

NUMERIČKA ANALIZA I MATEMATIČKO MODELIRANJE KRITIČNOG PRITISKA POSUDA OD KOMPOZITNIH MATERIJALA

¹ Mirzet Beganović, ² Fadil Islamović, ³ Dženana Gačo, ⁴ Esad Bajramović

¹ Regeneracija d.o.o. Velika Kladuša, Seko bb, mirzet.beganovic@regeneracija.ba

² Tehnički fakultet Bihać, ulica dr. Irfana Ljubijankića bb, f.islam@bih.net.ba

³ Tehnički fakultet Bihać, ulica dr. Irfana Ljubijankića bb, dzgaco@bih.net.ba

⁴ Tehnički fakultet Bihać, ulica dr. Irfana Ljubijankića bb, bajramovic_e@yahoo.com

Ključne riječi: numerička analiza, matematičko modeliranje, kritični pritisak, posude pod pritiskom, kompozitni materijali.

SAŽETAK:

Ovaj rad daje uporedni prikaz rezultata dobijenih numeričkom analizom i matematičkim modeliranjem, odnosno prikazuje mogućnosti provjere pouzdanosti korištenja numeričkih metoda bez izvođenja skupocijenih eksperimentalnih istraživanja.

Za numeričku analizu će se koristiti programski paket SolidWorks 2011, koji u svojoj strukturi ima mogućnost odabira i definisanja ponašanja kompozitnih materijala. Za matematičko modeliranje će se koristiti eksperimentalni rezultati dobijeni ispitivanjem hidropobama kritičnog pritiska posuda izrađenih od kompozitnih materijala.

1. UVOD

Savremene konstrukcije zahtijevaju nove materijale specijalnih osobina i oblika koji mogu da odgovore specifičnim uslovima eksploatacije: povišenoj čvrstoći, otpornosti na pritisak, temperaturi, brzini, udaru, vibracijama, i dr. Svrha usvajanja novih konstrukcijskih materijala je odgovor na sve složenije zahtjeve u pogledu izdržljivosti i performansi savremenih konstrukcija, kao i na sve veća ograničenja u pogledu težine. Da bi se postavljeni zahtjevi ispunili neizbježan je kompromis u postizanju lake konstrukcije i visokih mehaničkih svojstava materijala. Primjena kompozitnih materijala omogućava ispunjenje ovako postavljenih zahtjeva. Projektanti se susreću sa velikim problemima kod projektovanja posuda od kompozitnih materijala, pošto na tržištu postoje mnogi proizvođači smole kao i staklenih ojačanja tako da različite kombinacije daju različite karakteristike materijala [1].

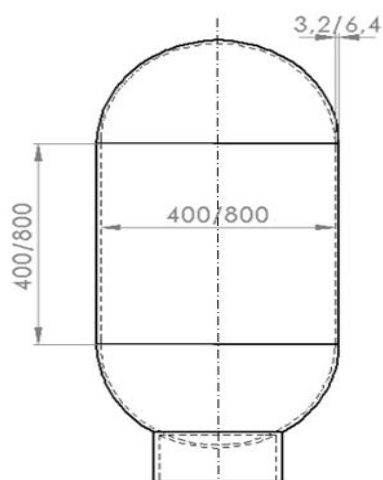
Cilj ovog rada, kako je već navedeno, je da se usporede rezultati eksperimenta, matematičkog modela i numeričke analize sa namjerom da se provjeri pouzdanost projektovanja posuda uz pomoć numeričke analize, odnosno da se izbjegne izvođenje skupocijenih eksperimenata.

2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Za potrebe izvođenja eksperimenta je izrađeno osam posuda sa dva različita prečnika, dvije različite debljine i dvije vrste kompozitnih ojačanja. Postupak izrade i testiranja navedenih posuda izveden je prema standardu BAS EN 13923, u preduzeću „Regeneracija“ d.o.o. V. Kladuša. U tabeli 1. je prikazan plan izrade posuda gdje se vidi struktura kompozitnog materijala za različite posude, a na slici 1. je prikazana geometrija posude za testiranje sa variranim dimenzijama.

Tabela 1. Laminat plan za izradu posuda

R/b	Prečnik D [mm]	Laminat plan
1	400	4 mate
2	800	4 mate
3	400	8 mata
4	800	8 mata
5	400	3 mate + rowing
6	800	3 mate + rowing
7	400	6 mata + 2 rowinga
8	800	6 mata + 2 rowinga



Slika 1. Dimenzije posuda za testiranje

Na slici 2. prikazane su svih osam izrađenih posuda od kompozitnih materijala prije testiranja.



