

PRIMENA ANALITIČKOG MODELA ZA ODREĐIVANJE SAVOJNIH SVOJSTAVA STAKLO-EPOKSI KOMPOZITNOG MATERIJALA

Marina Stamenović¹, B. Bajčeta², P. Stajčić², S. Putić²

¹ Viša Politehnička škola, Beograd

² Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Izvod

Mehanička svojstva kompozitnih materijala su uslovljena njihovom strukturom i zavise od svojstava strukturnih komponenata. U ovom radu prikazan je analitički model kojim se na osnovu poznatih zateznih i pritisnih mehaničkih svojstava mogu odrediti savojna svojstva. Dovođenje u vezu ovih svojstava je opravdano imajući u vidu mehaniku loma pri savijanju gde do loma uzorka dolazi sa strane spoljnog sloja koji je opterećen na zatezanje dok se lom završava na sloju opterećenom na pritisak. U radu su date i vrednosti zateznih, pritisnih i savojnih svojstava dobijene izvođenjem odgovarajućih eksperimentalnih mehaničkih ispitivanja. Poređenjem numeričkih rezultata savojnih svojstava dobijenih na osnovu modela sa eksperimentalno dobijenim rezultatima uočena je njihova zadovoljavajuća usaglašenost. Samim tim pokazano je da se ovaj model može koristiti u nekim budućim istraživanjima za određivanje savojnih svojstava bez izvođenja ispitivanja.

Ključne reči: numerički model, staklo-epoksi kompozitni materijal, ispitivanje na zatezanje, ispitivanje na pritisak, savojna svojstva

UVOD

Razvoj savremenih materijala se uglavnom zasniva na kombinovanju korisnih svojstava različitih materijala koji se spajaju u složeni kompozit. Ovakvi materijali mogu zadovoljiti zahteve koji se postavljaju u otežanim radnim uslovima pa se s pravom smatraju materijalima koji će predstavljati glavni pravac inovacije u budućnosti. Pored standardnih, a ujedno i skupih eksperimentalnih metoda, sve više se razvijaju analitički i numerički modeli za proračun svojstava bez predhodnog izvođenja eksperimenta. Jedan doprinos predstavlja i razvoj i prikaz numeričkog modela u ovom radu kojim se određuju savojna svojstva staklo-epoksi laminarnog kompozitnog materijala na osnovu poznatih zateznih i pritisnih mehaničkih svojstava. Ova svojstva se mogu dovoditi u vezu imajući u vidu da do loma pri savijanju dolazi sa strane spoljnog sloja opterećenog na zatezanje a lom se završava na unutrašnjem sloju

opterećenom na pritisak. Vrednosti zateznih i pritisnih svojstava koje se u modelu koriste za proračun određene su primenom standardnih metoda ispitivanja. Radi poređenja ispravnosti modela i dobijenih rezultata izvedena su takođe standardna ispitivanja na savijanje.

EKSPERIMENT

Svojstva razmatranog laminarnog kompozitnog materijala

Osnovne strukturne komponente kompozitnog materijala su: stakleno tkanje (ojačanje) i epoksi smola (matrica). Uzorci su izvedeni ručnom metodom oblikovanja, a očvršćavanje je bilo na sobnoj temperaturi. Ojačanje je izvedeno u vidu tkanja sa pet različitih gustina (A, B, C, D, E, tabela 1). Nakon oblikovanja su sečene dve vrste uzoraka za ispitivanje, strukture $0^\circ/90^\circ$ (uzorci oznake 1) i $\pm 45^\circ$ (uzorci oznake 2). Struktura uzoraka i njihove oznake u zavisnosti od izvedenih ispitivanja su prikazane u tabeli 1.

Pregled izvedenih ispitivanja

Izvedena su mehanička ispitivanja na zatezanje, pritisak i savijanje odgovarajućim standardnim metodama radi određivanja relevantnih mehaničkih svojstava (čvrstoće i moduli elastičnosti) neophodnih za kasnije primenjeni numerički model. Ispitivane su po tri epruvete svakog uzorka, dimenzija prikazanih u tabeli 1.

