

Ispitivanje kompozitnog panela na savijanje s ciljem utvrđivanja svojstva prionjivosti obloge i jezgre panela

Lukačević, Lazar

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:720162>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Lazar Lukačević

**Ispitivanje kompozitnog panela na savijanje s ciljem
utvrđivanja svojstva prionjivosti obloge i jezgre panela**

**Testing of composite panel on bending to determine adhesive
properties of panel cover and core**

Diplomski rad

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij građevinarstva
Konstrukcije
Lagane konstrukcije**

**Lazar Lukačević
JMBAG: 0114030112**

**Ispitivanje kompozitnog panela na savijanje s ciljem utvrđivanja
svojstva prionjivosti obloge i jezgre panela**

**Testing of composite panel on bending to determine adhesive
properties of panel cover and core**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2021.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Nosive konstrukcije

Tema diplomskog rada

**ISPITIVANJE KOMPOZITNOG PANELA NA SAVIJANJE S CILJEM UTVRĐIVANJA SVOJSTVA
PRIONJIVOSTI OBLOGE I JEZGRE PANELA**

**TESTING OF COMPOSITE PANEL ON BENDING TO DETERMINE ADHESIVE PROPERTIES OF
PANEL COVER AND CORE**

Kandidat: **LAZAR LUKAČEVIĆ**

Kolegij: **LAGANE KONSTRUKCIJE**

Diplomski rad broj: **K-2021-4**

Zadatak:

Provesti istraživanje kompozitnih panela te njihovu primjenu u građevinarstvu. Opisati materijale koji se koriste za izradu obloge i jezgre panela, te principe ostvarivanja kontakata između obloge i jezgre. Potrebno je provesti eksperimentalno istraživanje u Laboratoriju za konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci na kompozitnom panelu koji se sastoji od obloge izvedene od vatrootpornih gips-vlaknastih ploča te ispune od polimerne pjene. Pripremiti i provesti testove savijanjem primjenom američkih normi ASTM C393/C393M. Testom savijanja uzoraka utvrditi svojstva prionjivosti između obloge i polimerne pjene, te odrediti savojna i posmična svojstva obložnih elemenata i polimerne pjene. Za mjerenja pomaka i deformacija na uzorku koristiti LVDT mjernu opremu te GOM sustav za 3D beskontaktna optička mjerenja.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.

Komentorica:

doc. dr. sc. Nina Čeh,
mag. ing. aedif.

Mentorica:

doc. dr. sc. Paulina Krolo,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Diplomski rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i komentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Lazar Lukačević

U Rijeci, 2. rujna 2021.

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenih projekata

Predgotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način **(IRI2)**

Voditelj projekta TEHNOPLAST PROFILI d.o.o.

Suradnici na projektu: PALIJAN d.o.o., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

Šifra projekta KK.01.2.1.02

Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

Investigation of behavior of composite panel components with integrated steel core **(ZIP UNIRI)**

Voditelj projekta Doc.dr.sc. Paulina Krolo

Šifra projekta ZIP-UNIRI-1500-2-20

Financijer projekta Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić

Šifra projekta RC.2.2.06-0001

Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 2. rujna 2021.

Mentorica:

Zahvala

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc.dr.sc. Paulini Krolo te komentorici doc.dr.sc Nini Čeh na pruženom mentorstvu, pomoći, savjetima, prenesenom znanju i strpljenju prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Također, želim se zahvaliti i svim profesorima te asistentima Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci na prenesenom znanju iz raznih područja građevinarstva.

I na kraju, zahvaljujem se svojoj curi te svim prijateljima i svojoj obitelji na podršci i razumijevanju.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu dan je osnovni pregled teorije sendvič panela s naglaskom na ponašanje takvih konstrukcija i njihovu efikasnost. Analitička rješenja za normalna i posmična naprezanja te deformacije također su obrađena. Opisani su mehanizmi sloma, a jedan od njih je i glavni fokus rada. Cilj je eksperimentalno ispitati prionjivost između komponenti sendvič panela koji je izrađen od Fermacell Firepanel A1 gips-vlaknastih ploča i poliuretanske (PUR) pjene, koristeći Američku normu ASTM C393/C393M. Normom su pokrivena i nestandardna ispitivanja za uzorke posebnih dimenzija, a prionjivost se ispituje savijanjem uzorka u tri ili četiri točke. Za praćenje ispitivanja uz LVDT uređaje, primijenjena su i 3D optička mjerenja s dvije ARAMIS 12M kamere. Kako se za modeliranje sendvič panela uvelike koriste simulacije metodom konačnih elemenata, u radu je napravljena simulacija za jedan uzorak u dva slučaja, u programskom paketu Straus7, koja je uspoređena s rezultatima ispitivanja.

Ključne riječi: sendvič paneli, mehanizmi sloma, prionjivost, kompoziti, FEM, 3D optička mjerenja, eksperimentalno istraživanje, numerička analiza

ABSTRACT

This master thesis gives a basic overview of the theory of sandwich panels with an emphasis on the behavior and efficiency of such structures. Analytical solutions for normal and shear stresses and deformations are also given. The failure modes are described, and one of them is the main objective of the work. The aim is to experimentally test the adhesion between the components of a sandwich panel made of Fermacell Firepanel A1 gypsum fiberboard and polyurethane (PUR) foam, using the American standard ASTM C393 / C393M. The standard also covers non-standard tests for samples of special dimensions, and adhesion is tested by three- or four-point bending tests. Each test was monitored with LVDT devices and 3D optical measurements with two ARAMIS 12M cameras. As finite element simulations are widely used for modeling sandwich panels, the simulation for one sample in two cases is made with Straus7 FEA software and is compared with the test results.

Keywords: sandwich panels, failure modes, adhesion, composites, FEM, 3D optical measurements, experimental research, numerical analysis

SADRŽAJ

1. UVOD.....	7
2. KOMPOZITNI SENDVIČ PANELI.....	8
2.1. Materijali u sendvič panelima.....	10
2.1.1. Materijali za oblaganje panela.....	10
2.1.2. Materijali za ispunu panela.....	17
2.2. Ponašanje nosivih sendvič panela.....	22
2.2.1. Normalna i posmična naprezanja	23
2.2.2. Deformacije	29
2.2.3. Mehanizmi sloma kompozitnih nosivih panela.....	33
2.3. Prionjivost kompozitnih sendvič panela.....	38
3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE PRIONJIVOSTI KOMPOZITNIH PANELA	39
3.1. Komponente ispitivanog kompozitnog panela	39
3.1.1. Obložne ploče	39
3.1.2. Jezgra.....	41
3.2. Ispitivanje svojstava prionjivosti između komponenata kompozitnog panela	43
3.2.1. Određivanje dimenzija uzorka.....	43
3.2.2. Preliminarni proračun raspona nanesenih sila na uzorak	46
3.2.3. Postavljanje sustava za ispitivanje.....	49
3.2.4. Oprema za mjerenje pomaka uzoraka	50
3.2.5. ispitivanje prionjivosti polimerne pjene i obložnih ploča – savijanje panela	53
3.2.6. Rezultati ispitivanja prionjivosti – savijanje panela.....	57
4. NUMERIČKA ANALIZA SENDVIČ PANELA	74
4.1. Metode pristupa modeliranju sendvič panela	76
4.2. Numerička analiza sendvič panela.....	78
4.2.1. 1. Slučaj: jezgra – bi-linearni dijagram (slika 3.3)	80
4.2.1. 2. Slučaj: jezgra – realni dijagram T45-SV (slika 3.2).....	81

4.3. Usporedba rezultata FE modela i laboratorijskih ispitivanja.....	83
5. ZAKLJUČAK.....	85
6. LITERATURA.....	86

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Tipični sendvič panel	8
Slika 2.2 Poprečni presjeci a) lista irisa, b) skije i c) karbonskog sendvič panela sa saćastom jezgrom	8
Slika 2.3 Ekonomičnija varijanta sendvič konstrukcija.....	9
Slika 2.4 Tipovi čeličnih limova: a) čelični, b) nehrđajući čelik, c) hladno oblikovani čelik	11
Slika 2.5 a) Aluminijski lim i b) kompozitni aluminijski panel	11
Slika 2.6 Gips-kartonske ploče a) standard, b) crvena	13
Slika 2.7 Gips-vlaknaste ploče a) Fermacell gips-vlaknasta ploča, b) Fermacell Firepanel A1	13
Slika 2.8 OSB a) ploča, b) raspored iverja	14
Slika 2.9 Smjerovi postavljanja vlakana.....	15
Slika 2.10 Tipovi polimera ojačanih a) karbonskim vlaknima, b) staklenim vlaknima.....	15
Slika 2.11 a) Oblici poprečnog presjeka, b) CFS profili u nosivim zidovima	17
Slika 2.12 CFS profili u pregradnim zidovima	17
Slika 2.13 Topla valjini profili a) poprečni presjeci, b) uporaba u visokogradnji.....	18
Slika 2.14 Hibridni sustav zidnog panela (5)	18
Slika 2.15 instalacija poliuretanske (PUR) pjene	19
Slika 2.16 a) Ploča poliuretanske pjene, b) instalacija poliuretanskog spreja.....	20
Slika 2.17 a),b) prikaz EPS ploča.....	20
Slika 2.18 a) XPS ploča, b) instalacija XPS ploče	21
Slika 2.19 poprečni presjek nosivog sendvič panela	22
Slika 2.20 Vrijednosti za statički moment površine	26
Slika 2.21 raspodjela naprezanja po visini poprečnog presjeka	28
Slika 2.22 Raspodjela naprezanja po visini poprečnog presjeka s aproksimacijom iz izraza 2.1	28

Slika 2.23 Raspodjela naprezanja po visini poprečnog presjeka s aproksimacijom iz izraza 2.1 i 2.2.....	28
Slika 2.24 Prikaz ukupnih deformacija sendvič konzole (8).....	29
Slika 2.25 prikaz statičkog sustava i materijala sendvič panela.....	31
Slika 2.26 mehanizmi sloma kompozitnog panela (6)	33
Slika 2.27 Prikaz oblika sloma globalnog izbočivanja i posmičnog gužvanja.....	35
Slika 2.28 Mapa mehanizama sloma kompozitnog panela (6).....	37
Slika 2.29 Sendvič panel s adhezivnim slojevima (14).....	38
Slika 3.1 Dijagram momenta savijanja za ispitivanje savijanjem u tri točke.....	40
Slika 3.2 Dijagrami sila-pomak ispitanih uzoraka na tlak.....	41
Slika 3.3 Elasto-plastični dijagram tlačne čvrstoće.....	42
Slika 3.4 Prikaz izmjerenih vrijednosti dimenzija uzorka (mjere u cm).....	43
Slika 3.5 Momentni dijagram sustava	46
Slika 3.6 dijagram poprečnih sila na sustavu	47
Slika 3.7 Potrebne dimenzije raspona oslonaca i nanesenog opterećenja	48
Slika 3.8 Sustav oslanjanja uzorka i prijenos opterećenja.....	49
Slika 3.9 Prikaz mjernih urađaja a) OMEGA LD320-5, b) OMEGA LD320-25	50
Slika 3.10 Prikaz pozicija LVDT mjernih uređaja, a) frontalni pogled, b) bočni pogled ...	51
Slika 3.11 ARAMIS 12M optički mjerni sustav	51
Slika 3.12 Farbanje uzorka.....	52
Slika 3.13 Prikaz pozicija crno-bijelih točaka	52
Slika 3.14 Prikaz dobro ofarbanog uzorka	52
Slika 3.15 Prikaz pukotine na uzorku P3-Fp2-45.....	53
Slika 3.16 Prikaz uzorka P3-Fp2-45 prije početka ispitivanja	53
Slika 3.17 Prikaz slomljenog uzorka P3-Fp2-45.....	54
Slika 3.18 Prikaz sloma uzorka P3-Fp2-45 i kartonskog umetka.....	54

Slika 3.19 Prikaz uzorka P2-Fp2-45 prije ispitivanja.....	55
Slika 3.20 Prikaz sloma uzorka P2-Fp2-45	56
Slika 3.21 Prikaz pukotine a) prije i b) nakon sloma uzorka P2-Fp2-45.....	56
Slika 3.22 Dijagram pomaka uzorka P3-Fp2-45	57
Slika 3.23 Pomaci izmjereni u GOM correlate 2020 softveru	58
Slika 3.24 Pomaci uzorka P3-Fp2-45 - optičko mjerenje.....	58
Slika 3.25 Dijagram sila [N] - pomak [mm].....	60
Slika 3.26 Dijagrami poprečnih sila uzorka te od jedinične sile na sredini raspona	61
Slika 3.27 Dijagrami momenata savijanja uzorka te od jedinične sile na sredini raspona..	62
Slika 3.28 Dijagram pomaka uzorka P2-Fp2-45 – LVDT	64
Slika 3.29 Pomaci izmjereni u GOM correlate 2020 softveru	65
Slika 3.30 Pomaci uzorka P2-Fp2-45 - optičko mjerenje.....	65
Slika 3.31 Dijagram sila [N] - pomak [mm].....	66
Slika 3.32 Dijagrami unutarnjih sila od opterećenja	68
Slika 3.33 Dijagrami unutarnjih sila od doprinosa prepusta	69
Slika 3.34 Konačni dijagrami unutarnjih sila	70
Slika 3.35 Dijagram sila [N] - pomak [mm] - usporedba.....	73
Slika 4.1 Primjer korištenja pločastih elementa za model HEB profila (24)	75
Slika 4.2 Primjer dobro postavljene mreže (24)	75
Slika 4.3 Primjer modeliranja a) solidnim elementima, b) solidnim i pločastim elementima	77
Slika 4.4 Plohe simetrije za modeliranje četvrtine uzorka	78
Slika 4.5 Prikaz FEM modela sendvič panela	78
Slika 4.6 Prikaz prijenosa reakcije na točkaste kontakte.....	79
Slika 4.7 Progibi FE modela uzorka P3-Fp2-45 – bi-linearni dijagram.....	80
Slika 4.8 Normalna naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – bi-linearni dijagram	80

Slika 4.9 Posmična naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – bi-linearni dijagram.....	81
Slika 4.10 Progibi FE modela uzorka P3-Fp2-45 – realni dijagram	81
Slika 4.11 Normalna naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – realni dijagram	82
Slika 4.12 Posmična naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – realni dijagram	82
Slika 4.13 Usporedba rezultata ispitivanja i FE modela.....	84

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Mehanička svojstva čeličnih limova (1) (4) (5).....	11
Tablica 2.2 Mehanička svojstva aluminijskih limova	12
Tablica 2.3 karakteristične vrijednosti mehaničkih i fizikalnih svojstava gips-vlaknastih ploča (6).....	14
Tablica 2.4 Mehanička svojstva OSB ploča (7)	15
Tablica 2.5 Mehanička svojstva vlaknima ojačanih polimera (1) (8)	16
Tablica 2.6 Mehanička svojstva poliuretanskih ploča (10).....	20
Tablica 2.7 Mehanička i fizikalna svojstava ekspaniranog polistirena (11).....	21
Tablica 2.8 Mehanička i fizikalna svojstava ekstrudiranog polistirena (12).....	21
Tablica 2.9 Učinkovitost sendvič konstrukcija (14).....	23
Tablica 2.10 omjer članova izraza momenta inercije u izrazu ekvivalente krutosti.....	25
Tablica 3.1 Vrsta obložnih ploča u uzorcima za ispitivanje.....	39
Tablica 3.2 mehanička i fizikalna svojstva Fermacell Firepanel A1 gips-vlaknaste ploče (6)	40
Tablica 3.3 Otpornost na savijanje iz ispitivanja Fermacell Firepanel A1 ploče	40
Tablica 3.4 Srednje maksimalne vrijednosti sile i naprezanje.....	42
Tablica 3.5 Srednje vrijednosti izmjerenih dimenzija uzoraka	44
Tablica 3.6 Dimenzije uzorka P3-Fp2-45	57
Tablica 3.7 Dodatna težina na uzorku P3-Fp2-45	59
Tablica 3.8 Ukupna sila na uzorak P3-Fp2-45	59
Tablica 3.9 Proračunate vrijednosti naprezanja i progiba prema ASTM C393/C393M (15)	63
Tablica 3.10 Dimenzije uzorka P2-Fp2-45.....	64
Tablica 3.11 Dodatna težina na uzorku P2-Fp2-45	66
Tablica 3.12 Ukupna sila na uzorak P2-Fp2-45	66
Tablica 3.13 Pomaci ispod sila s udjelom prenesene sile.....	66

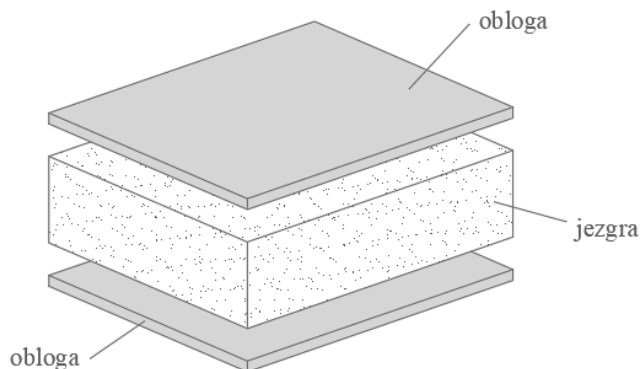
Tablica 3.14 Vrijednosti sila na uzorku P2-Fp2-45 lijevo i desno	67
Tablica 3.15 Maksimalne vrijednosti poprečne sile i momenta savijanja.....	69
Tablica 3.16 Proračunate vrijednosti naprezanja i progiba prema ASTM C393/C393M (9)	71
Tablica 3.17 Usporedba rezultata naprezanja.....	72
Tablica 3.18 Usporedba rezultata progiba	72
Tablica 4.1 Usporedba rezultata iz ispitivanja i numeričke analize	83

1. UVOD

Sendvič paneli se prvi put spominju u radovima Duleaua, 1820. godine [1]. Naziv za ovakve konstrukcije proizlazi iz jela koje se sastoji od dvije šnite kruha između kojih se nalazi namaz, povrće i sl., a također se naziva sendvič [1]. Prva ozbiljna upotreba sendvič panela došla je tek 110 godina kasnije zbog nestašice materijala uzrokovanom Prvim svjetskim ratom, a riječ je o avionu „Mosquito“. Avion je bio izgrađen od furnira između kojih je korišteno balza drvo [2]. 1950-ih i 1960-ih godina nastaju prvi teoretski radovi i istraživanja sendvič panela s analitičkim rješenjima. U isto vrijeme nastaju i novi materijali poput polivinil klorida (PVC) i poliuretana (PUR) te novi oblici saćaste i rešetkaste ispune sendvič panela. U zadnjih 20 godina teoretsko istraživanje preusmjereno je u optimizaciju kompozita, koristeći se analizama pomoću konačnih elemenata za rješavanje svih problema. Rezultat toga su jako rijetka istraživanja u teoretskom i analitičkom smislu pretežito zbog kompliciranosti izvedbe precizniji rješenja diferencijalnih jednadžbi. Iako su pretpostavke, koje su potrebne za analitičko rješavanje problema sendvič panela često zanemarive, analize pomoću metode konačnih elemenata ih nemaju, stoga mogu dati i precizniju analizu. Istraživanja koja se provode u zadnja dva desetljeća bave se najčešće otpornošću na udar, zamorom i mehanizmima sloma sendvič panela [1]. Ovim diplomskim radom provedeno je eksperimentalno istraživanje prionjivosti između komponenti sendvič panela te osnovni pregled teorije sendvič panela.

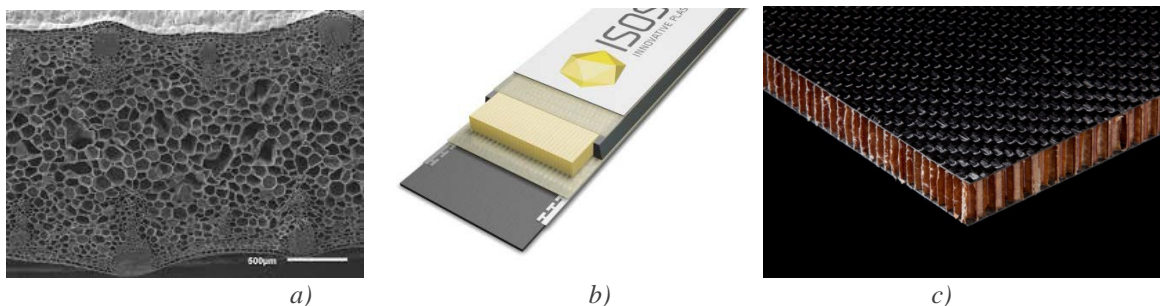
2. KOMPOZITNI SENDVIČ PANELI

Sendvič konstrukcija je visoko učinkovita kompozitna konstrukcija s velikom nosivosti u odnosu na vlastitu težinu, što se ostvaruje uporabom laganih materijala male gustoće ili učinkovitih oblika na mjestu jezgre, obloženom materijalima velike gustoće i nosivosti.



Slika 2.1 Tipični sendvič panel

Nosive panelne sustave izvedene od sendvič panela možemo pronaći u avionskoj industriji, industriji brodova, prirodi, skijama (Slika 2.2.b), svemirskim letjelicama te u građevinarstvu. Kao što je poznato razni oblici pronađeni u prirodi koriste se u arhitekturi kao što je latica lotusa, spiralna školjka i sl. Takvim pristupom razmatranja na razini mikrostrukture može se doći i do oblika sendvič konstrukcija, primjerice u listu biljke iris (Slika 2.2.a) čiji poprečni presjek na mikroskopu podsjeća na sendvič panel sa tankim licima veće gustoće i jezgrom male gustoće što je i tipični poprečni presjek ovih konstrukcija. Još jedan zanimljivi oblik preuzet iz prirode su saće, pa tako i u sendvič panelima postoje jezgre u obliku saća koje daju najbolju nosivost za najmanju težinu. Takav oblik sendvič konstrukcija koristi se za izradu svemirskih letjelica (Slika 2.2.c). Vanjska nosiva obloga može biti izrađena od karbonskih, staklenih i sličnih vlakana, čeličnih i aluminijskih limova, raznih kompozita te drvenih ploča.



Slika 2.2 Poprečni presjeci a) lista irisa, b) skije i c) karbonskog sendvič panela sa saćastom jezgrom

Zbog sve veće potrebe za energetski učinkovitom, brzom i ekonomičnom gradnjom, sendvič konstrukcijama pridaje se sve više pažnje kao i njihovom istraživanju. Tako se u građevinarstvu kod primjene u stambenim objektima nastoji jezgru istovremeno učiniti i toplinskom izolacijom kako bi poboljšali energetsku učinkovitost te samu kvalitetu života. U tom slučaju skupocjeni materijali zamjenjuju se ekonomičnijim rješenjima i materijalima koji imaju širu primjenu poput OSB ploča i gips vlaknastih ploča, a jezgre su jednostavnog poprečnog presjeka načinjene od poliuretanske (PUR) pjene ili ploča ekspaniranog i ekstrudiranog polistirena (EPS i XPS).



Slika 2.3 Ekonomičnija varijanta sendvič konstrukcija

Bilo da je riječ o skupocjenim, prirodnim ili komercijalnim sendvič panelima, da bi se oni ponašali kao jedna spregnuta konstrukcija potrebno je zadovoljiti dobro prianjanje između jezgre i vanjskih obloga sendvič panela. Iz aspekta panelne montažne gradnje vrlo bitna karakteristika sendvič panela je njihov proces proizvodnje u tvornici s velikom razinom kvalitete te dopremanje na gradilište s velikom razinom pretgotovljenosti. Panelnim načinom gradnje uvelike se smanjuje trajanje radova na gradilištu, a time i štedi vrijeme te resursi što ne čudi da su ovakvi sustavi sve traženiji.

2.1. Materijali u sendvič panelima

Kao što je u prošlom poglavlju spomenuto paneli se sastoje od obložnih ploča i jezgre, stoga možemo podijeliti materijale za izgradnju sendvič panela na materijale za oblaganje i materijale za ispunu panela. Izbor materijala za izradu sendvič panela sve je prostraniji zahvaljujući pojavi novih materijala poput vlaknima ojačanih kompozita i recikliranih materijala. Odabir materijala diktirati će dimenzije panela te njihova primjena, potrebne optimalne debljine komponenti i završna obrada, mehanička otpornost, energetska učinkovitost, proizvodni proces, cijena te u zadnje vrijeme vrlo naznačena ekološka održivost.

2.1.1. Materijali za oblaganje panela

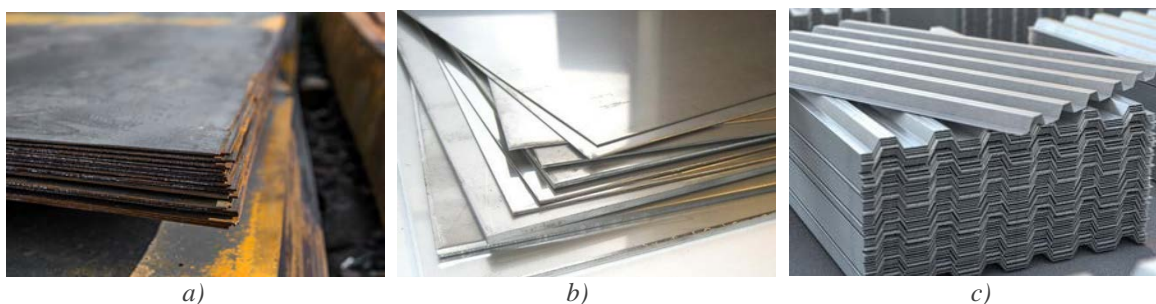
Prema Allen-u [3] “Gotovo svi strukturalni materijali dostupni u obliku tankih ploča, mogu se koristiti za izradu obloga sendvič panela”. Materijali za oblaganje panela također se mogu podijeliti na metalne i nemetalne. U metalne materijale svrstavaju se proizvodi od čelika, nehrđajućeg čelika (*slika 2.4.a*) te proizvodi od aluminijskih legura, a karakterizirani su velikim čvrstoćama i duktilnosti te izotropnosti materijala. Druga grupa predstavlja materijale na bazi prirodnih materijala, drva, cementa, gipsa, recikliranih materijala te kompozita ojačanih vlaknima. Prednost nemetalnih materijala jest njihova mala težina za određenu nosivost i anizotropnost materijala, primjerice postavljanje vlakana gušće samo u smjeru koji je više opterećen kod kompozita armiranih vlaknima.

2.1.1.1. Metalni materijali

Zbog svoje velike čvrstoće, ali i gustoće, ploče od metalnih materijala biti će vrlo tanke, odnosno povećanjem debljine znatno se povećava i vlastita težina ploča što otežava proces proizvodnje, transporta i ugradnje gotovih panela.

