

# NAPREDNO MODELIRANJE I ANALIZA SLOJEVITIH KOMPOZITNIH KONSTRUKCIJA NA PRIMERU REZERVOARA $V=100 \text{ m}^3$

UDK : 628.1'18:678.674  
004.388:519.673

Todor Vacev<sup>1</sup>, Miloš Milić<sup>2</sup>, Stepa Paunović<sup>2</sup>, Ivan Nešović<sup>2</sup>, Andrija Zorić<sup>3</sup>

**Rezime:** Napredak hemijske, građevinske i mašinske industrije u XX veku je omogućio projektovanje i izradu konstrukcija od različitih materijala poboljšanih karakteristika. Kao najbolji materijali za upotrebu u agresivnim sredinama pokazali su se kompoziti. Kompoziti su materijali sastavljeni od dve ili više komponenti. Shodno tome, oni zadržavaju dobre, ali i loše osobine, materijala od kojih se sastoje. Najširu primenu za izradu rezervoara za tečnosti i gasove ima poliester. U radu je prikazana analiza horizontalnog cilindričnog rezervoara za vodu sa torosferičnim dancima, izrađenog od poliester, naprednim numeričkim metodama zasnovanim na Metodi konačnih elemenata (MKE), uz primenu savremenih inženjerskih softvera.

**Ključne reči:** kompozitni materijal, poliester, rezervoar za vodu, MKE

**Summary:** The progress of the chemical, construction and mechanical industries in the 20th century has enabled the design and construction of structures from various materials of improved characteristics. The best materials for use in aggressive environment are composites. Composites are materials made of two or more components. Accordingly, they retain the good, but also the bad properties of the materials they contain. The widest use of polyester is for production of tanks for liquids and gases. This paper presents an analysis of a horizontal cylindrical water tank with torispherical head covers, made of polyester, using advanced numerical methods based on the Finite Element Method (FEM), and applying contemporary engineering software.

**Keywords:** composite material, polyester, water tank, FEM

## 1 UVOD

Poliester koji se primenjuje u konstrukterstvu je materijal koji je sastavljen od poliesterske smole kao veziva, i staklenih vlakana kao armature. Dodavanjem punilaca se može proizvoditi materijal određenih karakteristika za različite namene. Poliester je otporan na veliki broj neorganskih i organskih jedinjenja, a takođe i postojan na temperaturama od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+120^{\circ}\text{C}$  [1], što ga čini materijalom koji se može koristiti za izradu velikog broja konstrukcija. Prvi put je poliester dobijen sintezom 1941. godine u Engleskoj,

a pored najlona je bio novi materijal za vojnu industiju koji je našao primenu u izradi konstrukcija koje bi trebalo da budu lagane i izdržljive. Dodavanjem staklenih vlakana i finog peska i mešanjem sa poliesterskim vezivom, u slojevima određene debljine, dobija se armirani poliester. Armirani poliester ima specifičnu težinu od 1,5 do 1,8  $\text{g}/\text{cm}^3$ , postojan je, a starenje neznatno utiče na fizičke i mehaničke osobine proizvoda izrađenih od ove vrste materijala [1]. Umesto staklenih vlakana se mogu dodati i vlakna od drugih materijala. Postoje i pokušaji da se kao armatura upotrebe i kokosova vlakna čime bi se poliester učinio više ekološkim [2].

<sup>1</sup> Vanredni profesor, dr, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš

<sup>2</sup> Mast. inž. građ, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš

<sup>3</sup> Asistent, mast. inž. građ, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš

Područje primene armiranog poliestera je veoma široko. Od njega se mogu napraviti: skladišni rezervoari (horizontalni i vertikalni), kade za galvanizaciju, cevi, posude, silosi. Zbog toga što ne otpušta štetne materije u vodu, može se upotrebiti i za otvorene rezervoare u kojima se uzgaja riba [3]. Ukoliko je potrebno, može se izvršiti oblaganje konstrukcija poliestrom u svrhu povećanja hemijske otpornosti ili mehaničke čvrstoće.

Najveći deo poliesterskog kompozita se proizvodi kontinualnim postupkom namotavanja. Pored toga, postoje i drugi postupci (diskontinualni postupak namotavanja, ručna izrada), ali njihova primena zahteva više uloženog rada i finansijskih sredstava. Kontinualnim postupkom namotavanja se polimerizacija odvija pod uticajem toplote sa induktivno zagrejanog čeličnog jezgra i infracrvenim zračenjem sa spoljne strane, kao i oslobađanjem toplote zbog toga što je reakcija egzotermna (Sl. 1).



