

TEORIJSKO NUMERIČKI METOD PRORAČUNA CILINDRIČNIH I LOPTASTIH REZERVOARA ZA SKLADIŠTENJE FLUIDA

Prof. dr Radovan S. Petrovic, dipl.maš.inž.¹⁾, prof. dr Miloš Kojić, dipl.maš.inž.²⁾,
Nenad Todić, dipl.maš.inž.³⁾,

Kategorija rada: ORIGINALNI NAUČNI RAD

Adresa:

Recenzent: Prof.dr Milomir Gašić

¹⁾ Mašinski fakultet Kraljevo

Rad primljen: 20.08.2009.godine

²⁾ Mašinski fakultet Kragujevac

³⁾ Mašinski fakultet Kraljevo

Rezime: Teorijsko numerički metod proračuna je formiran na bazi izbora oblika konačnog elementa, kao pouzdanog elementa koji će dati tačna rešenja za bilo koju geometriju ljuske. Glavni deo posla je formiranje konačno-elementnog modela i njegove matrice krutosti. Za dobijanje membranske matrice krutosti ovde su korišćene lokalne L-koordinate, što je najracionalnije s' obzirom na proces integraljenja koji potom sledi. Ove koordinate su za simpleks konačne elemente ujedno i interpolacione funkcije, što dodatno ubrzava kompjutersko rešavanje. Kompjuterski proračun zahtevao je definisanje, određivanje i unos ulaznih podataka, odnosno veličina geometrijskog i mehaničkog karaktera (mreža konačnih elemenata sa koordinatama čvorova, ograničenja pomeranja, opterećenja i dr.). Ovaj veliki i zamoran posao ovde je jako ubrzan originalnim programom za automatsko generisanje ulaznih podataka.

Ključne reči: vertikalni rezervoar, loptasti rezervoar, metoda konačnih elemenata (MKE), matematičko modeliranje, mreža konačnih elemenata, interpolacione funkcije.

1. UVODNA RAZMATRANJA

Ovaj rad je nastao kao rezultat višegodišnjeg istraživanja autora u oblasti projektovanja rezervoara za transport i skladištenje fluida. Istraživanja su sprovedena na brojnim realnim konstrukcijama rezervoara iz proizvodnog programa Fabrike vagona Kraljevo a podržana od Ministarstva za nauku Republike Srbije, kroz više Istraživačko-razvojnih projekata sufinansiranih od Ministarstva nauke Srbije. U radu je pokazana primena metode konačnih elemenata, pri matematičkom modeliranju rezervoara za skladištenje fluida, koja je razvijena u Laboratoriji za inženjerski softver Mašinskog fakulteta Univerziteta u Kragujevcu.

Eksperimentalna ispitivanja rezervoara za transport i skladištenje fluida, sproveo je Centar za železničko mašinstvo Mašinskog fakulteta Kraljevo i Obitni centar Fabrike vagona Kraljevo.

2. IZBOR KONAČNOG ELEMENTA LJUSKE ZA LINEARNU I NELINEARNU GEOMETRIJSKU ANALIZU

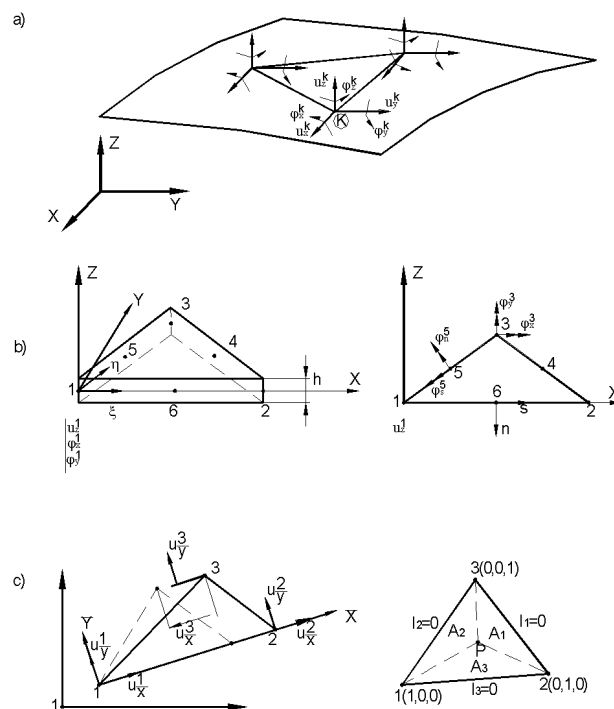
Za analizu čvrstoće i stabilnosti nosećih zidova rezervoara odabran je konačni element prikazan na sl. 1, prema [1], koji se pokazao veoma efikasnim i pogodnim za rešavanje problema iz opšte teorije ljuski. Ovde će biti izložene samo neke osnovne postavke ovog elementa, a detaljna izvođenja mogu se videti u [1]. Trougaoni konačni element ljuske, kako se vidi na sl. 1a. ima 6 stepeni slobode po čvoru – 3 translacije i 3 rotacije. Osnovna ideja kod ovog elementa sastoji se u tome što se posmatra posebno savijanje a posebno membranska opterećenja i deformacije.

