

Numeričko modeliranje procesa deformiranja kompozitne sendvič strukture

Radoš, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:997126>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Radoš

ZAGREB, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr.sc. Zdenko Tonković

Dr.sc. Boris Jalušić

Student:

Ivan Radoš

ZAGREB, 2021.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zagreb, rujan 2021.

Zahvaljujem se na početku svojim roditeljima, svojim sestrama i svojoj curi na bezuvjetnoj ljubavi i podršci tijekom ovih godina studiranja.

Zahvaljujem se svojem mentoru dr.sc. Zdenku Tonkoviću na stručnim savjetima i pomoći kod izrade ovog rada. Također, zahvaljujem se profesoru dr.sc. Janošu Kodvanju i asistentici Petri Adamović na pristupačnosti i pomoći.

Na kraju, zahvaljujem se FSB Racing Teamu za sva iskustva, znanja i veliko prijateljstvo bez kojeg ovaj rad ne bi bio moguć.

Ivan Radoš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Radoš**

Mat. br.: 0035210760

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko modeliranje procesa deformiranja kompozitne sendvič strukture**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical modelling of a composite sandwich structure deformation process**

Opis zadatka:

Hrvatska studentska asocijacija strojarskih fakulteta koja djeluje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu u sklopu natjecanja Formula Student izrađuje kompozitnu šasiju koju čine kompozitne sendvič strukture. Glavni cilj primjene sendvič kompozitnih struktura je smanjenje mase konstrukcije uz zadržavanje dobrih mehaničkih svojstava. U radu je potrebno provesti numeričko modeliranje i računalnu simulaciju procesa deformiranja kompozitne sendvič strukture za slučaj savijanja u tri točke. Pritom se struktura koja se sastoji od jezgre aluminijskog saća te vanjskih ljuski od tankih aluminijskih limova oslanja na dva valjka i opterećuje s trećim valjkom.

Za numeričke analize primijeniti programski paket *Abaqus* koji se temelji na metodi konačnih elemenata. U radu je potrebno analizirati različite varijante numeričkog modela koje uključuju: model realne konstrukcije aluminijskog saća, pojednostavljeni model aluminijskog saća u kojem su konstante krutosti dobivene od proizvođača te pojednostavljeni model aluminijskog saća u kojem su konstante krutosti obzirom na geometriju i materijal čelije izračunate prema izrazima iz literature. Valjke na koje se epruveta oslanja i s kojima se vrši opterećivanje za vrijeme eksperimenta potrebno je u proračunskom modelu modelirati s kontaktnim ploham. Kvazistatičke analize provesti uz pretpostavku malih pomaka i deformacija te linearno elastičnog ponašanja materijala. Dijagrame sila-pomak usporediti s eksperimentalnim rezultatima te izvesti zaključke o točnosti analiziranih modela.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdenko Tonković

Dr. sc. Boris Jalušić

Datum predaje rada:

1. rok: 18. veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.

3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

V Soldo

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1 UVOD	1
1.1 Sendvič konstrukcije	1
1.2 Općenito o sendvič konstrukciji	4
1.3 Općenito o saćama	5
2 MEHANIKA SAĆA	9
2.1 Mezostruktura saća	9
2.2 Deformacijski mehanizmi aluminijskih saća u ravnini	10
2.3 Deformacijski mehanizmi aluminijskih saća izvan ravnine	18
2.4 Ortotropno ponašanje aluminijskih saća	22
2.5 Stabilnost materijala	28
3 MEHANIKA SENDVIČ KONSTRUKCIJE	30
3.1 Sendvič konstrukcija opterećena savijanjem u tri točke	32
4 NUMERIČKO ISPITIVANJE RAČUNALNIM SIMULACIJAMA	36
4.1 Opis 1. numeričkog modela	37
4.2 Opis 2. numeričkog modela	40
4.3 Opis 3. numeričkog modela	41
5 EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE UZORAKA SENDVIČ KONSTRUKCIJE	45
5.1 Izrada uzoraka	45
5.2 Ispitivanje uzoraka	48
6 REZULTATI	51
6.1 Rezultati prvog opisanog numeričkog modela	51
6.2 Rezultati drugog opisanog numeričkog modela	52
6.3 Rezultati trećeg opisanog numeričkog modela	53

6.4	Rezultati ispitanih uzoraka	54
6.5	Validacija rezultata numeričkih analiza sendvič konstrukcije	58
6.6	Odstupanja rezultata pri rotaciju jezgre oko z osi za 90°	60
7	ZAKLJUČAK.....	65
8	LITERATURA	67
9	PRILOZI	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Lokomotiva „Planet“ konstruirana od Roberta Stephensona [1].....	1
Slika 2. Monokok šasija formule McLaren MP4/1C [2]	2
Slika 3. Bolid VulpesR i renderirani prikaz monokok šasije sa pridruženim elementima šasije ...	2
Slika 4. Ispitana torzijska krutost šasije VulpesR [3]	3
Slika 5. Ispitni uzorci bolida VulpesR	3
Slika 6. Vizualni prikaz dijelova sendvič konstrukcije [4]	4
Slika 7. Usporedba sendvič konstrukcije i I-profil grede [5].....	5
Slika 8. Usporedba krutosti, čvrstoće i mase sendvič konstrukcije u ovisnosti o debljini jezgre [5]	5
Slika 9. Različiti tipovi geometrija saća [6].....	6
Slika 10. Aluminijske i aramidne saće.....	6
Slika 11. Opisani prikaz proizvodnje aluminijskih saća [7]	7
Slika 12. Ekspandiranje aluminijskih saća u prostorijama FSB Racing Team-a.....	8
Slika 13. Čelija saća	9
Slika 14. Ponašanje aluminijskih saća kod tlačnog naprezanja u ravnini [10]	11
Slika 15. Ponašanje aluminijskih saća kod vlačnog naprezanja u ravnini [10]	12
Slika 16. Određivanje modula smicanja [10].....	17
Slika 17. Ponašanje aluminijskih saća kod tlačnog naprezanja izvan ravnine [10].....	18
Slika 18. Ponašanje aluminijskih saća kod vlačnog naprezanja izvan ravnine [10].....	19
Slika 19. Orijentacija glavnih osi u saćastom modelu [10]	19
Slika 20. Kalkulator ulaznih podataka aluminijskih saća	25
Slika 21. Opterećenje sendvič konstrukcije [5]	30
Slika 22. Progibi uzrokovani savijanjem i smikom [5].....	31
Slika 23. Načini popuštanja sendvič konstrukcije [5].....	31
Slika 24. Sendvič konstrukcija kod savijanja u tri točke	35
Slika 25. Dimenzije sendvič konstrukcije kod savojanja u tri točke	35
Slika 26. Prvi opisani numerički model.....	37
Slika 27. Definiranje orijentacije materijala	37
Slika 28. Rubni uvjeti prvog opisanog numeričkog modela.....	38
Slika 29. Prikaz reakcijske sile kod dva dodatna rubna uvjeta	39
Slika 30. Diskretizirani prvi numerički model sa konačnim elementima.....	39
Slika 31. Konvergencija rezultata prvog numeričkog modela.....	39
Slika 32. Treći opisani numerički model	42
Slika 33. Model jedne ponavljajuće ćelije	42
Slika 34. Model opisan funkcijom <i>Linear Pattern</i>	42
Slika 35. Izgled konačnog modela jezgre od aluminijskih saća	43
Slika 36. Renderirani prikaz Shell modela jezgre od aluminijskih saća.....	43
Slika 37. Rubni uvjeti trećeg opisanog numeričkog modela	44
Slika 38. Konvergencija rezultata trećeg numeričkog modela	44
Slika 39. Materijali korišteni za izradu uzoraka	45
Slika 40. Oblik sendvič konstrukcije nakon slaganja	46

Slika 41. Proizvod pod vakuumom u pećnici	46
Slika 42. Dijagram temperatura-vrijeme kod ciklusa pečenja uzoraka	47
Slika 43. Konačni uzorci nakon pečenja i rezanja	48
Slika 44. Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5	49
Slika 45. Postavljanje uzoraka na kidalicu	49
Slika 46. Uzorci nakon ispitivanja	50
Slika 47. Ukupni pomak 1. opisanog numeričkog modela	51
Slika 48. Krutost 1. opisanog numeričkog modela	51
Slika 49. Ukupni pomak 2. opisanog numeričkog modela	52
Slika 50. Krutost 2. opisanog numeričkog modela	52
Slika 51. Ukupni pomak 3. opisanog numeričkog modela	53
Slika 52. Krutost 3. opisanog numeričkog modela	53
Slika 53. Dijagram sila-pomak 1. uzorka.....	54
Slika 54. Dijagram sila-pomak 2. uzorka.....	55
Slika 55. Dijagram sila-pomak 1. i 2. uzorka skupa	55
Slika 56. Usporedba rezultata kod maksimalne ostvarene sile	56
Slika 57. Usporedba rezultata kod progiba pri maksimalnoj ostvarenoj sili	56
Slika 58. Usporedba rezultata krutosti	57
Slika 59. Usporedba rezultata savojnog modula elastičnosti.....	57
Slika 60. Usporedba dijagrama sila-pomak numeričkih modela i ispitanih uzoraka.....	58
Slika 61. Validacija krutosti numeričkih modela i eksperimentalno ispitanih uzoraka.....	58
Slika 62. Validacija savojnog modula elastičnosti numeričkih modela i eksperimentalno ispitanih uzoraka	59
Slika 63. Usporedba krutosti kod rotirane jezgre 1. opisane numeričke simulacije	60
Slika 64. Usporedba savojnog modula elastičnosti kod rotirane jezgre 1. opisane numeričke simulacije	61
Slika 65. Usporedba krutosti kod rotirane jezgre 2. opisane numeričke simulacije	61
Slika 66. Usporedba savojnog modula elastičnosti kod rotirane jezgre 2. opisane numeričke simulacije	62
Slika 67. Rotirana jezgra od aluminijskih saća	63
Slika 68. Usporedba krutosti kod rotirane jezgre 3. opisane numeričke simulacije	63
Slika 69. Usporedba savojnog modula elastičnosti kod rotirane jezgre 3. opisane numeričke simulacije	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva aluminija 5052 [9].....	10
Tablica 2. Geometrija ćelije.....	10
Tablica 3. Konstante elastičnosti i relativna gustoća saća	26
Tablica 4. Konstante krutosti saća	27
Tablica 5. Mehanička svojstva aluminija 5754 [13].....	32
Tablica 6. Dimenzije sendvič strukture kod savijanja u tri točke	33
Tablica 7. Konstante elastičnih vrijednosti dobiveni od proizvođača [8].....	40
Tablica 8. Konstante krutosti saća izvedene od konstanti elastičnosti dobivenih od proizvođača	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ_s	kg/m ³	Gustoća materijala jezgre
E_s	MPa	Youngov modul elastičnosti materijala jezgre
ν_s	-	Poissonov faktor materijala jezgre
G_s	MPa	Modul smicanja materijala jezgre
σ_{YS}	MPa	Granica razvlačenja materijala jezgre
ρ	kg/m ³	Gustoća homogenizirane jezgre
E_1	MPa	Youngov modul elastičnosti homogenizirane jezgre u smjeru osi x
E_2	MPa	Youngov modul elastičnosti homogenizirane jezgre u smjeru osi y
E_3	MPa	Youngov modul elastičnosti homogenizirane jezgre u smjeru osi z
ν_{12}	-	Poissonov faktor homogenizirane jezgre u ravnini xy
ν_{21}	-	Poissonov faktor homogenizirane jezgre u ravnini yx
ν_{13}	-	Poissonov faktor homogenizirane jezgre u ravnini xz
ν_{31}	-	Poissonov faktor homogenizirane jezgre u ravnini zx
ν_{23}	-	Poissonov faktor homogenizirane jezgre u ravnini yz
ν_{32}	-	Poissonov homogenizirane jezgre faktor u ravnini zy
G_{12}	MPa	Modul smicanja homogenizirane jezgre u ravnini xy
G_{13}	MPa	Modul smicanja homogenizirane jezgre u ravnini xz
G_{23}	MPa	Modul smicanja homogenizirane jezgre u ravnini yz
G_{23min}	MPa	Minimalni modul smicanja homogenizirane jezgre u ravnini yz
G_{23max}	MPa	Maksimalni modul smicanja homogenizirane jezgre u ravnini yz
σ_1	MPa	Naprezanje u smjeru osi x
σ_2	MPa	Naprezanje u smjeru osi y
σ_3	MPa	Naprezanje u smjeru osi z
τ_{12}	MPa	Smično naprezanje u ravnini xy
τ_{13}	MPa	Smično naprezanje u ravnini xz
τ_{23}	MPa	Smično naprezanje u ravnini yz
ε_1	mm/mm	Deformacija u smjeru osi x
ε_2	mm/mm	Deformacija u smjeru osi y

ε_3	mm/mm	Deformacija u smjeru osi z
γ_{12}	rad/rad	Kutna deformacija u ravnini xy
γ_{13}	rad/rad	Kutna deformacija u ravnini xz
γ_{23}	rad/rad	Kutna deformacija u ravnini yz
u_s	mm	Smični pomak točke D
Φ	rad/rad	Kutna deformacija oko točke B
M_1	Nmm	Moment u smjeru osi x
M_2	Nmm	Moment u smjeru osi y
M_B	Nmm	Moment oko točke B
P_1	N	Sila u smjeru osi x
P_2	N	Sila u smjeru osi y
F_{12}	N	Smična sila
δ_1	mm	Progib zida ćelije u smjeru osi x
δ_2	mm	Progib zida ćelije u smjeru osi y
I	mm ⁴	Oсни moment tromosti
D_{ijkm}	MPa	Tenzor elastičnosti
D^{el}	MPa	Matrica tenzora elastičnosti
Y	-	Konstanta tenzora elastičnosti
d	mm	Veličina ćelije
l	mm	Duljina stranica ćelije
h	mm	Duljina stranice ćelije
b	mm	Debljina jezgre
t	mm	Debljina stijenke jezgre
θ	°, rad	Kut ćelije
E	MPa	Youngov modul elastičnosti ljuske
ν	-	Poissonov faktor ljuske
G	MPa	Modul smicanja ljuske
D_f	Nmm ²	Krutost kod savijanja sendvič konstrukcije
K	N	Smična krutost sendvič konstrukcije
E_{cx}	MPa	Youngov modul elastičnosti jezgre u smjeru osi x
E_h	MPa	Savojni modul elastičnosti

σ_f	MPa	Naprezanje u ljusci
τ_c	MPa	Smično naprezanje u jezgri sendvič konstrukcije
S	N/mm	Krutost sendvič konstrukcije
s	mm	Ukupni progib sendvič konstrukcije
k_b	-	Koeficijent deformacije kod savijanja
k_s	-	Koeficijent deformacije kod smicanja
M	Nmm	Moment savijanja sendvič konstrukcije
P	N	Sila u sendvič konstrukciji
F	N	Smična sila sendvič konstrukcije
L	mm	Dužina sendvič konstrukcije
L_1	mm	Udaljenost oslonaca kod savijanja u tri točke
w	mm	Širina sendvič konstrukcije
t_1	mm	Debljina ljuske
h_1	mm	Ukupna debljina sendvič konstrukcije

SAŽETAK

U ovom radu prikazano je numeričko modeliranje i računalna simulacija procesa deformiranja sendvič konstrukcije za slučaj savijanja u tri točke. Sendvič konstrukcija sastoji se od tankih aluminijskih limova koji čine ljusku te aluminijske saće koje predstavlja jezgru sendvič konstrukcije. U numeričkoj analizi jezgra je opisana na 3 načina: homogenizirani model aluminijskih saća u kojem su određene konstante krutosti u odnosu na geometriju i materijal ćelije prema literaturi [10], homogenizirani model aluminijskih saća u kojem su konstante krutosti preuzete od proizvođača te model stvarne konstrukcije ćelije aluminijskih saća. Rezultati su prikazani u obliku dijagrama sila-pomak te su izračunate vrijednosti krutosti i savojnog modula elastičnosti. U svrhu validacije numeričkih modela proizvedeni su uzorci sendvič konstrukcije te je naknadno provedeno ispitivanje uzoraka kod savijanja u tri točke. Rezultati numeričkih modela i testiranih uzoraka su uspoređeni.

Ključne riječi: Sendvič konstrukcija, jezgra, aluminijske saće, test savijanja u tri točke, homogenizirani model, numerička analiza.

SUMMARY

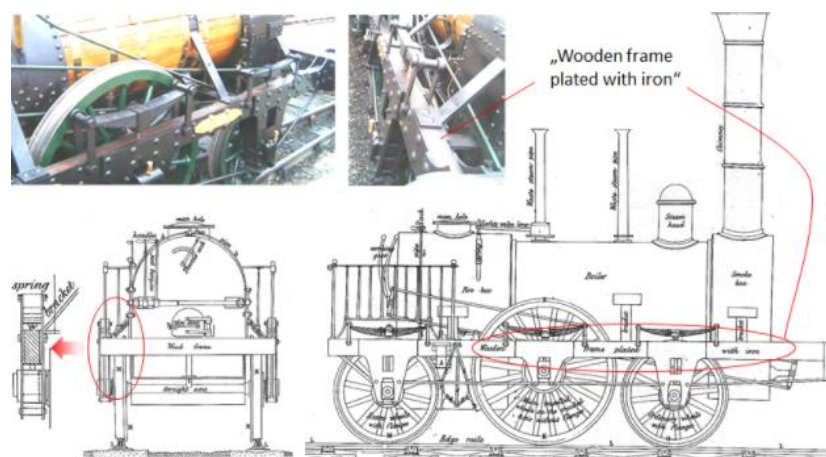
This thesis presents numerical modelling and computer simulation of the sandwich structure deformation process in a three-point bend test. The sandwich structure consists of thin aluminium sheets that form a skin and aluminium honeycomb that represents the core of the sandwich structure. In the numerical analysis, the core is described in 3 ways: a homogenized model of aluminium honeycombs in which stiffness constants are determined in relation to the geometry and cell material according to the literature [10], a homogenized model of aluminium honeycombs in which stiffness constants are taken from manufacturers and the actual model of the aluminum honeycomb cell. The results are presented in the form of a force-displacement diagram and the calculated values of the stiffness and the flexural modulus of elasticity. For the purpose of validation of numerical models, samples of sandwich construction were produced and subsequent testing of samples in three-point bend test was performed. The results of the numerical models and the tested samples were compared.