Slika 1 – Kontinualni postupak namotavanja [4]

Tabela 1 – Struktura zida cevi [4]

Sloj	Konstrukcija	Svrha
Unutrašnji	„C“ staklo	Zaštita
Granični	Seckano stakleno vlakno	Zaštita
Unutrašnji strukturni	Kontinualno i seckano stakleno vlakno	Strukturno ojačanje
Jezgro	Si pesak, seckano i kontinualno stakleno vlakno	Izdržljivo tvrdo jezgro
Spoljašnji strukturni	Kontinualno i seckano stakleno vlakno	Strukturno ojačanje
Spoljašnji	„C“ staklo	Zaštita

Izrada cevi je od unutrašnje strane prema spoljašnjoj, čime se omogućava jednak unutrašnji prečnik i optimalna hidraulička svojstva [4]. Ovakvim postupkom se mogu proizvesti cevi prečnika ne većeg od 2400 mm, iz razloga što bi za veće prečnike bila

otežano upravljanje potrebnim alatima. Proizvodnja cevi počinje tako što se na valjak namotava zaštitna folija. Preko zaštitne folije se nanosi poliesterska smola, a nakon toga seckana staklena vlakna i kontinualna staklena vlakna (roving).

Osim cevi kao završnog proizvoda, mogu se izraditi elementi u koje se cevi ugrađuju kao poluproizvodi. Tako se, sečenjem cevi pod uglom i njihovim spajanjem dobijaju fazonski komadi, krivine proizvoljnog skretnog ugla i poluprečnika, račve i dr. Ukoliko se cev sa jedne ili obeju strana zatvori, može se u krajnjem izraditi rezervoar ili silos.



Slika 2 – Krivina od poliesterskih cevi [5]

Rezervoari se izrađuju od armiranog poliestera, a njihova namena je skladištenje i transport tečnosti u prehrambenoj i hemijskoj industriji. Ukoliko je potrebno održavanje temperature tečnosti, mogu se izolovati poliuretanskom termoizolacijom. Rezervoari mogu biti sastavljeni od više segmenata, a najčešće se sastoje od cilindričnog segmenta i završnih elemenata (danceta). Na potrebnim mestima postoje otvori u obliku cevni priključaka za punjenje, pražnjenje ili ventilaciju, u zavisnosti od namene. S obzirom da je unutrašnja površina rezervoara od armiranog poliestera veoma glatka, ona ne dopušta bilo kakvo nagomilavanje materija (taloga ili kamenca) [4].



Slika 3 – Horizontalni rezervoar od poliestera [1]

## 2 KLASIČNE METODE PRORAČUNA I REGULATIVA

Sa pojavom poliesterskih kompozita u građevinskoj i mašinskoj tehnici, došlo je do potrebe za izdavanjem standarda u toj oblasti. U našoj zemlji ne postoje standardi koji uređuju projektovanje i izvođenje konstrukcija od poliestera, tako da se za tu svrhu koriste standardi drugih zemalja [6, 7, 8]. Primenjeni postupak u radu se oslanja na evropske propise [7], koji definišu proračun rezervoara klasičnim metodama. Klasični proračun se sastoji u dokazu da je nosivost konstrukcije veća od uticaja koji se u njoj javljaju.

Za početak je potrebno utvrditi broj lamela i njihovu debljinu. Debljina određene lamele se određuje u zavisnosti od procenta stakla u sloju i gustine stakla i primenjenog veziva. Debljina se određuje pomoću izraza:

$$t_i = [1/\rho_g + (100 - m_g)/(m_g \times \rho_r)] \times 10^{-3} \quad (1)$$

gde je:

- $t_i$  debljina  $i$ -te lamele u  $mm$ ,
- $m_g$  procenat stakla po masi u  $i$ -tom sloju,
- $\rho_r$  gustina vezivnog materijala u  $i$ -tom sloju,
- $\rho_g$  gustina stakla u  $i$ -tom sloju.

Osim debljine pojedinih lamela, Standard [7] propisuje da ukupna debljina laminata ne bi trebalo da bude manja od  $3\text{ mm}$ . Takođe, laminat treba da bude simetričan u odnosu na srednju ravan, a preklapanje slojeva ne sme biti veće od  $1/6$  debljine pojedine lamele.

Proračun armiranog poliestera se zasniva na posmatranju dilatacije usled dejstva opterećenja, za razliku od čeličnih, drvenih i betonskih konstrukcija, koje se u građevinarstvu najčešće primenjuju, a gde se posmatraju naponi. Dilatacije se ograničavaju na vrednost:

$$\varepsilon_{ar} = 0,1 \times \varepsilon_R \quad (2)$$

gde je:

- $\varepsilon_R$  dilatacija pri lomu vezivne materije bez ojačanja vlaknima.