REZULTATI MEHANIČKIH ISPITIVANJA

Zatezna i pritisna čvrstoća uzoraka se izračunavala na osnovu izraza (1):

$$R_{m(z,p)} = \frac{P_{\max}}{b \cdot d} \quad (1)$$

gde je:

$R_{m(z,p)}$ - zatezna, odnosno pritisna čvrstoća, [Pa];

P_{\max} - maksimalna sila pri kidanju usled zatezanja ili pritiska, [N];

b - širina epruvete, [m]; i

d - debljina epruvete, [m].

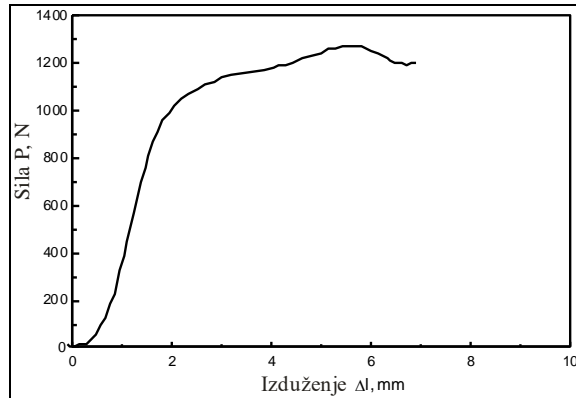
Tabela 1. Strukture i oznake ispitivanih uzoraka

Vrsta ispitivanja	Oznaka uzorka	Broj slojeva ojačanja	Gustina ojačanja (g/m ²)	Orientacij a ojačanja	Mas. udeo ojačanja (%)	Dimenzije epruveta lxbxd (mm)
ZATEZANJE (ASTM D 3039)	Z-A-1	8	125	0°/90°	30,0	250x 25x2,5
	Z-B-1	6	170		32,8	
	Z-C-1	5	210		33,3	
	Z-D-1	4	500		55,2	
	Z-E-1	3	880		63,9	
	Z-A-2	8	125	±45°	31,6	
	Z-B-2	6	170		36,0	
	Z-C-2	5	210		37,2	
	Z-D-2	4	500		56,3	
	Z-E-2	3	880		67,2	
PRITISAK (ASTM D 3410)	P-A-1	24	125	0°/90°	42,7	10x10x5
	P-B-1	18	170		33,7	
	P-C-1	15	210		37,1	
	P-D-1	12	500		57,4	
	P-E-1	9	880		66,3	
	P-A-2	24	125	±45°	41,1	
	P-B-2	18	170		37,1	
	P-C-2	15	210		38,1	
	P-D-2	12	500		53,7	
	P-E-2	9	880		68,2	
SAVIJANJE (ASTM D 790)	S-A-1	8	125	0°/90°	30,7	160x15x2,5
	S-B-1	6	170		33,2	
	S-C-1	5	210		36,3	
	S-D-1	4	500		55,9	
	S-E-1	3	880		67,3	
	S-A-2	8	125	±45°	31,2	
	S-B-2	6	170		34,7	
	S-C-2	5	210		37,4	
	S-D-2	4	500		57,1	
	S-E-2	3	880		67,7	

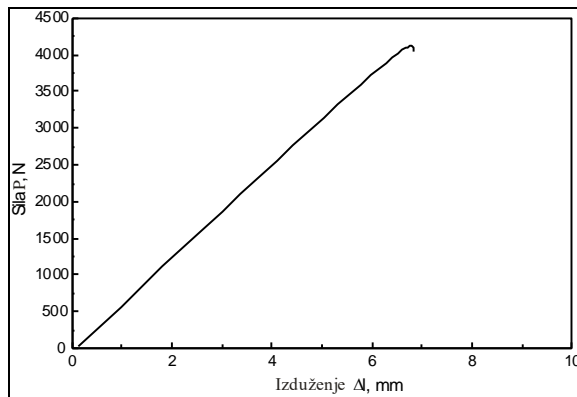
Modul elastičnosti epruveta $E_{I(z, p)}$ [GPa] se izračunavao pomoću izraza (2), pri čemu su odnosi $\Delta P/\Delta \epsilon_I$ određivani metodom linearne regresije sa pravolinijskih delova odgovarajućih krivih napon-deformacija dobijenih direktno sa uređaja za ispitivanje.