Keywords: Sandwich structure, core, aluminum honeycombs, three-point bend test, homogenized model, numerical analysis.

1 UVOD

1.1 Sendvič konstrukcije

Kroz povijest tražili su se alternativni materijali kako bi se uz potrebno smanjenje mase konstrukcije osigurala jednaka ili bolja svojstva tada tipičnih konstrukcija. Prvu primjenu sendvič konstrukcije primijenjenu u strojarstvu konstruirao je Robert Stephenson 1830. godine, gdje je jedan dio šasije tadašnje lokomotive sadržavao sendvič konstrukciju sa čeličnim ljuskama koji su vijčanim spojem bili pričvršćeni sa jezgrom od jasenovog drveta prikazano na Slika 1 [1].



Slika 1. Lokomotiva „Planet“ konstruirana od Roberta Stephensona [1]

Danas u svijetu transporta sendvič konstrukcije imaju sve veću zastupljenost. Najveća zastupljenost sendvič konstrukcija se nalazi u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji gdje je cilj postići što lakšu konstrukciju uz osiguravanje odličnih mehaničkih svojstava. Sve češću primjenu sendvič konstrukcija koristi i automobilska industrija. Prvu kompozitnu monokok šasiju proizveo je tim McLaren prikazanu na Slika 2. koji se 1981. natjecao u svjetskom poznatom natjecanju Formula 1 koristeći prvi puta tada polimere ojačanim karbonskim vlaknima i jezgrom od aluminijskih saća. Bolid McLaren MP4/1C osigurao je nisku masu šasije uz jako veliku torzijsku krutost šasije koja je potrebna radi ostvarivanja visokih performansi kod dinamike vozila. [2]

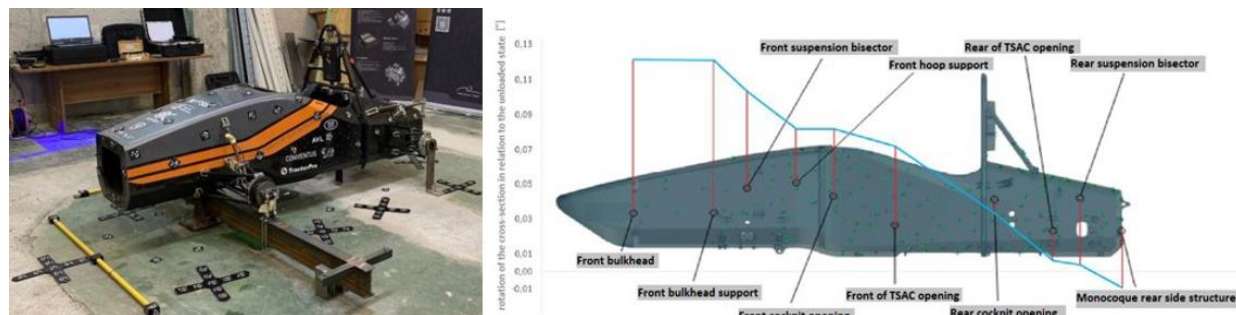


Slika 2. Monokok šasija formule McLaren MP4/1C [2]

FSB Racing Team je studentski projekt pod udugom Hrvatske studentske asocijacije strojarskih fakulteta. Osnovan je 2003. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Zadatak tima je konstruirati, razviti i proizvesti trkaći bolid jednosjed u cilju natjecanja „Formula Student,, FSB Racing Team 2019. godine izradio svoju prvu kompozitnu monokok šasiju, koristeći polimere ojačana karbonskim vlaknima s jezgrom od aluminijskih saća i PMI pjene prikazana na Slika 3. Ukupna masa monokoka s glavnim čeličnim obručem i prednjim ulaminiranim aluminijskim obručem iznosi 38 kg. Torzijska krutost monokoka iznosi 12500 Nm/deg. Ispitana torzijska krutost šasije i pridruženi dijagram prikazani su na Slika 4. [4]

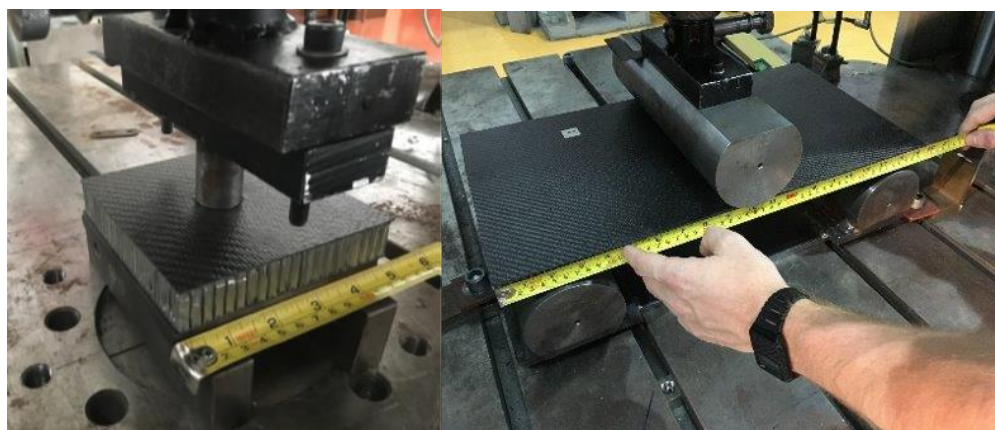


Slika 3. Bolid VulpesR i renderirani prikaz monokok šasije sa pridruženim elementima šasije



Slika 4. Ispitana torzijska krutost šasijske VulpesR [3]

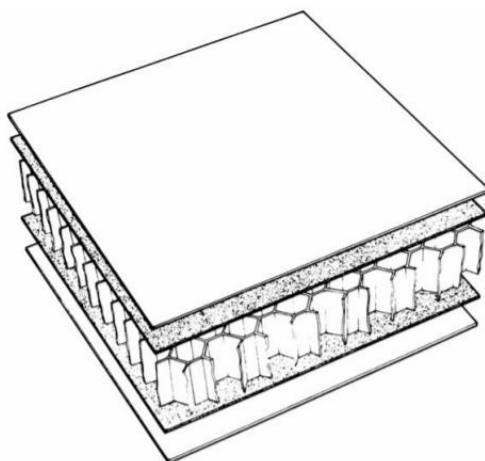
Kako bi se proizvela šasijska koja je sigurna za vozača potrebno je eksperimentalno ispitati čvrstoću korištenih materijala. *Formula Student Germany* osmislila je pravilnik po kojem se svi sudionici natjecanja moraju voditi i zadovoljiti sva pravila. Sendvič konstrukcije eksperimentalno se ispituju pomoću savijanja u tri točke te statičkim probijanjem uzoraka. Na Slika 5. se može vidjeti tipovi ispitanih uzoraka. Kako bi se osigurala optimalna sendvič konstrukcija potrebno je ispitati više uzoraka, no u cilju smanjenja troškova proizvodnje FSB Racing Team koristi simulacijske programe kako bi se eksperimentalno ispitati samo odabrani uzorci.



Slika 5. Ispitni uzorci bolida VulpesR

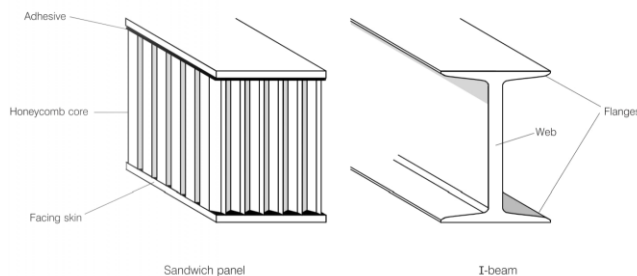
1.2 Općenito o sendvič konstrukciji

Sendvič konstrukcija definira se kao kompozitna konstrukcija gdje se dvije ljuske spajaju na određenu jezgru male gustoće. Takav spoj ostvaren je s određenim adhezivnim materijalom, najčešće epoksidnim ili poliuretanskim ljepljivom, prikazano na Slika 6. Takav spoj osigurava homogeniziranost jednog sustava sastavljen od više dijelova što osigurava visoku torzijsku krutost, te krutost na savijanje. Materijali ljuski variraju od izotropnih materijala kao što su čelik ili aluminij, do sve češćih primjera polimernih kompozitnih materijala kao što su karbonski i aramidni laminati.



Slika 6. Vizualni prikaz dijelova sendvič konstrukcije [4]

Takva primjena sendvič konstrukcije se može usporediti sa I-profilom grede jer nose naprezanja na savijanje prirubnice gdje je greda izložena, prikazano na Slika 7. U slučaju savijanja, jedna prirubnica je tlačno opterećena, dok je druga opterećena na vlak. Slično, jezgra saća odgovara jezgri I-profil grede. Jezgra jako dobro podnosi posmična opterećenja i povećava krutost konstrukcije držeći razmaknute ljuske. Sendvič konstrukcije svoju popularnost su osigurale sa zadržavanjem visokim mehaničkim svojstvima gdje masa same konstrukcije ostaje mala kao što je prikazano na Slika 8. [5]



Slika 7. Usporedba sendvič konstrukcije i I-profil grede [5]

Diagram showing three cross-sections of sandwich panels with different core thicknesses. The first is a thin panel with thickness t . The second is a panel with core thickness $2t$. The third is a panel with core thickness $4t$.

Relativna krutost savijanja	1	7.0	37
Relativna čvrstoća savijanja	1	3.5	9.2
Relativna masa	1	1.03	1.06

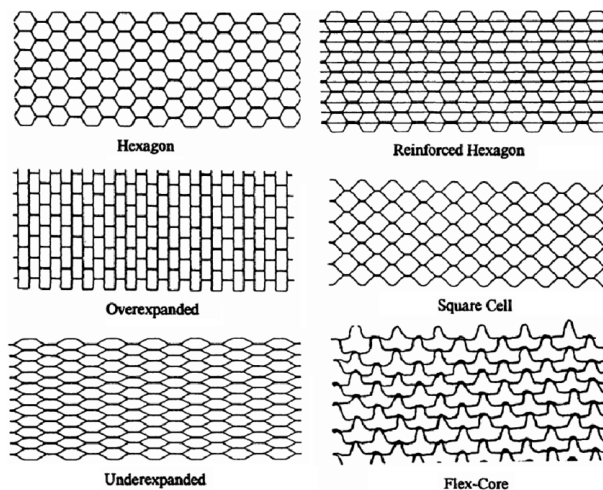
Slika 8. Usporedba krutosti, čvrstoće i mase sendvič konstrukcije u ovisnosti o debljini jezgre [5]

1.3 Općenito o saćama

Postoji nekoliko vrsti saća koja u industriji najčešće služe kao jezgra sendvič konstrukcijama. Tipove saća možemo podijeliti u 2 skupine.

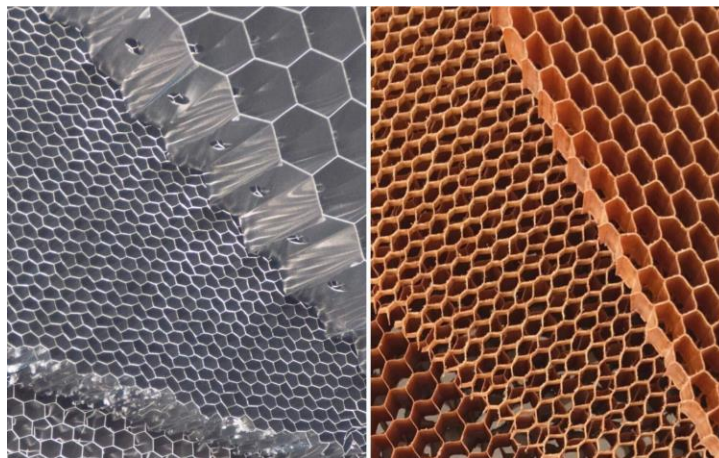
- a) Geometrija saća
- b) Vrsta materijala saća

Danas postoji veliki broj različitih tipova geometrija saća. Tip se opisuje pomoću njene ćelije. Najčešći oblik geometrije saća jest pravilni heksagonalni prizmatični oblik zbog jednostavnosti njegove izrade, međutim na Slika 9. možemo vidjeti nekoliko ostalih oblika geometrije. [6]



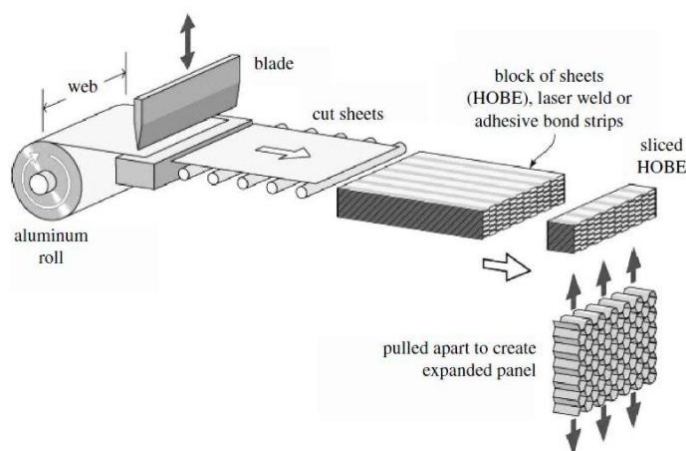
Slika 9. Različiti tipovi geometrija saća [6]

Što se tiče vrste materijala saća, nalazimo ih u obliku: aluminija, papira, polipropilena, stakloplastike impregnirane fenolnom smolom i papira obrađen fenolnim aramidnim vlaknima. Na Slika 10. možemo vidjeti aluminijske i aramidne (Nomex) saće. Najčešća vrsta materijala saća koja se koristi u industriji jest aluminijska i aramidna jer pokazuju najbolja mehanička svojstva u usporedbi sa njihovom masom.



Slika 10. Aluminijske i aramidne saće

U ovom radu razmatrat će se aluminijske saće sa pravilnim heksagonalnim oblikom. Postupak izrade aluminijskih saća opisan je na Slika 11 [7]. Rola određene širine aluminijske folije putem valjaka dolazi do oštrice gdje se folija reže na željenu duljinu. Zatim aluminijska folija dolazi do procesa postavljanja ljepila gdje stroj postavlja određeno ljepilo u neotvrdnjenom stanju na aluminijsku foliju jednako razmaknutim linijama određene debljine. Debljina ljepila predstavlja u razmatranom slučaju jednu stranicu šesterokuta. Zatim, aluminijska folija sa impregniranim ljepilom se slaže sa ostalim aluminijskim folijama iste duljine i širine. Konačni postavljeni broj folija kasnije ovisi o duljini konačnog proizvoda. Tako postavljeni slojevi dolaze do stroja koji putem prešanja i dovođenja topline aktivira ljepila te se dobije željeni spoj. Takav lijepljeni stroj dolazi do nove oštrice koji reže proizvod na željenu mjeru. Tako se dobiva određena debljina jezgre, odnosno debljina aluminijskih saća. Konačno, takav lijepljeni spoj dolazi do stroja za ekspanziranje koji razvlači proizvod do proračunatog trenutka kada sve stranice jedne ćelije su jednake duljine te čine pravilni šesterokut.



Slika 11. Opisani prikaz proizvodnje aluminijskih saća [7]

Aluminijske saće mogu biti kupljene u ekspanziranom stanju kao što je objašnjeno u postupku proizvodnje ili u ne ekspanziranom stanju gdje se preskače zadnji korak proizvodnje. Ekspanziranje proizvoda bez potrebne mehanizacije zna biti iznimno težak, no opravdan je uz nižu kupovnu cijenu. Na Slika 12. je prikazano ekspanziranje aluminijskog saća u prostorijama FSB Racing Team-a.



Slika 12. Ekspandiranje aluminijskih saća u prostorijama FSB Racing Team-a

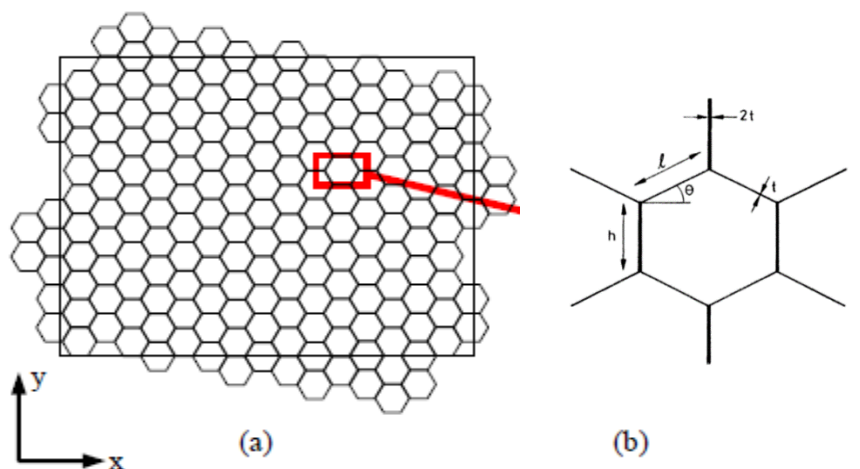
2 MEHANIKA SAĆA

2.1 Mezostruktura saća

Mezostruktura saća promatra strukturu na razini jedne ćelije saća kako je prikazano na Slika 13. Odabrani tip saća za nastavak ovog rada jest aluminijske saće s oznakom:

1/8-5052-.0007

Prva oznaka „1/8“ predstavlja veličinu ćelije saća. Oznaka je u inčima što je ekvivalent 3,175 mm. Druga oznaka „5052“ predstavlja vrstu materijala aluminija, dok treća oznaka „0007“ predstavlja debljinu folije u inčima što je ekvivalent 0,01778 mm. [8]



Slika 13. Ćelija saća

Zbog postupka proizvodnje aluminijske saće će uvijek imati dvije od šest ukupno stranica u jednoj ćeliji dvostruku debljinu uz dodatnu debljinu adhezivnog sloja. U Tablica 1. i Tablica 2 su prikazana izotropna svojstva materijala te geometrija jedne ćelije. [9]

ρ_s , [kg/m ³]	2680
E_s , [MPa]	70300
ν_s	0,33
G_s , [MPa]	26428,57
σ_{YS} , [MPa]	260

Tablica 1. Mehanička svojstva aluminija 5052 [9]

d , [mm]	3,175
l , [mm]	1,8331
h , [mm]	1,8331
h/l	1
b , [mm]	15
t , [mm]	0,01778
θ , [°]	30
θ , [rad]	0,5236

Tablica 2. Geometrija ćelije

2.2 Deformacijski mehanizmi aluminijских saća u ravnini

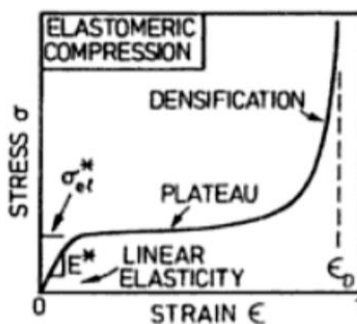
Ovaj rad će se fokusirati na pretpostavci o linearno elastičnom ponašanju materijala. Unatoč tome, u nastavku teksta je ukratko objašnjeno i plastično ponašanje materijala zbog boljeg razumijevanja.