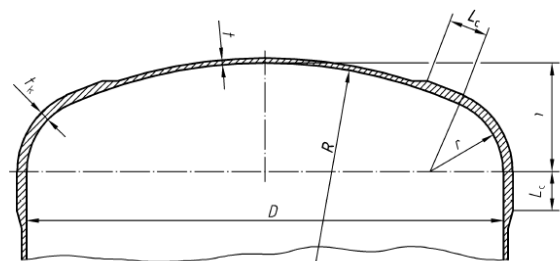
Razlog zbog koga se uvodi ovo ograničenje je što se materijali koji čine kompozit različito ponašaju pri opterećenju. Vezivni materijal može da dostigne svoju graničnu nosivost pri manjoj dilataciji od staklenih vlakana. To znači da pri preopterećenju vezivo puca, i staklena vlakna preuzimaju ulogu u nošenju. Kompozit se raspada, što dovodi do konačnog loma konstrukcije.

S obzirom na to da se radi o konstrukcijama koje imaju malu debljinu, potrebno je voditi računa i o stabilnosti. Standard [7] uzima u obzir i taj slučaj.

## 3 NAPREDNO MODELIRANJE I ANALIZA

Napredna analiza kompozitnih, kao i drugih konstrukcija, zasniva se na primeni MKE i savremenih softvera koji omogućavaju uključivanje geometrijske i materijalne nelinearnosti i upotrebu kompleksnih materijalnih modela u koje spadaju i kompoziti. Složeni proračun, zasnovan na teoriji ljuski i kompozita se uspešno može zameniti naprednom metodologijom, što će ovde biti pokazano na primeru horizontalnog cilindričnog rezervoara za vodu zapremine  $V=100\text{ m}^3$ , koji se često nalazi kao standardni proizvod kod mnogih proizvođača.

Cilindrični oblik rezervoara je izbor koji proističe iz tehnoloških mogućnosti, jer se može izraditi kontinualnim namotavanjem. Završni elementi cilindra, tzv. danca, se mogu izraditi kao ravna, sferična, ili torosferičnog oblika, Sl. 4 [7]. Cilindrična ljuska, kao deo konstrukcije kritičan u pogledu naprezanja i stabilnosti, obično se ukružuje prstenovima, koji su takođe izrađeni od poliestera. Umesto njih se mogu primeniti i metalna ojačanja, ali uz utapanje metalnih delova u kompozitni materijal zbog otpornosti na delovanje agresivnih supstanci.



Slika 4 – Detalj torosferičnog danca [7]

Detaljne preporuke za dimenzije konstruktivnih detalja koje treba usvojiti date su u Standardu [7]. Zadebljanja zidova (Sl. 4) se izvode radi ostvarivanja spoja danca i cilindra. Spajanje se izvodi sučeonim lepljenjem danca za cilindrični deo rezervoara uz dodatno lepljenje materijala sa spoljašnje strane, kao ojačanje.

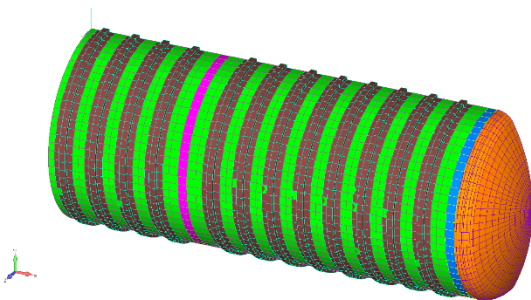
## 4 STATIČKA ANALIZA REZERVOARA

Zbog simetrije konstrukcije i opterećenja analizirana je  $1/4$  konstrukcije. U ravnima simetrije su zadati granični uslovi da su pomeranja izvan ravni i rotacije u

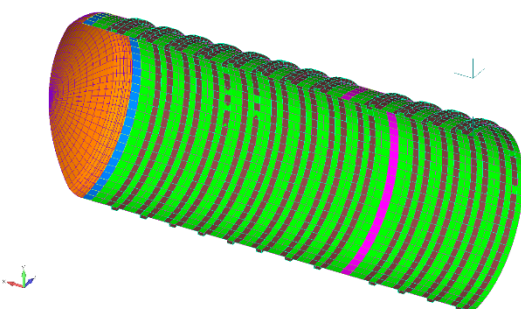
ravnima sprečena.. Kao primer je usvojen rezervoar ukopan u tlo, te je na osnovu toga pretpostavljeno oslanjanje konstrukcije na sloju peska, sa radijalnim uglom od  $170^\circ$  (donja polovina rezervoara). Analizirani su sledeći slučajevi opterećenja:

- Sopstvena težina rezervoara (G) + hidrostatički pritisak - voda do 100 % visine preseka (pw)
- Sopstvena težina rezervoara (G) + pritisak tla - nadsloj HN=1.00 m (pz)
- Sopstvena težina rezervoara (G) + hidrostatički pritisak (voda do 100 % visine preseka) (pw) + pritisak tla - nadsloj HN=1.00 m (pz)

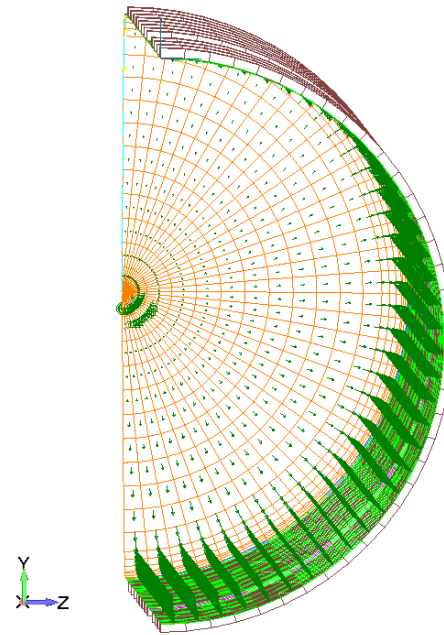
Modeliranje slojeva u softveru [9] je ostvareno u skladu sa tehnologijom izrade koju proizvođači već standardno primenjuju, a cilj analize je provera nosivosti i ekonomičnosti konstrukcije.



Slika 5 – Model konstrukcije (izgled spolja)



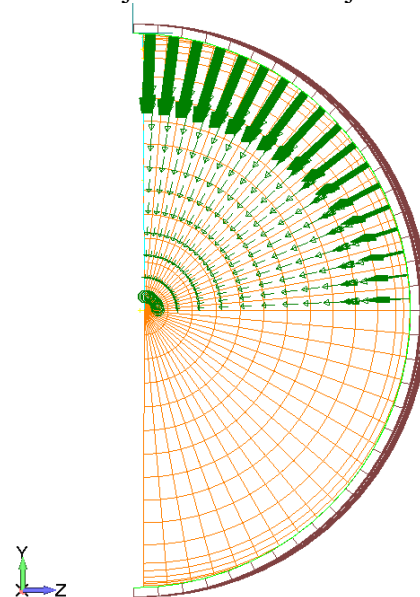
Slika 6 – Model konstrukcije (izgled iznutra)



Slika 7 – Detalj hidrostatičkog opterećenja

Za opterećenje od tla postoji više teorija i metoda, i sve tretiraju problem veoma pojednostavljeno. Za ovu analizu primenjen je postupak za opterećenje zidova bunkera koji su pod određenim uglom u odnosu na horizontalu. Ovde se taj ugao menja od  $0^\circ$  (teme rezervoara) do  $90^\circ$  (1/2 visine rezervoara). Metoda je data i u Evrokodu za bunke i silose [10].

Analiza je u ovom koraku urađena kao geometrijski linearna, i treba da posluži za globalnu ocenu ponašanja konstrukcije i eventualnu potrebu za analizom stabilnosti ljuske na izbočavanje.