$$E_{1(z,p)} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta P}{\Delta\varepsilon_1} \cdot \frac{1}{b \cdot d} \quad (2)$$

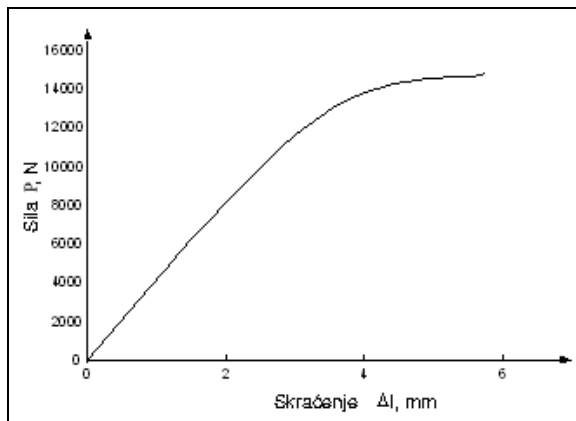
Primeri dijagrama sila-izduženje ($P-\Delta l$) dobijenih direktno sa uređaja za ispitivanje zatezanjem su prikazani na sl.1 (uzorak Z-C-1, epruveta 2) i sl.2 (uzorak Z-C-2, epruveta 1), dok su odgovarajući dijagrami sila-skraćenje dobijeni ispitivanjem na pritisak prikazani na sl.3 (epruveta P-C-1, epruveta 2) i sl.4 (epruveta P-C-2, epruveta 1).



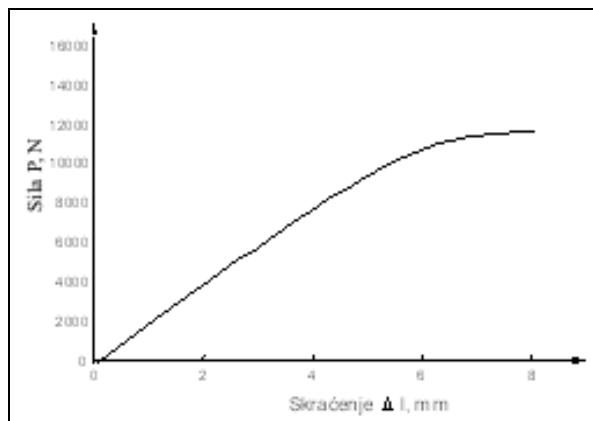
Slika 1 Dijagram sila-izduženje dobijen ispitivanjem epruvete Z-C-1-2



Slika 2 Dijagram sila-izduženje dobijen ispitivanjem epruvete Z-C-2-1



Slika 3 Dijagram sila-skraćenje
ispitivane epruvete P-C-1-2



Slika 4 Dijagram sila-skraćenje
ispitivane epruvete P-C-2-1

Čvrstoća na savijanje izračunavala se na osnovu maksimalnog opterećenja pri savijanju, P_{max} , izrazom (3):

$$R_f = \frac{3P_{max} L}{2b \cdot d^2} \quad (3)$$

gde je:

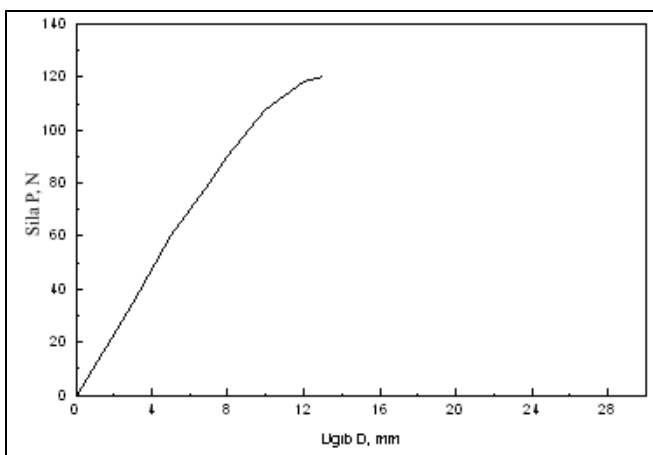
- R_f - čvrstoća na savijanje, [MPa]
- P_{max} - maksimalno opterećenje pri savijanju, [N]
- L - raspon između oslonaca, [mm]
- b - širina epruvete, [mm]
- d - debljina epruvete, [mm]

