

KOMPARATIVNA ANALIZA NAPONA KUGLASTOG SPREMNIKA FEM I EKSPERIMENTALNOM METODOM

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TENSIONS OF BALL-SHAPED CONTAINER WITH FEM AND EXPERIMENTAL METHODS

Dr.sc. Zijad Babović, docent

Dr.sc. Džemo Tufekčić, red. prof.

Dr. sc. Pašaga Muratović, red.prof.

Mr. sc. Salko Čosić, viši asistent

Univerzitet u Tuzli
Mašinski fakultet, Tuzla

REZIME

U okviru rada predstavljena je komparativna analiza napona kuglastog spremnika FEM i eksperimentalnom metodom. Mjerna mjesta na konstrukciji kuglastog spremnika, po karakteru mogu biti fiksna ili mogu biti određena u zavisnosti od iskustva vršioca mjerenja na mjestima gdje se po konstrukcionom rješenju očekuju povećane deformacije, odnosno koncentracija naprezanja. Definiranje naponskog stanja na spremniku, mjerenjem dilatacija ne mogu se uočiti naprezanja od sopstvene težine, i težine fluida, nego se ona mogu tretirati samo matematski. Na bazi proračuna, u okviru programskog paketa "ADINA", predstavljen je raspored cirkularnih, meridijalnih i tangencijalnih napona, kao i kvantitativni uticaj sopstvene težine na napone u plaštu spremnika, u cirkularnom i meridijalnom smjeru. Akvizicija podataka je vršena sa spremnika koji se nalazi u okviru HAK-a Poliuretanska hemija Tuzla, zapremine $V = 1200 \text{ m}^3$, i namijenjenog za skladištenje ukapljenog propilena (C_3H_6). Materijal spremnika je sitnozrnasti mikrolegirani čelik NIOVAL 47.

Ključne riječi: kuglasti spremnik, naponska analiza, propilen, FEM, mikrolegirani čelik.

ABSTRACT

Comparative analysis of the tensions of ball-shaped container is present with the method of ultimate components and experimental methods in this work. Measurable places on construction of ball-shaped container by character can be fixed or defined in depends of experience of doer the measuring on the places where is expected a higher strain apropos strain concentration by construstional solution. Defining the tension on container by measuring the dilatation it can't be espied on exertions of it's own weight and weight of fluid so they are only defined in mathematics. Based on calculations in programme package "ADINA" is presented plan of circular, merdian and tangent tensions and the quantitative influence of it's own weight on tensions in mantle of container. Collecting statistics has been done from container which is placed in Chlorine-alkaline large tract of Polyurethane-chemistry in Tuzla, capacity of 1200 m^3 and intend to depot instill propilen (C_3H_6). Material of which is made the container is small-grained microalloyed steel NIOVAL 47.

Key words: ball-shaped container, tension analysis, propilen, the method of ultimate components, microalloyed steel.

1. UVOD

Definisati naponsko stanje na postrojenjima koja se nalaze u okviru nekog tehnološkog procesa se najčešće svodi na postavljanje mjernih traka na odgovarajuća mjerna mjesta. Mjerna mjesta po karakteru mogu biti fiksna (postavljena od strane projektanta i izvođača), ili

pak u zavisnosti od iskustva vršioca mjerenja na mjestu gdje se po konstrukcionom rješenju može očekivati povećane deformacije, odnosno koncentracija naprezanja.

Za razliku od ostalih numeričkih metoda, koje se zasnivaju na matematičkoj diskretizaciji jednačina graničnih problema, metoda konačnih elemenata se zasniva na fizičkoj diskretizaciji razmatranog domena. Zbog toga su osnovne jednačine pomoću kojih se opisuju stanje u pojedinim elementima umjesto diferencijalnih i integralnih, obične algebarske.

Sušтина aproksimacije kontinuuma po metodi konačnih elemenata, je u tome da se razmatrani domen kontinuuma, pomoću zamišljenih linija ili površi, dijeli se na određen broj poddomena konačnih dimenzija, povezanih u konačnom broju tačaka.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Za rezultate dobijene mjerenjem deformacija (specifična deformacija ϵ) na plaštu spremnika, upotrijebljene su mjerne trake (tenzometri) tipa RY 11-6/120, proizvodnje "HBM" Njemačka u spoju sa mjernim instrumentom UPM 60, klase tačnosti 0,1 istog proizvođača. Na bazi mjerenja dilatacija, na plaštu spremnika izračunavaju se naprezanja. Sva mjerenja su vršena od strane proizvođača kuglastog spremnika, na šest fiksnih mijesta, i dati su u tabelama (1-5).

