzorka, koji bi u potpunosti spriječio gorenje. Stoga, prednost negorivosti kamene vune nije u potpunosti realizirana.

Ova je studija pokazala da ponašanje površine lijepljenja diktira ponašanje lameliranih greda. Nadalje, ljepilo se raspalo na temperaturi od oko 280 °C, a prema ovom eksperimentalnom istraživanju, mehanička svojstva (čvrstoća, modul elastičnosti, gustoća) drva približavaju se nuli na 300 °C, pa je utjecaj različitih vrsta ljepila zanemariv.

Utvrđena je jednodimenzionalna brzina pougljenja lamela ($\beta_0 = 0.69$ mm/min), što je blizu vrijednosti od 0.65 mm/min danoj u EN 1995-1-2[8]. Nadalje, za normalne GL grede određena je višedimenzionalna brzina pougljenja ($\beta_n = 0.78$ mm/min). U slučaju prošupljenih GL greda, kao i u prethodnom slučaju gdje su uzorci bili izloženi s jedne strane (vidi poglavlje 0), zbog protupožarne zaštite došlo je do odgode u izgaranju drva, te postoje dvije faze pougljenja. Na početku požarnog ispitivanja nema pougljenja, a onda se u fazi 2 javlja usporeno pougljenje ($\beta_0 = 0.49$ mm/min), sve do konsolidirane faze pougljenja, kada je brzina pougljenja

jednaka onoj u slučaju inicijalno nezaštićenih greda. Može se zaključiti da je kod prošupljenih GLT elemenata prisutna prirodna otpornost drva na požar (pougljenjeni sloj) koji sprječava širenja topline u unutrašnjost uzorka, bez obzira na postojanje rupa.

Uspoređujući normalne GLT grede sa prošupljenim, vidljiva je razlika u modovima loma, prvenstveno zbog pojave delaminacije kod prošupljenih uzoraka. Prvo, razlog tome je smanjena lijepljena površina zbog perforacije grede. Kod uzorka s izolacijom od kamene vune unutar šupljina, uočen je pozitivan učinak na požarnu otpornost uzorka, budući da u šupljinama nije bilo zraka, te je negorivi materijal odgodio prodor požara prema linijama lijepljenja. Protupožarni premaz uvelike je pridonio požarnoj otpornosti drvenih elemenata, čime je odgođen toplinski val do linije ljepila. Pojava delaminacije je promatrana u rasponu temperatura od 100 do 300 °C. Potrebno je uskladiti metodologiju ispitivanja interakcije ljepila i drva u ambijentnim i požarnim uvjetima.

Konačno, dobiveni rezultati omogućili će analitičku i numeričku analizu požarne otpornosti GLT (prošupljenih) elemenata. Razvijen je jednostavni proračunski model opisan u poglavlju 4.2.2.5. Rezultati su pokazali dobru korelaciju.

Ipak, ograničenje ovog dijela istraživanja prvenstveno je mali broj ispitanih uzoraka. To otežava procjenu utjecaja povišene temperature na ljepilo i požarnu otpornost lijepljenih prošupljenih drvenih elemenata. Primjetan je utjecaj perforacije drvenog elementa na razvoj temperature prema unutrašnjosti elementa, ali se ne može sa sigurnošću zaključiti koliko je, i na koji način to utjecalo na brzinu pougljenja. U budućem istraživanju analizirat će se veći broj uzoraka za sve vrste GLT elemenata. To se posebno odnosi na prošupljene GL drvene elemente, gdje su uključeni novi i dodatni parametri koji utječu na ponašanje takvih elemenata u slučaju požara. Prvenstveno se to odnosi na geometrijske karakteristike prošupljenih elemenata i raspored šupljina, pa posljedično i na zrak koji cirkulira unutar šupljina i pospješuje proces gorenja.

EN 1995-1-2 [8] propisuje vrijednosti brzine pougljenja za višestrani požar β_n kao i jednodimenzionalne brzine pougljenja β_0 za GLT grede. Međutim, pravila propisana od EN 1995-1-2 [8] nisu primjenjiva za inovativne prošupljene GL drvene elemente, stoga su potrebna daljnja istraživanja i parametarska analiza brojnih čimbenika koji utječu na požarnu otpornost ovakvih elemenata.

Zbog svega navedenoga, u sklopu ovog doktorskog rada, razvijen je novi pristup procjene stvaranja pougljenog sloja i požarne otpornosti drvenih elemenata, koristeći metodu konačnih elemenata i ANSYS programski jezik APDL, a koji je objašnjen u nastavku rada.

4.3.3 Numeričko modeliranje uzroka izloženih požaru s tri strane

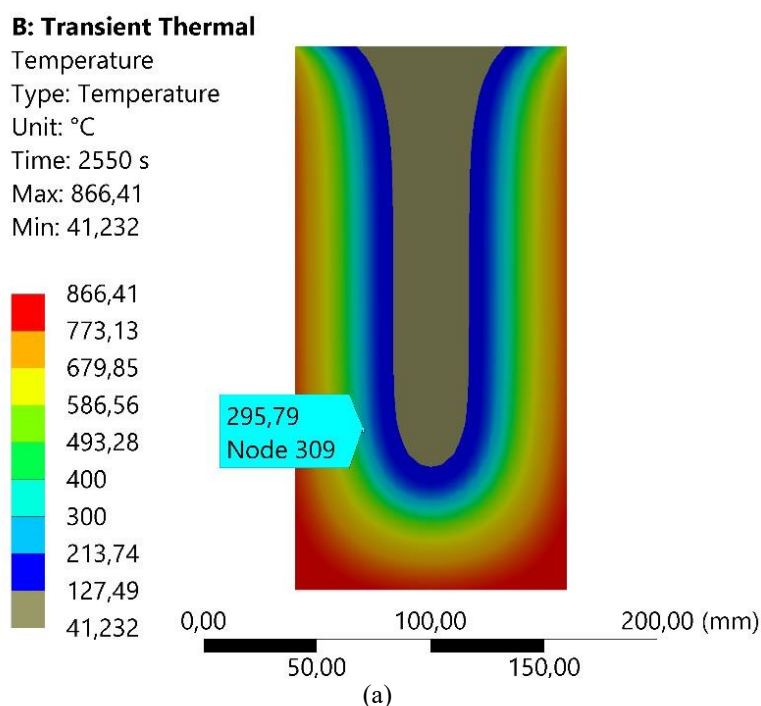
4.3.3.1 Uvod

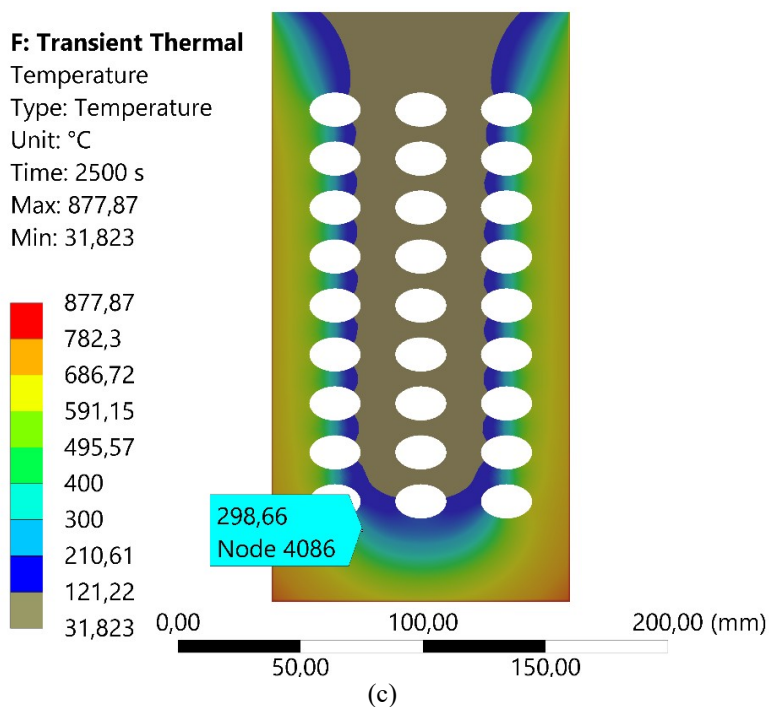
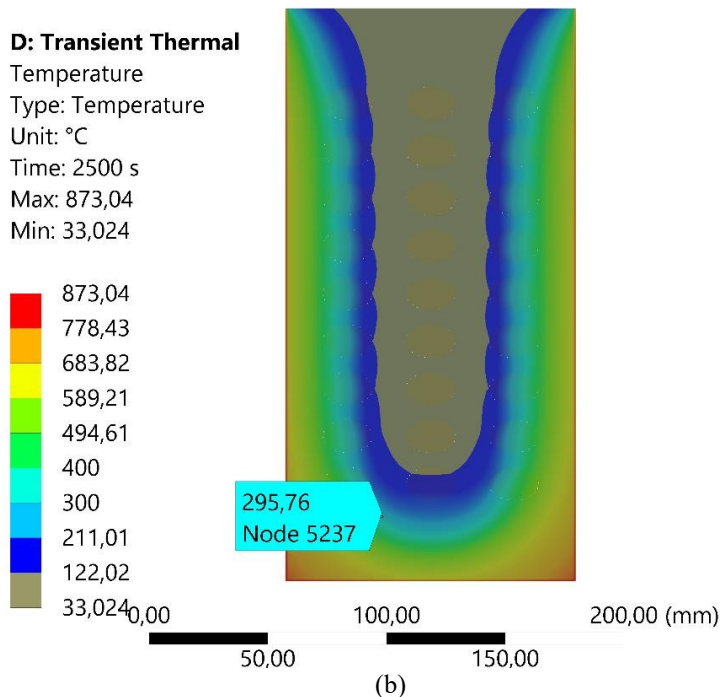
Metoda konačnih elemenata (MKE) korištena je kako bi predvidjelo ponašanje normalnih i prošupljenih lijepljeno lameliranih greda izloženih požaru s tri strane. S obzirom na dobru korelaciju rezultata (vidi poglavlje 4.2.3) dobivenih simulacijom i rezultata eksperimentalnog istraživanja uzoraka izloženih požaru s jedne strane, korišten je se isti princip, odnosno analogni ulazni podaci za simulaciju greda izloženih požaru s tri strane. Geometrijske karakteristike, rubni uvjeti i opterećenje (mehaničko i toplinsko) zadani su u skladu s eksperimentalnim istraživanjem opisanim u poglavlju 4.3.1.

4.3.3.2 Termalna analiza

Termalna analiza provedena je u skladu s postupkom opisanom u poglavlju 4.2.3.2 za uzorke izložene požaru s jedne strane. Generirana je geometrija modela ($b \times h = 120 \times 240$ mm), te su definirani rubni uvjeti (izloženost standardnoj požarnoj krivulji s tri strane).

S obzirom na već validirane rezultate termalne analize pomoću MKE u poglavlju 4.2.3.3 za uzorke izložene požaru s jedne strane, i u ovom poglavlju rezultati MKE pokazuju dobro slaganje s rezultatima eksperimentalnog istraživanja. Razvijene temperature unutar svih uzoraka dobivene pomoću MKE mogu se vidjeti na 4.69. Uz to, prikazana je temperatura od približno 300 °C, koja predstavlja granicu između pougljenog sloja i preostalog poprečnog presjeka.





Slika 4.69 MKE - rezultati termalne analize nakon 45 minuta izloženosti požaru : (a) puna greda; (b) prošupljena greda sa ispunom od KV; (c) prošupljena greda sa protupožarnim premazom

Rezultati termalne analize su potvrdili eksperimentalna ispitivanja. Na osnovu usporedbe razvijenih temperatura dobivenih požarnim ispitivanjem i rezultata dobivenih pomoću MKE, može se zaključiti da se simulacijom u ANSYS-u može dobro predvidjeti ponašanje drvenih elemenata u požaru.

4.4 Evaluacija pougljenog sloja pomoću MKE – implementacija novo-razvijenog pristupa numeričkom modeliranju

4.4.1 Uvod

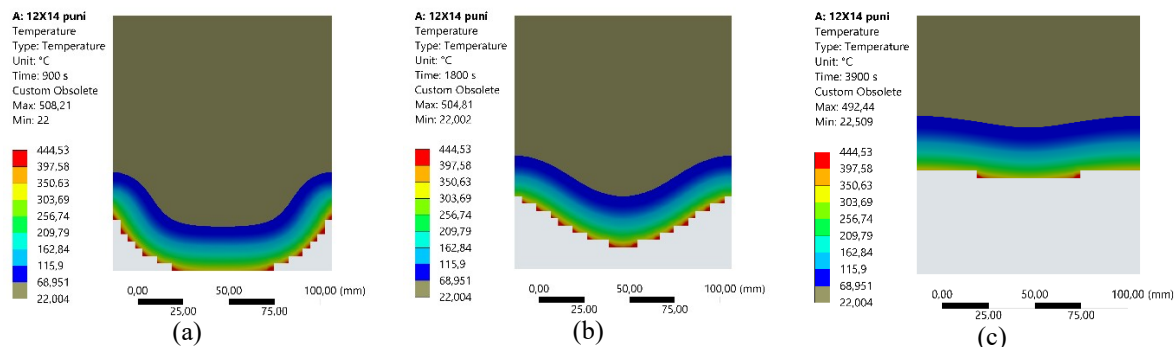
U doktorskom radu implementiran je potpuno novi princip simulacije procesa pougljenja drva, na način da kada se u drvu javlja temperatura od 300 °C, konačni elementi u numeričkom modelu „nestaju“. Na taj način simulira se ponašanje drva sukladno EN 1995-1-2 [8], prema kojoj drvo gubi svojstva (čvrstoću i krutost) pri temperaturi od 300 °C.

Razvijen je programerski kod koji je implementiran u APDL (Ansys Parametric Design Language), a koji omogućava navedenu simulaciju i „ubijanje“ konačnih elemenata prema određenom pravilu. Napravljen je iskorak u modeliranju drva u požaru, koji omogućuje predviđanje preostale nosivosti drvenih elemenata u požaru. Dodatno, na ovaj način moguće je simulirati pojavu delaminacije, opisanu u poglavlju 4.1.2. Sve navedeno omogućuje nova saznanja i predviđanje ponašanja drvenih elemenata u požaru. Nadalje, inovativni princip simulacije pougljenja, korišten je za potvrđivanje modela proračuna dubine pougljenog sloja, te sloja nulte čvrstoće za prošupljene elemente, opisanog u poglavlju 4.2.2.5. Inovativna metoda simulacije donosi prednosti jer nije potrebno očitavati temperaturu u određenim točkama mreže konačnih elemenata, a u naknadnoj strukturalnoj analizi uzima se u obzir samo stvarni preostali poprečni presjek, koji je sposoban prenositi opterećenje.

Napravljena je validacija ove kompleksne simulacije na eksperimentalno ispitanim drvenim uzorcima, za jednodimenzionalni i višedimenzionalni proces pougljenja.

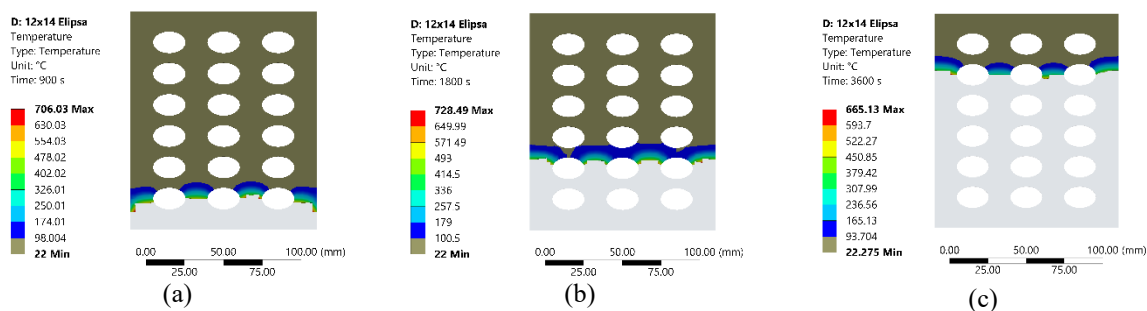
4.4.2 Termalna analiza – uzorci izloženi požaru s jedne strane

Prije svega, napravljena je validacija modela na osnovnim uzorcima normalne grede (vidi sliku 4.70) gdje se ustanovljena vrlo dobra korelacija između rezultata simulacije i požarnog testa. Dubina pougljena određena eksperimentom je 52.34 milimetra (vidi poglavlje 0), a dubina pougljena dobivena pomoću MKE iznosi 52 milimetra, nakon izloženosti požaru od 60 minuta. Slika 4.70 prikazuje razvoj pougljenog sloja u vremenu (15., 30., i 60. minuta).



Slika 4.70 Evaluacija pougljenog sloja normalne grede pomoću MKE: (a) 15. minuta; (b) 30. minuta; (c) 60. minuta

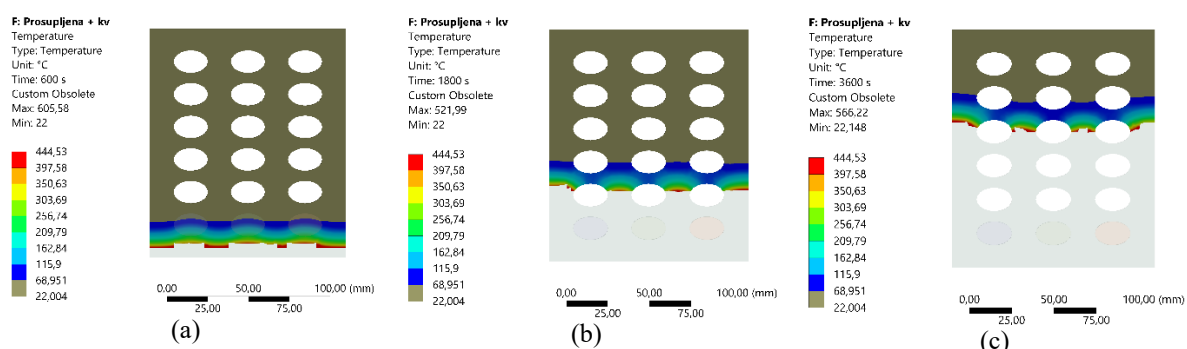
Nadalje, pristupilo se simulaciji ponašanja prošupljenih greda u požaru, gdje je također ustanovljena vrlo dobra korelacija između simulacije MKE i eksperimentalnog istraživanja. Nakon 60 minuta izloženosti požaru, eksperimentalno dobivena dubina pougljenog sloja bila je 97.1 milimetra (vidi sliku 4.22a), dok je dubina pougljenog sloja određena pomoću MKE u prosjeku iznosila 99.2 milimetra. Proces pougljenja kroz vrijeme predstavljen je na slici 4.71.



Slika 4.71 Evaluacija pougljenog sloja prošupljene grede pomoću MKE: (a) 15. minuta; (b) 30. minuta; (c) 60. minuta

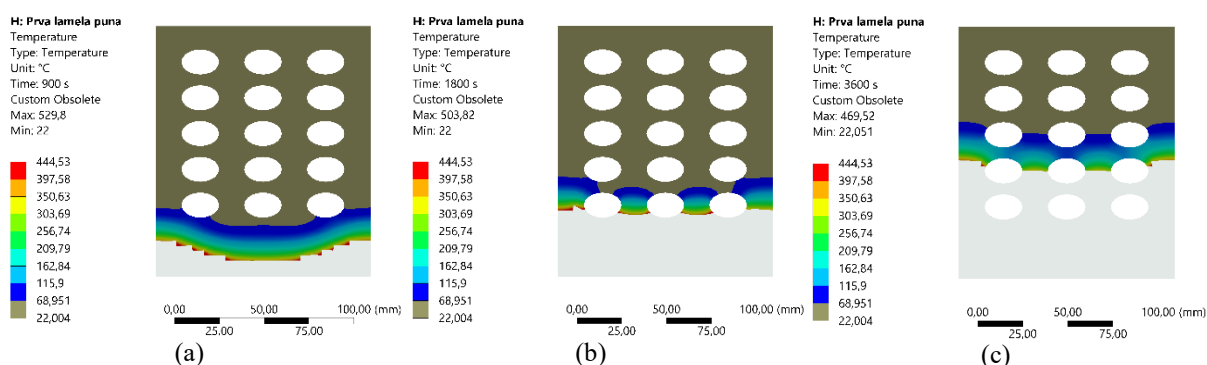
Da bi odredili utjecaj kamene vune postavljene u prvi red šupljina, napravljena je simulacija u ANSYS-u, gdje su implementirani novi elementi sa pripadajućim toplinskim svojstvima koji odgovaraju svojstvima kamene vune. Eksperimentalno izmjerena dubina pougljena nakon 60 minuta izloženosti požaru bila je 83.3 milimetra (vidi sliku 4.22b), a dubina

pougljenja određena pomoću MKE iznosila je u prosjeku 83 milimetra (vidi sliku 4.72c), što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata.



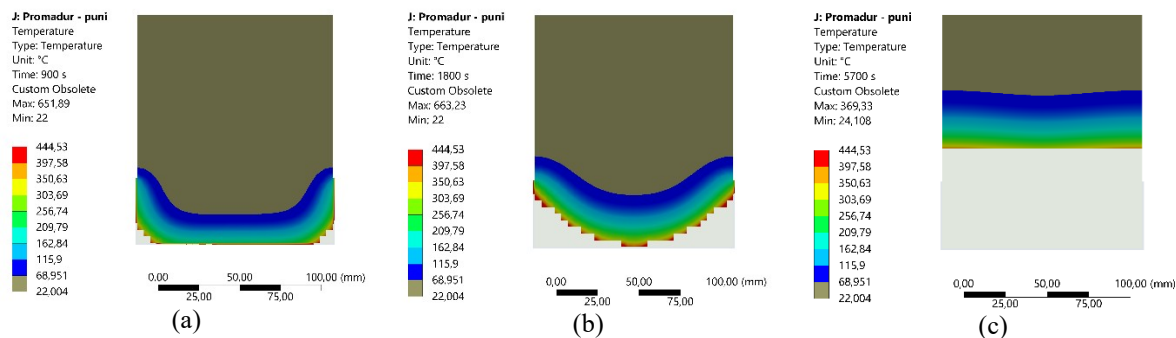
Slika 4.72 Evaluacija pougljenog sloja prošupljene grede sa KV pomoću MKE: (a) 10. minuta; (b) 30. minuta; (c) 60. minuta

Kombinacijom prethodno objašnjениh numeričkih modela, kreiran je model prošupljene grede sa prvom punom lamelom (vidi sliku 4.73). Također je ustanovljena vrlo dobra korelacija između eksperimentalnih rezultata (dubina pougljenja 60.3 milimetra – vidi sliku 4.22c) i rezultata dobivenih simulacijom koristeći MKE (60 milimetara).

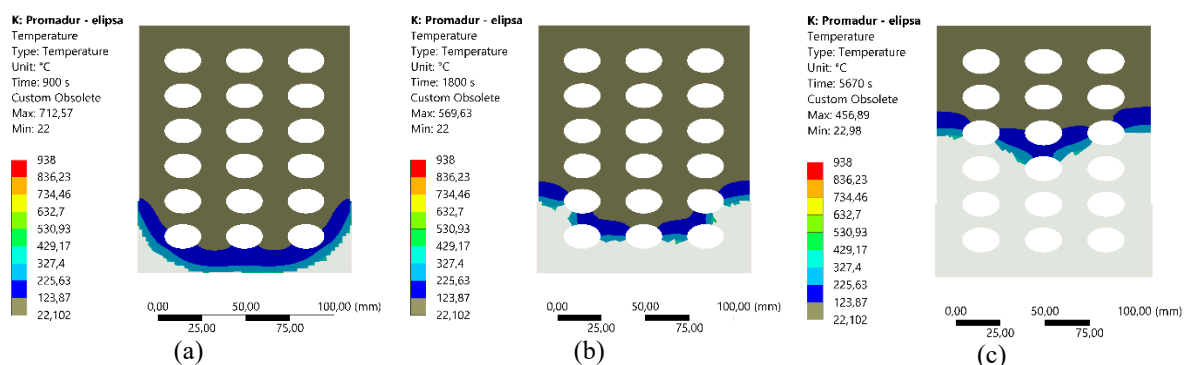


Slika 4.73 Evaluacija pougljenog sloja prošupljene grede sa prvom punom lamelom pomoću MKE: (a) 15. minuta; (b) 30. minuta; (c) 60. minuta

Zadnja skupina modela odnosila se na grede zaštićene protupožarnim premazom. Što čini ovu simulaciju složenijom. Na slici 4.74 prikazan je razvoj pougljenog sloja kroz vrijeme pune grede zaštićene protupožarnim premazom, dok je na slici 4.75 prikazan razvoj pougljenog sloja kroz vrijeme za prošupljeni uzorak, također zaštićen protupožarnim premazom. U oba slučaja, ustanovljena je dobra korelacija između rezultata dobivenih numeričkom simulacijom i eksperimentalnih rezultata. Razlika između dubine pougljenja za pune grede zaštićene premazom dobivene pomoću MKE i dubine pougljenja dobivene eksperimentom je u prosjeku 1.3 milimetra, a za prošupljene grede zaštićene premazom, u prosjeku 3.2 milimetra.



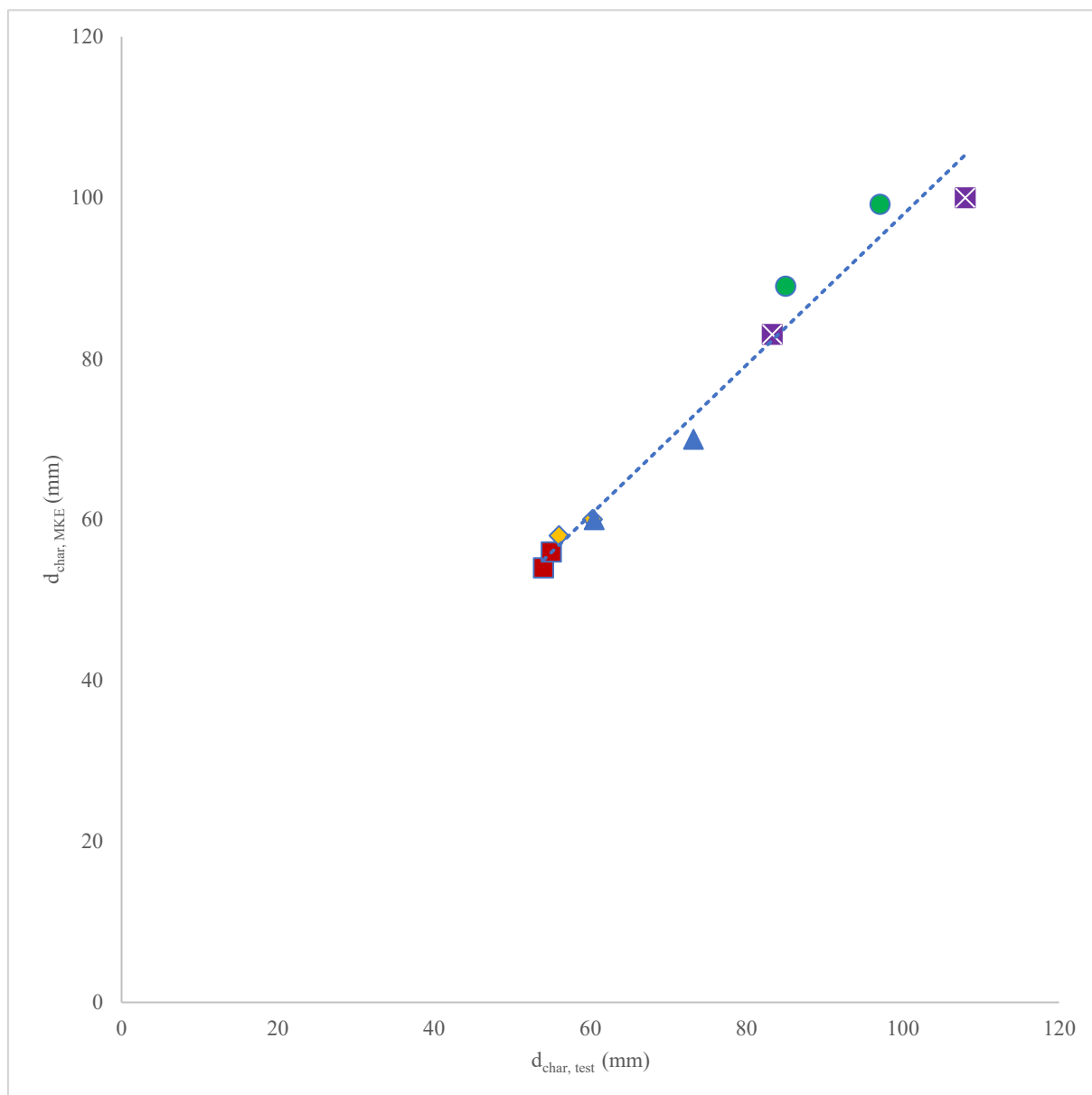
Slika 4.74 Evaluacija pougljenog sloja normalne grede sa protupožarnim premazom pomoću MKE: (a) 10. minuta; (b) 30. minuta; (c) 60. minuta



Slika 4.75 Evaluacija pougljenog sloja prošupljene grede sa protupožarnim premazom pomoću MKE: (a) 10. minuta; (b) 30. minuta; (c) 60. minuta

Analiza dubine pougljenog sloja napravljena u sklopu požarnih ispitivanja drvenih uzoraka u srednjem mjerilu. U nizu požarnih ispitivanja, proučavan je utjecaj različitih konfiguracija poprečnog presjeka i sustava zaštite, na stvaranje pougljenog sloja, i u konačnici, na požarnu otpornost GLT elemenata.

Razvijena je nova metoda procjene dubine pougljenog sloja, zasnovana na metodi konačnih elemenata i normi EN 1995-1-2 [8]. Vrijednosti dobivene numeričkim modeliranjem, potvrdile su eksperimentalno istraživanje. Na slici 4.76 uspoređene su izmjerene dubine pougljenja s dubinama pougljenja određenim pomoću numeričkih simulacija koristeći ANSYS programski paket.

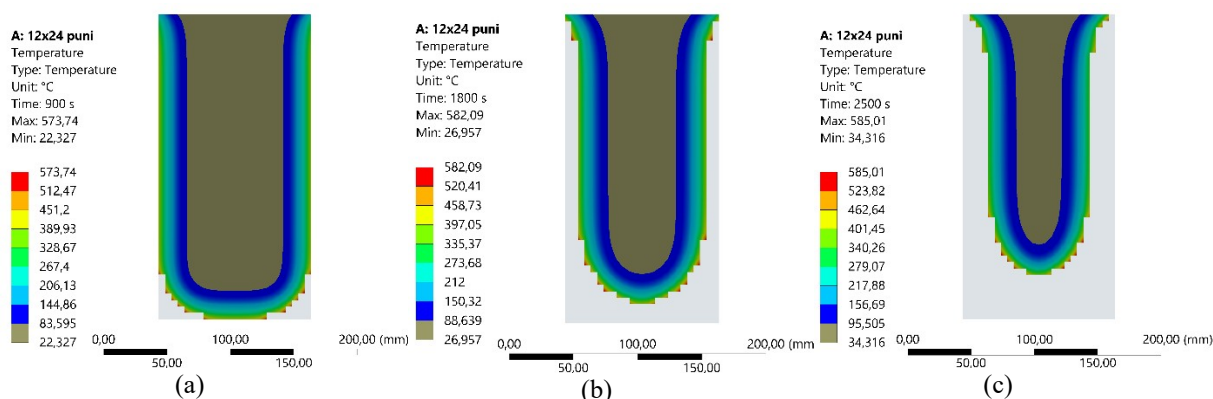


Slika 4.76 Usporedba dubine pougljenja dobivene pomoću MKE i eksperimentalnim istraživanjem

Utvrđeno je vrlo dobro slaganje između rezultata MKE i rezultata požarnih ispitivanja. Omjer dubine pougljenja dobivene numeričkim modeliranjem koristeći MKE ($d_{char, MKE}$) u odnosu na dubinu pougljenja dobivenih požarnim ispitivanjem ($d_{char, test}$) je 1.05, što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata (5 %).

4.4.3 Termalna analiza – uzorci izloženi požaru s tri strane

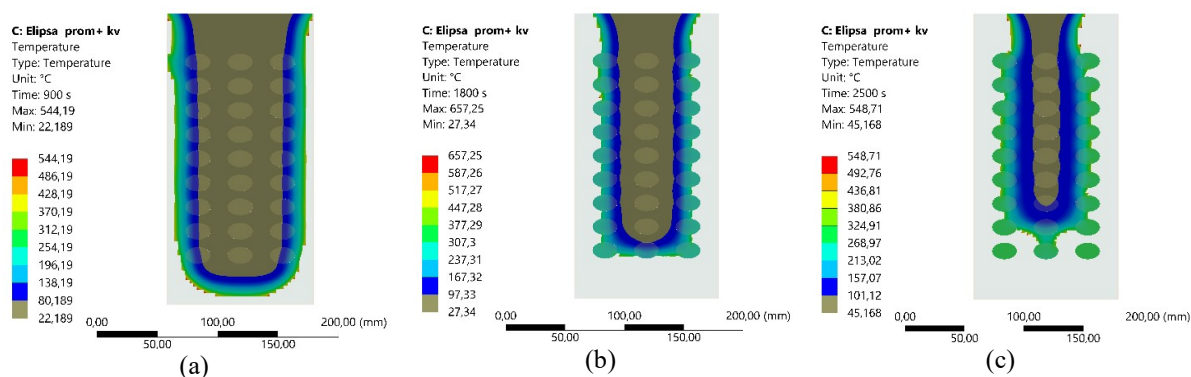
Analogno prethodnom poglavlju, u nastavku su prikazani rezultati dobivenog pougljenog sloja pomoću inovativnog pristupa numeričkom modeliranju (MKE), za drvene uzorke izložene požaru s tri strane. Dubine pougljenog sloja za standardnu GLT gredu, nakon 15., 30., i 45. minuta predstavljeni su na slici 4.77.



Slika 4.77 Evaluacija pougljenog sloja pune grede izložene požaru s tri strane: (a) 15. minuta; (b) 30. minuta; (c) 45. minuta

Uvidom u rezultate može se zaključiti dobro slaganje rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem sa rezultatima požarnog ispitivanja. Debljina pougljenog sloja pune grede izmjerene nakon 45 minuta izloženosti požaru, može se vidjeti na slici 4.61. Ako usporedimo dimenzije stvarnog pougljenog sloja sa onim dobivenim pomoću MKE, jedina manja razlika javlja se na neizloženoj (gornjoj) strani elementa. Razlog tomu su idealni uvjeti pretpostavljeni u numeričkom modelu, dok se u eksperimentalnom istraživanju, pred kraj ispitivanja i pri visokim temperaturama, javljaju izrazito dinamični procesi gorenja. Izmjerena dubina pougljenja s donje strane, nakon požarnog ispitivanja, bila je 36.1 milimetar, a u numeričkom modelu 35 milimetara, dok je izmjerena dubina pougljenja s bočne strane iznosila u prosjeku 30 milimetara, kao i u numeričkom modelu. Može se zaključiti da je korelacija između rezultata vrlo dobra.

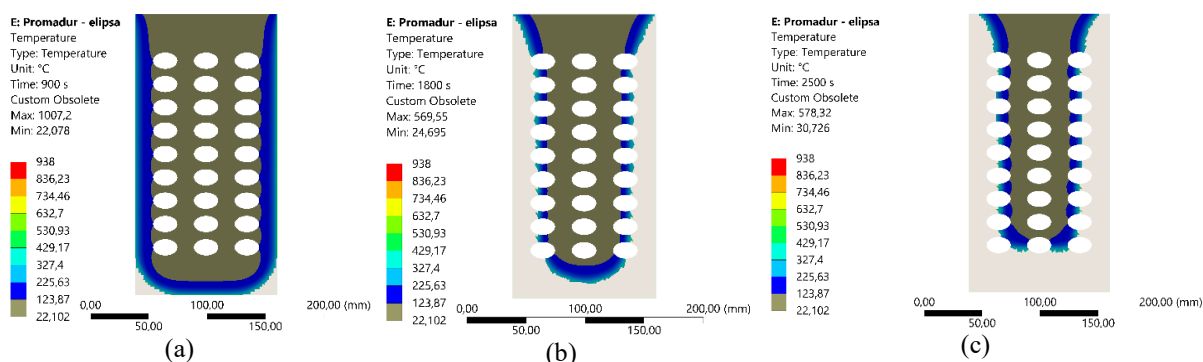
Nadalje, rezultati numeričke simulacije za prošupljenu gredu s ispunom od kamene vune u 15., 30., i 45. minuti, predstavljeni su na slici 4.78.



Slika 4.78 Evaluacija pougljenog sloja prošupljene grede sa ispunom od kamene vune izložene požaru s tri strane: (a) 15. minuta; (b) 30. minuta; (c) 45. minuta

Kamena vuna definirana je kao negorivi materijal (temperatura taljenja 1000 °C), stoga je prikaz kamene vune u rezultatima simulacije postojan do kraja. Izmjerena dubina pougljenja nakon požarnog ispitivanja za prošupljene uzorke sa ispunom od kamene vune bila je u prosjeku 30 milimetara, ne uzimajući u obzir delaminaciju koja se desila na kraju ispitivanja. Numeričkom simulacijom dobivena je ista vrijednost. Kao što se vidi na slici 4.78c, razlika se ponovno uočava samo na neizloženoj (gornjoj) strani uzorka.

Razvijene temperature i dubina pougljenog sloja dobivena simulacijom za prošupljeni drveni uzorak zaštićen protupožarnim premazom, prikazani su na slici 4.79.