Modul elastičnosti savijanja E_f se izračunavao izrazom (4):

$$E_f = \frac{L^3}{4b \cdot d^3} \cdot \frac{P}{D} \quad (4)$$

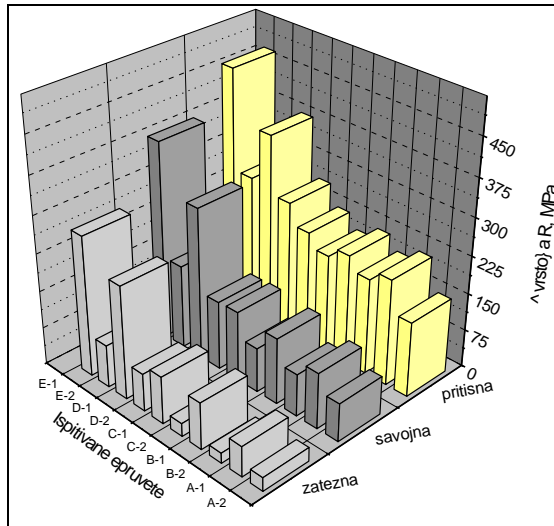
Najstrmiji pravolinijski deo krive sila - ugib (nagib krive) se određuje iz brojnih vrednosti P i D , metodom najmanjih kvadrata, gde je D (mm) predstavljao maksimalni ugib na sredini raspona ispitivanog uzorka.

Karakterističan dijagram sila ugib (P - D) (za epruvetu S-E-1, epruveta 2) prikazan je na sl.5

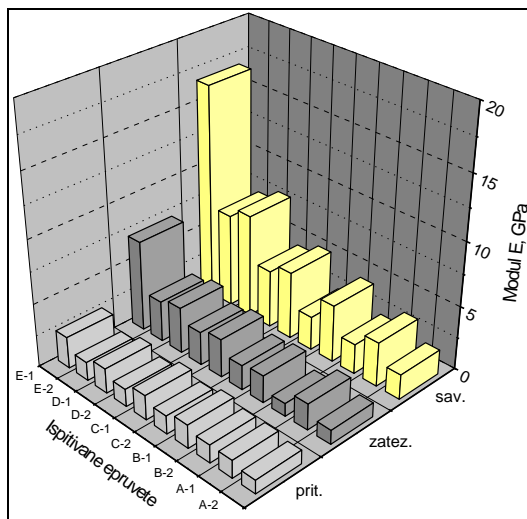


Slika 5 Dijagram sila-ugib dobijen savijanjem u tri tačke epruvete S-E-1-2

Radi preglednosti, svi rezultati su prikazani uporedno, grafički. Na sl.6 su prikazane uporedne vrednosti zateznih, pritisnih i savojnih čvrstoća, dok su na sl.7 uporedno prikazani odgovarajući moduli. U tabeli 2 i na sl.8 i sl.9 prikazane su srednje vrednosti eksperimentalno dobijenih čvrstoća i modula na savijanje koje će biti u narednom delu rada neophodni radi poređenja.



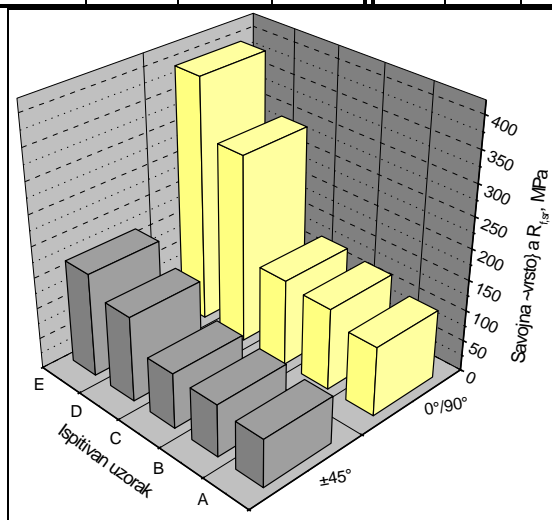
Slika 6 Uporedni prikaz eksperimentalno dobijenih vrednosti zateznih, pritisnih i savojnih čvrstoća