Element obezbeđuje pouzdana i tačna rešenja za bilo koju geometriju ljuske uzimajući u obzir različita opterećenja i granične uslove. U nelinearnoj analizi element je pogodan za izračunavanje velikih pomeranja, velikih rotacija i materijalne nelinearnosti. Ovakva pretpostavka za polje pomeranja sadrži u osnovi fizički uslov, da materijalne duži, prvobitno upravne na srednju ravan ljuske ostaju nedeformisane, ali ne mo-

raju zadržati pravac normalan na srednju površinu posle deformacije.

Vektor pomeranja dat je izrazom :

$$\{\bar{u}_B\}^T = \{u_z^1, \varphi_z^1, \varphi_y^1, u_z^2, \varphi_x^2, \varphi_y^2, u_z^3, \varphi_x^3, \varphi_y^3\}^T \quad (1)$$



Sl. 1 Trougaoni konačni element ljuske

2.1 Matrica krutosti savijanja

Za izračunavanje matrice krutosti elementa polazi se od izraza:

$$U = \frac{1}{2} \int_A \{K\}^T [D]_B \{K\} dA \quad (2)$$

gde su:

-{K} vektor savijanja koji ima tri komponente:

$$\{K\} = \begin{Bmatrix} \beta_x, y \\ -\beta_y, y \\ \beta_x, y - \beta_y, x \end{Bmatrix} \quad (3)$$

-Matrica $[D]_B$ opštem slučaju funkcija je debljine ljuske δ i elastičnih svojstava pojedinih slojeva materijala. U slučaju izotropnih homogenih ploča, konstantne debljine, važi sledeća relacija:

$$[D]_B = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 \\ sim & & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gde su E - Jangov modul elastičnosti a μ - Puasonov koeficijent.

Posmatrajući izraz (2) vidi se da se u njemu pojavljuju prvi izvodi β_x i β_y , pa je otuda relativno lako uspostaviti interpolacione funkcije koje zadovoljavaju uslove kontinualnosti. Polje rotacije β_x i β_y se može izraziti pomoću rotacija Q_x^k i Q_y^k

oko osa x i y u čvorovima:

$$\beta_x = \sum_{k=1}^6 N_k Q_x^k, \quad \beta_y = \sum_{k=1}^6 N_k Q_y^k \quad (5)$$

gde su: $N_k(\xi, \eta)$ - interpolacione funkcije

Međutim u izrazu (2) se ne pojavljuju ugibi elemenata. Zato se postavljaju dopunski uslovi na granicama elementa koji glase:

a) KIRCHOFF-ova hipoteza je zadovoljena u čvorovima i u međučvorovima tj:

$$\{\gamma\} = \begin{Bmatrix} u_{z,y} - \beta_y \\ u_{z,y} + \beta_x \end{Bmatrix} = 0 \quad (6)$$

u čvorovima $k=1, 2$ i 3

$$u_{z,s} - \beta_s = 0 \quad (7)$$

u međučvorovima $k=4, 5$ i 6

b) Pretpostavlja se linearna promena duž strana trougla

$$\beta_n^k = \frac{1}{2}(\beta_n^i + \beta_n^j) \quad (8)$$

Gde $k=4, 5, 6$ označava međučvorove na sredini strana a i, j su ugaoni čvorovi.