Slika 4.79 Evaluacija pougljenog sloja prošupljene grede sa ispunom od kamene vune izložene požaru s tri strane: (a) 15. minuta; (b) 30. minuta; (c) 45. minuta

Na slici 4.79a, vidi se učinak protupožarne zaštite, odnosno da je tek nakon 15. minute započelo pougljenje, kao što je zaključeno u poglavlju 0. Nakon toga, javlja se druga faza pougljenja gdje dolazi do ubrzanog pougljenja (vidi sliku 4.79b), što potvrđuje predloženi model proračuna opisan u poglavlju 4.2.2.4. Izmjerena dubina pougljenja nakon 45 minuta izlaganja požaru za prošupljene uzorke s protupožarnim premazom bila je u prosjeku 30

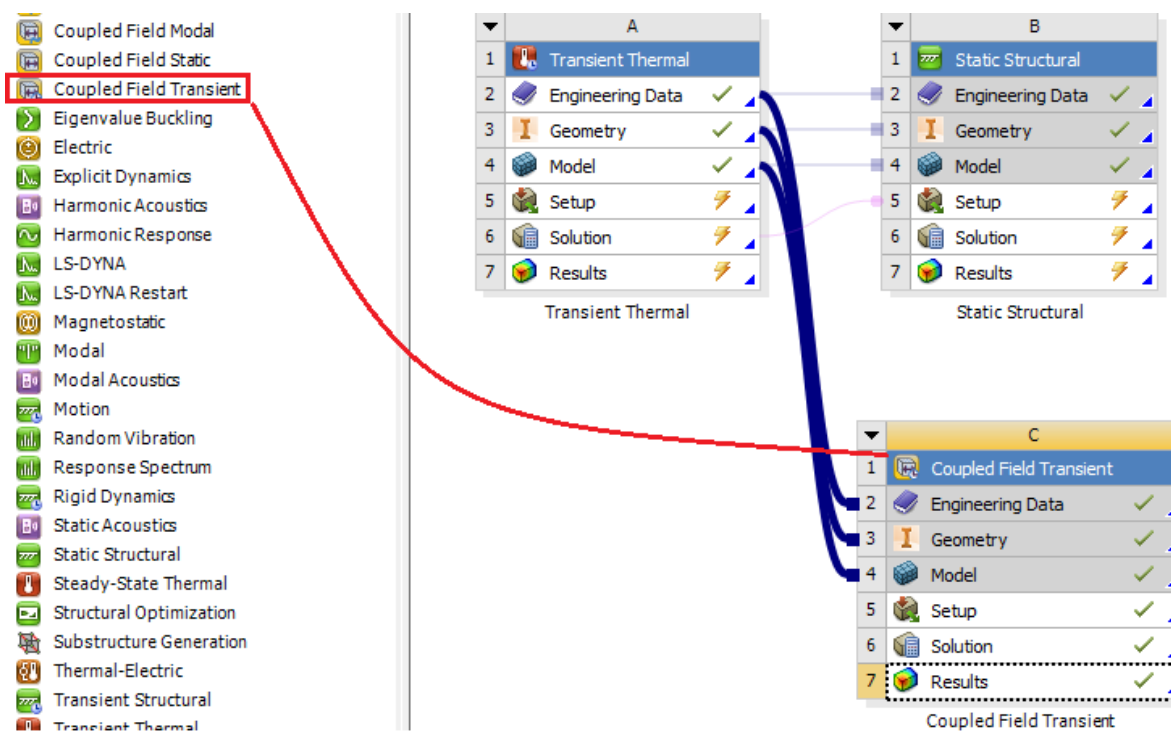
milimetara. Numeričkom simulacijom (MKE) dobivena je ista vrijednost. Kao u prethodnim slučajevima, jedina manja razlika očituje se na neizloženoj strani grede, koja je, s obzirom na cilj ovog istraživanja, od manjeg interesa.

4.4.4 Termo-mehanička simultana numerička analiza

Rezultati numeričke analize predstavljeni u poglavlju 4.2.3.4, gdje su se izlazni podaci termalne analize (temperatura) definirali kao unutarnje opterećenje u mehaničkoj analizi, ukazali su na dobro slaganje numeričkom modela s eksperimentalnim istraživanjem. Ipak, u ovom radu napravljen je iskorak u numeričkom modeliranju na način da se provela simultana termo-mehanička analiza koristeći principe MKE, uz primjenu inovativnog pristupa predstavljenog u prethodnom poglavlju (4.4.1).

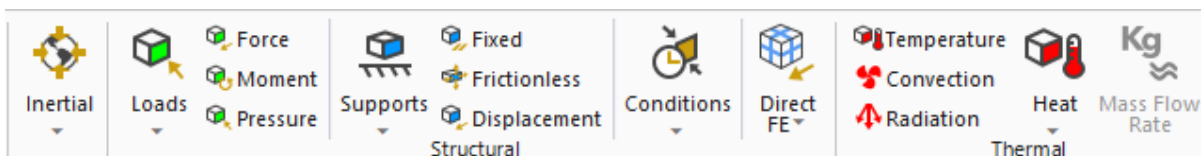
S obzirom da na prošupljene lijepljeno lamelirane drvene elemente proučavane u ovom radu uvelike utječu mehanički i toplinski aspekti opterećenja, važno je uzeti u obzir oba aspekta prilikom izvođenja numeričkih analiza, jer oba mogu dovesti do uspjeha (ili neuspjeha) same numeričke analize. Uz njihovu individualnu važnost, toplinski i mehanički aspekti sustava također značajno utječu jedan na drugoga. Promjena temperature materijala uzrokuje toplinsko širenje materijala. Tradicionalno, u slučajevima kada postoji značajno toplinsko opterećenje na sustav, prvo će se na sustavu izvršiti samo toplinska analiza i simulacija. Raspodjela temperature iz toplinske simulacije u tom slučaju bi se koristila kao ulazni podatak u strukturalnu simulaciju kako bi se uzeo u obzir utjecaj temperature na sustav. Ovakvo koncipirana numerička analiza dobro funkcionira u većini slučajeva. Međutim, budući da se toplinska simulacija dovršava zasebno i izolirano, ovaj način simulacije ne može odražavati učinak koji strukturni odziv sustava ima povratno na toplinski odziv, odnosno proces nije povratan. U mnogim slučajevima ovaj učinak je zanemariv, ali postoje određeni slučajevi u kojima su strukturalni i toplinski odziv međusobno pobježe „spojeni“.

Upotrebom novih sustava analize "spojenog polja" u ANSYS Workbench-u, prikazanih na slici 4.80, može se koristiti spojeni termo-mehanički numerički modul [183].



Slika 4.80 „Spojena“ termo-mehanička analiza [183]

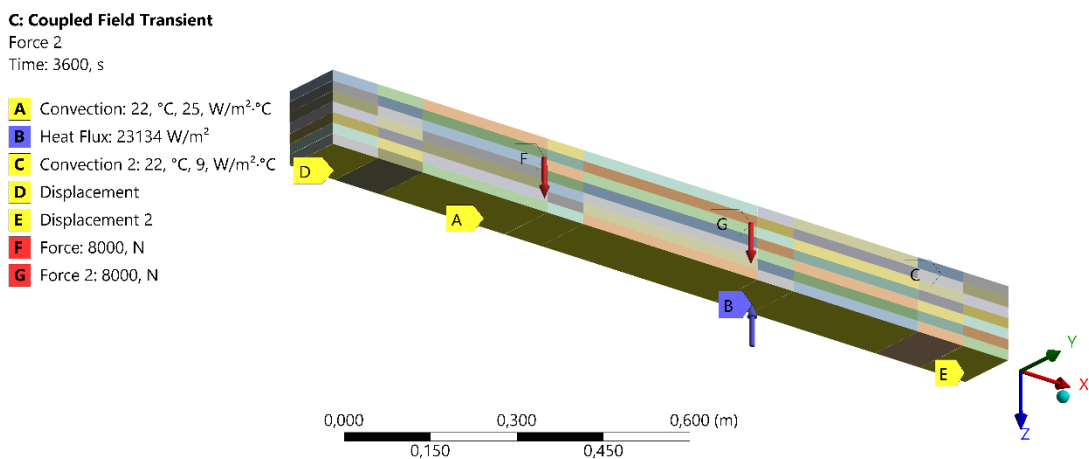
Termalni i strukturalni rubni uvjeti definirani su u Mechanical sučelju (vidi sliku 4.81).



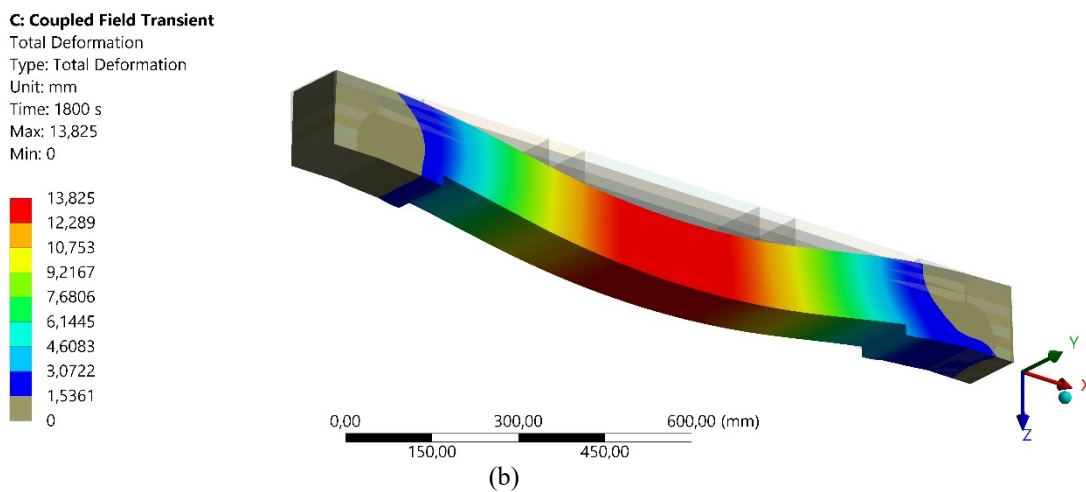
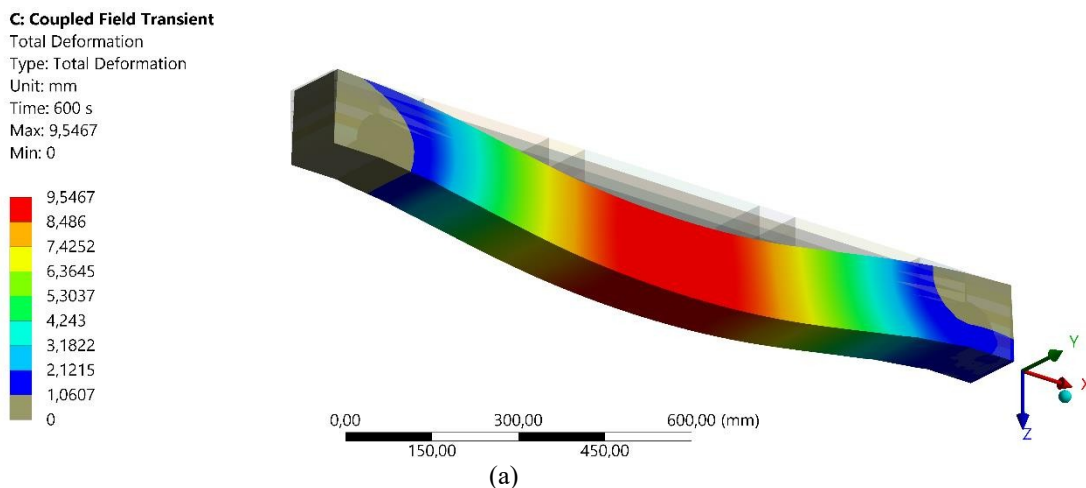
Slika 4.81 Rubni uvjeti – simultana termo-mehanička analiza [183]

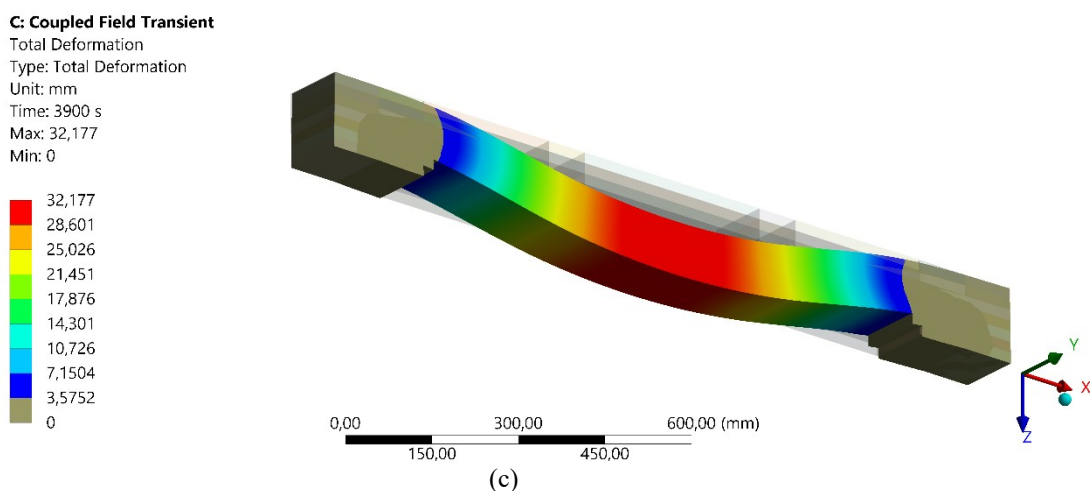
Korištenjem simultane termo-mehaničke analize uzima se u obzir i energija koja se oslobađa dok materijal prolazi kroz određene vrste nelinearnih deformacija, što može dovesti do povećanja temperature konstitutivnih elemenata samog numeričkog modela. Rubni uvjeti, opterećenje, geometrijske i materijalne karakteristike bile su iste kao kod numeričke analize prikazane u poglavlju 4.2.3.4.

Postavke modela prikazane su na slici 4.82. Rezultati simultane (spojene) termo-
mehaničke analize, uz dodatak novo-razvijene (APDL kodiranje) simulacije stvaranja
pougljenog sloja, prikazani su na slici 4.83.



Slika 4.82 Postavke 3d modela – rubni uvjeti i opterećenje





Slika 4.83 Rezultati simultane termo-mehaničke analize s novim pristupom MKE: (a) 10. minuta; (b) 30. minuta; (c) kraj ispitivanja

Rezultati MKE pokazu vrlo dobru korelaciju sa rezultatima eksperimenta u pogledu iznosa vertikalne deformacije, ali i u pogledu fizikalnih promjena na uzorku u vidu dubine pougljenog sloja tijekom vremena. Na slici 4.83b i 4.83c vidi se razvoj stvaranja pougljenog sloja, odnosno redukcija dimenzija poprečnog presjeka na području izloženosti nosača požaru.

Uzimajući u obzir sve navedeno, procijenjeno je ponašanje svih vrsta uzoraka, a rezultati su potvrdili eksperimentalno istraživanje. Omjer svih progiba izmjerenih prilikom požarnog ispitivanja i progiba dobivenog pomoću naprednih metoda koristeći MKE je u prosjeku $w_{test} / w_{MKE} = 1.04$, što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata.

4.5 Ispitivanje spojeva ljepilo-drvo kod lijepljenih lameliranih elemenata

4.5.1 Uvod

U posljednje vrijeme razvijeno je nekoliko modernih sustava drvene gradnje, s fokusom na visoke drvene kuće, gdje lijepljeni drveni proizvodi igraju važnu ulogu. Sigurnost drvenih konstrukcija u požaru je važna, ali svojstva ljepila u uvjetima požara nisu u potpunosti istražena. To se posebno odnosi na nove sustave ljepila, ali i na postojeće koji pokazuju slabu nosivost u požaru. Ovaj problem je uočila globalna mreža FSUW (Fire Safe Use of Wood), koja je formirala podskupinu "Glue-line failure of engineered wood products" s predstavnicima iz Australije, Novog Zelanda, Kanade, SAD-a, Francuske, Italije, Švicarske, Švedske i Njemačke. Prikupljeno je znanje i iskustvo iz dosadašnjih požarnih ispitivanja vezano za komponente lijepljeno lameliranih elemenata (osobito GLT-a, CLT-a i uzdužnih spojeva lamela) i definirane su potrebe za daljnjim istraživanjem. Zaključeno je da postoji mogućnost delaminacije u požaru, što može uzrokovati povećano pougljenje drvenog proizvoda. Rezultati pokazuju da temperatura tijekom standardnog požarnog ispitivanja kontinuirano raste bez faze hlađenja i s pojavom delaminacije dolazi do kolapsa konstrukcije. Jedno od rješenja je postaviti deblju prvu lamelu, kako bi se smanjio rizik od delaminacije. Ipak, to može dovesti do povećanja troškova i težine drvene konstrukcije. Stoga je od iznimne važnosti pronaći metode za procjenu ponašanja lijepljenih spojeva u požaru. Hipoteza je da se različiti sustavi ljepila različito ponašaju u požaru, i da se pojava delaminacije može izbjeći odabirom odgovarajuće vrste ljepila. Najbolja metoda za procjenu pojave delaminacije u požaru je ispitivanje u velikom mjerilu, ali s obzirom na visoke troškove takvih ispitivanja, potrebno je razviti ispitivanje u malom mjerilu. U ovom poglavlju, ideja je da upravo takva ispitivanja, daju iste rezultate kao eksperimentalni testovi u velikom mjerilu. Ovo eksperimentalno istraživanje uključuje rezultate požarnih ispitivanja lijepljenih spojeva u malom mjerilu kod GLT elemenata.

Ispitivanje je organizirano u dva poglavlja na temelju dviju različitih skupina drvenih uzoraka. Zajedničko za oba požarna testa je da su korištene četiri vrste ljepila (303, 314, 501 i 520) u svim vezama.

4.5.2 Zupčasti spoj

Korištena je drvena građa jele i graba, dimenzija $45 \times 100 \times 400$ mm. Prosječna gustoća za meko drvo bila je 387 kg/m^3 , a za tvrdo drvo 768 kg/m^3 , a sve je prikazano u tablici 4.14. Sadržaj vlage u uzorcima prije samog ispitivanja bio je 12 %. Proizvedena su po 3 uzorka za svaku vrstu drva i za svaki tip ljepila, što čini ukupno 24 uzorka. Zupčasti spojevi su industrijski

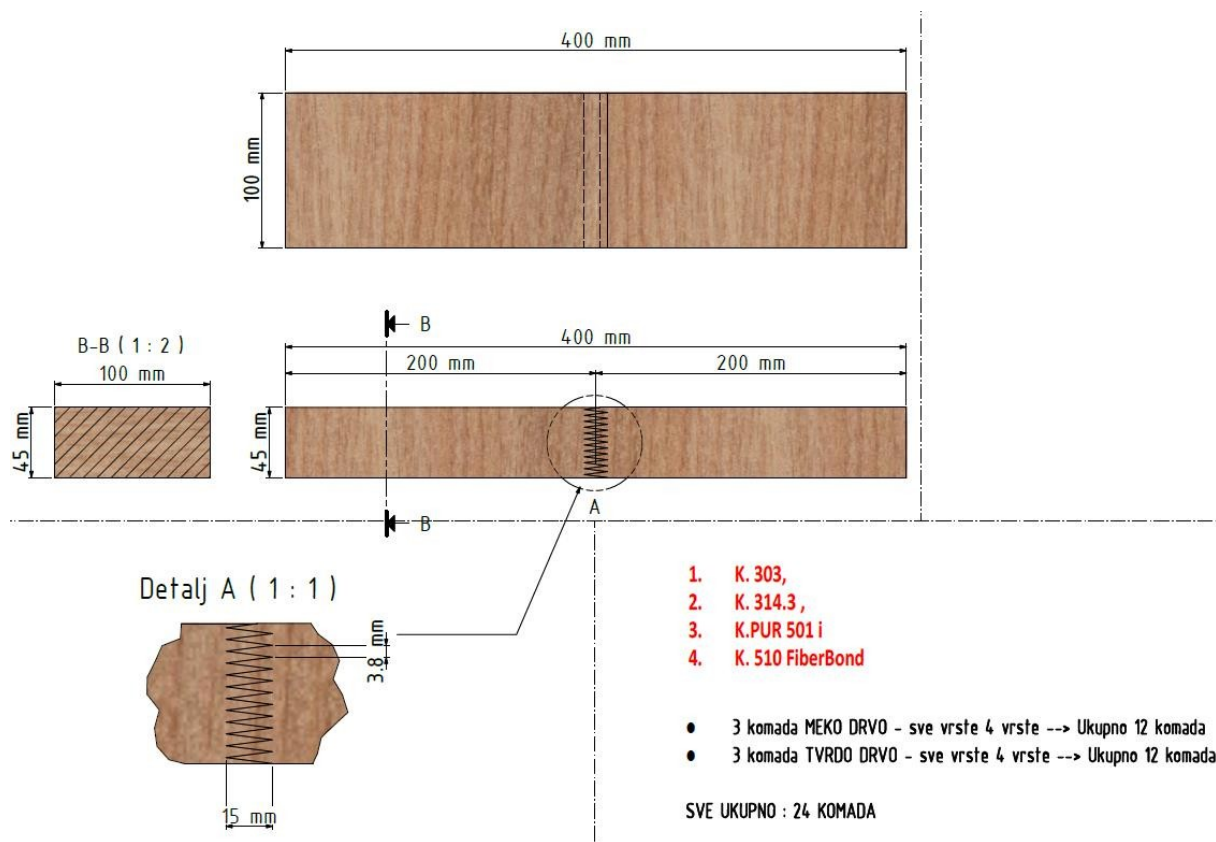
izrezani u proizvodnoj liniji tvrtke Tersa d.o.o. Ljepilo je nanoseno strojno s količinom ljepila koju je odredio proizvođač.

Tablica 4.14 Zupčasti spoj – gustoća

| Ljepilo | Vrsta drva | Gustoća (prosjeak) |
|---------|------------|--------------------|
| K. 303 | MD | 385 |
| K. 313 | MD | 386 |
| K. 501 | MD | 390 |
| K. 510 | MD | 387 |
| K. 303 | TD | 785 |
| K. 313 | TD | 787 |
| K. 501 | TD | 789 |
| K. 510 | TD | 787 |

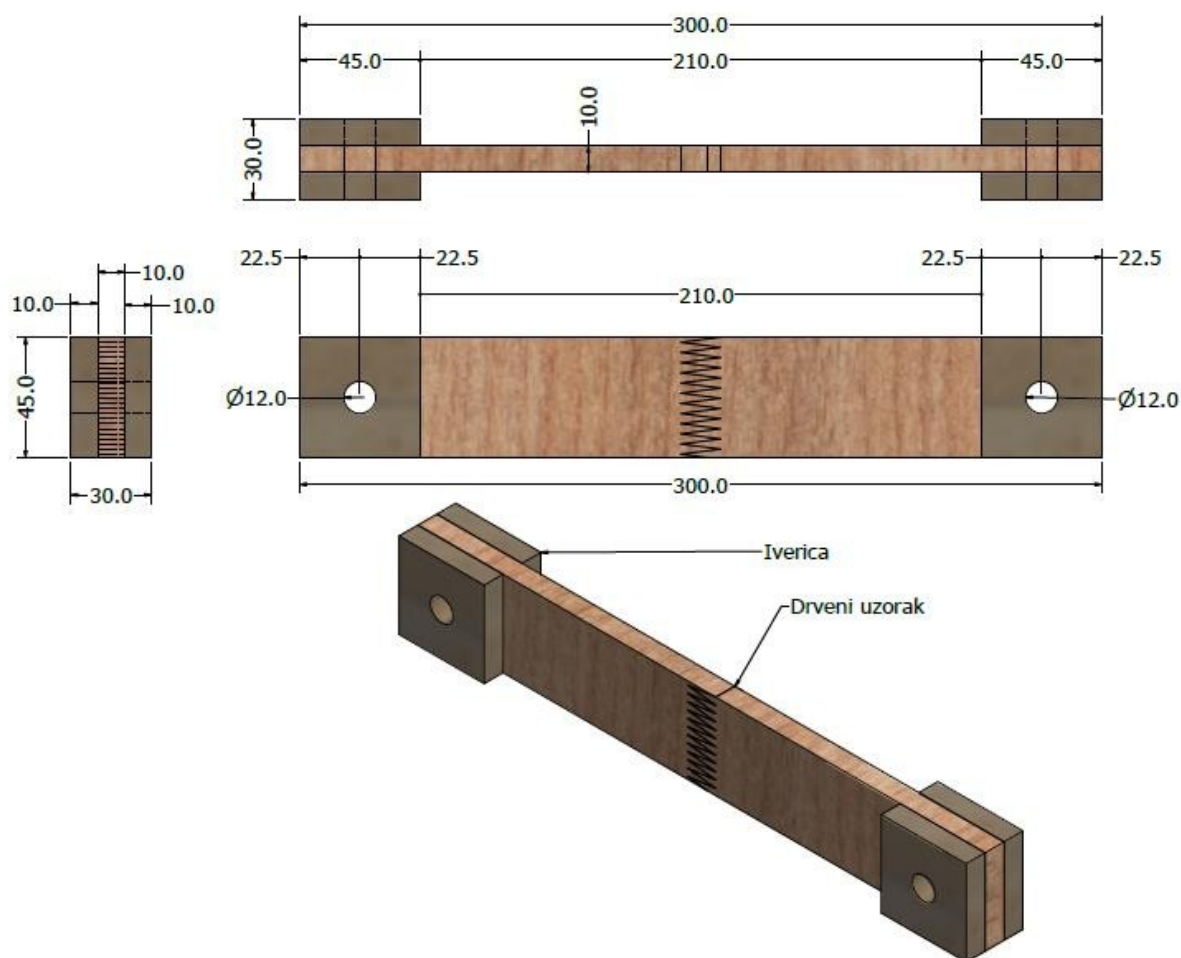
MD* meko drvo, TD* tvrdo drvo

Dimenzije izvornog uzorka bile su 100×45×400 mm sa zupčastim spojem u sredini (Slika 4.84). Svi uzorci su označeni prema korištenoj vrsti ljepila.



Slika 4.84 Zupčasti spoj - sirovi uzorak

Sirovi uzorak 100×45×400 mm izrezan je uzdužno na 8-9 manjih dijelova (konačnih ispitnih uzoraka) dimenzija 10×45×300 mm. Dodatni komadi iverice dimenzija 45×45×10 mm zalijepljeni su s obje strane oba kraja uzoraka ljepilom otpornim na visoke temperature, kako ne bi došlo do odvajanja prilikom požarnog testa (Slika 4.85).

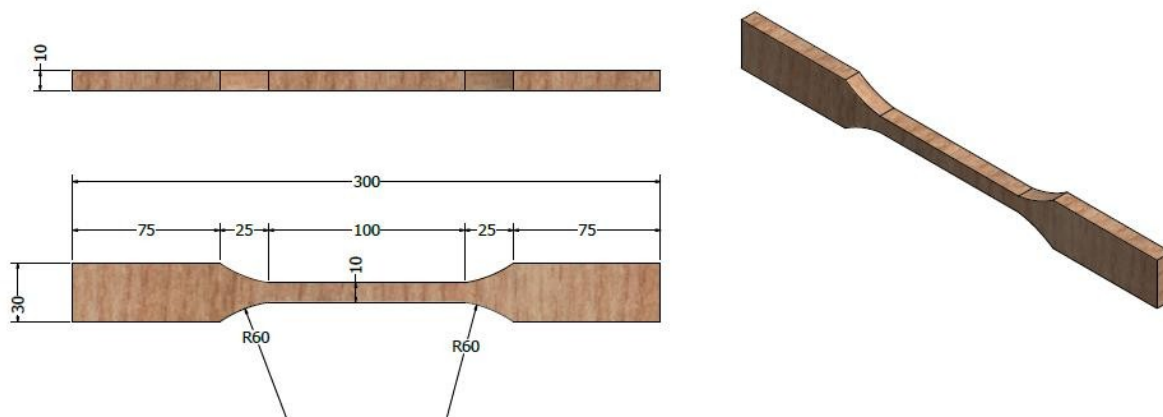


Slika 4.85 Zupčasti spoj – finalni uzorak za ispitivanje pri povišenoj temperaturi

Svi su uzorci prije testiranja kondicionirani na 20 °C i 65% RH. Prije ispitivanja na povišenim temperaturama izvršena je vlačna proba uzoraka u ambijentnim uvjetima, na prosječnoj temperaturi od 22 °C.

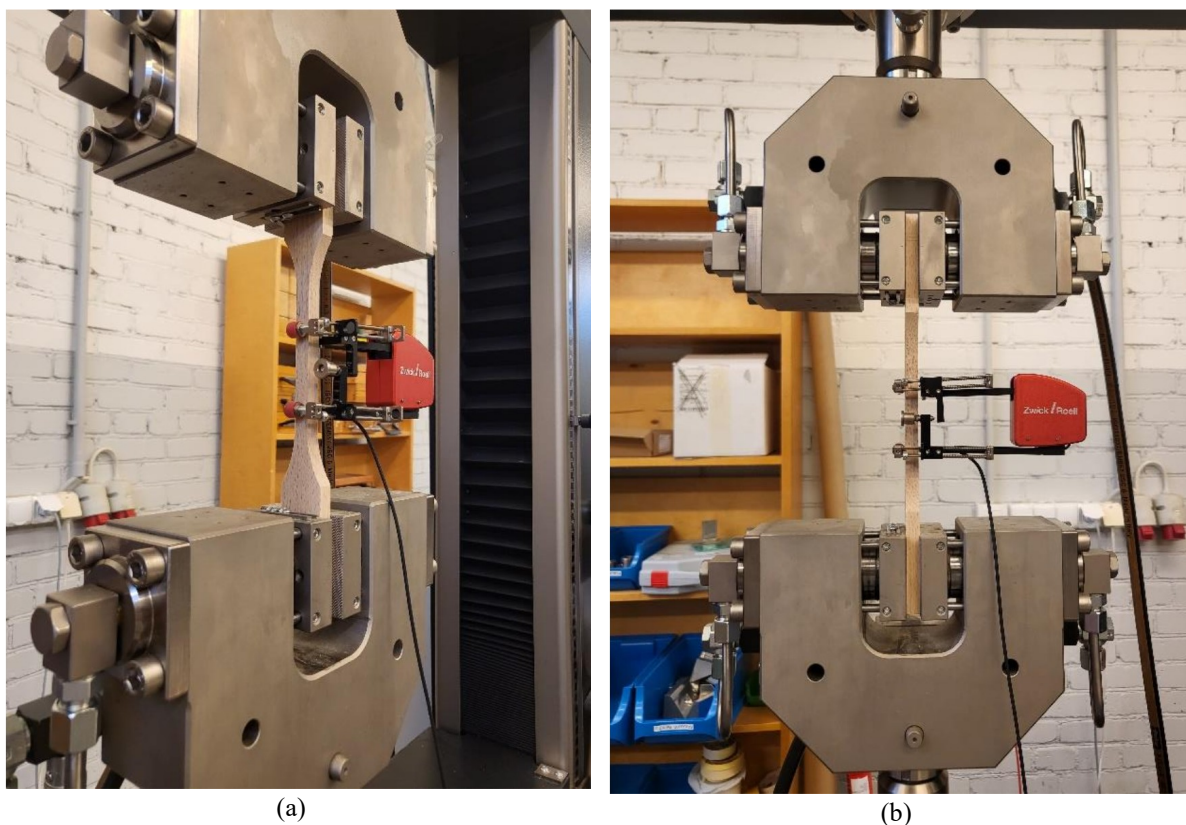
4.5.2.1 Ispitivanje zupčastog spoja na sobnoj temperaturi

Provedena su vlačna ispitivanja zupčastog spoja pri vlačnom opterećenju na sobnoj temperaturi. U cilju konzistentnosti rezultata, modova loma i konačno vlačne čvrstoće uzoraka sa zupčastim spojem, oblik i dimenzije uzoraka su prilagođeni (vidi sliku 4.86). Zupčasti spoj nalazi se u središtu uzorka.



Slika 4.86 Dimenzija uzorka za ispitivanje vlačne čvrstoće pri ambijentnim uvjetima

Postavke ispitivanja prikazana su na slici 4.87. Brzina ispitivanja iznosila je 0.5 mm/min, s ciljem da se lom uzorka dogodi u 300-toj sekundi od početka ispitivanja.



Slika 4.87 Vlačni test zupčastog spoja na sobnoj temperaturi: (a) bočni pogled; (b) pogled sprijeda

Ispitivanje se vršilo do loma, a evidentirana je sila loma i mod loma (drvo ili ljepilo). Kod mekog drva, za skupine ljepila 314, 501 i 510 dogodio se kombinirani lom po drvu i ljepilu, a za 303 lom po ljepilu, dok je kod tvrdog drva za sve tipove uzoraka evidentiran lom po ljepilu. Razlog je velika čvrstoća tvrdog drva u odnosu na čvrstoću samog ljepila. Karakteristični modovi loma prikazani su na slici 4.88.



Slika 4.88 Ispitivanje vlačne čvrstoće pri ambijentnim uvjetima - karakteristični modovi loma

Za svaki tip ljepila i vrstu drva, ispitano je po pet uzoraka. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.15.

Tablica 4.15 Zupčasti spoj – rezultati ispitivanja u ambijentnim uvjetima

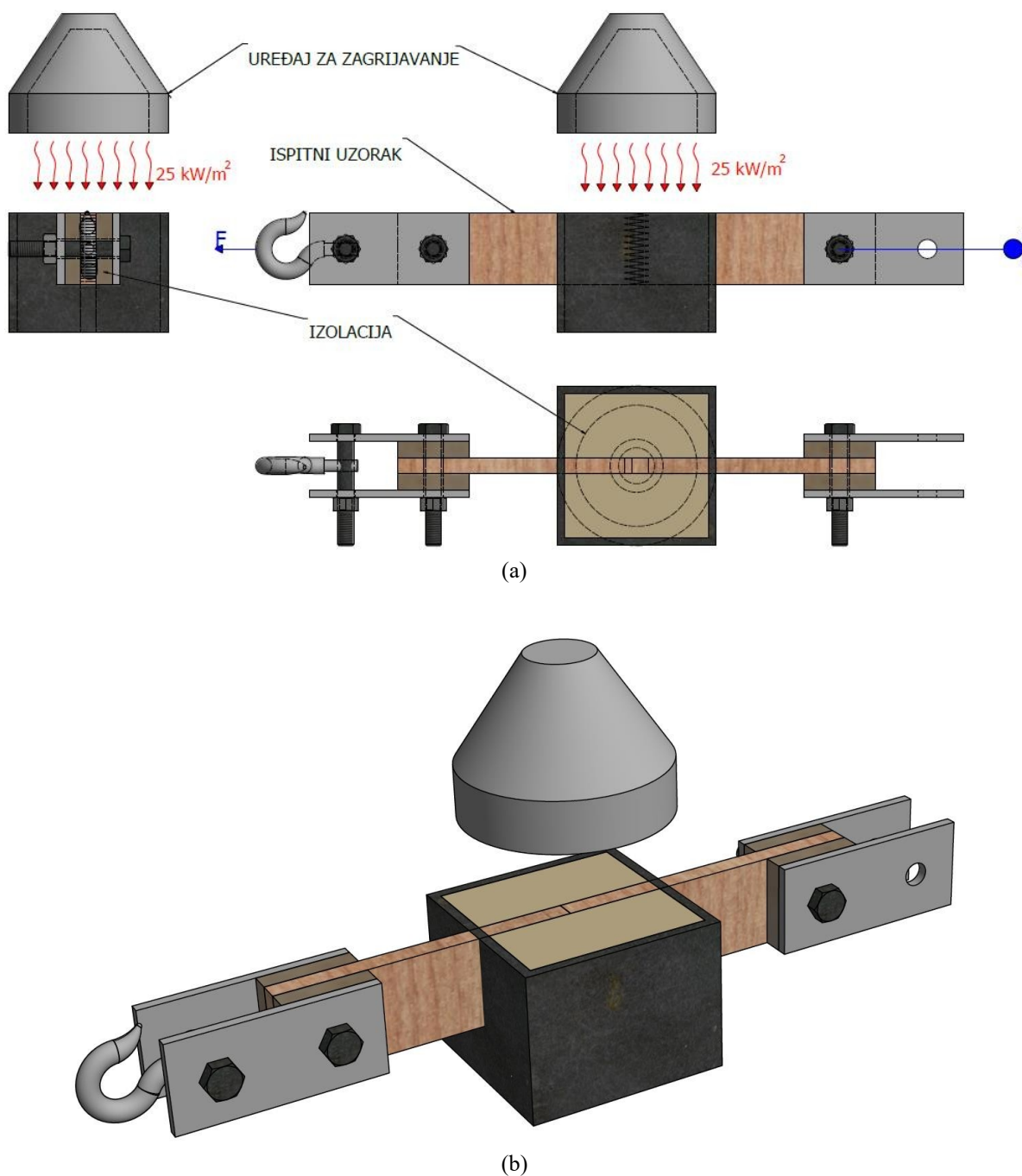
| Ljepilo | Materijal | Broj uzorka | Prosječna sila loma (N) | Vlačna čvrstoća (MPa) | Mod loma (D/LJ) |
|---------|-----------|-------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| K. 303 | MD | 5 | 5570 | 55 | LJ |
| K. 314 | MD | 5 | 4630 | 45 | D/LJ |
| K. 501 | MD | 5 | 3552 | 34 | D/LJ |
| K. 510 | MD | 5 | 6330 | 64 | D/LJ |
| K. 303 | TD | 5 | 6906 | 69 | LJ |
| K. 314 | TD | 5 | 4180 | 42 | LJ |
| K. 510 | TD | 5 | 3430 | 32 | LJ |
| K. 510 | TD | 5 | 6660 | 66 | LJ |

MD* meko drvo, TD* tvrdo drvo

D/LJ** – Drvo/Ljepilo

4.5.2.2 Ispitivanje zupčastog spoja na povišenoj temperaturi

Dimenzije uzorka za požarno ispitivanje bile su 10×45×300 mm. Na oba kraja uzoraka izbušena su rupe promjera 12 mm koja su omogućile vezu s opremom za unos opterećenja. Uzorci su bili izloženi konstantnom toplinskom toku iznosa 25 kW/m² pomoću uređaja za zagrijavanje. Teret (opterećenje) je bilo ovješeno na čeličnu žicu koja je povezana na ispitivani uzorak. Postavke ispitivanja mogu se vidjeti na slici 4.89.



Slika 4.89 Postavke ispitivanja za zupčasti spoj: (a) 2D nacrti; (b) 3D prikaz

Evidentirana je temperatura koristeći termoelemente postavljene po visini uzorka, svakih 6 milimetara (vidi slike 4.90a i 4.91). Ispitni uzorak nije zaštićen s gornje strane, ali je još obostrano izoliran kamenom vunom (133 kg/m³ debljine 50 mm). Uzorak je opterećen čeličnim elementima mase 100 kg, ovješeni o čeličnu sajlu (vidi sliku 4.90b). Eksperimentalno ispitivanje je održano u Tallinnu.