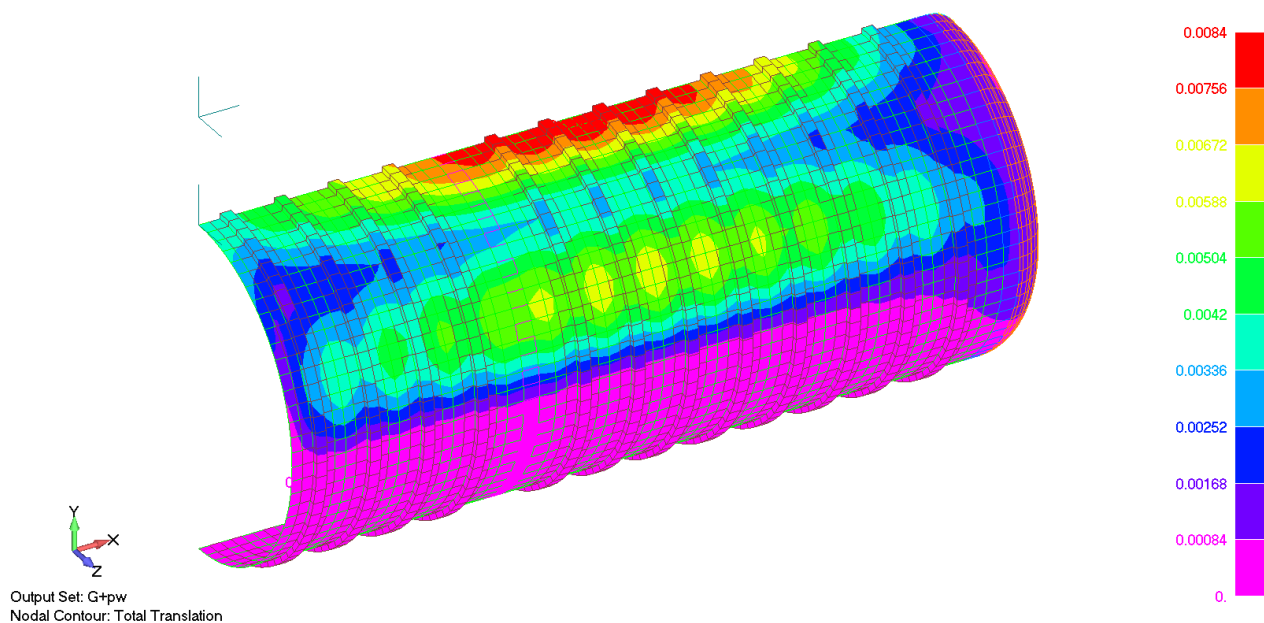
Slika 8 – Detalj opterećenja od tla

Karakteristični izlazni rezultati analize su dati kao konturni prikazi. (Sl. 9-17). Prikazana su totalna pomeranja konstrukcije i ekvivalentne dilatacije, i to za merodavne slučajeve opterećenja koji se javljaju kod ukopanih rezervoara. Posebno su prikazani i detalji danca kao potencijalna mesta eventualne optimizacije.

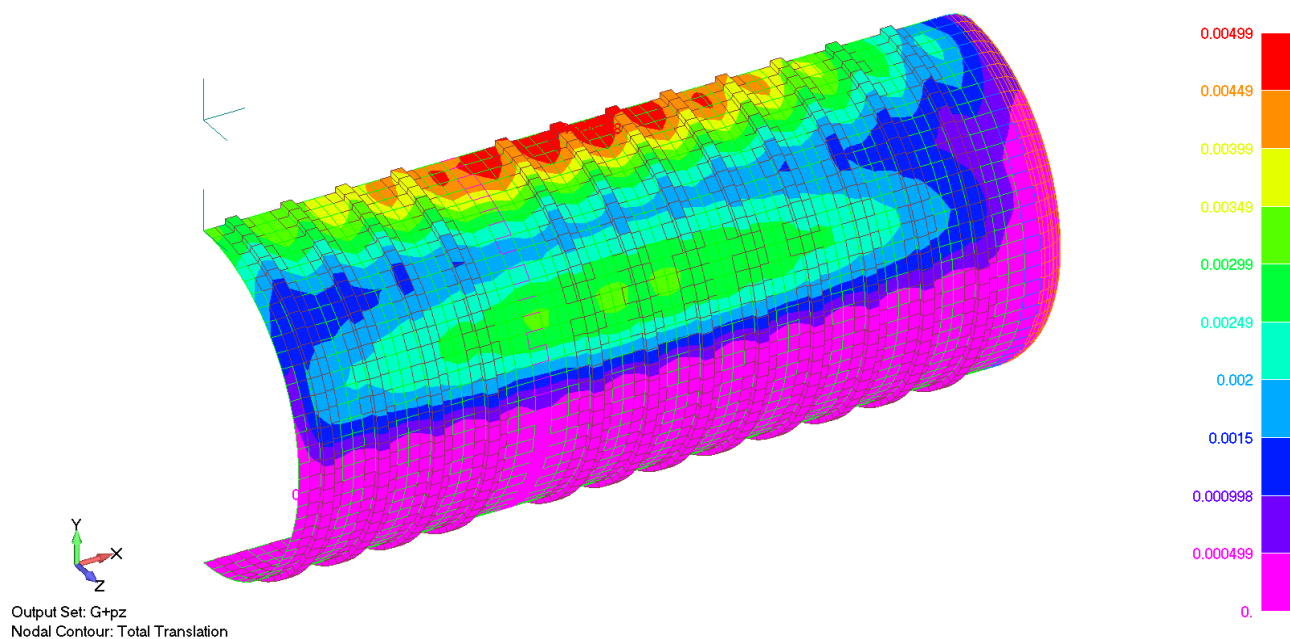
Kao osnovni kriterijum za ocenu nosivosti, shodno Standardu [7], usvojene su ekvivalentne dilatacije. Pitanje ukupnih pomeranja konstrukcije nije definisano

kao kriterijum ocene konstrukcije u pomenutom standardu, ali je ovde ipak dato kao uporedna ilustracija ponašanja konstrukcije za različite konstelacije opterećenja.

Zapažanja o dobijenim rezultatima i celokupnoj analizi data su u zaključcima rada.