Ponašanje aluminijских saća u stanju ravninskog deformiranja promatra se za dva slučaja naprežanja:

a) tlačno naprežanje

Ponašanje materijala u tlačnom naprežanju vidljivo je na Slika 14. Ponašanje aluminijских saća kod tlačnog naprežanja u ravnini. Mogu se vidjeti tri različita područja ponašanja.

- i. Linearno elastično područje
- ii. Plateau područje
- iii. Područje zgušnjavanja



Slika 14. Ponašanje aluminijskih saća kod tlačnog naprezanja u ravnini [10]

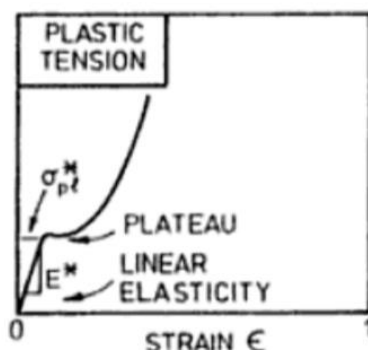
Plateau područje je proces plastičnog deformiranja aluminijskih saća. Područje zgušnjavanja saća opisano je kao područje kada se stranice susjednih ćelija počnu dodirivati. Ne postoji vidljivi prijelaz između Plateau područja i područja zgušnjavanja kao što je slučaj između linearnog elastičnog područja i Plateau područja. Obično je dogovorni iskustveni broj u dijagramu naprezanja i istežanja.

b) vlačno naprezanje

Ponašanje materijala u vlačnom naprezanju vidljivo je na Slika 15. Ponašanje aluminijskih saća kod vlačnog naprezanja u ravnini. Za razliku od ponašanja materijala u tlačnom naprezanju, vlačno naprezanje pokazuje dva vidljiva područja ponašanja:

- i. Linearno elastično područje
- ii. Plateau područje

Područje zgušnjavanja ovdje izostaje zbog načina opterećivanja ovog materijala. Vlačno opterećenje materijala neće dovesti materijal do trenutka kada se stranice ćelija dodiruju. Završetak Plateau područja pokazuje najčešće potpuno pucanje stranica aluminijske folije ili u manjem postotku pucanja adhezivnog sloja između lijepljenih stanica.



Slika 15. Ponašanje aluminijskih saća kod vlačnog naprezanja u ravnini [10]

Kako bi se opisalo linearno elastično ponašanje saća u ravnini potrebno je opisati elastične konstante materijala kao što su modul elastičnosti E , modul smicanja G te Poissonov faktor ν .

Geometriju saća zamjenjujemo s homogeniziranim prostornim elementom. Kod takvog opisanog materijala saća vidljivo je ortotropno ponašanje. Ortotropni materijali imaju tri međusobno okomite ravnine elastične simetrije koje se nazivaju ravnine ortotropije [11]. Stoga, kod linearnog elastičnog naprezanja materijala u ravnini razmatraju se ukupno dvije komponente modula elastičnosti (E_1, E_2), komponentu modula smicanja, G_{12} , te dvije komponente Poissonovog faktora (ν_{12}, ν_{21}). [10]

Prije opisivanja navedenih komponenata, najprije će se opisati relativna gustoća materijala ρ . Relativna gustoća saća predstavlja pojam gustoće koje saće svojim prostorom i masom zamjenjuju pojednostavljeni homogenizirani element. Uloga jezgre u materijalu da uz svoja dobra elastična svojstva ima relativno nisku masu, odnosno relativno nisku gustoću. Takva dobivena veličina opisana je jednadžbom (1) uz primjenu geometrije i vrste materijala saća prema literaturi [10]:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{\frac{t}{h} \left(\frac{h}{l} + 1 \right)}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right) \cos \theta} \quad (1)$$

Ako se uzme u obzir pravilni šesterokut u jednoj ćeliji ($h = l$; $\theta = 30^\circ$) nakon sređivanja dobije se jednostavniji oblik jednadžbe:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{\frac{t}{l} \left(\frac{h}{l} + 1 \right)}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right) \cos \theta} = \frac{8\sqrt{3} t}{9 l} \quad (2)$$

Kod opisivanja modula elastičnosti koristit ćemo recipročnu relaciju:

$$E_1 \nu_{21} = E_2 \nu_{12} \quad (3)$$

Ova relacija govori da su moduli elastičnosti jednaki kod tlačnog i vlačnog naprezanja i reducira broj nezavisnih komponenti modula umjesto pet na četiri.

Kod opisivanja dva Youngova modula elastičnosti (E_1 , E_2) koristit će se ravninska teorija naprezanja prostornog elementa:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}, \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}. \quad (5)$$

Naprezanje σ_1 koje djeluje paralelno u smjeru osi x uzrokuje savijanje jedne ćelije gdje se pojavljuje moment M_1 :

$$M_1 = \frac{P_1 l \sin \theta}{2}, \quad (6)$$

gdje je

$$P_1 = \sigma_1 (h + l \sin \theta) b. \quad (7)$$

Uz primjenu teorije čvrstoće grede progib zida ćelije iznosi:

$$\delta_1 = \frac{P_1 l^3 \sin \theta}{12 E_s I}, \quad (8)$$

gdje je I sekundarni moment inercije zida ćelije:

$$I = \frac{bt^3}{12}. \quad (9)$$

Istezanje se može izračunati kao:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_1 \sin \theta}{l \cos \theta} = \frac{\sigma_1 (h + l \sin \theta) bl^2 \sin^2 \theta}{12 E_s I \cos \theta}. \quad (10)$$

Uvrštavanje jednadžbe (10) u jednadžbu (4) dobije se E_1 :

$$\frac{E_1}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\cos \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \sin^2 \theta} \quad (11)$$

Na sličan način dobiva se komponenta E_2 . Naprezanje σ_2 koje djeluje paralelno u smjeru osi y uzrokuje savijanje jedne ćelije gdje se pojavljuje moment M_2 :

$$M_2 = \frac{P_2 l \cos \theta}{2}, \quad (12)$$

gdje je

$$P_2 = \sigma_2 lb \cos \theta \quad (13)$$

Uz primjenu teorije čvrstoće grede progib zida iznosi:

$$\delta_2 = \frac{P_2 l^3 \cos \theta}{12 E_s I}, \quad (14)$$

Istezanje se može izračunati kao:

$$\varepsilon_2 = \frac{\delta_2 \cos \theta}{h + l \sin \theta} = \frac{\sigma_2 b l^4 \cos^3 \theta}{12 E_s I (h + l \sin \theta)}. \quad (15)$$

Uvrštavanje jednadžbe (14) u jednadžbu (5) dobiva se E_2 :

$$\frac{E_2}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)}{\cos^3 \theta} \quad (16)$$

Poissonovi faktori ν_{12} , ν_{21} definirani su na način:

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\cos^2 \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \sin \theta}, \quad (17)$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \sin \theta}{\cos^2 \theta}, \quad (18)$$

U jednadžbi vidimo da vrijednosti Poissonovih faktora (ν_{12} , ν_{21}) iznose 1 za regularne heksagonske saće.

Modul smicanja G_{12} odredit će se također pomoću ravninske teorije naprezanja prostornog elementa:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}. \quad (19)$$

Kako je prikazano na Slika 16. radi simetrije nema relativnog pomaka točke A, B i C kada je saće opterećeno smikom. Smični pomak u_s je prouzrokovan radi savijanja grede BD i njegove rotacije kutom Φ oko točke B. Suma momenta oko točke B daje aplicirani moment gredi AB i BC.

$$M_B = \frac{F_{12}h}{4}, \quad (20)$$

gdje je

$$\Phi = \frac{F_{12}hl}{24E_s I}. \quad (21)$$

Smični pomak u_s točke D oko točke B iznosi:

$$u_s = \frac{1}{2}\Phi h + \frac{F_{12}}{3E_s I} \left(\frac{h}{2}\right)^3 = \frac{F_{12}h^2}{48E_s I} (l + 2h), \quad (22)$$

Kutna deformacija se može izračunati kao:

$$\gamma_{12} = \frac{2u_s}{h + l \sin \theta} = \frac{F_{12}h^2}{24E_s I} \frac{l + 2h}{(h + l \sin \theta)}. \quad (23)$$

Smično naprezanje iznosi:

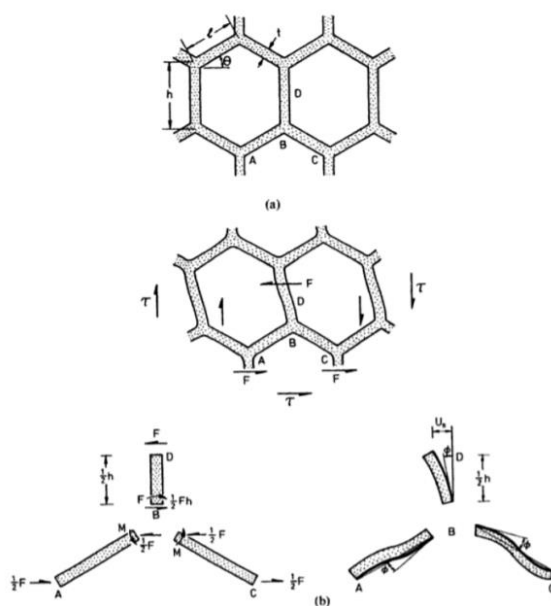
$$\tau_{12} = \frac{F_{12}}{2lb \cos \theta}. \quad (24)$$

Uvrštavanje jednadžbe (24) u jednadžbu (19) dobije se G_{12} :

$$\frac{G_{12}}{G_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 \left(1 + 2\frac{h}{l}\right) \cos \theta} \quad (25)$$

Gore navedene jednadžbe za izvod modula smicanja G_{12} vrijedi za ćelije aluminijskih saća koje ne uključuju dvostruku debljinu stranica ćelije. Ako u izvod uključimo i to modul smicanja G_{12} iznosi:

$$\frac{G_{12}}{G_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 \left(1 + 16\frac{h}{l}\right) \cos \theta} \quad (26)$$



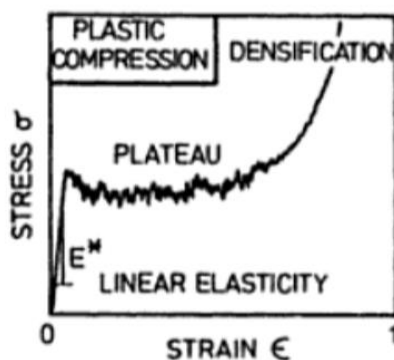
Slika 16. Određivanje modula smicanja [10]

2.3 Deformacijski mehanizmi aluminijskih saća izvan ravnine

Aluminijske saće su puno kruće i čvršće kada su opterećene u smjeru osi x_3 . Kao i kod razmatranja deformacijskih mehanizama u ravnini, mehanizme deformacije izvan ravnine možemo promatrati u dvije različite skupine naprezanja:

a) tlačno naprezanje

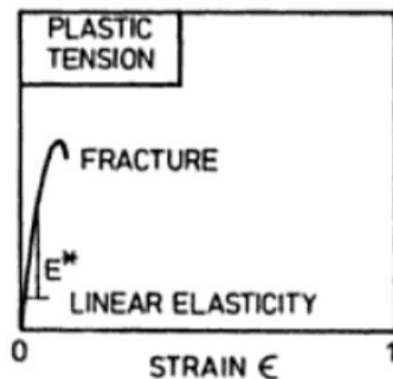
Na Sliku 17. vidimo pojavu linearnog elastičnog deformiranja do trenutka pojave Plateau područja gdje se dešava plastično izvijanje zidova saća. Konačno dolazi do kidanja ili totalnog urušavanja saća.[10]



Slika 17. Ponašanje aluminijskih saća kod tlačnog naprezanja izvan ravnine [10]

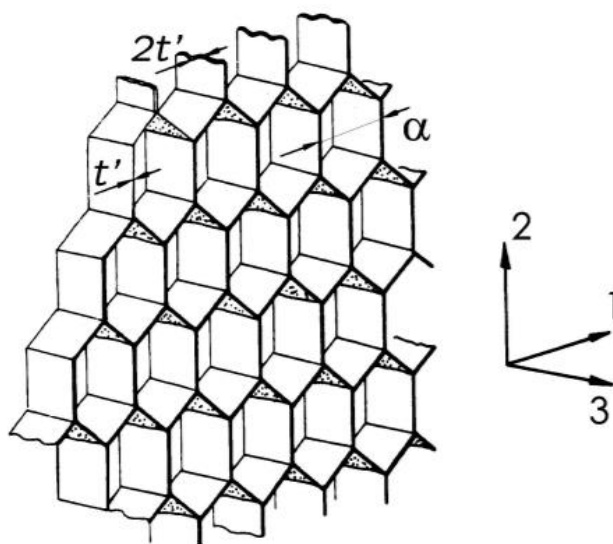
b) vlačno naprezanje

Na Slika 18. vidimo također pojavu linearnog elastičnog deformiranja do trenutka pojave kidanja zidova saća



Slika 18. Ponašanje aluminijskih saća kod vlačnog naprežanja izvan ravnine [10]

U deformacijskim mehanizmima saća u ravnini definirali su se 4 modula elastičnosti ($E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$). Kod elastičnih deformacijskih mehanizama naprežanja saća izvan ravnine definirat ćemo još 5 modula ($E_3, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{13}, G_{23}$). Slika 19. prikazuje orijentaciju glavnih osi u saćastom modelu.



Slika 19. Orijentacija glavnih osi u saćastom modelu [10]

Modul elastičnosti E_3 se jednostavno opisuje pomoću modula elastičnosti materijala E_s . Modul E_3 jednak je modulu E_s koji je umanjen sa faktorom omjera razlike normalne površine koja gleda na os z.

$$\frac{E_3}{E_s} = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{t \left(\frac{h}{l} + 1 \right)}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right) \cos \theta} \quad (27)$$

Poissonovi faktori ν_{31} , ν_{32} su jednaki Poissonovom faktoru materijala ν_s .

$$\nu_{31} = \nu_{32} = \nu_s \quad (28)$$

Kod određivanja Poissonovog faktora ν_{13} , ν_{23} koristit će se recipročne relacije:

$$\nu_{13} = \frac{E_1}{E_3} \nu_s \approx 0 \quad (29)$$

$$\nu_{23} = \frac{E_2}{E_3} \nu_s \approx 0 \quad (30)$$

U jednadžbama (29) i (30) vidimo da su Poissonovi faktori ν_{13} , ν_{23} približno jednaki nuli zbog omjera modula elastičnosti E_1 , E_2 naspram modulu elastičnosti E_3 .

Definiranje modula smicanja G_{13} , G_{23} je dosta komplicirano. Distribucija naprezanja kroz zidove ćelija nije uniformna zbog rubnih uvjeta uvjetovani susjednim zidovima, odnosno ravnina saća prestaje biti ravnina. Stoga se radi dobivanja egzaktnih vrijednosti koriste numeričke metode. Pojednostavljene vrijednosti u obliku minimalne i maksimalne vrijednosti modula moguće je dobiti koristeći metodu Kelsey-a.

Gornja granica vrijednosti dobije se pomoću minimalne potencijalne energije koja kaže da energija naprezanja izračunata iz bilo kojeg postavljenog skupa pomaka koji su kompatibilni s vanjskim rubnim uvjetima i sami po sebi bit će minimum za točnu raspodjelu pomaka. Definirane su maksimalne vrijednosti modula smicanja G_{13} , G_{23} :

$$\frac{G_{13}}{G_s} \leq \left(\frac{t}{l}\right) \frac{\cos \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)} \quad (31)$$

$$\frac{G_{23}}{G_s} \leq \left(\frac{t}{l}\right) \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin^2 \theta\right)}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \cos \theta} \quad (32)$$

Donja granica vrijednosti dobije se pomoću minimalne komplementarne energije koja kaže da je među raspodjelama naprezanja koje zadovoljavaju ravnotežu u svakoj točki i koje su u ravnoteži s vanjskim opterećenjima, energija naprezanja minimalna za točnu raspodjelu naprezanja. Definirane su maksimalne vrijednosti modula smicanja G_{13} , G_{23} :

$$\frac{G_{13}}{G_s} \geq \left(\frac{t}{l}\right) \frac{\cos \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)} \quad (33)$$

$$\frac{G_{23}}{G_s} \geq \left(\frac{t}{l}\right) \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin^2 \theta\right)}{\left(\frac{h}{l} + 1\right) \cos \theta} \quad (34)$$

Vidi se da modul smicanja G_{13} iznosi jednako u oba dva teorema. Uzima se kao konačna definirana veličina:

$$\frac{G_{13}}{G_s} = \left(\frac{t}{l}\right) \frac{\cos \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)}. \quad (35)$$

Uz određene granice modula smicanja G_{23} potrebno je odrediti njegovu konačnu vrijednost. Koristeći analizu konačnih elemenata mezostrukture jedne ćelije, Grediac (1993) je pokazao da modul smicanja G_{23} opada s porastom faktora b/l . Modul smicanja G_{23} definiran je na način:

$$G_{23} \cong G_{23_{\min}} + \frac{0,787}{\left(\frac{b}{l}\right)} (G_{23_{\max}} - G_{23_{\min}}). \quad (36)$$

2.4 Ortotropno ponašanje aluminijskih saća

S konačnim definiranjem svih modula elastičnosti možemo vidjeti da ponašanje ovakvog modela jest ortotropno. Saće sadrže ukupno 9 nezavisnih elastičnih konstanti:

- 4 konstante u području elastičnog deformiranja materijala u ravnini
 - E_1
 - E_2
 - $\nu_{12} = \nu_{21}$
 - G_{12}
- 5 konstanti u području elastičnog deformiranja materijala izvan ravnine
 - E_3
 - $\nu_{31} = \nu_{32}$
 - $\nu_{13} = \nu_{23}$
 - G_{13}
 - G_{23}

Elastični ortotropni model pomoću konstanti elastičnosti definirani se pomoću matrice

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Također, matrica se može definirati preko definiranja konstanti krutosti elastičnosti na način:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ D_{1122} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ D_{1133} & D_{2233} & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \quad (38)$$

$$= [D^{el}] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix},$$

gdje je:

$$D_{1111} = E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})Y, \quad (39)$$

$$D_{2222} = E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})Y, \quad (40)$$

$$D_{3333} = E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})Y, \quad (41)$$

$$D_{1122} = E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})Y = E_2(\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13})Y, \quad (42)$$

$$D_{1133} = E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})Y = E_3(\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})Y, \quad (43)$$

$$D_{2233} = E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})Y = E_3(\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13})Y, \quad (44)$$

$$D_{1212} = G_{12}, \quad (45)$$

$$D_{1313} = G_{13}, \quad (46)$$

$$D_{2323} = G_{23}, \quad (47)$$

gdje je:

$$Y = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}. \quad (48)$$

Kako je već objašnjeno u uvodu ovog rada, FSB Racing Team proizvodi kompozitnu monokok šasiju sa sendvič konstrukcijom. U cilju ostvarivanja zadovoljenih uvjeta sigurnosti sendvič paneli mogu sadržavati velik broj različitih tipova jezgri kao što je u ovom slučaju aluminijske saće. FSB Racing Team ove godine proveo je metodom konačnih elemenata pedesetak različitih tipova sendvič konstrukcija, te eksperimentalno validirala nekoliko. U cilju toga, napravljena je jedna Excel tablica radi lakšeg računanja ulaznih podataka potrebnih za metodu konačnih analiza koju ćemo iskoristiti i ovdje. Excel tablica sa potrebnim ulaznim podacima geometrije ćelije i svojstvima materijala aluminijske saće se može vidjeti na Slika 20. Napomena, u tablici je uključeno i plastično ponašanje materijala koje za potrebe ovog rada se može zanemariti.