(a)



(b)

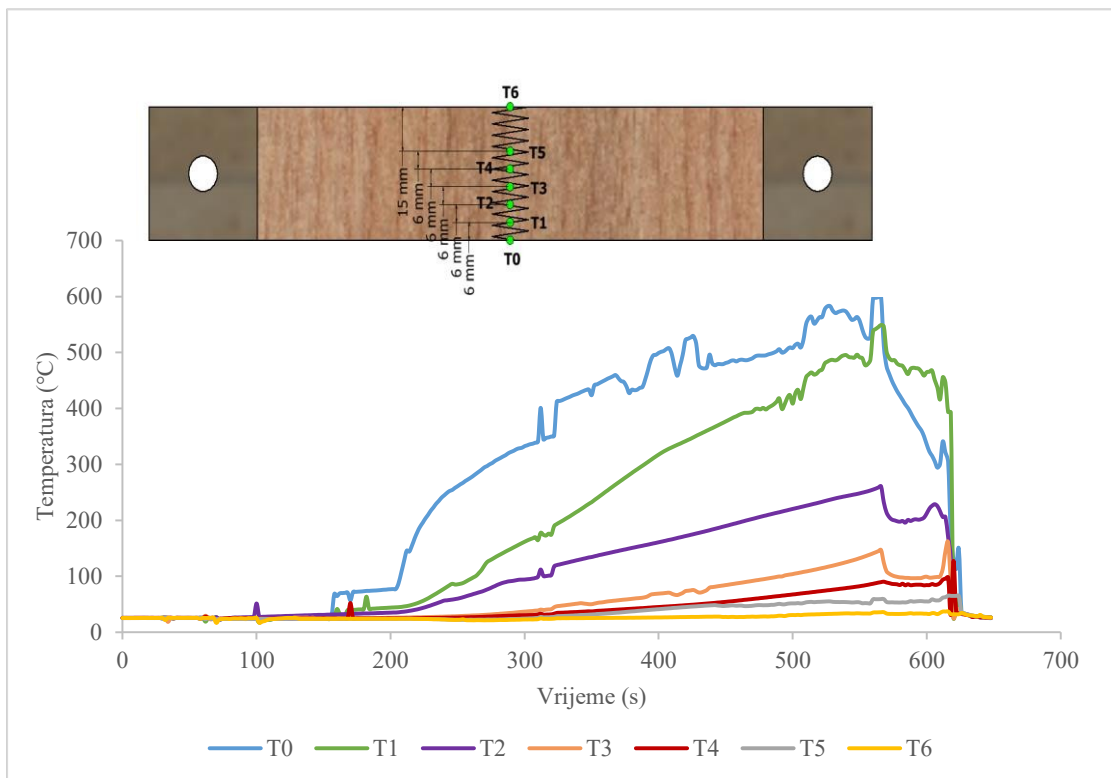


(c)

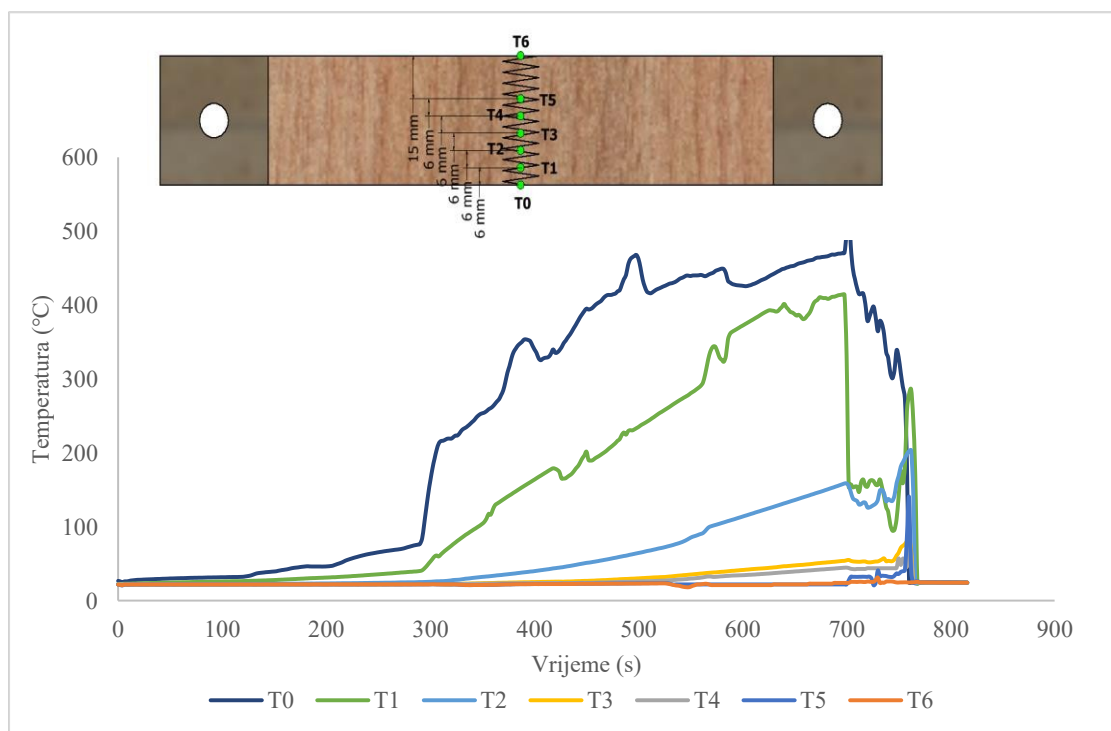
Slika 4.90 Priprema uzoraka za ispitivanje zupčastog spoja : (a) instaliranje termoelemenata i izolacije; (b) opterećenje; (c) uzorak neposredno prije ispitivanja

Ispitivanje je započelo otvaranjem zaštitne ploče koja je postavljena ispod grijača. Mjereno je vrijeme do otkazivanja uzoraka (VOU). Nakon loma, uzorak je uklonjen iz grijane zone i vatreni plamen je ugašen. Maksimalno vrijeme od loma uzorka do gašenja grijača bilo

je 5 sekundi. Nakon ispitivanja izvršeno je mjerenje dimenzija uzoraka kako bi se odredio preostali poprečni presjek i debljina pougljenog sloja. Razvijene temperature prikazane su na slici 4.91a za uzorke od mekog drva, te na slici 4.91b za uzorke od tvrdog drva.



(a)



(b)

Slika 4.91 Zupčasti spoj – razvijene temperature: (a) meko drvo; (b) tvrdo drvo

Očekivano, razvoj temperature u uzorcima od tvrdog drva je sporiji, pa je vrijeme zagrijavanja bilo duže. Iako je za pretpostaviti bilo da će se lom uzoraka od tvrdog drva kasnije dogoditi, rezultati pokazuju drugačije, što potvrđuje činjenicu da se lom dogodio po ljepilu, a ne drvu.

Vrijedno je spomenuti da osim vlačnog naprezanja, na zupčaste spojeve koji se ispituju pod grijačem, također utječe i naprezanje od savijanja. Savijanje nastaje kada se visina poprečnog presjeka smanjuje zbog sagorijevanja drvenog materijala. Nakon testiranja utvrđeni su modovi loma. Reprezentativni primjeri ispitanih uzoraka nakon požarnog ispitivanja prezentirani su na slici 4.92. Pougljeni sloj je očišćen i uklonjen nakon ispitivanja. Zatim je izmjeren preostali poprečni presjek uzorka, te evidentiran mod loma.



Slika 4.92 Zupčasti spoj – modovi loma

U tablici 4.16 prikazani su mogući modovi loma:

Tablica 4.16 Zupčasti spoj – modovi loma

| Mod loma | Opis |
|----------|---|
| LJ | do otkazivanje je došlo u ljepilu - ljepilo je najslabiji dio veze |
| LJ/D | mješoviti mod loma u ljepilu i drvu – uglavnom problem u ljepilu s malom količinom vlakana istrgnutih iz spoja, ljepilo je najslabije, ali postoji djelomično dobro prijanjanje, pa su vlakna potrgana ili je drvo slabije od ljepila |
| D/LJ | mješoviti mod loma u drvu i ljepilu - dublji dijelovi drva su istrgnuti i dolazi do pucanja vlakana, jako ljepilo i spoj ili slabije drvo |
| D | mjerodavni način loma je u drvu - jako ljepilo i veza ali i slabije drvo |

Prosječno vrijeme otkazivanja (VOU) i modovi loma prilikom ispitivanja zupčastog spoja u uvjetima povišenih temperatura, dani su u tablici 4.17.

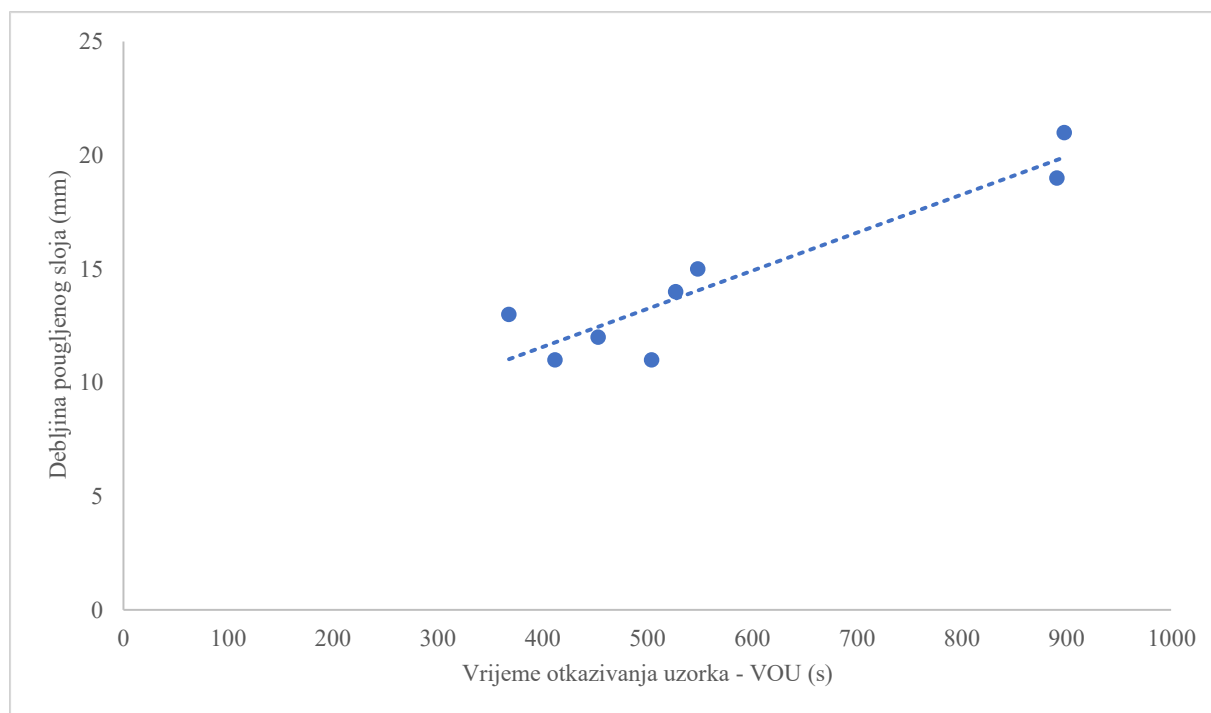
Tablica 4.17 Rezultati ispitivanja zupčastog spoja pri povišenim temperaturama

| Tip ljepila | Vrsta drva | VOU* (s) | Mod loma | Debljina pougljenog sloja (mm) | Vlačno naprezanje (N/mm ²) | Naprezanje Vlak+savijanje (N/mm ²) | St. Dev. VOU (s) |
|----------------|---------------|-------------|-------------|--------------------------------------|--|--|---------------------|
| K. 303 | MD | 453 | LJ | 12.1 | 2.97 | 6.21 | 65 |
| K. 314 | MD | 368 | LJ | 13.5 | 3.06 | 6.57 | 45 |
| K. 501 | MD | 527 | LJ/D | 14.2 | 3.92 | 9.32 | 83 |
| K. 510 | MD | 898 | LJ/D | 21.2 | 4.08 | 9.75 | 30 |
| K. 303 | TD | 412 | LJ | 11.3 | 2.88 | 5.85 | 55 |
| K. 314 | TD | 504 | LJ | 11.6 | 2.88 | 5.85 | 37 |
| K. 501 | TD | 548 | LJ | 15.3 | 3.27 | 7.32 | 78 |
| K. 510 | TD | 891 | LJ | 19.4 | 3.77 | 8.90 | 34 |

*VOU – vrijeme otkazivanja uzorka

Najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama pokazali su uzorci s ljepilom tipa K.510 kod kojih se lom dogodio nakon 15 minuta, a najlošije uzorci s ljepilom tipa K. 303 kod kojih se lom desio najranije.

Na slici 4.93 prikazana je ovisnost dimenzija preostalog poprečnog presjeka sa vremenom u trenutku otkazivanja uzorka (VOU). Odnosi pokazuju dobru korelaciju.

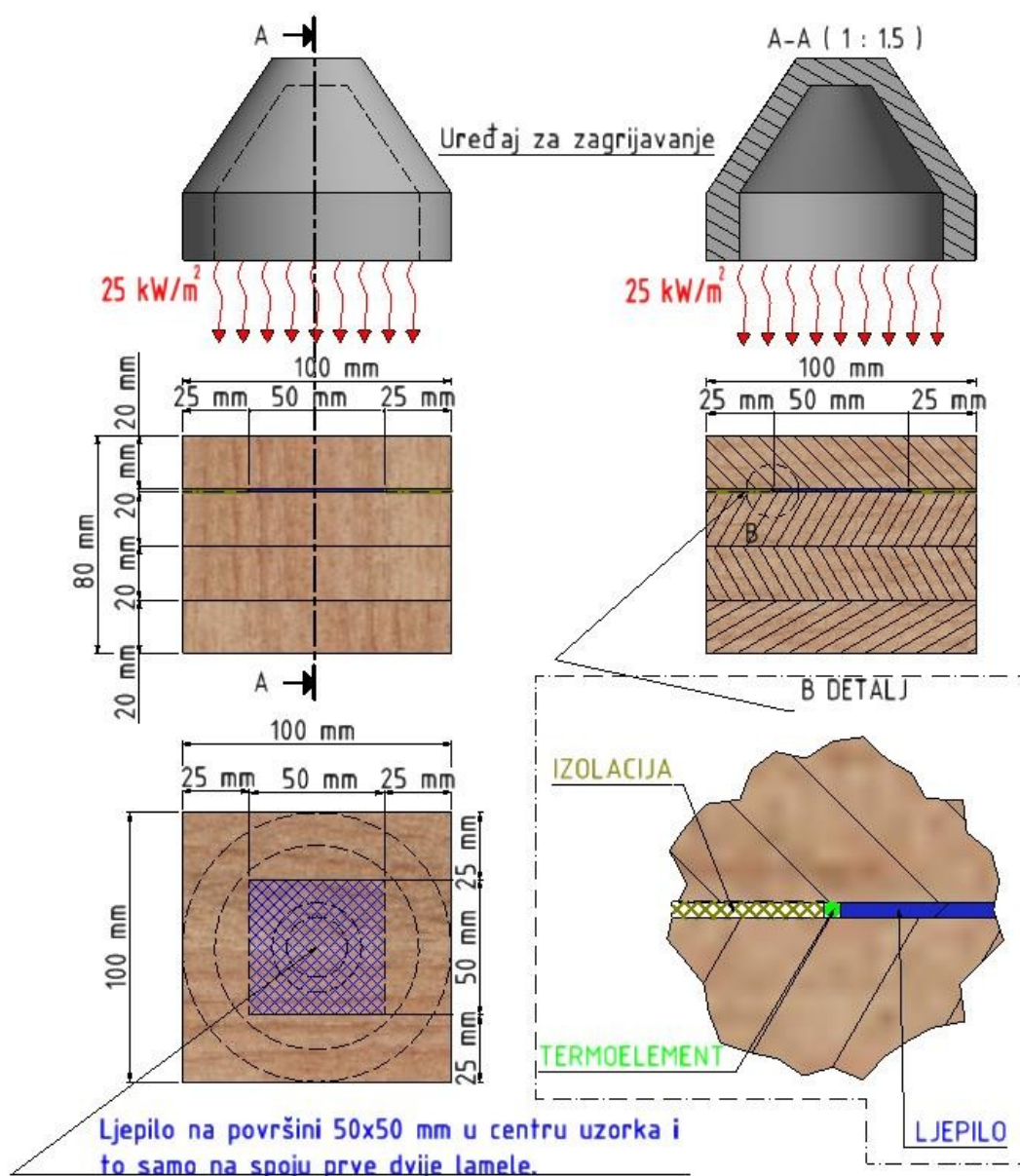


Slika 4.93 Ovisnost vremena otkazivanja sa preostalim poprečnim presjekom

4.5.3 Ispitivanje lijepljene površine između lamela

Cilj ovog istraživanja je procijeniti smanjenje posmične čvrstoće različitih tipova ljepila u uvjetima povišenih temperatura. Ispitivanje posmične čvrstoće linije ljepila u ambijentnim uvjetima istraženo je u poglavlju 3.3.5.

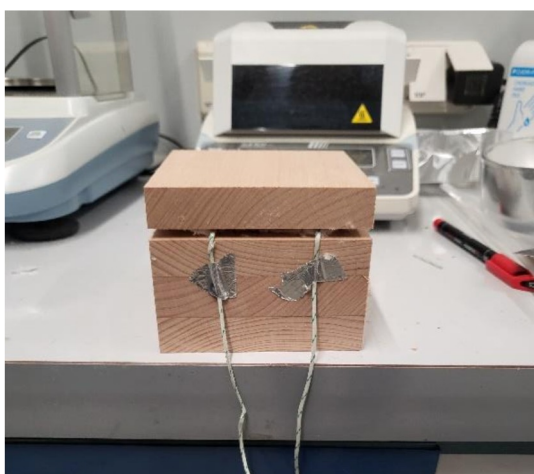
GLT uzorci proizvedeni su i lijepljeni u proizvodnom pogonu tvrtke Tera d.o.o, a sve prema uputama od strane proizvođača ljepila. Dimenzije uzoraka bile su $100 \times 100 \times 80$ mm ($\text{š} \times d \times v$). Debljina lamele bila je 20 mm, što je ujedno i debljina krajnjeg sloja drva koji je bio izložen požaru. Površina lijepljenja reducirana je na 50×50 mm urezivanjem uzorka sa svih strana pomoću tanke pile, točno u ravnini ispitivane površine lijepljenja lamela. Geometrija uzorka i postavke ispitivanja prikazane su na slici 4.94.



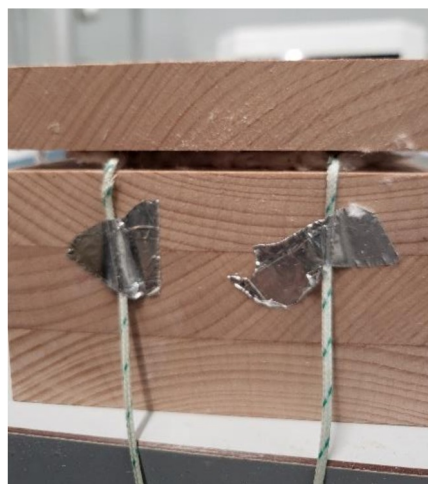
Slika 4.94 Uzorak za ispitivanje lijepljene površine između lamela

Smanjenje kapaciteta nosivosti lijepljenje površine između lamela može se procijeniti zagrijavanjem površine lijepljenja ispod grijača i zatim provođenjem posmičnog testa, odmah nakon izlaganja toplinskom toku. Površina lijepljenja nalazi se neposredno iza pougljenjenog sloja drveta.

Dva termoelementa postavljena su unutar reza u blizini linije lijepljenja (vidi sliku 4.95a), a zatim je postavljena izolacija od keramičke vune, koja štiti termoelemente (vidi sliku 4.95b), ali i linije lijepljenja, od utjecaja požara izvana. Na ovaj način eliminira se utjecaj zraka na mjerenu temperaturu na mjestu postavljenih termoelemenata. Uzorak je sa sve četiri bočne strane zaštićen gips-kartonskom pločom tipa F, debljine 15 mm (vidi sliku 4.95c). Zadnji korak bio je zaštititi rubove uzorka, tako da se dobije požaru izložena površina dimenzija 80×80 milimetara (vidi sliku 4.95d). Uzorci su na kraju omotani aluminijskom trakom kako bi se spriječilo pougljenje na bočnim stranama.



(a)



(b)



(c)

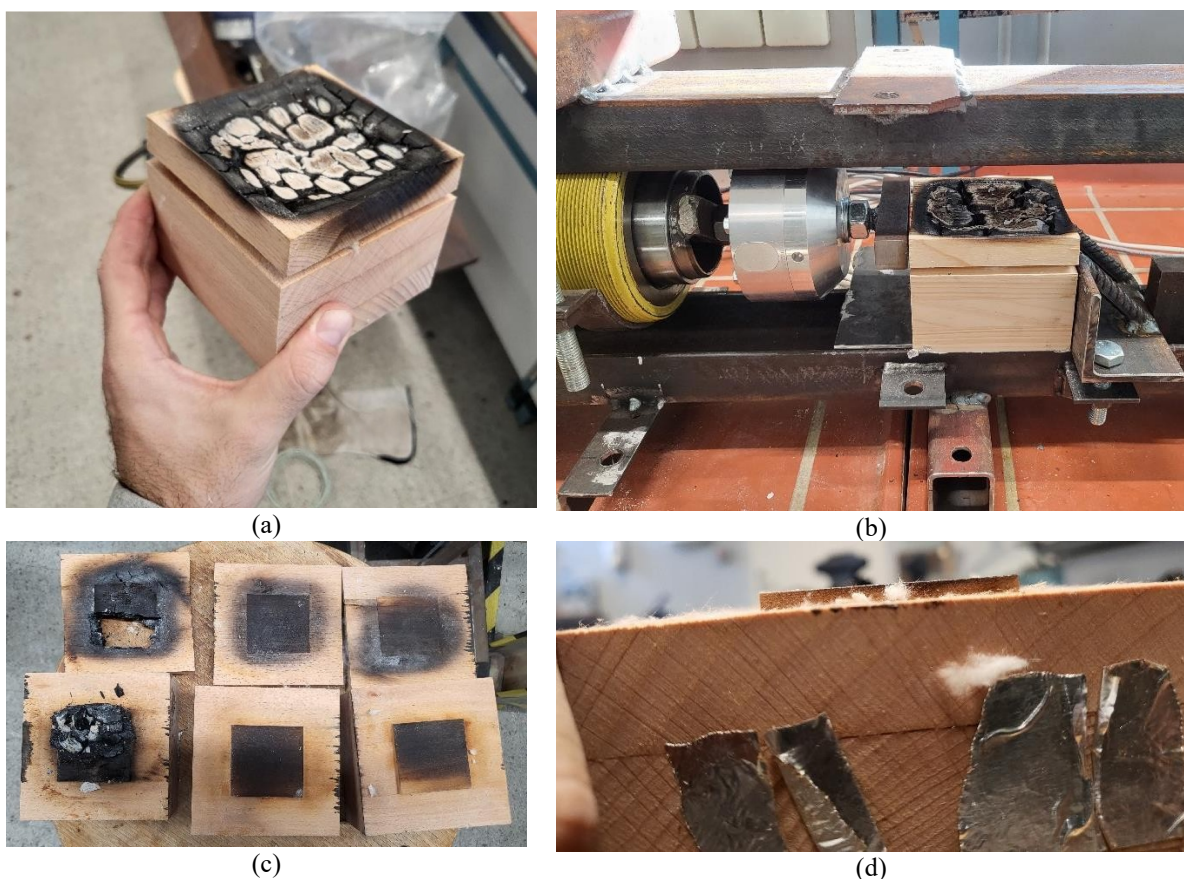


(d)

Slika 4.95 Postupak pripreme uzorka za ispitivanje posmične čvrstoće linije lijepljenja pri povišenoj temperaturi: (a) instalacija termoelemenata; (b) umetanje izolacije; (c) postavljanje gips-kartonske obloge; (d) konačni izgled uzorka

Kao i u prethodnom požarnom ispitivanju zupčastih spojeva, grijač je bio kalibriran na toplinski tok u iznosu od 25 kW/m^2 . Zatim se postavila negoriva ploča koja ima ulogu zatvarača, s ciljem sprječavanja širenja topline sve do željenog trenutka. Uzorak je postavljen ispod grijača tako da je dno grijača bilo 15 mm iznad vrha ispitnog uzorka. Vrijeme se počelo računati kada je zatvarač uklonjen. Razvoj temperature evidentiran je pomoću dva termoelementa. Uzorak je zagrijavan sve do postizanja prosječne, prethodno određene temperature u neposrednoj blizini površine lijepljenja.

Nakon što je postignuta željena temperatura, uzorak je uklonjen iz grijane zone. Zatim je uklonjena zaštitna obloga uzorka, koji je nakon toga premješten na predviđeno mjesto za posmični test. Postupak uklanjanja uzorka trajao je oko 60 sekundi. Uzorak se zatim posmično opterećivao sve do sloma, a evidentirana je vrijednost sile i mod loma (Slika 4.96). Ispitivanje preostale posmične čvrstoće ljepila uvijek je vršeno u smjeru vlaknaca lamela.



Slika 4.96 Posmični test linije lijepljenja pri povišenoj temperaturi: (a) uzorak nakon uklanjanja obloge (b) početak posmičnog testa; (c) uzorci nakon loma – pogled odozgo; (d) uzorci nakon loma – bočni pogled

Uočene su razlike u ponašanju između različitih skupina ljepila, ali i između različitih vrsta drva. S obzirom da tvrdo drvo ima značajno veću gustoću, do zapaljenja je došlo kasnije u odnosu na uzorke od mekog drva. Samim tim, tvrdo drvo je bilo duže izloženo toplinskom

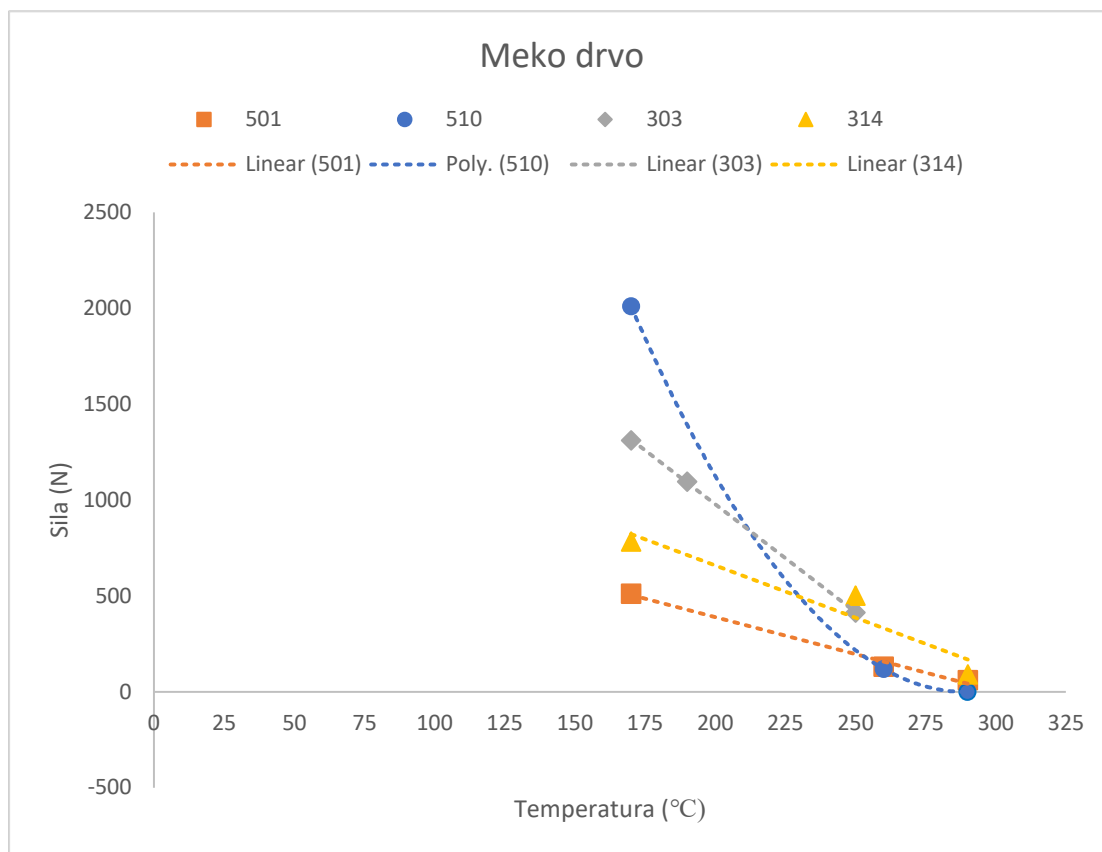
toku. To se najviše očitivalo na kraju procesa zagrijavanja, gdje su pojedini uzorci tvrdog drva potpuno izgorjeli u središnjem dijelu, pa se nije ni moglo pristupiti posmičnom testu, odnosno posmična čvrstoća je evidentirana kao nulta. Kod nižih temperatura, posljedica toga je bila različit mod loma kod nekih skupina ljepila, gdje je kod tvrdog drva mod loma bio kombinirani ljepilo-drvo, a za istu skupinu ljepila, kod mekog drva, mod loma bio je isključivo po ljepilu.

Pregled sila loma za odgovarajuće temperature dan je u tablici 4.18.

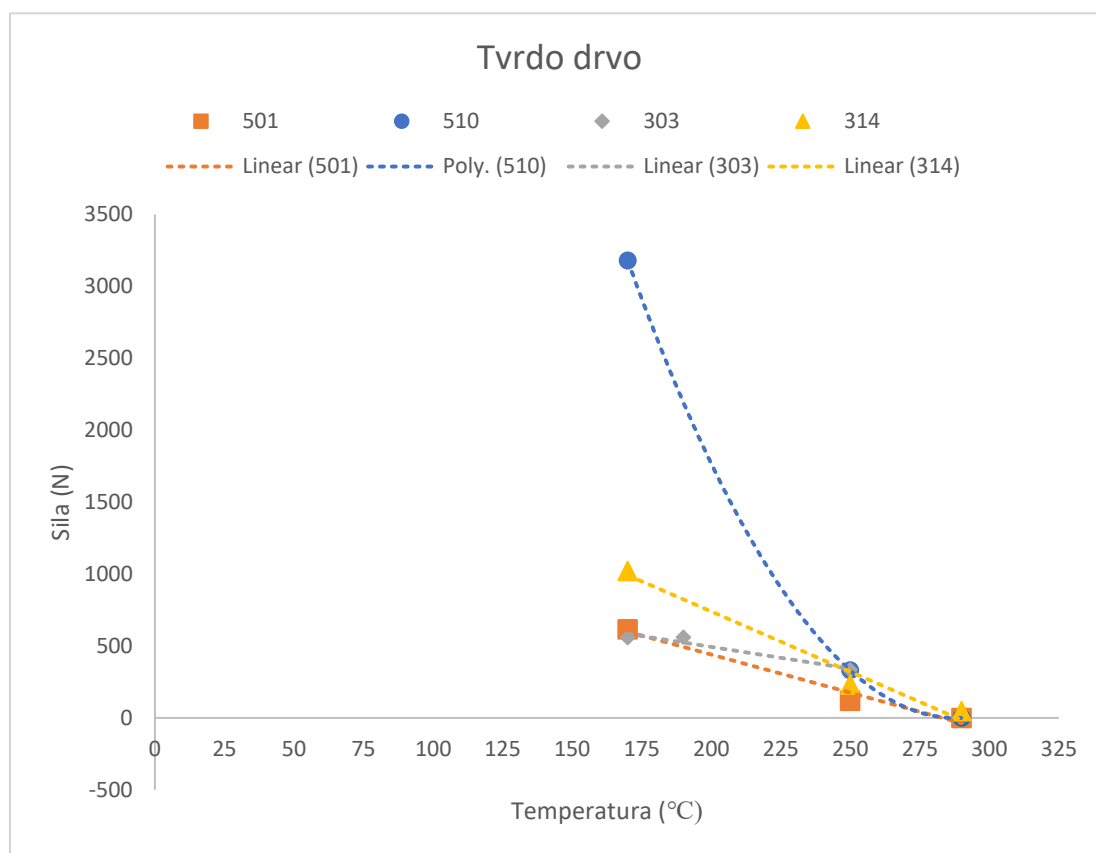
Tablica 4.18 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće linije ljepila pri uvjetima povišene temperature

| Vrsta drva | Skupina ljepila | Temperatura (°C) | Sila (N) | Mod loma | |
|------------|-----------------|------------------|----------|----------|------|
| Meko drvo | 501 | 290 | 63 | LJ | |
| | | 260 | 132 | LJ | |
| | | 170 | 512 | LJ/D | |
| | 510 | 290 | 0 | LJ/D | |
| | | 260 | 121 | LJ | |
| | | 170 | 2012 | LJ/D | |
| | 303 | 250 | 415 | LJ | |
| | | 190 | 1096 | LJ | |
| | | 170 | 1312 | LJ | |
| | 314 | 290 | 92 | LJ | |
| | | 250 | 503 | LJ | |
| | | 170 | 784 | D | |
| | Tvrdo drvo | 501 | 290 | 0 | LJ |
| | | | 250 | 121 | LJ |
| | | | 170 | 617 | LJ/D |
| 510 | | 290 | 0 | LJ/D | |
| | | 250 | 330 | LJ/D | |
| | | 170 | 3178 | LJ/D | |
| 303 | | 250 | 333 | LJ | |
| | | 190 | 560 | LJ | |
| | | 170 | 557 | LJ/D | |
| 314 | | 290 | 45 | LJ | |
| | | 250 | 231 | LJ | |
| | | 170 | 1021 | LJ/D | |

Može se zaključiti da sva ljepila imaju vrlo malu čvrstoću kada se temperatura približava 290 °C, što je u skladu s očekivanjima. Najveću nosivost pri temperaturama do 200 °C ima ljepilo tip 510, a najmanju tip 303. Opažanjem i analizom dijagrama ovisnosti sile lome o temperaturi, prikazanoj na slici 4.97, može se zaključiti linearna redukcija posmične čvrstoće ljepila s povećanjem temperature.



(a)



(b)

Slika 4.97 Ispitivanje površine lijepljenja - ovisnost posmične sile o temperaturi

4.5.3.1 Diskusija i zaključak

Ispitivanja posmične čvrstoće lijepljenje površine pri povišenim temperaturama provedena su na uzorcima od dvije vrste drva, čije su lamele spojene sa četiri vrste ljepila. Ispitana su ukupno 24 uzorka. Uočena je jasna razlika u ponašanju uzoraka sa različitim skupinama ljepila. Nadalje, vrsta drva također utječe na posmičnu čvrstoću ljepila pri povišenim temperaturama, zbog brzine i načina sagorijevanja drva. Ljepilo tipa 303 je manje učinkovito u požaru od drugih tipova ljepila zbog omekšavanja ljepila na višim temperaturama, uzrokujući ranije otkazivanje i/ili manju posmičnu čvrstoću. Najbolje ponašanje pokazalo je ljepilo tipa 510.

4.6 Eksperimentalno istraživanje u požarnim uvjetima – ispitivanje nosivog zida od inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata

4.6.1 Priprema uzorka

Ovaj sustav se može smatrati manjim pokaznim mockup-om požarnog odjeljka, u kome je istražena dinamika požara. Nosivi zid je bio zaštićen protupožarnim oblogama i sastavljen je od prošupljenih drvenih elemenata, osim prvog i zadnjeg elementa, koji su puni lamelirani drveni elementi. Dimenzije pojedinih konstitutivnih elemenata su :

- donji puni lamelirani drveni element: $120 \times 160 \times 2980$ mm (širina \times visina \times duljina)
- gornji puni lamelirani drveni element: $120 \times 140 \times 2980$ mm (širina \times visina \times duljina)
- prošupljeni lamelirani drveni elementi: $120 \times 240 \times 2980$ mm (širina \times visina \times duljina)

Konačno, dimenzije nosivog zida su $2980 \times 2985 \times 120$ mm (širina \times visina \times debljina). Uzorak nosivog zida od prošupljenih lameliranih drvenih elemenata sastoji se od ukupno 14 međusobno spojenih elemenata - greda. Gornji i donji element je izveden kao puni s ravnim površinama na vanjskoj strani koje naliježu na potpornu konstrukciju vertikalne peći. Između njih se nalazi 12 prošupljenih elemenata koji na gornjoj i donjoj strani imaju izrađen profil koji omogućava njihovo međusobno spajanje. Spojevi između elemenata ostvareni su bez dodatnih spojnih sredstava. Jedinični element nosivog zida sastoji se od ukupno dvanaest međusobno zalijepljenih lamela. Lamele su izrađene od mekog drva (jele) debljine 20 mm, a izvedene su na način da su vlakna unutar drva u smjeru duljine grede. Cijelom duljinom pojedine lamele izrađena su po tri žlijeba u obliku polovice elipse širine 21 mm i dubine 7 mm. Žljebovi su izrađeni na obje strane lamela te su spajanjem dobivena prošupljenja (elipse) uzduž grede, dimenzija 21 x 14 mm (poluosi elipse). Lijepljenje lamela izvršeno je upotrebom ljepila tip K. 510. Na gornjoj strani elementa izrađen je profil koji se sastoji od tri pravokutnika dimenzija 20×15 mm izrađenih na međusobnom razmaku od 15 mm. Na donjoj strani grede nalazi se profil koji se sastoji od četiri pravokutnika dimenzija 15×15 mm, izrađenih na međusobnom razmaku od 20 mm. Na taj način omogućeno je međusobno uglavljivanje pojedinačnih lameliranih drvenih elemenata.

Ispitivanje je izvršeno na jednom, simetričnom uzorku. Uzorak je izložen požaru sa strane na kojoj su postavljene gips-vlaknaste ploče [184].

Uzorak je ugrađen u okvir ispitne peći svijetlog otvora 3020 × 3050 mm (visina × širina), prilagođen za ispitivanje nosivih građevinskih elemenata, a koji je izveden prema slici 1, norme HRN EN 1365-1:2012 [185]. Uzorak je učvršćen u 7 točaka preko čeličnog kutnika, na donji horizontalni dio okvira ispitne peći izveden od armiranog betona gustoće oko 1600 kg/m³. Učvršćenje ispitnog uzorka je izvršeno samo u donjem horizontalnom dijelu. Vertikalni krajevi uzorka su ostali slobodni. Prostor između vertikalnih krajeva uzorka i okvira ispitne peći ispunjen je keramičkom vunom te predstavlja slobodne krajeve uzorka. Uzorak je sastavljen na način da je na donji dio ispitnog okvira pričvršćen na donji puni lamelirani drveni element na prethodno opisan način. Na njega su dalje slagani prošupljeni elementi koji su međusobno povezani, ukupno 12 komada. Na prošupljene elemente je prema gornjem dijelu ispitnog okvira postavljen gornji puni element te je na njega spuštена čelična greda za unos opterećenja.