Tabela 1. Režim ispitivanja: Pritisak $p = 0.0$ MPa

Pun spremnik							Pražnjenje spremnika					
M.M	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	S	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	S
1	79	72	23.22	22.08	22.67	19.85	56	40	15.69	13.11	14.57	30.88
2	67	81	21.07	23.33	22.29	20.19	18	15	5.19	4.71	4.97	90.58
3	64	60	18.92	18.28	18.61	24.18	4	14	1.89	3.51	3.04	147.98
4	68	82	21.37	23.63	22.58	19.92	29	70	11.54	18.16	15.92	28.27
5	67	80	21.00	23.10	22.12	20.34	30	28	8.86	8.54	8.70	51.70
6	72	86	22.57	24.83	23.78	18.92	32	36	9.88	10.52	10.22	44.05

Tabela 2. Režim ispitivanja: Pritisak $p = 0.51$ MPa

Pun spremnik							Pražnjenje spremnika					
M.M	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	S	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	S
1	316	293	93.21	89.49	91.92	4.90	631	572	185.22	175.68	181.69	2.48
2	264	314	82.66	90.74	87.49	5.14	496	578	154.48	167.72	162.55	2.77
3	256	261	77.15	77.95	78.06	5.76	483	503	146.28	149.52	148.97	3.02
4	239	279	74.47	80.93	78.41	5.74	452	510	139.62	148.98	145.57	3.09
5	241	283	75.21	81.99	79.33	5.67	458	516	141.42	150.78	147.37	3.05
6	237	276	73.80	80.10	77.65	5.80	451	508	139.25	148.45	145.12	3.10

Tabela 3. Režim ispitivanja: Pritisak $p = 1,05$ MPa

Pun spremnik							Pražnjenje spremnika					
M.M	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	S	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	S
1	597	546	175.57	167.33	172.65	2.61	631	572	185.22	175.68	181.69	2.48
2	487	576	152.26	166.64	160.98	2.80	496	578	154.48	167.72	162.55	2.77
3	482	488	145.02	145.98	146.55	3.07	483	503	146.28	149.52	148.97	3.02
4	440	502	136.29	146.31	142.61	3.16	452	510	139.62	148.98	145.57	3.09
5	444	506	137.49	147.51	143.81	3.13	458	516	141.42	150.78	147.37	3.05
6	439	501	135.99	146.01	142.31	3.16	451	508	139.25	148.45	145.12	3.10

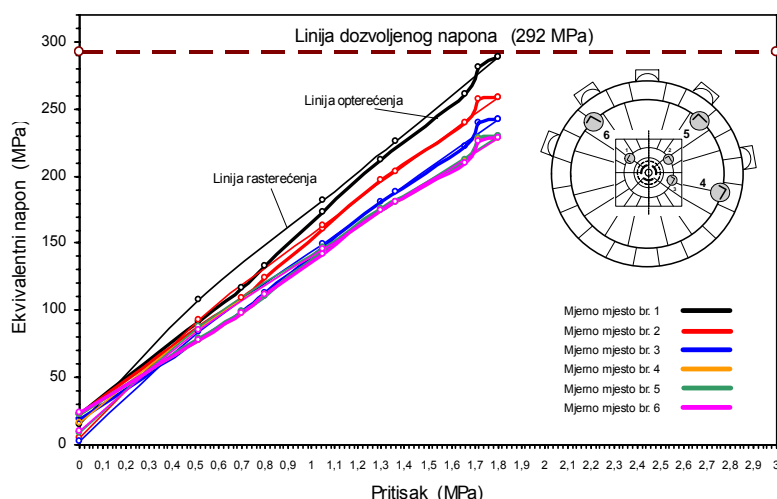
Tabela 4. Režim ispitivanja: Pritisak $p = 1,3 \text{ MPa}$

M.M	Pun spremnik						Pražnjenje spremnika					
	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	s	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	s
1	734	674	216.05	206.35	212.66	2.12	781	713	229.59	218.61	225.66	1.99
2	598	705	186.81	204.09	197.32	2.28	621	725	193.50	210.30	203.78	2.21
3	595	605	179.19	180.81	181.30	2.48	613	635	185.42	188.98	188.58	2.39
4	538	617	166.87	179.63	174.90	2.57	555	639	172.32	185.88	180.84	2.49
5	539	619	167.24	180.16	175.36	2.57	557	638	172.71	185.79	180.96	2.49
6	535	614	165.97	178.73	174.00	2.59	554	637	171.95	185.35	180.38	2.49

Tabela 5. Režim ispitivanja: Pritisak $p = 1,8 \text{ MPa}$

M.M	Pun spremnik					
	ϵ_a	ϵ_b	σ_e	σ_m	σ_{ekv}	s
1	980	900	288.46	275.54	289.02	1.58
2	784	920	244.62	266.58	258.10	1.74
3	789	811	238.22	241.78	241.82	1.86
4	712	800	219.69	233.91	228.93	1.97
5	715	803	220.59	234.81	229.83	1.96
6	710	801	219.30	234.00	228.80	1.97

Za sve režime i za sva mjerna mjesta, rezultati ispitivanja su predstavljani i dijagramski u odnosu na dozvoljenog napon za dati material (slika 1).