3D-element Honeycomb			LEGEND		
Isotropic material:		Honeycomb cell:			
ρ_m	2680 kg/m^3	w ("cell size")	3.175 mm	Yellow	input data
E_m	70900 MPa	l	1.8330871 mm	White	calculated data
ν_m	0.33	h	1.8330871 mm	Green	output data
G_m	26428.5714 MPa	h/l	1		
σ_{ys}	260 MPa	b	15 mm		
		t ("foil gauge")	0.01778 mm		
		θ ("angle")	30 rad		
			0.5236		

Linear Elastic			Buckling and Plastic collapse			Stress-Strain		
Gibson/Ashby equations			Wierzbicki, Gibson/Ashby			Hill Yield Criteria-Potential		
ρ	40.0213333 kg/m^3		$\sigma_{1,pl}$	0.0163072 MPa	R_{11}	0.02154	σ_y [MPa]	1.587733397
E_1	0.14814966 MPa		$\sigma_{2,pl}$	0.0163072 MPa	R_{22}	0.02154	ϵ_y [mm/mm]	0
E_2	0.14814966 MPa		$\sigma_{3,pl}$	0.75700435 MPa	R_{33}	1		0.757004348
E_3	1049.81333 MPa		$t_{12,pl}$	0.0282449 MPa	R_{12}	0.06463		0.809994653
ν_{12}	0.999		σ_0	0.75700435 MPa	R_{13}	0		0.866694278
ν_{21}	0.999		τ_0	0.43705666 MPa	R_{23}	0		0.927362878
ν_{13}	4.657E-05		Zhang/Ashby					0.992278279
ν_{31}	0.33		$\sigma_{1,el}$	1.5877334 MPa				1.061737759
ν_{23}	4.657E-05							1.136059402
ν_{32}	0.33							1.21558356
G_{12}	0.00653601 MPa							
G_{13}	148 MPa							
G_{23}	224.372341 MPa							
$G_{23,min}$	222 MPa							
$G_{23,max}$	246.666667 MPa							

Slika 20. Kalkulator ulaznih podataka aluminijskih saća

Vrijednosti konstante elastičnosti i relativna gustoća se može vidjeti u tablici 3.

ρ , [kg/m ³]	40,021
E_1 , [MPa]	0,148
E_2 , [MPa]	0,148
E_3 , [MPa]	1049,813
$\nu_{12} = \nu_{21}$	0,999
$\nu_{31} = \nu_{32}$	0,33
$\nu_{13} = \nu_{23}$	4,657e-5
G_{12} , [MPa]	0,00654
G_{13} , [MPa]	148
G_{23} , [MPa]	224,372
$G_{23,\min}$, [MPa]	222
$G_{23,\max}$, [MPa]	246,667

Tablica 3. Konstante elastičnosti i relativna gustoća saća

U tablici se može vidjeti visoka razlika elastičnih konstanti izvan ravnine za razliku konstanti u ravnini. Poissonov faktor ν_{12} i ν_{21} teoretski iznose 1. Međutim, taj vrijednost u stvarnosti nikad neće biti 1. Uzeta je vrijednost 0,999.

Matrica konstanti elastičnih krutosti iznosi:

$$[D^{el}] = \begin{bmatrix} 76,461 & 76,387 & 50,440 & 0 & 0 & 0 \\ 76,387 & 76,461 & 50,440 & 0 & 0 & 0 \\ 50,440 & 50,440 & 1083,104 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,00654 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 148 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 224,372 \end{bmatrix} \quad (49)$$

D_{1111}	76,461
D_{1122}	76,387
D_{2222}	76,461
D_{1133}	50,440
D_{2233}	50,440
D_{3333}	1083,104
D_{1212}	0,00654
D_{1313}	148
D_{2323}	224,372

Tablica 4. Konstante krutosti saća

2.5 Stabilnost materijala

Potrebno je provjeriti stabilnost ovakvog ortotropnog modela. Potrebno je zadovoljiti nekoliko uvjeta kod konstanti krutosti elastičnog ponašanja materijala [12]:

$$D_{1111}, D_{2222}, D_{3333}, D_{1212}, D_{1313}, D_{2323} > 0 \quad (50)$$

1. uvjet je zadovoljen

$$|D_{1122}| < (D_{1111}D_{2222})^{\frac{1}{2}} \quad (51)$$

$$|76,387| < (76,461 \cdot 76,461)^{\frac{1}{2}} = 76,461 \quad (52)$$

2. uvjet je zadovoljen

$$|D_{1133}| < (D_{1111}D_{3333})^{\frac{1}{2}} \quad (53)$$

$$|50,440| < (76,461 \cdot 1083,104)^{\frac{1}{2}} = 287,776 \quad (54)$$

3. uvjet je zadovoljen

$$|D_{2233}| < (D_{2222}D_{3333})^{\frac{1}{2}} \quad (55)$$

$$|50,440| < (76,461 \cdot 1083,104)^{\frac{1}{2}} = 287,776 \quad (56)$$

4. uvjet je zadovoljen

$$\det(D^{el}) > 0 \quad (57)$$

$$D_{1111}D_{2222}D_{3333} + 2D_{1122}D_{1133}D_{2233} - D_{2222}D_{1133}^2 - D_{1111}D_{2233}^2 - D_{3333}D_{1122}^2 > 0 \quad (58)$$

$$11892,098 > 0 \quad (59)$$

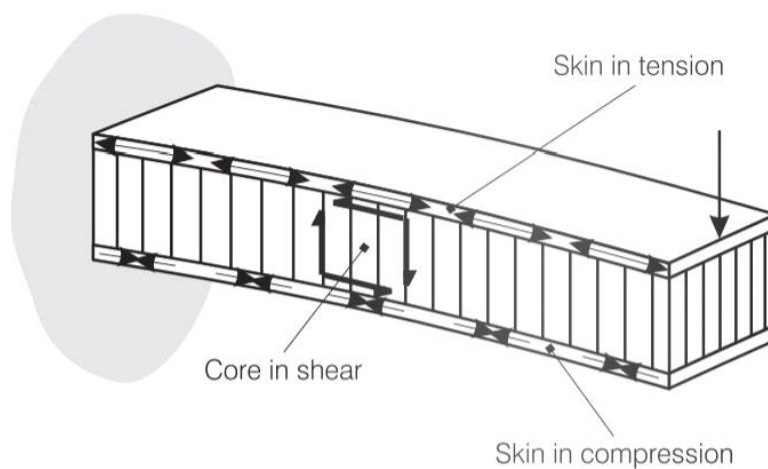
5. uvjet je zadovoljen

3 MEHANIKA SENDVIČ KONSTRUKCIJE

Kod rješavanja mehanike sendvič konstrukcije potrebno je sendvič konstrukciju promatrati kao gredni element.

Na Slika 21. je vidljiva sendvič konstrukcija opterećena poznatom silom. Ta sila uzrokuje moment koje je maksimalan u uklještenju, te smične sile kroz cijelu dužinu zamišljene grede.

U gornjoj ljusci pojavljuju se vlačno naprezanje dok u donjoj ljusci se pojavljuje tlačno naprezanje. Jezgra preuzima smična naprezanja što osigurava homogenost takve konstrukcije. [5]

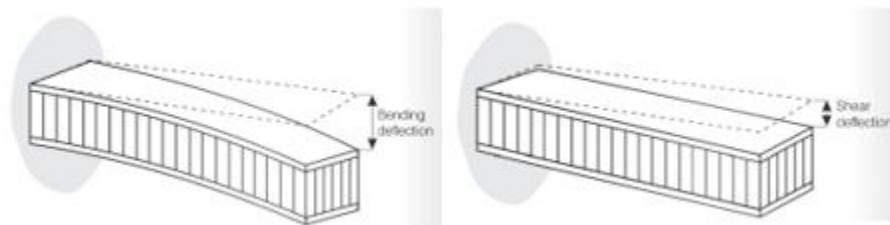


Slika 21. Opterećenje sendvič konstrukcije [5]

Vanjska sila stvara određeni progib. Progib se dijeli na:

- progib uzrokovan savijanjem
- progib uzrokovan smikom

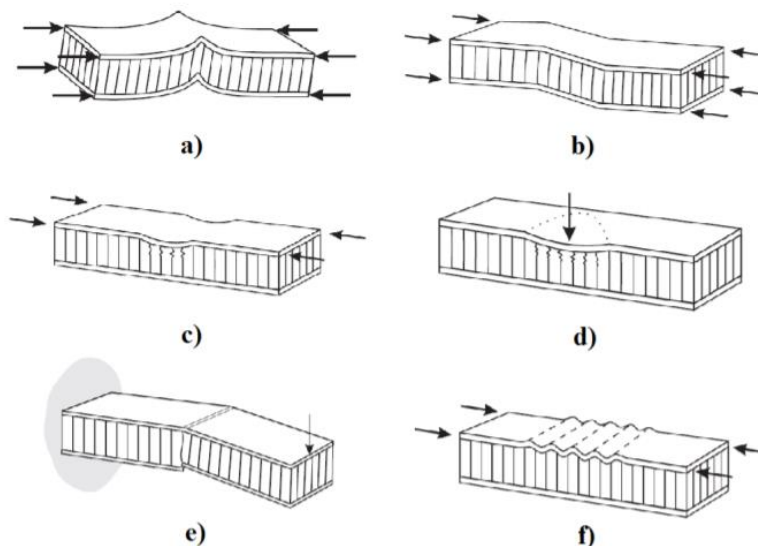
Ukupni progib jednak je zbroju ova dva progiba prikazani na Slika 22.



Slika 22. Progibi uzrokovani savijanjem i smikom [5]

Popuštanje konstrukcije može se dogoditi uslijed popuštanja vanjskih ljuski ili jezgre konstrukcije. Neki od načina popuštanja su prikazani na Slika 23.:

- a) i b) popuštanje ljuski zbog nedovoljne debljine i modula smicanja jezgre
- c) udubljenje ljuske uzrokovano nedovoljnom krutošću ljuske i čvrstoće jezgre
- d) utiskivanje jezgre zbog nedovoljne tlačne čvrstoće jezgre
- e) popuštanje donje ljuske zbog previsokih tlačnih naprezanja uslijed savijanja
- f) nabiranje gornje ljuske uslijed korištenja prevelike jedinične ćelije saća



Slika 23. Načini popuštanja sendvič konstrukcije [5]

Kako bi se spriječile ovakve neočekivane pojave potrebno je početno proračunati pojedina svojstva kao što su:

- pretpostaviti materijal ljuske, debljinu ljuske i debljinu konstrukcije (zanemariti materijal jezgre)
- proračunati krutost
- proračunati progib (zanemariti progib uzrokovan smikom)
- proračunati potrebnu čvrstoću ljuski
- proračunati potrebnu smičnu čvrstoću jezgre

Kada su se početne stavke provele, korigira se debljina i materijal ljuske, debljina konstrukcije, te se odabire zadovoljavajuća jezgra. Postupak se ponavlja, uz dodatne proračune kod popuštanja konstrukcije [5]

3.1 Sendvič konstrukcija opterećena savijanjem u tri točke

Vrsta saća je **1/8-5052-.0007** kako je određeno je u prethodnoj cjelini.

Materijal ljuske je **aluminij 5754** debljine 2 mm. Svojstva materijala prikazana su u **tablici**

$E, [\text{N}/\text{mm}^2]$	70300
ν	0,33
$G, [\text{N}/\text{mm}^2]$	25900

Tablica 5. Mehanička svojstva aluminija 5754 [13]

Kao i kod mehanike saća, savijanje u 3 točke sendvič konstrukcije ograničeno je linearnom elastičnom analizom. Na Slika 24. se može vidjeti primjer sendvič konstrukcije kod savijanja u 3 točke. Dimenzije sendvič konstrukcije prikazani na Slika 25., vidljivi su u Tablica 6.

L , [mm]	400
L_1 , [mm]	360
w , [mm]	90
t_1 , [mm]	2
b , [mm]	15
h_1 , [mm]	17

Tablica 6. Dimenzije sendvič konstrukcije kod savijanja u tri točke

Uz pretpostavku da su ljuske nepomično učvršćene sa jezgrom može se izračunati krutost kod savijanja: [4]

$$D_f = \frac{Ewt_1^3}{6} + \frac{Ewt_1h_1^2}{2} + \frac{E_{cx}wb^3}{12}, [\text{Nmm}^2] \quad (60)$$

Ova jednadžba se može pojednostaviti. Prvi i treći član iznose manje od 1% ukupne vrijednosti krutosti. Stoga krutost kod savijanja računa se kao:

$$D_f = \frac{Ewt_1h_1^2}{2}, [\text{Nmm}^2] \quad (61)$$

Smična krutost računa se kao:

$$K = wh_1G_C, [\text{N}] \quad (62)$$

Ukupni progib se računa na način:

$$s = \frac{k_b PL_1^3}{D_f} + \frac{k_s PL_1}{K}, [\text{mm}] \quad (63)$$

Čvrstoća ljuske računa se:

$$\sigma_f = \frac{M}{h_1 t_1 w}, [\text{N/mm}^2], \quad (64)$$

gdje je:

$$M = \frac{PL_1}{4}, [\text{Nmm}] \quad (65)$$

Smično naprezanje u jezgri računa se:

$$\tau_c = \frac{F}{h_1 w}, [\text{N/mm}^2] \quad (66)$$

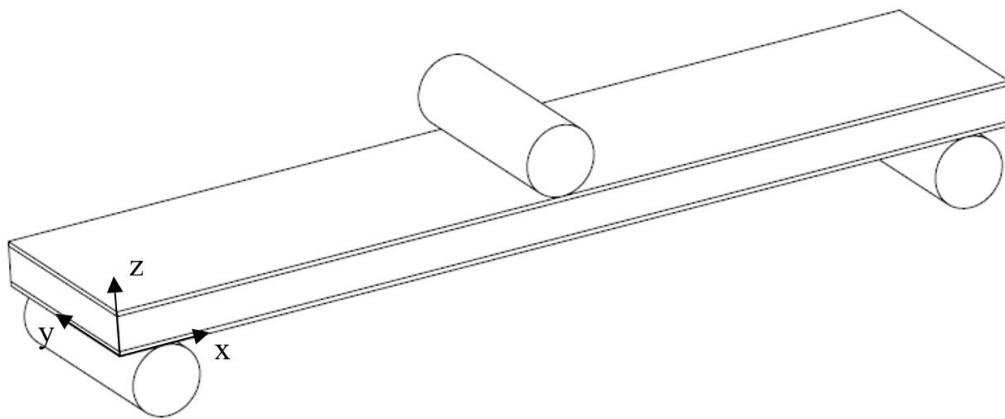
gdje je:

$$F = \frac{P}{2}, [\text{N}] \quad (67)$$

Izraz za računanje savojnog modula elastičnosti E_b glasi:

$$E_h = \frac{L_1^3}{4w(b + 2t_1)^3} \frac{\Delta F}{\Delta s}, [\text{N/mm}^2] \quad (68)$$

gdje veličina s predstavlja progib uzorka pri savijanju. Radi jednostavnosti u daljnjem tekstu član $(\Delta F/\Delta s)$ zamijenit ćemo simbolom S , $[\text{N/mm}]$



Slika 24. Sendvič konstrukcija kod savijanja u tri točke



Slika 25. Dimenzije sendvič konstrukcije kod savijanja u tri točke

4 Numeričko modeliranje i računalne simulacije

Numeričko modeliranje i računalne simulacije temelje se na metodi konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata je metoda zasnovana na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Današnjica prati svakodnevni razvoj računala te samim time i razvoj analize konačnih elemenata. U industriji, metoda je sve više prihvaćena zbog smanjenja vremena koje bi uzelo ručno računanje veliki broj jednadžbi u kompliciranim sustavima. Uz to, metodom se brže i lakše optimiraju konstrukcije te se smanjuju troškovi koje bi bilo potrebno utrošiti na velik broj eksperimentalnih ispitivanja.

U ovom radu korišten je programski paket *Simulia Abaqus/CAE 2021*. Simulacije su provedene pomoću *Abaqus/Standard* postupka uz pretpostavku čisto linearno elastičnih svojstava materijala.