c) Pretpostavlja se kubna promena za u_z duž strana trougla

$$u_z = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 \quad (9)$$

Na osnovu izraza (3) dobija se

$$[K] = [B]_B \{u_B\} \quad (10)$$

gde su:

$$\begin{Bmatrix} u_B \end{Bmatrix} - \text{vektor pomeranja dat izrazom (1).}$$

$[B]_B$ - Linearna matrica deformacija - pomeranje za savijanje data u obliku (1):

$$[B]_B = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_3 \{H_{x,\xi}\}^T \\ -x_3 \{H_{y,\xi}\} + x_2 \{H_{y,\eta}\}^T \\ -x_3 \{H_{x,\xi}\} + x_2 \{H_{x,\eta}\} + y_3 \{H_{y,\xi}\}^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

Konačno matrica krutosti savijanja u odnosu na lokalni koordinatni sistem x, y, z se dobija integracijom po površini A elementa:

$$[\bar{K}]_B = 2A \int_0^1 \int_0^{1-\eta} [B] [D]_B [B]_B d\xi d\eta \quad (12)$$

2.2 Membranska matrica krutosti

Membransko polje pomeranja definišemo interpolacijama:

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{h^1(l_i)\}^T \\ \{h^2(l_i)\}^T \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \end{Bmatrix} M \quad (13)$$

gde su $\bar{u}$ - interpolacioni vektori izraženi preko area koordinata $/i$.

Ove koordinate se definišu na sledeći način:

Površina trougla je:

$\{h^1(l_i)\}, \{h^2(l_i)\}$ - interpolacioni vektori izraženi preko area koordinata $/i$.

Ove koordinate se definišu na sledeći način:

Površina trougla je:

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} = \quad (14)$$

$$= \frac{1}{2} [x_i(y_j - y_k) + x_j(y_k - y_i) + x_k(y_i - y_j)]$$

gde su: $x_i, x_j, x_k, y_i, y_j, y_k$ - koordinate temena trougla. Interpolacioni vektori izraženi preko površinskih koordinata l_i glase:

$$\begin{aligned} \{h^1\}^T &= \{l_1 \ 0 \ l_2 \ 0 \ l_3 \ 0\}^T \\ \{h^2\}^T &= \{0 \ l_1 \ 0 \ l_2 \ 0 \ l_3\}^T \end{aligned} \quad (15)$$

a vektor membranskih pomeranja u lokalnom sistemu $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ dat je izrazom:

$$\{\bar{u}_M\} = \{u_x^1, u_y^1, u_x^2, u_y^2, u_x^3, u_y^3\}^T \quad (16)$$

Vektor deformacije glasi:

$$\{e\} = \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ h, x \end{Bmatrix}^T \\ \begin{Bmatrix} h^2, y \end{Bmatrix}^T \\ \begin{Bmatrix} 1 \\ h, y \end{Bmatrix}^T + \begin{Bmatrix} h^2, x \end{Bmatrix}^T \end{bmatrix} \quad \{\bar{u}\} = [B_M] \{\bar{u}\} \quad (17)$$

gde je $[B_M]$ matrica veze između linearne membranske deformacije $\{e\}$ i pomeranja $\{\bar{u}\}$, u lokalnom sistemu.

Na osnovu konstitutivnih relacija sledi

$$\{\sigma\} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \{\epsilon\} = [C] \{\epsilon\} = [C][B_M] \{u\}$$

3. PRIMER NUMERICKE ANALIZE I PRO- RAČUNA

3.1. Loplasti rezervoar zapremine $V = 600 \text{ m}^3$

- Opterećenja: sopstv. tež. + hidrost. prit. + prit. gasa
- $\gamma_z = 0,0078 \text{ dN/cm}^3$ specifično opterećenje od zida ljsuke
- $\gamma_h = 0,001 \text{ dN/cm}^3$ specifično opterećenje tečnosti
- $p_g = 16,7 \text{ dN/cm}^2$ pritisak propan-butan gasa
- $R = 526 \text{ cm}$ spoljni poluprečnik lopte
- $t = 2,8 \text{ cm}$ debljina ljsuke
- Oslanjanje $\varphi_0 = 90^\circ$ i $\varphi_0 = 105^\circ$
- Sopstvena težina lopte:

$$G = \frac{4\pi}{3} (R^3 - R_u^3) \cdot \gamma_z = 75,6358 \text{ daN}$$

- $R_u = 526 - 2,8 = 523,2 \text{ cm}$, unutrašnji poluprečnik,
- $R_{sr} = 526 - 1,4 = 524,6 \text{ cm}$, srednji poluprečnik,
- veličine srednje površine $A_{sr} = 4\pi R_{sr}^2 = 3458330 \text{ cm}^2$
- sopstvena težina po jedinici srednje površine:

$$g = \frac{G}{A_{sr}} = 0,02187 \text{ dN/cm}^2$$

3.1.1. Membranski naponi od dejstva sopstvene težine

Ukupno opterećenje koje deluje na deo kupole je:

$$Q = gA = 2\pi gR^2(1 - \cos\varphi) \quad (19)$$

Sile u preseccima iznose:

$$N_\varphi = -\frac{gR}{1 + \cos\varphi} \quad (20)$$

$$N_\theta = -gR\left(\cos\varphi - \frac{1}{1 + \cos\varphi}\right) \quad (21)$$

U slučaju $\varphi_0 = \varphi + \frac{\pi}{2}$

- komponente opterećenja su:

$$X = 0, \quad Y = g\sin\varphi_0, \quad Z = g\cos(\pi - \varphi_0) = g\cos\varphi_0$$

- površina dela kupole ispod kruga poluprečnika r_0 iznosi:

$$A = 2\pi R^2 f = 2\pi R^2(1 + \cos\varphi_0),$$

- ukupno opterećenje koje deluje na taj deo kupole biće:

$$Q' = gA = 2\pi gR^2(1 + \cos\varphi_0),$$

Sile u preseccima u ovom slučaju su

$$N_\varphi = -\frac{gR}{1 - \cos\varphi_0} \quad (22)$$

$$N_\theta = -gR\left(\cos\varphi_0 - \frac{1}{1 - \cos\varphi_0}\right) \quad (23)$$

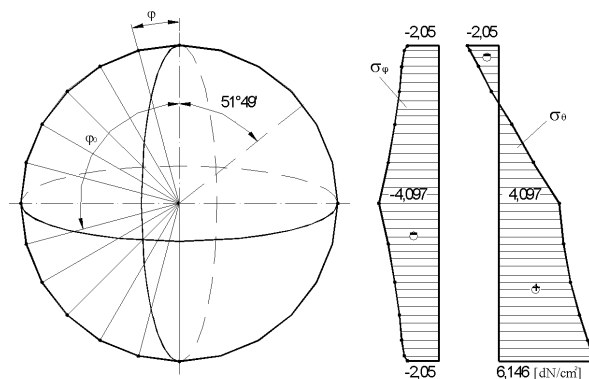
φ	N_φ	N_θ	σ_φ	σ_θ
$^\circ$	dN/cm	dN/cm	dN/cm ²	dN/cm ²
0	-5,736	-5,736	-2,05	-2,05
15	-5,836	-5,246	-2,084	-1,874
30	-6,148	-3,787	-2,196	-1,352
45	-6,721	-1,391	-2,4	-0,496
60	-7,649	1,912	-2,732	0,683
75	-9,114	6,145	-3,255	2,194
90	-11,473	11,473	-4,097	4,097
105	-9,114	12,083	-3,255	4,315
120	-7,649	13,385	-2,732	4,78
135	-6,721	14,833	-2,4	5,297
150	-6,148	16,084	-2,196	5,744
165	-5,836	16,918	-2,084	6,042
180	-5,736	17,209	-2,05	6,146

Tabela 1.

Vrednosti sila po jedinici dužine preseka za pojedine uglove φ , kao i napona u tim preseccima pod dejstvom sopstvene težine dati su u tabeli 1. i slici 2.

Iz table 1. i dijagrama napona na sl.2. mogu se izvući sledeći zaključci:

- Izraz (23) postaje nula za $\varphi = 51^\circ 49'$ pa cirkularni napon za tu vrednost dobija promenu znaka.
- Deo rezervoara iznad paralelnog kruga definisanog ovom vrednošću ugla izložen je pritisku a deo rezervoara ispod ovog kruga opterećen je na istezanje.
- Najveća vrednost cirkularnog napona $\sigma_\theta = 6,146 \text{ dN/cm}^2$ nalazi se na donjem temenu rezervoara a najveća vrednost meridijanskog napona $\sigma_\varphi = 4,097 \text{ dN/cm}^2$ nalazi se na sredini rezervoara.
- Kao što se iz rezultata vidi naponi od dejstva sop-



stvene težine imaju male vrednosti.