Čelici

Ploče od čelika najčešće se koriste kod rashladnih komora i krovnih sendvič panela u obliku hladno oblikovanog čelika. Nekoliko najraširenije korištenih oblika s mehaničkim karakteristikama prikazani su u tablici 2.1



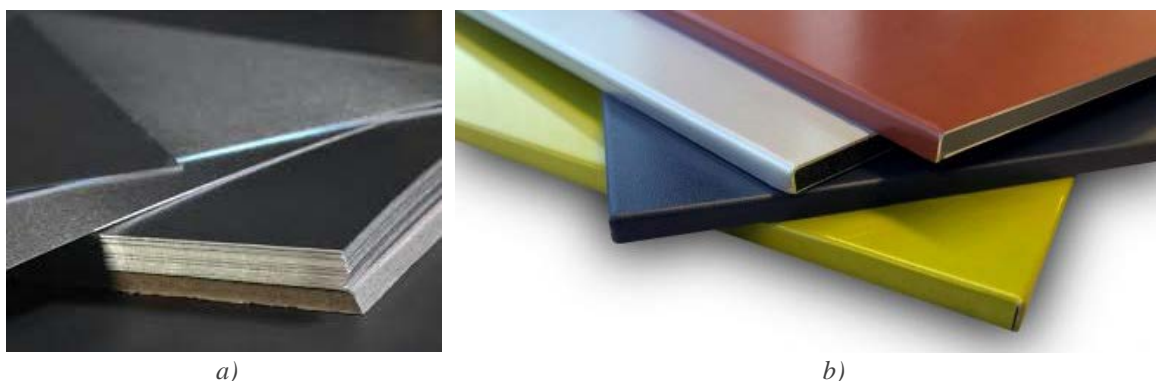
Slika 2.4 Tipovi čeličnih limova: a) čelični, b) nehrđajući čelik, c) hladno oblikovani čelik

Tablica 2.1 Mehanička svojstva čeličnih limova [1] [4] [5]

Mehanička svojstva	Čelik			Hladno oblikovani čelik		Nehrđajući čelik	
	S235	S275	S355	420MC	460MC	304	316
Gustoća [kg/m^3]	7850			7800		7700	
Debljine d [mm]	6-300			1.8-15		1- 8	
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	46			-		110	
Modul elastičnosti E [N/mm^2]	210000			200000		193000	
Granica tečenja [N/mm^2]	235	275	355	420	460	200	220
Otpornost f_k [N/mm^2]	360	470	510	500	530	500	530

Aluminij

Aluminij kao materijal tri puta lakši od čelika i s velikim izborom legura te prirodnom zaštitom od korozije, upotrebljava se u tankim kompozitnim panelima s raznim primjenama, primjerice panelima za sisteme fasadnih obloga. Česte legure za izradu ploča su EN AW-1050A i EN AW-5005 od kojih svaka ima i detaljniju podjelu. Podaci o čvrstoći i ostalim karakteristikama dostupni su u europskoj normi EN 485 [6], u nastavku u tablici 2.2 su prikazane samo često primjenjivane legure s nekim od mehaničkih karakteristika.



Slika 2.5 a) Aluminijski lim i b) kompozitni aluminijski panel

Tablica 2.2 Mehanička svojstva aluminijskih limova [6]

Mehanička svojstva	Aluminij		
	EN AW 1050A H14	EN AW 5005 H24	EN AW 5754
Gustoća [kg/m ³]	2700		
Debljine d [mm]	0.2 – 12.5		
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	210-220	205	147
Modul elastičnosti E [N/mm ²]	70000		
Granica tečenja [N/mm ²]	85	110	130
Otpornost f_{k} [N/mm ²]	105-145	145-185	220-270

2.1.1.2. Nemetalni materijali

Najviše prostora u ovoj grupi materijala zauzimaju vlaknima armirani materijali te kompoziti, upotrebljavaju se *S* (eng. *Strength*) i *R* (eng. *Reinforcement*) staklena vlakna s visokim vlačnim čvrstoćama i *E* (eng. *Electrical*) staklena vlakna s niskom električnom provodljivošću te aramidna, karbonska, celulozna, drvena i vlakna borona. Pločasti materijali za sendvič panele nastaju povezivanjem vlakana materijalima poput gipsa, epoksi smola, ljepila, cementa i sl. Njihova čvrstoća može znatno varirati ovisno o korištenim vlaknima i materijalima za povezivanje.

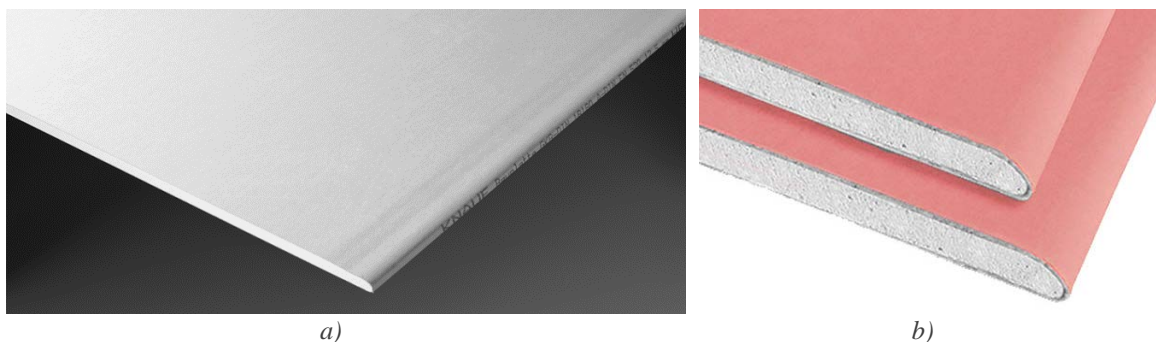
Materijali na bazi gipsa

Gips je jedan od raširenije održivo rudarenih sulfatnih minerala koji se uvelike koristi u građevinskoj industriji, u prošlosti za izradu ukrasnih fasada i štukatura, a danas u proizvodnji cementa te gips vlaknastih ili gips kartonskih ploča. Njegova sposobnost da se može beskrajno reciklirati umanjuje činjenicu da je gips ograničeni resurs koji mora biti sačuvan.

- *Gips-kartonske ploče*

Gips-kartonske ploče sastoje se od gipsane jezgre obloženom teškim papirom. Jezgra je načinjena od sirovog gipsa koji grijanjem djelomično dehidrira i miješa se s papirnatim vlaknima, raznim aditivima za smanjenje vodopropusnosti i povećanje vatrootpornosti te akceleratora u obliku fino usitnjenih kristala gipsa. Nakon miješanja jezgra je umetnuta između vanjskih slojeva tvrdog papira te ostavljena u komori za sušenje sve dok ne dosegne dovoljnu čvrstoću potrebnu za transport. Ovisno o boji gips-kartonskih ploča prepoznaje se

njihova karakteristika; crvena – bolja požarna otpornost, zelena- vlagootporna, bijela-standardna.



Slika 2.6 Gips-kartonske ploče a) standard, b) crvena

Najveća primjena gips-kartonskih ploča jest u izradi pregradnih zidova te spuštenih stropova, no i u panelnoj i montažnoj gradnji gdje čine dio nosivih zidova. Kao što je vidljivo na slikama 2.6.a i 2.6.b rubovi ploča su stanjeni kako bi se sljubnica između dvije ploče popunila i poravnala. Postoji i ravno obrađeni rub koji se koristi kada se završna obrada vrši na cijeloj površini ploča. Velika mana ovih sustava u panelnoj gradnji je ta što ukoliko gips-kartonske ploče dođu u dodir s vodom oštećuje se kartonski sloj te se ploče moraju zamijeniti.

- **Gips-vlaknaste ploče**

Gips-vlaknaste ploče su armirani materijali, a sastoje se od gipsa i celuloznih vlakana koji se sirovi miješaju samo s vodom kao jedinim vezivnim sredstvom te prešaju pod jakim pritiskom formirajući ploče. Nakon sušenja ploče su impregnirane hidrofobnim premazom te izrezane na potrebne dimenzije. Gips-vlaknaste ploče svrstavaju se u požarne razrede A1 i A2 prema europskoj normi EN 13501-2 gdje su A1 i A2 najveće moguće klase, dok je najniža klasa F. Prednost gips-vlaknastih ploča u odnosu na gips-kartonske su mehanička svojstva koja posjeduju te njihov doprinos nosivosti panelnim sustavima.



Slika 2.7 Gips-vlaknaste ploče a) Fermacell gips-vlaknasta ploča, b) Fermacell Firepanel A1

Tablica 2.3 karakteristične vrijednosti mehaničkih i fizikalnih svojstava gips-vlaknastih ploča [7]

Mehanička svojstva	Fermacell fibreboard	Fermacell Firepanel A1
Gustoća [kg/m^3]	1150	1200
Debljine d [mm]	10, 12.5, 15, 18, 22, 25, 28, 30	10, 12.5, 15
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	0.32	0.38
Modul elastičnosti E [N/mm^2]	3800	> 4500
Otpornost na savijanje $f_{m,k}$ [N/mm^2]	4.6	> 5.8
Klasa materijala prema EN 13501-1	negorivo, A2	negorivo, A1

OSB

OSB (*eng. Oriented Strand Board*) ili ploče sa suprotno orijentiranim iverjem proizvode se prešanjem i lijepljenjem pojedinih slojeva dugog i tankog iverja (makroiverja) koji su međusobno suprotno orijentirani. Iako OSB ploče čini 95% drvo ostalih 5% otpada na lijepila koja su na bazi izocijanata i formaldehida koji u dodiru s vlagom mogu biti štetni za zdravlje, stoga je potrebno razlikovati OSB ploče prema njihovoj primjeni. OSB 1 i OSB 2 smiju se koristiti samo u suhim područjima odnosno u interijerima i namještaju. OSB 3 i OSB 4 sadrže fenol - formaldehid te smiju biti izložene vlazi zbog čega se i koriste za izradu strukturnih panela. Zbog svoje ekonomičnosti OSB ploče se koriste u puno većoj mjeri od okomito uslojenih ploča iverja (šperploča) te pokrivaju 66% tržišta panelne montažne gradnje.



Slika 2.8 OSB a) ploča, b) raspored iverja

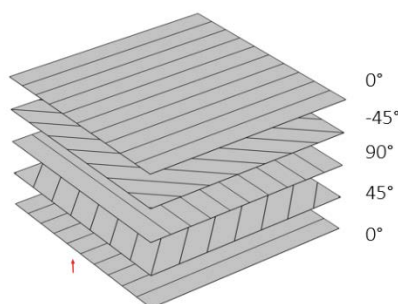
Tablica 2.4 Mehanička svojstva OSB ploča [8]

Mehanička svojstva	SWISS KRONO OSB 3	SWISS KRONO OSB 4
Gustoća [kg/m^3]	>600	>620
Debljine d [mm]	(6-10)*, >10-<18, (>18-25)*	(6-10)*, >10-<18, (>18-25)*
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	0.13	0.13
Modul elastičnosti E [N/mm^2]	3500	4800
Otpornost na savijanje $f_{m,k}$ [N/mm^2]	20	28
Klasa materijala prema EN 13501-1	normalno goriv B2 - D	normalno goriv B2 - D

*Debljine ploča od 6-10mm i 18-25mm imaju veća odnosno manja svojstva.

Vlaknima ojačani materijali

Kompozitni materijali od karbonskih vlakana mogu se pronaći u autoindustriji, avioindustriji, biciklima, formuli 1 i sl. U građevinarstvu su zastupljenija staklena vlakna te se sve više koriste kod mikroarmiranog betona i ploča na bazi cementa. Polimeri ojačani vlaknima (eng. FRP – fiber reinforced plastics/polimers) postižu najviša mehanička svojstva te su značajni u izradi sendvič panela s rešetkastim i saćastim jezgrama. Raspored vlakana u materijalima može biti nasumičan, ali može biti i raspoređen pravilno u više smjerova čime se postižu viša mehanička svojstva u potrebnim smjerovima.



Slika 2.9 Smjerovi postavljanja vlakana



Slika 2.10 Tipovi polimera ojačanih a) karbonskim vlaknima, b) staklenim vlaknima

Tablica 2.5 Mehanička svojstva vlaknima ojačanih polimera [1] [9]

Mehanička svojstva	CFRP		GFRP
Gustoća [kg/m ³]	1400		1700-1800
Debljine d [mm]	0.7 – 3.2		0.2 – 0.5
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	0.3 - 0.35		0.3 – 0.35
Modul elastičnosti E [N/mm ²]	230000	540000	80000
Vlačna čvrstoća f_k [N/mm ²]	3400	1900	1500

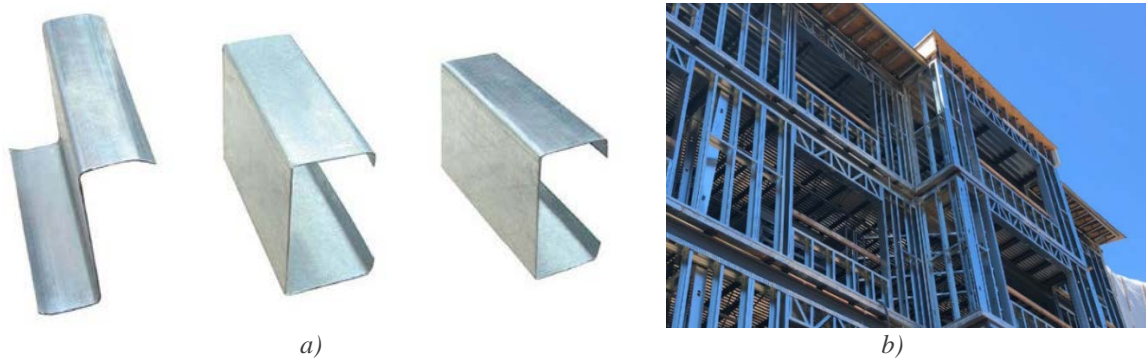
**Svojstva materijala koja sadrže vlakna jako mogu varirati ovisno o materijalu koji ih spaja i samoj količini vlakana.*

2.1.2. Materijali za ispunu panela

2.1.2.1. Čelična ispuna

Hladno oblikovani čelik (eng. CFS - cold formed steel)

Hladno oblikovani čelik pretežito se koristi za konstrukcije pregradnih zidova ili u fasadnim sistemima, no u posljednje vrijeme uporaba hladno oblikovanog čelika u nosivim zidovima i nosivim panelnim konstrukcijama privukla je pažnju. Najveća prednost profila od hladno oblikovanog čelika jest mala vlastita težina za veliku otpornost s dovoljnom duktilnosti što je vrlo značajno u potresnim područjima. Poprečni presjeci ovih profila najčešće su C ili Z oblika te je opći izbor poprečnih presjeka manji od onog kod toplo valjanog čelika. Kod otvorenih profila problem su torzijski momenti kod opterećenja izvan osi profila te opterećenja u ravni što profilima zbog male debljine predstavlja problem i često je kritično lokalno izbočivanje. Lokalno izbočivanje pokušava se najčešće spriječiti gušćom geometrijom i rasporedom profila te krutim vanjskim oblogama povezanim spajalima ili ispunom od strukturalne izolacije.



Slika 2.11 a) Oblici poprečnog presjeka, b) CFS profili u nosivim zidovima



Slika 2.12 CFS profili u pregradnim zidovima

2.1.2.2. Izolacijski materijali

Glavna karakteristika ovih materijala i razlog zbog čega se koriste u građevinskoj industriji jest toplinska provodljivost čime se mogu postići visoke energetske učinkovitosti ovojnice zgrada. Kod panelnih konstrukcija koje nisu strukturalno izolirane koriste se često mineralna i staklena vuna te izolacijski materijali na bazi drvenih vlakana čiji se koeficijenti toplinske provodljivosti kreću oko 0,05 W/mK. Kod strukturalno izoliranih sendvič panela moguće je koristiti sljedeće izolacijske materijale:

Poliuretan (PUR)

Poliuretan je u grubo polimer sastavljen od organskih tvari povezanih uretanskim vezama, najčešće se proizvodi reakcijama izocijanata (*eng. isocyanate*) i poliola (*eng. polyol*), a uporaba PUR pjena je rasprostranjena u raznim područjima. U građevinskoj industriji koristi se za izolacijske materijale i sprječavanje toplinskih mostova kod instalacije stolarije. PUR pjene sa sobom donose najniži koeficijent toplinske provodljivosti stoga je moguće imati tanje ovojnice za jednaku energetska učinkovitost. Mana naspram ostalim izolacijskim materijalima je niska klasa materijala F-E prema EN13501-1 [11] što je svrstava u zapaljive materijale. PUR izolacijski sustavi mogu biti u obliku krutih izolacijskih ploča, no mogu se i špricati na površinu zidova ili krovova nakon čega pjena ekspandira i ispunjava prostor.



Slika 2.15 Instalacija poliuretanske (PUR) pjene



Slika 2.16 a) Ploča poliuretanske pjene, b) instalacija poliuretanskog spreja

Tablica 2.6 Mehanička svojstva poliuretanskih ploča [12]

Mehanička svojstva	Nestaan PUR ploča
Gustoća [kg/m^3]	32 - 200
Debljine d [mm]	10 - 800
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	0.015 – 0.03
Tlačna čvrstoća $f_{c,k}$ [N/mm^2]	0.1 – 0.9
Klasa materijala prema EN 13501-1	lako zapaljivi, F ili E

Ekspandirani Polistiren (EPS)

Ekspandirani polistiren proizvodi se u kalupu punom malih kuglica od pjene polistirena, kalup se zagrije ili se pušta para što uzrokuje ekspaniranje kuglica koje se tako povežu. Moguća je pojava šupljina stoga ovaj izolacijski materijal nije vodonepropustan.



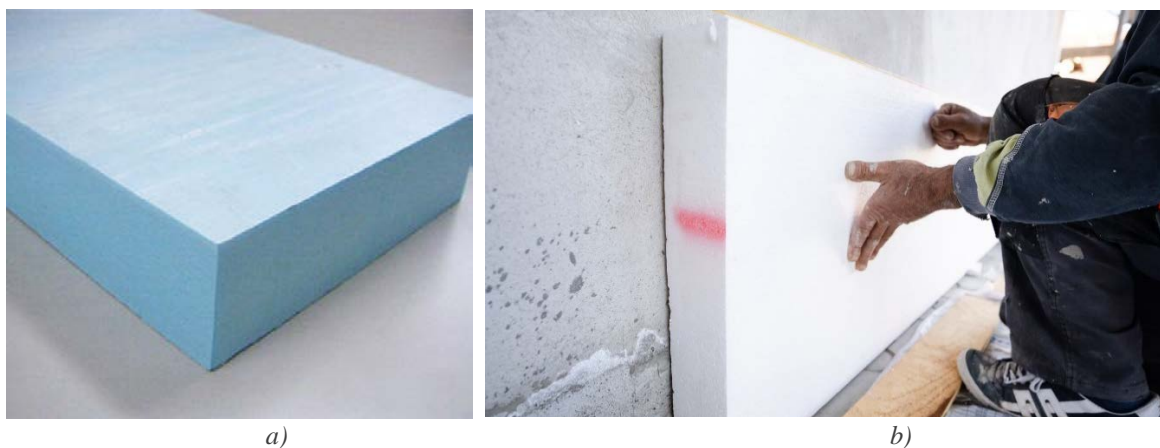
Slika 2.17 a), b) Prikaz EPS ploča

Tablica 2.7 Mehanička i fizikalna svojstva ekspaniranog polistirena [13]

Mehanička svojstva	Styropan EPS ploča
Gustoća [kg/m^3]	50 - 200
Debljine d [mm]	20 - 150
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	0.033 – 0.041
Tlačna čvrstoća $f_{c,k}$ [N/mm ²]	0.07 – 0.4
Klasa materijala prema EN 13501-1	lako zapaljivi, E

Ekstrudirani Polistiren (XPS)

Ekstrudirani polistiren ili XPS proizvodi se procesom ekstruzije koji uključuje taljenje i miješanje potrebnih sastojaka koji su ekstrudirani kroz otvor potrebne dimenzije te ekspaniraju tijekom procesa hlađenja. Prednost u odnosu na ekspanirani polistiren (EPS) jest bolja povezanost čestica što onemogućuje prodor vode te povećava tlačna čvrstoću.



Slika 2.18 a) XPS ploča, b) instalacija XPS ploče

Tablica 2.8 Mehanička i fizikalna svojstva ekstrudiranog polistirena [14]

Mehanička svojstva	Kingspan greenguard XPS ploča
Gustoća [kg/m^3]	32 - 45
Debljine d [mm]	60 - 120
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	0.033 – 0.035
Tlačna čvrstoća $f_{c,k}$ [N/mm ²]	0.3 – 0.7
Klasa materijala prema EN 13501-1	lako zapaljivi, E

2.2. Ponašanje nosivih sendvič panela

Poprečni presjek nosivih kompozitnih panela može se usporediti s poprečnim presjekom I grede gdje vanjske nosive ploče preuzimaju vlačna i tlačna naprezanja uzrokovana savijanjem, a kruta izolacijska jezgra preuzima posmična naprezanja i sprječava izbočivanje vanjskih nosivih slojeva. Prema teoriji sendvič panela [15] vanjske nosive obloge uvijek imaju puno veće gustoće, a time i module elastičnosti u odnosu na jezgru panela, stoga možemo zapisati:

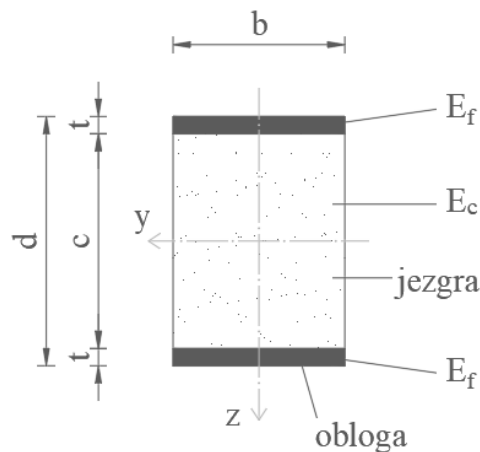
$$E_c \ll E_f \quad (2.1)$$

gdje su:

E_c – modul elastičnosti jezgre

E_f – modul elastičnosti nosivih obloga

Tipični poprečni presjek nosivog sendvič panela prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 2.19 Poprečni presjek nosivog sendvič panela

Sljedeća karakteristika vidljiva na poprečnom presjeku jesu debljine nosivih obloga i jezgre gdje su u pravilu debljine obloga puno manje od debljina jezgre [15], stoga se može zapisati:

$$t \ll c \quad (2.2)$$


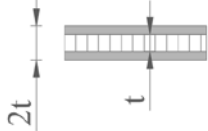
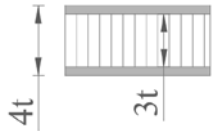
gdje su:

c – debljina (visina) jezgre

t – debljina (visina) nosivih obloga

Zašto su sendvič konstrukcije toliko učinkovite, a s jako malim povećanjem težine, najbolje se može dokazati u tablici 2.9.

Tablica 2.9 Učinkovitost sendvič konstrukcija [16]

	Bez jezgre	Jezgra, t	Jezgra, 3t
Debljina jezgre u odnosu na obloge			
Krutost	1,0	7,0	37,0
Otpornost na savijanje	1,0	3,5	9,2
Težina	1,0	1,03	1,06

2.2.1. Normalna i posmična naprezanja

Glavna karakteristika linearne teorije sendvič panela je pretpostavka da se sva posmična naprezanja prenose jezgrom dok se sva tlačna i vlačna naprezanja uslijed savijanja prenose nosivim oblogama sendvič panela [15]. Raspodjelu naprezanja po visini poprečnog presjeka kompozitnog sendvič panela možemo dobiti razmatranjem spregnutog presjeka. Iz samog položaja komponenti presjeka vidljivo je da se nosive obloge nalaze na mjestima najudaljenijima od težišta, gdje su normalna naprezanja najveća. Također udaljavanjem nosivih obloga od težišta povećava se utjecaj Steinerovog teorema, što možemo lako dokazati. Promatranjem spregnutog presjeka moramo uključiti različita svojstva materijala ekvivalentnom krutošću poprečnog presjeka [15]:

$$EI_{eq} = \frac{E_c * b * c^3}{12} + 2 * E_f * \left[\frac{b * t^3}{12} + b * t * \left(\frac{c+t}{2} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

gdje su:

E_c – modul elastičnosti jezgre

E_f – modul elastičnosti nosivih obloga

c – debljina (visina) jezgre

t – debljina (visina) nosivih obloga

b – širina poprečnog presjeka

Primijenimo li uvjete iz izraza 2.1 i 2.2 prvi član i udio momenta inercije obloga iz izraza 2.3 možemo zanemariti te promatrati samo Steinerov dodatak momentu inercije obloga. To možemo dokazati usporedbom pojedinih vrijednosti za jediničnu širinu poprečnog presjeka svedenih samo na debljinu jezgre ili debljinu obloge pomoću omjera debljine obloge i debljine jezgre:

$$\frac{t}{c} = \frac{1}{5} \quad (2.4)$$

Omjer od jedne petine relativno je mali omjer no moguć je kod nosivih panela za izgradnju stambenih građevina. Iz izraza 2.3 izdvojiti ćemo moment inercije jedne obloge te njen dodatak:

$$I_{f,1} = \left[\frac{b * t^3}{12} \right] \quad (2.5)$$

gdje je:

$I_{f,1}$ – moment inercije obloga

$$I_{f,st} = b * t * \left(\frac{c+t}{2} \right)^2 \quad (2.6)$$

te:

$I_{f,st}$ – Steinerov dodatak momentu inercije obloga

Uvrstimo li omjer iz izraza 2.4 tako da eliminiramo c iz izraza 2.6 dobivamo sljedeći izraz:

$$I_{f,st} = 9 * b * t^3 \quad (2.7)$$

gdje je:

$I_{f,st}$ – Steinerov dodatak momentu inercije obloga za omjer $t/c = 1/5$

Usporedimo li izraze 2.5 i 2.7 saznajemo da je izraz 2.7 108 puta veći te time potvrđujemo prethodnu tvrdnju. Još neki od mogućih omjera prikazani su u sljedećoj tablici 2.10:

Tablica 2.10 omjer članova izraza momenta inercije u izrazu ekvivalente krutosti

Omjer t/c	$I_{f,1} \ll I_{f,st}$
1/5	108
1/6	147
1/10	363
1/15	768
1/20	1323

Naprezanja u nosivim oblogama sada se mogu pojednostavljeno izraziti kao:

$$\sigma_f = \frac{M}{I_{f,st}} * \left(\frac{c+t}{2}\right) = \frac{M}{2*b*t*\left(\frac{c+t}{2}\right)^2} * \left(\frac{c+t}{2}\right) = \frac{M}{b*t*(c+t)} = \frac{2*M}{b*t*(d+c)} \quad (2.8)$$

gdje su:

M – moment savijanja u promatranom presjeku

σ_f – naprezanje u težištu nosivih obloga

c – debljina (visina) jezgre

t – debljina (visina) nosivih obloga

b – širina poprečnog presjeka

Prelaskom iz područja nosivih obloga u područje jezgre po visini poprečnog presjeka ostaje samo moment inercije jezgre te zbog izraza 2.1 nastaje skok u dijagramu normalnih naprezanja na mjestu prijelaza iz jezgre u nosive obloge.

Posmična naprezanja najveća su na mjestu neutralne osi poprečnog presjeka te rastu parabolično od rubova presjeka prema maksimalnoj vrijednosti. Poslužimo li se znanjem iz otpornosti materijala izraz za posmično naprezanje na bilo kojem mjestu poprečnog presjeka može se dobiti pomoću statičkog momenta površine, širine presjeka na promatranom mjestu i momenta inercije. Zbog nehomogenog poprečnog presjeka potrebno je ponovno koristiti ekvivalentne vrijednosti, stoga izraz 2.9 za naš slučaj izgleda ovako:

$$\tau(z) = \frac{P*ES_{eq}}{El_{eq}*b} \quad (2.9)$$

gdje su:

P – posmična sila na promatranom presjeku

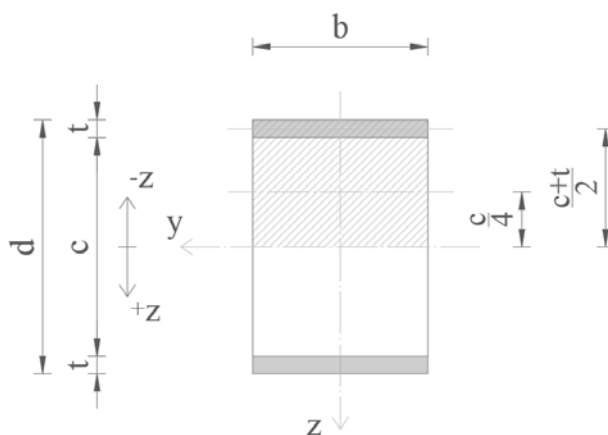
$\tau(z)$ – posmično naprezanje na visini z od neutralne osi

ES_{eq} – ekvivalentni statički moment površine s obzirom na neutralnu os

EI_{eq} – ekvivalentni moment inercije sendvič konstrukcije

b – širina poprečnog presjeka

Kao što je prije spomenuto najveće posmično naprezanje nalazi se na mjestu neutralne osi, stoga je potrebno izvesti izraz za posmično naprezanje kada je $z=0$.