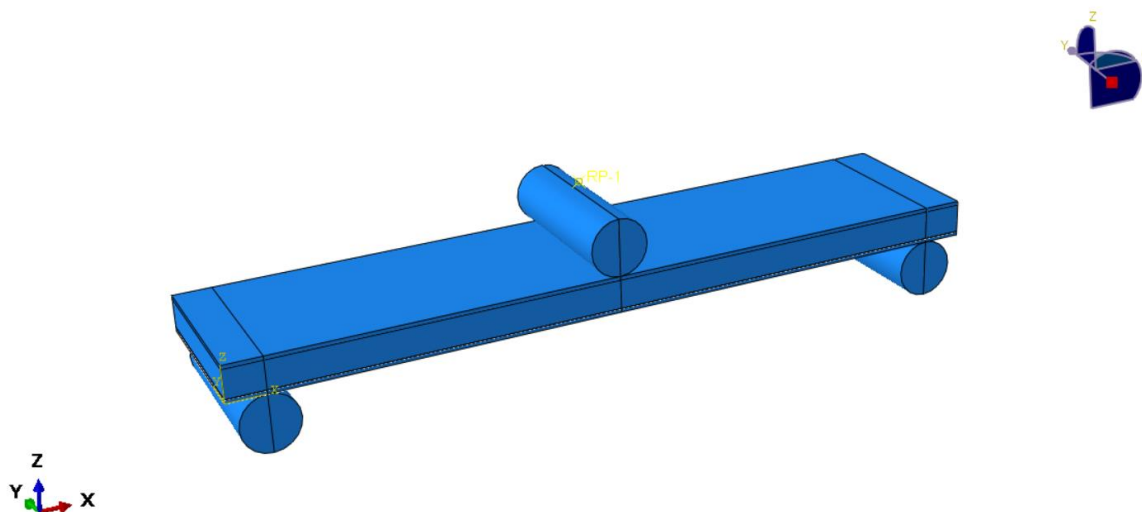
U ovom radu proučavaju se numerička rješenja simulacijskog modela sendvič konstrukcije kod savijanja u tri točke. Rješenja su ograničena na linearno elastičnu analizu gdje će se prikazati rješenja numeričke simulacije u dijagramu sila-pomak. Rješenja će uspoređivati samo a krutosti i savojne module elastičnosti ne ulazeći u teorije popuštanja konstrukcije.

Promatrat će se model sa tri različita načina definiranja jezgre modela:

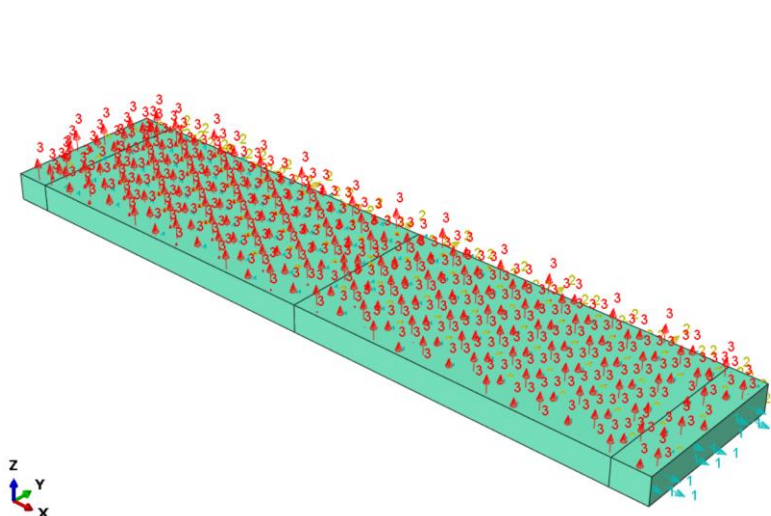
1. Homogenizirani model aluminijskih saća u kojem su određene konstante krutosti u odnosu na geometriju i materijal ćelije
2. Homogenizirani model aluminijskih saća u kojem su konstante krutosti preuzete od proizvođača
3. Model stvarne konstrukcije ćelije aluminijskih saća

4.1 Opis 1. numeričkog modela

Numerički model prikazan je na Slika 26. Saće su modelirane kao homogenizirani model kojem su pridružene elastične konstante krutosti ortotropnog ponašanja materijala navedene u Tablica 4. Zbog ortotropnog ponašanja modela potrebno je definirati orijentaciju takvog modela pomoću funkcije „Assign Material Orientation“ kao što je prikazano na Slika 27. Napomena: Vrijednosti G_{13} i G_{23} su međusobno zamijenjene zbog zamijenjene orijentacije x i y .



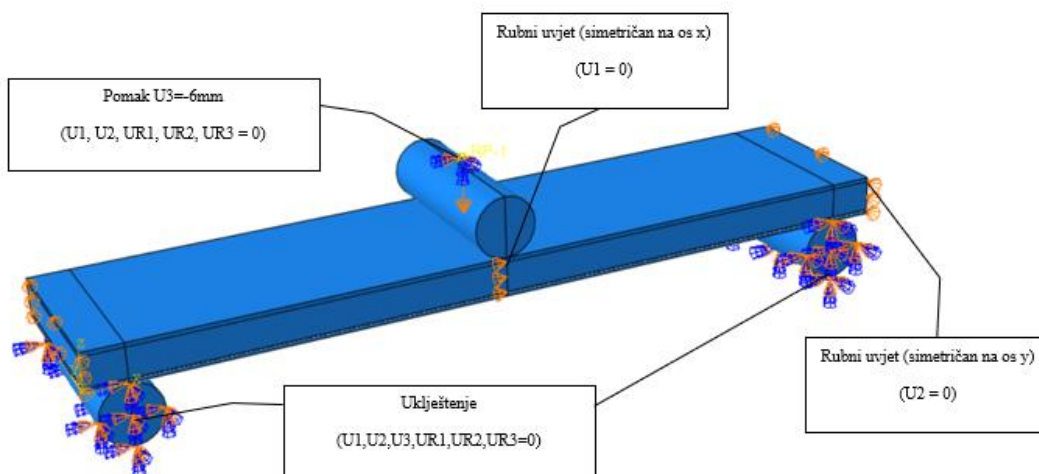
Slika 26. Prvi opisani numerički model



Slika 27. Definiranje orijentacije materijala

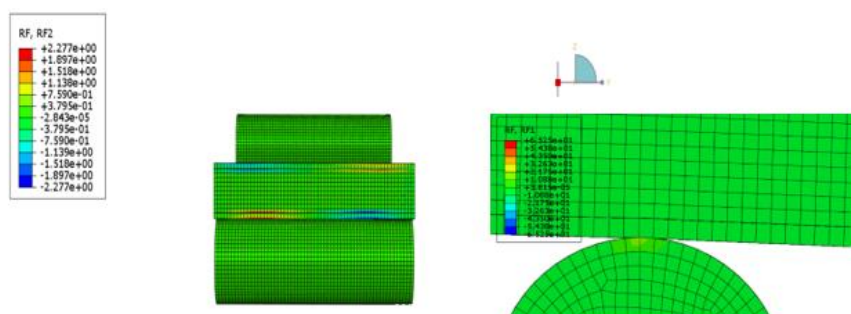
Ljuskama sendvič konstrukcije nije potrebno definirati orijentaciju materijala zbog izotropnog ponašanja aluminija. Materijalu je dodijeljen Youngov modul elastičnosti i Poissonov faktor koji su prikazani u Tablica 5. Valjci koji služe kao aplikator sile i oslonci sendvič konstrukcije su čelični promjera 30 mm. Dodijeljeno je svojstvo kontakta između valjaka i ljuski sendvič konstrukcije sa normalnim i tangencijalnim ponašanjem sa uključenim faktorom trenja koji iznosi 1,45. Ostvarivanje adhezivnog spoja između ljuski i jezgre konstrukcije postignuto je opcijom „Tie“ koje pomoću stupnjeva slobode gibanja osigurava da nema relativnog pomaka između elemenata ljuski i jezgre, odnosno $U_1, U_2, U_3, UR_1, UR_2, UR_3 = 0$.

Rubni uvjeti prikazani su na Slika 28. Funkcija „Encastre“ je korištena na osloncima dok kod aplikatora sile je oslobođen stupanj slobode kretanja u z -os. Ukupni progib iznosi 6 mm. Numerička analiza očitava silu preko jedne referentne točke u sustavu koja je opcijom „Coupling“ povezana sa aplikatorom sile gdje je $U_1, U_2, U_3, UR_1, UR_2, UR_3 = 0$.



Slika 28. Rubni uvjeti prvog opisanog numeričkog modela

Kako bi se spriječili mali pomaci između oslonaca, aplikatora sile i sendvič konstrukcije primijenjena su dodatna dva rubna uvjeta koja ne utječu na konačne rezultate. Na Slika 29. se može vidjeti kako reakcijske sile ostvarene zbog dva dodatna rubna uvjeta su malog iznosa i takve se mogu zanemariti ($RF_1 = 65 \text{ N}$, $RF_2 = 2 \text{ N}$).



Slika 29. Prikaz reakcijske sile kod dva dodatna rubna uvjeta

U ovom numeričkom modelu korišteni su elementi oblika heksaedra s osam čvorova i reduciranom integracijom (C3D8R) prikazano na Slika 30. U simulaciji je korišteno 269100 konačnih elemenata. Taj broj izabran je na temelju konvergencije ostvarene sile u smjeru osi z na maksimalnom progibu od 6 mm prikazano na Slika 31.



Slika 30. Diskretizirani prvi numerički model sa konačnim elementima



Slika 31. Konvergencija rezultata prvog numeričkog modela

4.2 Opis 2. numeričkog modela

Razlika ovog numeričkog modela u odnosu na prošli opisani jest u drugačijim ulaznim podacima aluminijskih saća. Koristit će se podaci dobiveni od proizvođača vidljivi u Tablica 7. Zbog samo promjene ulaznih podataka materijala saća, koristit će se isti numerički model za rezultate.

Važno je napomenuti da proizvođači ne daju vrijednosti Poissonovih faktora, te konstante E_1 , E_2 i G_{12} jer su ti iznosi zanemarivi u odnosu na prikazane konstante. Također može se uočiti razlika vrijednosti u odnosu na proračunata elastična. To se opravdava zbog samog načina proizvodnje aluminijskih saća gdje male nepravilnosti u mezostrukтури modela imaju veliki utjecaj na elastična svojstva modela.

Konstante elastičnih svojstva koje nedostaju preuzet ćemo iz prvog slučaja te odrediti novu matricu sa konstantama krutosti prikazani u Tablica 8. [8]

ρ , [kg/m ³]	49,657
E_3 , [MPa]	517,11
G_{13} , [MPa]	310,26
G_{23} , [MPa]	151,68

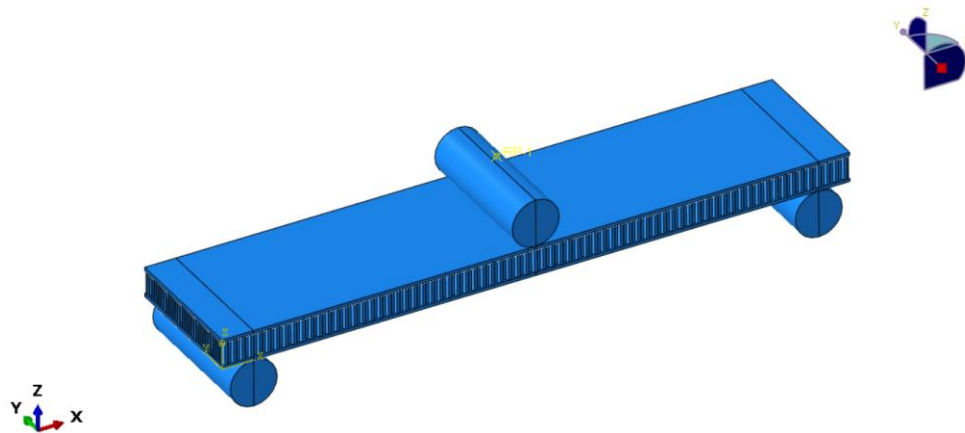
Tablica 7. Konstante elastičnih vrijednosti dobiveni od proizvođača [8]

D_{1111}	79,042
D_{1122}	78,968
D_{2222}	79,042
D_{1133}	52,143
D_{2233}	52,143
D_{3333}	551,524
D_{1212}	0,00654
D_{1313}	310,26
D_{2323}	151,68

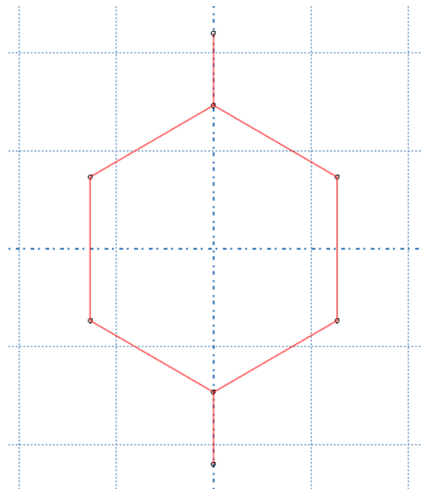
Tablica 8. Konstante krutosti saća izvedene iz konstanti elastičnosti dobivenih od proizvođača

4.3 Opis 3. numeričkog modela

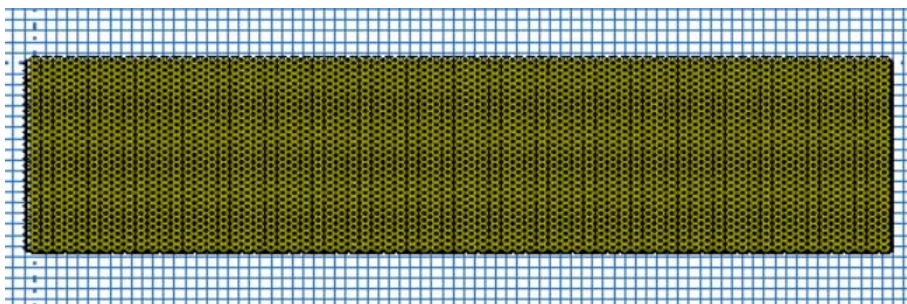
Numerički model prikazan je na Slika 32. Aluminijske saće modelirane pomoću stvarne geometrije ćelije gdje su modelu dodijeljena svojstva materijala aluminijske. Modeliranje geometrije saća iznimno je zahtjevno, stoga se modeliranje izvršilo izravno u simulacijskom paketu *Abaqus/CAE*. Kako bi smanjili vrijeme eksportiranja ovakvog modela korištena je opcija „*Shell-Extrusion*“ Modelirana je jedna ponavljajuća ćelija aluminijske saća prikazana na Slika 33. Zatim se opcijom „*Linear Pattern*“ odredio broj ponavljanja ovakvog uzorka na konačnu željenu veličinu jezgre prikazano na Slika 34. Nakon ekstrudiranja konačni model saća prikazan je na Slika 35. Ukupno vrijeme eksportiranja ovog modela trajalo je približno 10 sati. Svojstvo materijala modelu je dodijeljeno „*Create Section*“ tipa „*Shell, Homogeneous*“ gdje je pridružena veličina t iznosa 0,01778. Slika 36. prikazuje renderirani prikaz shell modela.

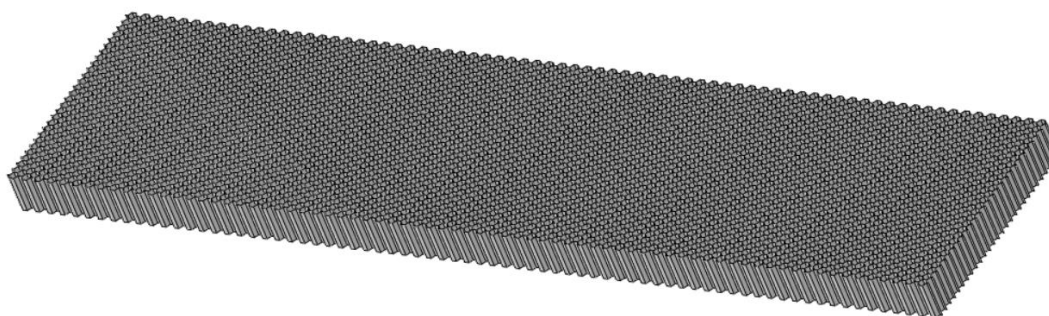


Slika 32. Treći analizirani numerički model



Slika 33. Model jedne ponavljajuće ćelije

Slika 34. Model opisan funkcijom *Linear Pattern*



Slika 35. Izgled konačnog modela jezgre od aluminisjkih saća

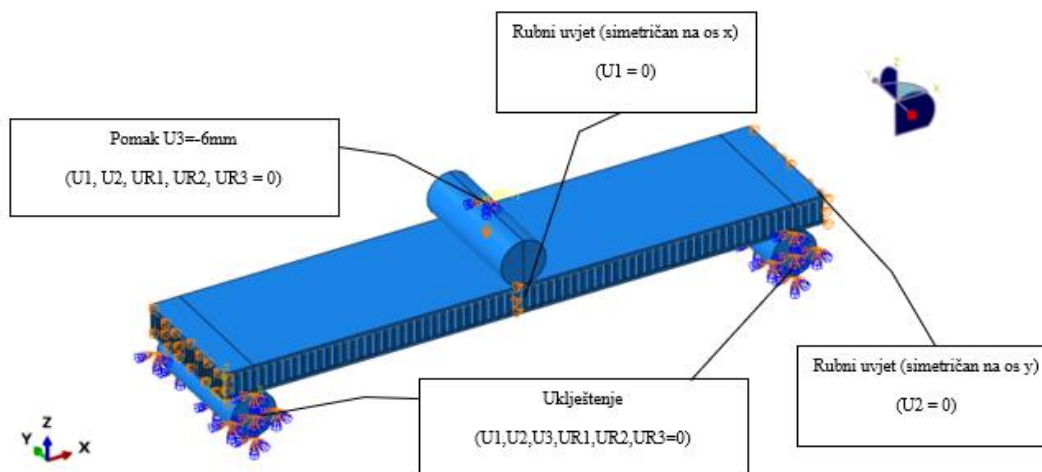


Slika 36. Rendirani prikaz Shell modela jezgre od aluminisjkih saća

Bitno je napomenuti da je kao rješavač ovog problema korištena „*Dynamic, Implicit*“ metoda. Dynamic, Implicit metoda je kvazistatična metoda koja se koristi ako je model neovisan o vremenu ali su prisutne velike distorzije elemenata kao što je slučaj kod aluminisjkih saća. Ova metoda efikasno može smanjiti vrijeme trajanja simulacije.