Sl.2. Dijagram membranskih napona σ_φ i σ_θ pri sopstvenoj težini sfernog rezervoara.

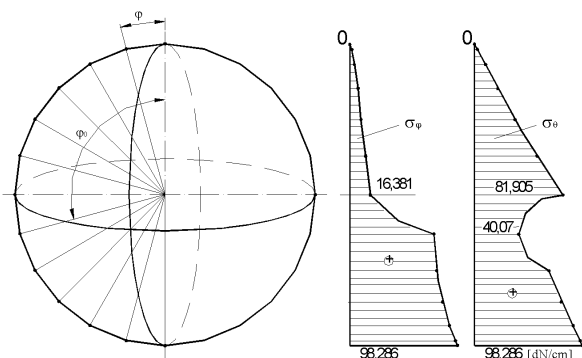
3.1.2. Membranski naponi od dejstva hidrostatičkog pritiska

Isključujući članove od pritiska gasa, sile po jedinici dužine preseka za pojedine uglove kao i naponi u tim preseccima dati su u tabeli 2.

Na osnovu table 2 i dijagrama napona na sl.3. vidi se uticaj oslanjanja na poremećaj membranskog stanja napona. U konkretnom slučaju taj poremećaj je uočljiv za vrednosti ugla φ između 90° i 105° . Najveća vrednost cirkularnog σ_θ i meridijanskog napona nalazi se u donjem temenu rezervoara i iznose $98,286 \text{ dN/cm}^2$.

Tabela 2

φ	N_φ	N_θ	σ_φ	σ_θ
0	dN/cm	dN/cm	dN/cm ²	dN/cm ²
0	0	0	0	0
15	2,333	7,07	0,833	2,525
30	8,996	27,88	3,213	9,957
45	18,997	61,637	6,784	22,013
60	30,578	107,023	10,921	38,222
75	40,985	162,985	14,637	58,209
90	45,867	229,335	16,381	81,905
105	234,216	112,216	83,649	40,077
120	244,624	198,757	87,365	70,984
135	256,205	213,564	91,5	76,273
150	266,205	247,321	95,073	88,329
165	272,892	268,131	97,461	95,761
180	275,202	275,202	98,286	98,286

Sl.3. Dijagrami napona σ_φ i σ_θ pri dejstvu hidrostatickog pritiska.

3.1.3. Membranski naponi od dejstva pritiska gasa

Obzirom da sile po jedinici dužine preseka ne zavise od ugla φ što se može videti iz obrasca

$$N_\varphi = N_\theta = \frac{R_r p_g}{2}$$

Veličine napona biće

$$\sigma_\varphi = \sigma_\theta = \frac{N_\varphi}{\delta}$$

3.1.4. Proračun membranskih napona od dejstva sopstvene težine, hidrostatickog pritiska i pritiska gasa

Sabirajući vrednosti napona za pojedine vrste opterećenja u odgovarajućim presecima dobijamo zbirne napone date tabelom 3.

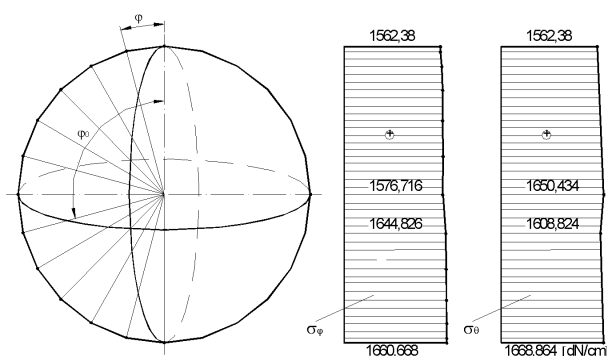
Tabela 3.

φ	σ_φ	σ_θ
0	dN/cm ²	dN/cm ²
0	1562,38	1562,38
15	1563,181	1565,083
30	1565,449	1573,037
45	1568,816	1585,949
60	1572,621	1603,337
75	1575,814	1624,835
90	1575,716	1650,434
105	1644,826	1608,824
120	1649,066	1640,196
135	1653,200	1646,002
150	1657,309	1658,505
165	1659,809	1666,235
180	1660,668	1668,864

Vrednosti napona date tabelom 3 i dijagrami napona prikazani na sl.4, ukazuju na poremećaj membranskog stanja napona u području oslanjanja $\varphi_0 = 105^\circ$. Takođe se uočava dominantni uticaj unutrašnjeg pritiska gasa koji izaziva daleko veće napone u poređenju sa naponima od hidrostatickog pritiska i sopstvene težine.