Slika 2.20 Vrijednosti za statički moment površine

Tada je statički moment površine također najveći, a potrebno ga je izračunati odvojeno za dio poprečnog presjeka obloge i jezgre s obzirom na neutralnu os.

$$ES_{eq} = E_f * b * t * \left(\frac{c+t}{2}\right) + E_c * b * \frac{c^2}{8} \quad (2.10)$$

Odredivši statički moment površine za slučaj najvećeg posmičnog naprezanja možemo uvrstiti i ostale članove u izraz 2.9 za posmično naprezanje.

$$\tau(z = 0) = \frac{P * E_f * b * t * \left(\frac{c+t}{2}\right) + E_c * b * \frac{c^2}{8}}{\left[\frac{E_c * b * c^3}{12} + 2 * E_f * \left[\frac{b * t^3}{12} + b * t * \left(\frac{c+t}{2}\right)^2 \right] \right] * b} \quad (2.12)$$

Aproksimacijom izraza 2.11 pomoću izraza 2.1 i 2.2 možemo pojednostaviti izraz za posmična naprezanja koji se u konačnici ne razlikuje za više od 1% [1].

$$\tau(z = 0) = \frac{P * E_f * b * t * \left(\frac{c+t}{2}\right)}{\left[2 * E_f * \left[b * t * \left(\frac{c+t}{2}\right)^2\right] * b\right]} = \frac{P}{2 * \left[\frac{c+t}{2}\right] * b} = \frac{P}{[c+t] * b} \quad (2.13)$$

Zamijenimo li debljinu obloge t , izrazom $d=c+2t$, dobiva se izraz iz norme ASTM C393/C393M [17]:

$$\tau_{c,max} = \frac{2 * P}{[d+c] * b} \quad (2.14)$$

gdje su:

P – poprečna sila na promatranom presjeku

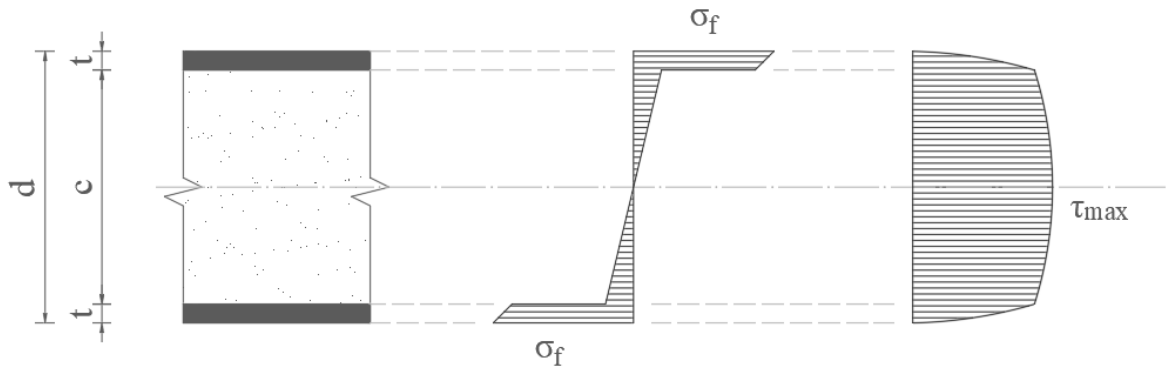
$\tau_{c,max}$ – maksimalno posmično naprezanje na visini $z=0$

c – debljina (visina) jezgre

d – ukupna debljina (visina) sendvič panela

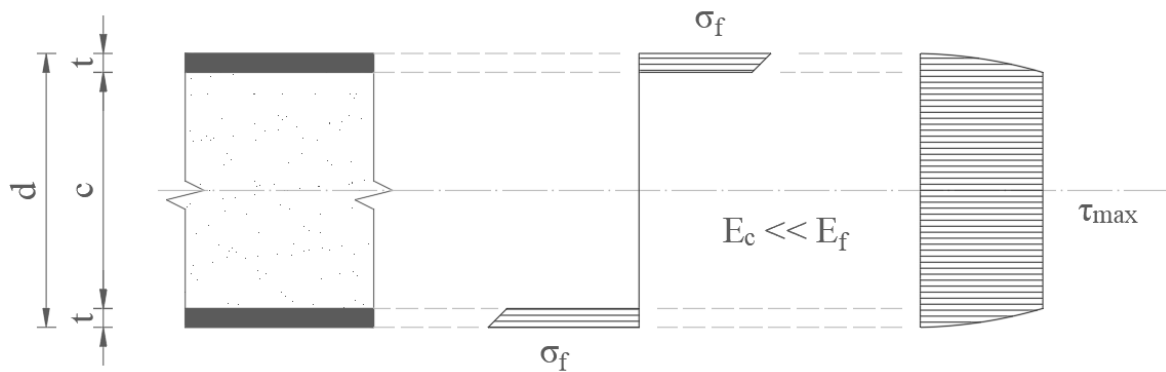
b – širina poprečnog presjeka

Raspodjela normalnih i posmičnih napreznaja bez aproksimacija prikazana je na slici 2.21:



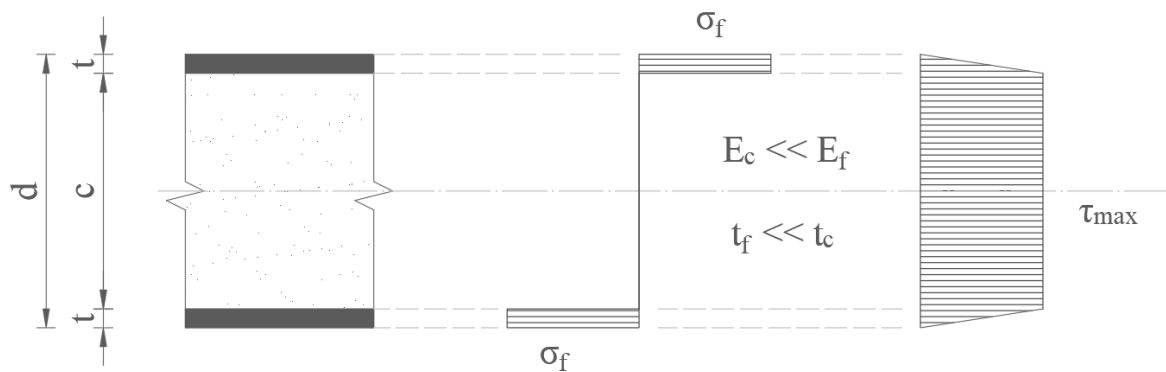
Slika 2.21 Raspodjela napreznaja po visini poprečnog presjeka

Aproksimacijom iz izraza 2.1 raspodjela se može pojednostaviti kao što je prikazano na slici 2.22.



Slika 2.22 Raspodjela napreznaja po visini poprečnog presjeka s aproksimacijom iz izraza 2.1

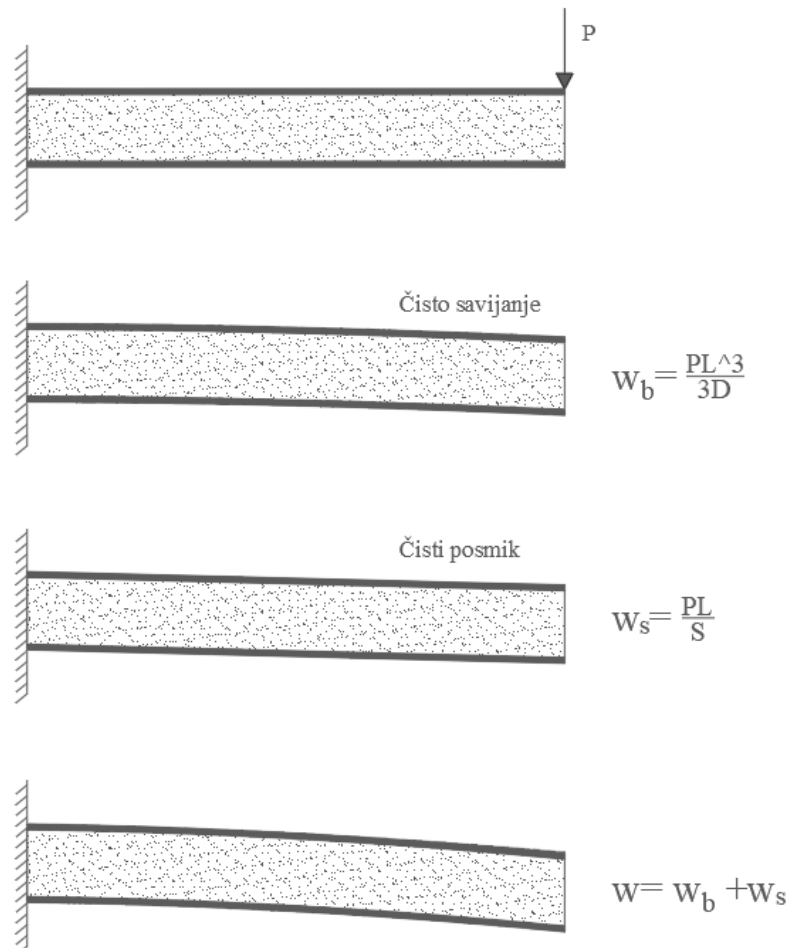
Dodatnom aproksimacijom iz izraza 2.2 raspodjela se još može pojednostaviti kao što je prikazano na slici 2.23.:



Slika 2.23 Raspodjela napreznaja po visini poprečnog presjeka s aproksimacijom iz izraza 2.1 i 2.2

2.2.2. Deformacije

Važna razlika kod prije spomenute usporedbe sendvič grede s poprečnim presjekom I nosača je preuzimanje posmičnog opterećenja. I greda ima dovoljno kruti hrbat da preuzme posmična naprezanja bez deformacija poprečnog presjeka što kod sendvič grede nije zadovoljeno jer jezgra nije dovoljno kruta [2]. U pravilu se kod homogenih poprečnih presjeka doprinos deformacija od posmičnog opterećenja zanemaruje jer su uvijek dominantne deformacije od savijanja, no to kod sendvič konstrukcija nije primjenjivo [1]. Potrebno je zbrojiti komponente deformacija od savijanja i od posmičnih sila kao što je prikazano na primjeru sendvič konzole na slici 2.24. Za određivanje deformacija ponovno moramo koristiti ekvivalentne vrijednosti modula elastičnosti za savijanje i modula posmika za doprinos deformacija od poprečnih sila [1].



Slika 2.24 Prikaz ukupnih deformacija sendvič konzole [1]

U izrazu za deformaciju od savijanja dovoljno je koristiti prethodno dokazane aproksimacije iz izraza 2.1 i 2.2 stoga se savojna krutost, D odnosi samo na obloge sendvič panela i može zapisati kao [17]:

$$D = \frac{E_f * (d^3 - c^3) * b}{12} \quad (2.15)$$

gdje su:

D – savojna krutost sendvič panela, $D = EI_{eq}$

E_f – modul elastičnosti obloga

c – debljina (visina) jezgre

d – ukupna debljina poprečnog presjeka

b – širina sendvič panela

Posmična krutost prema normi ASTM C393 [17] označava se slovom U , a opisana je pomoću modula posmika G_c te geometrijskih karakteristika sendvič panela. Zbog malih vrijednosti modula posmika jezgre, vrijednosti doprinosa progibu od posmičnih sila često su veće nego one od savijanja.

$$U = \frac{G_c * (d+c)^2 * b}{4 * c} \quad (2.16)$$

gdje su:

U – posmična krutost sendvič panela, U ili S

G_c – modul posmika jezgre

c – debljina (visina) jezgre

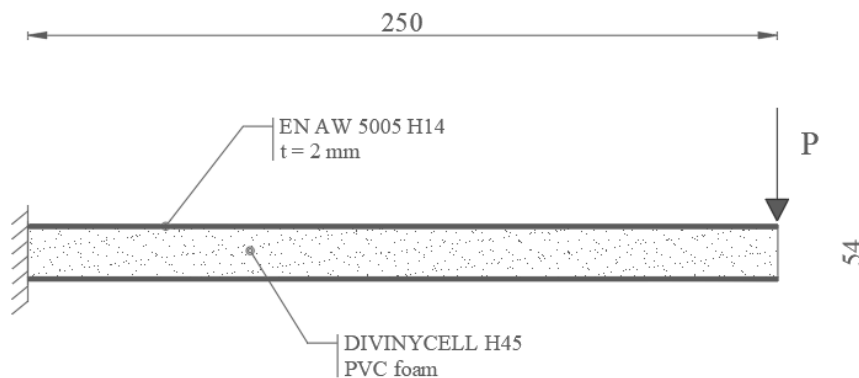
d – ukupna debljina poprečnog presjeka

b – širina sendvič panela

Na primjeru 2.2.2.1 prikazani su progibi od savijanja i posmičnih sila te njihova usporedba.

Primjer 2.2.2.1

Sendvič panel statičkog sustava konzole sa slike 2.24 istaka 250 mm opterećen je koncentriranom silom P od 400 N. Obloge su aluminijske ploče legure EN AW 5005 H14 i debljine 2 mm, a jezgra PVC pjena DIVINYCELL H45 [18] proizvođača DIAB debljine 50 mm.



Slika 2.25 Prikaz statičkog sustava i materijala sendvič panela

Dimenzije sustava

$d = 54 \text{ mm}$
 $L = 250 \text{ mm}$
 $P = 400 \text{ N}$
 $b = 100 \text{ mm}$

Materijali

obloge: $t = 2 \text{ mm}$
 $E_f = 70000 \text{ MPa}$

jezgra: $c = 50 \text{ mm}$
 $G_c = 15 \text{ MPa}$

Proračun

svojna krutost:

$$D = \frac{E_f \cdot (d^3 - c^3) \cdot b}{12} = \frac{70000 \cdot (54^3 - 50^3) \cdot 100}{12} = 1,89 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2$$

posmična krutost:

$$U = \frac{G_c \cdot (d+c)^2 \cdot b}{4 \cdot c} = \frac{15 \cdot (54+50)^2 \cdot 100}{4 \cdot 50} = 81120 \text{ N}$$

progib od savijanja:

$$w_b = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot D} = \frac{400 \cdot 250^3}{3 \cdot 1,89 \cdot 10^{10}} = 0,11 \text{ mm}$$

progib od posmičnih sila:

$$w_s = \frac{P \cdot L}{U} = \frac{400 \cdot 250}{81120} = 1,23 \text{ mm}$$

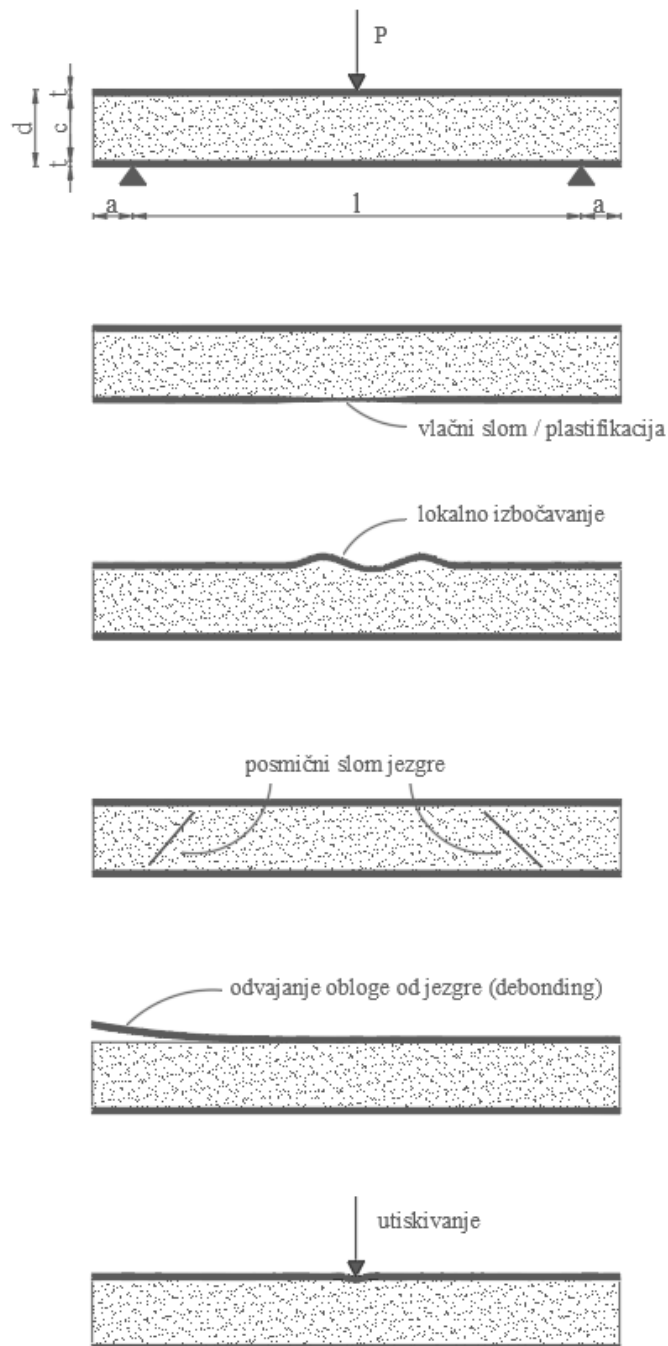
usporedba progiba:

$$\eta = \frac{w_s}{w_b} = \frac{1,23}{0,11} = 11,18$$

Iz usporedbe progiba od savijanja i posmičnih sila na jednostavnom primjeru 2.2.2.1, može se vidjeti kako je progib od posmičnih sila 11,18 puta veća od doprinosa progibu od savijanja, stoga se kod sendvič panela obavezno moraju u proračun progiba uključiti i doprinosi od posmičnih sila.

2.2.3. *Mehanizmi sloma kompozitnih nosivih panela*

Poznavanjem mehanizama sloma, konstrukcije se mogu optimizirati na željeni način, odnosno isti se mogu spriječiti različitim rješenjima. Kompozitni paneli mogu doživjeti slom na nekoliko načina, a sve ih možemo pokazati na primjeru slobodno oslonjene grede opterećene silom na sredini raspona [15].



Slika 2.26 mehanizmi sloma kompozitnog panela [15]

2.2.3.1. Vlačni slom obloge

Ovisno o materijalu obloga sendvič panela i njihovoj debljini slom može biti izražen poput krtog loma ili u obliku plastifikacije materijala kod duktilnih materijala kao što su aluminij i čelik. Ovakav slom je čest kod savijanja, a dešava se zbog povećanih vlačnih naprezanja u zoni nosivih obloga koje se nalazi na vlačnoj strani poprečnog presjeka. Može se zapisati da do vlačnog sloma ili plastifikacije obloge dolazi kada je vrijednost naprezanja iz izraza 2.8 jednaka granici tečenja materijala za plastifikaciju ili vlačnoj čvrstoći za slom [15]:

$$\sigma_f = \frac{2 * M}{b * t * (d + c)} = f_y = f_t \quad (2.9)$$

2.2.3.2. Lokalno izbočivanje obloge

Prilikom savijanja kompozitnog panela, jezgra nastoji spriječiti lokalno izbočivanje obloge u zoni tlačnih naprezanja, no ukoliko jezgra nije dovoljno kruta, djeluje kao elastična podloga u koju se obloga koja je kruća može utisnuti te popuštanjem adhezije između jezgre i obloge djelomično i odvojiti. Za takav slučaj empirijski je određeno naprezanja pri kojem dolazi do izbočivanja, a koje ovisi u modulima elastičnosti jezgre i nosivi obloga [15]:

$$\sigma_{buckling} = 0,57 * E_f^{\frac{1}{3}} * E_c^{\frac{2}{3}} = \sigma_f \quad (2.10)$$

2.2.3.3. Posmični slom jezgre

Kod materijala s velikom vlačnom čvrstoćom, kao što su polimeri armirani karbonskim i staklenim vlaknima ili materijali velike duktilnosti poput čelika i aluminija, moguće je dostići slom posmičnim silama u jezgri prije nego dođe do nekog od mehanizama sloma u oblogama. Posmični slom manifestira se kosim pukotinama u jezgri kompozitnog panela [15].

$$\tau_{max} = \tau_c \quad (2.11)$$

2.2.3.4. Adhezivni slom obloge i jezgre (eng. debonding)

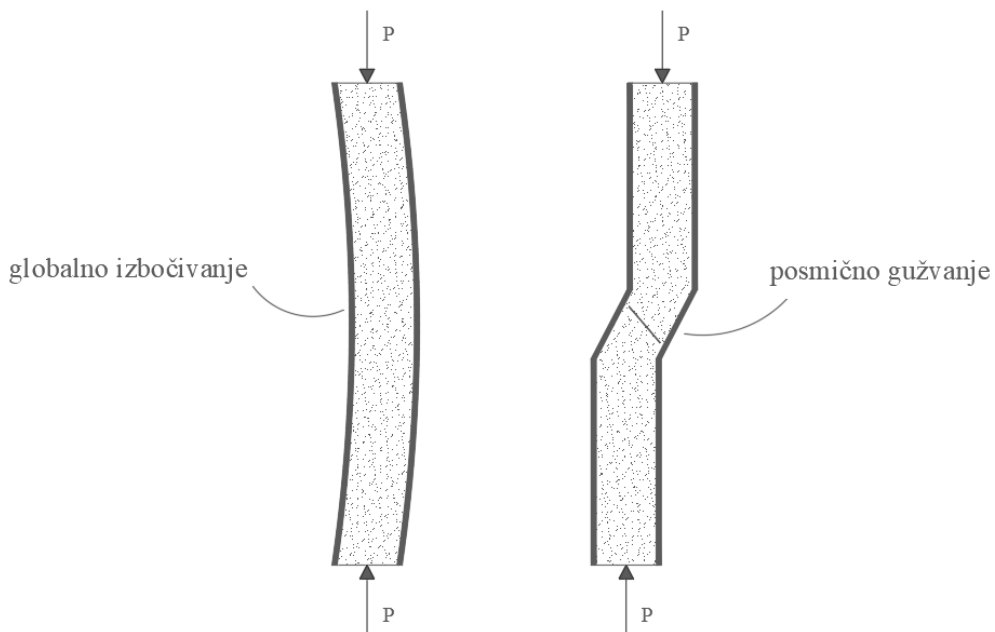
Najnepovoljniji slom jest adhezivni slom, odnosno popuštanje na spoju jezgre i obloge te odvajanje komponenti čime se gube svi učinci kompozitnog sendvič panela. Može se pojaviti i prilikom savijanja, zbog poprečnih sila koje se javljaju na spoju komponenti sendvič panela.

2.2.3.5. Utiskivanje (eng. indentation)

Utiskivanje je uzrokovano najčešće uslijed koncentriranog opterećenja ili silom od udarca koji stvaraju lokalno udubljenje na vanjskoj strani obloge. Pojavljuje se jer opterećenje na maloj površini djeluje lokalno na jednu oblogu koja se ponaša kao ploča na elastičnoj podlozi koja predstavlja jezgru. Prekorači li se tlačno naprezanje jezgre, jezgra će popustiti i nastati će utiskivanje obloge [1].

2.2.3.6. Globalno izbočivanje

Globalno izbočivanje nastaje pretežito zbog tlačnih sila, ali može biti i u kombinaciji sa savijanjem te često ne dovodi direktno do sloma, već narušava funkciju i granična stanja uporabljivosti. Do sloma dolazi ukoliko se opterećenje poveća ili zbog povećanja deformacija, a moguća su otkazivanja obloga zbog prevelikih tlačnih napreznja ili lokalnog izbočivanja obloge (2.2.2.2) te sloma u jezgri zbog velikih posmičnih sila (2.2.2.3) [1].



Slika 2.27 Prikaz oblika sloma globalnog izbočivanja i posmičnog gužvanja

Vrijednost kritične sile pri globalnom izbočivanju dana je od strane nekoliko autora, sljedećim izrazom prikazana je *Allen-ova metoda* [19]:

$$P_{cr} = \frac{P_E}{1 + \frac{P_E}{AG}} \quad (2.11)$$

gdje su:

P_E – Eulerova kritična sila - $\pi^2 D / L^2$

D – suma ekvivalentnih momenata inercije - $E I_{eq}$

G – modul posmika jezgre

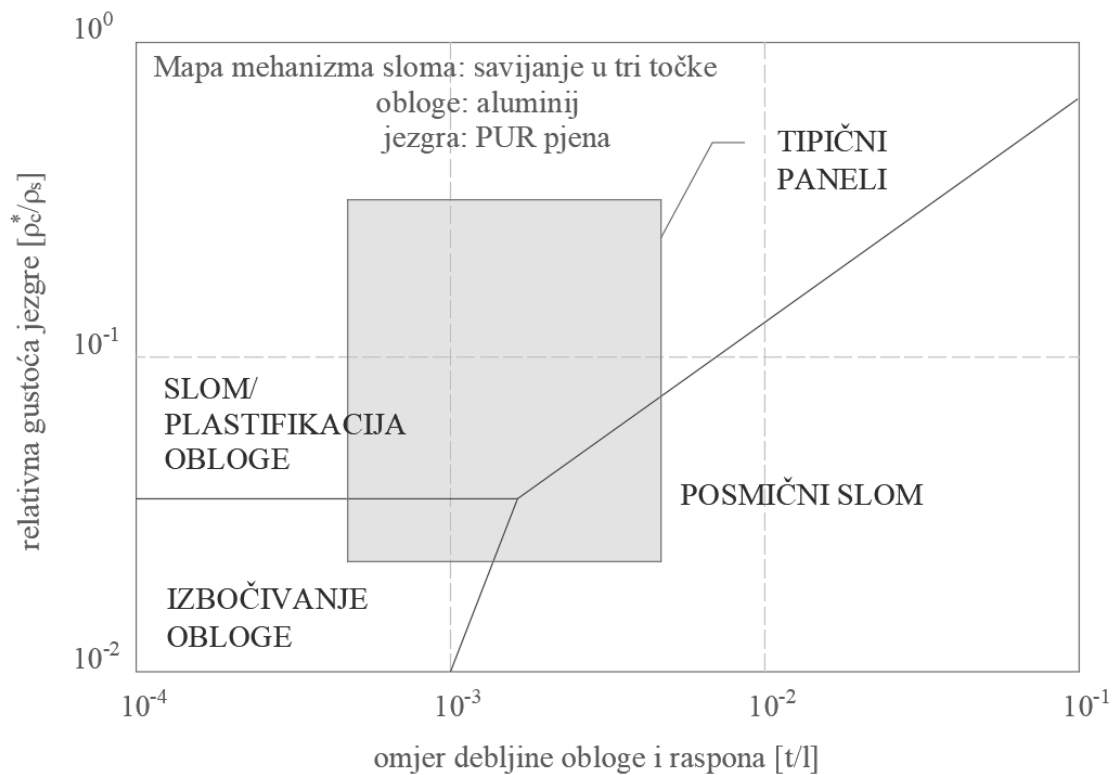
A – efektivna površina jezgre – $b \cdot c$

2.2.3.7. Posmično gužvanje (eng. shear crimping)

Kod sendvič panela s tankim oblogama i prilikom velikih deformacija izvan ravnine panela pojavljuje se slom posmične nestabilnosti s pojavom klasične posmične pukotine. To se dešava zbog povećanja posmičnog naprezanja s povećanjem deformacija [1].

2.2.3.8. Dijagram mehanizama sloma

Sređivanjem izraza iz poglavlja 2.2.1 do 2.2.5 na način da izlučimo silu koja djeluje na promatrani uzorak možemo pronaći oblik sloma koji će se prvi pojaviti tako da će za isti biti potrebna najmanja sila, odnosno opterećenje. Oblici sloma mogu se prikazati i grafički u obliku mape mehanizama sloma koja ovisno u relativnoj gustoći jezgre te omjeru debljine nosivih obloga i duljine raspona uzorka prikazuje polja i granice između pojedinih mehanizama sloma. Na sljedećoj slici 2.28 prikazana je mapa mehanizama sloma za panel s jezgrom u obliku PUR pjene i nosivih obloga od aluminijske [15].