Prije ispitivanja obavljena je verifikacija ispitnog uzorka. Zaključeno je da je ispitni uzorak u skladu s normom HRN EN 1365-1 točka 6.3 [185]. Uvidom u dokumentaciju proizvođača gips-vlaknastih ploča utvrđena je bruto gustoća ploča Fermacell Firepanel A1 od 1200 ± 50 kg/m³.

Prije ugradnje izvršeno je vaganje konstitutivnih drvenih elemenata nosivog zida (Tablica 4.19):

Tablica 4.19 Dimenzija i masa konstitutivnih elemenata

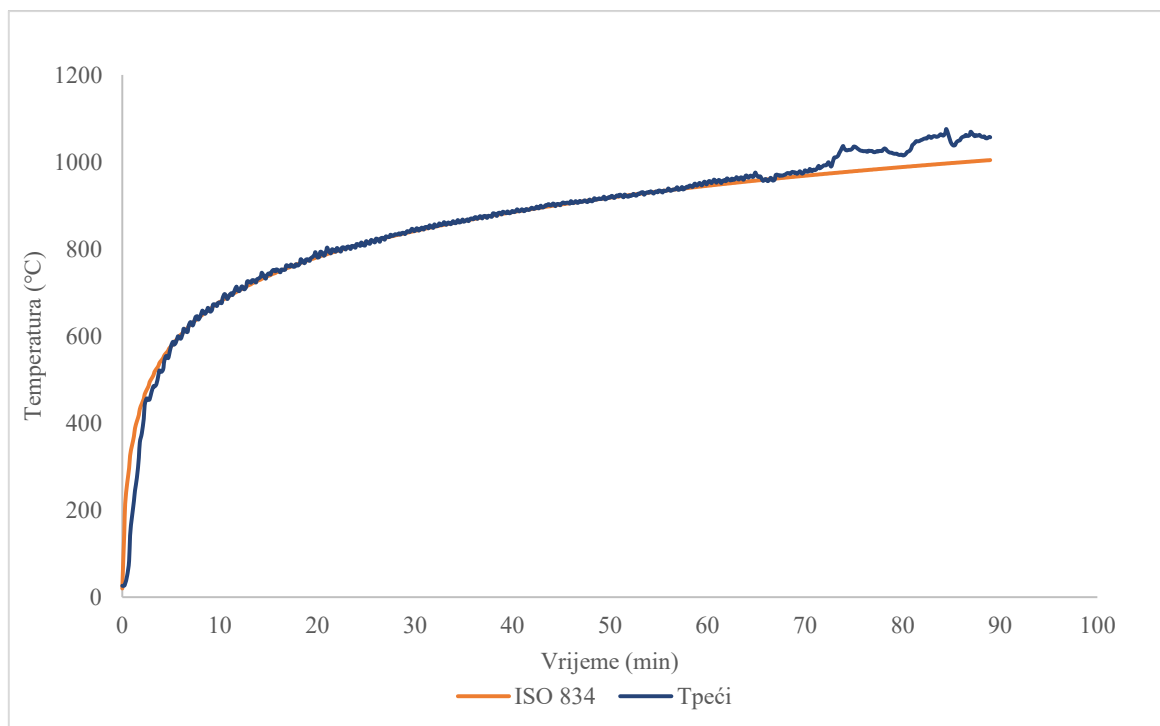
| Vrsta konstrukcijskog elementa | Dimenzije (v × š × d) | Masa (kg) |
|---|------------------------|-----------|
| Puni donji laminirani drveni element (ugradnja na dnu uzorka) | 60 × 120 × 2980 | 22.3 |
| Prošupljeni drveni laminirani element (prosječna masa ugrađenih elemenata) | 40 × 120 × 2980 | 23.5 |
| Puni gornji laminirana drveni element (ugradnja na vrhu uzorka) | 140 × 120 × 2980 | 20.6 |

Dijelovi od kojih se sastoji ispitni uzorak kao i ugrađeni uzorak u okviru ispitne peći su prije ispitivanja bili u laboratoriju gdje su uvjeti okoline održavani na približno 50 % relativne vlažnosti i 20 °C, u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 8.1 [181].

4.6.2 Postupak ispitivanja

Ispitivanje je izvršeno u skladu s normama HRN EN 1363-1:2020 *Ispitivanje otpornosti na požar – 1. dio: Opći zahtjevi*, HRN EN 1365-1:2012+Ispr.1:2013 *Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata - 1. dio: Zidovi*.

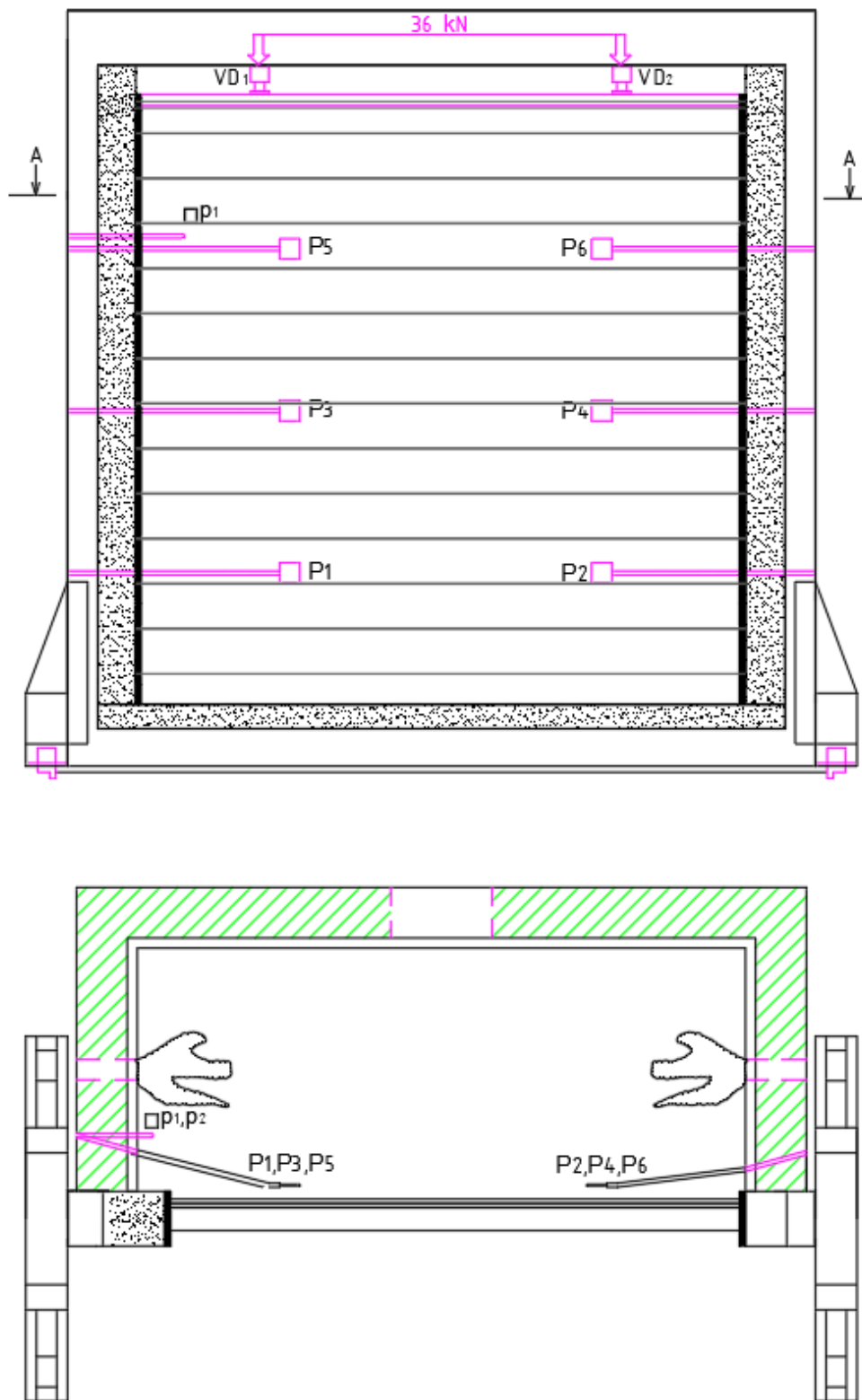
Temperature okoline u laboratoriju bila je 24.6 °C, dok je relativna vlažnost bila 58 %. Požarna peć omogućava standardnu izloženost ispitnih uzoraka požaru, s obzirom na toplinsku izloženost i pritisak. Požar u požarnom prostoru peći ostvaruje se pomoću šest plamenika na tekuće gorivo (lož ulje), u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 4.1 i 4.2 [181]. Temperatura zraka u ispitnom prostoru 24 sata prije požarnog ispitivanja održavana je na temperaturi od 20 (±5) °C. Zagrijavanje u peći određeno je po standardnoj temperaturnoj krivulji, u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 5.1, a prikazana je na slici 4.98.



Slika 4.98 Dijagram usporedbe zadane i srednje postignute temperature u peći

Temperatura u peći mjerena je sa šest ravnomjerno raspoređenih termoelemenata tipa K, čiji je vrući spoj učvršćen u geometrijskom centru ploče u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 4.5.1.1[181]. Termoelementi su bili pozicionirani na način da nisu u kontaktu s otvorenim plamenom iz plamenika te da su 100 mm udaljeni od vatrom izložene strane ispitivanog uzorka (Slika 4.99).

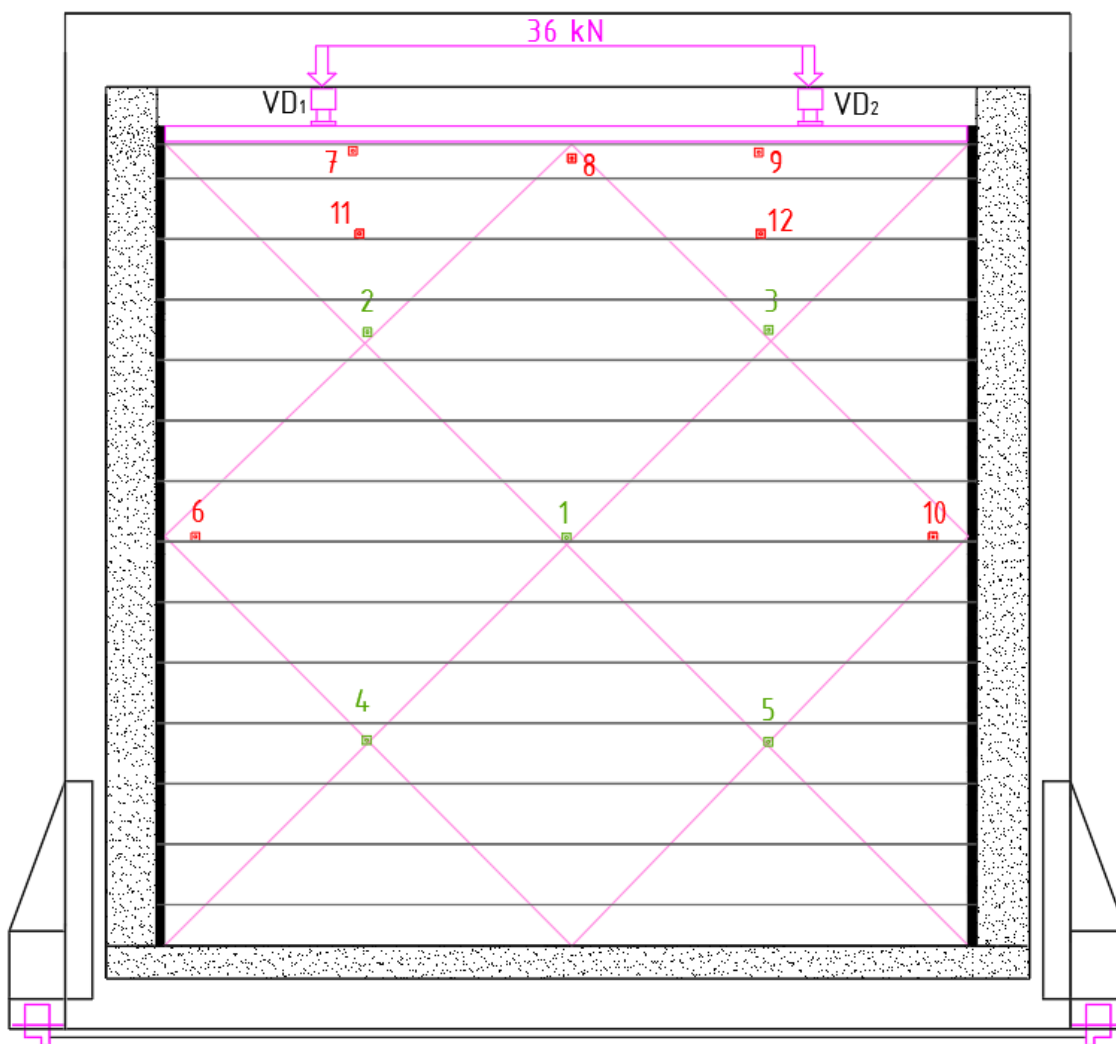
Statički pretlak u požarnom prostoru ispitne peći održavan je u području od 15 ± 2 Pa. Senzor – mjerac tlaka postavljen je tako da se tlak mjeri na visini od 2.3 m od poda peći, a regulira se pomoću zapornog dijela glavnog i rasteretnog dimnjaka peći.



Slika 4.99 Skica mjernih mjesta temperature i tlaka u peći

Što se tiče temperature u uzorku, temperatura na požaru neizloženoj strani uzorka mjerena je s 12 termoelemenata NiCr-Ni, (tip K) žice \varnothing 0.5 mm, zavarenih na bakrenim diskovima \varnothing 12 mm debljine 0.2 mm, u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 4.5.1.2[181]. Termoelementi su prekriveni s anorganskim izolirajućim materijalom dimenzija $30 \times 30 \times 2$ mm, a na mjerna mjesta pričvršćeni su lijepljenjem pomoću anorganskog ljepila. Mjerenje porasta prosječne temperature i mjerenje porasta maksimalne temperature neizložene strane uzorka bilježi se termoelementima postavljenim na pozicije u skladu s normom HRN EN 1365-1:2012, točka 9.1.2[181].

Dodatni termoelementi postavljeni su unutar konstrukcije i to kako slijedi: Mjerenje porasta prosječne temperature na neizloženoj strani (kriterij 140 K) prikazan je na slici 4.100.



Slika 4.100 Skica mjernih mjesta temperature na požaru neizloženoj strani uzorka

- Mjerno mjesto broj 1 - sredina uzorka
- Mjerna mjesta broj 2, 3, 4 i 5 - sredina svake četvrtine uzorka

Mjerenje porasta maksimalne temperature na neizloženoj strani (kriterij 180 K):

- Mjerna mjesta broj 7, 8, 9 - 20 mm od gornjeg ruba uzorka
- Mjerna mjesta broj 6, 10 - 150 mm od slobodnog ruba uzorka na sredini uzorka
- Mjerna mjesta broj 11, 12 - 20 mm od horizontalnog spoja greda u gornjem dijelu uzorka

Mjerenje porasta temperature unutar uzorka prikazano je u tablici 4.20 i slici 4.101.

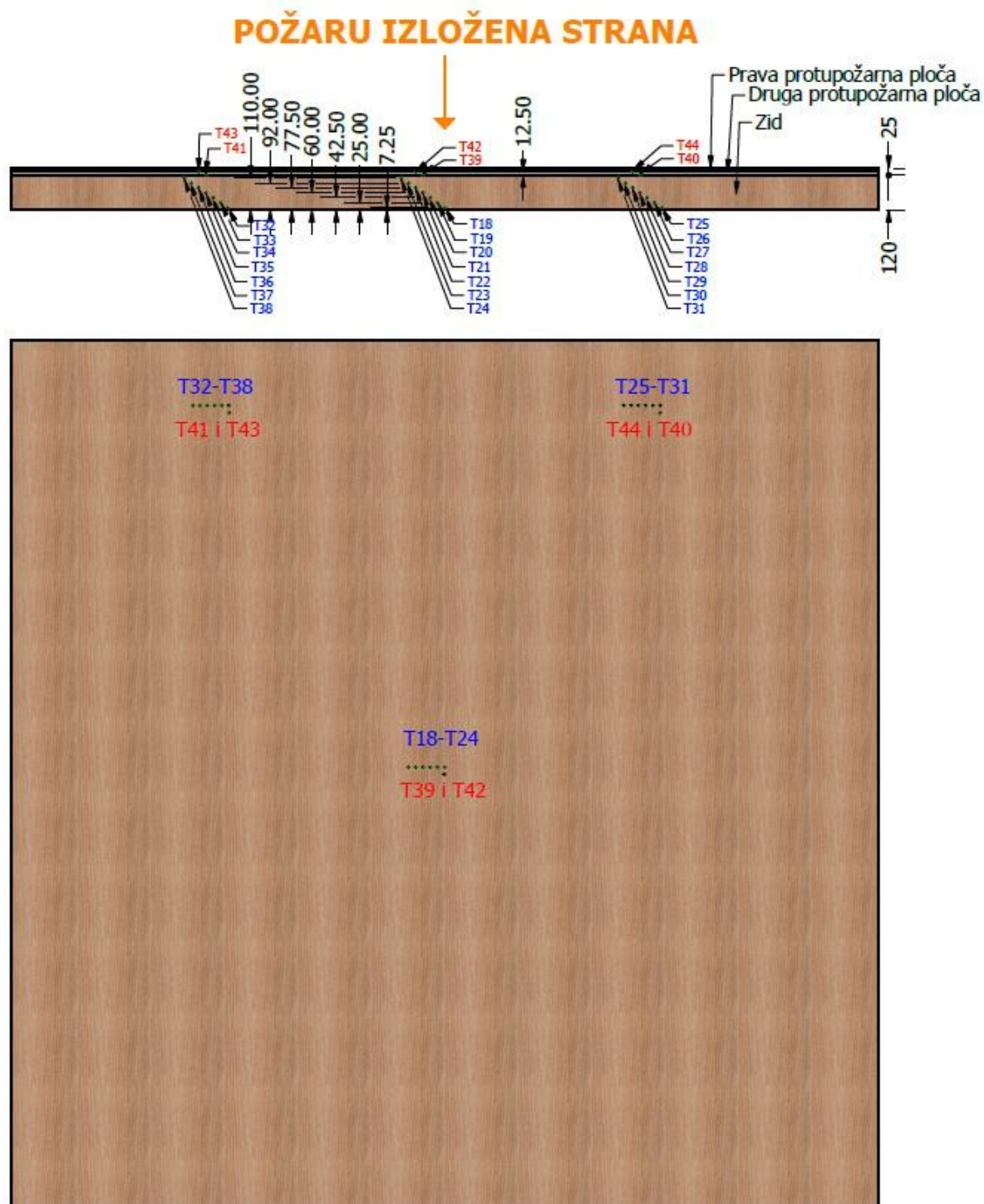
Tablica 4.20 Pozicija termoelemenata unutar uzorka

| Termoelement | Pozicija |
|----------------|--|
| T18, T25 i T32 | na dubini od 7.25 mm od vanjske vertikalne stranice* |
| T19, T26 i T33 | na dubini od 25 mm od vanjske vertikalne stranice |
| T20, T27 i T34 | na dubini od 42.5 mm od vanjske vertikalne stranice |
| T21, T28 i T35 | na dubini od 60 mm od vanjske vertikalne stranice |
| T22, T29 i T36 | na dubini od 77.5 mm od vanjske vertikalne stranice |
| T23, T30 i T37 | na dubini od 92 mm od vanjske vertikalne stranice |
| T24, T31 i T38 | na dubini od 110 mm od vanjske vertikalne stranice |
| T39, T40 i T41 | između drvenog zida i obloge |
| T42, T43 i T44 | između dvije ploče obloge |

*vanjska vertikalna stranica – neizložena strana

termoelementi T25 – T38; T40, T41, T43 i T44 postavljeni su u gornjem dijelu uzorka

termoelementi T18 – T24; T39 i T42 postavljeni su na sredini uzorka

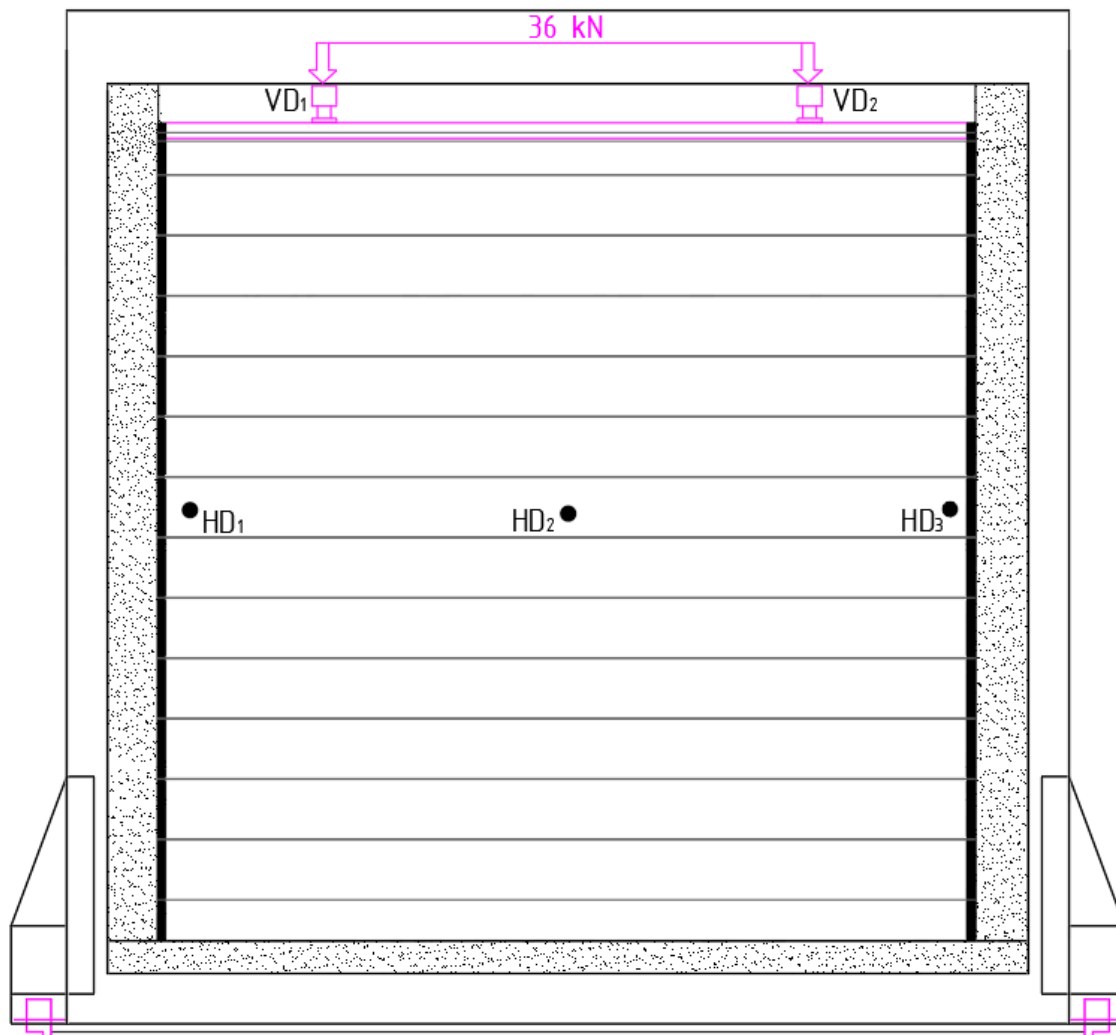


Slika 4.101 Skica mjernih mjesta temperature unutar uzorka

Tijekom ispitivanja mjerene su horizontalne deformacije u tri točke, te vertikalne deformacije u dvije točke.

Što se tiče horizontalne deformacije to su mjerne točke HD1 i HD3 - na sredini visine uzorka, 50 mm od slobodnog ruba, te mjerna točka HD2 - u središtu uzorka.

Kod mjerenja vertikalne deformacije mjerne točke su VD1 i VD2 - uz slobodne krajeve uzorka – vertikalni pomak horizontalne grede za raspodjelu opterećenja uzorka. Navedena mjerna mjesta prikazana su na slici 4.102.



Slika 4.102 Skica mjernih mjesta deformacija uzorka

Ispunjenje kriterija kapaciteta nosivosti uzorka ostvareno je ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

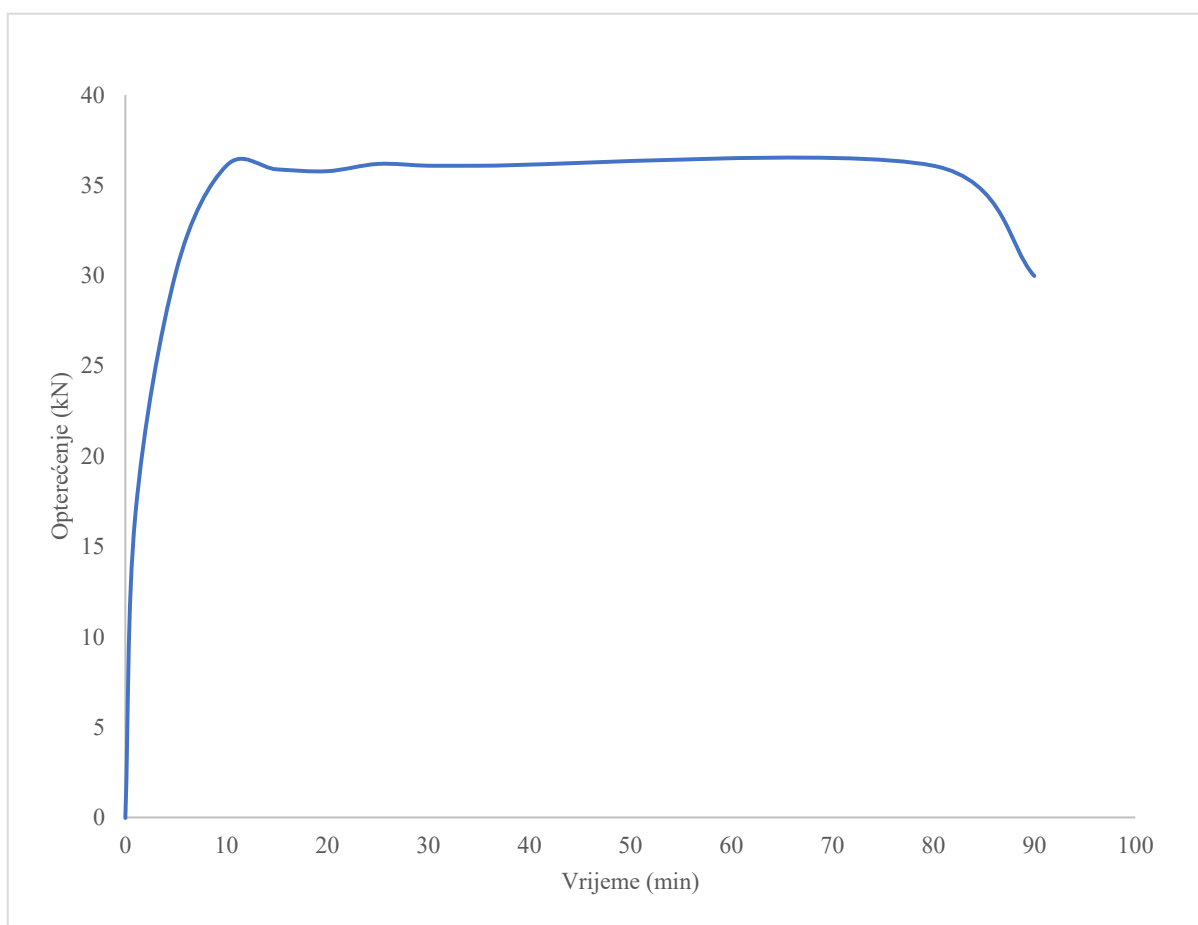
Maksimalna vertikalna deformacija (kontrakcija):

$$C = \frac{h}{100} = \frac{2985}{100} = 29.85 \text{ mm} \quad (4.59)$$

te maksimalna brzina prirasta vertikalne deformacije:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} = \frac{3 \cdot 2985}{1000} = 8.95 \text{ mm/min} \quad (4.60)$$

Uzorak je opterećen s kontinuiranim opterećenjem u iznosu od 12 kN/m, što odgovara ukupnom primijenjenom kontinuiranom opterećenju na uzorak u iznosu od 36 kN. Opterećenje ostvareno je pomoću hidrauličkog sustava koji je ravnomjerno djelovao na horizontalnu gredu za raspodjelu opterećenja. Kontinuirano opterećenje je na uzorak primijenjeno u centralnoj osi preko cijele širine poprečnog presjeka nosivog zida. Uvjeti opterećenja odgovaraju primjeru (d) prikazanom na slici 1 norme HRN EN 1365-1:2012 [185], gdje je prikazan sustav za prijenos opterećenja, te primijenjeno opterećenje s gornje strane ispitnog uzorka. Uzorak je postupno opterećen prije početka ispitivanja. Potrebno opterećenje od 36 kN postignuto je 20 minuta prije početka te je održavano cijelim tokom ispitivanja (Slika 4.103).



Slika 4.103 Opterećenje uzorka

4.6.3 Opažanja tijekom požarnog ispitivanja

Prije samih rezultata požarnog ispitivanja u vidu razvoja temperature, prikazane su glavne (fizičke) promjene na uzorku tijekom ispitivanja (Tablica 4.21).

Tablica 4.21 Opažanje tijekom požarnog ispitivanja – zid

| Vrijeme (min:s) | Strana* | Opažanje |
|--------------------|---------|--|
| 00:00 | | Početak ispitivanja |
| 03:20 | PI | Tamni površina gips-vlaknastih ploča uzorka. |
| 12:10 | PI | Vidljive horizontalne pukotine na pločama prvog sloja (na pločama postavljenima uz rub uzorka nepune visine). |
| 24:30 | PI | Povećavaju se zazorci na horizontalnim pukotinama ploča. |
| 31:10 | PN | Mjestimično izlazi para iz pukotina u drvu greda. |
| 33:20 | PI | Povećavaju se zazorci na spojevima ploča prvog sloja. |
| 44:10 | PI | Odvaja se ugao na spoju ploča (na horizontalnom spoju) te se javlja plamena po površini uzorka. Također se odvaja veći dio ploče vertikalno uz desni rub uzorka. |
| 50:40 | PI | Odvajale se ploče prvog sloja vertikalno uz desni rub uzorka te je izložen drugi sloj ploča. |
| 59:20 | PI | Iz područja na kojemu su se otvorile ploče izlazi intenzivan plamen. |
| 63:10 | PI | Intenzivira se izlazak dima kroz otvore u godovima greda. |
| 67:20 | PI | Intenzivan plamen na većem dijelu površine uzorka. |
| 86:50 | PN | Vidljiva deformacija desnog kraja uzorka od peći (sredina uzorka se sve više odmiče od peći). |
| 89:10 | PN | Pad kriterija nosivosti i cjelovitosti uzorka – deformacija srednjeg dijela uzorka (na sredini visine) dovela je do raspada uzorka. Grede na sredini uzorka su izašle izvan okvira potporne konstrukcije te su ispale prema neizloženoj strani što je imalo za posljedicu ispadanje preostalih greda koje su se nalazile iznad njih. |
| 90:01 | | Prekid ispitivanja. |

* PI – požaru izložena strana

PN – požaru neizložena strana

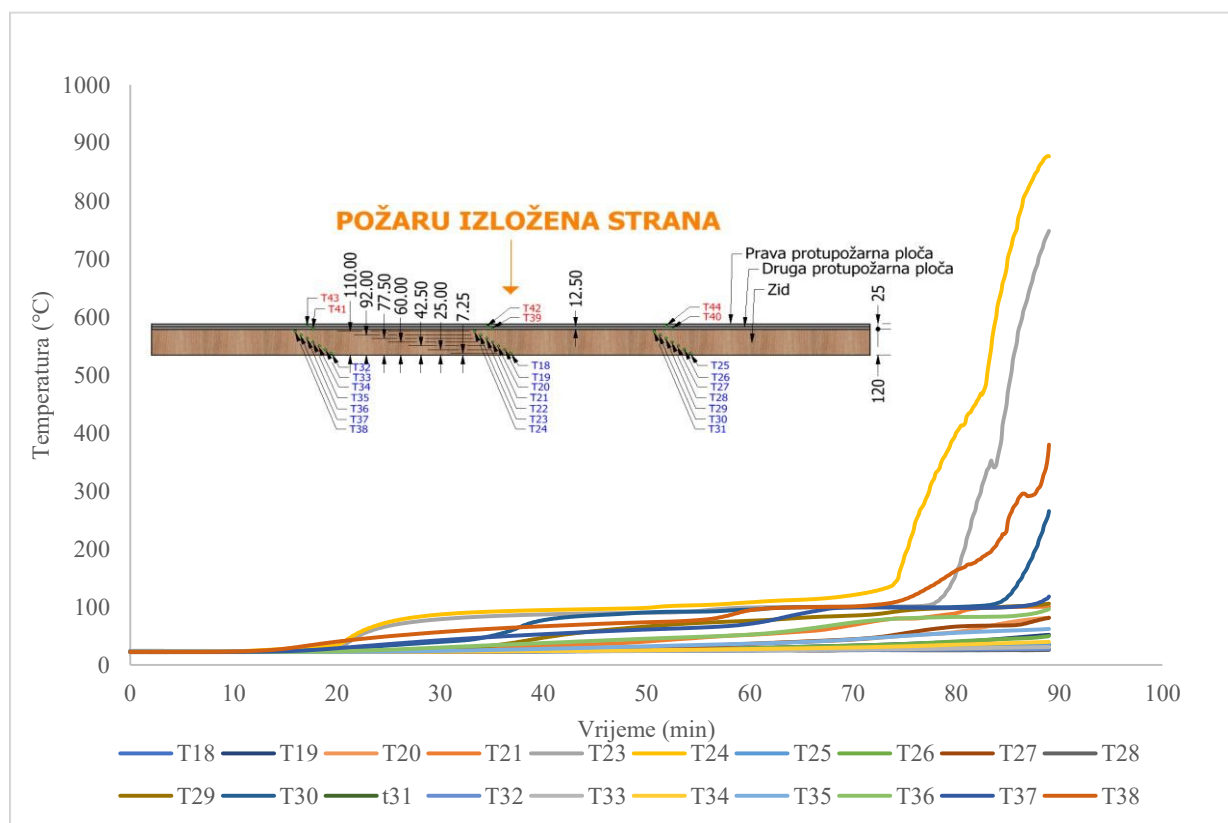
4.6.4 Rezultati ispitivanja

Prema normi HRN EN 1363-1:2020, točka 11.4.1. [181], podrazumijeva se da kriteriji izolacije i cjelovitosti nisu održani od trenutka gubitka kriterija nosivosti (Tablica 4.22). Ispitivanje je bilo prekinuto u 91. minuti zbog pada kriterija nosivosti i cjelovitosti te kolapsa uzorka.

Tablica 4.22 Kriterij prolaznosti uzorka

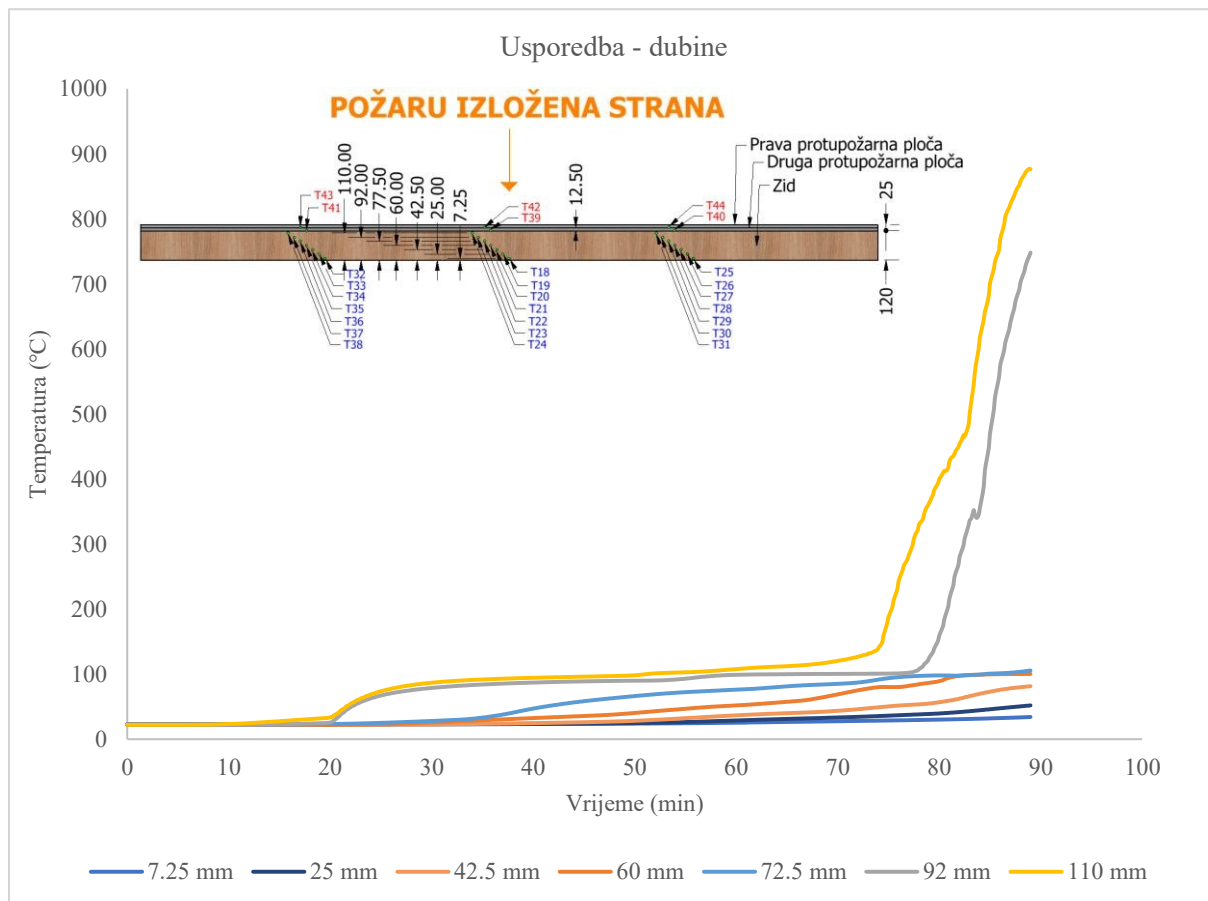
| Parametar | Vrijeme do kojeg je kriterij prolaznosti održan |
|---|---|
| R - Nosivost – vertikalni progib ($C < 30$ mm) | 89 min |
| R - Nosivost - brzina vertikalnog progiba ($dC/dt < 9$ mm/min) | 89 min |
| E - Cjelovitost - ispitivanje mjeračem razmaka Φ 6 mm | 89 min |
| E - Cjelovitost - ispitivanje mjeračem razmaka Φ 25 mm | 89 min |
| E - Cjelovitost - ispitivanje pamučnom podlogom | 89 min |
| E - Cjelovitost - kontinuirani plamen | 89 min |
| I - Izolativnost - prosječna temperatura (140 K) | 89 min |
| I - Izolativnost - maksimalna temperatura (180 K) | 89 min |

Dijagram globalnog porasta temperature na uzorku prikazan je na slici 4.104.