Slika 2. Posude od kompozitnih materijala prije testiranja

Mirzet Beganović, Fadil Islamović, Dženana Gačo, Esad Bajramović
 NUMERIČKA ANALIZA I MATEMATIČKO MODELIRANJE KRITIČNOG
 PRITISKA POSUDA OD KOMPOZITNIH MATERIJALA

Za ispitivanje izrađenih posuda je korištena pumpa REMS E - Plush sa mogućnošću postizanja pritiska do 60 bara sa skalom 2 bara, a sam eksperiment je izveden u krugu preduzeća Regeneracija d.o.o. Velika Kladuša. Tabela 2. prikazuje dobijene rezultate za svih osam testiranih posuda u zavisnosti od prečnika D [mm], debljine stijenke s [mm], i karakteristike materijala σ_m [N/mm²].

Tabela 2. Rezultati izmjerenog kritičnog pritiska [2]

R/b	D [mm]	s [mm]	σ_m [N/mm ²]	Eksperimentalni rezultati [bar]
1	400	3,2	118	22,0
2	800	3,2	118	9,0
3	400	6,4	118	30,0
4	800	6,4	118	17,0
5	400	3,2	169	26,5
6	800	3,2	169	12,5
7	400	6,4	169	35,0
8	800	6,4	169	20,5

Eksperiment se odnosio na određivanje kritičnog pritiska u odnosu na postavljene parametre, tako da se u tabeli 2. vide dobijeni rezultati za osam testiranih posuda koji predstavljaju osnovnu podlogu za matematičko modeliranje kritičnog pritiska.

Potrebno je naglasiti da je kod prve četiri posude koje su bile izrađene sa ojačanjima u obliku mate prilikom pucanja došlo do totalnog oštećenja kako je prikazano na slici 5. a), odnosno usljed djelovanja cirkularnog napona došlo je do popuštanja cilindričnog dijela posude koje je prouzrokovalo pukotinu uzduž cijele posude, odnosno uzduž cilindričnog dijela posude [2].

Ostale četiri posude koje u svojoj strukturi imaju neprekidna vlakna (rowing), u momentu kritičnog pritiska, popustile su samo na jednom mjestu kako je prikazano na slici 3. b). Neprekidna vlakna uslijed popuštanja posude pod određenim pritiskom nisu dozvolila da se pukotina prenese na ostatak posude nego su izvršila lokalizaciju pukotine, što posudama koje u svojoj strukturi imaju rowing, iz sigurnosnih razloga, daje ogromnu prednost [2].



Slika 3. a) Izgled popuštanja posuda izrađenih od ojačanja u obliku mate (lijevo)
 b) Izgled popuštanja posuda izrađenih od ojačanja u obliku mate i rowinga (desno)

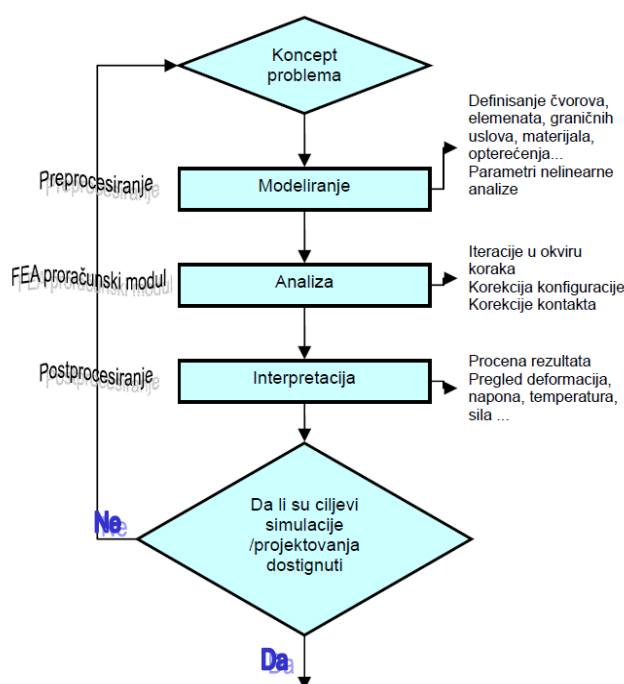
Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata izradili smo matematički model kritičnog pritiska u zavisnosti od prečnika posude, debljine stijenke i zatezne čvrstoće materijala posude:

$$P_{kr} = 18,06 - 0,034D + 2,54s + 0,081\sigma_m \quad (1)$$

3. NUMERIČKA ANALIZA KRITIČNOG PRITISKA POSUDA

Numerička metoda FME/MKE (Finite Element Method / Metoda konačnih elemenata) je postavljena ranih pedesetih godina ali je njena praktična primjena počela tek značajnijim razvojem računara, a nastala je iz potrebe za izračunavanjem napona i deformacija. Sa razvojem samog metoda povećavao se i broj veličina koje se mogu izračunavati u okviru statičke, dinamičke, termičke, elektromagnetne analize [3].