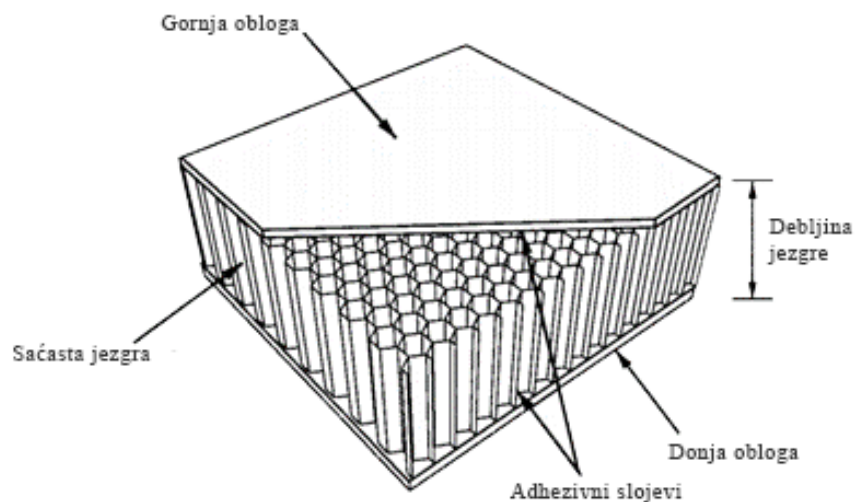


Slika 2.28 Mapa mehanizama sloma kompozitnog panela [15]

Prikazom rezultata iz ispitivanja na mapi mehanizama sloma jasno se prikazuje do kojeg je mehanizma sloma došlo.

2.3. Prionjivost kompozitnih sendvič panela

Prionjivost između komponenti kompozitnih sendvič panela postiže se na dva načina, hladnim prešanjem i uporabom adhezivnih premaza ili samo ekspanzijom materijala jezgre. U prvom slučaju se na već gotovu jezgru nanosi adhezivni premaz te se vanjske nosive obloge prešaju hladnim postupkom. Ovaj postupak koristi se kod uporabe neekspanzirajućih jezgri kao što su ploče izolacijskog sloja od ekstrudiranog polistirena (XPS) ili ekspanziranog polistirena (EPS) te sačaste i rešetkaste jezgre [19]. Adhezivni premazi moraju povezati jezgru s oblogama kako bi se ostvarilo spregnuto djelovanje sendvič konstrukcije. Kod adhezivnih ljepila u sendvič panelima sa sačastim jezgrama jako je važno dobro aplicirati adhezivni sloj jer više od 90% površine nije u kontaktu [20]. Adhezivni premazi najčešće su na bazi epoxy smola, fenolnih i poliuretanskih ljepila. Poliuretanska ljepila posjeduju mogućnost prionjivosti s gotovo svim materijalima te su ekološki prihvatljivije rješenje [1].



Slika 2.29 Sendvič panel s adhezivnim slojevima [21]

U drugom slučaju vanjske nosive obloge se u preši fiksiraju na gornjoj i donjoj plohi preše tako da se između njih ostavi potrební razmak u koji se ubrizgava tekuća pjena. Nije moguće sve materijale koji se primjenjuju za izradu jezgri koristiti u ovom načinu izrade sendvič panela. Jedna od najčešće korištenih je poliuretanska pjena zbog svoje ekonomičnosti i dobrih toplinskih svojstava [20]. Pjena je u viskoznom stanju sve dok ne počne ekspanzirati zbog grijanja vanjskih ploha i reakcije izocijanata te počne popunjavati prostor između vanjskih ploča. Ekspanziranje pjene svojom jačinom prodire u pore materijala obloge te tako ostvaruje spoj između komponenti sendvič panela. Nakon 45 minuta paneli se mogu izvaditi iz preše i skladištiti.

3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE PRIONJIVOSTI KOMPOZITNIH PANELA

Laboratorijskim ispitivanjem savijanja kompozitnih panela cilj je istražiti svojstvo prionjivosti između komponenata panela. Osim prionjivosti testom savijanja moguće je odrediti naprezanja i krutosti u oblogama i jezgri te ukupnu savojnu krutost sendvič panela. Laboratorijska ispitivanja provedena su u laboratoriju za konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci prema američkoj normi ASTM C393/C393M [17].

3.1. Komponente ispitivanog kompozitnog panela

Ispitivanja su provedena na uzorcima s jezgrom izvedenom od PUR pjene i nosivih obložnih vatrootpornih gips-vlaknastih ploča debljine 15mm.

3.1.1. Obložne ploče

Za sva ispitivanja korištene su gips-vlaknaste ploče firme Fermacell, u tablici 3.1 oznakom Fp2 su označene Fermacell Firepanel A1 gips-vlaknaste ploče s pojačanim svojstvima vatrootpornosti.

Tablica 3.1 Vrsta obložnih ploča u uzorcima za ispitivanje

Oznaka	Vrsta ploče	Debljina [mm]
Fp2	Fermacell Firepanel A1	15mm

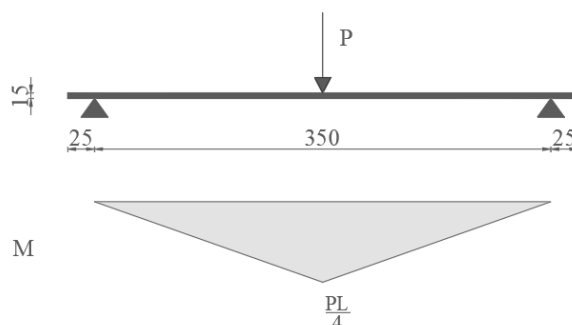
3.1.1.1. Fermacell Firepanel A1

Fermacell Firepanel A1 ploče sastoje se od gipsa, celuloznih vlakana te dodatnih negorivih vlakana s hidrofobnim premazom na radnoj plohi ploče. Prema europskoj normi EN 1995-1-1 [22] ove ploče svrstane su u klase primjene 1 i 2 što podrazumijeva primjenu u unutarnjim suhim i vanjskim područjima koji su neizravno izloženi atmosferskim utjecajima. Također ovaj tip gips-vlaknastih ploča zbog negorivih vlakna stvrstan je prema europskoj normi EN 13501-1 [23] u negorivu klasu građevinskih materijala: A1 (Tablica 3.2).

Tablica 3.2 mehanička i fizikalna svojstva Fermacell Firepanel A1 gips-vlaknaste ploče [7]

Mehanička svojstva	Fermacell Firepanel A1
Gustoća [kg/m ³]	1200 +/- 50
Debljina d [mm]	15
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	0.38
Modul elastičnosti E [N/mm ²]	> 4500
Otpornost na savijanje f _{m,k} [N/mm ²]	> 5.8
Alkalnost [ph-vrijednost]	7-8
Klasa materijala prema EN 13501-1	negorivo, A1

Provedenim ispitivanjima utvrđena je vrijednost otpornosti na savijanje te premašuje vrijednost od 5,8 MPa. Ispitivanje savojne čvrstoće gips vlaknastih Fermacell Firepanel A1 ploča izvršeno je na okviru za savijanje marke Controls 50-C1601-FR kapaciteta 300 kN. Ispitivanja provedena prema normi HRN EN 15283-2:2010 [24] na uzorcima dimenzija 400x300mm debljine 15mm iz kojeg je srednja vrijednost najveće sile pri slomu svih uzorka iznosila 840 N (P = 840 N).



Slika 3.1 Dijagram momenta savijanja za ispitivanje savijanjem u tri točke

Naprezanje u obložnoj ploči jednostavno je dobiveno iz izraza za naprezanje:

$$\sigma = \frac{M}{I} * \left(\frac{t}{2}\right) = \frac{\frac{P*L}{4}}{\frac{b*t^3}{12}} * \left(\frac{t}{2}\right) = \frac{3*P}{2*b*t^2} = \frac{3*840}{2*300*15^2} = 6,5 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

Tablica 3.3 Otpornost na savijanje iz ispitivanja Fermacell Firepanel A1 ploče

Mehanička svojstva	Fermacell Firepanel A1
Otpornost na savijanje [N/mm ²]	6,5

U nastavku diplomskog rada biti će korištena vrijednost otpornosti na svijanje od 6,5 MPa veća od vrijednosti 5,8 MPa iz tablice 3.2.

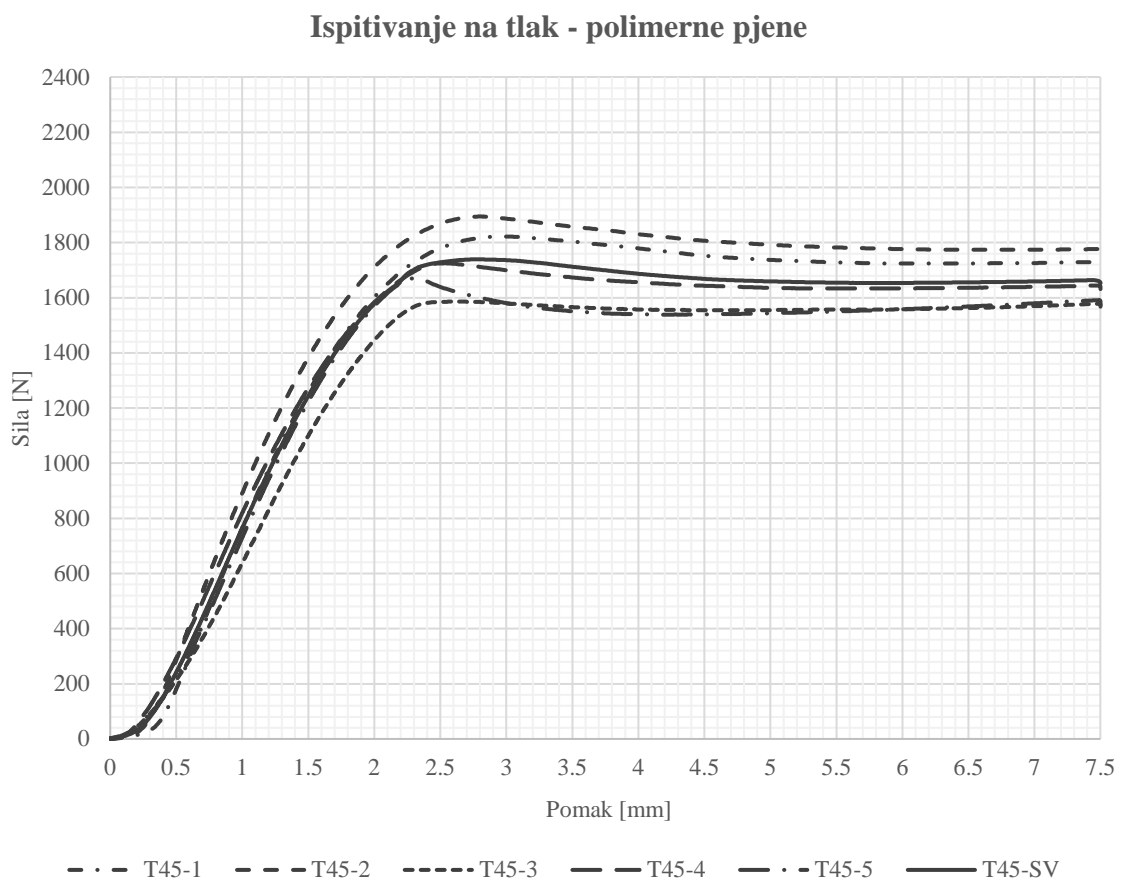
3.1.2. Jezgra

Svi ispitni uzorci sadrže jezgru od poliuretanske (PUR) pjene koja se u viskoznom stanju ubrizgava u prostor između dvije obložne ploče pridržane prešom koja tijekom ekspanzije popunjava prostor i ostvaruje sprezanje s obložnim pločama nakon 45 minuta.

3.1.2.1. Poliuretanska (PUR) pjena

Poliuretanska pjena bila je jedan od prvih materijala korištenih u izradi kompozitnih sendvič panela. Postala je popularna zbog svoje male toplinske provodljivosti, velikog omjera nosivosti i težine te slabe propusnosti vlage [25].

U ispitnim uzorcima korištena je polimerna pjena gustoće 45kg/m^3 , a ispitivanja koja su napravljena trenutno jesu samo tlačna ispitivanje pjene. Rezultati u obliku dijagrama sila – pomak prikazani su na slici 3.2 [26].



Slika 3.2 Dijagrami sila-pomak ispitanih uzoraka na tlak

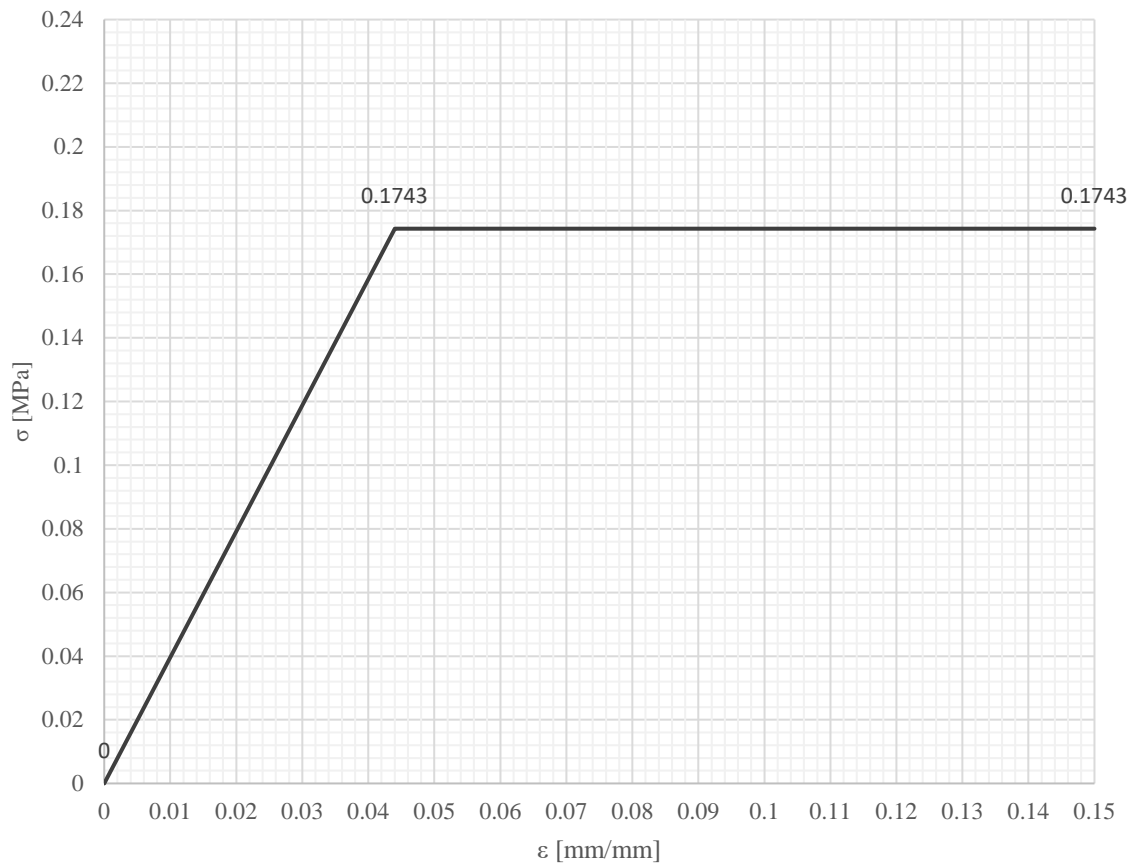
Srednja vrijednost maksimalne sile za 5 ispitanih uzoraka iznosi: **F = 1739,7 N**

Tablica 3.4 Srednje maksimalne vrijednosti sile i naprezanje

	Sila - F [N]	Naprezanje – σ [MPa]
Srednja vrijednost	1739,7	0,1743

Iz dijagrama na slici 3.2 vidljivo je da se jezgra, polimerna pjena, ponaša hiper-elastično. Kako bismo pojednostavili numeričku analizu u poglavlju 4. koristiti će se idealni elasto-plastični dijagram naprezanje – deformacija prikazan na slici 3.3.

Elasto-plastični dijagram naprezanje - deformacije



Slika 3.3 Elasto-plastični dijagram tlačne čvrstoće

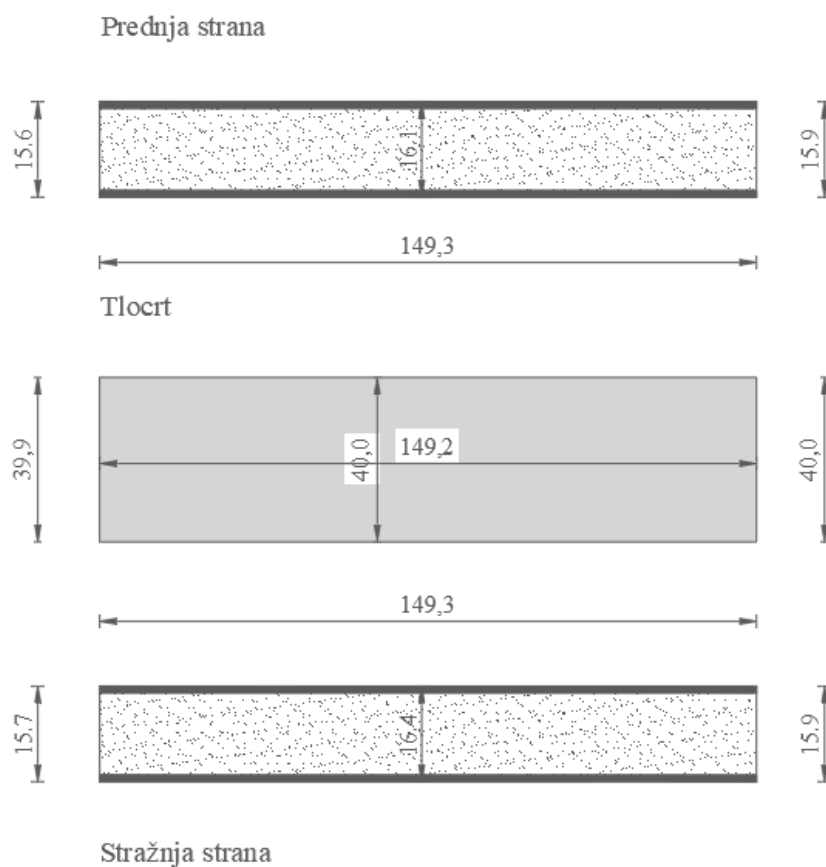
Deformacija pri maksimalnom naprezanju iznosi 0.044 mm/mm.

3.2. Ispitivanje svojstava prionjivosti između komponenata kompozitnog panela

Prionjivost između obložnih ploča i poliuretanske pjene ostvarena je ekspanzijom pjene pri čemu se jezgra i obložne ploče prirodno lijepe. Nikakvi adhezivi i prethodno premazivanje nije korišteno za ostvarivanje prionjivosti. Ispitivanje prionjivosti savijanjem provodi se prema Američkoj normi ASTM C393/C393M [17]. Norma ASTM C393/C393M [17] preporučuje ispitivanje savijanjem u 3 i u 4 točke ovisno o veličini uzorka i posmičnom naprezanju koje se mora postići. Za ispitivanje uzorka odabran je test savijanjem u 4 točke radi velikih dimenzija uzorka i potrebnog raspona oslonaca. Zbog male vlačne čvrstoće obloga nije korišten standardni test čije su dimenzije u normi već je preliminarno određena potrebna udaljenost sile od oslonca.

3.2.1. Određivanje dimenzija uzorka

Dopremljeni uzorci moraju se izvagati te ponovno točno izmjeriti kako bi rezultati bili što točniji. Mjerenje uzoraka vršeno je klasičnim metrom i ravnalom te su izmjerene sljedeće vrijednosti:



Slika 3.4 Prikaz izmjerenih vrijednosti dimenzija uzorka (mjere u cm)

Tablica 3.5 Srednje vrijednosti izmjerenih dimenzija uzoraka

Uzorak	duljina, l [cm]	širina, b [cm]	debljina, d [cm]	jezgra, c [cm]	obloge, t [cm]	Masa [kg]
P2-Fp2-45	149,29	39,83	15,96	12,96	1,5	26,00
P3-Fp2-45	149,27	39,67	15,93	12,93	1,5	25,98

Prema izmjerenim dimenzijama uzorak je definiran kao nestandardni test. Prema normi ASTM c393/c393M [17] za nestandardne uzorke je potrebno provjeriti zadovoljavaju li uvjete dane u poglavlju 8. iste norme. Uvjeti ograničavaju vrijednosti raspona oslonaca te posmične i tlačne čvrstoće jezgre iz razloga kako bi eliminirali slom u obložnim pločama kompozitnog panela ili utiskivanje.

Razmak oslonaca mora zadovoljiti uvjet:

$$s \leq \frac{2k\sigma t}{F_s} + L \quad (3.2)$$

ili posmična čvrstoća mora zadovoljiti:

$$F_s \leq \frac{2k\sigma t}{(s-L)} \quad (3.3)$$

Tlačna čvrstoća mora zadovoljiti:

$$F_c \geq \frac{2(c+t)\sigma t}{(s-L)l_{pad}} \quad (3.4)$$

gdje su:

s – razmak oslonaca [mm]

F_s – pretpostavljena posmična čvrstoća jezgre [MPa]

F_c – dozvoljeno tlačno naprezanje jezgre [MPa]

L – razmak sila opterećenja ($L=0$ za test savijanjem u tri točke) [mm]

σ – očekivano maksimalno naprezanje u nosivim obložnim pločama [MPa]

c – debljina (visina) jezgre [mm]

t – debljina (visina) nosivih obloga [mm]

l_{pad} – duljina prijenosnika opterećenja [mm]

k – faktor sigurnosti za osiguranje sloma u jezgri [$k=0,75$]

Provjera uvjeta:

$$s \leq \frac{2 \cdot 0,75 \cdot 2,4 \cdot 15}{0,14} + 1050 \leq 1435 \text{ mm} \quad (3.5)$$

$$F_c \geq \frac{2(130+15) \cdot 2,4 \cdot 15}{(1420-1050) \cdot 60} \geq 0,47 \text{ MPa} \quad (3.6)$$

Također kod nestandardnih geometrija uzoraka dane su smjernice za dimenzije pa tako moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti za širinu uzorka, b:

$$b \leq \begin{cases} 6d \\ \frac{s}{2} \end{cases} \leq \begin{cases} 960 \\ 710 \end{cases} \text{ [mm]} \quad (3.7)$$

$$b \geq \begin{cases} 2d \\ 3c \end{cases} \geq \begin{cases} 320 \\ 390 \end{cases} \text{ [mm]} \quad (3.8)$$

Širina uzorka je 400mm stoga ove uvjete zadovoljava. Ograničenja za širinu uzorka dana su kako bi se mogao primjenjivati postupak za jednostavne sendvič grede, u suprotnom ukoliko je širina veća od dozvoljene potrebno je uračunati efekte savijanja ploče.

Ukupna duljina uzorka mora biti jednaka rasponu oslonaca S , uvećanom za 50 mm ili polovicom visine uzorka, a mjerodavna je veća vrijednost.

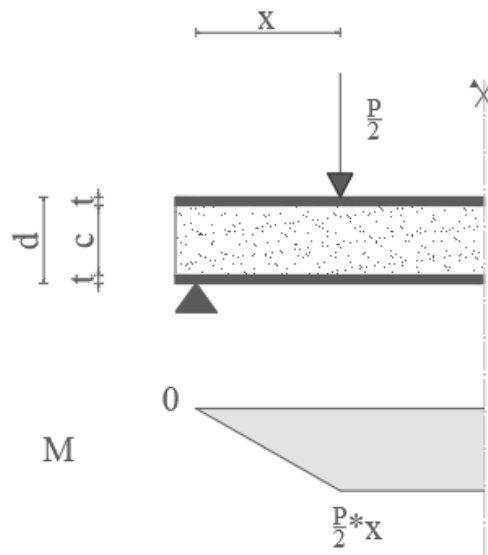
$$l = s + \begin{cases} 50\text{mm} \\ d/2 \end{cases} = s + \begin{cases} 50 \\ 160/2 \end{cases} = 1420 + 80 = 1500 \text{ [mm]} \quad (3.9)$$

Svi uvjeti za dimenzije su zadovoljeni.