Slika 4.104 Dijagram porasta temperatura na uzorku - ukupno

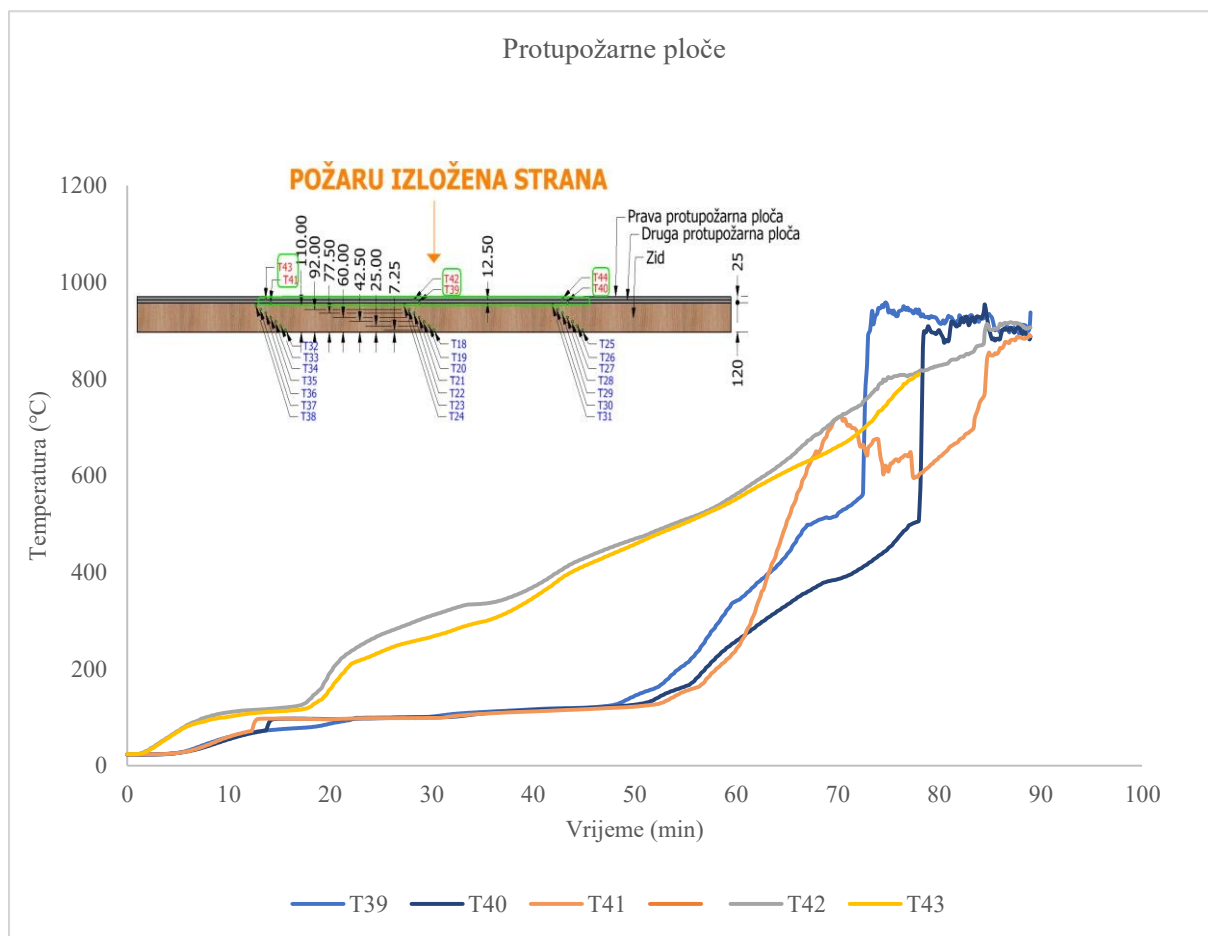
S obzirom na velik broj mjernih mjesta, izdvojeni su dijagrami porasta temperature određenih skupina termoelemenata (na određenoj dubini instalacije) koji prikazuju značajnije lokalne promjene tijekom požarnog ispitivanja (vidi sliku 4.105).



Slika 4.105 Usporedba razvoja temperature na određenim dubina (mjereno od vanjske, ne izložene strane)

Prije kolapsa uzorka, značajnije promjene temperature dogodile su se samo u prva dva reda izloženih termoelemenata (92 i 110 mm dubina).

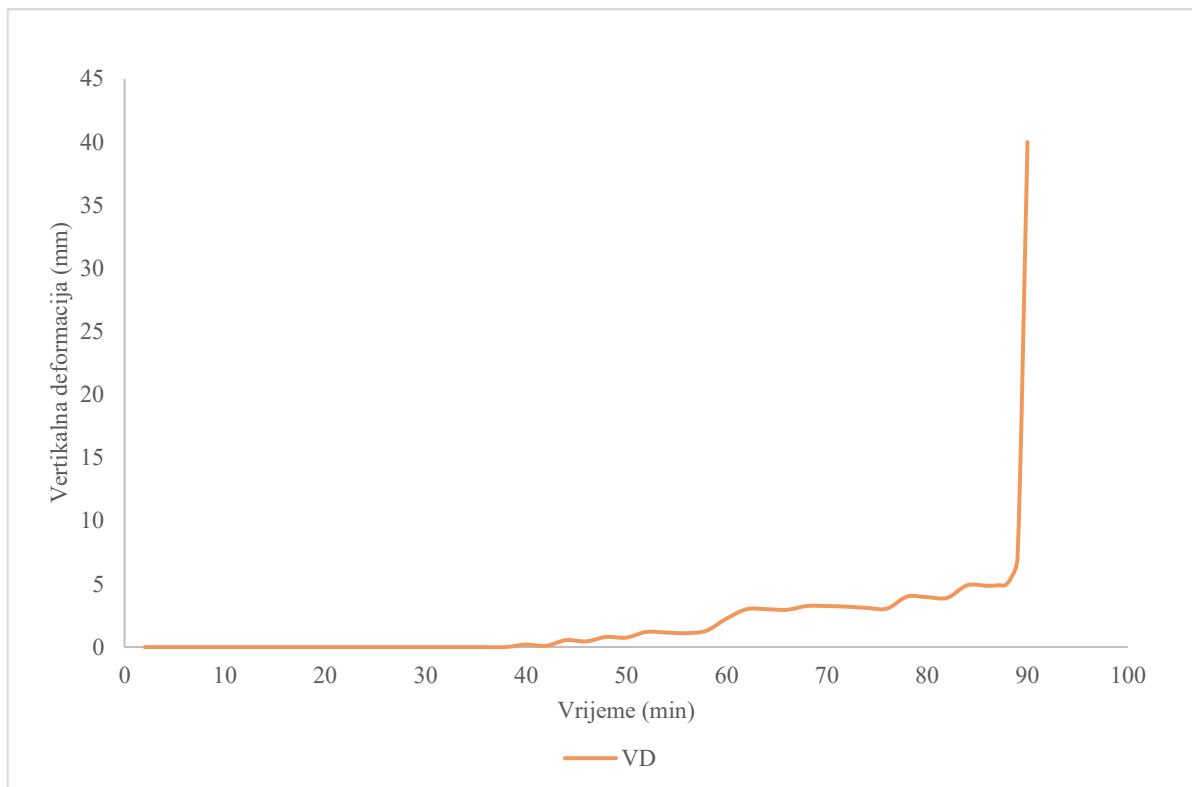
Nadalje, bitna promjena vezana je za odvajanje protupožarnih ploča, odnosno prodor vatre prema neizloženom drvenom uzorku. Na slici 4.106 prikazan je dijagram porasta temperature skupine termoelemenata instaliranih između zida i protupožarne ploče (T19, T40 i T41), te između dvije protupožarne ploče (T42 i T43). Može se zaključiti da su protupožarne ploče popuštale na linija spojeva oko 20. minute požarnog ispitivanja, dok se odvajanje drugog sloja protupožarnih ploča dogodilo u 50. minuti ispitivanja. Nakon toga, uzorak je bio direktno izložen požaru, a brzina pougljenja i ponašanje je bilo u skladu sa prethodnim eksperimentalnim istraživanjem objašnjenim u poglavlju 4.2.2.3.



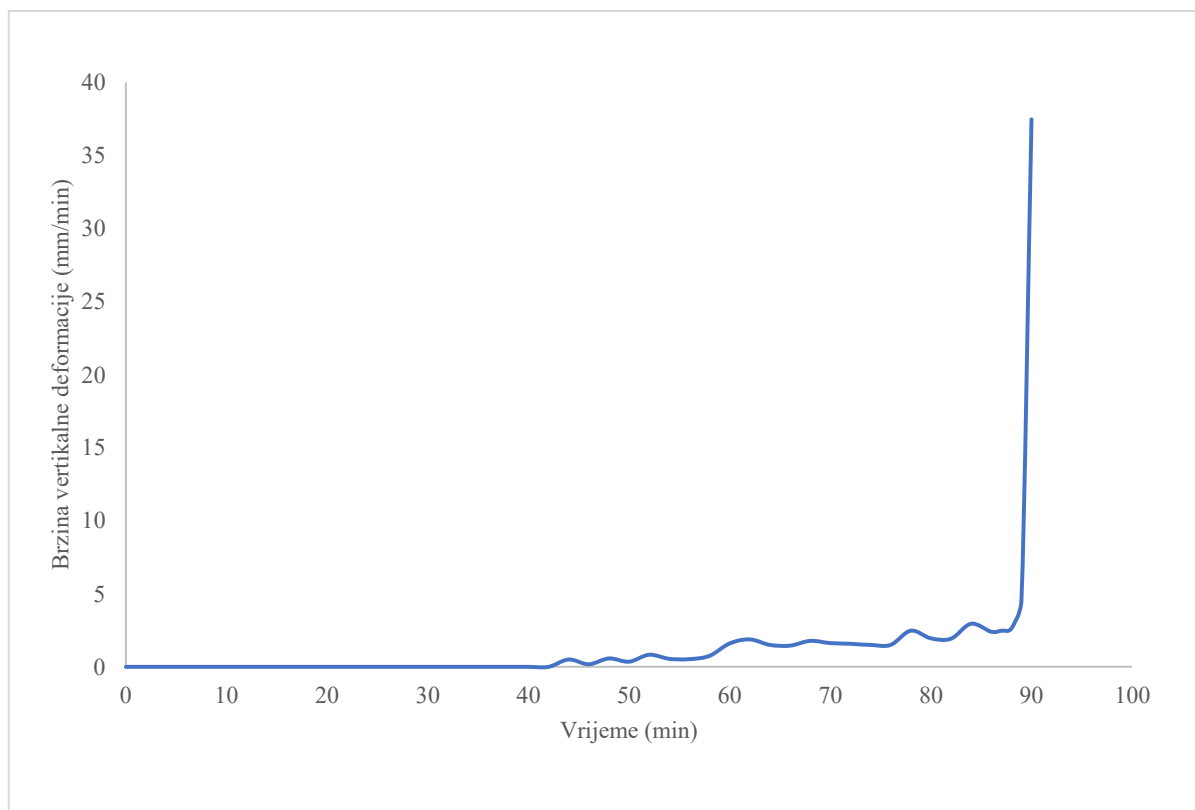
Slika 4.106 Dijagram porasta temperatura na uzorku - na dubini od 110 mm

Dozvoljeni porast prosječne temperature na požaru neizloženoj strani uzorka (140 K) nije bio prekoračen do 91. minute ispitivanja, dok dozvoljeni porast maksimalne temperature na požaru neizloženoj strani uzorka (180 K), je bio prekoračen u 90. minuti ispitivanja na mjernom mjestu T9. Do gubitka cjelovitosti uzorka je došlo u 90. minuti ispitivanja.

Zatim, do gubitka nosivosti uzorka je došlo u 90. minuti ispitivanja – vertikalni progib $C > 29,85$ mm (vidi sliku 4.107) i brzina prirasta vertikalnog progiba $dC/dt > 8,95$ mm/min (vidi sliku 4.108).



Slika 4.107 Vertikalna deformacija

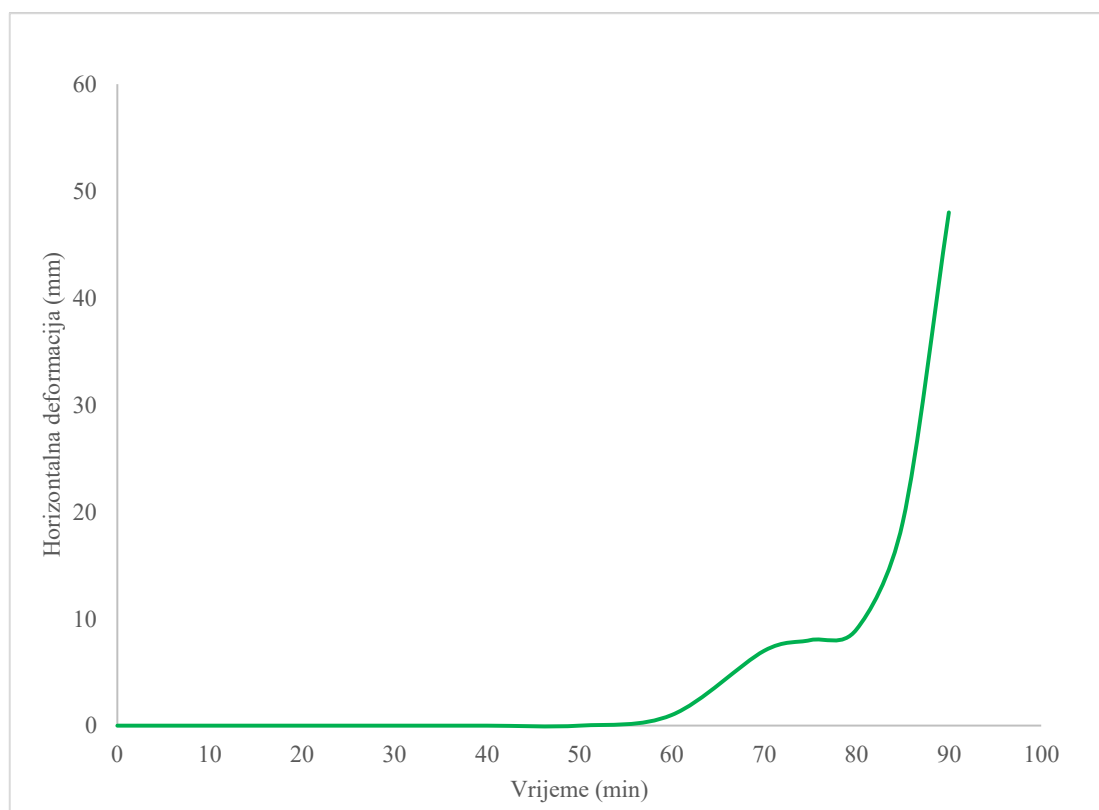


Slika 4.108 Brzina vertikalne deformacije

Dodatna kontrola je horizontalna deformacija, odnosno izbočavanje zida. Granična vrijednost horizontalne deformacije iznosi:

$$C = \frac{h}{100} = \frac{3000}{100} = 30 \text{ mm} \quad (4.61)$$

Do prekoračenja uvjeta navedenog u izrazu (4.61) došlo je u 90. minuti, kao što je prikazano na slici 4.109.



Slika 4.109 Horizontalna deformacija

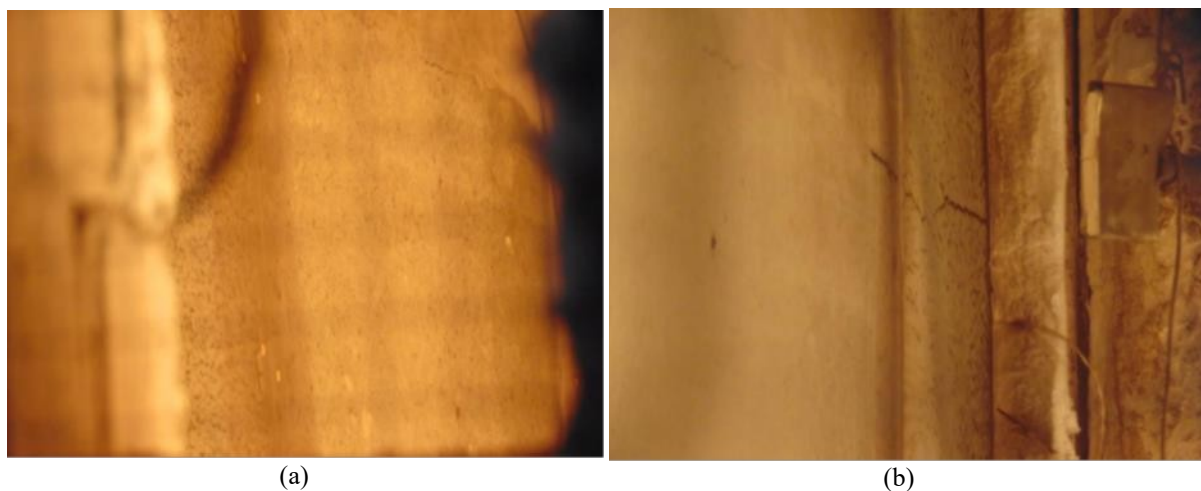
Kontinuirano opterećenje uzorka od 36 kN održavano je do 89. minute kada ga više nije bilo moguće održavati zbog porasta iznosa deformacije.

U nastavku je prikazan cjelokupni proces požarnog ispitivanja nosivog zida zaštićenog protupožarnim oblogama, te glavne fizikalne promjene sustava tijekom ispitivanja. Početak ispitivanja i sastavljeni uzorak može se vidjeti na slici 4.110.



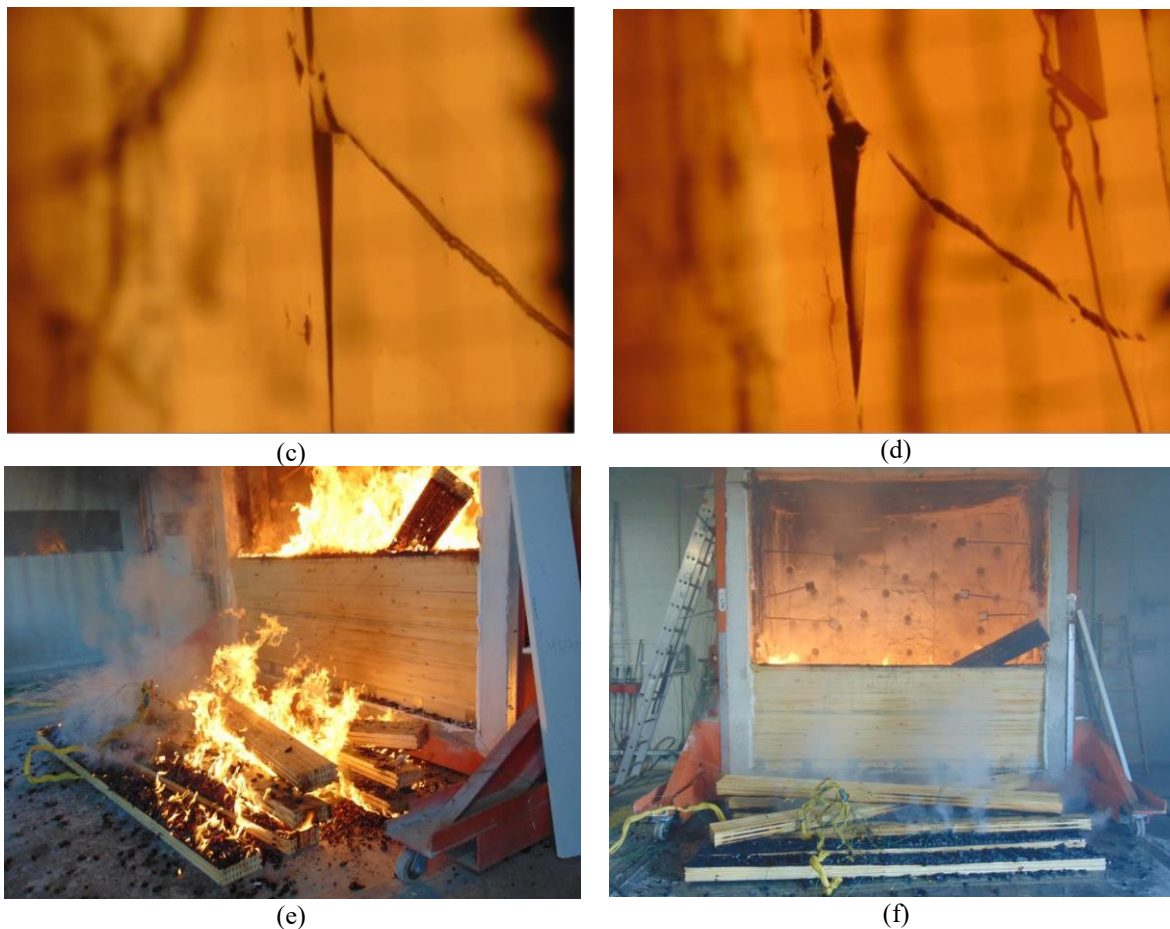
Slika 4.110 Ispitni uzorak s neizložene strane prije ispitivanja

U 13. minuti ispitivanja vidljive su početne pukotine na spojevima protupožarnih ploča (Slika 4.111-b), dok su u 34. minuti vidljive veće pukotine (Slika 4.111-c), a zatim inicijalno odvajanje ploča u 45. minuti (Slika 4.111-d). Konačno, prekid ispitivanja i gubitak stabilnosti desio se u 91. minuti (Slika 4.111-e,f).



(a)

(b)



Slika 4.111 Ispitni uzorak – izložena strana: (a) 4. minuta ispitivanja; (b) 13. minuta ispitivanja; 34. minuta ispitivanja; (d) 45. minuta ispitivanja; (e) 90. minuta - pad kriterija nosivosti i cjelovitosti; (f) 91. minuta - prekid ispitivanja

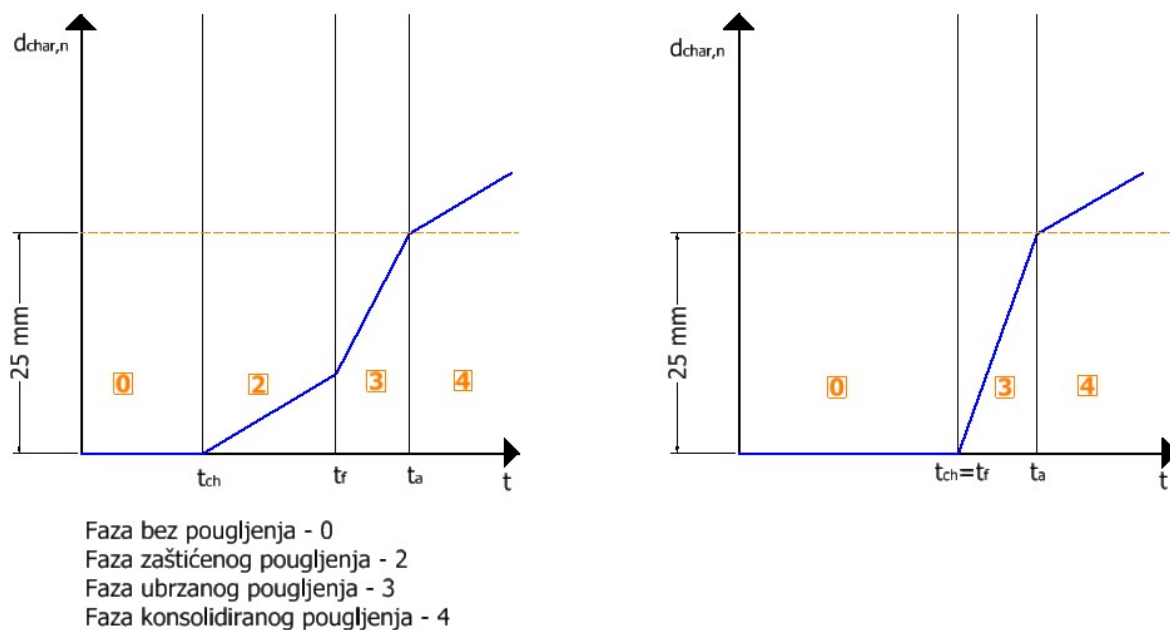
Nakon prekida ispitivanja, pristupilo se gašenju drvenih elemenata zida. Na slici 4.112 prikazan je preostali presjek zida, gdje se vidi da su konstitutivni elementi izgorjeli do prve šupljine (5 mm), što je bilo dovoljno smanjenje presjeka da dođe do gubitka stabilnosti cijelog zida.



Slika 4.112 Presjek prošupljenog laminiranog drvenog elementa nakon ispitivanja

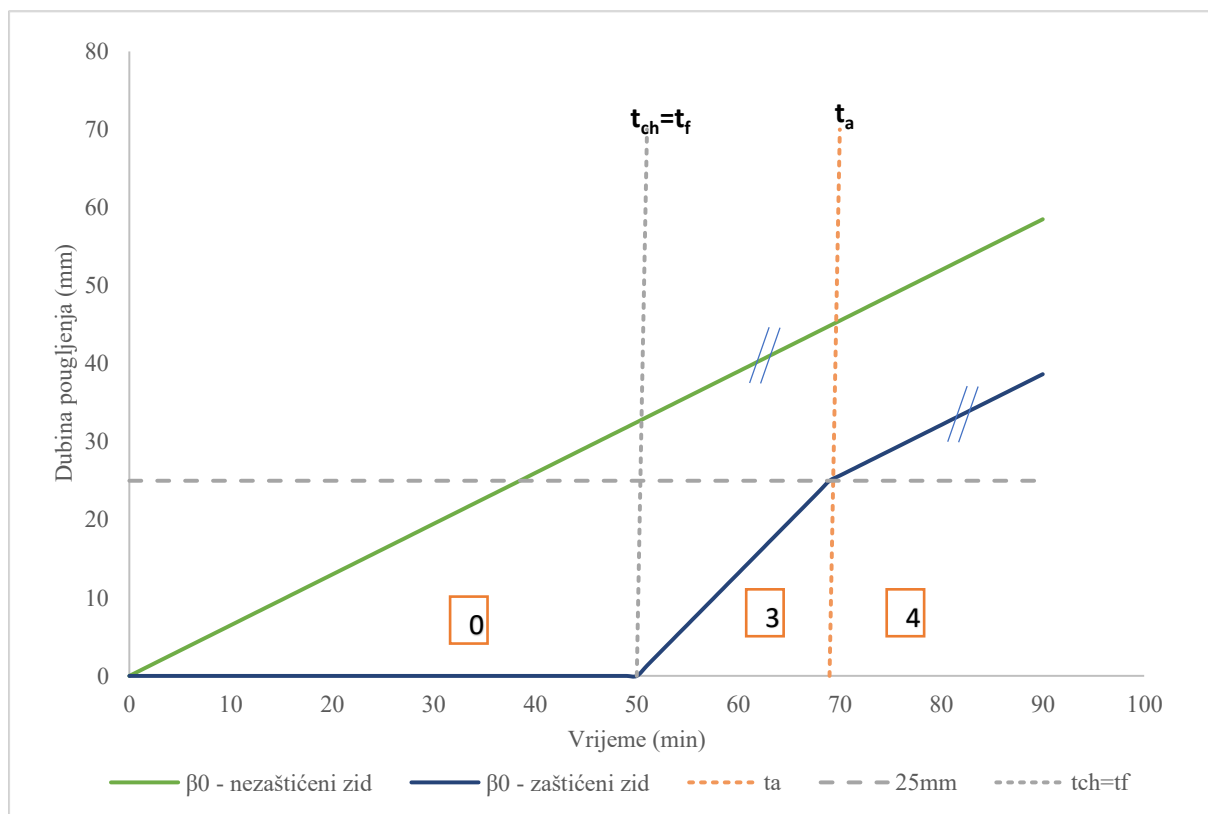
4.6.5 Diskusija i zaključak

Za površine zaštićene protupožarnim oblogama, treba uzeti u obzir da je početak pougljenja odgođen do određenog trenutka (t_{ch}). Prema EN 1995-1-2 [8] pougljenje se može javiti prije odvajanje protupožarne zaštite, ali s nižom brzinom pougljenja od brzina prikazanih u tablici 4.2, sve do trenutka otkazivanja protupožarne zaštite (t_f). Karakteristične faze pougljenja prikazane su na slici 4.113.



Slika 4.113 Karakteristične faze pougljenja

Faze pougljenja ispitanog zida prikazane su na slici 4.114. Nakon odvajanja protupožarne zaštite, brzina pougljenja se povećava ($\beta_{0,Faza3} = 1.3$ mm/min) iznad vrijednosti prikazano u tablici 4.2 ($\beta_0 = 0.65$ mm/min), i to dva puta ($k_3 = 2$) do trenutka t_a koji predstavlja trenutak kada je dubina pougljenja jednaka dubini pougljenja istog elementa bez protupožarne zaštite ili 25 mm (manje od dvije vrijednosti). Od tog trenutka nadalje, brzina pougljenja se vraća na vrijednost prikazanu u tablici 4.2.



Slika 4.114 Faze pougljenja zida

„Faza 0“ označava fazu bez pojave pougljenja, odnosno protupožarne obloge potpuno štite zid. Nadalje, „faza 3“ je faza ubrzanog sagorijevanja, zbog naglog prodora vatre nakon odvajanje protupožarne obloge od zida. Nakon dostizanja dubine pougljenja od 25 mm, slijedi „faza 4“, konsolidirana faza pougljenja, gdje je brzina pougljenja jednaka brzini pougljenja inicijalno nezaštićenog elementa (linije na slici 4.114 su paralelne).

EN 1995-1-2 [8] daje smjernice i izraze za izračun vremena početka pougljenja (t_{ch}), odnosno u nekim slučajevima to je ujedno i vrijeme otkazivanja protupožarne obloge (t_f);

$$t_{ch} = t_f = 2.8 \cdot h_p - 11 \quad (4.62)$$

gdje je h_p debljina panela. Ipak, nisu dani izrazi za gips-vlakašne ploče. Za obloge koje se sastoje od dva sloja, debljinu h treba uzeti kao debljinu vanjskog sloja i 50 % debljine unutarnjeg sloja. Prema tome, za zid opisan u ovom radu, predviđeno vrijeme otkazivanja protupožarnih ploča bi 41.5 minuta, što nije u skladu s rezultatima eksperimenta (51. minuta).

Izraz (4.62) daje relativno točne vrijednosti za određene sustave i debljine protupožarnih obloga. Međutim, to ne uzima u obzir postojanje više od jednog sloja obloga, niti cijeli raspon debljina samih obloga. Konačno, ne uzima se u obzir uzrok otkazivanja protupožarnih panela.

Pregledom stanja područja i na osnovu eksperimentalnog ispitivanja, predlaže se sljedeći izraz za gips-vlknaste ploče sa dva sloja:

$$t_f = 3.7 \cdot h_p - 42 \quad (4.63)$$

gdje je h_p ukupna debljina panela.

Zatim, dan je izraz za određivanje trenutka nakon koje kreće konsolidirana faza pougljenja:

$$t_a = \min \left\{ \frac{2t_f}{\beta_{0,Faza3}} + t_f, 25 - (t_f - t_{ch}) \cdot \beta_{0,Faza2} \right\} \quad (4.64)$$

Vrijednost dobivena ovim izrazom ($t_a = 70$ min) pokazuje poklapanje sa rezultatima eksperimentalnog istraživanja.

Poglavlje 5.**DISKUSIJA I DOPRINOS ISTRAŽIVANJA**

Diskusija predstavljena u ovom poglavlju sastoji se od dva glavna poglavlja. U poglavlju 5.1 raspravlja se utjecaju prošupljenja na ponašanje lijepljeno lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim uvjetima, dok se u poglavlju 5.2 raspravlja o utjecaju povišenih temperatura (požarnog opterećenja) na ponašanje prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata. Naposljetku, u poglavlju 0 istaknut je doprinos istraživanja predstavljenog u doktorskom radu.

5.1 Ambijentni uvjeti**5.1.1 Preliminarno istraživanje inicijalnih uzoraka**

Glavna opažanja prilikom preliminarnog eksperimentalnog istraživanja inovativnih prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim uvjetima su:

- Uočeno je generalno bolje ponašanje uzoraka s eliptičnim šupljinama u odnosu na uzorke s kružnim šupljinama.
- Prilikom ispitivanja savijanjem oko jače osi, za uzorke s eliptičnim, ali i s kružnim šupljinama, primjećuje se gotovo linearan odnos sila – pomak od početka ispitivanja pa sve do otkazivanja uzoraka. Ovakvo je ponašanje uobičajeno za krte materijale, jer krivulja ne posjeduje područje popuštanja za vrijeme kojega bi bile uočene značajne deformacije, uz manji prirast sile, kao najava otkazivanja uzoraka.
- Ispitivanja savijanjem oko slabije osi ukazuje na manju krutost uzoraka s eliptičnim šupljinama u odnosu na uzorke s kružnim šupljinama, što je suprotno očekivanome, uzimajući u obzir rezultate savijanja oko jače osi. Mogući razlog krije se u obliku šupljina, promatrajući u smjeru nanošenja opterećenja. Naime, kada je uzorak položen tako je visina poprečnog presjeka $h = 120$ mm, eliptične šupljine su puno šiljatije u odnosu na kružne, tj. luk elipse, gledajući od tjemena, puno je strmiji u odnosu na luk kružnice, što može pridonijeti boljem prijenosu opterećenja. Drugi uzrok ovakvom ponašanju, može biti vezan za lokalno veću površini drvenih uzoraka s kružnim šupljinama u ravnini spoja lamela. Iako je prošupljenost uzoraka s kružnim šupljinama globalno veća, kružne su šupljine raspoređene naizmjenično, na način da se u jednom redu nalaze tri, a u drugom samo dvije šupljine, pa je samim tim veća površina drva u okolici šupljina.

- Nedovoljna čvrstoća ljepila korištenog za spajanje lamela, tj. ljepilo nije adekvatno zbog tendencije otkazivanja uzoraka po lijepljenoj površini prilikom ispitivanja savijanjem. Dakle, došlo je to uzdužnog smicanja između lamela.
- Eksperimentalno ispitivanje tlaka okomito na vlakanca pokazalo je kako uzorci s eliptičnim šupljinama mogu podnijeti gotovo dvostruko veće opterećenje u odnosu na uzorke s kružnim šupljinama. Razlog tomu je način raspodjele šupljina unutar poprečnog presjeka uzoraka. Eliptične šupljine postavljene su jedna ispod druge, što omogućava jednostavan prijenos sile, po hrptovima punog drva, dok su kružne šupljine izmaknute jedna u odnosu na drugu, gledajući po visini presjeka, pa je i prijenos sile relativno nepravilan. Naime, kod uzoraka s kružnim šupljinama, sila, koja ide hrptom punog drva, nailazi na šupljinu, u čijoj okolini dolazi do otkazivanja materijala. Kada bi se kružne šupljine postavile jedna ispod druge, kao što je slučaj kod eliptičnih, tada se ne bi mogla postići dovoljna prošupljenost uzoraka s kojom bi bila ostvarena zadovoljavajuća redukcija vlastite težine drvenih elemenata.
- Može se primijetiti kako bi se prilikom povezivanja pukotina na uzorku s kružnim šupljinama dobila zakrivljena linija. Ovime je potvrđena prethodno objašnjena nepravilnost pri kretanju sile, koju prenosi uzorak s kružnim šupljinama. Kada bi se spojile pukotine uzorka s eliptičnim šupljinama, dobila bi se ravna linija koja povezuje vrhove lukova elipsi. To ukazuje na pravilan put prijenosa sile, što je za posljedicu imalo otkazivanje uzoraka prilikom drobljenja drva u području oko šupljina.
- U rubnim lamelama neophodno je izbjegavanje prošupljena, u cilju eliminacije koncentracije naprezanja.

5.1.2 Druga serija uzoraka – eksperimentalno istraživanje

Slijedom opažanja navedenih u prethodnom poglavlju, donesen je zaključak da uzorci s eliptičnim šupljinama imaju veću i zadovoljavajuću nosivost, i generalno bolje ponašanje, stoga se nastavak istraživanja odnosi samo na tu vrstu uzoraka. Provedeno je eksperimentalno istraživanje na novim uzorcima, a poboljšanje se ogleda u sljedećem:

- Rubne lamele izrađene su bez oslabljenja, u cilju eliminacije koncentracija naprezanja u rubnim zonama.
- Korišteno je 1-komponentno poliuretansko ljepilo s ojačanim vlaknima, certificirano za nosive drvene konstrukcije.

Nadalje, u nastavku su ispitani i uzorci od tvrdog drva, kako bi se istražio utjecaj različitih vrsta drva na ponašanje inovativnih prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata. Konačno, sve varijante prošupljenih drvenih elemenata, uspoređene su sa standardnim GLT elementima iste vrste, kako bi se definirao utjecaj prošupljenja na nosivost i uporabivost GLT elemenata.