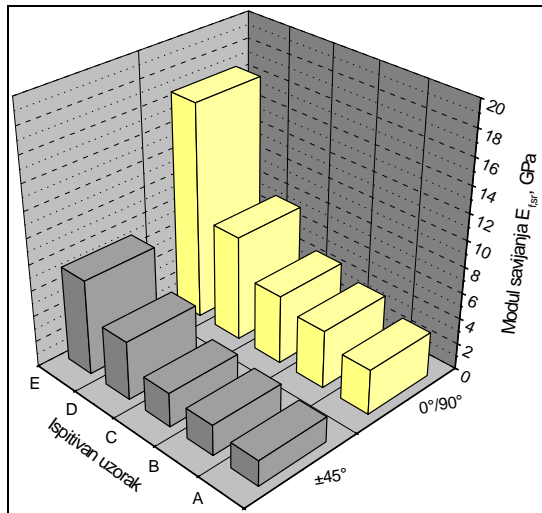
Slika 7 Uporedni prikaz eksperimentalno dobijenih vrednosti zateznih, pritisnih i modula savijanja

Tabela 2. Srednje vrednosti savojnih svojstava

	0°/90°					±45°				
	S-A-1	S-B-1	S-C-1	S-D-1	S-E-1	S-A-2	S-B-2	S-C-2	S-D-2	S-E-2
Srednja vrednost $R_{f, sr}$ (MPa)	112,2	132,6	139,6	303,5	393,7	77,2	84,8	89,4	137,9	167,5
Srednja vrednost $E_{f, sr}$ (GPa)	3,47	4,48	5,29	8,12	16,71	1,96	2,36	2,63	4,53	7,34



Slika 8 Uporedni prikaz srednjih vrednosti savojne čvrstoće ispitivanih uzoraka



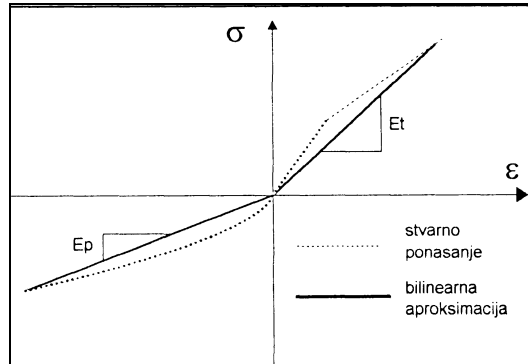
Slika 9 Usporedni prikaz srednjih vrednosti modula savijanja ispitivanih uzoraka

PRIKAZ NUMERIČKOG MODELA; REZULTATI I POREĐENJE SA EKSPERIMENTOM

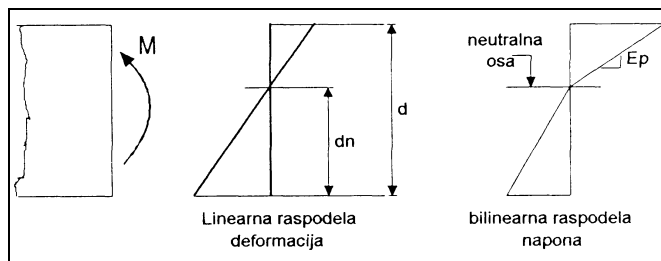
Kao što je u uvodnom delu napomenuto, cilj ovog rada je prikaz numeričkog modela koji bi korišćenjem mehaničkih zateznih i pritisnih svojstava predvideo njegova savojna svojstva. Dovođenje u vezu ovih svojstava je potpuno opravdano imajući u vidu mehaniku loma pri savijanju gde do loma uzorka dolazi sa strane spoljnog sloja koji je opterećen na zatezanje dok se lom završava na gornjem (unutrašnjem) sloju opterećenom na pritisak. S obzirom da je jedno od najvažnijih svojstava kompozitnog materijala krutost, tj. vrednost modula elastičnosti, prvi deo analize se zasniva na prikazu analitičkog modela kojim se može bez eksperimenta, a uz pretpostavku poznatih zateznih i pritisnih svojstava, odrediti modul kompozitnog materijala na savijanje [1-5].