3.2.2. Preliminarni proračun raspona nanesenih sila na uzorak

Kako bi izbjegli slom u nosivim obložnim pločama dosezanjem vlačne čvrstoće, potrebno je odrediti razmak sila od oslonca koji će za to biti mjerodavan. Možemo se poslužiti izrazom iz norme ASTM C393/C393M [17] za normalna naprezanja u oblogama, odnosno izrazom 2.9 u kojem izjednačujemo naprezanja u oblogama sa vlačnom čvrstoćom obložnih ploča. U ovom slučaju vrijednost momenta savijanja nije poznata, ali njegov oblik jest, stoga se moment može izraziti preko djelujuće sile P i udaljenosti sile od oslonca, x , na sljedeći način:

$$\sigma_f = \frac{2 * M}{b * t * (d + c)} = f_t \quad (2.9)$$



Slika 3.5 Momentni dijagram sustava

Nakon što u izrazu zamijenimo M , dobivamo izraz sa nepoznicom, x , izrazimo li x , ostaje nam još samo nepoznata sila P :

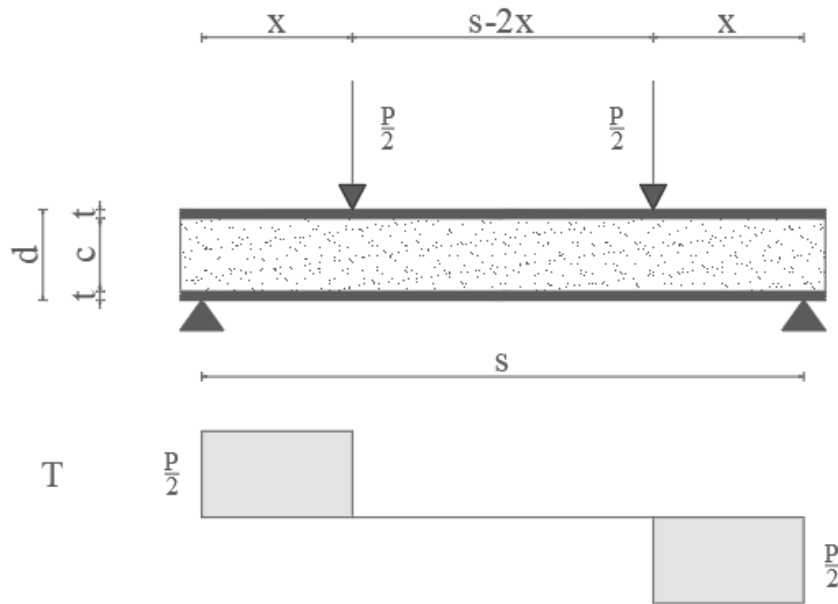
$$M = \frac{P}{2} * x \quad (3.10)$$

$$k * f_t \geq \frac{P * x}{b * t * (d + c)} \quad (3.11)$$

$$x \leq \frac{k * f_t * b * t * (d + c)}{P} \quad (3.12)$$

Potrebnu silu P koju uvrštavamo možemo dobiti iz izraza za posmični slom (3.13), uvrstimo li poznatu posmičnu čvrstoću jezgre u izraz. Zato jer se veličina posmičnih naprezanja ne mijenja s pomicanjem opterećenja već samo s njihovom vrijednošću.

$$\tau_c = \frac{P}{2 * b * (d+c)} = \tau_{max} \quad (3.13)$$



Slika 3.6 Dijagram poprečnih sila na sustavu

Uvrštavanjem sile P/2 i sređivanjem izraza kako bismo dobili silu P dobivamo:

$$P = 2 * \tau_{max} * b * (d + c) \quad (3.14)$$

Posmična čvrstoća pjene nije nam poznata jer uzorci poliuretanske pjene nisu prethodno ispitani, stoga je moramo pretpostaviti čime već unosimo potencijalnu grešku. Posmična čvrstoća preuzeta je iz ispitivanja prionjivosti između polimerne pjene i čeličnih limova (P1-Sp2-45) gdje je došlo do posmičnog sloma. Kao što je prije definirano, posmični slom je mehanizam sloma koji nastaje u jezgri. Mjereći maksimalnu silu pri slomu i pomak na sredini uzorka moguće je izračunati posmično naprezanje u trenutku sloma koristeći normu ASTM C393/C393M [17] čime je dobivena vrijednost posmičnog naprezanja od 0,063 MPa. Uvrstimo li izraz 3.14 u izraz 3.12 dobivamo sljedeće:

$$x \leq \frac{k \cdot f_t \cdot t}{2 \cdot \tau_{max}} \quad (3.15)$$

Poznate vrijednosti uvrstavamo u izraz 3.15 te dobivamo graničnu vrijednost razmaka sile od oslonaca pri kojem neće doći do vlačnog sloma u obložnoj ploči.

$$x \leq \frac{k \cdot f_t \cdot t}{2 \cdot \tau_{max}} \leq \frac{0,75 \cdot 2,4 \cdot 15}{2 \cdot 0,063} \leq 285,71 \text{ mm} \quad (3.16)$$

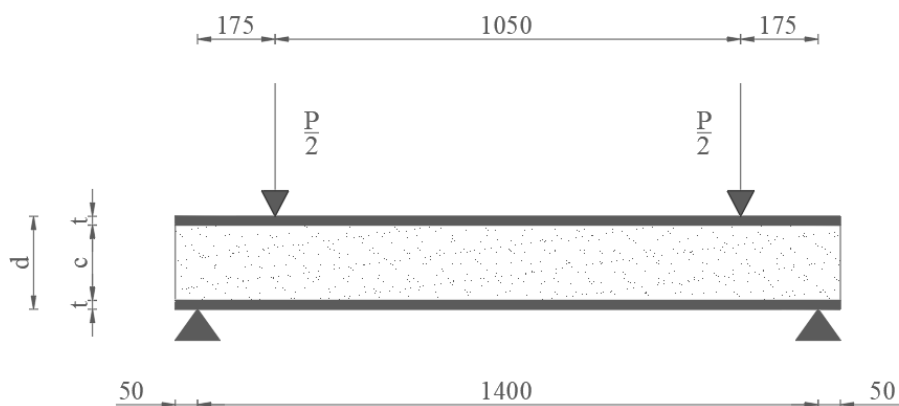
Predloženi razmaci sile od oslonca u normi ASTM C393/C393M su:

$$x = \begin{cases} \frac{s}{4} \\ \frac{s}{3} \end{cases} = \begin{cases} \frac{1400}{4} \\ \frac{1400}{3} \end{cases} = \begin{cases} 350 \\ 466,67 \end{cases} \text{ [mm]} \quad (3.17)$$

Predložene udaljenosti ne zadovoljavaju uvjet iz izraza 3.16 zbog male vlačne čvrstoće obložnih ploča, stoga je potrebno uzeti proizvoljni razmak manji od ponuđenih. Odabran je razmak sile od oslonca jednak:

$$x = \frac{s}{8} = \frac{1400}{8} = 175 \text{ mm} \quad (3.18)$$

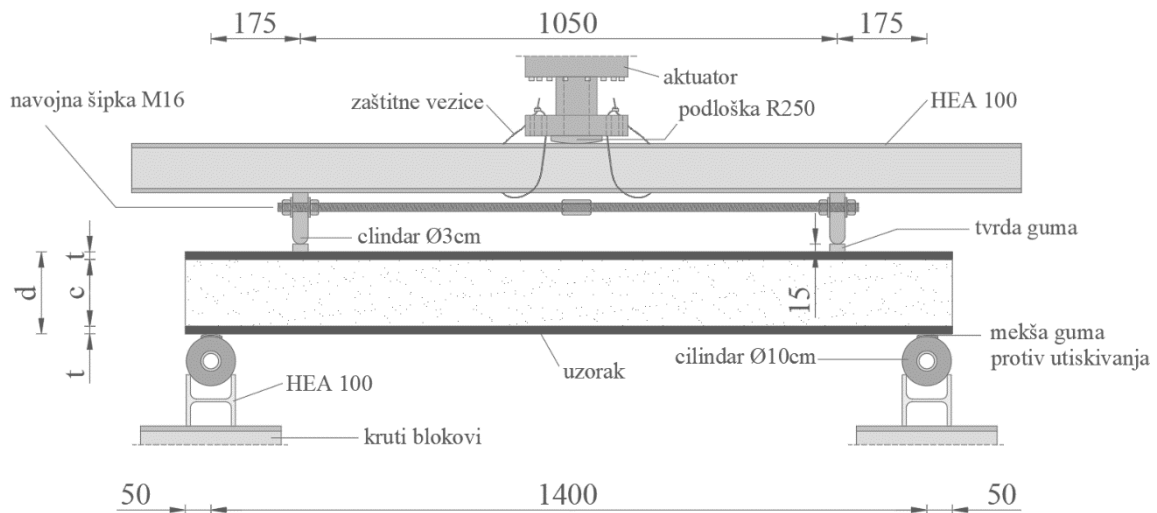
Sustav za ispitivanje uzoraka mora sadržavati sljedeće dimenzije raspona oslonaca i raspona nanesenog opterećenja prikazane na slici 3.7:



Slika 3.7 Potrebne dimenzije raspona oslonaca i nanesenog opterećenja

3.2.3. Postavljanje sustava za ispitivanje

Statičko ispitivanje savijanjem provedeno je pomoću hidrauličnog aktuatora Zwick Roell, kapaciteta 250 kN koji ima određeni hod cilindra od 25 centimetara te je potrebno postaviti potkonstrukciju za oslonce kako bi isti bili na potrebnoj visini. Sustav se sastoji od četiri kruta čelična bloka, dva HEA 100 profila i dva čelična cilindra promjera 10 centimetara.



Slika 3.8 Sustav oslanjanja uzorka i prijenos opterećenja

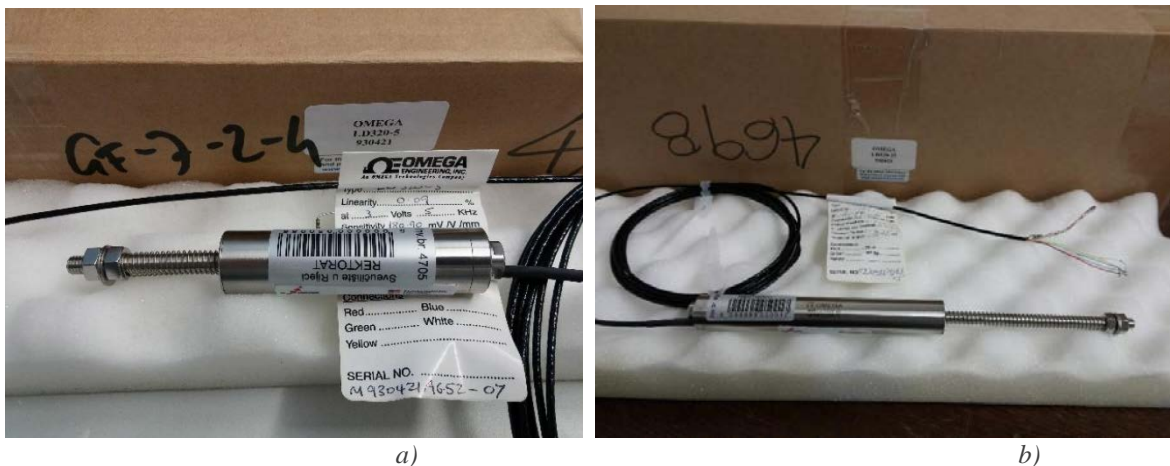
Na slici 3.8 prikazan je sustav prijenosa opterećenja na uzorak koji se ostvaruje pomoću HEA 100 profila duljine 174 centimetara. Na čelični HEA 100 profil se sila iz aktuatora prenosi preko čelične podloške koja je s jedne strane ravna, a s druge zaobljena radijusom od 250 centimetara kako bi izbjegli mogući moment zbog velike površine aktuatora i nepravilnosti HEA 100 profila. Sila se preko profila prenosi na dva čelična pravokutnika, također s jednim rubom promjera 3 centimetra povezanih navojnom šipkom za podešavanje razmaka. Tvrda guma debljine 15 milimetara postavlja se između uzorka i čeličnih cijevi kako ne bi došlo do utiskivanja u uzorak. Dvije zaštitne čelične vezice služe za pridržavanje čeličnog HEA 100 profila od mogućeg pada nakon sloma uzorka.

3.2.4. Oprema za mjerenje pomaka uzorka

Pomaci uzorka mjere se na dva načina, optičkim mjerenjem i pomoću linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora, u nastavku rada LVDT-a (*eng. Linear Variable Differential Transformer*). Optičkim mjerenjem moguće je beskontaktno pratiti pomake cijelog uzorka dok se linearni mjerači postavljaju na uzorak u određenim točkama u kojima mjere pomak.

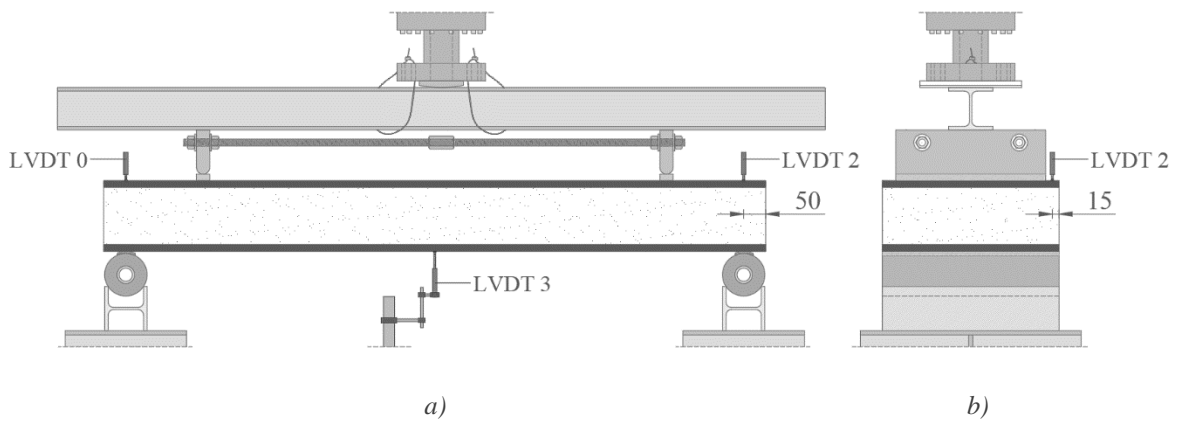
3.2.4.1. Lokacije i tipovi korištenih LVDT-a

LVDT mjerni uređaji postavljaju se na tri položaja na uzorku, iznad oslonaca s gornje strane uzorka te na sredini uzorka s donje strane. Korišteni LVDT mjerni uređaji su OMEGA LD320-5 s nominalnim hodom od ± 5 mm (*slika 3.9.a*) na mjestima iznad oslonca i OMEGA LD320-25 s nominalnim hodom od ± 25 mm (*slika 3.9.b*) na sredini s donje strane uzorka.



Slika 3.9 Prikaz mjernih uređaja a) OMEGA LD320-5, b) OMEGA LD320-25

LVDT uređaji označeni su s oznakama: LVDT 0, LVDT 2 (*slika 3.9.a*) i LVDT 3 (*slika 3.9.b*). LVDT 0 i LVDT 2 postavljeni na udaljenosti od 15 mm od stražnjeg ruba uzorka i 50 mm od bočnih rubova uzorka (*slika 3.10.a i b*). LVDT 3 je postavljen na sredini raspona uzorka s donje strane (*slika 3.10.a*).



Slika 3.10 Prikaz pozicija LVDT mjernih uređaja, a) frontalni pogled, b) bočni pogled

3.2.4.2. Oprema za 3D optička mjerenja

3D optička mjerenja provedena su uz pomoć ARAMIS 12M optičkog mjernog sustava s dvije kamere rezolucije 4096 x 3000 piksela (slika 3.11). S obzirom na veličinu uzoraka mjerni sustav se mora kalibrirati na potrebni mjerni volumen koji u našem slučaju iznosi $1405 \times 1405 \times 1730 \text{ mm}^3$. Za obradu slika se korišten je softver ARAMIS i GOM correlate 2020.



Slika 3.11 ARAMIS 12M optički mjerni sustav

3D optička mjerenja su beskontaktni oblik mjerenja pomaka i deformacija koji se koristi za dinamička i statička ispitivanja s primjenom kod testiranja materijala, određivanja karakteristika materijala, utvrđivanja pojave pukotina, potvrđivanja modela s konačnim elementima [27]. Kako bi mjerni uređaj detektirao uzorak odnosno promatranu površinu i

potrebne točke, potrebno je pripremiti uzorak za optičko mjerenje. Za promatranje površina uzorak se mora nepravilno ofarbati (slika 3.12), dok je na promatrane točke potrebno zalijepiti bijele točke s crnim rubom (markere).



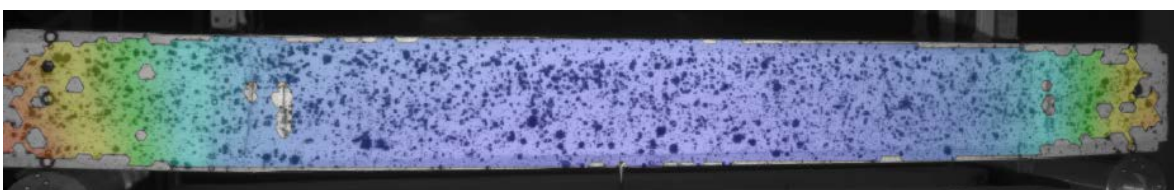
Slika 3.12 Farbanje uzorka

Bijele točke s crnim rubom postavljaju se na mjesta gdje želimo izmjeriti točnije pomake, dakle one se postavljaju na oslonce, iznad oslonaca, na mjestima gdje se nanosi opterećenje te na sredini raspona (slika 3.13).



Slika 3.13 Prikaz pozicija crno-bijelih točaka

Nepravilni uzorak je dovoljno dobar kada se u softveru ARAMIS prikaže površina bez velikih rupa (slika 3.14), a točke zadovoljavaju kada su sve prepoznate u nedeformiranom stanju. Plava boja označava kvalitetniji uzorak na površini dok narančasta označava lošiji, no i dalje zadovoljavajući.



Slika 3.14 Prikaz dobro ofarbanog uzorka

3.2.5. Ispitivanje prionjivosti polimerne pjene i obložnih ploča – savijanje panela

Ispitivanje je provedeno pomoću Zwick/Roell hidrauličnog aktuatora kapaciteta od 250kN. Prema normi ASTM C393/C393M [17] i na postavljenom sustavu kao u poglavlju 3.2.3. ispitivanje je provedeno kontrolom sile s brzinom prirasta od 6 mm/min. Kako bi zadovoljili uvjet statičkog ispitivanja, trajanje testa je od 3 do 6 minuta. Neposredno prije ispitivanja, vizualnim pregledom uzoraka utvrđena su oštećenja koja su nastala prije ispitivanja. Tijekom proizvodnje sendvič panela pri jakoj ekspanziji jezgre došlo je do odvajanja dijela jezgre, na način da se cijelom duljinom uzorka s jedne strane proteže pukotina širine nekoliko milimetara i dubine između 150 mm i 200 mm. Pukotina na uzorku P3-Fp2-45 prikazana je na slici 3.15.



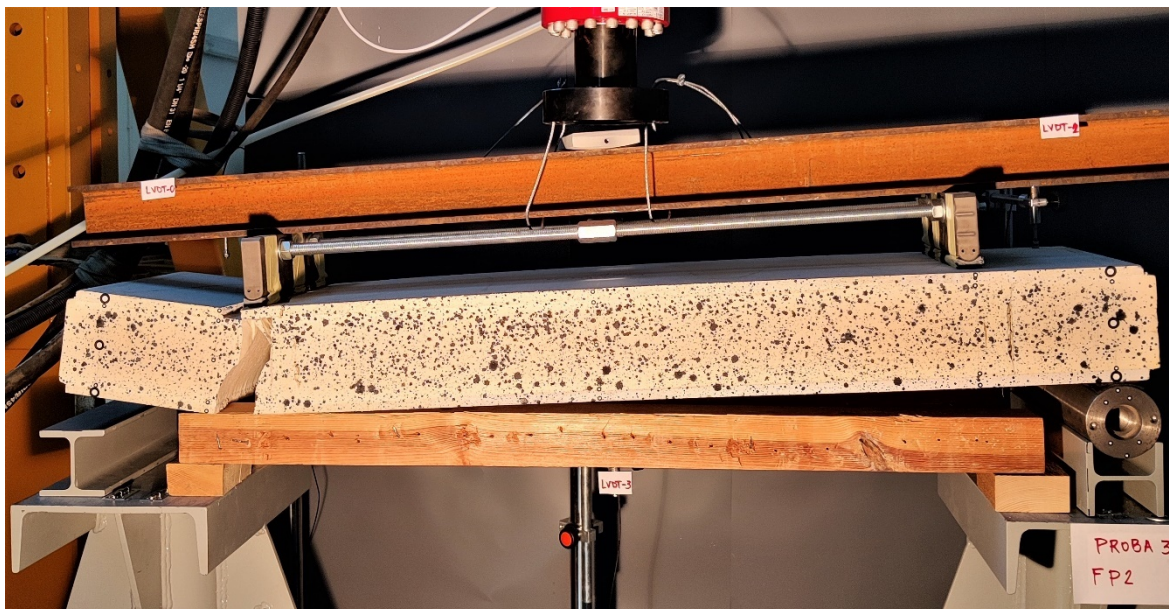
Slika 3.15 Prikaz pukotine na uzorku P3-Fp2-45

Dimenzije ispitanih uzoraka prikazane su u tablici 3.5 u poglavlju 3.2.1., a uzorak P3-Fp2-45 prikazan je na slici 3.16. Izmjerena sila na aktuatoru neposredno prije sloma uzorka P3-Fp2-45 iznosi 10,495 kN.



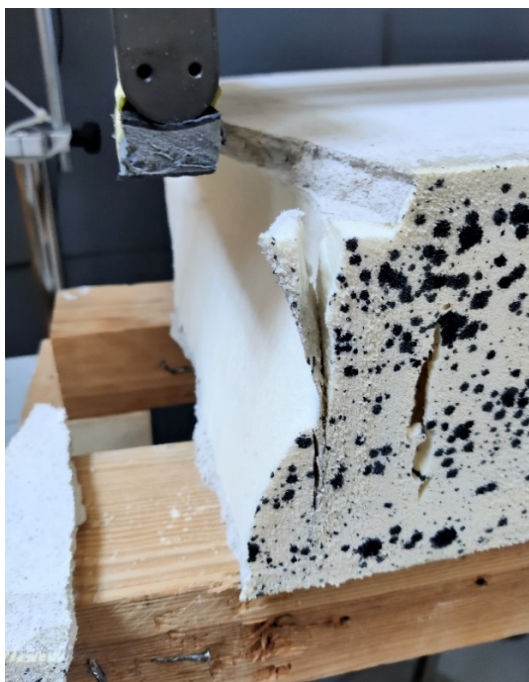
Slika 3.16 Prikaz uzorka P3-Fp2-45 prije početka ispitivanja

Mehanizam sloma uzorka P3-Fp2-45 je slom savijanjem gdje je prvo došlo do vlačnog sloma donje obloge te nakon toga do sloma jezgre i gornje obloge. Uzorak nakon sloma prikazan je na slici 3.17., a vidljivo je kako su utjecaj na širenje pukotine imali kartosnki i plastični umeci koji služe kao distanceri između dviju gips-vlaknastih ploča u fazi izrade uzorka.



Slika 3.17 Prikaz slomljenog uzorka P3-Fp2-45

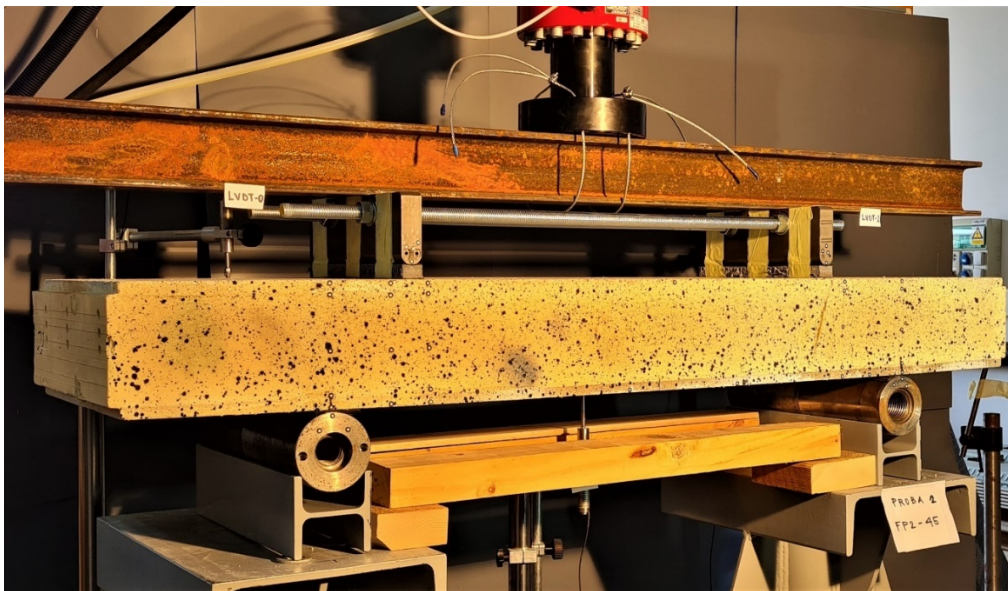
Kartonski umetak vidljiv je slici 3.18.



Slika 3.18 Prikaz sloma uzorka P3-Fp2-45 i kartonskog umetka

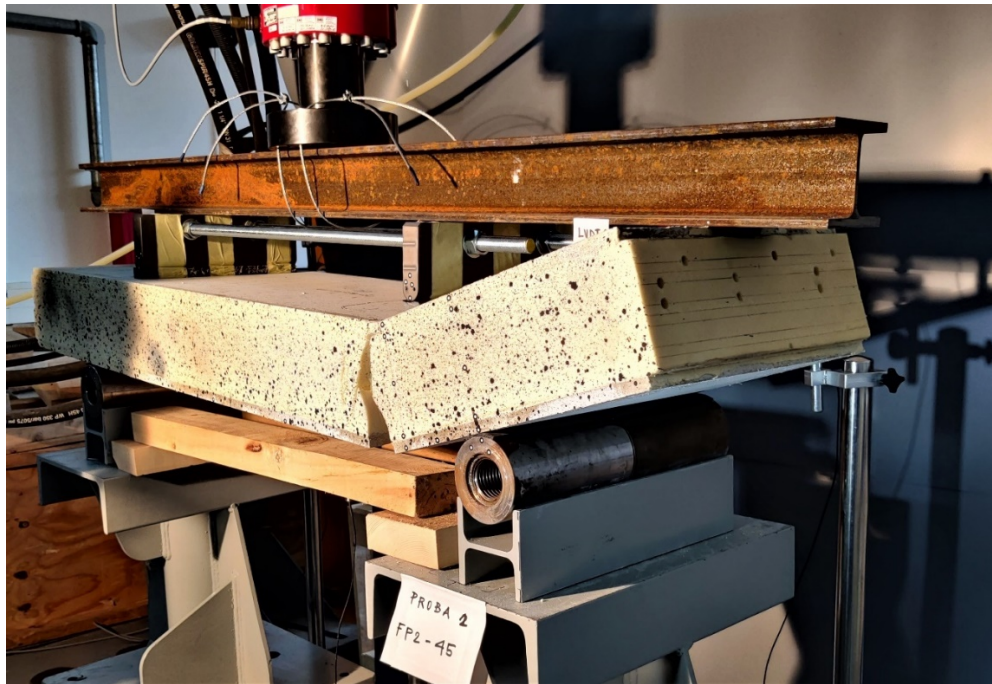
Obzirom da je očekivani mehanizam sloma bio posmični slom u jezgri, a do kojeg nije došlo, prionjivost između komponenti sendvič panela je svejedno ostala očuvana ako se zanemari komadić koji se odlomio. Kako bi na drugom uzorku dobili posmični slom u jezgri, odlučeno je dodatno smanjiti udaljenost oslonca u odnosu na djelujuće opterećenje za 45 mm te nova udaljenost od oslonca iznosi 130 mm. To je najmanja moguća udaljenost koja je jednaka debljini jezgre, a proizlazi iz pretpostavke da se sile šire jezgrom pod kutom od 45 stupnjeva, stoga bi vrijednost manja od 130 mm rezultirala prijenosom sile direktno u oslonce.

Zbog ne posjedovanja dovoljno dugih navojnih šipki, distancera prijenosnika opterećenja, raspon oslonaca smanjen je s 1420 mm na 1000 mm. Novo postavljene sustav s uzorkom P2-Fp2-45 prikazan je na slici 3.19.



Slika 3.19 Prikaz uzorka P2-Fp2-45 prije ispitivanja

Maksimalna sila pri slomu uzorka P2-Fp2-45 bila je 11.13 kN izmjerena na aktuatoru, a slom je i ovoga puta ponovno bio uzorkovan savijanjem. Možemo zaključiti kako zbog obloga relativno male otpornosti na vlak i savijanje od 2.4 MPa i 5.8 MPa koje su pritom i krte, nije došlo do čistog posmičnog sloma u pjenu te bi raspon oslonaca morao biti jako mali. Ponašanje jezgre pokazalo se bolje od očekivanog te jezgra sigurno ima veću posmičnu čvrstoću od pretpostavljene.



Slika 3.20 Prikaz sloma uzorka P2-Fp2-45

Slomu uzorka P2-Fp2-45 također je doprinijela kosa pukotina pozicionirana s desne strane uzorka ispod prijenosnika opterećenja. Pukotina je također bila prisutna prije ispitivanja, a nastala je tijekom proizvodnje.



a)

b)

Slika 3.21 Prikaz pukotine a) prije i b) nakon sloma uzorka P2-Fp2-45

3.2.6. Rezultati ispitivanja prionjivosti – savijanje panela

Za svaki uzorak prikazani su dijagrami odnosa sile [N] i pomaka [mm], dijagrami pomaka u vremenu te maksimalne vrijednosti sile i pomaka pri slomu s prikazanim oblikom sloma. Vrijednosti progiba i pomaka dobivene optičkim mjerenjima uspoređene su s mjerenjima pomoću LVDT uređajima te proračunskim vrijednostima dobivenim normom ASTM C393/C393M [17].