Osim ispitivanja koja su provedena kod inicijalnih uzoraka, kod druge serije uzoraka provedena su i dodatna ispitivanja (vlak paralelno s vlakancima, posmični test površine lijepljenja), a glavna opažanja su:

- Prilikom ispitivanja uzoraka savijanjem, nosivost novih, poboljšanih uzorka od mekog drva, povećana je u prosjeku za 50 % u odnosu na inicijalne uzorke.
- Kod tvrdog drva modul elastičnosti je očekivano veći nego kod mekog drva. Prošupljeni uzorci imaju manji modul elastičnosti od uzoraka s punim poprečnim presjekom, međutim razlika nije velika, što je dobar pokazatelj vezano za krutost prošupljenih GLT elemenata.
- Može se zaključiti da pri savijanju oko jače osi, čvrstoća mekog i tvrdog drva je podjednaka, a uzrok tomu je prijevremeni krti lom po zupčastom spoju kod elemenata od tvrdog drva. Mogući razlozi otkazivanja po zupčastom spoju su velika čvrstoća tvrdog drva u odnosu na čvrstoću ljepila, ili nekompatibilnost ljepila i tvrdog drva. Kod savijanja oko slabije osi, razlika između karakterističnih čvrstoća na savijanje je veća zbog manjeg iznosa sile, odnosno statičke visine, pa je kasnije dosegnuta čvrstoća ljepila.
- Kombinacijom različitih debljina lamela, materijala pojedinih lamela, i u konačnici, rasporeda lamela, mogu se postići pozitivni učinci na deformaciju i/ili naprezanje

drvenih elemenata. Ukoliko je deformacija maksimalno prošupljene grede prevelika, može se povećati klasa drva svih lamela. Povećanje čvrstoće, uz približno iste vrijednosti deformacije, postiže se višim klasama drveta vanjskih lamela. Za smanjenje deformacija i naprezanja, klasa drva unutarnjih lamela može se povećati, još bolji učinak moguće je postići zamjenom lamela „P3“ lamelama „P5“, ili povećanjem debljine rubnih lamela (vidi sliku 3.45). Za drastično smanjenje pomaka i naprezanja potrebno je uz gornji rub drvenog elementa dodati „P5“ lamele, veće debljine u odnosu na druge lamele. Neke od mogućih kombinacija za standardni raspon i opterećenje prikazani su u tablici 3.10.

- Omjer sile loma svih uzoraka prilikom eksperimentalnog istraživanja tlaka okomito na vlakanca, prikazan je u tablici 3.13. Očekivano, najveća sila loma uočena je kod prošupljenih uzoraka od tvrdog drva, zatim kod punih uzoraka od mekog drva, i na kraju, kod prošupljenih uzoraka od mekog drva. Nosivost prošupljenih uzoraka od tvrdog drveta veća je čak i od nosivosti punih uzoraka od mekog drveta, zbog približno tri puta većeg CSPG-a. Uzrok najmanje nosivosti kod prošupljenih uzoraka od mekog drva leži u malom razmaku između šupljina, odnosno maloj debljini vertikalnih drvenih stijenki između šupljina, koje bi prenosile opterećenje od vrha do dna uzorka. Konačno, tlačna čvrstoća okomito na vlakanca za svaku skupinu uzoraka, s pripadajućim koeficijentom $k_{c,90}$ prikazana je u tablici 3.12.
- Iz prikazanog istraživanja može se zaključiti da je CSPG mekog drva, za puni poprečni presjek opterećen u smjeru jače osi, jednak 4.07 MPa, a CSPG punih uzoraka od tvrdog drva 12.96 MPa, s koeficijentom $k_{c,90}$ jednak 1.0. Prilikom primjene opterećenja na rub elementa dobiven je koeficijent $k_{c,90} = 1.24$, koji je za 20 % niži od vrijednosti propisane u Eurokodu 5 [1] koja iznosi 1.55. U slučaju primjene opterećenja u sredini uzoraka dobiven je koeficijent $k_{c,90} = 1.45$, što je za 12% manje od vrijednosti propisane u [1] koja iznosi 1.66. CSPG mekog drva, za prošupljeni presjek opterećen u smjeru jače osi, smanjuje se za oko 55 % u odnosu na puni presjek, s vrijednošću od 1.83 MPa, a za tvrdo drvo smanjuje se za oko 50 %, na vrijednost od 6.58 MPa, s koeficijentom $k_{c,90} = 1.0$. U slučaju primjene opterećenja na rubu i sredini elementa dobiveni su faktori $k_{c,90}$ s vrijednošću bližom vrijednosti dobivenoj za uzorke s punim presjekom, što ukazuje na istu fenomenologiju, bez obzira na prošupljenje poprečnog presjeka.
- Osim toga, može se zaključiti da je CSPG četinara, za puni presjek opterećen u smjeru slabije osi, jednak 4.17 MPa, a CSPG tvrdog drva jednak 15.08 MPa, s koeficijentom $k_{c,90} = 1.0$. U slučaju primjene opterećenja na rub drvenog elementa dobiven je

koeficijent $k_{c,90} = 1.42$, koji je za 30 % manji od vrijednosti (2.07) propisane u EC5 [1]. Prilikom primjene opterećenja na sredini elementa dobiven je koeficijent $k_{c,90} = 1.46$, što je za 35 % manje od vrijednosti (2.21) propisane u EC5 [1]. CSPG mekog drva, za prošupljeni presjek opterećen u smjeru slabije osi, smanjuje se za oko 55 % u odnosu na puni presjek, s vrijednošću od 1.90 MPa, a za tvrdo drvo smanjuje se za oko 55 %, na vrijednost od 6.75 MPa, s koeficijentom $k_{c,90} = 1.0$. Može se zaključiti da obrazac ponašanja sličan onome kada je uzorak opterećen u smjeru jače osi.

- Naposljetku, može se zaključiti da je stupanj prošupljenosti proporcionalan CSPG-u bez obzira na vrstu drva. Nadalje, prošupljenost poprečnog presjeka ne utječe na prijenos sile s obzirom na rubne uvjete i položaj opterećenja, tj. koeficijenti $k_{c,90}$ imaju približno iste vrijednosti za prošupljene i pune uzorke. Međutim, da bi se dobio još bolji i detaljniji uvid u ponašanje (prošupljenih) GLT elemenata, potrebno je detaljnije proučiti raspodjelu naprezanja i putanju sile DIC metodom mjerenja. Kao što je spomenuto u prethodnim poglavljima, koeficijent $k_{c,90}$ teško je jednoznačno odrediti za različite rubne uvjete. Ovo istraživanje pokazalo je da se vrijednosti dane u europskim standardima [1] još uvijek ne mogu jednoobrazno primijeniti. Dakle, potrebna su daljnja istraživanja za korekciju koeficijenata vezanih uz vrstu drva, vrstu presjeka itd.
- Prilikom eksperimentalnog ispitivanja vlaka paralelno s vlakancima preporučuje se koristiti uzorke s „dog bone“ geometrijskim oblikom, zbog loma drvenih uzoraka na mjestu prihvata/unosa vlačne sile, tj. prevelikog pritiska na drvo. Omjer modula elastičnosti paralelno s vlakancima tvrdog i mekog drva je u prosjeku 1.63, dok je omjer vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima tvrdog drva u odnosu na meko drvo 1.92.
- Posmični test površine lijepljenja pokazao je da je kapacitet nosivosti površine lijepljenja između 2 lamele paralelno s vlakancima je približno 2 puta veći od kapaciteta nosivosti linije lijepljenja lamela okomito na vlakanca za tvrdo drvo, a čak 3 puta veći za meko drvo. Nadalje, meko drvo paralelno s vlakancima otkazalo je pri 44 % manjoj sili u odnosu na tvrdo drvo paralelno s vlakancima. Konačno, kod tvrdog drva mod loma bio isključivo po ljepilo, a kod pojedinih uzoraka od mekog drva uočen je kombinirani mod loma drvo-ljepilo (Slika 3.68c). Za uzorke opterećene okomito na vlakanca, sila loma kod mekog drva bila je manja za 67 % manja u odnosu na tvrdo drvo.

5.1.3 Teoretsko istraživanje inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata prema EC5

Inovativni prošupljeni lijepljeno lamelirani drveni elementi mogu se proračunavati prema teoriji sastavljenih nosača, danoj u EC5 [1]. Poklapanja rezultata dobivenih ručnim proračunom s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja su vrlo dobra. Glavna opažanja vezano za teoretsko istraživanje prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata dana su u nastavku:

- Prilikom savijanja uzoraka oko jače osi, prisutna su normalna naprezanja od utjecaja savijanja, ali i od popustljivosti spoja između lamela. Naime, naprezanja od popustljivosti pojavljuju se za onu os poprečnog presjeka u smjeru koje su postavljena spojna sredstva, jer se upravo u toj ravnini događa popuštanje spajala i eventualan lom. Kako se u smjeru jače osi presjeka nalazi površina lijepljenja lamela, pojavljuju se i naprezanja od popuštanja. S druge strane, to nije slučaj prilikom savijanja uzoraka oko slabije osi, jer se u smjeru te osi ne postoje spojna sredstva. Zato su oko prilikom savijanja uzoraka oko slabije osi prisutna samo naprezanja od savijanja, dok su naprezanja od popustljivosti spajala jednaka nuli.
- Dijagram ukupnih naprezanja ima očekivani oblik, odnosno izgleda približno jednako kao za uzorak punog poprečnog presjeka. Najveća su naprezanja na rubovima poprečnog presjeka. U težištu poprečnog presjeka jednaka su nuli, te se linearno mijenjaju po visini. Međutim, za ovaj tip sastavljenog nosača mogu se uočiti skokovi u vrijednostima naprezanja pri rubovima presjeka. Razlog tomu je što su rubne lamele drugačijeg tipa od onih u unutrašnjosti. U unutrašnjosti su lamele tipa „P3“ tako da se parametar a_i jednoliko povećava u središnjem dijelu, a posljedično i naprezanja. Nakon lamela „P3“, gledajući od težišta presjeka prema rubovima, dolazi lamela „P2“ čije je težište pomaknuto prema gornjem rubu, uslijed šupljina položenih samo s jedne strane lamele. Stoga, skok u dijagramu je takav da se naprezanja naglo povećaju za određeni iznos zbog naglog povećanja parametra a_i (crveno zaokruženo – slika 3.78). Zadnja je lamela tipa „P1“, odnosno „P4“, a obje imaju težište pomaknuto više prema rubu koji se nalazi s unutarnje strane presjeka. Posljedično, skok u dijagramu naprezanja je takav da se naprezanja smanjuju zbog naglog smanjenja parametra a_i (zeleno zaokruženo – slika 3.78).
- Prilikom proračuna posmičnih naprezanja u sastavljenom nosaču, vrijednosti poprečne sile i efektivnog momenta tromosti konstantne su za sve posmične ravnine (vidi tablicu

3.20). Promjena posmičnih naprezanja time ovisi o statičkom momentu površine i o širini presjeka u ravnini za koju se promatra posmično naprezanje. Može se uočiti da statički moment površine proporcionalno raste s udaljenošću posmične ravnine od neutralne osi, iako je rast manji u području šupljina. Stoga, promjena iznosa posmičnih naprezanja najviše ovisi o širini poprečnog presjeka u ravnini za koju se računa naprezanje. Može se primijetiti kako je promjena iznosa posmičnog naprezanja po visini svake lamele značajna (vidi sliku 3.81). Razlog tomu je što je iznos posmičnog naprezanja obrnuto proporcionalan duljini l_g , što znači da će posmično naprezanje biti veće što je manja širina poprečnog presjeka u toj ravnini. Širina presjeka najmanja je u ravnini lijepljenog spoja u kojoj je najveća širina eliptičnih šupljina, pa je u toj ravnini i najveća vrijednost posmičnog naprezanja pojedine lamele. U rubnim lamelama vidljivi su skokovi u posmičnom naprezanju zbog toga što je u istoj ravnini različita duljina l_g ovisno o tome uzima li se u obzir gornja ili donja strana promatrane ravnine.

5.1.4 Metoda konačnih elemenata (MKE)

Kako su eksperimentalna ispitivanja dugotrajna i iziskuju velike financijske izdatke, teži se razvijanju novih metoda proračuna te numeričkog modeliranja (MKE). Rezultati numeričkog modeliranja metodom konačnih elemenata u programskom paketu ANSYS pokazali su vrlo dobru korelaciju s rezultatima eksperimentalnog ispitivanja. Dodatno, napravljene je numerička parametarska analiza utjecaja rasporeda šupljina na nosivost i uporabivost prošupljenih GLT elemenata. Glavna opažanja istraživanja zasnovanog na MKE, dana su u nastavku:

- Prilikom numeričke simulacije drvene grede opterećene savijanjem, vidljivo je kako normalna napreznja dobivena MKE vrlo malo odstupaju u odnosu na napreznja dobivena ručnim proračunom. Razlika je manja od 1.24 % u svim točkama (vidi tablicu 3.23), što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata dobivenih MKE i rezultata dobivenim eksperimentalnim istraživanjem.
- U slučaju savijanja uzorka oko slabije osi, razlika u napreznjima dobivenih ručnog proračuna i numeričkim modeliranjem u ANSYS-u je mala, tj. manja od 1 %, što ukazuje vrlo dobro poklapanje rezultata (vidi tablicu 3.24).
- Progibi dobiveni metodom konačnih elemenata potvrdili su rezultate dobivene eksperimentalnim istraživanjem, sa odstupanjem od 3 % za savijanje oko jače osi, te 1.6 % za savijanje oko slabije osi.

Provedena je numerička parametarska analiza u cilju određivanja utjecaja rasporeda rupa i postotka prošupljenosti elemenata, na tlačnu čvrstoću okomito na vlakanca, i posljedično definiranja optimalnog oblika poprečnog presjeka prošupljenih GLT elementa. Na osnovu parametarske analize, doneseni su sljedeći zaključci:

- Prije numeričke parametarske analize, izvršena je validacija numeričkog modela. Kao što se vidi u tablici 3.12, za MP-209 mm utvrđena je vrijednost $f_{c,90,k} = 4.07$ MPa (u gornjem kutu), a za ME-209 mm $f_{c,90,k} = 1.83$ MPa. Prvotno, ista napreznja pojavila su se u gornjem kutu i na obodu rupa u slučaju eksperimentalnog istraživanja prošupljenih uzoraka, što je također potvrđeno u MKE analizi (Slika 3.55). Procjenom rezultata MKE analize početno σ_z napreznje za MP-209 mm iznosilo je 4.067 MPa (Slika 3.55a) za vrijednost sile loma 106.7 kN (Tablica 3.13), te 1.869 MPa (vidi sliku 3.55b) za uzorak MP-209 mm za vrijednost sile loma 47.7 kN (vidi tablicu 3.13). Nadalje, prikazana pojava inicijalnih pukotina te mod loma uzorka (Slika 3.53), što je potvrđeno i numeričkim modelom – prikaz putanje napreznja na slici 3.55.

- Prva skupina modela odnosila se na modele kod kojih su šupljine postupno uklanjane u redovima, počevši od donje lamele (vidi sliku 3.56). Prvi model (3.56a) u prvoj skupini prikazuje koncentraciju naprezanja, a najveće naprezanje javlja u području između rupa i iznosi 3.118 N/mm^2 . Kada je uklonjen prvi red šupljina (3.56b), to je minimalno utjecalo na raspodjelu naprezanja. Iako je na dnu uzorka naprezanje manje, maksimalno naprezanje bilo je slično prvom ($3,155 \text{ N/mm}^2$). Uklanjanjem rupa u sljedećoj lameli (3.56c) raspodjela naprezanja bila je povoljnija i lokalno i globalno, posebice u donjem dijelu uzorka.
- Sljedeća skupina modela (Slika 3.57) ogleda se u varijabilnosti rupa u naizmjeničnim redovima. Slika 3.57a prikazuje raspodjelu naprezanja kada su uklonjene šupljine na svakoj uzastopnoj lameli. Uočeno je manje naprezanje na vertikalnim stijenkama između šupljina. Međutim, naprezanje bilo nešto veće na horizontalnim dijelovima drveta između šupljina u usporedbi s prvom skupinom modela. Drugi (Slika 3.57b) i treći model u ovoj skupini bili su vrlo slični, iako je treći model (Slika 3.57c) u ovoj skupini pokazao bolje ponašanje zbog nepostojanja šupljina na vanjskim dijelovima poprečnog presjeka. Maksimalno naprezanje za prvi model u ovoj skupini iznosilo je 3.212 N/mm^2 , dok je naprezanje za drugi model bilo 3.301 N/mm^2 .
- Treću skupinu modela (Slika 3.58) karakterizirala je varijacija šupljina u stupcima. U prvom modelu (Slika 3.58a) su šupljine izostavljene u središnjem području poprečnog presjeka, što se odrazilo na raspodjelu naprezanja. Maksimalno naprezanje je manje u odnosu na prethodne modele (2.697 N/mm^2), a raspodjela naprezanja je povoljnija jer nema koncentracije naprezanja u središnjem dijelu poprečnog presjeka. Izostavljanjem rupa u svakoj sljedećoj lameli (Slika 3.58b,c) globalna raspodjela naprezanja bila je povoljnija, no zbog manjeg broja rupa, dolazi do nešto većeg iznosa naprezanja na rubovima elipse, uzrokovanog raspodjelom glavnih naprezanja.
- Konačno, posljednja skupina modela (vidi sliku 3.59) odnosi se na uzorke koji su suprotni od prethodne skupine, tj. rupe su prisutne samo u središnjem području poprečnog presjeka, dok je zadnji model bio standardni puni uzorak GLT elementa. Za posljednju skupinu može se primijetiti da je najpovoljnija raspodjela naprezanja za standardni puni uzorak (vidi sliku 3.59c), dok je drugi uzorak (vidi sliku 3.59b) u ovoj skupini ukazao na bolje ponašanje u odnosu na ponašanje prvog modela (vidi sliku 3.59a), a razlog tome bila je manja perforacija uzorka i shodno tome manja koncentracija naprezanja.

- Konačno, numerička (MKE) analiza potvrdila je eksperimentalno istraživanje. Rezultati parametarske numeričke analize pokazali su kako raspored šupljina utječu na raspodjelu naprezanja. Dokazano je da uklanjanjem pojedinih redova ili stupaca rupa može se povoljno utjecati na raspodjelu naprezanja. Ako su prve lamele pune, bez šupljina, to pozitivno utječe na cjelokupno ponašanje GLT elementa, odnosno dolazi do loma uzorka pri većim iznosima sile. Izbjegavanjem šupljina u svakoj sljedećoj lameli smanjuje se koncentracija naprezanja i povećava površina između dvije šupljine, što u konačnici rezultira većom nosivošću GLT elementa. Ako je središnji dio poprečnog presjeka uzorka bez rupa, naprezanje se smanjuje, ali posebnu pozornost treba obratiti na udaljenost rupa od rubova elementa, kako ne bi došlo do lokalnog pucanja materijala. Na kraju, ukoliko su šupljine prisutne samo u središnjem dijelu elementa, ponašanje elementa je povoljnije, ali se postavlja pitanje koliko ima smisla izrađivati takve uzorke i kolike su to prednosti u usporedbi uzorku bez šupljina, s obzirom da je perforacija ovakvog uzorka znatno manja u odnosu na dosad proučavane uzorke.

5.2 Požarni uvjeti

U doktorskom radu je proučavan utjecaj prošupljenja na požarnu otpornost lijepljeno lameliranih drvenih elemenata i sklopova. Nadalje, istražen je utjecaj različitih sustava protupožarne zaštite na požarnu otpornost prošupljenih GLT elemenata. Konačno, proučavan je utjecaj povišenih temperatura na lijepljene spojeve lameliranih drvenih elemenata. Glavna opažanja predstavljena su u nastavku rada.

5.2.1 Uzorci izloženi požaru s jedne strane

Sukladno cilju ovog istraživanja (utjecaj povišene temperature na prošupljene lijepljeno lamelirane drvene elemente), te zbog određenih ograničenja vezanih uz dimenzije laboratorijske opreme, uzorci su prilagođeni kako veličinom, tako i oblikom. Dimenzije poprečnog presjeka uzoraka bile su 12×14 cm, a duljina 150 cm. Osim toga, prva i zadnja lamela (s utorima) su eliminirane radi jednostavnije primjene (na ravnu površinu) opterećenja na uzorke. S obzirom na cilj istraživanja, to nema utjecaj na konačne rezultate. Ukupno je ispitano 10 uzoraka, tj. 3 tipa uzoraka (normalni, prošupljeni i prošupljeni s prvom punom lamelom), s varijacijama u sustavu protupožarne zaštite (kamena vuna, protupožarni premaz) i ljepila između lamela (Slika 4.7). Na osnovu eksperimentalnog istraživanja (prošupljenih) GLT elemenata, u nastavku rada prezentirana su glavna opažanja:

- Na slici 4.13 prikazana je usporedba požarne otpornosti svih ispitanih uzoraka izloženih požaru s jedne strane. Što se tiče punih greda, vrijeme otkazivanja bilo je 63 minute za uzorke s ljepilom tip 501, odnosno 65 minuta za uzorke s ljepilom 510.
- Nadalje, do prekida ispitivanja uslijed kolapsa prošupljenih greda došlo je u 46. minuti (tip K.501 ljepilo), odnosno u 53. minuti (tip K.510 ljepilo). Drugim riječima, požarna otpornost prošupljenih uzoraka u prosjeku je manja za 23% u odnosu na standardne pune GLT uzorke. Sljedeći korak bio je ustanoviti utjecaj kamene vune postavljene u prvi red šupljina (izložena strana) prošupljenih uzoraka. Vrijeme otkazivanja za prošupljene uzorke sa kamenom vunom i ljepilom tipa K.501 bilo je 58 minuta, odnosno 68 minuta za prošupljene uzorke sa ljepilom tipa 510. Može se zaključiti da kamena vuna ima pozitivan utjecaj na požarnu otpornost prošupljenih GLT elemenata. Prvi razlog je taj da je kamena vuna negorivi materijal, čime se sprječava izravni doticaj požara sa drvom. Uz to, nema slobodne cirkulacije zraka u šupljinama, koji pospješuje gorenje. Sve navedeno rezultiralo je povećanjem požarne otpornosti prošupljenih

uzoraka s kamenom vunom u prosjeku za 27 % u odnosu na nezaštićene prošupljene drvene elemente.

- Kod nezaštićenih prošupljenih GLT uzoraka uočena je pojava delaminacije, a jedan od načina za izbjeci delaminaciju je umetnuti prvu (požaru izloženu) lamelu bez šupljina i na taj način povećati površinu lijepljenja između lamela. Rezultati (slika 4.13) požarnog ispitivanja ovog tipa uzoraka pokazuju da to ima pozitivan utjecaj na požarnu otpornost, jer se vrijeme otkazivanja povećalo za 12 minuta za uzorke sa tipom ljepila 501, odnosno 4 minute za uzorke s tipom ljepila 510. Nadalje, mod loma je bio drugačiji, bez pojave delaminacije.
- Zadnji tip uzoraka su puni i prošupljeni GLT uzorak zaštićen protupožarnim premazom. Ova vrste zaštite pokazala se kao najučinkovitija. Rezultati (vidi sliku 4.13) požarnog ispitivanja ukazuju na povećanje požarne otpornosti za 52 % (33 minute) u slučaju punog GLT uzorka, odnosno 67 % (33 minute) kod prošupljenog GLT uzorka.
- Uspoređujući standardne pune lijepljeno lamelirane uzorke sa prošupljenim, uočena je razlika u modovima loma, prvenstveno zbog toga što se kod prošupljenih uzoraka dogodila delaminacija. Prvo, uzrok delaminaciji bila je reducirana površina lijepljenja uslijed perforacije lamela, koje se međusobno spajaju. Nadalje, postojanje šupljina omogućuje cirkulaciju zraka (kisika) unutar drvenih elementa, čime se potiče razvoj požara, pa je i brzina sagorijevanja veća. Kada je u pitanju prošupljeni uzorak s ispunom od kamene vune, uočen je pozitivan učinak na požarnu otpornost prošupljenih uzoraka, budući da u šupljinama nije bilo zraka. Međutim, javio se dodatni dvodimenzionalni tok uslijed akumulacije topline u kamenoj vuni, koji je ubrzao stvaranje pougljenog sloja.

5.2.2 Uzorci izloženi požaru s tri strane

Ovo poglavlje sadrži rezultate požarnog ispitivanja lijepljeno lameliranih standardnih i prošupljenih drvenih greda u skladu s postupcima referentnih normi; EN 1363-1:2020 [28] i HRN EN 1365-3:2002 [29]. Ispitane su tri grede; normalna GLT greda, prošupljena GLT greda sa ispunom od kamene vune, te prošupljena GLT greda sa protupožarnim premazom. Dimenzije uzoraka bile su iste kao i kod ispitivanja u ambijentnim uvjetima : $120 \times 240 \times 5040$ mm (širina \times visina \times duljina), dakle, provedeno je požarno ispitivanje u velikom mjerilu. Na temelju eksperimentalnog istraživanja i analize rezultata požarnih testova, prikazana su sljedeća zapažanja:

- Kod standardnih GLT greda, koje imaju površinu lijepljenja cijelom širinom grede, nije došlo do delaminacije, već su grede otkazale uslijed redukcije poprečnog presjeka. Za razliku od punih greda, kod šupljih je došlo do delaminacije jer je površina lijepljenja značajno reducirana, uslijed perforacije lamela koje se međusobno lijepe.
- Protupožarni premaz i kamena vuna usporile su prodor požara prema unutrašnjosti drvenih greda, pa je vrijeme otkazivanja bilo slično kao i kod normalnih greda. Proračunom su se dobile i usporedile dimenzije preostalog poprečnog presjeka normalne grede sa i bez protupožarnog premaza (4.68), nakon izlaganja požaru u vremenu od 45 minuta. Za nezaštićenu gredu, dimenzije preostalog poprečnog presjeka bile su 197/34 milimetara, a za zaštićenu gredu 217/74 milimetara, što ukazuje na značajnu razliku, i posljedično, požarnu otpornost GLT greda.
- Požarna otpornost uzoraka s ispunom od kamene vune je vrlo slična požarnoj otpornosti uzoraka s protupožarnim premazom. Razlog tomu je što ispuna od kamene vune nije omogućila potpuni (cijelom širinom uzorka) prekid razvoja požara unutar elementa. Stoga, prednost negorivosti kamene vune nije u potpunosti realizirana.
- Utvrđena je jednodimenzionalna brzina pougljenja lamela ($\beta_0 = 0.69$ mm/min), što je blizu vrijednosti od 0.65 mm/min danoj u EN 1995-1-2 [8]. Nadalje, za normalne GL grede određena je višedimenzionalna brzina pougljenja ($\beta_n = 0.78$ mm/min), koja je također u skladu s vrijednostima koje propisuje EN 1995-1-2 [8] ($\beta_n = 0.80$ mm/min).
- U slučaju prošupljenih greda sa protupožarnim premazom, kao i kod uzoraka izloženih požaru s jedne strane (vidi poglavlje 4.2.2.4), došlo je do odgode u zapaljenju drvene površine, te je utvrđeno postojanje više faza pougljenja. Na početku ispitivanja nema pougljenja, a onda se u fazi 2 javlja usporeno pougljenje ($\beta_0 = 0.49$ mm/min), sve do konsolidirane faze pougljenja, kada je brzina pougljenja jednaka brzini pougljenja

inicijalno nezaštićenih greda. Može se zaključiti da je kod prošupljenih GLT elemenata prisutna prirodna otpornost drva na požar (pougljenjeni sloj) koji sprječava širenja topline prema unutrašnjosti grede, bez obzira na postojanje rupa.

- Uspoređujući standardne GLT grede sa prošupljenim, vidljiva je razlika u modovima loma, prvenstveno zbog pojave delaminacije kod prošupljenih GLT greda. Prvo, razlog tomu je smanjena lijepljena površina zbog perforacije lamela. Kod prošupljenih greda s ispunom od kamene vune, uočen je pozitivan kamene vune na požarnu otpornost grede, budući da u šupljinama nije bilo zraka, te je negorivi materijal spriječio direktni kontakt požara i drene površine. Ipak, javlja se dodatni toplinski tok zbog grijanja materijala vune. Protupožarni premaz uvelike je pridonio povećanju požarne otpornosti GLT greda. Delaminacija je promatrana u rasponu temperatura od 100 do 300 °C.
- Potrebno je uskladiti metodologiju ispitivanja interakcije ljepila i drva u ambijentnim i požarnim uvjetima. S obzirom na problem delaminacije kod prošupljenih uzoraka, u budućim istraživanjima ideja je napraviti prve lamele bez šupljina i time povećati površinu lijepljenja između požaru izloženih lamela. Osim toga, za prvu (požaru izloženu) lamelu može se koristiti drvo više klase, ili se pak može postaviti deblja lamela.

5.2.3 Pojednostavljeni model proračuna dubine pougljenog sloja

Razvijen je proračunski model za određivanje dubine pougljenog sloja, te sloja nulte čvrstoće, koji je validiran za sve vrste ispitanih uzoraka. Model proračuna baziran je na metodi reduciranog poprečnog presjeka prema EN 1995-1-2 [8], ali uzima u obzir više faza pougljenja, prije i poslije otpadanja prvog punog sloja izloženog požaru, nakon čega se mogu javiti različite faze/brzine pougljenja, ovisno u vrsti GLT elementa. U nastavku su dana glavna opažanja i pretpostavke vezane za proračunski modela:

- Pretpostavljeni su linearni odnosi između vremena i dubine pougljenja za svaku fazu. Nadalje, u koliko je prisutna ispuna od kamene vune, pretpostavlja se da vertikalne stijenke drva između prošupljena, nisu izložene požaru sa tri strane, nego sa jedne strane. Važno je napomenuti da je izolacija (kamena vuna) mora ostati na mjestu nakon prodora vatre u šupljine.
- Požarna ispitivanja su pokazala da je u prvoj fazi element izložen požaru s jedne strane i ustanovljena je vrijednost brzine pougljenja koja odgovara vrijednosti koju propisuje EN 1995-1-2 [8]. Za proračun efektivnog poprečnog presjeka, brzina pougljenja uzimajući obzir pukotine i zaobljenja je 0.8 mm/min, dok je debljina nultog sloja $d_0 = 7$ mm.
- Tijekom druge faze pougljenja prošupljenih elemenata sa kamenom vunom, javlja se pojačano pougljenje vertikalnih drvenih stijenki (između šupljina) uslijed dvodimenzionalnog toplinskog toka koji se javlja zbog akumulacije topline u kamenoj vuni. Za prošupljene drvene elemente i debljinu vertikalnih stijenki od 23 mm, ustanovljena je brzina pougljenja od 1.6 mm/min, što je potvrđeno rezultatima požarnih ispitivanja. Zbog malih dimenzija vertikalnih stijenki, izmjerene temperature u okolici šupljina su više u odnosu na temperature kod uzoraka bez kamene vune. Iz tog razloga, tijekom druge faze pougljenja, sloj nulte čvrstoće d koji uzima u obzir smanjenje čvrstoće i krutosti ovisno o temperaturi, mora se povećati na 19 mm.
- Za drvene površine zaštićene protupožarnim premazom, potrebno je uzeti u obzir da je početak pougljenja odgođen do trenutka t_{ch} , ali pougljenje može početi prije odvajanja protupožarnog premaza od drvene površine (trenutak t_f), ali pri nižoj brzini pougljenja u odnosu na brzinu pougljenja nezaštićenog drveta. Nakon trenutka u koje zaštita gubi svojstva otpornosti na požar, brzina pougljenja se povećava sve do trenutka t_a , u kojem je debljina pougljenog sloja jednaka debljini pougljenog sloja istog elementa bez zaštite od požara ili 25 mm (manja vrijednost). Nakon toga (faza 4), brzina pougljenja se vraća

na vrijednost inicijalno nezaštićenog drvenog elementa (β ili β_n). Faze pougljenja prikazane su na slici 4.27.

- S obzirom da se trenutak gubitka svojstava protupožarnog premaza (t_f), ne može eksplicitno odrediti, predlaže se pojednostavljeni model koji definira vrijeme početka pougljenja t_{ch} , te vrijeme početka konsolidacije t_a , dok se vrijeme gubitaka svojstava zaštite t_f ne razmatra prilikom procjene požarne otpornosti premazom zaštićenih drvenih greda. Prijedlog modela može se vidjeti na slici 4.28. Nadalje, predlaže se da se početak konsolidirane faze pougljenja odredi iz dva uvjeta; prvi je dosezanje debljine pougljenog sloja od 25 mm, a drugi je da se trenutak t_a , direktno povezan sa požarnom otpornošću samog elementa (30, 60 ili 90 minuta). Na taj način brzina pougljenja bi bila direktno povezana sa požarnom otpornošću drvenog elementa.

5.2.4 Metoda konačnih elemenata (MKE)

Numeričke simulacije mogu pružiti detaljniji uvid u ponašanje prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata u požaru. Termo-mehanička analiza provedena je u programskom paketu ANSYS, a numeričke simulacije su potvrdile eksperimentalno istraživanje. Glavna opažanja su su predstavljena u nastavku:

- U slučaju provođenja topline u drvu, gdje se drveni elementi zagrijavaju iznad 100 °C, što je uobičajeno u uvjetima požara, javlja se nelinearni problem, koji uključuje fazu promjene stanja vode sadržane u drvu. Problem se može riješiti definiranjem ulaznih parametara ovisnih o temperaturi. Prema EN1995-1-2 [8], glavni parametri su specifični toplinski kapacitet, gustoća, i toplinska vodljivost (pristup zasnovan na specifičnom toplinskom kapacitetu). Druga opcija je koristiti entalpijski pristup, koji se pokazao dobrim prilikom procjene ponašanja drva pri temperaturi od 100 °C, kada dolazi do promjene agregatnog stanja vode.
- Numeričkom simulacijom potvrđeno je eksperimentalno istraživanje. Na slici 4.35 prikazani su rezultati numeričkih simulacija za sve uzorke, nakon 65 minuta izloženosti požaru. Nadalje, označeno je mjesto na kojem se razvila temperatura od približno 300 °C, koje služi za određivanje granice pougljenog sloja kod uzoraka. Inicijalne numeričke simulacije provedene su na punim (vidi sliku 4.35a), i maksimalno prošupljenim elementom (vidi sliku 4.35b), koji su ekstremni slučajevi. Zatim, procijenjen je utjecaj ispune od kamene vune (vidi sliku 4.35c), te prve (izložene požaru) pune lamele, kao što je vidljivo na slici 4.35d. Konačno, na slici 4.35e, prikazani su rezultati razvijene temperature u uzorku s punim poprečnim presjekom koji je zaštićen protupožarnim premazom, a na slici 4.35f, prošupljenog uzorka koje je zaštićen sa istim protupožarnim premazom. Što se tiče procijenjenih temperatura, pogreška se u prosjeku mijenja od 15.1°C do 18.1 °C, dok je u vidu postotka, srednja postotna pogreška 5.1 %, a koeficijent R^2 pokazuje izvrsnu korelaciju rezultata. Slika 4.36 prikazuje usporedbu temperatura svih uzoraka izračunatih pomoću ANSYS-a (apscisa) i temperatura mjerenih u eksperimentu (ordinata). Vidljiva je dobra korelacija rezultata za sve uzorke. Svi rezultati ukazuju na pogreške u vidu temperature manje od 30 °C, te izvrsne koeficijente korelacije, što ukazuje na vrlo dobru predikciju ponašanja drvenih elemenata u požarnim uvjetima, pomoću ANSYS-a. Treba naglasiti da ove greške pokrivaju cijeli raspon temperatura.

- Razvijen je termo-mehanički numerički model za simulaciju ponašanja drvenih elemenata izloženih standardnoj ISO 834 krivulji požara. Rezultati termo-mehaničke analize pokazuju dobro slaganje s rezultatima požarnog ispitivanja. Požarno ispitivanje pune grede završeno je u 63. minuti kada se desio kolaps grede. Početna vertikalna deformacija u sredini raspona grede od konstantnog opterećenja bila je 4.67 mm, na osloncima prosječno 0.6 mm. Nakon 15 minuta konstantnog opterećenja, greda je bila izložena požaru pri čemu se deformacija postupno povećavala (redukcija čvrstoće i krutosti materijala) do vrijednosti od 34 mm, nakon čega je došlo do sloma uzorka.
- U doktorskom radu implementirana je novi način simulacije pougljenja drva, i to na način da kada se u drvu javlja temperatura od 300 °C, konačni elementi modela nestaju. Na taj način, simulira se ponašanje drva u skladu s normom EN 1995-1-2 [8], prema kojoj drvo gubi svojstva na temperaturi od 300 °C. Razvijen je programerski kod koji se implementira u APDL (Ansys Parametric Design Language), a koji omogućava navedenu simulaciju i „ubijanje“ konačnih elemenata prema određenom pravilu. Napravljen je iskorak u modeliranju drva u požaru, koji omogućava predviđanje preostale nosivosti drva. Dodatno, na ovaj način može se simulirati pojava delaminacije, opisana u poglavlju 4.1.2. Nadalje, ova metoda numeričkog modeliranja korištena je za potvrđivanje modela proračuna dubine pougljenog sloja, te sloja nulte čvrstoće za prošupljene GLT elemente, opisanog u poglavlju 4.2.2.5. Inovativna metoda simulacije donosi prednosti u vidu razmatranja samo stvarnog preostalog poprečnog presjeka GLT elemenata, u naknadnoj strukturalnoj analizi. Napravljen je validacija ove kompleksne simulacije na ispitanim drvenim uzorcima, za jednodimenzionalni i višedimenzionalni proces pougljenja. Rezultati dobiveni ovim načinom numeričkog modeliranja, potvrdili su eksperimentalno istraživanje. Na slici 4.76 uspoređene su izmjerene dubine pougljenja nakon požarnog ispitivanja, s dubinama pougljenja određenim pomoću numeričkih simulacija. Utvrđeno je vrlo dobro slaganje između rezultata MKE i rezultata požarnih ispitivanja. Omjer dubine pougljenja dobivene numeričkim modeliranjem koristeći MKE ($d_{char,MKE}$) u odnosu na dubinu pougljenja dobivenih požarnim ispitivanjem ($d_{char,test}$) je 1.05, što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata (5 %).
- Provedena je simultana termo-mehanička numerička analiza uz dodatak novo-razvijenog numeričkog pristupa određivanja dubine pougljenog sloja. Korištenjem simultane analize uzima se u obzir i energija koja se oslobađa dok materijal prolazi kroz određene vrste nelinearnih deformacija, što može dovesti do povećanja temperature

komponenti samog modela. Rezultati numeričkih simulacija ukazali su na vrlo dobru korelaciju sa rezultatima eksperimenta, u pogledu procjene vertikalne deformacije, ali i u pogledu fizikalnih promjena na uzorku u vidu procesa pougljenja uzoraka. Na slici 4.83b i 4.83c prikazan je razvoj dubine pougljenog sloja, odnosno redukcija poprečnog presjeka na području izloženosti nosača požaru. Dakle, rezultati numeričkih simulacija su potvrdili eksperimentalno istraživanje. Omjer svih progiba izmjenjenih prilikom požarnog ispitivanja i progiba dobivenog pomoću naprednih metoda koristeći MKE je u prosjeku $w_{test} / w_{MKE} = 1.04$, što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata.