Slika 1. Prikaz opterećenja i rasterećenja konstrukcije spremnika u funkciji ekvivalentnog napona

2.1 Analiza eksperimentalnih podataka

Maksimalno naprezanje izmjereno je na mjernom mjestu broj 1. i iznosi 284,02 MPa za cirkularni napon, odnosno, 275,54 MPa za meridijalni napon, pri ispitnom pritisku od 1,8 MPa. Te vrijednosti iznose 63 % za cirkularni, odnosno 61 % za meridijalni napon od naprezanja tečenja osnovnog materijala (NIOVAL 47), koji iznosi 450 MPa, tj. koeficijent sigurnosti konstrukcije za ispitni pritisak iznosi 1,58. Po standardu koeficijent sigurnosti konstrukcije za ispitni pritisak mora biti $\geq 1,1$.

Kod radnog pritiska od 1,3 MPa najveće izmjereno naprezanje je također na mjernom mjestu broj 1. i iznosi za cirkularni napon 216,05 MPa, a za meridijalni napon 206,35 MPa, što daje koeficijent sigurnosti konstrukcije 2,12. Po standardu koeficijent sigurnosti konstrukcije za radni pritisak mora biti $\geq 1,5$.

3. 2D ANALIZA KONAČNIM ELEMENTIMA

3.1 Algoritamski koncept FEM

Analiza i rješavanje problema mahanike kontinuuma po metodu konačnih elemenata uvijek se svode na tzv. proces *korak po korak* (Step by step process). U tom procesu koji se može prikazati kao jednostavan algoritam, izdvaja se sedam najvažnijih koraka: *diskretizacija kontinuuma, izbor interpolacionih funkcija, izračunavanje karakteristika elemenata*, definiranje rubnih uslova, formiranje jednačina za mrežu konačnih elemenata, rješavanje sistema jednačina, proračun potrebnih uticaja. Od navedenih sedam koraka, naročito su važna prva tri. Način diskretizacije, izbor oblika elemenata, kao i ukupnog broja elemenata, zavise od prirode problema koji se rješava i potrebe tačnosti traženog rješenja. Pored broja i oblika elemenata važan je izbor čvorova, osnovnih nepoznatih u njima i interpolacionih funkcija. Pomoću interpolacionih funkcija se definiira polje promjenljivih u svakom elementu. Od njihovog izbora neposredno zavisi i kontinuitet u granicama između pojedinih elemenata, a samim tim i tačnost aproksimacije. Promjenljive u elementu mogu biti skalarne, vektorske ili tenzorske veličine. Karakteristike pojedinih elemenata određuju se nezavisno od mreže elemenata kao cjeline.

Posljednja tri koraka, iako su za praktične proračune od velikog značaja, danas spadaju u okvire rutinskog posla koji je prilagođen automatskom radu elektronskih računara

3.2 Analiza 2D modelom

Kuglasti spremnik se može geometrijski posmatrati kao simetrično tijelo, ali sa stanovišta opterećenja nije simetričan. Na mjestima oslanjanja, gdje djeluju reaktivne vanjske sile, normalno je očekivati *koncentraciju napona*, kao i povećane deformacije. Osim toga u spremniku se javlja i maksimalni *hidrostatski pritisak*, u samom dnu spremnika, od stuba fluida. Polazni parametri simulacije 2 D modela su: $V=1200 \text{ m}^3$, $D_s=13\,322 \text{ mm}$, $D_u=13\,262 \text{ mm}$, medij-propilen gustine $512,90 \text{ kg/m}^3$, $p_r=1,3 \text{ MPa}$, material-NIOVAL 47, $E=210 \text{ GPa}$, $\nu=0,30$; $Re=450 \text{ MPa}$