Treba napomenuti da u ranijim proračunima analitičke metode nisu mogle obuhvatiti uticaj savijanja pri dejstvu pritiska gasa u području oslanjanja.

Uticaj savijanja u ovom slučaju moguće je obuhvatiti jedino približnim metodama a veoma dobri rezultati su dobijeni primenom metode konačnih elemenata. Na sl. 4. dat je raspored meridijanskog σ_φ i cirkularnog napona σ_θ za uglove $\varphi=0-180^\circ$ sa podelom od 10° . Debljina zida ljske iznosi 2,8 cm a spoljni prečnik rezervoara je 526 cm. Pritisak gasa u ovom slučaju iznosi 16,7 dN/cm² i predstavlja radni pritisak rezervoara. Treba napomenuti da su ovakvi rezervoari pre upotrebe izloženi probnom ispitivanju pritiskom gasa od 25,7 dN/cm² u kom slučaju su imali veće vrednosti napona.

Sl. 4. Zbirni dijagram napona σ_φ i σ_θ

Kao što se sa sl. 4. vidi, za $\varphi = 0$ imamo iste vrednosti cirkularnog i meridijanskog napona a oba potiču samo od pritiska gasa. Idući dalje za $\varphi > 0$ do mesta oslanjanja $\varphi = 105^\circ$ imamo nešto veću vrednost meridijanskog napona upravo iz razloga ograničenog širenja u cirkularnom pravcu na mestu oslanjanja. Na kraju za $\varphi > 135^\circ$ gde uticaj oslanjanja opada imamo nešto veće vrednosti cirkularnog napona od meridijanskog.

3.2. Vertikalni atmosferski rezervoar zapremine $V = 3000 \text{ (m}^3\text{)}$

- R = 800 cm poluprečnik rezervoara
- H = 1447 cm visina punjenja tečnošću
- H1 = 199 cm visina prvog prstena
- $\delta = 0,9 \text{ cm}$ debljina lima omotača
- t = 1,0 cm debljina lima dna
- $\gamma = 0,0014 \text{ dN/cm}^2$ spec. težina tečnosti
- E = 2100 000 dN/cm²
- $\mu = 0,3$ Puasonov koeficijent
- R = 800 cm poluprečnik rezervoara
- H = 1447 cm visina punjenja tečnošću
- H1 = 199 cm visina prvog prstena
- λ - pomoćna veličina

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{R \cdot \delta}} \sqrt[4]{3(1 - \mu^2)} = \frac{1}{\sqrt{800 \cdot 0,9}} \cdot \sqrt[4]{3(1 - 0,3^2)} =$$

$$= 0,0372 \cdot 1,2854 = 0,0479 \text{ cm}^{-1}$$

-opterećenje dna

$$p = \gamma H = 0,0014 \cdot 1447 = 2,0258 \text{ dN/cm}^2$$

3.2.1. Vrednosti sila N_θ i napona σ_θ u pojedinim presecima

Za pojedine preseke a polazeći od dna prema vrhu rezervoara, vrednosti sila N_θ i napona σ_θ date su u Tabeli 4.

Tabela 4

x	N_θ	$\sigma_\theta = \frac{N_\theta}{\delta}$
cm	dN/cm	dN/cm ²
0	22,823	25,359
66	1615,421	1794,912
265	1323,834	1470,928
464	1100,96	1223,289
647	896	995,555
797	728	808,889
947	560	622,222
1097	392	435,555
1247	224	248,889
1397	56	62,222
1447	0	0

Na osnovu dobijenih vrednosti pokazanih u tabeli 4 dat je dijagram cirkularnog napona σ_θ u zadatim presecima na Sl. 6 a. Sa slike se vidi da se najveća vrednost cirkularnog napona nalazi nešto iznad spoja dno-omotač (u preseku $x = 66 \text{ cm}$) a ne u samom spoju. Objašnjenje leži u poremećaju membranskog stanja napona na mestu spoja koji sprečava širenje omotača. U slučaju da nema dna, omotač rezervoara bi se mogao nesmetano širiti pod dejstvom hidrostatičkog pritiska i imali bi membransko stanje napona.