Da bi se razumjele osnove metode konačnih elemenata potrebno je poznavati osnovne pojmove kao što su pojmovi napona i deformacije i veze između njih. Na slici 4. je prikazan koncept korištenja FME/MKE metode.



Slika 4. Koraci primjene metode konačnih elemenata [3]

Kako se vidi sa slike korištenje FMA/MKE se sastoji od slijedećih koraka:

- postavljanje zadatka,
- priprema analize (preprocesiranje),
- analiza (procesiranje),
- obrada rezultata (postprocesiranje), i
- provjera i analiza rezultata.

Jedan od najvažnijih koraka u pripremnoj analizi je diskretizacija, to jest zamjena kontinuiranog sistema ili procesa diskretnim. Metoda diskretizacije, izbor geometrije konačnih elemenata (linije, površine, volumeni) i ukupan broj elemenata zavisi od prirode rješavanog problema i zahtjeva tačnosti. Teži se tome da se diskretizacija uradi sa minimalni brojem elemenata s tim da se ne remeti tačnost traženih podataka. Takođe je moguće na pojedinim dijelovima napraviti gušću mrežu sve sa ciljem postizanja boljih rezultata [3].

Mirzet Beganović, Fadil Islamović, Dženana Gačo, Esad Bajramović
NUMERIČKA ANALIZA I MATEMATIČKO MODELIRANJE KRITIČNOG
PRITISKA POSUDA OD KOMPOZITNIH MATERIJALA

Prije početka numeričke analize potrebno je odabrati odgovarajući softver koji će na najbolji način opisivati dati proces. U našem slučaju smo upotrijebili SolidWorks 2011, pošto u ponuđenim opcijama ima i mogućnost da definiše ponašanje kompozitnih materijala. U nastavku ćemo pokazati korake kod numeričke analize posude DN 400 sa debljinom stijenke 3,2 mm i materijalom kao prema prvom dijelu eksperimenta (samo mata).

Prvi korak u FME/MKE je da se nacrtaju 3D model. U našem slučaju se radi o simetričnim posudama pa smo za analizu uzeli samo jednu polovinu navedene posude.

Drugi korak se odnosi na definisanje materijala od kojih je posuda napravljena.

Treći korak je pokretanje simulacije uz definisanje debljine i materijala pojedinih slojeva kompozitnog materijala. Odabrali smo četiri sloja sa debljinom 0,8 mm i karakteristikom materijala MAT (ojačanje u obliku mata).

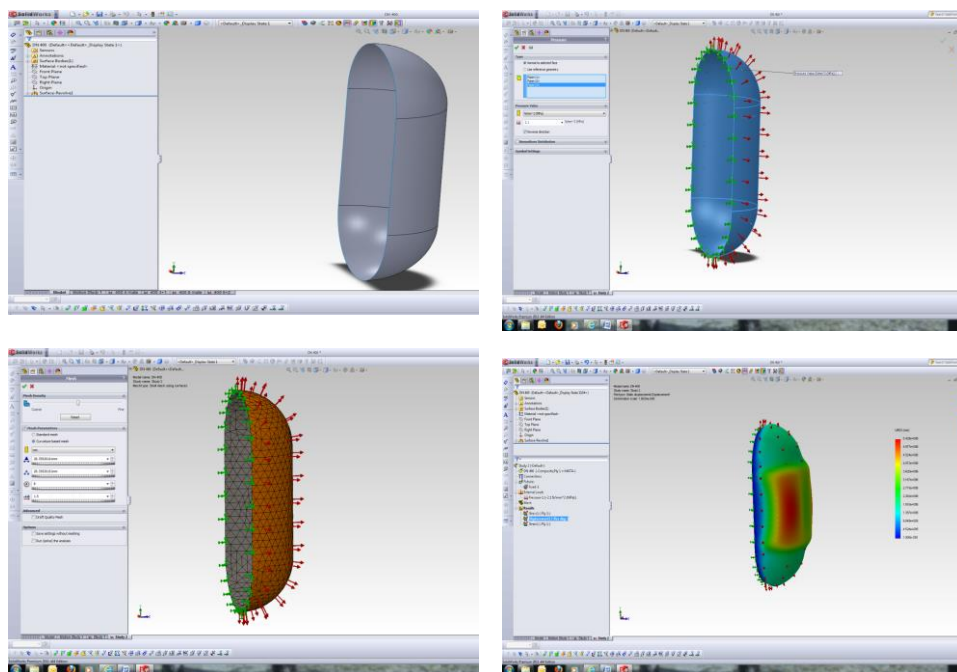
Četvrti korak se odnosi na fiksiranje geometrije. Kako smo uzeli da zbog simetričnosti analiziramo pola posude, mjesto prekida smo uzeli kao mjesto fiksiranja.