Da bi se pravilno definirali rubni uslovi, u okviru programskog paketa "ADINA", (v. 8.0), definirani su stepeni slobode svake karakteristične tačke koja učestvuje u generiranju simulirane mreže krivolinijskog koordinatnog sistema, kao i hidrostatski pritisak, od stuba fluida. Korišteni su izoparametarski elementi sa devet Gausovih integracionih tačaka. Svaki element je definiran sa četiri čvora. Date su tri vrste rubnih uslova:

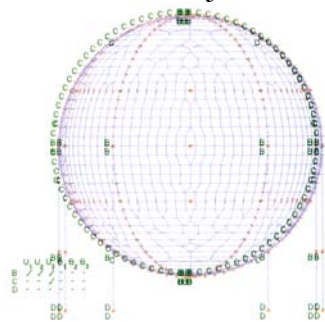
D - predstavlja potpuno uklještenje, bez ijednog stepena slobode.

C - predstavlja dozvoljeni pomak u pravcu ose z.

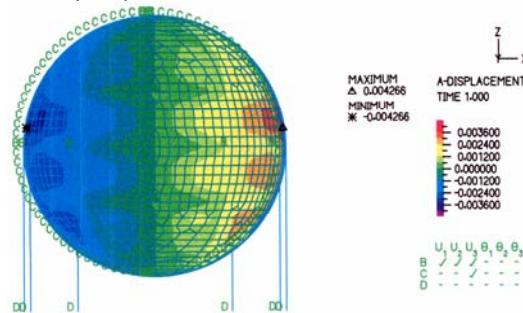
B - predstavlja dozvoljeni pomak u pravcu osa x, y i z, bez rotacije.

Sve ostale tačke imaju šest stepeni slobode.

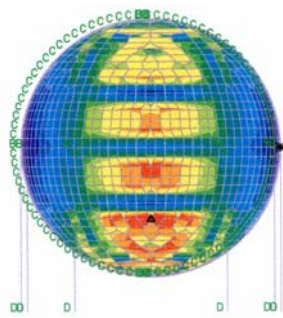
Simulirana mreža ima ukupno 1054 elementa od kojih je 1048 elemenata ljuske, i 6 elemenata – linijski nosači, i prikazani su na slikama (2-7).



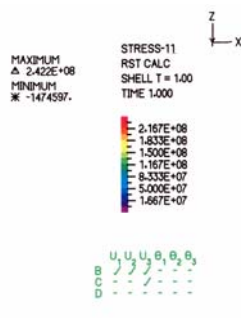
Slika 2. Prikaz osnovne mreže



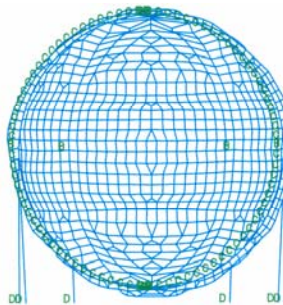
Slika 3. Apsolutna pomjeraja



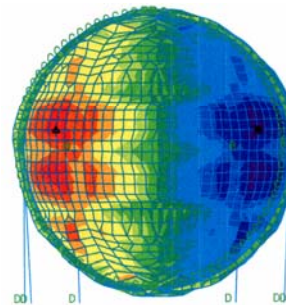
Slika 4. Prikaz cirkularnih napona (1,3 MPa)



Slika 5. Prikaz meridijalnih napona (1,3 MPa)



Slika 6. Deformacija mreže kao posljedica



Slika 7. Prikaz tangencijalnih napona (1,3 MPa)

Prikaz izračunatih i izmjerenih napona u cirkularnom i meridijalnom smjeru je dat u tabeli 2.

Tabela 6. Prikaz odnosa između izračunatih i izmjerenih napona

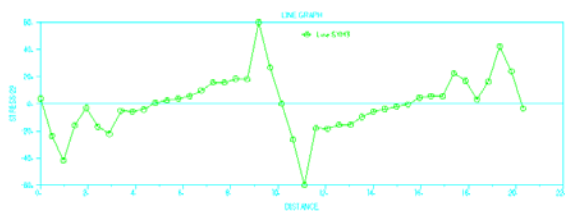
Izračunato – izmjereno (za mjerna mjesta)	p= 1,3 (MPa)		p= 1,8 (MPa)	
	σ_{11}	σ_{22}	σ_{11}	σ_{22}
Izračunate vrijednosti	195,10	122,00	270,20	168,90
Izmjerene vrijednosti: 1	216,05	206,35	288,46	275,54
Izračunate vrijednosti	195,10	122,00	270,20	168,90
Izmjerene vrijednosti: 2	186,81	204,09	244,62	266,58
Izračunate vrijednosti	152,80	173,40	211,50	240,10
Izmjerene vrijednosti: 3	179,19	180,81	238,22	241,78
Izračunate vrijednosti	191,50	168,60	265,20	233,50
Izmjerene vrijednosti: 4	166,87	179,63	219,69	233,91
Izračunate vrijednosti	196,10	216,00	271,60	299,10
Izmjerene vrijednosti: 5	167,24	180,16	220,59	234,81
Izračunate vrijednosti	167,80	243,30	232,30	336,80
Izmjerene vrijednosti: 6	165,97	178,73	219,30	234,00