3.2.2. Momenti M_x [dNcm/cm] u pojedinim presecima

Ukupni moment po jedinici dužine preseka biće jednak zbiru momenta od ivične sile i ivičnog momenta:

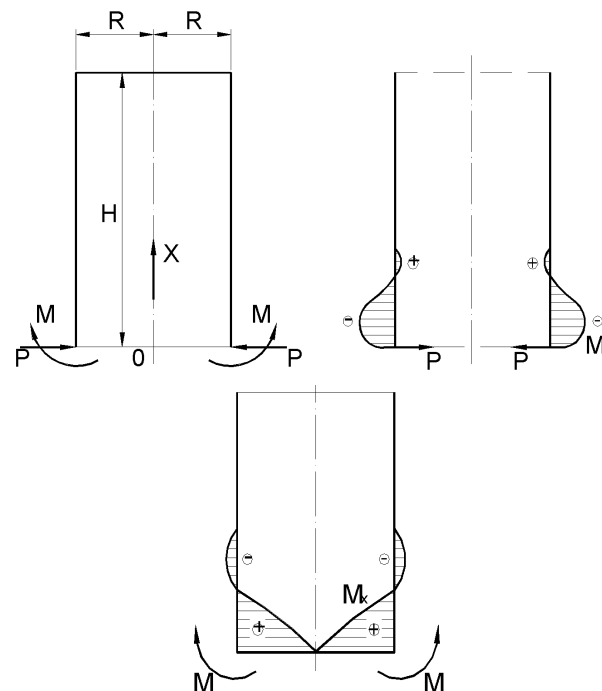
$$M_x = M_{xp} + M_x \quad (24)$$

$$M_{xp} = -\frac{P}{\lambda} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (25)$$

$$M_{xm} = M e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (26)$$

Zbog rotacione simetrije naponskog stanja imamo u ovom slučaju samo dva ivična opterećenja i to: opterećenje od ivičnih sila P i opterećenje od ivičnih momenata M ukupni moment u preseku M_x biće:

$$M_x = M e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) - \frac{P}{\lambda} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (27)$$

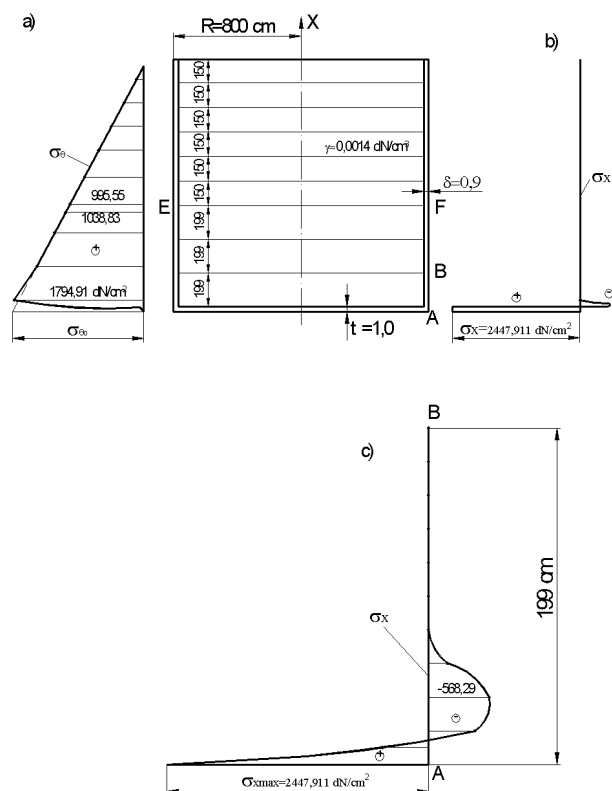


Sl. 5. Dejstvo sila i momenata na spoju dno – omotač

U tabeli 5 su date vrednosti momenta M_x za pojedine preseke kao i vrednosti napona u aksijalnom pravcu. Na osnovu vrednosti u tabeli 5 prikazani su dijagrami napona u aksijalnom pravcu na sl. 6 b, c. Sa sl.6 b je uočljivo da se najveća vrednost ovog napona nalazi na mestu uklještenja. Takođe se uočava promena znaka ovog napona i njegovo naglo opadanje. Karakteristika ovog napona savijanja je da se već u prvom prstenu rezervoara prigušuje i da se njegov uticaj dalje prema vrhu rezervoara može zanemariti.