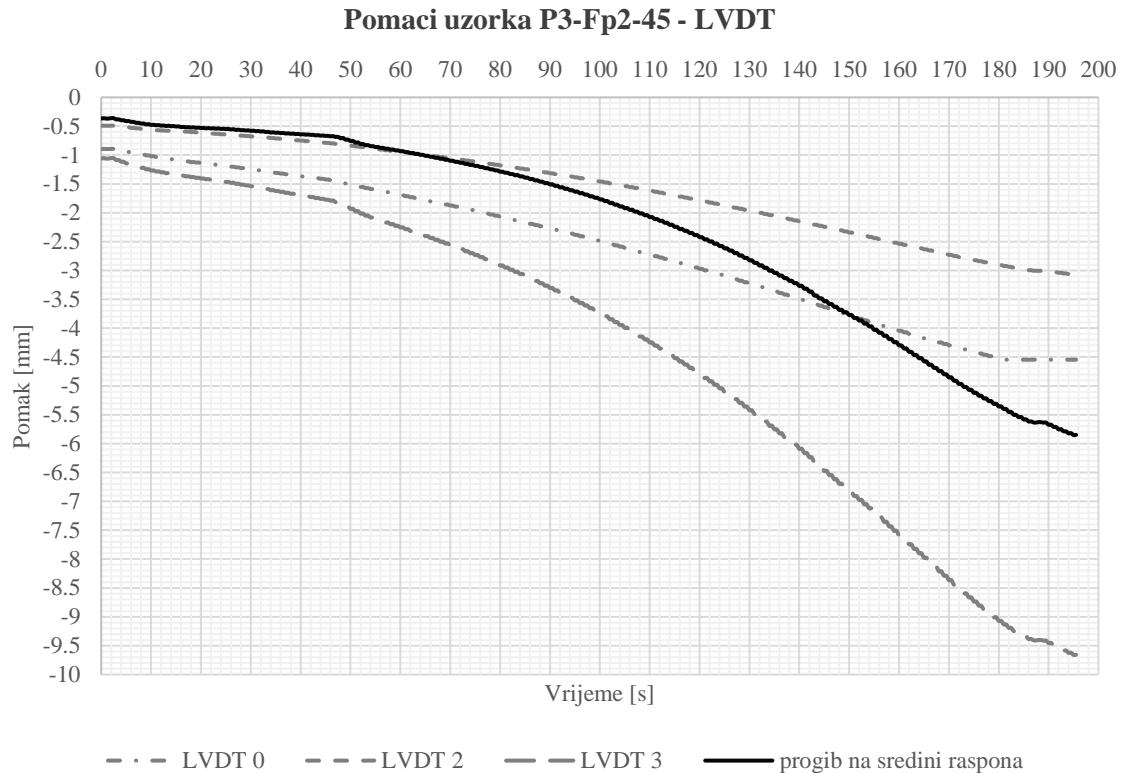
3.2.6.1. Uzorak P3-Fp2-45

Dimenzije uzorka dane su u tablici 3.5 te ponovno ovdje u milimetrima u tablici 3.6

Tablica 3.6 Dimenzije uzorka P3-Fp2-45

Uzorak	duljina, l [mm]	širina, b [mm]	debljina, d [mm]	jezgra, c [mm]	obloge, t [mm]	Masa [kg]
P3-Fp2-45	1492,7	396,7	159,3	129,3	15	25,98

Pomaci mjereni LVDT mjernim uređajima prikazani su na dijagramima (slika 3.22).



Slika 3.22 Dijagram pomaka uzorka P3-Fp2-45

Najveći progib na sredini uzorka iznosi: $w_s = 5,85 \text{ mm}$

Konačni progib na sredini raspona uzorka w_s prikazan punom linijom na (slici 3.22), mora se dobiti računski prema izrazu 3.19.

$$w_s = \Delta_s - \frac{\Delta_l + \Delta_d}{2} \quad (3.19)$$

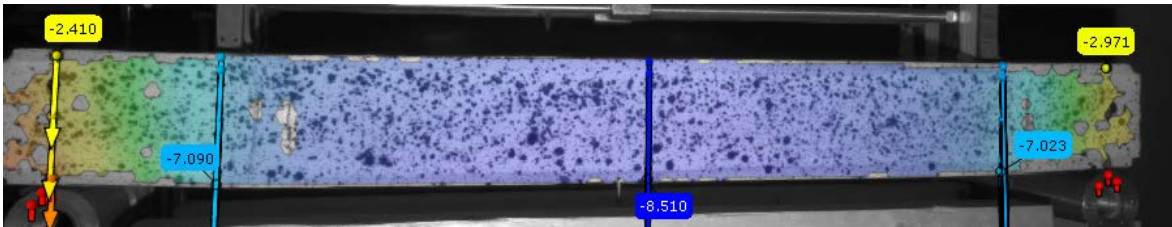
gdje su:

Δ_s – izmjereni pomak na sredini uzorka

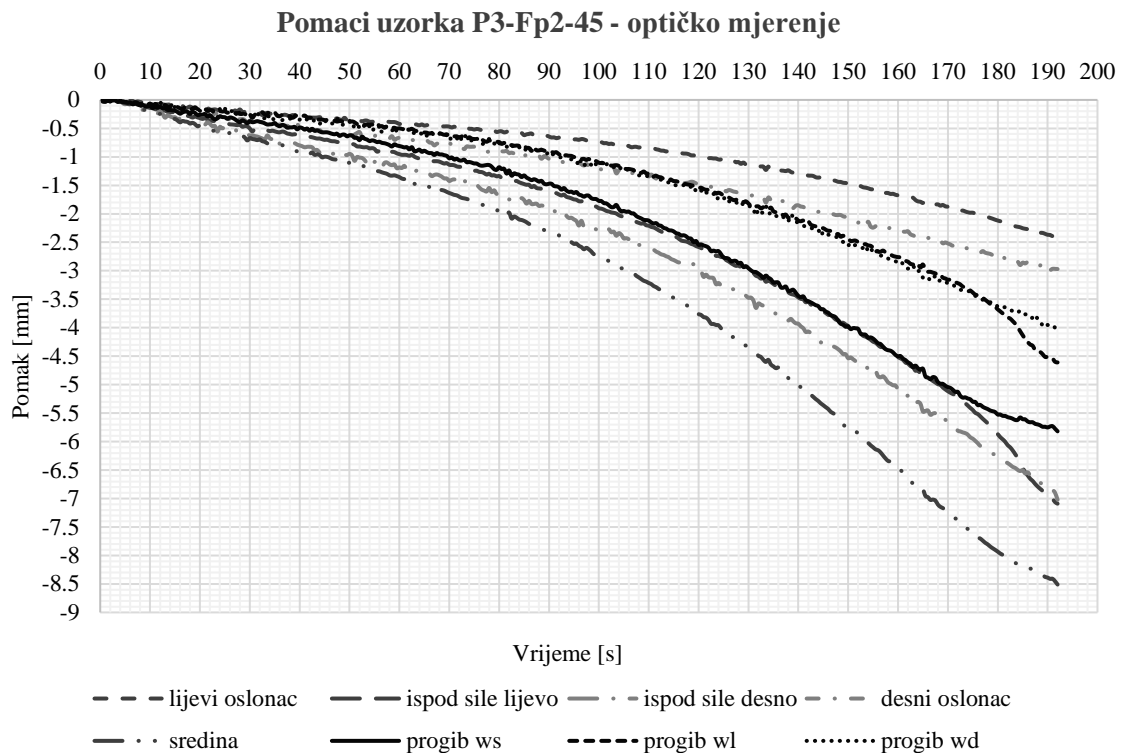
Δ_l – izmjereni pomak na uzorku iznad lijevog oslonca

Δ_d – izmjereni pomak na uzorku iznad desnog oslonca

Korištenjem 3D optičkih mjerenja moguće je izmjeriti pomake na cijeloj prednjoj površini uzorka, stoga su ovom metodom izmjereni pomaci kao i LVDT mjernim uređajima za provjeru, ali i pomaci na mjestima ispod nanesenog opterećenja.



Slika 3.23 Pomaci izmjereni u GOM correlate 2020 softveru



Slika 3.24 Pomaci uzorka P3-Fp2-45 - optičko mjerenje

Najveći progib na sredini uzorka iznosi: $w_s = 5,82 \text{ mm}$

Kod optičkog mjerenja izmjeren je i pomak točki ispod prijenosnika opterećenja, stoga je moguće izračunati progibe na tim mjestima pomoću izraza 3.20 i 3.21.

$$w_l = \Delta_1 - \Delta_d - (\Delta_l - \Delta_d) * \frac{a_1 + l_1}{S} \quad (3.20)$$

i

$$w_d = \Delta_2 - \Delta_d - (\Delta_l - \Delta_d) * \frac{a_2}{S} \quad (3.21)$$

gdje su:

Δ_1 – izmjereni pomak na mjestu ispod lijevog prijenosnika opterećenja

Δ_l – izmjereni pomak na uzorku iznad lijevog oslonca

Δ_d – izmjereni pomak na uzorku iznad desnog oslonca

w_l – progib na mjestu ispod lijevog prijenosnika opterećenja

w_d – progib na mjestu ispod desnog prijenosnika opterećenja

a_1 – udaljenost od lijevog oslonca do lijevog prijenosnika opterećenja

a_2 – udaljenost od desnog oslonca do desnog prijenosnika opterećenja

l_1 – raspon između prijenosnika opterećenja

S – raspon oslonaca

S obzirom da udio težine potrebnih dodataka za prijenos opterećenja na uzorak premašuje težinu samog uzorka potrebno je uračunati doprinos te iste težine te dodati na maksimalnu silu izmjerenu na aktuatoru.

Tablica 3.7 Dodatna težina na uzorku P3-Fp2-45

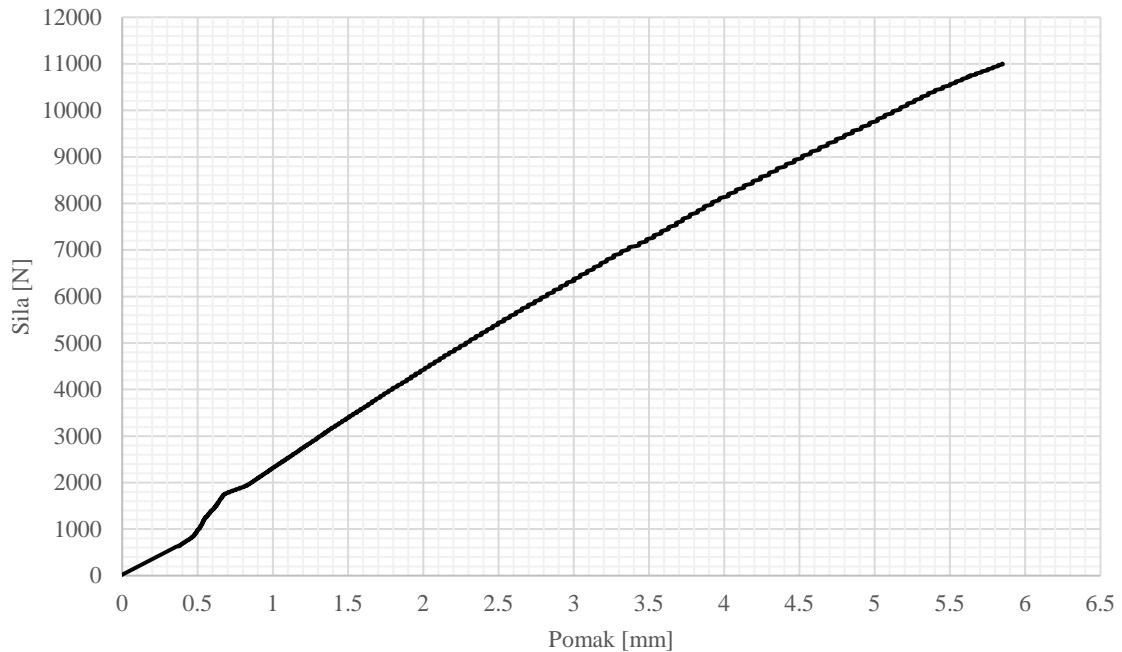
	Prijenosnik 1	HEA 100 profil	Prijenosnik 2	Ukupno
Težina [N]	48,64	285,47	176,13	510,24

Promatrajući 3D optička mjerenja ustanovljeno je da su pomaci ispod lijeve i desne sile na uzorak unutar 1% razlike, što se može smatrati jednolikom raspodjelom opterećenja na uzorak.

Tablica 3.8 Ukupna sila na uzorak P3-Fp2-45

	Aktuator	Dodatna težina	Ukupno
Sila na uzorak [N]	10495	510,24	11005,24

Dijagram sila [N] - pomak [mm]



Slika 3.25 Dijagram sila [N] - pomak [mm]

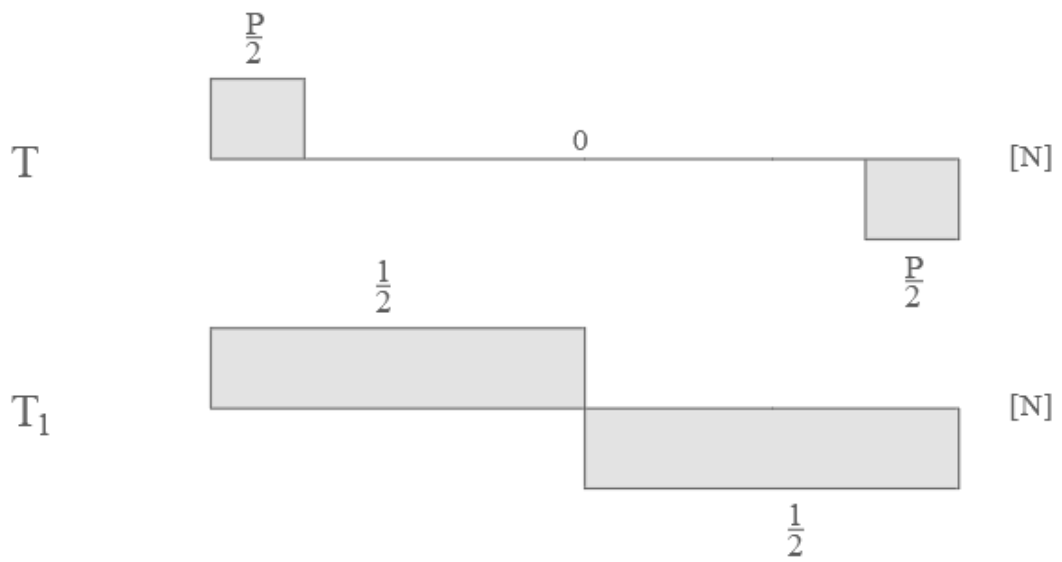
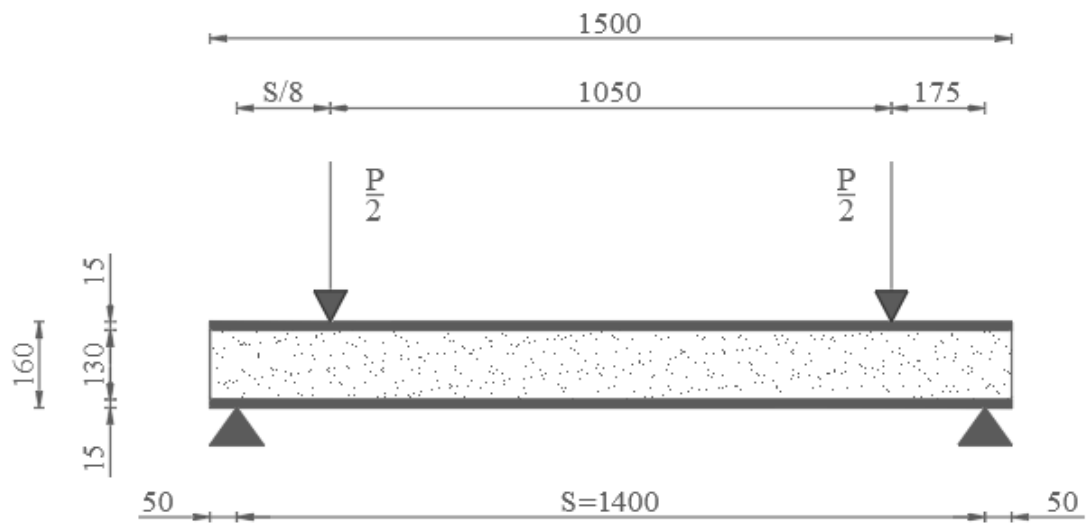
Strmiji nagib na dijagramu sila [N] – pomak [mm] (slika 3.25) na rasponu sile od 1000 do 2000 N predstavlja stlačivanje tvrdih guma postavljenih ispod djelujućeg opterećenja kako bi spriječili pojavu utiskivanja u uzorak. Prema normi ASTM C393/C393M [17] proračunate su vrijednosti normalnih naprezanja u oblogama, posmičnih naprezanja u jezgri te progiba uzoraka. S obzirom da je raspon opterećenja bio manji od standardnog testa s polovicom raspona, potrebno je srediti izraze 2.8 i 2.14 za raspon opterećenja od tri četvrtina raspona. Izraz za normalna naprezanja uzorka P3-Fp2-45 izgleda:

$$\sigma_f = \frac{P \cdot S}{8 \cdot b \cdot t \cdot (d+c)}, \quad (3.22)$$

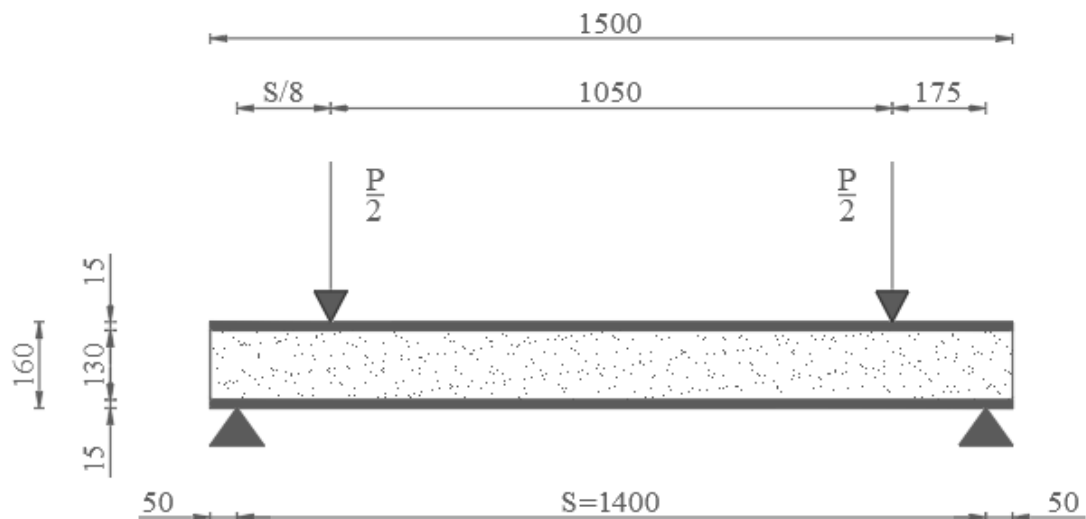
te izraz za posmična naprezanja u jezgri:

$$\tau_{c,max} = \frac{P}{[d+c] \cdot b}, \quad (3.23)$$

Izrazi za progibe u normi ASTM C393/C393M dani su samo za standardne raspone oslonaca i opterećenje, stoga je potrebno odrediti izraz za progib na sredini raspona kada su sile od oslonaca udaljene za $S/8$. Za određivanje izraza korištena je metoda Vereščagin.



Slika 3.26 Dijagrami poprečnih sila uzorka te od jedinične sile na sredini raspona



Slika 3.27 Dijagrami momenata savijanja uzorka te od jedinične sile na sredini raspona

Izraz za progib na sredini raspona sada se može dobiti:

$$w_s = \frac{1}{E I_{eq}} * \left[\frac{PS}{16} * \frac{S}{8} * \frac{1}{2} * \frac{2}{3} * \frac{1}{8} * \frac{S}{4} * 2 + \frac{PS}{16} * \frac{3S}{4} * \frac{S}{4} \right] + \frac{1}{S_{eq}} * \left[\frac{P}{2} * \frac{S}{8} * \frac{1}{2} * 2 \right]$$

$$w_s = \frac{1}{E I_{eq}} * \left[\frac{PS^3}{6144} + \frac{3PS^3}{256} \right] + \frac{1}{S_{eq}} * \left[\frac{PS}{16} \right]$$

$$w_s = \frac{73PS^3}{6144E I_{eq}} + \frac{PS}{16S_{eq}} \quad (3.24)$$

Korištenjem izraza 3.19, 3.20 i 3.21 te vrijednostima iz tablice 3.6 dobivene su vrijednosti u sljedećoj tablici 3.9.

Tablica 3.9 Proračunate vrijednosti naprezanja i progiba prema ASTM C393/C393M [17]

Uzorak P3-Fp2-45			
sila na uzorku	P	11005,24	N
modul elastičnosti obloge	E_f	5800	MPa
modul posmika jezgre	G_c	2,87	MPa
razmak oslonaca	S	1420	mm
naprezanje u oblogama	σ	1,14	MPa
posmično naprezanje u jezgri	τ	0,096	MPa
svojna krutost	EI_{eq}	3,61E+11	Nmm ²
posmična krutost	S	1,83E+05	N
progib od savijanja	w_b	1,04	mm
progib od posmika	w_s	5,33	mm
ukupni progib na sredini	w	6,37	mm

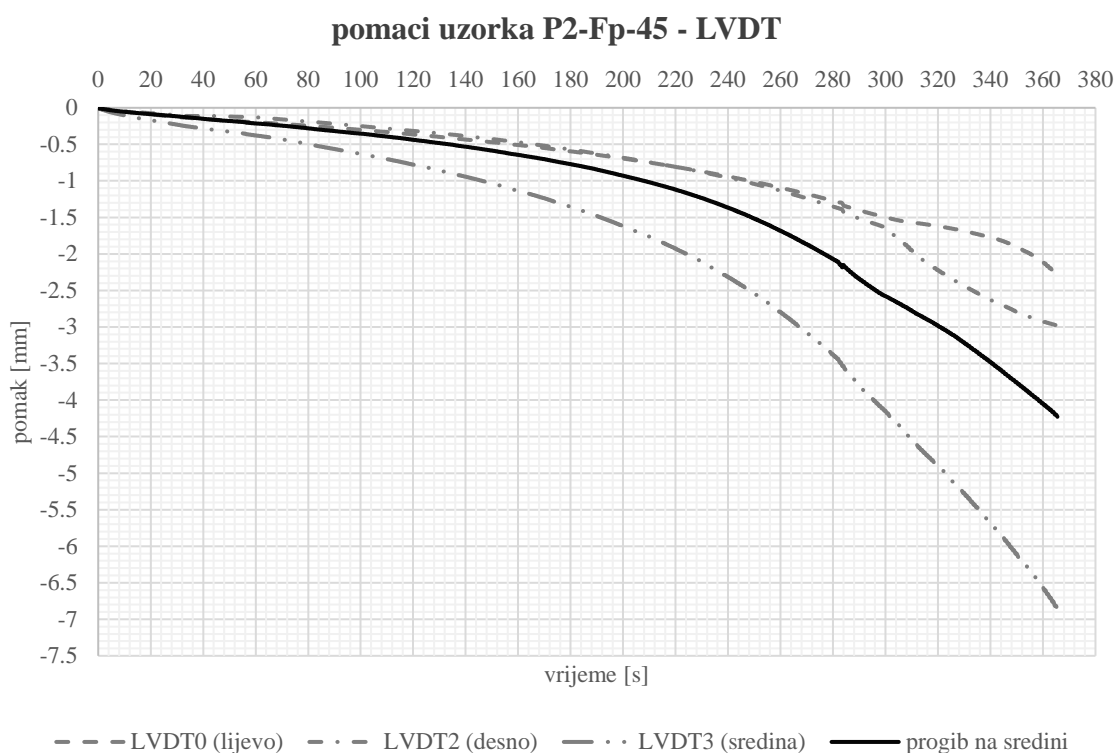
3.2.6.2. Uzorak P2-Fp2-45

Dimenzije uzorka dane su u tablici 3.5 te ponovno ovdje u milimetrima u tablici 3.10.

Tablica 3.10 Dimenzije uzorka P2-Fp2-45

Uzorak	duljina, l [mm]	širina, b [mm]	debljina, d [mm]	jezgra, c [mm]	obloge, t [mm]	Masa [kg]
P2-Fp2-45	1492,9	398,3	159,6	129,6	15	26,00

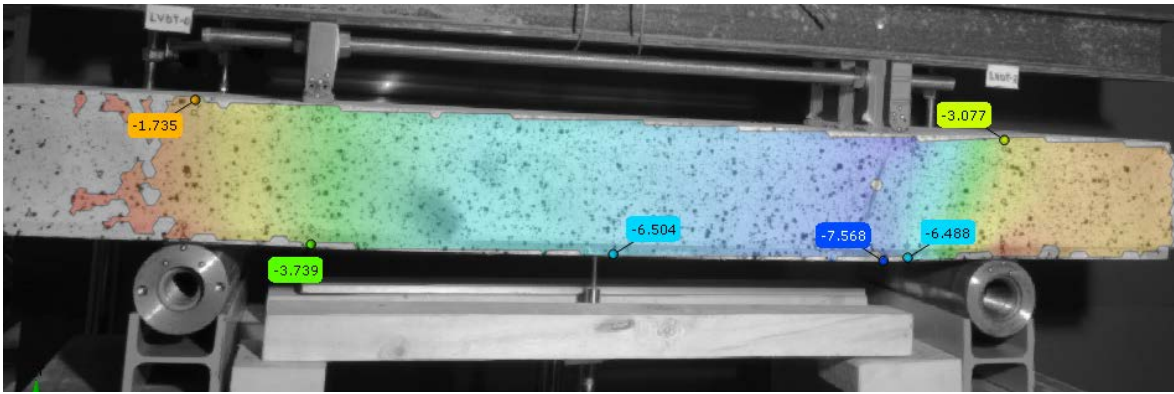
Pomaci mjereni LVDT mjernim uređajima prikazani su na sljedećem dijagramu:



Slika 3.28 Dijagram pomaka uzorka P2-Fp2-45 – LVDT

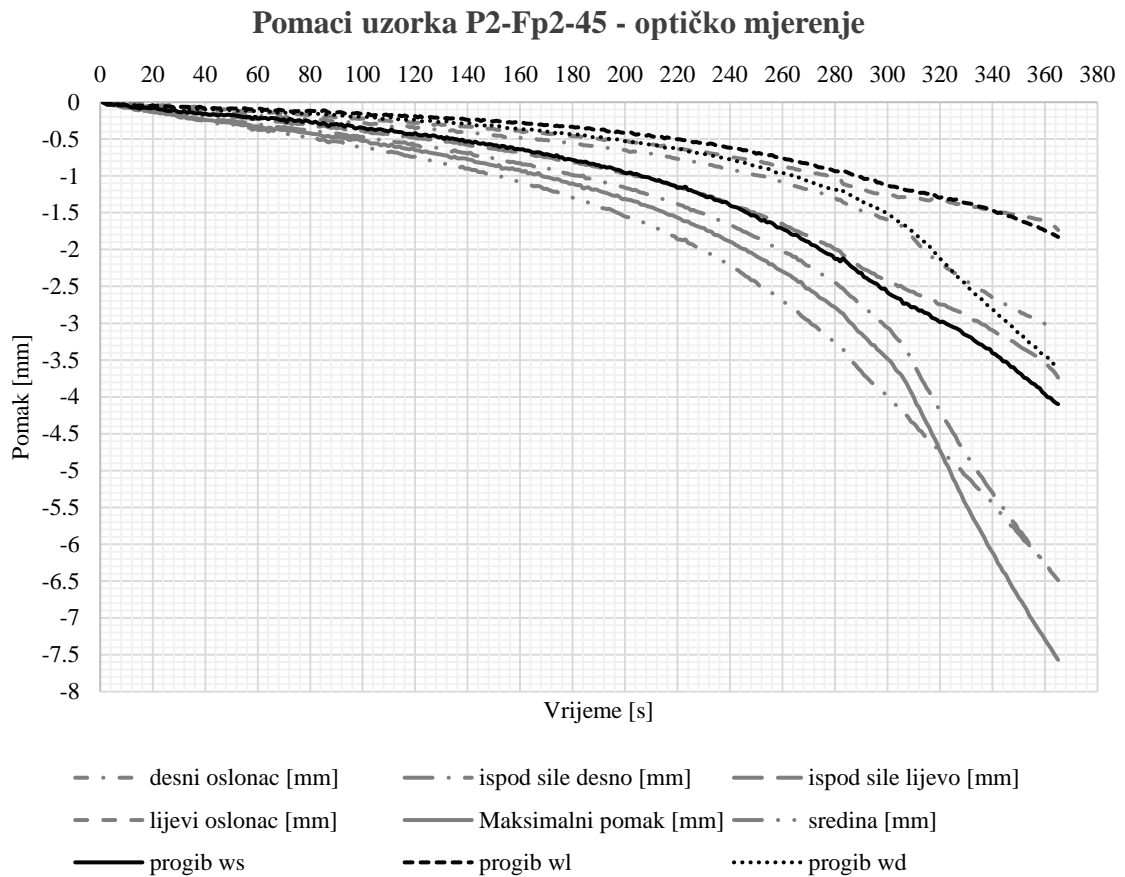
Najveći progib na sredini uzorka iznosi: $w_s = 4,23 \text{ mm}$

Kao i kod prethodnog uzorka korištena su 3D optička beskontaktna mjerenja pomoću kojih su izmjerene dodatne vrijednosti pomaka (slika 3.29). Kod uzorka P2-Fp2-45, a kao što je i vidljivo iz 3D optičkih mjerenja pomaci ispod lijeve i desne sile znatno se razlikuju. To se može pripisati manjoj krutosti uzorka na tom mjestu, ali i većoj površini pri prijenosu sile iz aktuatora na HEA profil bez podloške R250 sa slike 3.8.