Mjerenjem dilatacija ne mogu se uočiti naprezanja od sopstvene težine, i težine fluida, nego se ona mogu tretirati samo matematski. Na bazi proračuna, u okviru programskog paketa "ADINA", u tabeli 7; dat je kvantitativni utjecaj sopstvene težine na napone u plāstu spremnika, u cirkularnom i meridijalnom smjeru.

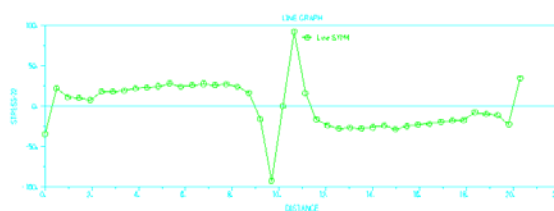
Tabela 7. Kvantitativni utjecaj sopstvene težine na napone u plāstu spremnika.

P r i t i s a k	Maksimalno izračunate vrijednosti napona		
	σ_{11} (MPa)	σ_{22} (MPa)	$\sigma_{ekv.}$ (MPa)
1,3 (MPa)	242,20	291,10	269,19
0,0 (MPa)	1,983358	4,225175	3,6504813
Procentualno učešće	0,82 %	1,45 %	1,36 %

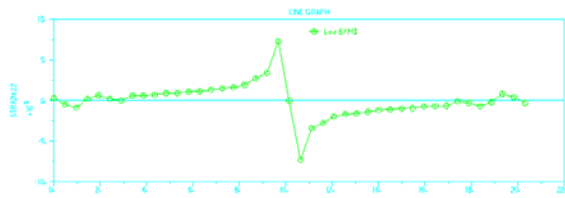
Prikaz napona i deformacija po obimu, meridijalni smjer, predstavljen je na slikama (8-10):



Slika 8. Napon σ_{22} – opterećena konstrukcija



Slika 9. Napon σ_{22} – neopterećena konstrukcija.



Slika 10. Dijagram deformacija u meridijalnom smjeru.

4. ZAKLJUČAK

Konstatirane ekstremne vrijednosti veličina odstupanja, između izračunatog i izmjerenog napona, evidentirane su na mjernim mjestima 1 (40,9%), 2 (40,2%) i 6 (36,1%) i nalaze se u području ekvatora (ukrućenje konstrukcije za nogare), što je posljedica poremećaja naponskog polja tj. pojave koncentracije napona izazvanih diskontinuitetom u osnovnom materijalu. Vrijednosti zaostalih naprezanja nakon rasterećenja konstrukcije spremnika kreću se u granicama dopuštenih (15% od maksimalnog izmjerenog naprezanja za pojedino mjerno mjesto). Numerička analiza FEM ukazala je da su naponi većeg inteziteta locirani na mjestima zavara segmenata-kalota, i da prate meridijalni smjer. Konstatirana su veća odstupanja rezultata (mjereno-izračunato) u meridijalnom smjeru, usljed poremećaja naponskog polja, s obzirom da je većina varova locirana u meridijalnom smjeru. Iz tabele 7, je vidljivo da naponi izazvani od uticaja sopstvene težine konstrukcije, u cirkularnom smjeru sudjeluju sa 0,82 %, a u meridijalnom sa 1,45 %, što potvrđuje prethodno navedenu konstataciju o poremećaju naponskog polja, usljed diskontinuiteta u osnovnom materijalu, pa se može zaključiti da je simulacija 2D modela FEM u potpunosti prihvatljiv način definiranja kritičnih mjesta na posudama pod pritiskom, a time i definiranje pouzdanosti same konstrukcije.

5. LITERATURA

- [1] Fedorov V.V.: Teorija eksperimenta, Nauka, Moskva, 1971.
- [2] Krsmanović LJ., Vušković I.: Metode laboratorijskih mjerenja, Mašinski fakultet, Beograd, 1984.
- [3] Savković – Stevanović J.: Modelovanje i simulacija procesa, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, Beograd, 1995.
- [4] Jecić S.: Teorija elastičnosti, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1977.
- [5] Kalajdžić M., Mekelba: Metod konačnih elemenata u BASIC-u, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.