Osnovni polazni element pri analizi, koji je i ekperimentalno potvrđen, je taj da ispitani kompozitni materijali pokazuju različite zavisnosti napon-deformacija prilikom ispitivanja na zatezanje i pritisak, pa se prema tome prilikom savijanja aksijalne deformacije linearno menjaju kroz debljinu epruvete, dok je promena napona bilinearna. Zato se kriva linearne zavisnosti napon-deformacija može aproksimirati bilinearnom krivom (sl.10) [1-3, 5]. Razlika između modula elastičnosti pri zatezanju ($E_{I,z}$) i pritisku ($E_{I,p}$) prouzrokuje i pomeranje neutralne ose (gde su vrednosti napona i deformacija jednake nuli) koja se u

ovom slučaju ne nalazi na sredini epruvete i na taj način utiče na vrednosti modula savijanja i savojne čvrstoće (sl.11) [3, 5].



Slika 10 Aproksimiranje linearne zavisnosti napon-deformacija bilinearnom krivom

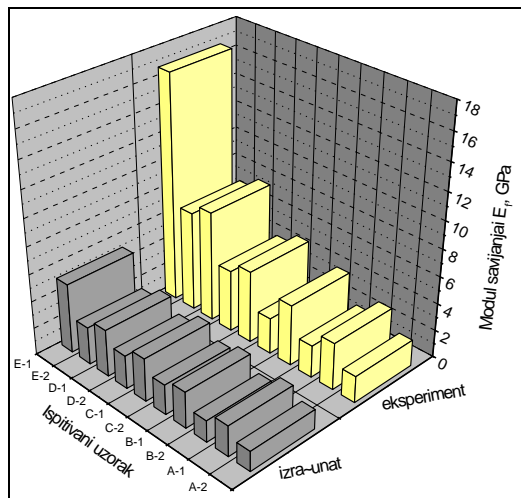


Slika 11 Raspodela deformacija i napona u uzorku

Imajuću u vidu prethodnu analizu kao i iskustveno poznatu relaciju (5) [3, 5], izračunati su moduli na savijanje $E_{f,izr}$ na osnovu poznatih modula elastičnosti pri zatezanju ($E_{1,z}$) i pritisku ($E_{1,p}$) dobijenih ispitivanjem za razmatrani kompozitni materijal.

$$E_{f,izr} = \frac{4 \cdot \left(\frac{E_{1,z}}{E_{1,p}} \right)}{1 + 2 \cdot \left(\frac{E_{1,z}}{E_{1,p}} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{E_{1,z}}{E_{1,p}}} \quad (5)$$

Radi bolje preglednosti i poređenja izračunatih i ekperimentalno dobijenih modula na savijanje, vrednosti su prikazane grafički na sl.12.



Slika 12 Uporedni prikaz izračunatih i eksperimentalno dobijenih vrednosti modula savijanja

Sa sl.12 se može uočiti izvesno neslaganje vrednosti. Izračunate vrednosti su manje od onih dobijenih sa ispitivanja. Ovo neslaganje se može objasniti već prethodno navedenim aproksimacijama pri proračunu, ali i jako bitnom činjenicom da je proračunom zanemaren efekat smicanja u ravni 1-2 jer takva ispitivanja nisu izvođena i te vrednosti nisu bile dostupne u proračunu.

Drugi deo analize ovim numeričkim modelom se zasniva na određivanju savojnih čvrstoća, a poznavajući odgovarajuće zatezne i pritisne čvrstoće i module. U zavisnosti od odnosa modula elastičnosti pri zatezanju i pritisku i odnosa zatezne i pritisne čvrstoće kompozitni materijali se mogu podeliti u četiri grupe [3, 5]:

- 1) $E_{1,z} > E_{1,p}$, $R_{m,z} > R_{m,p}$;
- 2) $E_{1,z} > E_{1,p}$, $R_{m,z} < R_{m,p}$;
- 3) $E_{1,z} < E_{1,p}$, $R_{m,z} > R_{m,p}$; i
- 4) $E_{1,z} < E_{1,p}$, $R_{m,z} < R_{m,p}$.