Slika 3.29 Pomaci izmjereni u GOM correlate 2020 softveru

Najveći progib na sredini uzorka 3D optičkom metodom mjerenja iznosi: $w_s = 4,09$ mm



Slika 3.30 Pomaci uzorka P2-Fp2-45 - optičko mjerenje

S obzirom da udio težine potrebnih dodataka za prijenos opterećenja na uzorak premašuje težinu samog uzorka potrebno je uračunati doprinos te iste težine te dodati na maksimalnu silu izmjerenu na aktuatoru.

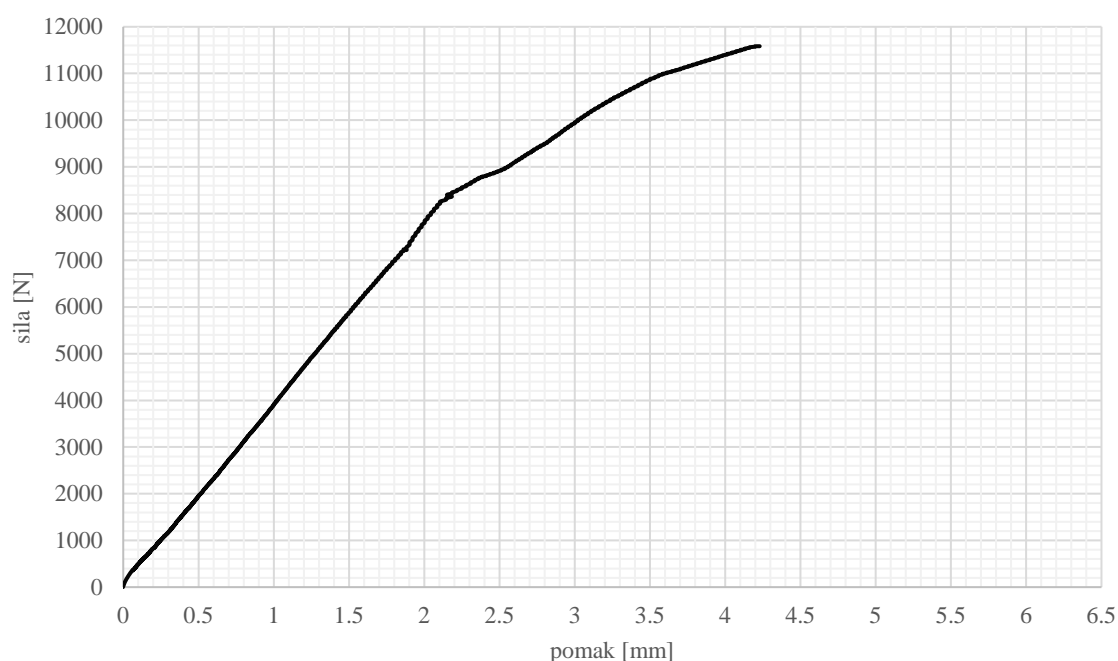
Tablica 3.11 Dodatna težina na uzorku P2-Fp2-45

	HEA 100 profil	Prijenosnik 2	Ukupno
Težina [N]	285,47	167,30	452,77

Tablica 3.12 Ukupna sila na uzorak P2-Fp2-45

	S aktuatora	Dodatna težina	Ukupno
Sila na uzorak [N]	11130	452,77	11582,77

Dijagram sila [N] - pomak [mm]



Slika 3.31 Dijagram sila [N] - pomak [mm]

Odnosom razlike u pomacima na mjestu ispod lijeve i desne sile moguće je pretpostaviti vrijednosti sila koje djeluju na uzorak. Pretpostavimo li da je ukupna sila prouzročila ukupni pomak jednak zbroju pomaka ispod sile lijevo i desno. Udio pojedinog pomaka u ukupnom pomaku jednak je tada postotku sile koja djeluju na tu stranu uzorka.

$$P_d = P * \frac{w_d}{w_l + w_d} \quad (3.25)$$

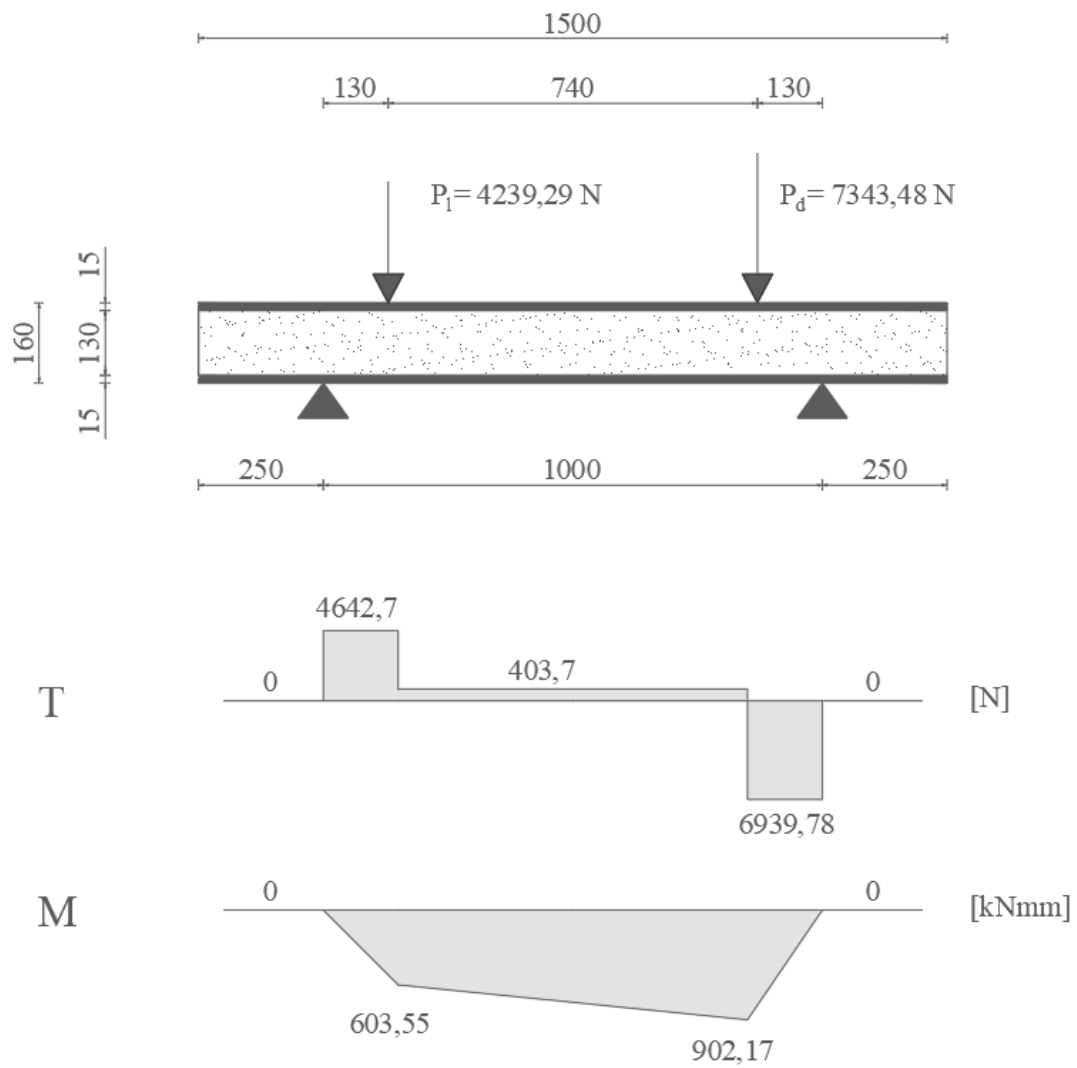
Tablica 3.13 Pomaci ispod sila s udjelom prenesene sile

	w_l [mm]	w_d [mm]	$\frac{w_d}{w_l + w_d}$	$\frac{w_l}{w_l + w_d}$
Pomaci	3,739	6,488	0,634	0,366

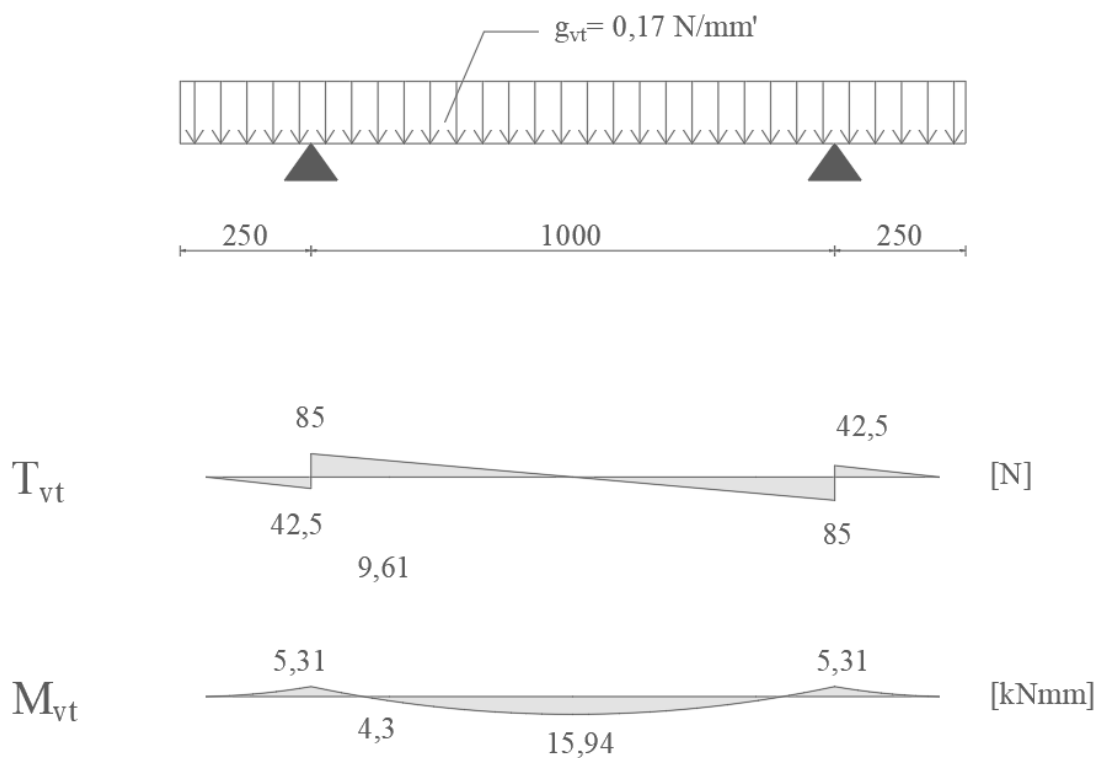
Tablica 3.14 Vrijednosti sila na uzorku P2-Fp2-45 lijevo i desno

	Ukupna sila, P	Sila lijevo, P_l	Sila desno, P_d
Sila [N]	11582,77	4239,29	7343,48

S obzirom da je do sloma uzorka došlo na desnoj strani, samo će naprezanja na desnoj strani biti razmatrana. Kako raspodjela opterećenja nije jednaka, izrazi za naprezanja iz prethodnog poglavlja nisu primjenjiva te je potrebno odrediti točne dijagrame momenata na uzorku P2-Fp2-45. Također zbog većih prepusta sendvič grede potrebno je uključiti utjecaj vlastite težine uzorka na konačne rezultate dijagrama unutarnjih sila.



Slika 3.32 Dijagrami unutarnjih sila od opterećenja



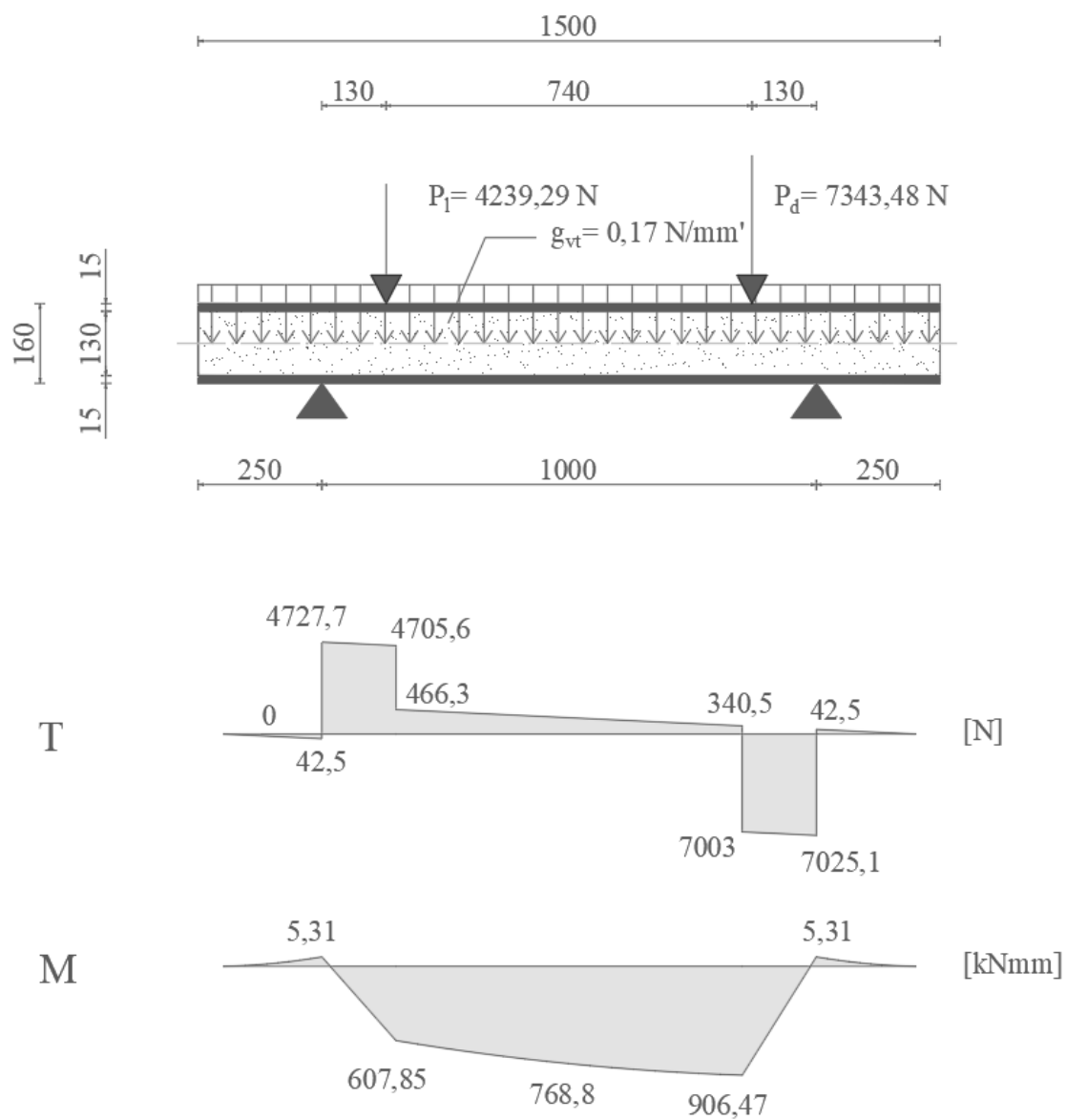
Slika 3.33 Dijagrami unutarnjih sila od doprinosa prepusta

Na slikama 3.32 – 3.34 prikazani su dijagrami unutarnjih sila, utjecaj prepusta nije značajan, no svejedno je uračunat kako bismo eliminirali jedan faktor pogreške.

Vrijednosti mjerodavne poprečne sile i momenta savijanja dane su u tablici 3.15.

Tablica 3.15 Maksimalne vrijednosti poprečne sile i momenta savijanja

	Poprečna sila, P [N]	Moment savijanja, M [kNmm]
Maksimalne vrijednost	7003	906,47



Slika 3.34 Konačni dijagrami unutarnjih sila

Korištenjem izraza 2.3, 2.8 te 2.14 te vrijednostima iz tablice 3.9 i 3.14 dobivene su vrijednosti u tablici 3.16.

Tablica 3.16 Proračunate vrijednosti naprezanja i progiba prema ASTM C393/C393M (9)

Uzorak P2-Fp2-45			
sila koja djeluje na uzorak	P_{max}	11582,77	N
moment savijanja	M	906470	Nmm
posmična sila	P	7003	N
modul elastičnosti obloge	E_f	5800	MPa
modul posmika jezgre	G_c	2,87	MPa
razmak oslonaca	S	1000	mm
naprezanje u oblogama	σ	1,05	MPa
posmično naprezanje u jezgri	τ	0,122	MPa
svojna krutost	EI_{eq}	3,64E+11	Nmm ²
posmična krutost	S	1,84E+05	N
progib od savijanja	w_b	0,38	mm
progib od posmika	w_s	3,93	mm
ukupni progib na sredini	w	4,30	mm

3.2.6.3. Usporedba rezultata

Usporedbom rezultata na uzorcima P3-Fp2-45 i P2-Fp2-45 prikazane su razlike u napreznjima te razlike u mjerenim vrijednostima progiba i onima izračunatim prema normi ASTM C393/C393M [17]. Iz usporedbe rezultata napreznja vidljivo je kako se smanjenjem raspona djelujućeg opterećenja i raspona oslonaca dobivaju veća posmična napreznja, no zbog obloga relativno male vlačne čvrstoće to nije bilo dovoljno. Napreznje je manje od 2.4 MPa iz tablice 3.17, no u primjedbi 10 norme ASTM C393/C393M [17], piše da izračunato napreznje u oblogama σ , ne predstavlja maksimalnu čvrstoću obloge, stoga su ovakvi rezultati mogući. Proračunski progibi se razlikuju od izmjerenih progiba, zbog pretpostavki o modulu posmika jezgre koji nije mogao biti dobiven ispitivanjem u vrijeme pisanja ovog diplomskog rada.

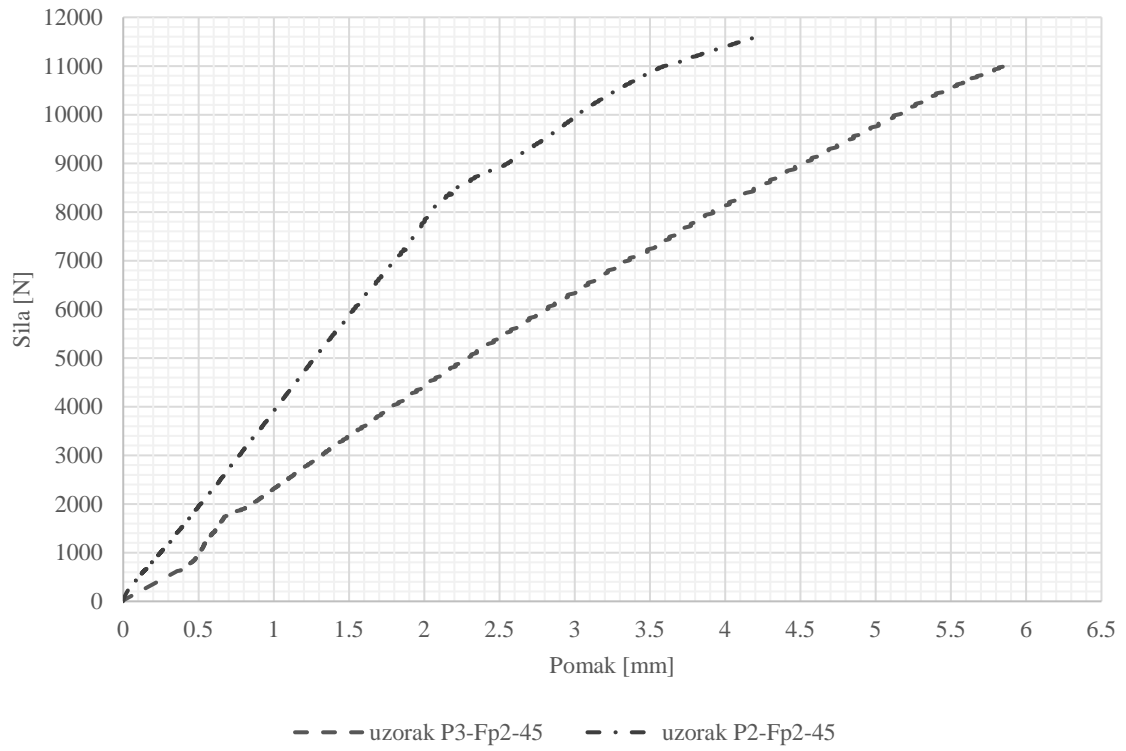
Tablica 3.17 Usporedba rezultata napreznja

Uzorak	P3-Fp2-45	P2-Fp2-45
σ [MPa]	1,14	1,05
τ [MPa]	0,096	0,122
Mehanizam sloma	savijanje	savijanje

Tablica 3.18 Usporedba rezultata progiba

Uzorak	P3-Fp2-45	P2-Fp2-45
ASTM C393/C393M [mm]	6,37	4,30
Ispitivanje [mm]	5,85	4,22
Razlika rezultata [%]	1,09	1,018

Dijagram sila [N] - pomak [mm]



Slika 3.35 Dijagram sila [N] - pomak [mm] - usporedba

4. NUMERIČKA ANALIZA SENDVIČ PANELA

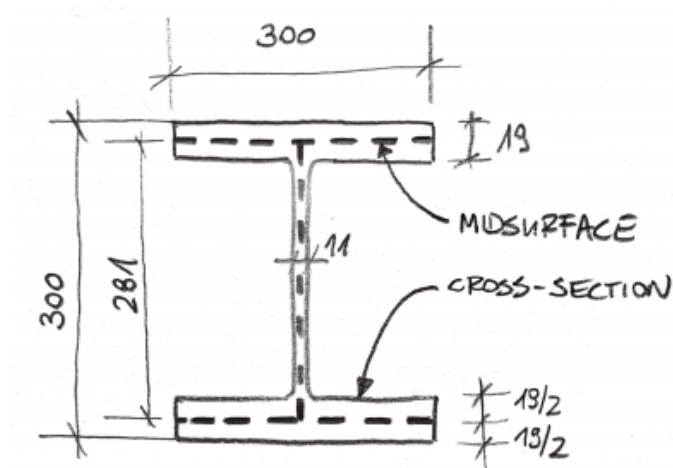
Numerička analiza sendvič panela pomoću metode konačnih elemenata (MKE ili FEM) uvelike se koristi pri modeliranju i analizi sendvič panela jer omogućuje korištenje kompleksnih oblika opterećenja i rubnih uvjeta [28]. Druge metode su limitirane kada se dosegnu nestandardni uvjeti [28]. Počeci analize metodom konačnih elemenata datiraju čak u doba poznatog matematičara Euler-a iz 16 stoljeća, ali ozbiljnije korištenje metode spominje se u radovima Schellbach-a iz 1851 godine. Tek 1950-ih godina je metoda konačnih elemenata zaživjela primjenom u stvarnim situacijama. Courant (1943.) je izračunao torzijsku deformaciju šuplje osovine podjelom poprečnog presjeka na trokute te konačan rezultat dobio interpolacijom pojedinih rezultata [29]. Pojavom računala razvijeni su programi te je primjena sve raširenija u poljima od autoindustrije, građevine, termičke analize, dinamike fluida, nautike, svemirskih letjelica [30]. U ovom diplomskom radu ćemo se površinski dotaknuti teme metode konačnih elemenata te opisati ukratko potrebne pojmove koje se spominju u nastavku rada.

Elementi

Elementi od kojih se model može sastojati su: čvorovi, štapni elementi, pločasti elementi i solid (*eng. solid*) elementi. Bilo koji od elemenata mora biti povezan čvorom kako bi model bio valjan ukoliko to nije slučaj, velike su vjerojatnosti da simulacija neće biti uspješna.

Štapni elementi koriste se za štapne modele, rešetkaste konstrukcije i sl., a njihova jednostavnost idealna je za velike konstrukcije jer se oni dijele samo na segmente. Proračun ovakvih modela relativno je brz.

Pločasti elementi predstavljaju ploču koju čine ploha te 3 ili 4 čvora ovisno o obliku pločastog elementa, odnosno da li je trokutni i kvadratni konačni elementi. Koriste se za tanke materijale, primjerice limove i ploče, detaljne analize spojeva čeličnih i aluminijskih profila i sl. Pločasti elementi su dvodimenzionalni, a predstavljaju plohe koje prolaze težištima poprečnih presjeka.

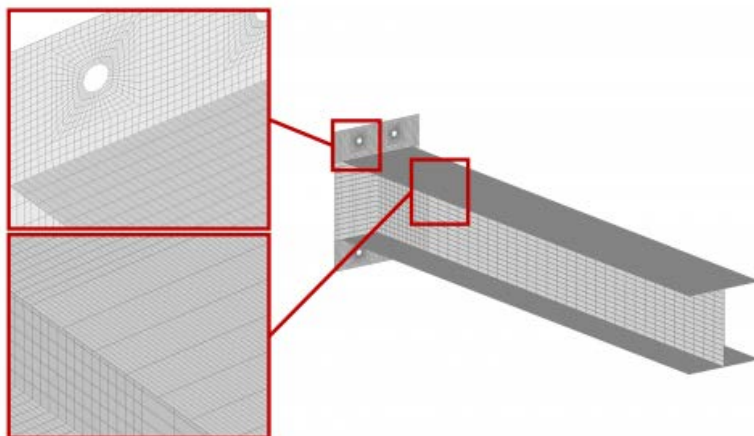


Slika 4.1 Primjer korištenja pločstih elementa za model HEB profila [31]

Solid ili (eng. brick) konačni elementi su trodimenzionalni, a najčešće su oblika kocke gdje se na svakom kutu nalazi čvor. Koriste se za konstrukcije s većom debljinom, primjerice, betonske grede, sendvič paneli, čelični ili aluminijski blokovi i sl. Solid elementi su vremenski najzahtjevniji za proračun.

Mreža (mesh)

Mreža predstavlja skup čvorovima povezanih pločastih ili solid elemenata koji tek tada čine model konstrukcije. Najprecizniji rezultati postižu se pravilnom mrežom odnosno kvadratnom za pločaste elemente i kockastom za solid elemente. Na mjestima gdje se očekuju kompleksniji rezultati, primjerice u područjima diskontinuiteta, mjestima spojeva i sl. potrebno je mrežu napraviti gušćom.



Slika 4.2 Primjer dobro postavljene mreže [31]

Rubni uvjeti

Rubni uvjeti najčešće predstavljaju oslonce koji model čine stabilnim, no rubni uvjeti mogu predstavljati kontaktne plohe, simetrije u određenim smjerovima, blokiranje pomaka nakon određene vrijednosti i sl.