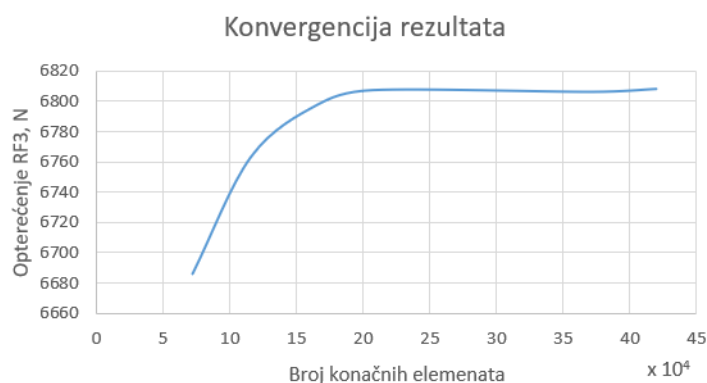
Kontakt između valjaka i ljuski sendvič konstrukcije definiran je na isti način kao u prethodna dva modela. Kontakt između jezgre i ljuski modeliran je također pomoću opcije „*Tie*“ ali je umjesto „*surface to surface*“ korištena „*node to surface*“ diskretizacijska metoda.

Rubni uvjeti definirani su na slični način kao u prethodna dva modela prikazani na Slika 37.



Slika 37. Rubni uvjeti trećeg opisanog numeričkog modela

U ovom numeričkom modelu ljske sendvič konstrukcije opisani su s elementima oblika heksaedra s osam čvorova i reduciranom integracijom (C3D8R) na isti način kao u prva dva opisana numerička modela. Jezgra od aluminijskih saća opisana je s četverokutnim površinskim elementima s reduciranom integracijom (S4R) prikazano na Slika 30. U simulaciji je korišteno 489942 konačnih elemenata gdje je 70484 C3D84 elemenata i 419458 S4R elemenata. Taj broj izabran je na temelju konvergencije ostvarene sile u smjeru osi z na maksimalnom progibu od 6 mm prikazano na Slika 38.



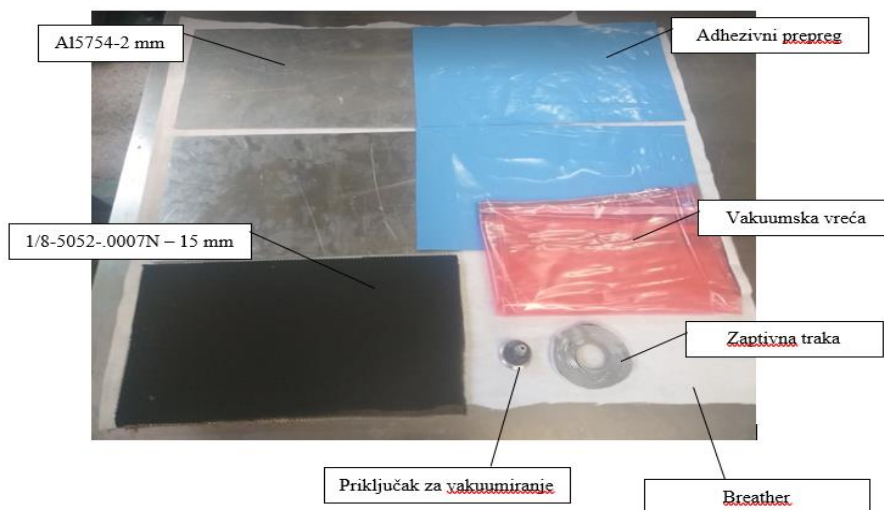
Slika 38. Konvergencija rezultata trećeg numeričkog modela

5 EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE UZORAKA SENDVIČ KONSTRUKCIJE

Eksperimentalna ispitivanja provedena su radi validacije rezultata provedenih numeričkih analiza. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje

5.1 Izrada uzoraka

Uzorci su izrađeni u prostorijama FSB Racing Team-a. Na Slika 39. su prikazani materijali korišteni za izradu ukupno dva uzorka iste sendvič konstrukcije. Uz spomenuto aluminijske saće (1/8-5052-.0007N) te aluminijskih limova – Al5754, na Slika 39. se može vidjeti adhezivni prepreg¹ (XA120 150g) na bazi epoksidne smole, vakuumska vreća, zaptivna traka za brtvljenje, brider (*eng: Breather*), te priključak za vakumiranje.



Slika 39. Materijali korišteni za izradu uzoraka

¹ Adhezivni prepreg je adhezivni sloj u neotvrdjenom stanju koji se aktivira tek na određenoj temperaturi. Adhezivni prepreg sadrži u sebi tanka isprepletana staklena vlakna zbog lakšeg polaganja slojeva. Prepreg se najčešće viđa u formi epoksidnih slojeva ojačana karbonskim ili staklenim vlaknima.

Postupak izrade počinje rezanjem aluminijskih saća, aluminijskih limova i adhezivnog preprega na željenu veličinu. Proces laminiranja teče na način da prvo postavimo aluminijsku ljusku na radni stol, na nju „lijepimo“ adhezivni prepreg te se zatim dodaje aluminijske saće. Postupak ponovimo obrnutim redoslijedom. Konačni oblik sendvič konstrukcije prikazan je na Slika 40.



Slika 40. Oblik sendvič konstrukcije nakon slaganja

Nakon toga, sendvič konstrukcija se umotava u brider koji osigurava jednoliko distribuiranje vakuuma po cijelom uzorku. Zatim takav uzorak se postavlja u vakuumsku vreću koja se sa zaptivnom trakom brtvi. Prije samog potpunog zatvaranja vakuumske vreće potrebno je postaviti priključak za crijevo. Na priključak spajamo crijevo i vakuum pumpu te se postavlja u pećnicu prikazano na Slika 41. Prije početka pečenja potrebno je provjeriti da je ostvaren vakuum i da nema propuštanja zraka kroz takav sustav. Vakuum se provjerava na ventilu ugrađenim u pećnici.



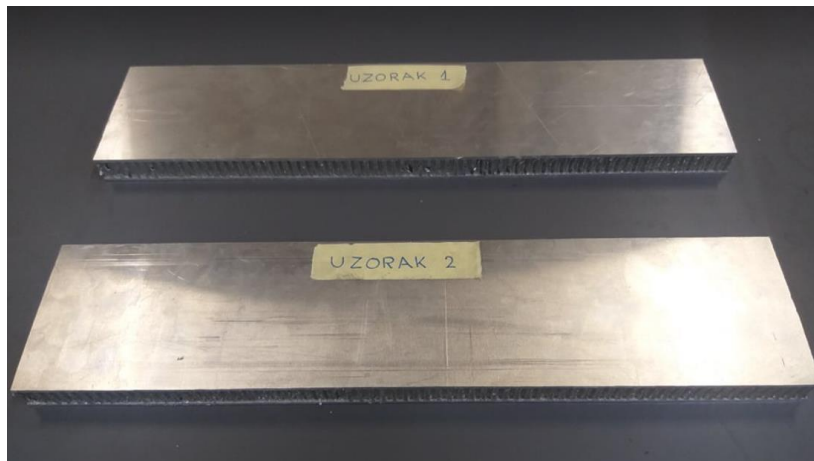
Slika 41. Proizvod pod vakuumom u pećnici

Na pećnici se određuje ciklus pečenja ovisan o temperaturi i vremenu. Podaci su dostupni od proizvođača adhezivnog prepreg-a. [14]. Na slici je prikazan dijagram temperature i vremena. Proces pečenja podijeljen je u dva ciklusa. U prvom ciklusu diže se temperatura na 100°C. Brzina dizanja temperature postavljena je na 2°C po minuti. Nakon toga slijedi ciklus podvrgavanja uzorka višom temperaturom radi postizanja boljih svojstava i da se ispuste plinovi koji su se stvorili prilikom umrežavanja, tzv „postcure“. Temperatura se diže na maksimalnu temperaturu 120°C uz brzinu dizanja temperature 0,3°C. Ukupno vrijeme pečenja iznosi 6 sati i 46 minuta. Važno je napomenuti kako tokom pečenja uzorak mora biti cijelo vrijeme pod vakuumom kako bi se dobila najbolja mehanička svojstva.



Slika 42. Dijagram temperatura-vrijeme kod ciklusa pečenja uzoraka

Uzorak nakon pečenja pušten je da se ohladi na sobnoj temperaturi te se potom reže na željenu veličinu. Gotovi uzorci nakon pečenja i rezanja prikazani su na Slika 43. Kod proizvodnje sendvič konstrukcije sa saćastom jezgrom dešava se problem urušavanja jezgre u smjeru osi x i y zbog djelovanja tlaka kod procesa vakumiranja na otvorene rubove jezgre. Problem se rješava na način da se oko uzorka podese letvice čvrstog materijala (npr. drvo) jednake debljine kao jezgra kako bi se spriječilo urušavanje. Zbog olakšanja proizvodnje u ovom slučaju se nisu podesile letvice, već se početni uzorak skalirao za iskustveni faktor da bi se nakon rezanja mogla dobiti željena veličina uzoraka.



Slika 43. Konačni uzorci nakon pečenja i rezanja

5.2 Ispitivanje uzoraka

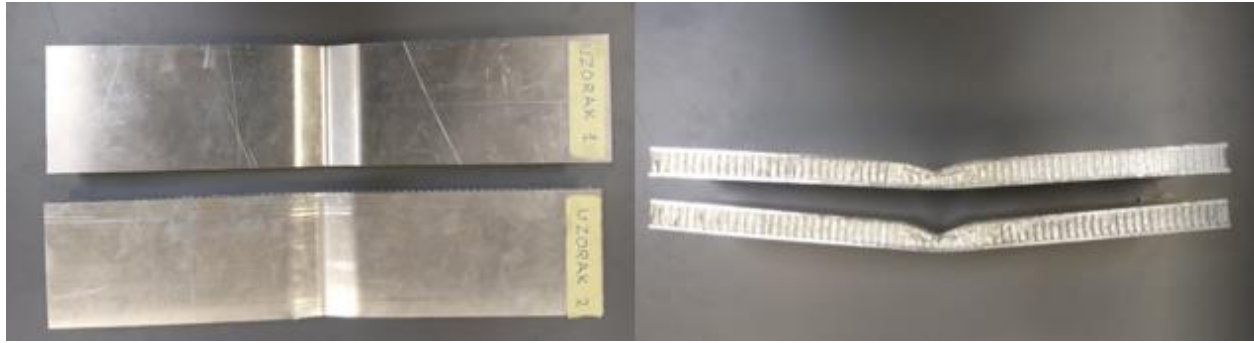
Ispitivanje je provedeno na statičkoj kidalici *MESSPHYSIK BETA 50-5* prikazana na Slika 44. Kako je već određeno, podešen je razmak oslonca na 360 mm. Uzorak se postavlja na ispitne oslonce i centriraju se s obzirom na vertikalnu os aplikatora sile kako je prikazano na Slika 45. Brzina aplikatora sile podešena je na 3,5 mm/min. Promjer valjaka iznosi 30 mm. Podešava se kidalica tako da aplikator sile dođe u dodir sendvič konstrukcije sa predopterećenjem iznosa 5 N. Kidalica zatim putem računala očitava podatke u obliku koraka u jedinici vremena, očitane sile i pomaka aplikatora sile. Ispitni uzorak nakon ispitivanja prikazan je na Slika 46.



Slika 44. Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5



Slika 45. Postavljanje uzoraka na kidalicu

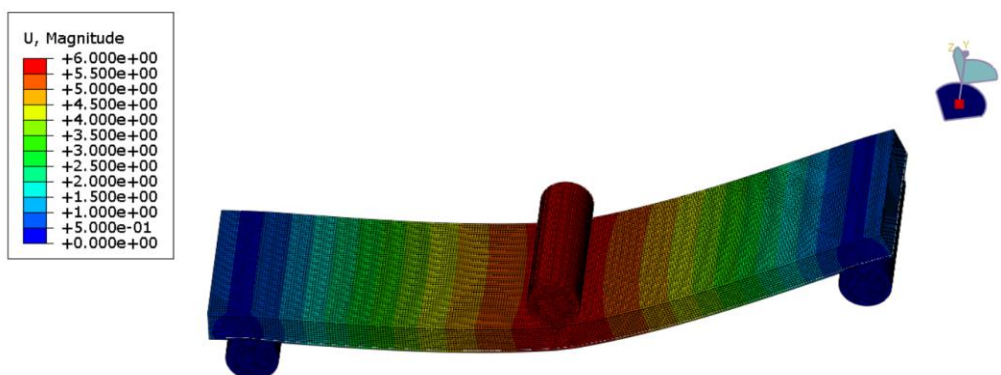


Slika 46. Uzorci nakon ispitivanja

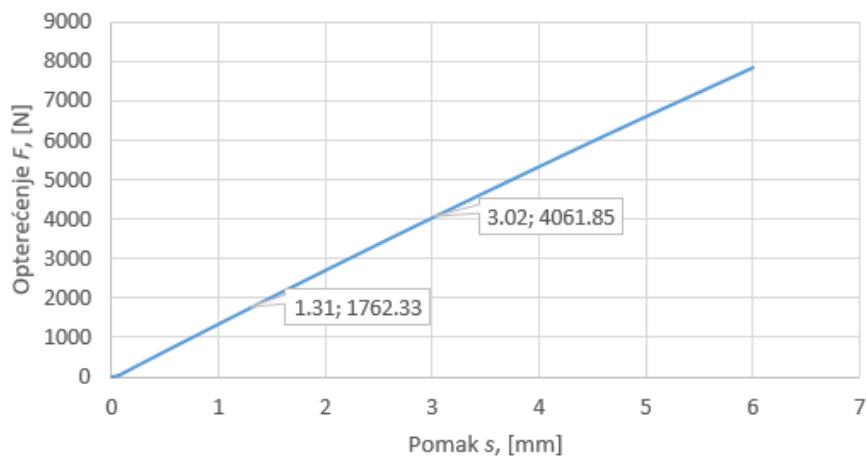
6 REZULTATI

U ovoj cjelini prikazat će se rezultati tri numerička modela i rezultati eksperimentalnog ispitivanja dvaju uzoraka. Prikazat će se dobiveni dijagrami sila-pomak, te izračunata krutost S i savojni modul elastičnosti E_h . Nakon toga, numeričke analize će se validirati tako što će se usporediti navedene veličine.

6.1 Rezultati prvog opisanog numeričkog modela



Slika 47. Ukupni pomak prvog analiziranog numeričkog modela



Slika 48. Dijagram opterećenje-pomak prvog analiziranog numeričkog modela

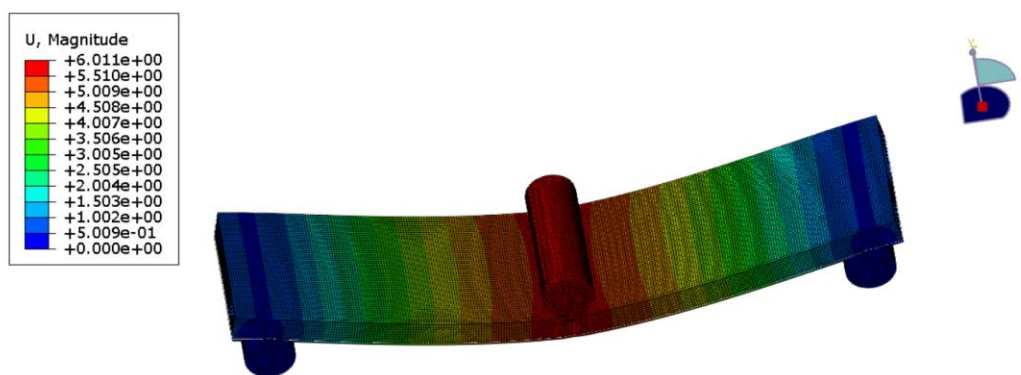
Prema slici krutost S uzorka iznosi:

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1} = 1345,85 \text{ N/mm} \quad (69)$$

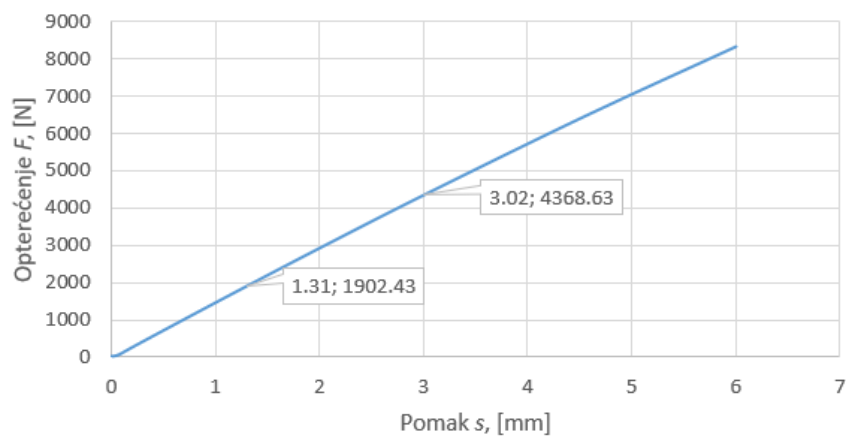
Savojni modul elastičnosti E_h prema jedndažbi (68) jednak je:

$$E_h = 35502,18 \text{ N/mm}^2 \quad (70)$$

6.2 Rezultati drugog opisanog numeričkog modela



Slika 49. Ukupni pomak 2. analiziranog numeričkog modela



Slika 50. Krutost 2. opisanog numeričkog modela

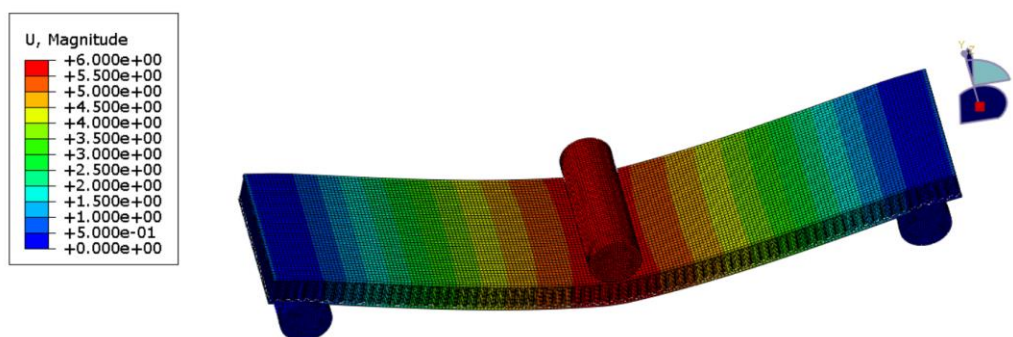
Prema slici krutost S uzorka iznosi:

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1} = 1443,4 \text{ N/mm} \quad (71)$$

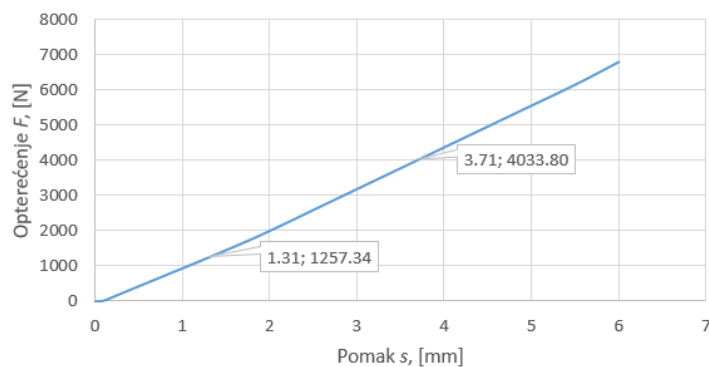
Savojni modul elastičnosti E_h prema jednažbi (68) jednak je:

$$E_h = 38075,55 \text{ N/mm}^2 \quad (72)$$

6.3 Rezultati trećeg opisanog numeričkog modela



Slika 51. Ukupni pomak 3. opisanog numeričkog modela



Slika 52. Krutost 3. opisanog numeričkog modela

Krutost S iznosi:

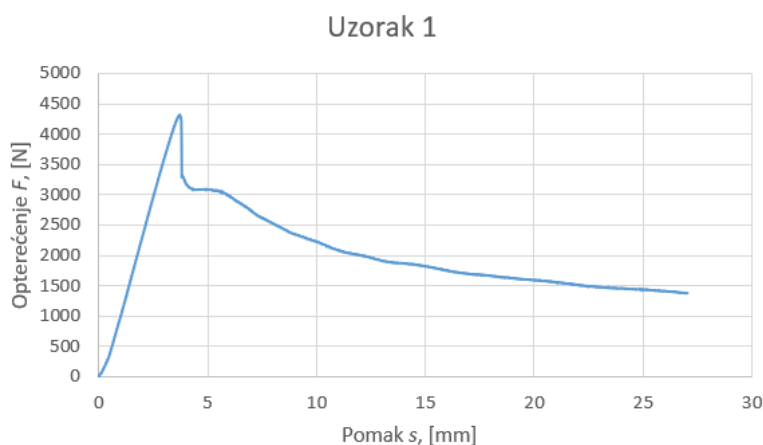
$$S = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1} = 1156,85 \text{ N/mm} \quad (73)$$

Savojni modul elastičnosti E_h prema jednažbi (68) jednak je:

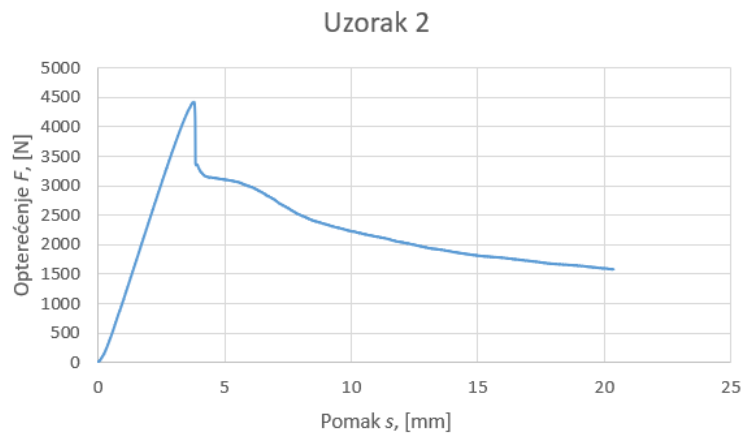
$$E_h = 30516,63 \text{ N/mm}^2 \quad (74)$$

6.4 Rezultati ispitanih uzoraka

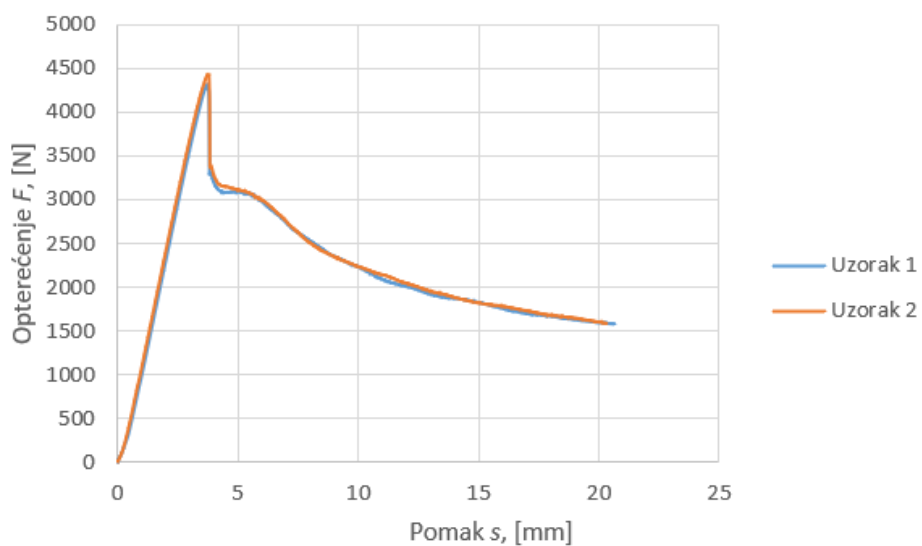
Rezultati ispitanih uzoraka obrađeni su i prikazani u nastavku ovoga rada. Važno je napomenuti kako ukupno 2 ispitana uzorka mogu imati velika odstupanja te srednja vrijednost nebi mogla dati realna očekivanja. Zbog nedostatka materijala te visoke cijene materijala aluminijskih saća napravljena su samo 2 uzorka. Ipak standardna devijacija pokazuje zanemariva odstupanja te se rezultati ovih ispitanih uzoraka mogu smatrati prihvatljivim. Na Slika 53 i Slika 54. se vide rezultati obrađeni računalom na ispitnoj stanici prikazani dijagramom sila-pomak. Može se primijetiti sličnost ponašanja dvaju uzoraka. Kada su uzorci postigli maksimalnu ostvarenu silu, došlo je do urušavanja jezgre gdje su uzorci naglo izgubili krutost. Nakon toga, dolazi do popuštanja ljuski sendvič konstrukcije, odnosno aluminijski limovi prelaze u plastično područje ponašanja materijala. Slika 55. prikazuje sličnost ponašanja dvaju uzoraka.



Slika 53. Dijagram sila-pomak 1. uzorka



Slika 54. Dijagram sila-pomak 2. uzorka



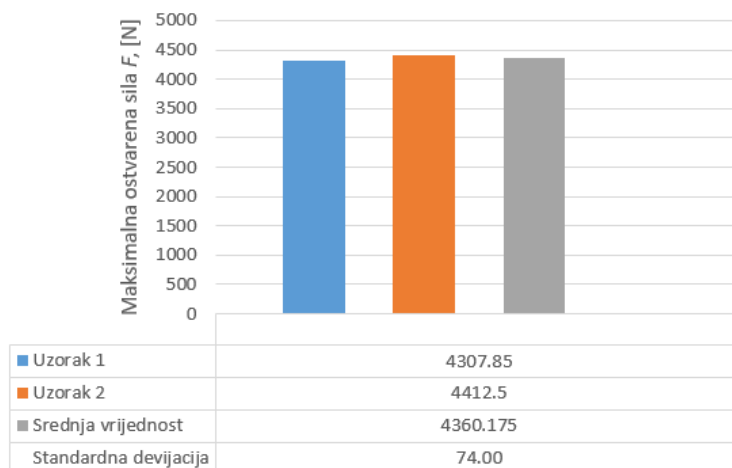
Slika 55. Dijagram sila-pomak 1. i 2. uzorka skupa

U nastavku prikazane su usporedbe 4 fizikalne veličine:

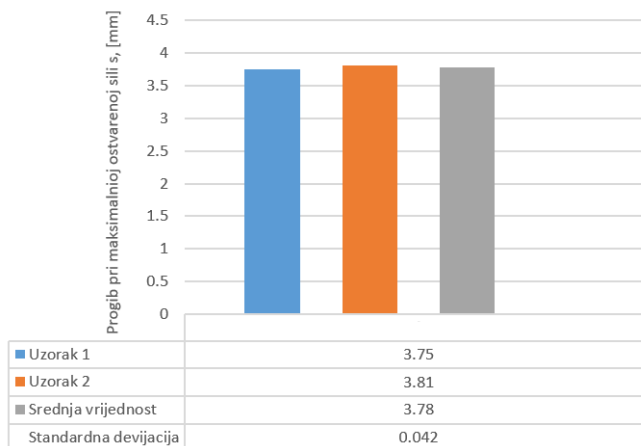
- Maksimalna ostvarena sila F , [N]
- Ukupni progib pri maksimalnoj ostvarenoj sili s , [mm]
- Krutost S , [N/mm]
- Savojni modul elastičnosti E_h , [N/mm²]

Uz usporedbu prikazana je i srednja (aritmetička) vrijednost rezultata te standardna devijacija rezultata. Savojni modul elastičnosti izračunat je po jednadžbi (68).

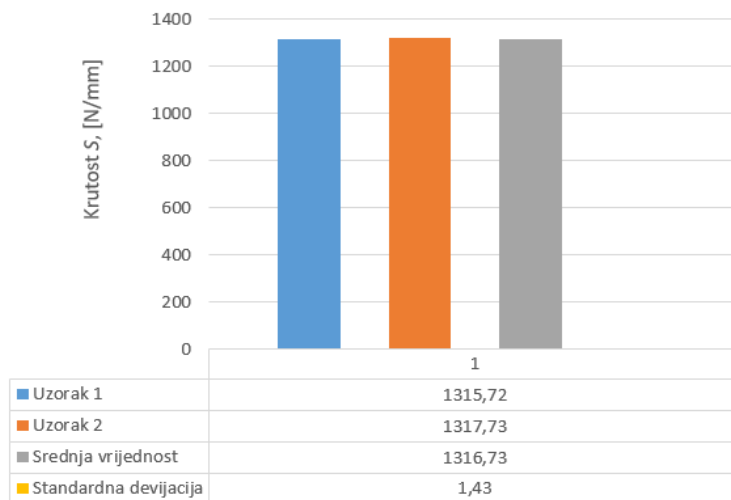
U rezultatima vidimo da dva uzorka ne pokazuju veliko odstupanje, odnosno jako niska standardna devijacija. Srednje aritmetičke vrijednosti rezultata služit će kod procesa validacije rezultata numeričkih simulacija sa eksperimentalno ispitanim uzorcima u nastavku ovog rada.



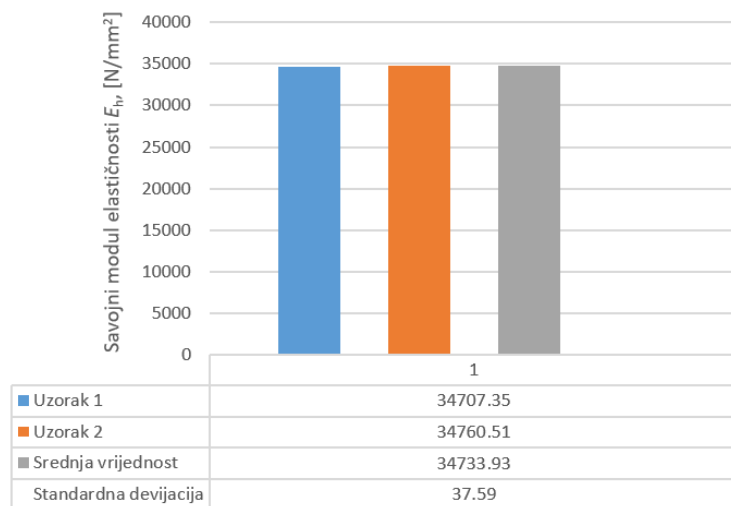
Slika 56. Usporedba rezultata kod maksimalne ostvarene sile



Slika 57. Usporedba rezultata kod progiba pri maksimalnoj ostvarenoj sili

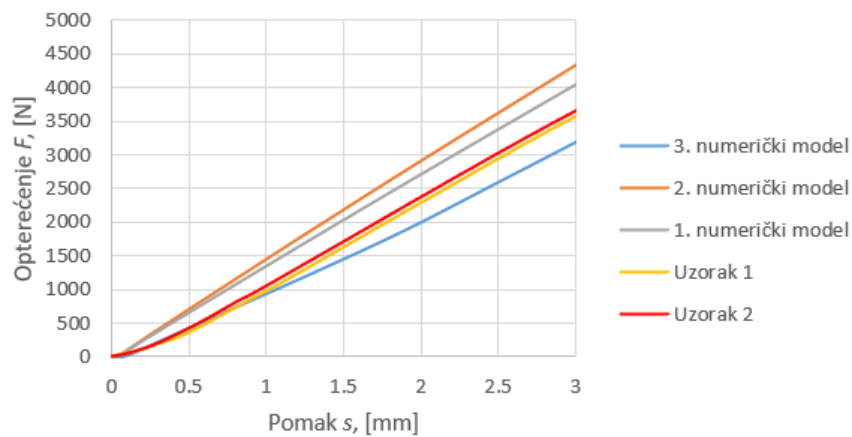


Slika 58. Usporedba rezultata krutosti uzoraka

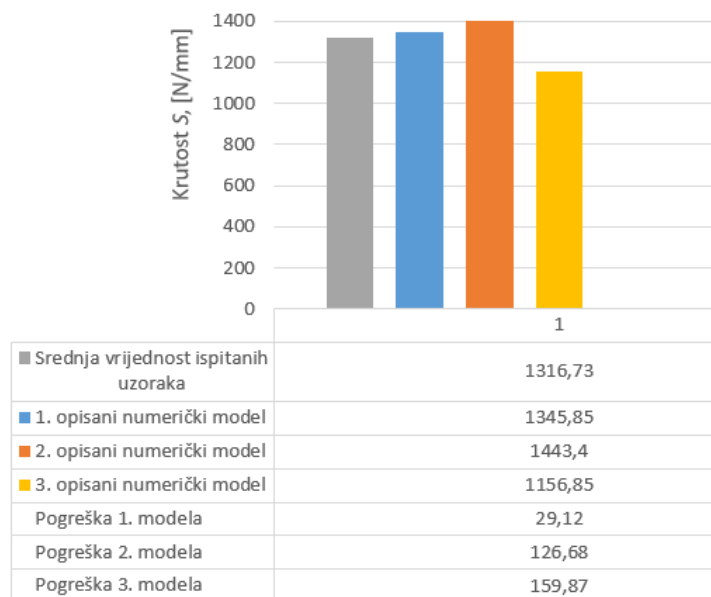


Slika 59. Usporedba rezultata savojnog modula elastičnosti

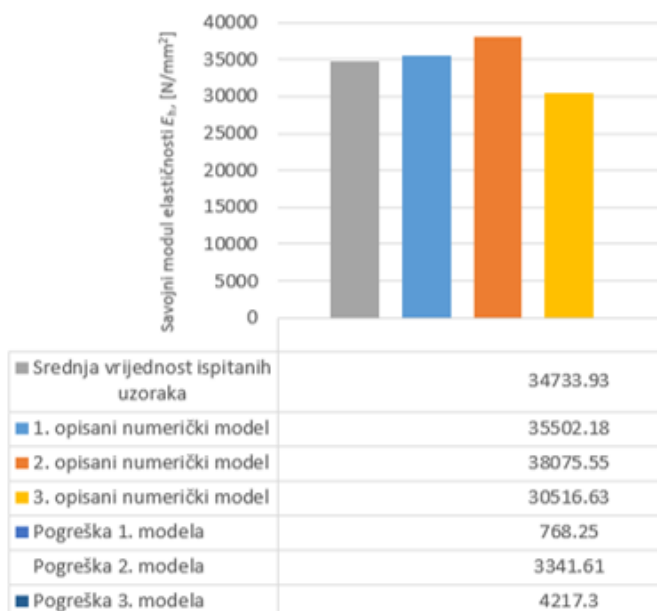
6.5 Validacija rezultata numeričkih analiza sendvič konstrukcije



Slika 60. Usporedba dijagrama sila-pomak numeričkih modela i ispitanih uzoraka



Slika 61. Validacija krutosti numeričkih modela i eksperimentalno ispitanih uzoraka



Slika 62. Validacija savojnog modula elastičnosti numeričkih modela i eksperimentalno ispitanih uzoraka

Slika 60. prikazuje dijagram sila-pomak s prikazanom usporedbom krutosti numeričkih modela i ispitnih uzoraka gdje je radi bolje preglednosti maksimalni pomak sveden na 3 mm.