Posmatrajući vrednosti dobijene ispitivanjem, može se zaključiti da svi uzorci imaju $E_{1,z} > E_{1,p}$ i $R_{m,z} < R_{m,p}$. U takvom slučaju savojna čvrstoća se može predvideti na osnovu izraza 6 [3,5]:

$$R_f = \frac{R_{m,z}}{C_{z(p)}} \quad (6)$$

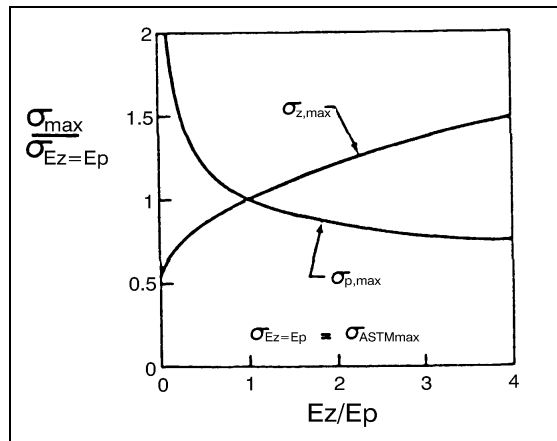
C_z i C_p predstavljaju korekzione faktore koji se uvode zbog razlike modula elastičnosti pri zatezanju i pritisku. Vrednosti se određuju na osnovu sl.13 [3, 5] i uz pomoćne veličina:

$$\sigma_{z,max} = C_z \cdot \sigma_{max,ASTM} \quad ; \quad \sigma_{p,max} = C_p \cdot \sigma_{max,ASTM} \quad (7)$$

pri čemu je:

$$\sigma_{max, ASTM} = \frac{\left\{ \left[\left(\frac{E_z}{E_p} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] - 2 \right\} \cdot \frac{6 \cdot F \cdot l}{b \cdot d^2}}{\frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot d^2}} \quad (8)$$

U izrazu (6) koristi se manja od izračunatih vrednosti C_z i C_p .



Slika 13 Zavisnost korekcionih faktora od odnosa zateznog i pritisknog modula

U daljem proračunu se uzimaju iskustveno u obzir dva korekciona faktora k_1 i k_2 [1, 2, 5]. Oni uzimaju u obzir već pomenuto pomeranje neutralne ose u odnosu na središnju ravan ispitivanog uzorka, ali i umanjuju odstupanja koja su nastala tokom ispitivanja zbog velike vrednosti ugiba ispitivanih uzoraka (koje

u velikoj meri utiču na savojnu čvrstoću). Tako se dobija nova, korektovana vrednost savojne čvrstoće, prikazana izrazom (9):

$$R_{f,izr} = R_f \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \frac{1}{k_2} \quad (9)$$

pri čemu su:

$$k_1 = 1 + 6 \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^2 - 4 \cdot \frac{d \cdot D}{L^2} \quad ; \quad k_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{E_z}{E_p}\right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \quad (10)$$

gde je: D - ugib, mm

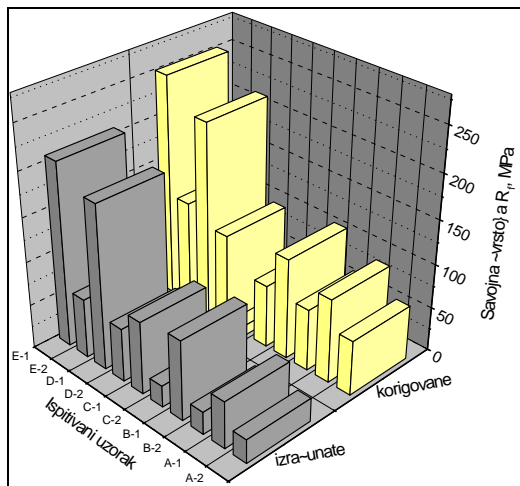
L - raspon između oslonaca, mm

d - debljina uzorka, mm

Ovako izračunate i eksperimentalno određene vrednosti savojne čvrstoće su prikazane u tabeli 3 i na sl.14 za sve strukture staklo-epoksi kompozitnog materijala.