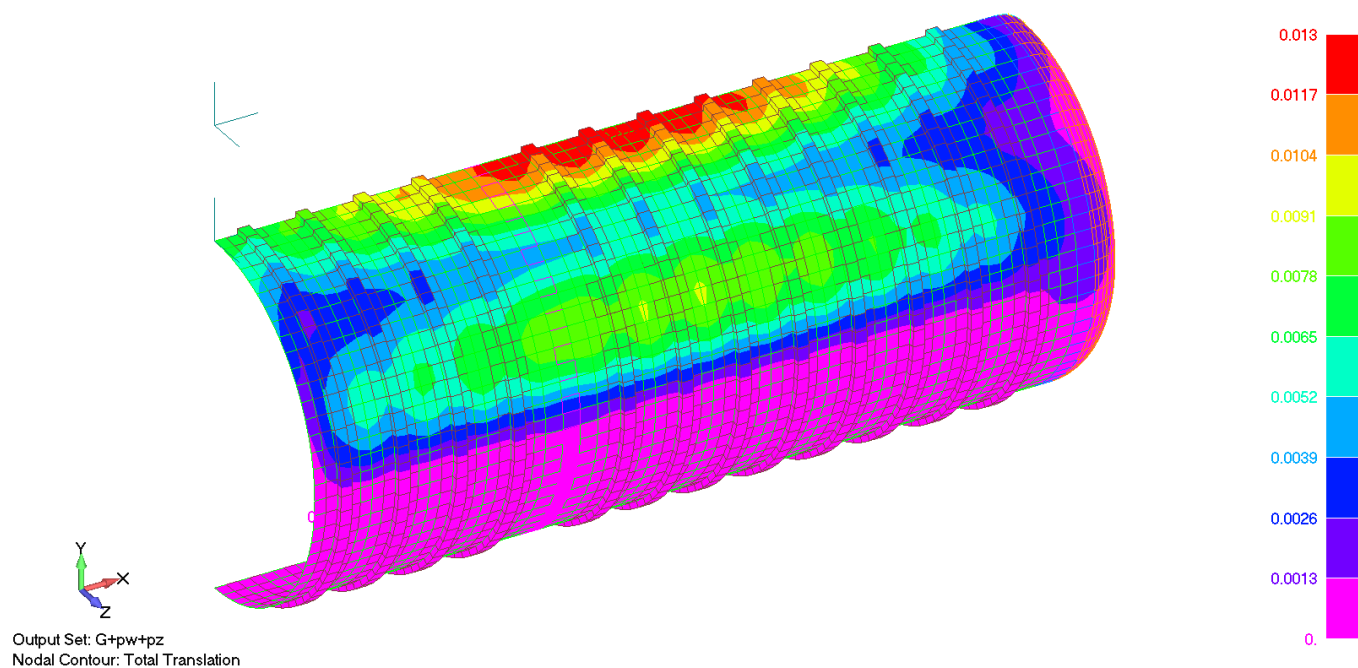


*Slika 9 – Opterećenje: G+pw. Totalne deformacije. Max. vrednost: 8.4 mm*

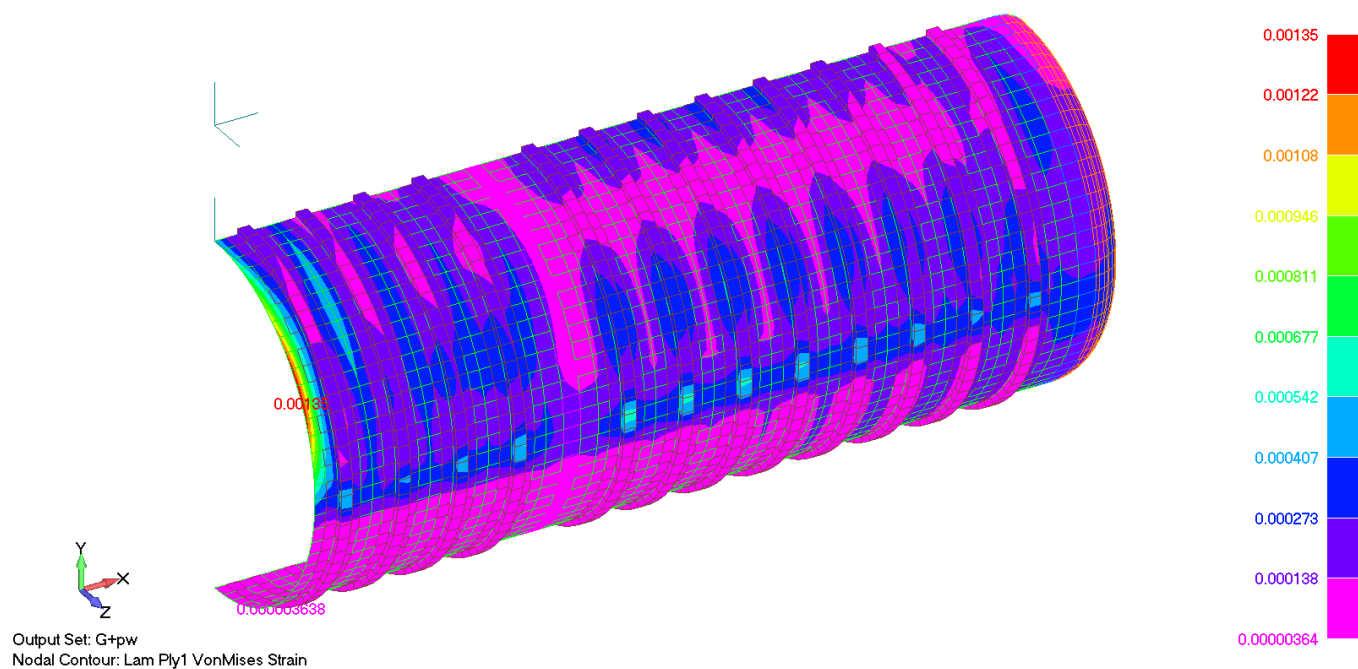