5.2.5 Ispitivanje spojeva ljepilo-drvo kod lijepljenih lameliranih elemenata

Sigurnost drvenih konstrukcija u požaru je važna, ali svojstva ljepila u uvjetima požara nisu u potpunosti istražena. To se posebno odnosi na nove sustave ljepila, ali i na postojeće koji pokazuju slabu nosivost u požaru. Najbolja metoda za procjenu pojave delaminacije u požaru je ispitivanje u velikom mjerilu, ali s obzirom na visoke troškove takvih ispitivanja, potrebno je razviti ispitivanje u malom mjerilu. U ovom poglavlju, ideja je da upravo takva ispitivanja, daju iste rezultate kao eksperimentalni testovi u velikom mjerilu. Ovo eksperimentalno istraživanje uključuje rezultate požarnih ispitivanja lijepljenih spojeva u malom mjerilu kod GLT elemenata. Ispitivanje je organizirano u dva poglavlja na temelju dviju različitih skupina drvenih uzoraka. Zajedničko za oba požarna testa je da su korištene četiri vrste ljepila (303, 314, 501 i 520) u svim vezama. Na osnovu eksperimentalnog istraživanja lijepljenih veza, izdvojena su glavna opažanja:

- Kod ispitivanja nosivosti zupčastoj spoja pri povišenim temperaturama vrijedno je spomenuti da osim vlačnog naprezanja, na zupčaste spojeve u požarnim uvjetima, također utječe i naprezanje uzrokovano savijanjem uzorka. Savijanje nastaje kada se visina poprečnog presjeka smanjuje zbog sagorijevanja drva, odnosno gubitka mase. Mjereno je vrijeme do otkazivanja uzorka (VOU). Najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama pokazali su uzorci s ljepilom tipa K.510 kod kojih se lom dogodio nakon 15 minuta, a najlošije uzorci s ljepilom tipa K. 303 kod kojih se lom desio najranije. Na slici 4.93 prikazana je ovisnost dimenzija preostalog poprečnog presjeka sa vremenom u trenutku otkazivanja uzorka (VOU). Odnosi pokazuju dobru korelaciju.
- Razvoj temperature u uzorcima od tvrdog drva je sporiji, pa je vrijeme zagrijavanja bilo duže. Iako je za pretpostaviti bilo da će se lom uzoraka od tvrdog drva kasnije dogoditi, rezultati pokazuju drugačije, što potvrđuje činjenicu da se lom dogodio po ljepilu, a ne drvu.

Smanjenje kapaciteta nosivosti lijepljenje površine između lamela može se procijeniti zagrijavanjem površine lijepljenja ispod grijača i zatim provođenjem posmičnog testa, odmah nakon izlaganja toplinskom toku. Površina lijepljenja nalazi se neposredno iza pougljenjenog sloja drveta.

- Uočene su razlike između različitih skupina ljepila, ali i između različitih vrsta drva. S obzirom da tvrdo drvo ima značajno veću gustoću, do zapaljenja je došlo kasnije nego kod mekog drva. Samim tim, tvrdo drvo je bilo duže vremena izloženo toplinskom toku.

To se najviše očitivalo kod viših temperatura, gdje su pojedini uzorci tvrdog drva potpuno izgorjeli, pa se nije ni moglo pristupiti posmičnom testu, odnosno nosivost je evidentirana kao nulta. Kod nižih temperatura, posljedica je bila različit mod loma kod nekih skupina ljepila, gdje je kod tvrdog drva mod loma bio kombinirani ljepilo-drvo, a za istu skupinu ljepila, kod mekog drva, mod loma bio je isključivo po ljepilu. Pregled sila loma za odgovarajuće temperature dan je u tablici 4.18.

- Može se zaključiti da sva ljepila imaju vrlo malu čvrstoću kada se temperatura približava 290 °C, što je u skladu s očekivanjima. Najveću nosivost pri temperaturama do 200 °C ima ljepilo tip 510, a najmanju tip 303. Opažanjem i analizom dijagrama ovisnosti sile lome o temperaturi, prikazanoj na slici 4.97, može se zaključiti linearna redukcija posmične čvrstoće ljepila s povećanjem temperature, osim kod ljepila tipa K.510, gdje posmična čvrstoća opada s kvadratom porasta temperature.

5.2.6 Ispitivanje nosivog zida od inovativnih prošupljenih lameliranih drvenih elemenata

Provedeno je požarno ispitivanje zaštićenog nosivog zid od prošupljenih elemenata, u velikom mjerilu. Ovaj sustav se može smatrati manjim pokaznim „mockup-om“ požarnog odjeljka, u kome je istražena dinamika požara. Nosivi zid je bio zaštićen protupožarnim oblogama. Ispitivanje je izvršeno u skladu s normama HRN EN 1363-1:2020 *Ispitivanje otpornosti na požar – 1.dio: Opći zahtjevi*, HRN EN 1365-1:2012+Ispr.1:2013 *Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata - 1. dio: Zidovi*.

U nastavku su dana glavna opažanja:

- Za površine zaštićene protupožarnim oblogama, treba uzeti u obzir da je početak pougljenja odgođen do određenog trenutka (t_{ch}). Prema EN 1995-1-2 [8] pougljenje se može javiti prije odvajanje protupožarne zaštite, ali s nižom brzinom pougljenja od brzina prikazanih u tablici 4.2, sve do trenutka otkazivanja protupožarne zaštite (t_f). Karakteristične faze pougljenja prikazane su na slici 4.113.
- Faze pougljenja ispitanog zida prikazane su na slici 4.114. Nakon odvajanja protupožarne zaštite, brzina pougljenja se povećala ($\beta_{0,Faza3} = 1.3$ mm/min) iznad vrijednosti prikazane u tablici 4.2 ($\beta_0 = 0.65$ mm/min), i to dva puta ($k_g = 2$), i kao takva je održana sve do trenutka t_t , koji predstavlja trenutak kada je dubina pougljenja jednaka dubini pougljenja istog drvenog elementa bez protupožarne zaštite ili 25 mm (manje od dvije vrijednosti). Od tog trenutka nadalje, brzina pougljenja se vraća na iznos prikazan u tablici 4.2.
- EN 1995-1-2 [8] daje smjernice i izraze za izračun vremena početka pougljenja (t_{ch}), odnosno u nekim slučajevima, to je ujedno i vrijeme otkazivanja protupožarne obloge (t_f), gdje je h_p debljina panela. Za obloge koje se sastoje od dva sloja, debljinu h_p treba uzeti kao debljinu vanjskog sloja i 50 % debljine unutarnjeg sloja. Prema tome, za zid opisan u ovom radu, predviđeno vrijeme otkazivanja protupožarnih ploča bi 41.5 minuta, što nije u skladu s rezultatima eksperimenta (51. minuta). Izraz (4.62) daje relativno točne rezultate za određene sustave i debljine protupožarnih obloga. Međutim, to ne uzima u obzir postojanje više od jednog sloja obloga, niti cijeli raspon debljina samih obloga. Konačno, ne uzima se u obzir uzrok otkazivanja protupožarnih panela. Pregledom stanja područja i na osnovu eksperimentalnog ispitivanja, predloženo je korištenje izraza (4.63).

5.3 Doprinos istraživanja

Na temelju opsežnog eksperimentalnog i numeričkog istraživanja ponašanja prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima, doprinos istraživanja može se definirati kroz sljedeće točke:

- Eksperimentalnim istraživanjima i numeričkim analizama unaprijeđene su spoznaje o prirodi ponašanja prošupljenih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima.
- Provedena je parametarska analiza i procjena optimalnog postotka prošupljenosti lameliranih drvenih elemenata, kao i vrste i rasporeda samih šupljina, koje utječu na nosivost i uporabivost GLT elemenata. Parametarskom analizom utvrđen je optimalni omjer prošupljenosti i otpornosti GLT drvenih elemenata.
- Utvrđena je krutost prošupljenih elemenata, te su razvijeni i predloženi analitički izrazi za proračun nosivosti i uporabivosti prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata.
- Provedena su eksperimentalna ispitivanja punih i prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata pri požarnim uvjetima, te su definirane različite mogućnosti aktivne i pasivne zaštite drvenih elemenata od požara, a koje utječu na požarnu otpornost istih.
- Definiran je utjecaj različitih sustava i metoda zaštite drvenih elemenata od požara, na lokalno i globalno ponašanje elemenata prilikom mehaničkog i požarnog opterećenja.
- Razvijen je proračunski model za određivanje dubine pougljenja prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata.
- Predložena je debljina sloja nulte čvrstoće za prošupljene drvene elemente.
- Izrađen je numerički model u svrhu simulacije ponašanja drvenih elemenata u ambijentalnim i požarnim uvjetima, te utjecaja različitih sustava zaštite drvenih elemenata od požara.
- Razvijen je i implementiran novi numerički pristup evaluacije stvaranja pougljenog sloja zasnovan na metodi konačnih elemenata (MKE).
- Procijenjen je utjecaj različitih vrsta ljepila korištenih pri lameliranju, na delaminaciju, i posljedično, na nosivost i požarnu otpornost lijepljeno lameliranih drvenih elemenata. Procijenjen je integritet spojeva za međusobno povezivanje (prošupljenih) lijepljeno lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima.
- Provedeno je požarno ispitivanje zaštićenog nosivog zida sastavljenog od prošupljenih drvenih elemenata, u velikom mjerilu. Procijenjen je utjecaj dinamike požara u požarnom odjeljku na nosivi zid i protupožarnu zaštitu u vidu protupožarnih obloga.

Poglavlje 6. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJE ISTRAŽIVANJE

U doktorskom radu proučavano je ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima.

Glavni zaključci istraživanja u ambijentnim uvjetima sažeti su u poglavlju 6.1, dok su zaključci doneseni na osnovu istraživanja u požarnim uvjetima, objedinjeni u poglavlju 6.2.

Naposljetku, neriješena pitanja i preporuke za daljnje istraživanje, predstavljene su u poglavlju 6.3.

6.1 Ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim uvjetima

Provedeno je eksperimentalno i numeričko istraživanje utjecaja prošupljenja na ponašanje lijepljeno lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim uvjetima. Nadalje, napravljena je parametarska analiza u kojoj je variran broj i raspored rupa u poprečnom presjeku drvenog elementa, geometrijske i materijalne karakteristike lamela, a sve u cilju utvrđivanja optimalnog prošupljenog poprečnog presjeka lijepljenih lameliranih drvenih elemenata.

Na temelju rezultata preliminarnog dijela istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Šupljine utječu na ponašanje lijepljeno lameliranih drvenih elemenata. Granično stanje nosivosti i uporabivosti je dosegnuto ranije, u usporedbi sa standardnim lijepljeno lameliranim drvenim elementima.
- Ljepilo kojim se povezuju lamele, utječe na ponašanje prošupljenih drvenih elemenata. Ukoliko ljepilo nije adekvatne kvalitete, i ukoliko proces nanošenja ljepila nije strogo kontroliran, ljepilo se ne smije koristiti za nosive lijepljeno lamelirane drvene elemente. Ljepilo K.510 može se koristiti za nosive prošupljene lijepljeno lamelirane drvene elemente.
- Ponašanje uzoraka s elipsastim šupljinama, bolje je u odnosa na ponašanje uzoraka sa kružnim šupljinama. Eksperimentalno ispitivanje tlaka okomito na vlakanca pokazalo je kako uzorci s eliptičnim šupljinama mogu podnijeti gotovo dvostruko veću silu u odnosu na uzorke s kružnim šupljinama.

Slijedom navedenih zaključaka, u nastavku rada istraživani su samo uzorci s elipsastim prošupljenjima. Na osnovu eksperimentalnog istraživanja druge serije (poboljšanih) uzoraka, glavni zaključci su:

- Nosivost poboljšanih uzorka od mekog drva, povećana je u prosjeku za 50 % u odnosu na inicijalne uzorke.
- Prošupljeni lijepljeno lamelirani drveni elementi od mekog drva, sa primjenom naizmjeničnog prošupljenja poprečnog presjeka od 28 %, dosegli su 69.65 % nosivosti uzoraka s punim poprečnim presjekom. Prošupljeni lijepljeno lamelirani elementi izrađeni od tvrdog drva, dosegli su u prosjeku 72.63 % nosivosti uzoraka s punim poprečnim presjekom (vidi sliku 3.44a). Ovime je potvrđena druga hipoteza (H2).
- Prijevremeni krti lom po zupčastom spoju kod elemenata od tvrdog drva ukazuje na nekompatibilnost ljepila tipa K.510 i materijala tvrdog drva.
- Kombinacijom različitih debljina lamela, klase drva pojedinih lamela, i u konačnici, rasporeda lamela, mogu se postići pozitivni učinci na deformaciju i/ili naprezanje unutar elemenata. Povećanjem debljine rubnih lamela, može se postići pozitivan učinak u vidu redukcije vertikalnih deformacija i naprezanja u lijepljeno lameliranom drvenom elementu. Povećanjem klase unutarnjih lamela, smanjuje se vertikalna deformacija prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata.
- Prilikom istraživanja tlaka okomito na vlakanca prošupljeni uzorci od tvrdog drva imaju veću nosivost od uzoraka mekog drveta bez rupa, zbog približno tri puta većeg CSPG-a.
- Vrijednosti propisane za koeficijent $k_{c,90}$ u Eurokodu 5 [1] su konzervativne.
- CSPG mekog drva, za prošupljene uzorke opterećene u smjeru jače osi, smanjuje se u prosjeku za 55 %, a u slučaju uzoraka od tvrdog drva, u prosjeku za 50 %.
- Stupanj prošupljenja proporcionalan je CSPG-u bez obzira na vrstu drva. Nadalje, prošupljenost ne utječe na prijenos sile s obzirom na rubne uvjete i položaj opterećenja, tj. koeficijenti $k_{c,90}$ imaju slične vrijednosti za prošupljene i pune lijepljeno lamelirane drvene elemente.
- Eksperimentalna analiza vlaka paralelno s vlakancima pokazala je da je omjer modula elastičnosti paralelno s vlakancima tvrdog i mekog drva 1.63, dok je omjer vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima tvrdog drva u odnosu na čvrstoću mekog drva, 1.92.

- Kapacitet nosivosti površine lijepljenja između 2 lamele paralelno s vlakancima je približno 2 puta veći od kapaciteta nosivosti površine lijepljenja lamela okomito na vlakanca za tvrdo drvo, a čak 3 puta veći za meko drvo.
- Inovativni prošupljeni lijepljeno lamelirani drveni elementi mogu se proračunavati prema teoriji sastavljenih nosača, predloženoj u Eurocodu 5. Poklapanja rezultata dobivenih ručnim proračunom s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja su vrlo dobra.
- Rezultati numeričkog modeliranja metodom konačnih elemenata u programskom paketu ANSYS pokazali su vrlo dobru korelaciju s rezultatima eksperimentalnog ispitivanja.
- U numeričkoj parametarskoj analizi, pokazano je kako raspored šupljina utječe na raspodjelu naprezanja u drvenom elementu. Dokazano je da se uklanjanjem pojedinih redova ili stupaca rupa, javlja pozitivan učinak na raspodjelu naprezanja unutar prošupljenih drvenih elemenata. Korištenjem punih rubnih lamela, bez oslabljenja, utvrđen je pozitivan učinak na cjelokupno ponašanje lijepljeno lameliranih drvenih elemenata. Izbjegavanjem šupljina u svakoj predstojećoj lameli, povećava površina drva između dvije šupljine, ali i smanjuje koncentracija naprezanja, što je u konačnici rezultiralo većom nosivošću elementa. Ako je središnji dio poprečnog presjeka drvenog elementa bez rupa, naprezanje se smanjuje, ali posebnu pozornost treba obratiti na udaljenost rupa od rubova kako ne bi došlo do lokalnog oštećenja drvenog elementa.
- Na osnovu zaključaka navedenih u ovom poglavlju, potvrđena je prva hipoteza (H1)

6.2 Ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u požarnim uvjetima

Provedeno je eksperimentalno i numeričko istraživanje utjecaja šupljina na ponašanje prošupljenih lameliranih drvenih elemenata u požarnim uvjetima. Razmatran je utjecaj različitih sustava protupožarne zaštite, na požarnu otpornost punih i prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata. Glavni zaključci dani su u nastavku:

- Za inicijalno nezaštićene pune lijepljeno lamelirane drvene elemente, izložene požaru s jedne strane, vrijeme otkazivanja bilo je 63 minute za uzorke s ljepilom tip K.501, odnosno 65 minuta za uzorke s ljepilom tipa K.510. Vrsta ljepila (K.501 i K.510) nema značaj utjecaj na požarnu otpornost lameliranih drvenih elemenata.
- Požarna otpornost nezaštićenih prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih uzoraka (postotak prošupljenosti 25 %) izloženih požaru s jedne strane, u prosjeku je manja za 23 % u odnosu na pune uzorke. Ovime je potvrđen prvi dio treće hipoteze (H3).
- Kamena vuna postavljena u šupljine lijepljeno lameliranih drvenih elemenata ima pozitivan utjecaj na požarnu otpornost prošupljenih drvenih elemenata. Požarne otpornost povećana je u prosjeku za 27 % u odnosu na nezaštićene prošupljene drvene elemente.
- Postavljanjem prve (požaru izložene) pune lamele (umjesto lamele s prošupljenjima) vrijeme otkazivanja povećalo se u prosjeku za 20 % u odnosu na maksimalno prošupljene uzorke.
- Aplikiranjem protupožarnog premaza na pune i prošupljene uzorke, požarna otpornost povećavana je za 52 % (33 minute) u slučaju punih uzoraka, odnosno 67 % (33 minute) kod prošupljenih uzorka. Ovime je potvrđen drugi dio treće hipoteze (H3).
- Kod inicijalno nezaštićenih prošupljenih lijepljeno lameliranih elemenata može uočena je pojava delaminacije.
- Postavljanjem prve pune/deblje lamele i/ili protupožarne zaštite, izbjegava se delaminacija lijepljeno lameliranih drvenih elemenata.

Na temelju eksperimentalnog istraživanja i analize drvenih greda izloženih požaru s tri strane, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Prošupljeni uzorci izloženi požaru s tri strane, otkazali su uslijed pojave delaminacije.
- Aplikiranjem protupožarnog premaz i ispune od kamene vune na prošupljene lijepljeno lamelirane drvene grede ostvaren je pozitivan učinak na požarnu otpornost prošupljenih uzoraka. Vrijeme otkazivanja prošupljenih uzoraka bilo je slično vremenu otkazivanja inicijalno nezaštićenih standardnih lijepljeno lameliranih greda.
- Jednodimenzionalna brzina pougljenja lamela mekog drva iznosila je $\beta = 0.69$ mm/min, čime su potvrđene vrijednosti dane u EN 1995-1-2[8]. Višedimenzionalna brzina pougljenja za normalne GLT grede bila je $\beta_n = 0.78$ mm/min, koja je također u skladu s vrijednostima koje propisuje EN 1995-1-2 [8].
- Kod zaštićenih prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih greda (protupožarnim premazom, ispunom od kamene vune), postoje tri različite faze (brzine) pougljenja.

Razvijen je model proračuna dubine pougljenog sloja, te sloja nulte čvrstoće koji je prikladan za sve vrste uzoraka. Model proračuna baziran je na metodi reduciranog poprečnog presjeka danog u EN 1995-1-2 [8]. Na osnovu analize rezultata dobivenih proračunskim modelom, predstavljeni su glavni zaključci:

- U svakoj fazi pougljenja, može se pretpostaviti linearan odnos dubine pougljenja i vremena izloženosti požaru.
- Za normalne (pune) lijepljeno lamelirane drvene elemente, brzina pougljenja (jednodimenzionalna ili višedimenzionalna), te debljina sloja nulte čvrstoće odgovaraju vrijednostima koje propisuje EN 1995-1-2 [8].
- Tijekom druge faze pougljenja prošupljenih elemenata sa kamenom vunom, javlja se pojačano pougljenje vertikalnih stijenki drva između prošupljenja, uslijed dvodimenzionalnog toplinskog toka prouzrokovanog akumulacijom topline u kamenoj vuni. Iz tog razloga, sloj nulte čvrstoće i krutosti (ρ), mora se povećati na 19 milimetara.
- Za drvene površine zaštićene protupožarnim premazom, početak pougljenja odgođen je do trenutka t_{ch} , ali pougljenje je započelo prije gubitka zaštitnih svojstava protupožarnog premaza, ali pri nižoj brzini pougljenja od brzina pougljenja nezaštićenih drvenih površina. S obzirom da se trenutak gubitaka zaštitnih svojstava t_f , ne može eksplicitno odrediti, i trenutno ne postoje jasna pravila za određivanje istog, predložen je pojednostavljeni proračunski model koji definira trenutak početka pougljenja t_{ch} , te trenutak početka konsolidiranog pougljenja t_a , dok se trenutak gubitka zaštitnih svojstava protupožarnog premaza t_f , ne razmatra. Prijedlog modela može se vidjeti na slici 4.28.

Numeričke simulacije mogu pružiti detaljniji uvid u ponašanje prošupljenih lijepljenih lameliranih drvenih elemenata u požarnim uvjetima. Termo-mehanička analiza provedena je u programskom paketu ANSYS, a numeričke simulacije potvrdile su eksperimentalno istraživanje. Razvijen je inovativni numerički pristup evaluacije pougljenog sloja, zasnovan na metodi konačnih elemenata. Na osnovu svega navedenog, dani su glavni zaključci:

- Termalna, i termo-mehanička analiza pokazale su vrlo dobru korelaciju predviđenih i izmjerenih razvijenih temperatura u drvenim elementima koji su bili izloženi standardnom požaru.
- U doktorskom radu razvijen je i implementiran je novi način simulacije pougljenja drva. Utvrđeno je vrlo dobro slaganje između rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem (MKE) i rezultata požarnih ispitivanja. Omjer dubina pougljenja procijenjenih numeričkim modeliranjem ($d_{char,MKE}$), u odnosu na dubine pougljenja izmjerene nakon požarnih ispitivanja ($d_{char,test}$) je 1.05, što ukazuje na vrlo dobru korelaciju rezultata (5 %).
- Inovativni pristup numeričkom modeliranju može se primijeniti na sve vrste drvenih elemenata i poprečnih presjeka. Napravljen je iskorak u numeričkom modeliranju drva u požaru.
- Provedena je simultana termo-mehanička analiza uz dodatak novo-razvijenog pristupa numeričkog određivanja dubine pougljenog sloja. Omjer deformacija kod svih ispitanih uzoraka izmjerenih prilikom požarnog ispitivanja i deformacija dobivenih pomoću naprednih metoda koristeći MKE, u prosjeku je $w_{test} / w_{MKE} = 1.04$.
- Nadalje, procijenjen je utjecaj različitih vrsta ljepila korištenih pri spajanju lamela, te integritet lijepljenih spojeva, u požarnim uvjetima. Na osnovu požarnih ispitivanja u malom mjerilu, može se zaključiti sljedeće:
- Kod ispitivanja nosivosti zupčastoj spoja pri povišenim temperaturama najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama pokazali su uzorci s ljepilom tipa K.510, a najlošije uzorci s ljepilom tipa K.303
- Kod ljepila tipa K.510 čvrstoća se reducira s kvadratom porasta temperature, dok kod ostalih vrsta ispitanih ljepila, čvrstoća opada linearno s porastom temperature. Sve vrste ljepila imaju vrlo malu preostalu posmičnu čvrstoću kada se temperatura približava 290 °C.

Konačno, provedeno je požarno ispitivanje zaštićenog (protupožarnim oblogama) nosivog zida sastavljenog od prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata, u velikom mjerilu. Na osnovu rezultata eksperimentalnog istraživanja, doneseni su glavni zaključci:

- Za površine zaštićene protupožarnim oblogama, treba uzeti u obzir da je početak pougljenja odgođen do određenog trenutka (t_{ch}), koji je definiran vrstom protupožarne zaštite.
- Nakon odvajanja protupožarne zaštite, brzina pougljenja se povećavala na $\beta_{0,Faza3}=1.3$ mm/min, i to dva puta ($k_3 = 2$) u odnosu na brzinu pougljenja prikazanu u tablici 4.2 ($\beta_0 = 0.65$ mm/min). Brzina pougljenja nije se mijenjala sve do trenutka t_a koji predstavlja trenutak kada je dubina pougljenja jednaka dubini pougljenja istog elementa bez protupožarne zaštite, ili 25 mm (manje od dvije vrijednosti). Od tog trenutka nadalje, brzina pougljenja se vratila na vrijednost koja je prikazana u tablici 4.2.
- Rezultati dobiveni proračunskim modelom prema EN 1995-1-2 [8] nisu odgovarali rezultatima požarnog ispitivanja zaštićenog nosivog zida. Izraz za proračun trenutka otkazivanja protupožarnih ploča dan u propisima je konzervativan.
- Na osnovu zaključaka navedenih u ovom poglavlju, potvrđena je prva hipoteza (H1)

6.3 Preporuke za daljnja istraživanja

Na temelju pregleda stanja područja i zaključaka izvedenih iz eksperimentalnih i numeričkih istraživanja u doktorskom radu, formulirana su glavna pitanja koja bi se mogla obraditi u daljnjim istraživanjima:

- Provesti eksperimentalna istraživanja prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata, sa različitim postotkom i rasporedom prošupljenja, sukladno parametarskoj i numeričkoj analizi provedenoj u ovom radu (vidi poglavlja 3.3.2.5 i 3.3.3.5).
- Istražiti ponašanje elemenata, sklopova i spojeva pod dinamičkim uvjetima.
- Ispitati prošupljene drvene elemente sa rubnim lamelama izrađenim od drva više klase, kako bi se odredio utjecaj ove promjene na nosivost prošupljenih lijepljeno lameliranih drvenih elemenata u ambijentnim i požarnim uvjetima.
- Detaljnije proučiti raspodjelu naprezanja i putanje sile DIC metodom mjerenja.
- Eksperimentalno istražiti toplinska svojstva materijala.
- Ispitati nove vrste ljepila i njihovu kompatibilnost za prošupljene drvene elemente izrađene od tvrdog i mekog drva.
- Ispitati ljepila na bazi različitoj od poliuretana (PUR), kako bi se procijenio utjecaj na delaminaciju kod prošupljenih drvenih elemenata u požarnim uvjetima.
- Uskladiti metodologiju ispitivanja interakcije ljepila i drva u ambijentnim i požarnim uvjetima.
- Detaljno istražiti utjecaj cirkulacije zraka u šupljinama lijepljeno lameliranih drvenih elemenata, na ponašanje u požarnim uvjetima.
- Istražiti utjecaj protupožarnih premaza na faze pougljenja, te unificirati pravila proračuna, protupožarnim premazom zaštićenih drvenih elemenata.
- U naprednim proračunskim metodama (MKE), kada se koristi metoda toplinske vodljivosti, postoji li razlika između različitih vrsta drva?
- Istražiti utjecaj gustoće drva na brzinu pougljenja, EC5 pojednostavljeni modeli proračuna ne uzimaju u obzir ovu činjenicu.
- Istražiti utjecaj sadržaja vode u drvu na brzinu pougljenja drva. EC5 pojednostavljeni modeli proračuna ne uzimaju u obzir ovu činjenicu.
- Istražiti ponašanje spojeva drvo-metal u požarnim uvjetima. Osim različitog ponašanja drveta i čelika u požaru, postoji interakcija između njih. Iako postoje jednostavna pravila proračuna, ona su određena potpuno empirijski, ograničeni na (nekolicinu)

požarnih ispitivanja i vrijede samo za simetrične spojeve s 3 elementa (metalne ploče s bočne strane drvenih elemenata).

- Istražiti dinamiku požara u objektu sastavljenom od prošupljenih drvenih elemenata.

1. *Eurocode 5: Design of Timber Structures -- Part 1-1: General -- Common Rules and Rules for Buildings (EN 1995-1-1:2004/A2:2014)*.
2. Buchanan, A.H. Can Timber Buildings Help Reduce Global CO2 Emissions? In *9th World Conference on Timber Engineering 2006, WCTE 2006*; **2006**; Vol. 3.
3. "On the side of nature." Available online : <https://www.moelven.com/news/news-archive2/2019/on-the-side-of-nature> (accessed on June 24, 2022).
4. Kitek Kuzman, M. Drvo Kao Građevni Materijal Budućnosti. *Građevinar*, **2010**, 62, 313–318.
5. Zeleni čuvari planeta pod opsadom - Poslovni dnevnik. Available online : <https://www.poslovni.hr/strane/zeleni-cuvari-planeta-pod-opsadom-188083> (accessed on August 24, 2022).
6. Östman, B.; Schmid, J.; Klippel, M.; Just, A.; Werther, N.; Brandon, D. Fire Design of CLT in Europe. *Wood and Fiber Science*, **2018**, 50, 68–82.
7. Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara. Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_03_29_505.html (accessed on June 27, 2022).
8. Eurocode 5: Design of timber structures -- Part 1-2: General - Structural fire design (EN 1995-1-2:2004/A2:2014): Available online : <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.2.2004.pdf> (accessed on June 27, 2022).
9. Schmid, J.; Klippel, M.; Just, A.; Frangi, A. Comparison of the Fire Resistance of Timber Members in Tests and Calculation Models. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction - Working Commission W18 - Timber Structures*, **2013**, 365–378.
10. Schmid, J.; König, J.; Just, A. The Reduced Cross-Section Method for the Design of Timber Structures Exposed to Fire-Background, Limitations and New Developments. *Structural Engineering International*, **2012**, 22, 514–522.
11. Schmid, J.; Just, A.; Klippel, M.; Fragiaco, M. The Reduced Cross-Section Method for Evaluation of the Fire Resistance of Timber Members: Discussion and Determination of the Zero-Strength Layer. *Fire Technology 2014 51:6*, **2014**, 51, 1285–1309.

12. Kamenická, Z.; Sandanus, J. Comparison of Simplified and Advanced Design Methods for Determining Mechanical Resistance of Timber Structures Exposed to Fire. *International Wood Products Journal*, **2017**, *8*, 88–93.
13. Hietaniemi, J. A Probabilistic Approach to Wood Charring Rate. In *Espoo*; **2005**; pp. 1–54.
14. Mikkola, E. Charring Of Wood Based Materials. *Fire Safety Science*, **1991**, *3*, 547–556.
15. Frangi, P.A. CEN TC 250 SC5 , Progress Report EN 1995-1-2 : 2025. **2020**.
16. Klippel, M.; Frangi, A. Fire Safety of Glued-Laminated Timber Beams in Bending. *Journal of Structural Engineering*, **2017**, *143*, 04017052.
17. Fragiaco, M.; Menis, A.; Clemente, I.; Bochicchio, G.; Ceccotti, A. Fire Resistance of Cross-Laminated Timber Panels Loaded Out of Plane. *Journal of Structural Engineering*, **2012**, *139*, 04013018.
18. Menis, A. *Dottorato in Ingegneria Strutturale Fire Resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) Elements*; Cagliari.
19. Friquin, K.L. Charring Rates of Heavy Timber Structures for Fire Safety Design, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, **2010**.
20. Klippel, M.; Leyder, C.; Frangi, A.; Fontana, M.; Lam, F.; Ceccotti, A. Fire Tests on Loaded Cross-Laminated Timber Wall and Floor Elements. *Fire Safety Science*, **2014**, *11*, 626–639.
21. Frangi, A.; Fontana, M.; Hugli, E.; Jübstl, R. Experimental Analysis of Cross-Laminated Timber Panels in Fire. *Fire Saf J*, **2009**, *44*, 1078–1087.
22. Emberley, R.; Inghelbrecht, A.; Doyle, N.; Torero, J.L. Components and Consequences of Cross-Laminated Timber Delamination. *Fire Science and Technology 2015*, **2017**, 273–279.
23. Su, J.; Lafrance, P.; Hoehler, M.; Bundy, M. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests. *National Research Council of Canada*, **2018**, 396.
24. Morrisset, D.; Hadden, R.M.; Bartlett, A.I.; Law, A.; Emberley, R. Time Dependent Contribution of Char Oxidation and Flame Heat Feedback on the Mass Loss Rate of Timber. *Fire Saf J*, **2021**, *120*, 103058.
25. Crielaard, R.; van de Kuilen, J.W.; Terwel, K.; Ravenshorst, G.; Steenbakkens, P. Self-Extinguishment of Cross-Laminated Timber. *Fire Saf J*, **2019**, *105*, 244–260.

26. Thi, V.D.; Khelifa, M.; el Ganaoui, M.; Rogaume, Y. Modelling of Heat Transfer in Timber Exposed to Fire. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*; **2016**.
27. Okuni, I.M.; Bradford, T.E. Modelling of Elevated Temperature Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber: An Application of ANSYS Mechanical 2020 R1 Structural Analysis Software. *Environmental Sciences Proceedings*, **2020**, 3, 46.
28. Silva, R. Direct Coupled Thermal-Structural Analysis in ANSYS WorkBench. *ESSS Conference and Ansys Users Meeting*, **2013**.
29. Aseeva, R.; Serkov, B.; Sivenkov, A. *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*; Springer Series in Wood Science; Springer Netherlands: Dordrecht, **2014**.
30. Luxhome. Available online : <https://www.luxhome.at/> (accessed on December 11, 2021).
31. ECOCELL. Available online : <https://ecocell.ch/en/us-building-system> (accessed on December 11, 2021).
32. Fabric Workshop - Mass Timber Solutions. Available online : <https://www.fabricws.com/building-solution> (accessed on December 11, 2022).
33. Brikawood | Kits maisons bois passives écologiques, brique en bois écologique, maison BBC.?. Available online : <https://www.brikawood-ecologie.fr/> (accessed on December 11, 2022).
34. GABLOK-Insulated formwork block for self-build project. Available online : <https://gablok.be/en/> (accessed on December 11, 2022).
35. STEKO® Building Systems | Everybody Wins with Smart Construction. Available online : <https://www.stekosouthamerica.com> (accessed on December 11, 2022).
36. Building fire. Available online : https://www.chinadaily.com.cn/photo/2013-12/16/content_17176617_2.htm (accessed on August 30, 2022).
37. How safe from fire are high rise buildings? | KCRW. Available online : <https://www.kcrw.com/culture/shows/design-and-architecture/how-safe-from-fire-are-high-rise-buildings> (accessed on August 29, 2022).
38. Benković, D.; Todorovski, Đ.; Peretin, S. Sprečavanje Pojave i Širenja Požara Na Informatičkoj Opremi. *Sigurnost : časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini*, **2019**, 61, 133–144.

39. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o gradnji. Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_04_39_802.html (accessed on August 29, 2022).
40. Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara. Available online : https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_03_29_505.html (accessed on August 29, 2022).
41. HRN EN 13501-1:2010 / Hrvatski normativni dokument / HRN4You - Hrvatski zavod za norme. Available online : <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+13501-1%3A2010> (accessed on August 29, 2022).
42. Morrisset, D.; Hadden, R.M.; Bartlett, A.I.; Law, A.; Emberley, R. Time Dependent Contribution of Char Oxidation and Flame Heat Feedback on the Mass Loss Rate of Timber. *Fire Saf J*, **2021**, *120*, 103058.
43. Rackauskaite, E.; Kotsovinos, P.; Barber, D. Letter to the Editor: Design Fires for Open-Plan Buildings with Exposed Mass-Timber Ceiling. *Fire Technol*, **2021**, *57*, 487–495.
44. Fire Sprinkler System for Industries And Warehouses. Available online : <https://www.indiamart.com/proddetail/fire-sprinkler-system-for-industries-and-warehouses-20246994488.html> (accessed on August 29, 2022).
45. Sauerbier, P.; Mayer, A.K.; Emmerich, L.; Militz, H. Fire Retardant Treatment of Wood – State of the Art and Future Perspectives. *Wood & Fire Safety*, **2020**, 97–102.
46. Sredstvo za zaštitu od požara za drvo: tehničke karakteristike, potrošnja. Available online : <https://hr.puntomariner.com/fire-retardant-for-wood-technical> (accessed on August 29, 2022).
47. Permatex - Wood Fire Protection. Available online : <http://permatextr.com/fire-retardant-for-wood-organic.html> (accessed on August 29, 2022).
48. Zaštita drvenih konstrukcija od požara. Available online : <https://webgradnja.hr/clanci/zastita-drvenih-konstrukcija-od-pozara/4140> (accessed on August 29, 2022).
49. Jeleč, M.; Varevac, D.; Rajčić, V. Križno Lamelirano Drvo (CLT) - Pregled Stanja Područja. *Građevinar*, **2018**, *70*, 75–95.

-
50. Cross Laminated Timber. Available online : <https://technologyinarchitecture.com/cross-laminated-timber/> (accessed on September 9, 2021).
 51. Bedon, C.; Chifliganec, C.; Džolev, I.; Pečenko, R.; Hozjan, T. Numerical Modelling of Timber Concrete Composite Structures in Fire, COST Action FP 1404-Guidance Document, **2018**.
 52. Pečenko, R. Mechanical Response of Curved Timber Beams with Variable Height under Fire Conditions, Doctoral thesis, Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Slovenia, **2013**.
 53. Werther, N.; O, J.W.; Spellman, P.M.; Abu, A.K.; Moss, P.J.; Buchanan, A.H.; Winter, S. Parametric Study of Modelling Structural Timber in Fire with Different Software Packages. In *Proceedings of the 7 th International Conference on Structures in Fire*; Fontana, M.; Frangi, A.; Knobloch, M., Eds.; Zurich, **2012**.
 54. O, J.W.; Abu, A.K.; Carradine, D.M.; Moss, P.J.; Buchanan, A.H. Modelling the Fire Performance of Structural Timber Floors. In *Proceedings of the 7 th International Conference on Structures in Fire*; Fontana, M.; Frangi, A.; Knobloch, M., Eds.; Zurich, **2012**.
 55. Regueira, R.; Guaita, M. Numerical Simulation of the Fire Behaviour of Timber Dovetail Connections. *Fire Saf J*, **2018**, *96*, 1–12.
 56. Tran, T.T.; Khelifa, M.; Nadjai, A.; Oudjene, M.; Rogaume, Y. Modelling of Fire Performance of Cross Laminated Timber (CLT) Panels. *J Phys Conf Ser*, **2018**, *1107*.
 57. Szász, A.; Hlavička, V.; Lublőy, É.; Biró, A. Numerical Modelling of the Fire Resistance of Double Sheared Steel-to-Timber Connections. *Journal of Building Engineering*, **2021**, *37*.
 58. O'Neill, J.W.; Abu, A.K.; Abu, A.K.; Carradine, D.M.; Moss, P.J.; Buchanan, A.H. Predicting the Fire Performance of Structural Timber Floors. *8th International Conference on Structures in Fire*, **2014**.
 59. Palma, P.; Frangi, A. Modelling the Fire Resistance of Steel-to-Timber Dowelled Connections Loaded Perpendicularly to the Grain. *Fire Saf J*, **2019**, *107*, 54–74.
 60. Audebert, M.; Dhima, D.; Bouchair, A. Proposal for a New Formula to Predict the Fire Resistance of Timber Connections. *Eng Struct*, **2020**, *204*.
 61. Naser, M.Z. Fire Resistance Evaluation through Artificial Intelligence - A Case for Timber Structures. *Fire Saf J*, **2019**, *105*, 1–18.