Tabela 3. Usporedni prikaz eksperimentalnih i izračunatih savojnih čvrstoća

Uzorci	Zatezna čvrstoća $R_{m,z}$, (MPa)	Pritisna čvrstoća $R_{m,p}$, (MPa)	Eksperimentalno određena savojna čvrstoća $R_{f,exp}$, (MPa)	Izračunata savojna čvrstoća $R_{f,izr}$, (MPa)
A-1	61,23	212,9	112,2	95,4
A-2	27,50	150,6	77,2	62,4
B-1	94,10	218,6	132,6	114,4
B-2	20,41	192,5	84,8	70,3
C-1	95,00	224,0	139,6	11,8
C-2	26,68	196,9	89,4	71,2
D-1	227,3	378,4	303,5	220,5
D-2	75,90	264,1	137,9	104,1
E-1	281,5	473,8	393,7	251,6
E-2	85,45	277,1	167,3	118,8



Slika 14 Izračunate i eksperimentalno određene vrednosti savojne čvrstoće

ZAKLJUČAK

Poređenjem dobijenih rezultata numeričkim i eksperimentalnim putem može se zaključiti relativno dobro slaganje. U svim slučajevima su veće vrednosti one dobijene eksperimentalnim ispitivanjima. S obzirom da su odstupanja reda veličine 15-30% ne može se sa dovoljnom sigurnošću govoriti o pouzdanosti modela. Međutim, u svakom slučaju, ovakav model može biti od koristi gde se ukazuje potreba za dobijanjem približnih, orijentacionih savojnih svojstava, a u nemogućnosti izvođenja eksperimenta što zbog cene koštanja ili nedostatka uzoraka. Za neke odgovornije analize ovakvi rezultati mogu poslužiti samo kao početna informacija. Svakako da analizu koja je prikazana treba još više produbiti i proširiti novim parametrima, pre svega smicajnim karakteristikama, a zatim rezultate potvrđivati eksperimentima, sve do trenutka kada se postignu odstupanja reda veličine do 1-2%.

LITERATURA

- [1] M. Stevanović, T. Stecenko, *"Tensile and Flexural Macromechanical Characteristics of Glass/Polyester Composites"*, J. Serb. Chem. Soc. 57(7), (1992), pp.451.
- [2] M. Stevanović, T. Stecenko, *"The Strain dependence of flexural modulus in unidirectional carbon/epoxy composites"*, J. Serb. Chem. Soc. 57(11), (1992), pp.785-792.
- [3] R. M. Jones, *"Apparent Flexural Modulus and Strength of Multimodulus Materials"*, J. Composite Materials, Vol. 10, (1976), pp.342.

- [4] Masaki Kimoto, *"Flexural properties and dynamic mechanical properties of glass fibre-epoxy composites"*, Journal of material science, Vol. 25, (1990).
- [5] M. Nikolić, *"Uticaj staklenog ojačanja na savojna svojstva laminarnog kompozitnog materijala"*, diplomski rad, TMF, Beograd, (1998).

SUMMARY

ANALYTICAL MODEL FOR THE DETERMINATION OF BENDING PROPERTIES OF GLASS-EPOXY COMPOSITES

Marina Stamenović¹, B. Bajčeta², P. Stajčić², S. Putić²

¹Higher Polytechnical school, Belgrade

² Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade

Mechanical properties of composite materials are conditioned by their structure and depend from the characteristic of structural components. In this paper the analytical model has been shown with which the bending properties can be determined on the basis of known mechanical properties of tension and pressure. Getting these characteristics in connection is justified having in mind the mechanic of fracture during bending where fracture happens on the outer layer which is subjected to bending while break ends on the layer subjected to pressure. In the paper are given the values of tension, pressure and bending properties got while doing certain mechanical test. By comparison of numeric results of bending properties got on the basis of model with the experimentally got results their satisfactory matching was seen. According to that it is shown that this model can be used for some future research to determine bending properties without experiments.