*Slika 10 – Opterećenje: G+pz. Totalne deformacije. Max. vrednost: 5.0 mm*

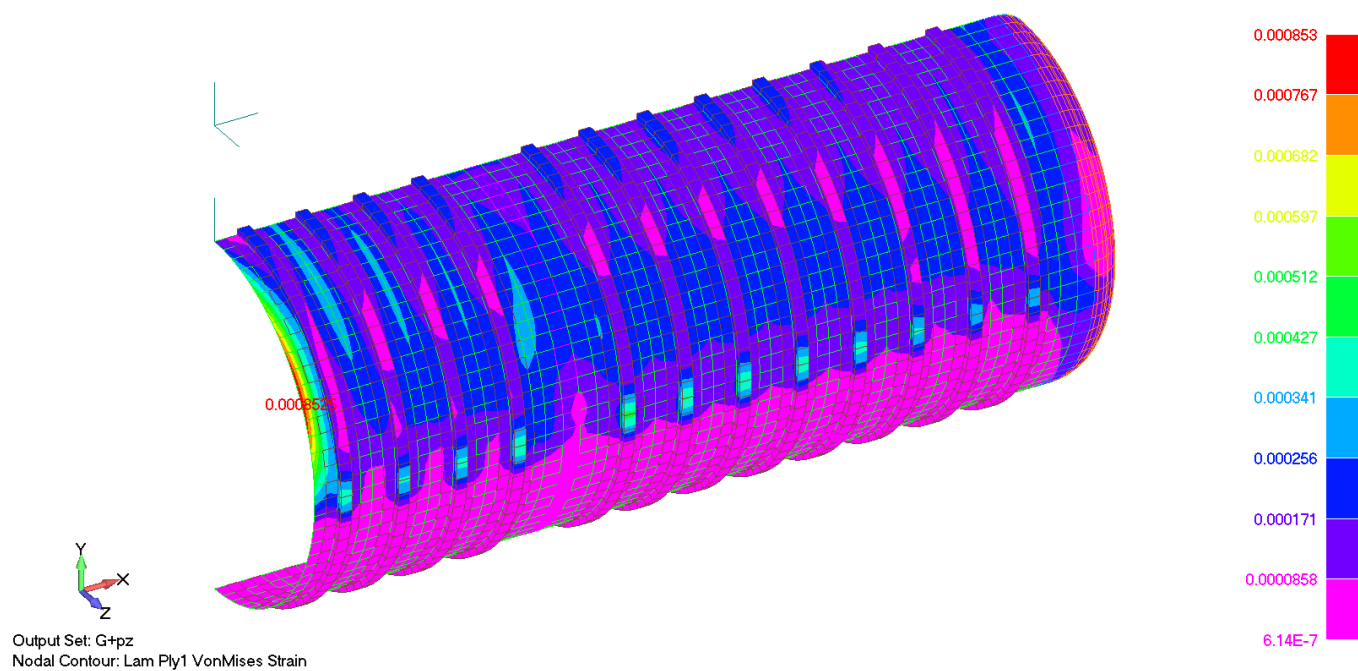




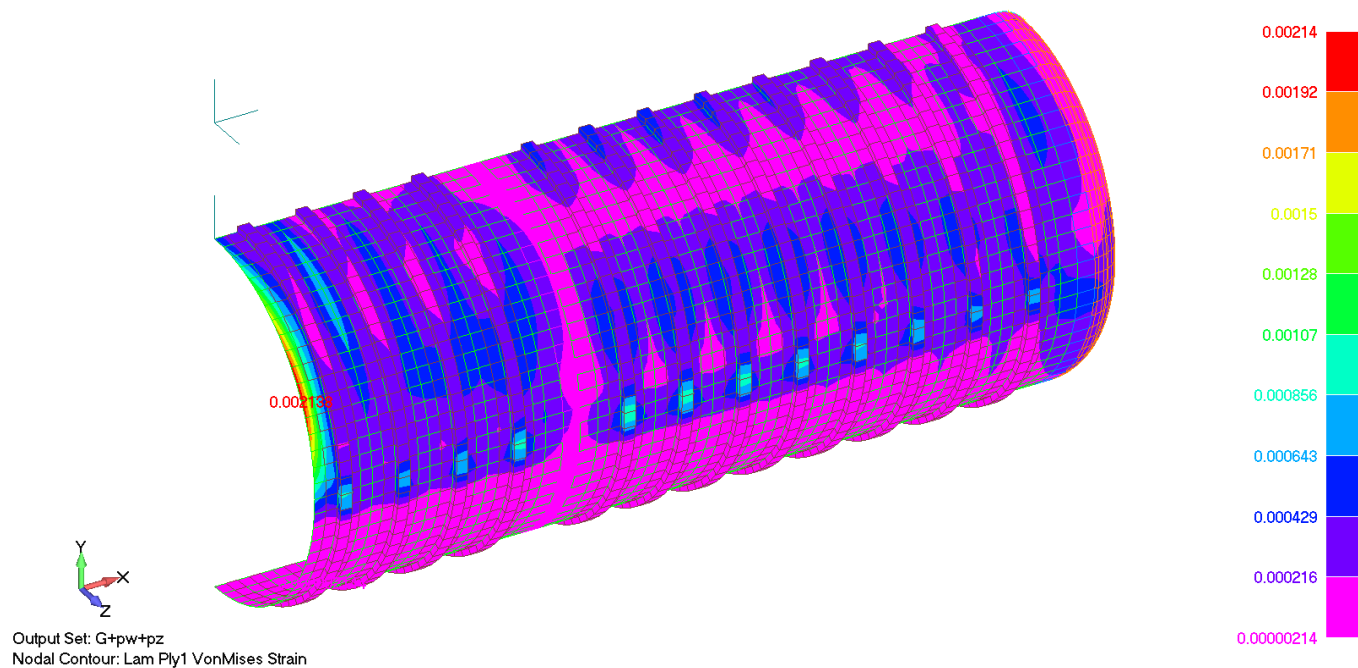