-
62. Racher, P.; Laplanche, K.; Dhima, D.; Bouchaïr, A. Thermo-Mechanical Analysis of the Fire Performance of Dowelled Timber Connection. *Eng Struct*, **2010**, *32*, 1148–1157.
 63. Erchinger, C.; Frangi, A.; Fontana, M. Fire Design of Steel-to-Timber Dowelled Connections. *Eng Struct*, **2010**, *32*, 580–589.
 64. Twomey, B. The Performance and Behavior of Lightweight Wood Exposed to Fire Conditions, Master Theses, Worcester Polytechnic Institute, **2007**.
 65. König, J. *Fire Exposed Simply Supported Wooden I-Joists in Floor Assemblies*; SP Swedish National Testing and Research Institute, Stockholm, Sweden, **2006**.
 66. Frangi, A.; König, J. Effect of Increased Charring on the Narrow Side of Rectangular Timber Cross-Sections Exposed to Fire on Three or Four Sides. *Fire Mater*, **2011**, *35*, 593–605.
 67. EN 408:2012 : Timber structures -- Structural timber and glued laminated timber -- Determination of some physical and mechanical properties. Available online : <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6ffae6c9-5eaf-4c84-8bf3-5132cbfc563c/en-408-2010a1-2012> (accessed on July 2, 2022).
 68. *EN 384:2016: Structural Timber-Determination of Characteristic Values of Mechanical Properties and Density*; **2016**.
 69. BS EN 14358:2006 Timber structures - calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample (Withdrawn), British Standards Institution - Publication Index | NBS. Available online : <https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=BSI&DocID=312113> (accessed on September 11, 2022).
 70. EN 14080:2013 - Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements. Available online : <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/f5a36e99-021d-44cb-8dec-9e41df42d7a5/en-14080-2013> (accessed on January 7, 2022).
 71. DIN EN 15497 - European Standards. Available online : <https://www.en-standard.eu/din-en-15497-structural-finger-jointed-solid-timber-performance-requirements-and-minimum-production-requirements/> (accessed on September 11, 2022).
 72. EN 14358:2016 - Timber structures - Calculation and verification of characteristic values. Available online :
-

- <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/189a6762-f939-452e-acac-37940c4b421b/en-14358-2016> (accessed on September 29, 2022).
73. Bather, M. Guide to Statistics in the Eurocodes for Timber Engineers, Master Theses, University of Liverpool, UK, **2021**.
 74. Ravenshorst, G.J.P. Species Independent Strength Grading of Structural Timber. In *Proceedings of the 7th International Scientific Conference On Hardwood Processing*; **2015**.
 75. Sciomenta, M.; Bedon, C.; Fragiaco, M.; Luongo, A. Shear Performance Assessment of Timber Log-House Walls under In-Plane Lateral Loads via Numerical and Analytical Modelling. *Buildings*, **2018**, *8*, 99.
 76. Leijten, A.J.M.; Larsen, H.J.; van der Put, T.A.C.M. Structural Design for Compression Strength Perpendicular to the Grain of Timber Beams. *Constr Build Mater*, **2010**, *24*, 252–257.
 77. Madsen, B.; Leijten, A.J.M.; Gehri, E.; Mischler, A.; Jorissen, A.J.M. *Behaviour of Timber Connections*; Vancouver Ltd: Vancouver, **2000**.
 78. Blass, H.J.; Görlacher, I.R. Compression Perpendicular to the Grain. In *In the Proceedings of the 8th World Conference of Timber Engineering*; Finnish Association of Civil Engineers RIL: Lathi, Finland, **2004**; pp. 435–440.
 79. Roh Werkst, H.; C M van der Put, T.A. Derivation of the Bearing Strength Perpendicular to the Grain of Locally Loaded Timber Blocks. *Holz als Roh- und Werkstoff 2008 66:6*, **2008**, *66*, 409–417.
 80. Pozgaj, A.; Chovanec, D.; Kurjatko, S.; Babiak, M. *Struktúra a Vlastnosti Dreva; Priroda*: Bratislava, Slovak Republic, **1993**.
 81. Tabarsa, T.; Chui, Y.H. Characterizing Microscopic Behaviour of Wood in Radial Compression. Part 2: Effect of Species and Loading Direction. *Wood and Fiber Science*, **2001**, *33*, 223–232.
 82. Kretschmann, D.E. *Influence of Juvenile Wood Content on Shear Parallel, Compression, and Tension Transverse to Grain Strength and Mode I Fracture Toughness for Loblolly Pine*; **2008**; Vol. 647.
 83. Hoffmeyer, P.; Damkilde, L.; Pedersen, T.N. Structural Timber and Glulam in Compression Perpendicular to Grain. *Holz als Roh- und Werkstoff 2000 58:1*, **2000**, *58*, 73–80.

-
84. Gehri, E. Timber in Compression Perpendicular to the Grain. In *Proceedings of the International Conference of IUFRO S5.02 Timber Engineering*; Copenhagen, Denmark, **1997**; pp. 16–17.
 85. Verbist, M.; Branco, J.M.; Nunes, L. Characterization of the Mechanical Performance in Compression Perpendicular to the Grain of Insect-Deteriorated Timber. *Buildings*, **2020**, *10*, 14.
 86. Bodig, J.; Jayne, B.A. *Mechanics of Wood and Wood Composites*; Van Nostrand Reinhold Company Inc: New York, USA, **1982**.
 87. Dinwoodie, J.M. *Timber : Its Nature and Behavior*; E & FN Spon: New York, USA, **2000**.
 88. Kunesh, R.H. *Strength and Elastic Properties of Wood in Transverse Compression*; Forest Prod J, **1968**.
 89. Madsen, B.; Hooley, R.F.; Hall, C.P. A Design Method for Bearing Stresses in Wood. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **2011**, *9*, 338–349.
 90. Leijten, A.J.M. The Bearing Strength Capacity Prediction by Eurocode 5 and Other Potential Design Code Models. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016)*; Vienna University of Technology: Vienna, Austria, **2016**; pp. 1–8.
 91. Leijten, A.J.M.; Jorissen, A.J.M.; de Leijer, B.J.C. The Local Bearing Capacity Perpendicular to Grain of Structural Timber Elements. *Constr Build Mater*, **2012**, *27*, 54–59.
 92. Brandner, R.; Schickhofer, G. Properties of Cross Laminated Timber (CLT) in Compression Perpendicular to Grain. In *Proceedings of the International Network on Timber Engineering Research (INTER)*; **2014**; pp. 1–13.
 93. Gasparri, E.; Lam, F.; Liu, Y. Compression Perpendicular to Grain Behavior for the Design of a Prefabricated CLT Façade Horizontal Joint. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*; Vienna University of Technology: Vienna, Austria, **2016**.
 94. Brandner, R. Cross Laminated Timber (CLT) in Compression Perpendicular to Plane: Testing, Properties, Design and Recommendations for Harmonizing Design Provisions for Structural Timber Products. *Eng Struct*, **2018**, *171*, 944–960.
 95. Serrano, E.; Enquist, B. Compression Strength Perpendicular to Grain in Cross-Laminated Timber (CLT). In *Proceedings of the World Conference on Timber*

- Engineering (WCTE 2010), Trentino, Italy*; Trees and Timber Institute, National Research Council: Trentino, **2010**; pp. 1–8.
96. Franzoni, L.; Lebée, A.; Lyon, F.; Forêt, G. Elastic Behavior of Cross Laminated Timber and Timber Panels with Regular Gaps: Thick-Plate Modeling and Experimental Validation. *Eng Struct*, **2017**, *141*, 402–416.
 97. Tian, Z.; Gong, Y.; Xu, J.; Li, M.; Wang, Z.; Ren, H. Predicting the Average Compression Strength of CLT by Using the Average Density or Compressive Strength of Lamina. *Forests*, **2022**, *13*, 591.
 98. Kollmann, F.F.P.; Côté, W.A. *Principles of Wood Science and Technology*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, **1968**.
 99. Brol, J.; Kubica, J.; Weglorz, M. The Problem of Compressive Strength in Direction Perpendicular to the Grains on Example of Tests of the Load-Bearing Capacity of the Continuously Supported Timber-Frame Sill Plates. *Materials* **2020**, *Vol. 13*, Page 1160, **2020**, *13*, 1160.
 100. Basta, C.T.; Gupta, R.; Leichti, R.J.; Sinha, A. Characterizing Perpendicular-to-Grain Compression (C) Behavior in Wood Construction. *Holzforschung*, **2011**, *65*, 845–853.
 101. Kathem, A.; Tajdar, H.; Arman, K. Compression Perpendicular to Grain in Timber—Bearing Strength for a Sill Plate, Master Thesis, Linnaeus University, Vaxyo, Sweden, **2014**.
 102. Leijten, A.J.M.; Jorissen, A.J.M. Global Test Standards and Code Design Rules for Compressive Strength Perpendicular to Grain. In *Proceedings of the World Conference of Timber Engineering (WCTE 2010), Trento, Italy*; CNR-IVALSA: Trento, Italy, **2010**.
 103. Kleiberit. Available online : https://www.kleiberit.com/fileadmin/Content/Documents/EN/Info_Sheets/510_Tragender_Holzbau_GB_US.pdf (accessed on June 13, 2022).
 104. Structural Analysis Software | Dlubal. Available online : <https://www.dlubal.com/en> (accessed on August 31, 2022).
 105. RSECTION: Section Properties and Stress Analysis | Dlubal Software. Available online : <https://www.dlubal.com/en/products/cross-section-properties-software/rsection> (accessed on August 31, 2022).
 106. Kohan, N.; Via, B.K.; Taylor, S. A Comparison of Geometry Effect on Tensile Testing of Wood Strands. *For Prod J*, **2012**, *62*, 167–170.

-
107. CEN. *EN 13183-2:2008, Moisture Content of a Piece of Sawn Timber - Part 2: Estimation by Electrical Resistance Method*; **2008**.
 108. Steiger, R.; Gehri, E.; Richter, K.; Steiger, R.; Richter Empa, · K; Gehri, E. Quality Control of Glulam: Shear Testing of Bondlines. *Eur. J. Wood Prod*, **2010**, *68*, 243–256.
 109. Li, R.; Xu, W.; Fang, L.; Cao, P.; Guo, X. Non-Standard Test Method for Glue Line Shear Strength. *Materials Science*, **2017**, *65*, 825–830.
 110. Li, R.; Xu, W.; Lu, F.; Cao, P.; Guo, X.; Ekevad, M. Non-Standard Test Method for Glue Line Shear Strength. *Wood research*, **2017**, *62*, 825–830.
 111. Abaqus SIMULIA | nonlinear Finite Element Analysis (FEA) software. Available online : <https://www.4realsim.com/abaqus/> (accessed on June 15, 2022).
 112. Turnbull, A.; Crocker, L.E. *Four Point Bend Testing – Finite Element Analysis of the Stress and Strain Distribution*; **2014**.
 113. Jordaan, J. Four-Point Bending Fatigue Test Specimen Design by FEA. *R&D Journal*, **2018**, *34*, 1–8.
 114. Khorsandnia, N.; Valipour, H.; Crews, K. Structural Response of Timber-Concrete Composite Beams Predicted by Finite Element Models and Manual Calculations. *Advances in Structural Engineering*, **2014**, *17*, 1601–1621.
 115. Kawecki, B.; Podgórski, J. 3D Abaqus Simulation of Bent Softwood Elements. *Archives of Civil Engineering*, **2020**, *66*, 323–337.
 116. Herranen, H.; Pabut, O.; Eerme, M.; Majak, J.; Pohlak, M.; Kers, J.; Saarna, M.; Allikas, G.; Aruniit, A. Design and Testing of Sandwich Structures with Different Core Materials. *Material Science*, **2012**, *18*, 45–50.
 117. Souliman, M.I. Preliminary Finite Element Modeling of Asphalt Material Using ANSYS. *Civil Engineering Beyond Limits*, **2021**, *2*, 21–27.
 118. Baño, V.; Arriaga, F.; Soilán, A.; Guaita, M. Prediction of Bending Load Capacity of Timber Beams Using a Finite Element Method Simulation of Knots and Grain Deviation. *Biosyst Eng*, **2011**, *109*, 241–249.
 119. Zhang, J.; Xu, Q. feng; Xu, Y. xiang; Zhang, M. Research on Residual Bending Capacities of Used Wood Members Based on the Correlation between Non-Destructive Testing Results and the Mechanical Properties of Wood. *Journal of Zhejiang University: Science A*, **2015**, *16*, 541–550.

-
120. Ansys Contact Types and Explanations - Mechead.com. Available online : <https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/> (accessed on August 29, 2022).
 121. HRN EN 1990:2011 / Hrvatski normativni dokument / HRN4You - Hrvatski zavod za norme. Available online : <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1990%3A2011> (accessed on August 29, 2022).
 122. Sandhaas, C.; Blaß, H.J.; Sandhaas, C. *Timber Engineering Principles for Design for Safety*; KIT Scientific Publishing, **2017**.
 123. Broughton, J.G.; Hutchinson, A.R. Adhesive Systems for Structural Connections in Timber. *Int J Adhes Adhes*, **2001**, *21*, 177–186.
 124. EN 16351:2021 - Timber structures - Cross laminated timber - Requirements. Available online : <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/3f9c8502-609e-4592-9cc2-219dc2ff3720/en-16351-2021> (accessed on June 23, 2022).
 125. Zelinka, S.L.; Sullivan, K.; Pei, S.; Ottum, N.; Bechle, N.J.; Rammer, D.R.; Hasburgh, L.E. Small Scale Tests on the Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber (CLT) at Elevated Temperatures. *Int J Adhes Adhes*, **2019**, *95*.
 126. Emberley, R.; Torero Cullen, J. Cross-Laminated Timber Failure Modes for Fire Conditions. In *Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015)*; School of Civil Engineering, The University of Queensland: Brisbane, QLD, Australia, **2015**; pp. 1023–1030.
 127. Schmidt, L. Experimental Study on the Effect of Char Fall off on the Heat Transfer within Loaded CLT Columns Exposed to Radiant Heating, Master Thesis, The University of Edinburgh, College of Science and Engineering, **2020**.
 128. Kucíková, L.; Janda, T.; Šejnoha, M.; Sýkora, J. Experimental Investigation of Fire Resistance of Glt Beams. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, **2020**, *8*, 99–110.
 129. Johansson, E.; Svenningsson, A. *Delamination of Cross-Laminated Timber and Its Impact on Fire Development Focusing on Different Types of Adhesives*; Lund, Sweden, **2018**.
 130. Čolić, A. Study of the Char Fall-off Phenomenon in Cross-Laminated Timber under Fire Conditions, Master's Thesis, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK, **2021**.

131. Richter, K.; Steiger, R. Thermal Stability of Wood-Wood and Wood-FRP Bonding with Polyurethane and Epoxy Adhesives. *Adv Eng Mater*, **2005**, *7*, 419–426.
132. Clauß, S.; Joscak, M.; Niemz, P. Thermal Stability of Glued Wood Joints Measured by Shear Tests. *European Journal of Wood and Wood Products 2010 69:1*, **2010**, *69*, 101–111.
133. Zelinka, S.L.; Sullivan, K.; Pei, S.; Ottum, N.; Bechle, N.J.; Rammer, D.R.; Hasburgh, L.E. Small Scale Tests on the Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber (CLT) at Elevated Temperatures. *Int J Adhes Adhes*, **2019**, *95*.
134. Fahrni, R.; Klippel, M.; Just, A.; Ollino, A.; Frangi, A. Fire Tests on Glued-Laminated Timber Beams with Specific Local Material Properties. *Fire Saf J*, **2019**, *107*, 161–169.
135. König, J. Structural Fire Design According to Eurocode 5—Design Rules and Their Background. *Fire Mater*, **2005**, *29*, 147–163.
136. Schaffer, E.L. Charring Rate of Selected Woods--Transverse to Grain. **1967**.
137. Frangi, A.; Fontana, M. Charring Rates and Temperature Profiles of Wood Sections. *Fire Mater*, **2003**, *27*, 91–102.
138. König, J. Fire Resistance of Timber Joists and Load Bearing Wall Frames. **1994**.
139. König, J.; Walleij, L. Timber Frame Assemblies Exposed to Standard and Parametric Fires: Part 2: A Design Model for Standard Fire Exposure. *Rapport - Institutet för Träteknisk Forskning*, **2000**.
140. König, J.; Norén, J.; Olesen, F.; Hansen, F. Timber Frame Assemblies Exposed to Standard and Parametric Fires: Part 1, Fire Tests. *undefined*, **1997**.
141. Frangi, A.; Fontana, M. Thermal Expansion Of Wood And Timber-Concrete Composite Members Under Iso-Fire Exposure. *Fire Safety Science*, **2003**, *7*, 1111–1122.
142. EN 13381-7:2019 - Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural. Available online : <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/4d52d75a-658e-4b7b-aebf-99b546b7a20a/en-13381-7-2019> (accessed on July 2, 2022).
143. Waliszewska, B.; Mleczek, M.; Zborowska, M.; Goliński, P.; Rutkowski, P.; Szentner, K. Changes in the Chemical Composition and the Structure of Cellulose and Lignin in Elm Wood Exposed to Various Forms of Arsenic. *Cellulose*, **2019**, *26*, 6303–6315.

144. Mania, P.; Wróblewski, M.; Wójciak, A.; Roszyk, E.; Moliński, W. Hardness of Densified Wood in Relation to Changed Chemical Composition. *Forests*, **2020**, *11*, 506.
145. Faleeva, J.M.; Sinelshchikov, V.A.; Sytchev, G.A.; Zaichenko, V.M. Exothermic Effect during Torrefaction. *J Phys Conf Ser*, **2018**, *946*, 012033.
146. Carpita, N.C.; McCann, M.C. Redesigning Plant Cell Walls for the Biomass-Based Bioeconomy. *Journal of Biological Chemistry*, **2020**, *295*, 15144–15157.
147. Yang, H.; Yan, R.; Chen, H.; Lee, D.H.; Zheng, C. Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. *Fuel*, **2007**, *86*, 1781–1788.
148. Machová, D.; Oberle, A.; Zárbynická, L.; Dohnal, J.; Šeda, V.; Dömény, J.; Vacenovská, V.; Kloiber, M.; Pěňčík, J.; Tippner, J.; Čermák, P. Surface Characteristics of One-Sided Charred Beech Wood. *Polymers (Basel)*, **2021**, *13*, 1551.
149. Fonseca, E.M.M.; Barreira, L.M.S. Charring Rate Determination Of Wood Pine Submitted To High Temperatures. *WIT Transactions on The Built Environment*, **2009**, *108*, 449–457.
150. Lange, D.; Boström, L.; Schmid, J.; Albrektsson, J. The Reduced Cross Section Method Applied to Glulam Timber Exposed to Non-Standard Fire Curves. *Fire Technol*, **2015**, *51*, 1311–1340.
151. Drevostavba požiar - Anton Osvald. Available online : <https://www.knihomol.sk/ucebnice-slovniky/ostatne/drevostavba-poziar> (accessed on September 25, 2022).
152. Structural Fire Design: Wood - E.L. Schaffer - Google Books. Available online : https://books.google.ee/books/about/Structural_Fire_Design.html?id=8Q5pvwEACAAJ&redir_esc=y (accessed on September 25, 2022).
153. Ferreira, J.; Gernay, T.; Franssen, J.; Vassant, O. Discussion on a Systematic Approach to Validation of Software for Structures in Fire. In *Proceedings of the 10th Int. Conf. Struct. Fire*; Belfast, **2018**.
154. Naser, M.Z. Properties and Material Models for Modern Construction Materials at Elevated Temperatures. *Comput Mater Sci*, **2019**, *160*, 16–29.
155. Zhang, J.; Xu, Q.F.; Xu, Y.X.; Wang, B.; Shang, J.X. A Numerical Study on Fire Endurance of Wood Beams Exposed to Three-Side Fire. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A 2012 13:7*, **2012**, *13*, 491–505.

-
156. Molina, J.C.; Junior, C.C.; Kimura, E.F.A.; Pinto, E.M.; Regobello, R. Análise Numérica Do Comportamento de Elementos de Madeira Em Situação de Incêndio. *Floresta e Ambiente*, **2012**, *19*, 162–170.
 157. Couto, D.L.P.; Fonseca, E.M.M.; Piloto, P.A.G.; Meireles, J.M.; Barreira, L.M.S.; Ferreira, D.R.S.M. Perforated Cellular Wooden Slabs under Fire: Numerical and Experimental Approaches. *Journal of Building Engineering*, **2016**, *8*, 218–224.
 158. Dúbravská, K.; Špilák, D.; Tereňová, L.; Štefková, J. Charring Layer on a Cross-Laminated Timber Panel Construction. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, **2019**, *61*, 109–119.
 159. Yoon, S.; Macphee, D.E.; Imbabi, M.S. Estimation of the Thermal Properties of Hardened Cement Paste on the Basis of Guarded Heat Flow Meter Measurements. *Thermochim Acta*, **2014**, *588*, 1–10.
 160. Janssens, M.L.; White, R.H. Short Communication: Temperature Profiles in Wood Members Exposed to Fire. *Fire Mater*, **1994**, *18*, 263–265.
 161. Mehaffey, J.R.; Cuerrier, P.; Carisse, G. A Model for Predicting Heat Transfer through Gypsum-Board/Wood-Stud Walls Exposed to Fire. *Fire Mater*, **1994**, *18*, 297–305.
 162. Fuller, J.J.; Leichti, R.J.; White, R.H. Temperature Distribution in a Nailed Gypsum-Stud Joint Exposed to Fire. *Fire Mater*, **1992**, *16*, 95–99.
 163. Frangi, Andrea. Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken. *IBK Bericht*, **2001**, *269*, 240.
 164. Knudson, R.; Schniewind, A. Performance of Structural Wood Members Exposed to Fire. *Materials Science*, **1975**.
 165. Rasbash, D.J. Charring of Wood in Building Fires: Practice, Theory, Instrumentation Measurements. *Fire Saf J*, **1983**, *5*, 171–172.
 166. Gammon, W.B. *Reliability Analysis of Wood-Frame Wall Assemblies Exposed to Fire*; **1987**.
 167. König, J. Timber Frame Assemblies Exposed to Standard and Parametric Fires. Part 2 A Design Model for Standard Fire Exposure. **2000**.
 168. Špilák, D.; Majlingová, A.; Kačíková, D.; Tischler, P. Determining the Charred Layer of Wooden Beams with Finite Element Analysis Based on Enthalpy Approach. *Buildings 2022, Vol. 12, Page 875*, **2022**, *12*, 875.

-
169. Peng, L.; Hadjisophocleus, G.; Mehaffey, J.; Mohammad, M. Predicting the Fire Resistance of Wood-Steel-Wood Timber Connections. *Fire Technol*, **2011**, *47*, 1101–1119.
 170. Bedon, C.; Fragiacom, M. Fire Resistance of In-Plane Compressed Log-House Timber Walls with Partial Thermal Insulation. *Buildings*, **2018**, *8*, 131.
 171. Bedon, C.; Fragiacom, M. Experimental and Numerical Analysis of In-Plane Compressed Unprotected Log-Haus Timber Walls in Fire Conditions. *Fire Saf J*, **2019**, *107*, 89–103.
 172. Cachim, P.B.; Franssen, J.M. Numerical Modelling of Timber Connections under Fire Loading Using a Component Model. *Fire Saf J*, **2009**, *44*, 840–853.
 173. Frangi, A.; Erchinger, C.; Fontana, M. Charring Model for Timber Frame Floor Assemblies with Void Cavities. *Fire Saf J*, **2008**, *43*, 551–564.
 174. Martinez-Martinez, J.E.; Alonso-Martinez, M.; Rabanal, F.P.A.; del Coz Diaz, J.J. Study of the Influence of Heat Transfer of a CLT Beam through FEM. *J Phys Conf Ser*, **2018**, *1107*, 032003.
 175. Introduction to Fourier's Law | Ansys Innovation Courses. Available online : <https://courses.ansys.com/index.php/courses/learn-physics-structural-mechanics-heat-transfer-copy/lessons/lesson-1-introduction-to-fouriers-law-2/> (accessed on September 25, 2022).
 176. Thermal Contact Conductance | Ansys Innovation Courses. Available online : <https://courses.ansys.com/index.php/courses/learn-physics-structural-mechanics-heat-transfer-copy/lessons/thermal-contact-lesson-3/> (accessed on September 25, 2022).
 177. Specific Heat of Materials | Ansys Innovation Courses. Available online : <https://courses.ansys.com/index.php/courses/thermal-capacitance-in-heat-transfer/lessons/lesson-2-specific-heat-of-materials/> (accessed on September 25, 2022).
 178. Suntharalingam, T.; Upasiri, I.; Nagaratnam, B.; Poologanathan, K.; Gatheeshgar, P.; Tsavdaridis, K.D.; Nuwanthika, D. Finite Element Modelling to Predict the Fire Performance of Bio-Inspired 3D-Printed Concrete Wall Panels Exposed to Realistic Fire. *Buildings*, **2022**, *12*, 111.
 179. Bergheau, J.-Michel.; Fortunier, Roland. *Finite Element Simulation of Heat Transfer*; ISTE Ltd., **2008**.

-
180. PROMADUR® - Promat. Available online :
<https://www.promat.com/en/construction/products-systems/products/intumescent-paints/promadur/> (accessed on July 2, 2022).
181. EN 1363-1:2020 - Fire resistance tests - Part 1: General requirements. Available online : <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/243adbdc-e0e0-43aca801-22c8e91e7f3c/en-1363-1-2020> (accessed on June 23, 2022).
182. HRN EN 1365-3:2002 / Hrvatski normativni dokument / HRN4You - Hrvatski zavod za norme. Available online :
<https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1365-3%3A2002> (accessed on September 13, 2022).
183. Ansys Mechanical | Structural FEA Analysis Software. Available online :
<https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical> (accessed on October 19, 2022).
184. Firepanel A1 | James Hardie Europe GmbH. Available online :
<https://www.fermacell.com/en/products/fibre-gypsum/firepanel-a1> (accessed on September 14, 2022).
185. HRN EN 1365-1:2012 / Hrvatski normativni dokument / HRN4You - Hrvatski zavod za norme. Available online :
<https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1365-1%3A2012> (accessed on September 14, 2022).

Nikola Perković rođen je 1991. godine u Livnu u Bosni i Hercegovini gdje je pohađao osnovnu školu, a zatim i gimnaziju koju je završio 2010. godine. Iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij, a zatim diplomski sveučilišni studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, koji završava u lipnju 2015. godine stekavši diplomu s najvećom pohvalom na smjeru Konstrukcije.

Iste godine zaposlen je u KFK d.o.o., kao projektant metalnih i staklenih konstrukcija, gdje se zadržava dvije godine. Od veljače 2017. godine zaposlen je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao asistent na Zavodu za konstrukcije. Aktivno sudjeluje u pripremi i održavanju nastave iz kolegija Uvod u konstruktorsko inženjerstvo, Drvene konstrukcije I, Lagane konstrukcije, te povremeno Betonske i zidane konstrukcije I na preddiplomskom studiju, te kolegija Drvene konstrukcije II i povremeno Betonske i zidane konstrukcije II na diplomskom studiju.

Također, aktivno sudjeluje u izradi stručnih projekata.

U prosincu 2017. godine upisuje poslijediplomski sveučilišni doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje započinje svoj istraživački rad na smjeru Inženjerske konstrukcije. Paralelno s doktorskim studijem, upisuje i poslijediplomski specijalistički studij – Požarno inženjerstvo.

Kao aktivni član i suradnik sudjelovao je na HRZZ istraživačkom projektu VETROLIGNUM : Prototype of Multipurpose Timber - Structural Glass Composite Panel (HRZZ IP-2016-06-3811), zatim projektima sveučilišne potpore "Ocjena indeksa pouzdanosti saniranih i ojačanih konstrukcija", na međunarodnom Horizon 2020 projektu "INCEPTION" i proHolz projektu "Comprehensive Transformation of the Region with Wooden Constructions (Master Class).

Suradnik je na nacionalnom HRZZ uspostavnom istraživačkom projektu ARES: Assessment and rehabilitation of existing structures - Development of contemporary methods for masonry and timber structures (UIP-2019-04-3749).

Suradnik je na IRI projektu (Novi proizvodi i usluge kao rezultat djelatnosti istraživanja, razvoja i inovacija) pod nazivom „Razvoj modularne kuće primjenom inovativnih drvenih elemenata“ (KK.01.2.1.02.)

Kao član, sudjelovao je u radu europskih COST akcija "FP1402": Design of Timber-concrete-composite systems", zatim COST akcija "TU1403": Adaptive Facades". Trenutno sudjeluje u radu COST akcije "CCA18120: Reliable roadmap for certification of bonded

primary structures" te u radu nove COST akcije "CA20139 – Holistic design of taller timber buildings“.

Kao autor i koautor objavio je 29 znanstvenih radova, od čega je devet radova objavljeno u časopisima indeksiranim u WoSCC (SCI-EXPANDED) bazi, tri u ostalim časopisima, dva rada u zborniku skupa domaće konferencije, pet cjelovitih radova s recenzijom objavljena u zbornicima skupova međunarodnih konferencija, dva cjelovita rada s recenzijom objavljena u zbornicima skupova domaćih konferencija, osam proširenih sažetaka s recenzijom objavljena u zbornicima skupova međunarodnih konferencija i jedno poglavlje u knjizi. Sudjelovao je i kao komentor u više od pet ocijenskih radova.

RADOVI U ČASOPISIMA – znanstveni i pregledni radovi**a) Web of Science Core Collection (WoSCC), Science Citation Index Expanded**

- Bedon, C., Rajčić, V., Barbalić, J. & Perković, N. (2022) CZM-based FE numerical study on pull-out performance of adhesive bonded-in-rod (BiR) joints for timber structures. *Structures*, 2022, 46, 471-491 <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.084>
- Perković, N.; Barbalić, J.; Rajčić, V.; Duvnjak, I. Compressive Strength Properties Perpendicular to the Grain of Hollow Glue-Laminated Timber Elements. *Polymers* 2022, 14, 3403. <https://doi.org/10.3390/polym14163403>
- Perković, N.; Rajčić, V. Mechanical and Fire Performance of Innovative Hollow Glue-Laminated Timber Beams. *Polymers* 2022, 14, 3381. <https://doi.org/10.3390/polym14163381>
- Rajčić, V.; Perković, N.; Damjanović, D.; Barbalić, J. Influence of Friction on the Behavior and Performance of Prefabricated Timber–Bearing Glass Composite Systems. *Sustainability* 2022, 14, 1102. <https://doi.org/10.3390/su14031102>
- Perković, N.; Rajčić, V.; Pranjić, M. Behavioral Assessment and Evaluation of Innovative Hollow Glue-Laminated Timber Elements. *Materials* 2021, 14, 6911. <https://doi.org/10.3390/ma14226911>
- Perković, N.; Stepinac, M.; Rajčić, V.; Barbalić, J. Assessment of Timber Roof Structures before and after Earthquakes. *Buildings* 2021, 11, 528. <https://doi.org/10.3390/buildings11110528>
- Perković, N.; Rajčić, V.; Barbalić, J. Analytical and Numerical Verification of Vibration Design in Timber Concrete Composite Floors. *Forests* 2021, 12, 707. <https://doi.org/10.3390/f12060707>
- Rajčić, V.; Perković, N.; Bedon, C.; Barbalić, J.; Žarnić, R. Thermal and Energy-Efficiency Assessment of Hybrid CLT–glass Façade Elements. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3071. <https://doi.org/10.3390/app10093071>

a) Ostali

- Perković, N.; Rajčić, V.; Bedon, C.; Barbalić, J.; Žarnić, R. Basis of Guidelines for Structural Design and Thermal Assessment of Buildings with Hybrid CLT-Glass Elements. // *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, 4 (2020), 1; 97-113 doi:10.3844/sgamrsp.2020.97.113

- Perković, N.; Rajčić, V.; Barbalić, J.; Žarnić, R. Građevinsko-fizikalne osobine kompozitnog sustava drvo–nosivo staklo. // KGH klimatizacija grejanje hlađenje, 48 (2019), 4; 367-373
- Perković, N.; Rajčić, V.; Barbalić, J. Experimental and Numerical Analysis of Continuously Coupling Timber-Lightweight EPS Concrete Composite System. // International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research, 5 (2021), 14-28 doi:10.3844/sgamrsp.2021.14.28 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

KNJIGE I POGLAVLJA U KNJIGAMA

- Stepinac, M.; Rajčić, V.; Barbalić, J.; Perković, N. Metode pregleda i ocjena stanja drvenih konstrukcija. // Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada / Uroš, Mario; Todorčić, Mario; Crnogorac, Milan; Atalić, Josip; Šavor Novak, Marta; Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2021. str. 331-335

ZNANSTVENI RADOVI U ZBORNICIMA SKUPOVA

- Rajčić, V.; Barbalić, J.; Perković, N. Seismic and Energy Renovation of Masonry or RC Framed Buildings with Timber or Composite Timber Panels. // 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering - 1CroCEE Conference Proceedings / Lakušić, Stjepan ; Atalić, Josip (ur.). Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2021. str. 731-742 doi:10.5592/CO/1CroCEE.2021.103 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Rajčić, V.; Barbalić, J.; Perković, N. Tehnički muzej Nikola Tesla u Zagrebu - tehnike snimanja i dokumentiranja za zaštitu, održavanje i nove AR i VR sadržaje. // SABOR HRVATSKIH GRADITELJA 2021 - Zbornik radova / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Tiskara Zelina d.d., 2021. str. 255-266 doi:10.14256/8SHG.2021. (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Perković, N.; Rajčić, V.; Bedon, C.; Barbalić, J. Load-bearing composite timber - glass wall prototype in fire conditions. // ASFE'21 Proceedings, Ljubljana, 2021. 77, 6 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Stepinac, M.; Rajčić, V.; Barbalić, J.; Perković, N.; Lulić, L.; Jockwer, R. Assessment and rehabilitation of existing structures - The ARES project. // Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2021, WCTE 2021 Santiago, Čile, 2021. 174133, 2 (ostalo, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

- Rajčić, V.; Bedon, C.; Barbalić, J.; Perković, N. The Numerical Analysis and Experimental Verification on the Thermal Performance of Hybrid Cross-Laminated Timber (CLT) - Glass Facade Elements. // Challenging Glass 7 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass 2020 Conference Proceedings / Belis, Jan ; Bos, Freek ; Louter, Christian (ur.). Delft: TU Delft Open, 2020. 4459, 12 doi:10.7480/cgc.7.4459 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Barbalić, J.; Rajčić, V.; Zarnić, R.; Perković, N. Behaviour of Cyclic Loaded Joint Made With Glued- in Rod in Corner of CLT Frame. // International Network on Timber Engineering Research - INTER: Proceedings of Meeting Fifty-Two / Görlacher, R. (ur.). Karlsruhe, Njemačka: Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen, 2019. str. 517-519 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- Perković, N.; Rajčić, V. Utjecaj trenja na ponašanje i rad predgotovljenih kompozitnih sustava drvo – nosivo staklo. // 4. Simpozij doktorskog studija građevinarstva / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb, Hrvatska: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2018. str. 79-90 doi:10.5592/co/phdsym.2018.08 (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

SAŽECI SA SKUPOVA

- Perković, N.; Rajčić, V. Influence of elevated temperature on glued-steel rods for CLT elements. // CertBond Cost Action CA18120 Trst, Italija, 2021. (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
- Rajčić, V.; Barbalić, J.; Perković, N. Višenamjenski hibridni panel CLT - nosivo staklo. // Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva 2020, Zagreb, Republika Hrvatska, 2020. (predavanje, pp prezentacija, ostalo)
- Perković, N.; Rajčić, V. Energy Evaluation of CLT - Laminated Glass Composite. // Research in Sustainable Environments Glasgow, 2019. str. 1-4 (predavanje, međunarodna recenzija, prošireni sažetak, znanstveni)
- Rajčić, V.; Žarnić, R.; Perković, N.; Barbalić, J. Optimisation Test Study of Connections and Joints Between Elements of the Hybrid Timber- Structural Glass Panel. // World Construction Forum 2019: Buildings and Infrastructure Resilience - Book of Abstracts with Programme / Mikoš, Matjaž ; Bezak, Nejc (ur.). Ljubljana,

Slovenija: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, 2019. str. 82-82 (predavanje, mednarodna recenzija, prošireni sažetak, znanstveni)

- Rajčič, V.; Perković, N.; Žarnić, R.; Barbalić, J. Energy Efficiency of CLT Frame with Laminated Glass Infill. // World Construction Forum 2019: Buildings and Infrastructure Resilience - Book of Abstracts with Programme / Mikoš, Matjaž ; Bezak, Nejc (ur.). Ljubljana, Slovenija: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, 2019. str. 50-50 (predavanje, mednarodna recenzija, prošireni sažetak, znanstveni)
- Perković, N.; Rajčič, V. Numerical modelling and finite element analysis of friction in prefabricated wood – bearing glass composite systems. // Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019) PhD Symposium, Rovinj: RILEM Publications S.A.R.L, 2019. str. 47-48 (predavanje, domaća recenzija, prošireni sažetak, znanstveni)
- Rajčič, V.; Žarnić, R.; Perković, N.; Barbalić, J. Numerical Models for Verification of Bearing Capacity of the Hybrid Timber-Structural Glass Panel. // World Construction Forum 2019: Buildings and Infrastructure Resilience - Book of Abstracts with Programme / Mikoš, Matjaž ; Bezak, Nejc (ur.). Ljubljana, Slovenija: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, 2019. str. 83-83 (predavanje, mednarodna recenzija, prošireni sažetak, znanstveni)