Prvi opisani numerički model pokazuje najtočnije rezultate u usporedbi sa eksperimentalno ispitanim uzorcima. Krutost S odstupa za 29,12 N/mm, dok savojni modul elastičnosti odstupa za 768,25 N/mm² što u postotku iznosi:

$$Odstupanje_1 = 100 \cdot \frac{|S_1 - S_u|}{S_u} = 100 \cdot \frac{|1345,85 - 1316,73|}{1316,73} = 2,21 \% \quad (75)$$

Drugi opisani numerički model gdje su ulazni podaci aluminijskih saća uzeti od proizvođača pokazuje odstupanje krutosti za 126,68 N/mm, dok savojni modul elastičnosti odstupa za 3341,61 N/mm² što u postotku iznosi:

$$Odstupanje_2 = 100 \cdot \frac{|S_2 - S_u|}{S_u} = 100 \cdot \frac{|1443,4 - 1316,73|}{1316,73} = 9,62 \% \quad (76)$$

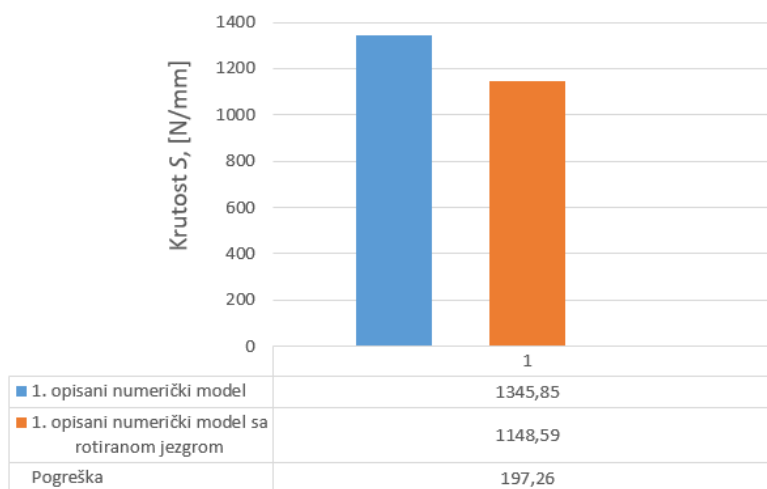
Treći opisani numerički model pokazue najlošije rezultate u usporedbi sa eksperimentalnim ispitanim uzorcima. Krutost S odstupa za 159,87 N/mm, dok savojni modul elastičnosti odstupa za 4217,3 N/mm² što u postotku iznosi:

$$\text{Odstupanje}_3 = 100 \cdot \frac{|S_3 - S_u|}{S_u} = 100 \cdot \frac{|1443,4 - 1156,85|}{1316,73} = 12,14 \% \quad (77)$$

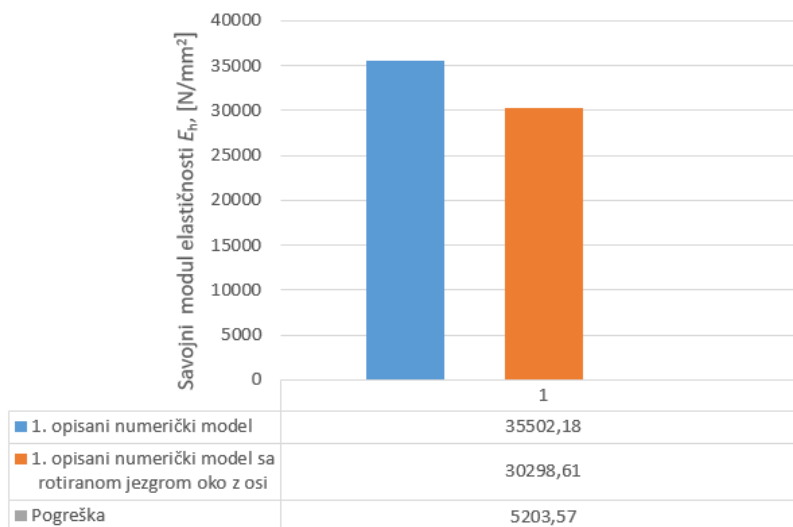
6.6 Odstupanja rezultata pri rotaciju jezgre oko z osi za 90°

Nadalje se provela numerička analiza kako bi se pokazao utjecaj orijentacije jezgre od aluminijskih saća na krutost S i savojni modul elstičnosti E_h . Odstupanja rezultata je uspoređena s opisanim numeričkim analizama sendvič konstrukcije.

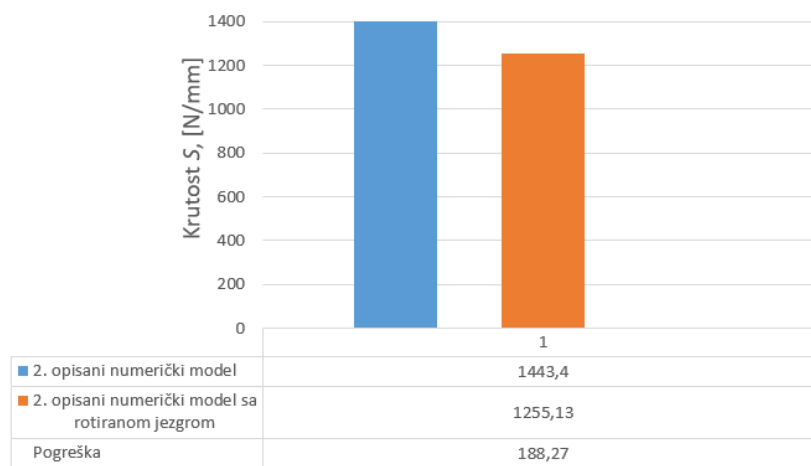
Kod rotacije jezgre oko z osi za 90° prve i druge opisane numeričke analize potrebno je samo zamijeniti module smicanja G_{13} i G_{23} u svojstvu definiranog ortotropnog materijala.



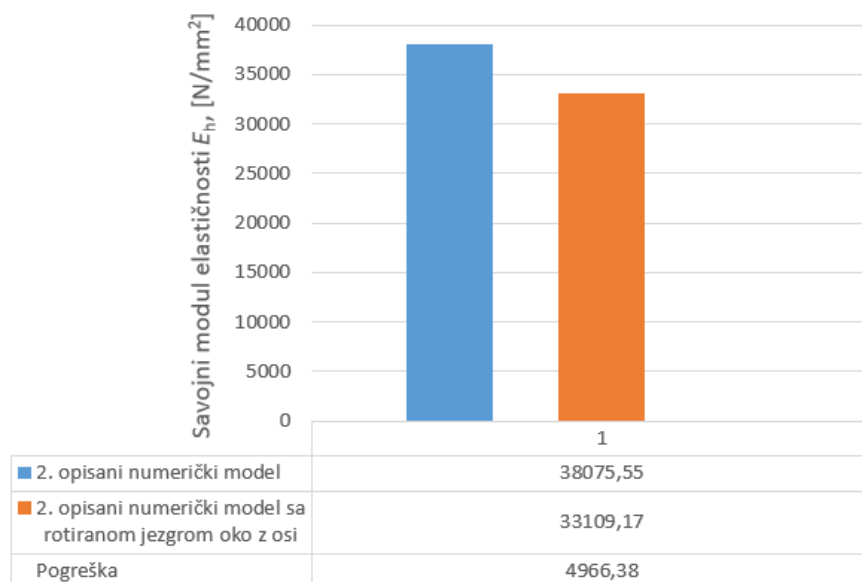
Slika 63. Usporedba krutosti kod rotirane jezgre 1. opisane numeričke simulacije



Slika 64. Usporedba savojnog modula elastičnosti kod rotirane jezgre 1. opisane numeričke simulacije



Slika 65. Usporedba krutosti kod rotirane jezgre 2. opisane numeričke simulacije

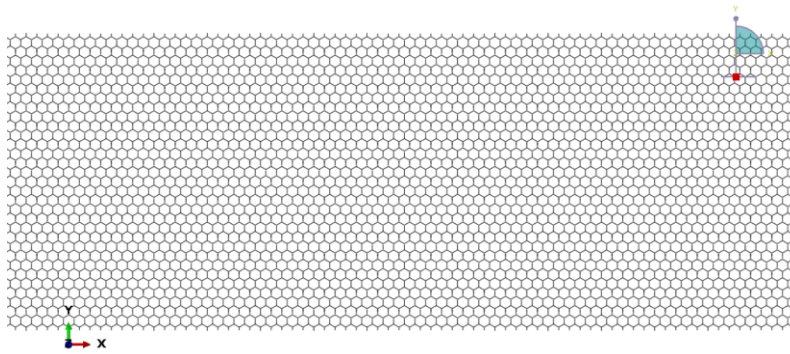


Slika 66. Usporedba savojnog modula elastičnosti kod rotirane jezgre 2. opisane numeričke simulacije

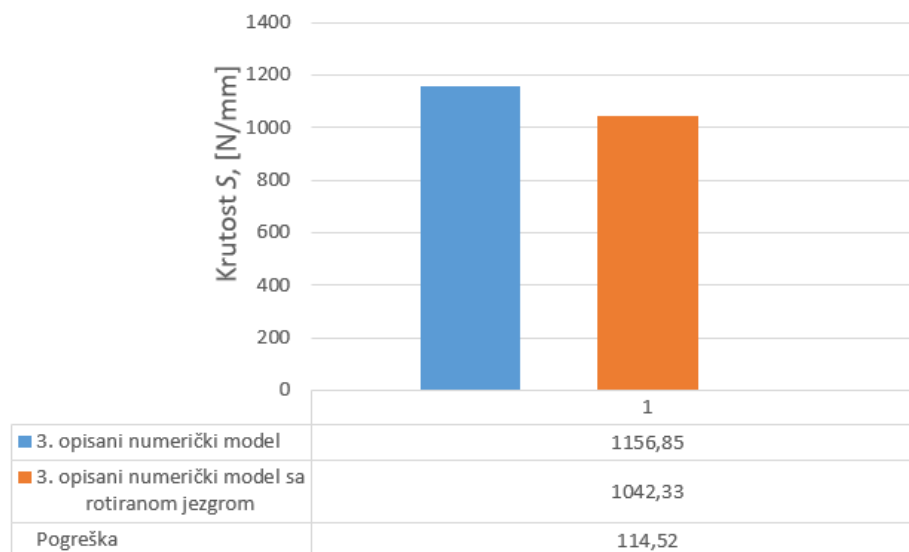
$$Odstupanje_a = 100 \cdot \frac{|S_a - S_u|}{S_u} = 100 \cdot \frac{|1148,59 - 1345,85|}{1345,85} = 14,66 \% \quad (78)$$

$$Odstupanje_b = 100 \cdot \frac{|S_b - S_u|}{S_u} = 100 \cdot \frac{|1255,13 - 1443,4|}{1255,13} = 13,04 \% \quad (79)$$

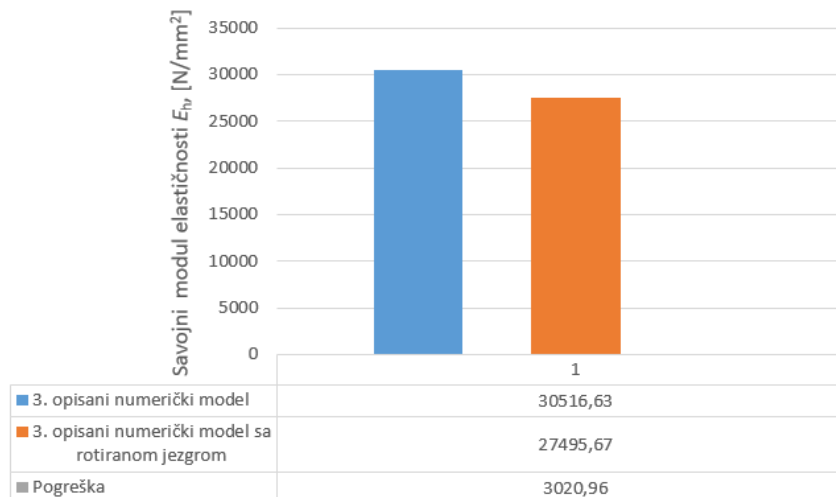
Kod rotacije jezgre oko z osi za 90° trećeg opisanog numeričkog modela potrebno je modelirati novu jezgru prikazana na Slika 67. Kod opcije „*Linear Pattern*“ zamijenit će se broj ponavljajućih ćelija u x i y smjeru.



Slika 67. Rotirana jezgra od aluminijskih saća



Slika 68. Usporedba krutosti kod rotirane jezgre 3. opisane numeričke simulacije



Slika 69. Usporedba savojnog modula elastičnosti kod rotirane jezgre 3. opisane numeričke simulacije

$$Odstupanje_c = 100 \cdot \frac{|S_a - S_u|}{S_u} = 100 \cdot \frac{|1042,33 - 1156,85|}{1156,85} = 9,9 \% \quad (80)$$

7 ZAKLJUČAK

Ovaj rad je prikazao svojna svojstva jednog primjera sendvič konstrukcije s aluminijskim ljuskama te aluminijskim saćem kao jezgrom kod testa savijanja u tri točke. Opisana su 3 različita numerička modela gdje su prvi i drugi opisani model prikazali jezgru kao homogeni ortotropni model, dok je treći numerički model opisan sa stvarnim modelom saćaste jezgre. Prvi opisani homogenizirani model aluminijskih saća u kojem su određene konstante krutosti u odnosu na geometriju i materijal ćelije su pokazali nešto višu krutost i savojni modul elastičnosti nego homogenizirani model aluminijskih saća u kojem su konstante krutosti preuzete od proizvođača i modela stvarne konstrukcije ćelije aluminijskih saća.

Kako bi se numerički rezultati mogli validirati izrađeni su i testirani uzorci iste opisane sendvič konstrukcije. Iako bi se po normi testiranja ovih uzoraka trebalo testirati minimalno pet uzoraka, zbog visoke cijene materijala i troškova proizvodnje odabrana su dva uzorka. Rezultati dva testirana uzorka pokazuju zanemarivo mala odstupanja te se zaključuje da su rezultati eksperimentalnog ispitivanja validni.

Prvi opisani numerički model u usporedbi s eksperimentalno ispitanim uzorcima pokazuje najmanje odstupanje krutosti i savojnog modula elastičnosti od 2,21%, dok drugi i treći opisani numerički model pokazuju nešto veće odstupanje od 9,62% i 12,14%. Iako bi treći opisani model sa stvarnom konstrukcijom ćelije aluminijskih saća trebao pokazati najtočnije rezultate, razlog većeg odstupanja je to što je saće opisano s površinskim elementima kojem se dodijelila konstanta debljina stijenke aluminijskih saća. To predstavlja pojednostavljeni model s obzirom da dvije stranice od šest jedne ćelije aluminijskih saća ima dvostruku debljinu stijenke zbog načina proizvodnje. Jedan od načina rješenja ovog problema bi bio model stvarne konstrukcije saća s prostornim elementom, no međutim to u ovom radu nije bilo moguće zbog nedostatka računalne snage.

Također u radu je prikazan utjecaj orijentacije aluminijskih saća u ravnini, odnosno položaj saća u sendvič konstrukciju u odnosu na x i y os kod krutosti i savojnog modula elastičnosti. Rezultati svakog numeričkog modela su uspoređeni s istim opisanim numeričkim modelom, ali rotiranom jezgrom. Usporedba tako opisanih numeričkih modela pokazuje znatno, ali ne veliko odstupanje krutosti i savojnog modula elastičnosti. Ipak, u Formuli Student upravo ta razlika može utjecati na

zadovoljavanje pravilnika te je pritom važno voditi računa o pravilno orijentiranoj jezgri u sendvič konstrukciji, odnosno šasiji.

U zaključku, pojednostavljeni opisani numerički modeli pokazuju zadovoljavajuća svojstva, a samim time i uštedu vremena i energije potrebne za rješavanje kompleksnih analiza. U nastavku ovog rada detaljnije bi se prikazala analiza teorije popuštanja sendvič konstrukcija gdje bi se zasebno pokazao utjecaj jezgre i ljuske na čvrstoću same konstrukcije. Također tako opisani numerički model bi se mogao promatrati na dinamičke udare gdje bi se dodatno opisala plastična ponašanja kompozitnih materijala u sendvič konstrukciji.

8 LITERATURA

- [1] EconCore: The History of Sandwich Construction and Honeycombs. <http://www.econhp.com/history/> [12.9.2021.]
- [2] Formula 1 Dictionary: Monocoque – Survival Cell. <http://www.formula1-dictionary.net/monocoque.html> [12.9.2021.]
- [3] Milek, L.: Razvoj kompozitne šasije od ugljičnih vlakana bolidu Formula student, diplomski rad, Zagreb, FSB, 2020.
- [4] Petras, A.: Design of Sandwich Structures, Cambridge University Engineering Department, 1998.
- [5] HexWeb Honeycomb sandwich design technology, Hexcel composites, Duxford, 2000.
- [6] A NUMERICAL HOMOGENIZATION APPROACH TO CHARACTERIZE IN-PLANE ANISOTROPIC HYPERELASTIC RESPONSES OF A NON-METALLIC HONEYCOMB CORE. https://www.researchgate.net/figure/Different-honeycomb-core-cell-configurations-1_fig2_343005063 [12.9.2021.]
- [7] Experimental and numerical investigation of the quasi-static and high strain rate crushing behavior of single and multi-layer zig-zag 1050 H14 Al trapezoidal corrugated core sandwich. https://www.researchgate.net/figure/Honeycomb-manufacturing-process-26_fig8_280682688 [12.9.2021.]
- [8] I.MA.TEC.: HONEYCOMB ALUMINIUM 5052. <https://www.imatec.it/wp-content/uploads/2014/04/Honeycomb-Aluminum-5052-EN.pdf> [12.9.2021.]
- [9] MatWeb: Aluminium 5052-H32. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=96d768abc51e4157a1b8f95856c49028&ckck=1> [12.9.2021.]
- [10] Gibson L. J., Ashby M. F.: Cellular solids – Structure and properties, Cambridge University Press, 1999.
- [11] Alfirević I.: Linearna analiza konstrukcija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

- [12] ABAQUS, Inc.: ABAQUS Online Documentation: Version 6.6-1.
<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch17s02abm02.html> [12.9.2021.]
- [13] MatWeb: Aluminium 5754-H24.
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e40b7c1abf33410a8ddd59c441faa5a8> [12.9.2021.]
- [14] EasyComposites: XA120 Prepreg Adhesive Film – Technical Datasheet v1.0, 2017.
<https://www.easycomposites.co.uk/xa120-prepreg-adhesive-film> [12.9.2021.]

9 PRILOZI

- I. Certifikat eksperimentalno ispitanih uzoraka u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

MESSPHYSIK Materials Testing.

Test Certificate

Flexural Test

Tester.....Janos Kodvanj
Supplier.....FSB Racing Team

Tested on.....2021-07-19

Testing machine.....Beta 50-5
Pretension.....5 N

Test speed 1.....0 % -> 3.5 mm/min

Directory.....formula_zavrsni_2021_07_19
Parameter set.....070402_plocica_par

Legend

BNo.....Batch number
Fmax.....Maximum load

smax.....Stroke at Fmax

Test No	BNo	Fmax N	smax mm
1	uzorak_1	4308	3.737
2	uzorak_2	4413	3.756
Mean:		4361	3.747
Std.dev.:		74.25	0.013