Tabela 5.

x	M_x	$\sigma_x = \frac{6M_x}{\delta^2}$
cm	dNcm/cm	dN/cm ²
0	330,468	2447,911
10	57,338	424,722
20	-63,629	-471,324
40	-76,719	-568,29
60	-24,456	-181,152
80	0,484	3,582
100	8,87	65,704
120	1,614	11,952
140	0,15	1,11
160	-0,171	-1,266
180	-0,0977	-0,726
200	-0,0179	-0,132



Sl. 6. Dijagram cirkularnog i aksijalnog napona za vertikalni atmosferski rezervoar $V = 3000 \text{ (m}^3\text{)}$

ZAKLJUČAK

U radu je prikazan teorijsko numerički metod pri matematičkom modeliranju rezervoara za skladištenje fluida, na tipskim rezervoarima. Eksperimentalna verifikacija rezultata proračuna metodom konačnih elemenata (MKE) omogućila je optimizaciju konstrukcija rezervoara za skladištenje fluida.

Specifičnosti kojima se odlikuju pojedine grupe rezervoara za skladištenje fluida, tiču se pritiska i vrste fluida. U većini slučajeva skladištenje fluida zahteva od rezervoara strogo kontrolisane faze, projektovanja, izrade, inspekcije, eksploatacije i servisa pa će pokazanom metodom biti moguće izraditi kontrolne proračune familije rezervoara.

THEORETICAL NUMERICAL METHODS CALCULATION OF BALL AND CYLINDRICAL TANK STORAGE FLUID

Abstract : Theoretical and numerical calculation method was established based on the final form of the element of choice as a reliable element that will give the correct solution for any geometry of the shell. The main part is the formation of the model and its finite element stiffness matrix. To obtain membrane stiffness matrices used here are L-local coordinates, which is a most rational view of the integral process that followed. These coordinates are for simplex finite elements at the same time interpolation functions, which further speeds up the computer rešenje. Komputerski calculation required is to define, determine and enter the input data, ie the size of the geometric and mechanical character (the network of finite elements with nodes coordinates, displacement constraints, loads, etc.). This large and tedious job here is very original accelerated program to automatically generate the data.

Key words: vertical tank, the tank ball, finite element method (FEM), mathematical modeling, the network of finite elements, interpolation functions.

LITERATURA

- [1] R.Petrović, M.Kojić, D.Djordjević, Projektovanje rezervoara za skladištenje i transport fluida, Mašinski fakultet Kraljevo, 2005. god.
- [2] M.Kojić, R.Slavković, M.Živković, N.Grujović, Metod konačnih elemenata I, Mašinski fakultet Kragujevac 1998.
- [3] Slavkovic R., Zivkovic M. and Kojic M., (1994), 'Enhanced 8-node three-dimensional solid and 4-node shell elements with incompatible generalized displacements', Communications in Numerical Methods in Engineering, 10, 699-709.
- [4] Trajanović M., Pantović A., 'Modeliranje procesa istosmernog istiskivanja u hladnom stanju za analizu metodom konačnih elemenata', Časopis IMK-14 Istraživanje i razvoj, br.(16-17)1-2/03 str 61
- [5] Kolarević M, Pantelić T., Istraživanje metoda i postupaka za izradu delova pri razvoju inovaciji proizvoda teške mašingradnje, Časopis IMK-14 Istraživanje i razvoj, br. (8-9) 2-3/98 str 37-43
- [6] Vukićević M, Đurić S., Tehnologija primene plakiranih limova za izradu zavarenih konstrukcija, Časopis IMK-14 Istraživanje i razvoj, br.(12-13) 2001 str 55 - 61
- [7] Kojic S., Grujovic N. and Zivkovic M., (1994), 'Nonlinear analysis of joint behaviour under thermal and hydrostatic loads for an arch dam', Third benchmark workshop on Numerical analysis of dams, Paris, France.
- [8] Kojic M., Grujovic N., Slavkovic R. and Zivkovic M., (1994), 'Yield Criterion for a General Anisotropic Plasticity Model with Mixed Hardening', EU-ROMECH, 2nd European Solid Mechanics Conference, H20, Genoa, Italy.
- [9] Kojic M., Zivkovic M. and Kojic A., (1995), 'Elastic-Plastic analysis of orthotropic multilayered beam', Computers & Structures, 57, 205-211.