4.1. Metode pristupa modeliranju sendvič panela

Prema (Diab sandwich handbook) [2] dane su preporuke za modeliranje sendvič panela metodom konačnih elemenata. Kako bi se odredila stvarna posmična krutost u FE modelu potrebno je usporediti i provjeriti rezultate FE modela s analitičkim rezultatima ili rezultatima ispitivanja. Pojednostavljenja za jednostavnije modeliranje su donesena uz nekoliko pretpostavki [2]:

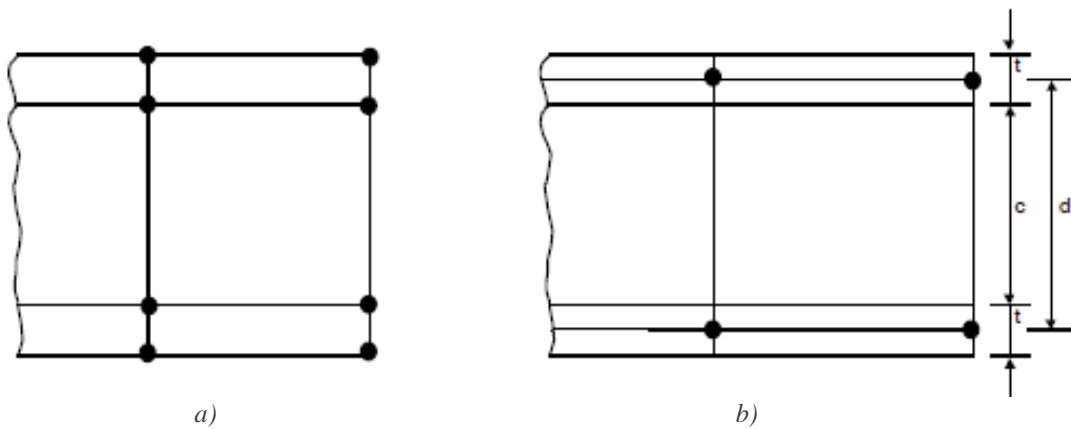
- 1. Naprezanja koja su okomita na plohu sendvič panela zanemariva su u oblogama, a i u jezgri.*
- 2. Materijali jezgre i obloga su izotropni.*
- 3. U većini slučajeva je modul elastičnosti jezgre toliko mali, da je njen doprinos krutosti na savijanje zanemariv.*
- 4. Deformacije su male, stoga je teorija savijanja primjenjiva.*
- 5. Obloge su tanke u odnosu na jezgru, što znači da se lokalna savojna krutost može zanemariti i može se reći da je debljina jezgre c jednaka udaljenosti između težišta dviju obloga.*

FEM model sendvič panela može biti izgrađen na tri različita načina [2]:

- a. Sendvič panel gdje su jezgra i obloge modelirani solid elementima.*
- b. Obloge se modeliraju pločastim elementima, a jezgra solid konačnim elementima.*
- c. Sendvič panel modeliran pločastim konačnim elementima s matematičkim modelom.*

Ukoliko se koriste samo solid elementi, oni će imati istu debljinu obloga i jezgre kao i stvarni sendvič panel. Kod slučaja sendvič panela s jako tankim oblogama može nastati problem jer

se kod solidnih elemenata teži da oni budu pravilni, stoga bi za jako tanke obloge bilo previše elemenata, a vrijeme kalkulacije postalo bi neprihvatljivo.

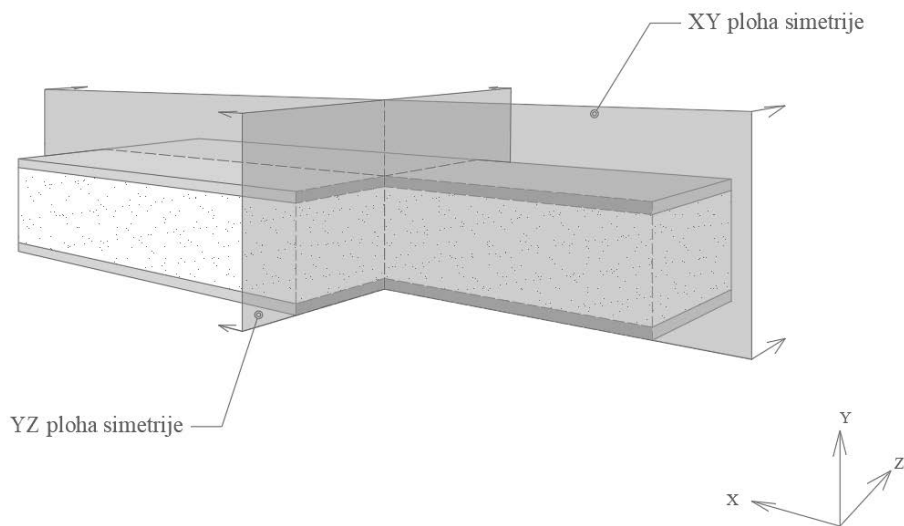


Slika 4.3 Primjer modeliranja a) solidnim elementima, b) solidnim i pločastim elementima

U tom slučaju je racionalnije koristiti pločaste konačne elemente za modeliranje obloga. S obzirom da plohe pločastih elemenata predstavljaju težišne plohe obloga, moraju biti postavljene na međusobnoj udaljenosti: $(c+d)/2$. Tada je debljina jezgre veća za $(d-c)/2$ te je potrebno reducirati posmičnu krutost jezgre reduciranjem modula posmika G_c .

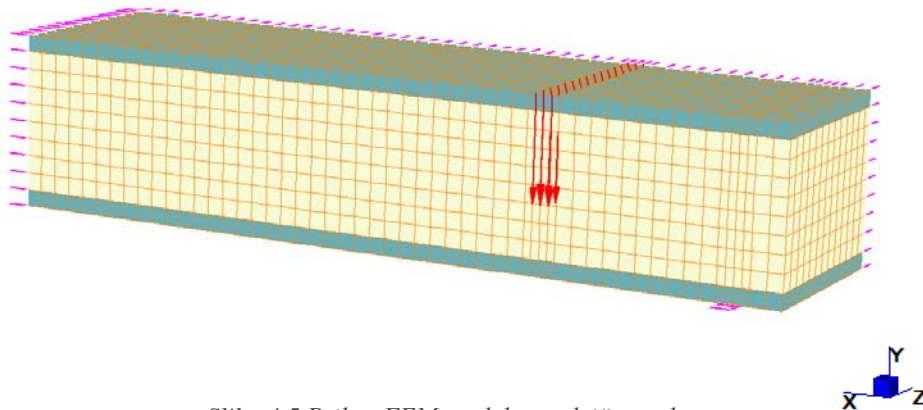
4.2. Numerička analiza sendvič panela

Simulacije kompozitnog panela primjenom MKE provedene su u programskom paketu Straus7, model predstavlja uzorak P3-Fp2-45 i napravljen je od solid (*eng. brick*) elemenata, što znači da su elementi od kojih je načinjena jezgra i elementi od kojih se sastoje obloge, realne debljine. Dimenzije modela su 750x160x200mm. S obzirom da kod ispitivanja nije došlo do otkazivanja prionjivosti, pretpostavlja se da su obloge i jezgra idealno spregnuti. Solid konačni elementi za obloge panela imaju dimenzije 15x15x15 mm, dok su konačni elementi jezgre dimenzija 16.25x15x15 mm zbog debljine jezgre od 130 mm i pravilne raspodjele elemenata.



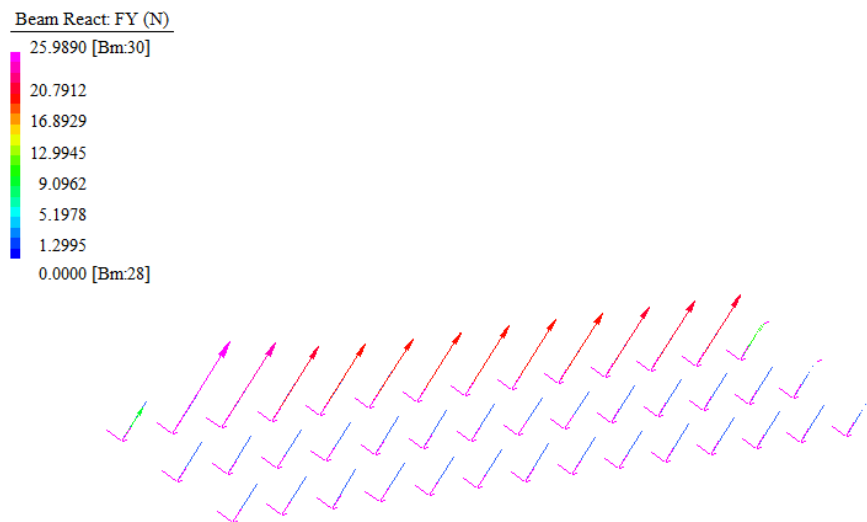
Slika 4.4 Plohe simetrije za modeliranje četvrtine uzorka

Kako bi poboljšali brzinu simulacije, modelirana je samo četvrtina sendvič panela (slika 4.5) koristeći simetrije s obzirom na vertikalne plohe XY i YZ (slika 4.4).



Slika 4.5 Prikaz FEM modela sendvič panela

Djelujuće opterećenje je četvrtina maksimalne sile $P = 11005,24/4 = 2751,31 \text{ N}$, koje je rašireno na 42 čvora kako ne bi došlo do utiskivanja. Na osloncima i mjestima djelujućeg opterećenja mreža konačnih elemenata je gušća te su elementi prepolovljeni s obzirom na os X, a dimenzije tih elemenata su 15x7.5x15mm. Oslonac je formiran kao niz točkastih kontakata krutosti $1 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$ što predstavlja kruti oslonac. Točkasti kontakti također su bili „razmazani“ na širini od 15mm odnosno 42 čvora, no nakon prve analize pokazano je da se sva reakcija prenosi preko jednog reda točkastih kontakata (*slika 4.6*), stoga je ostavljen samo srednji red u osi oslonca za daljnji proračun.

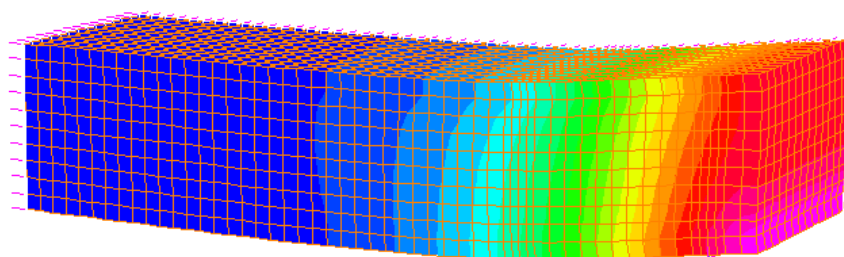
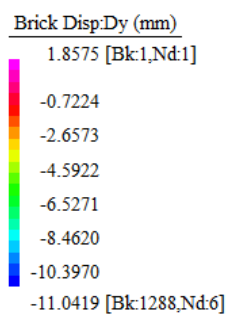


Slika 4.6 Prikaz prijenosa reakcije na točkaste kontakte

Materijali jezgre i obloga su izotropni, prema preporukama iz poglavlja 4.1. Oblogama je zadan modul elastičnosti od 5000 MPa, te elastični materijal. Jezgra je modelirana kao elasto-plastični materijal za dva slučaja. Prvi pomoću bi-lineranog dijagrama i drugi pomoću srednje vrijednosti dijagrama naprezanja – deformacije iz poglavlja 3.1.2. Nelinearna analiza provodi se u 10 inkrementa koji kreću od 10 do 100% vrijednosti sile povećavajući se svakim inkrementom za 10%.

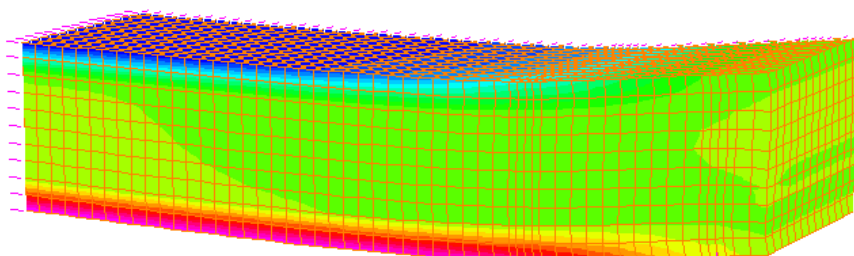
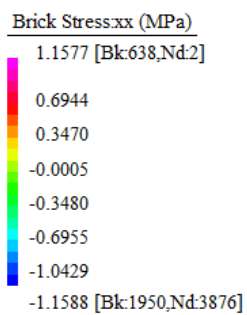
4.2.1. 1. Slučaj: jezgra – bi-linearni dijagram (slika 3.3)

Progib



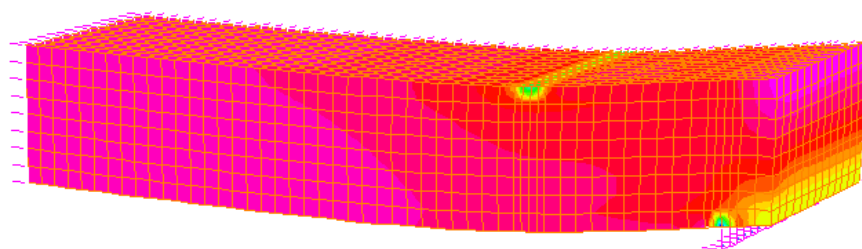
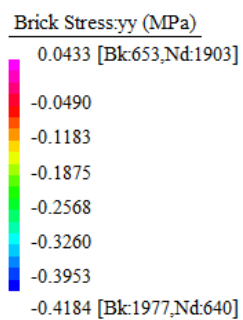
Slika 4.7 Progibi FE modela uzorka P3-Fp2-45 – bi-linearni dijagram

Normalna naprezanja



Slika 4.8 Normalna naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – bi-linearni dijagram

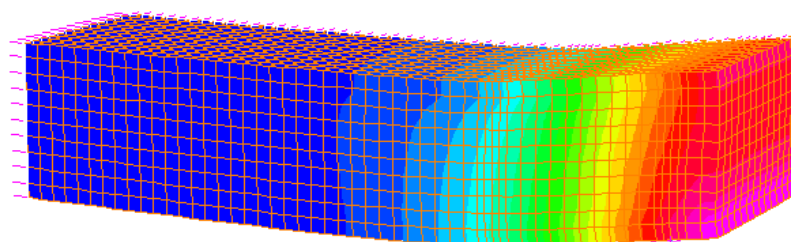
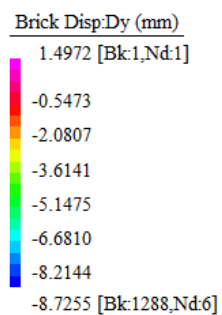
Posmična naprezanja u jezgri



Slika 4.9 Posmična naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – bi-linearni dijagram

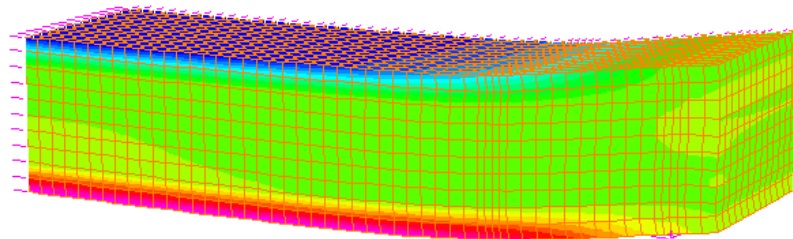
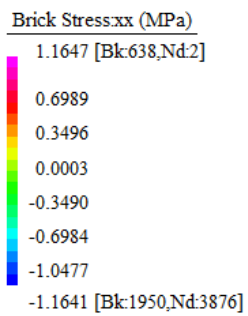
4.2.1. 2. Slučaj: jezgra – realni dijagram T45-SV (slika 3.2)

Progib



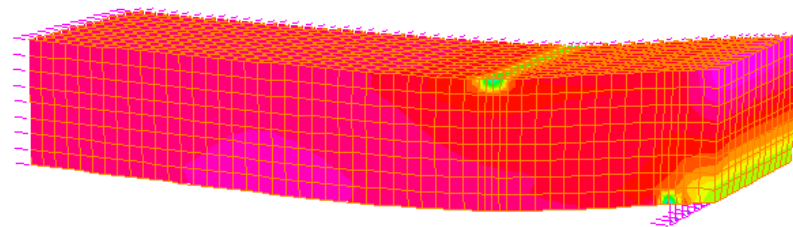
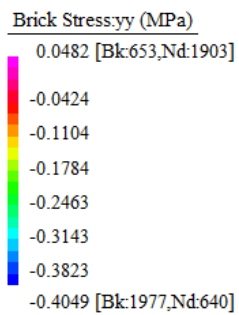
Slika 4.10 Progibi FE modela uzorka P3-Fp2-45 – realni dijagram

Normalna naprezanja



Slika 4.11 Normalna naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – realni dijagram

Posmična naprezanja u jezgri



Slika 4.12 Posmična naprezanja FE modela uzorka P3-Fp2-45 – realni dijagram

4.3. Usporedba rezultata FE modela i laboratorijskih ispitivanja

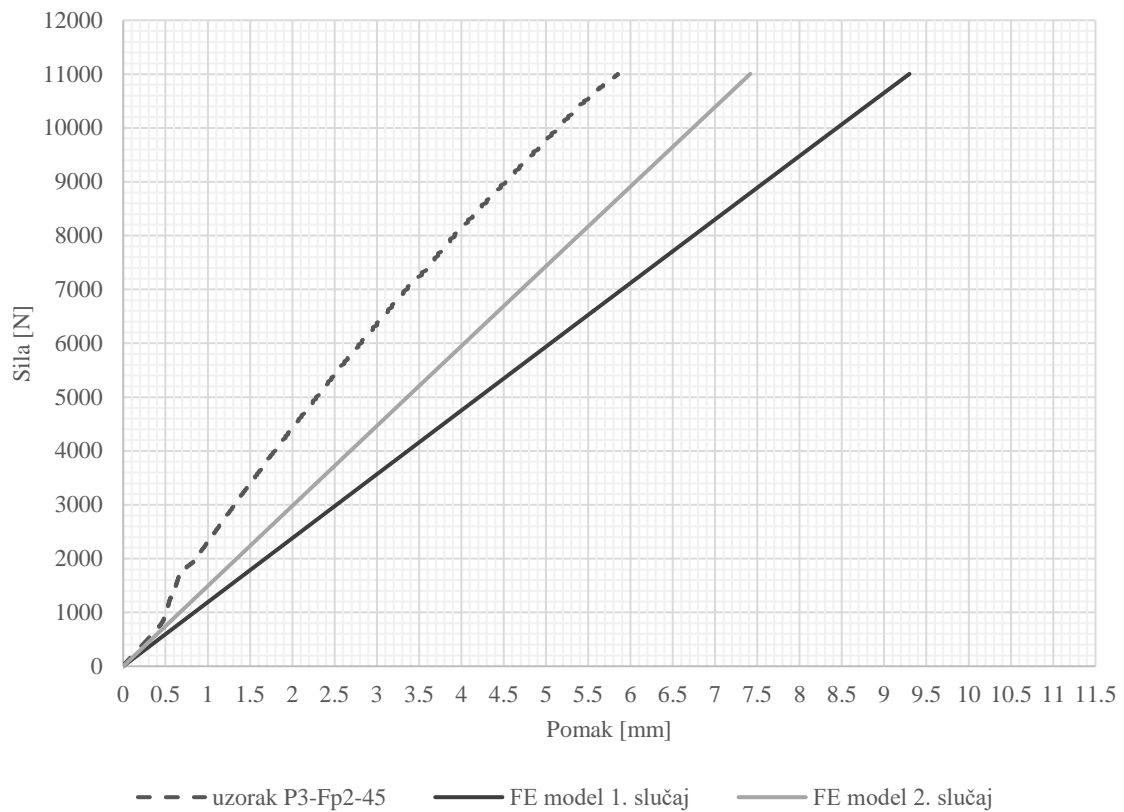
Usporedba sadrži vrijednosti progiba, naprezanja u oblogama i posmičnih naprezanja iz 3. poglavlja, odnosno vrijednosti dobivene ispitivanjem te računski prema normi ASTM C393/C393M [17] i numerički dobivene vrijednosti u programskom paketu Straus7.

Tablica 4.1 Usporedba rezultata iz ispitivanja i numeričke analize

P3-Fp2-45	Ispitivanje		ASTM C393/C393M	FE model	
	LVDT	GOM		1. slučaj	2. slučaj
σ [MPa]	/	/	1,14	1,157	1,165
τ [MPa]	/	/	0,096	0,043	0,048
w_s [mm]	5,85	5,82	6,37	9,29	7,41

Naprezanja u oblogama se podudaraju što znači da pretpostavljeni modul elastičnosti obloga odgovara modulu elastičnosti obloga uzorka. Posmična naprezanja znatno su manja od vrijednosti proračunatih prema normi ASTM C393/C393M [17] dok su progibi uzorka na sredini raspona, proračunati prema izrazu 3.19., veći od izmjerenih i proračunatih. Iz toga možemo zaključiti da model jezgre nije dovoljno precizan. Dobiveni su precizniji rezultati korištenjem stvarnog dijagrama srednjih vrijednosti (*slika 3.2*), no model je moguće dodatno optimizirati korištenjem ortotropnog materijala za jezgru. Također velika je vjerojatnost da je krutost jezgre u ispitanom uzorku P3-Fp2-45 veća od srednje vrijednosti krutosti ispitanih uzoraka polimerne pjene.

Dijagram sila [N] - pomak [mm]



Slika 4.13 Usporedba rezultata ispitivanja i FE modela

Dijagrami FE modela na slici 4.13 su linearni iako je proveden nelinearni proračun iz razloga što su naprezanja u jezgri manja od čvrstoće polimerne pjene, stoga deformacije jezgre nisu prešle u područje hiper-elastičnosti, a materijal obloga je modeliran kao linearno-elastičan materijal.

5. ZAKLJUČAK

Principi teorije sendvič panela odličan su način za znatno povećanje nosivosti konstrukcije s minimalnim povećanjem vlastite težine. Iako njihova primjena izvan zrakoplovstva, vjetrenjača i sl. još uvijek nije raširena, uz trenutne probleme sa zagađenjem okoliša i užurbanom načinom života, teži se graditi energetske učinkovite građevine u što kraćem vremenu, u što se sendvič konstrukcije idealno uklapaju. Izbor materijala za obloge sendvič panela vrlo je širok i teži se optimizaciji postojećih kompozita. Materijali ispune i dalje se istražuju kao i njihov način ugradnje i povezivanja s oblogama. Ispitivanja prionjivosti provedena u ovom radu pokazala su da je način povezivanja komponenti sendvič panela, bez primjene adheziva, već samo ekspanzijom polimerne pjene efikasan način u slučaju s gips-vlaknastim oblogama. Iako nije došlo do čistog posmičnog sloma jezgre što se željelo postići, nakon postignutih mehanizama loma nije došlo do odvajanja između komponenti sendvič panela. Zbog načina ugradnje ispune ne koristi se komercijalan proizvod uniformne gustoće, stoga mehanička svojstva uzoraka mogu varirati. Rezultatima iz numeričke analize moguće je zaključiti da je ispuna u uzorcima kruća od srednje vrijednosti ispitanih uzoraka samo polimerne pjene. Sljedeći korak bio bi optimizacija numeričkog FE modela realnim materijalnim svojstvima, ali i validacija modela s većim brojem ispitanih uzoraka.

6. LITERATURA

- [1] **D. Zeckert**, *The Handbook of Sandwich Construction*, 1997.
- [2] **DIAB**, *DIAB SANDWICH HANDBOOK*, Laholm.
- [3] **J.-F. O. K.-A. a. S. S.-E. Jansson**, *Fiber reinforced plastics. Thermosets*, Solna: Swedish Tech Books, 1989.
- [4] **CEN**, *EN10025-2 Structural Steel Plate Analysis Specification*, CEN, 2005.
- [5] **CEN**, *EN 10149-2*, CEN, 2014.
- [6] **CEN**, *EN 485-2 Mechanical properties of materials, Aluminium alloys, Aluminium, Sheet materials, Alloys*, CEN, 2013.
- [7] **Fermacell**, »Konstrukcije«, 2019.
- [8] **S. KRONO**, »SWISS KRONO Technical Data«, SWISS KRONO, 2020. [Mrežno]. Available: <https://www.swisskrono.pl/en/mdb/OSB-boards/Technical-Data>. [Pokušaj pristupa srpanj 2021].
- [9] **X. W. a. K. I. Zhishen Wu**, *State-of-the-Art of Advanced FRP*, Ibaraki: Department of Urban and Civil Engineering, 2007.
- [10] **P. S. *. K. K. B. S. M. Mortazavi**, »Prefabricated hybrid steel wall panels for mid-rise construction in seismic regions«, *Journal of Building Engineering*, svez. 100942, 2020.
- [11] **CEN**, *EN 13501-1 Fire-resistance of building materials and elements*, CEN, 2018.
- [12] **Neestan**. [Mrežno]. Available: <https://www.nestaan.nl/en/blokschuim/pur/>. [Pokušaj pristupa 01 rujan 2021].

- [13] **Styropan**, »TECHNICAL SPECIFICATIONS,« Styropan, [Mrežno]. Available: <https://www.styropan.gr/en/products/thermal-insulation/expanded-polystyrene/technical-specifications>. [Pokušaj pristupa 01 september 2021].
- [14] **Kingspan**, »Kingspan GreenGuard,« kingspan, [Mrežno]. Available: <https://www.kingspan.com/gb/en-gb/products/insulation-boards/insulation-boards/kingspan-greenguard>. [Pokušaj pristupa 1 september 2021].
- [15] **L. Gibson**, »Cellular Solids: Structure, Properties and Applications,« Massachusetts, 2015.
- [16] **F. C. Campbell**, Manufacturing Processes for Advanced Composites, 2004.
- [17] **ASTM International**, C393/C393M - Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, United States, 2012.
- [18] **DIAB**, »Divinycell H,« 2021.
- [19] **P. RUNGTHONKIT**, STRUCTURAL BEHAVIOUR OF STRUCTURAL INSULATED PANELS (SIPS), Birmingham: The University of Birmingham, 2012.
- [20] **F. A. F. António Bastos Pereira**, Sandwich Panels Bond with Advanced Adhesive Films, Journal of Composites Science, 2019.
- [21] **S. L. B. A. R. I. C.-S. C. Tong-Seok Han**, Delamination buckling and propagation analysis of honeycomb panels using a cohesive element approach, International Journal of Fracture, 2002.
- [22] **E. c. f. standardization**, EN 1995-1-1, CEN, 2008.
- [23] *HRN EN 13501-1:2019*, CEN, 2019.
- [24] **E. C. F. STANDARDIZATON**, *Gypsum boards with fibrous reinforcement -- Definitions, requirements and test methods -- Part 2: Gypsum fibre boards*, CEN, 2008.

- [25] **Y. Li**, Application of cellulose nanowhisker and lignin preparation of rigid polyurethane nanocomposite, Georgia Institute of Technology, 2012.
- [26] **p. IRI 2**, »Pretgotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način,« Građevinski fakultet , Rijeka, 2021.
- [27] **U. o. A. S. a. A. N. Switzerland**, »Optical 3D measurement techniques,« [Mrežno]. Available: <https://www.fhnw.ch/en/about-fhnw/schools/school-of-engineering/institutes/institute-of-product-and-production-engineering/optical-3d-measurement-techniques>. [Pokušaj pristupa 25 srpanj 2021].
- [28] **J. M. Davies**, »Sandwich Panels,« *Thin-Walled Structure*, 1993.
- [29] **Z. Bi**, »FEA brief history,« u *Overview of Finite Element Analysis*, 2018.
- [30] **T. English**, »interesting engineering,« 2019. [Mrežno]. Available: <https://interestingengineering.com/what-is-finite-element-analysis-and-how-does-it-work>. [Pokušaj pristupa 10 kolovoz 2021].
- [31] **L. Skotny**, »Enterfea,« 2019. [Mrežno]. Available: <https://enterfea.com/fundamentals-of-fea-beginners-guide/>. [Pokušaj pristupa 19 kolovoz 2021].