Peti korak se odnosi na definisanje opterećenja a u našem slučaju se radi o posudi pod pritiskom, tako da pritisak djeluje na sve dijelove posude. Za naš slučaj sa četiri matrike posuda je izdržala pritisak 21 bar ($2,1 \text{ N/mm}^2$).

Šesti korak je određivanje već spomenute diskretizacije kontinuuma. Na slici 5. se vide mogućnosti definisanja mreže kao što je gustoća i dimenzije elemenata.

Sedmi korak se odnosi na pokretanje simulacije prema zadanim parametrima.

Osmi korak se odnosi na pregled dobijenih rezultata. Prikazani su rezultati prema Von Misesu gdje će posuda izdržati pritisak od 21 bar kada nastaje lom iz razloga što definisani materijal ima graničnu čvrstoću 118 N/mm^2 .



Slika 5. Prikaz izvođenja numeričke analize

Mirzet Beganović, Fadil Islamović, Dženana Gačo, Esad Bajramović
 NUMERIČKA ANALIZA I MATEMATIČKO MODELIRANJE KRITIČNOG
 PRITISKA POSUDA OD KOMPOZITNIH MATERIJALA

4. UPOREDNA ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA, MATEMATIČKOG MODELIRANJA I NUMERIČKE ANALIZE

U tabeli 3. su prikazani rezultati dobijeni eksperimentom, numeričkom analizom i matematičkim modeliranjem. Prikazani rezultati matematičkog modeliranja za testirane posude pod pritiskom daju rezultate sa odstupanjem $\pm 0,5$ bara u odnosu na rezultate eksperimenta, tako da se sa vrlo dobrom tačnošću može reći na kojem pritisku će doći do otkaza ili pucanja posude pod pritiskom.

Tabela 3. Rezultati eksperimenta, numeričke analize i matematičkog modela

N	Fizikalne varijable			Eksperimentalni rezultati	Numerička analiza	Rezultati modeliranja
	D [mm]	s [mm]	σ_m [N/mm ²]	Pkr _{exp} [bar]	Pkr _{num} [bar]	Pkr _{mat} [bar]
1	400	3,2	118	22,0	21,0	22,1
2	800	3,2	118	9,0	10,5	8,5
3	400	6,4	118	30,0	35,0	30,3
4	800	6,4	118	17,0	19,0	16,7
5	400	3,2	169	26,5	25,0	26,3
6	800	3,2	169	12,5	12,4	12,7
7	400	6,4	169	35,0	48,0	34,4
8	800	6,4	169	20,5	24,5	20,8

5. ZAKLJUČAK

Rezultati numeričke analize kod tanjih posuda (debljine 3,2 mm) daju približno tačne rezultate u odnosu na eksperimentalne i matematičke rezultate, dok su za veće debljine posuda (u našem slučaju 6,4 mm) vidljiva daleko veća odstupanja. Za navedena odstupanja numerike mogu se navesti kao razlog da su posude pod pritiskom rađene ručnim putem i da je ljudski faktor direktno utjecao na kvalitet same posude. Takođe se kao razlika kod većih debljina može navesti interlaminarna čvrstoća koja kod kompozitnih materijala igra važnu ulogu, pošto znamo da se kompozitni materijali sastoje od niza slojeva koji se spajaju jedan za drugi preko matrice.

Generalno kazano ovako dobijen matematički odnosno numerički model kritičnog pritiska je dobar pokazatelj projektantima da znaju do kojeg kritičnog pritiska može izdržati navedena posuda, te na osnovu toga napraviti blic kontrolu radnog, odnosno projektovanog pritiska, ali i za projektovanje novih posuda od kompozitnih materijala kao zamjena skopocijenim eksperimentalnim ispitivanjima.

6. LITERATURA

- [1] S. Kadić: „Prilog analizi mehaničkih i eksploatacijskih svojstava kompozitnih materijala“, *Magistarski rad*, Univerzitet u Bihaću - Tehnički fakultet Bihać, Bihać, 2006.
- [2] M. Beganović: „Teorijsko-eksperimentalna analiza i matematičko modeliranje kritičnog pritiska posude od kompozitnih materijala“, *Magistarski rad*, Univerzitet u Bihaću - Tehnički fakultet Bihać, Bihać, 2012.
- [3] www.mfkg.kg.ac.rs/centri-fakulteta/centar-za-virtuelnu-proizvod (31.05.2013.)