Slika 11 – Opterećenje: G+pw+pz. Totalne deformacije. Max. vrednost: 13 mm



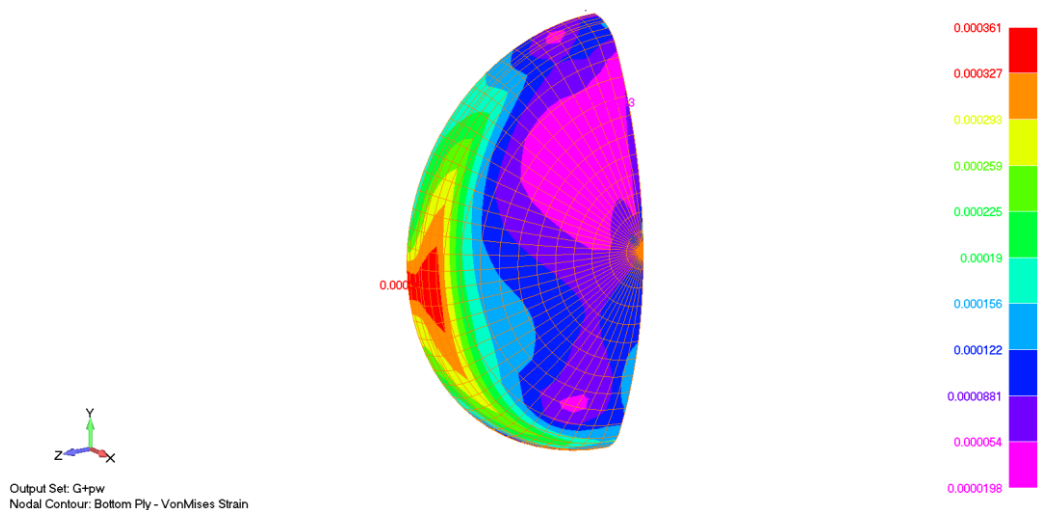
Slika 12 – Opterećenje: G+pw. Ekvivalentne dilatacije. Max. vrednost: 0.135 %



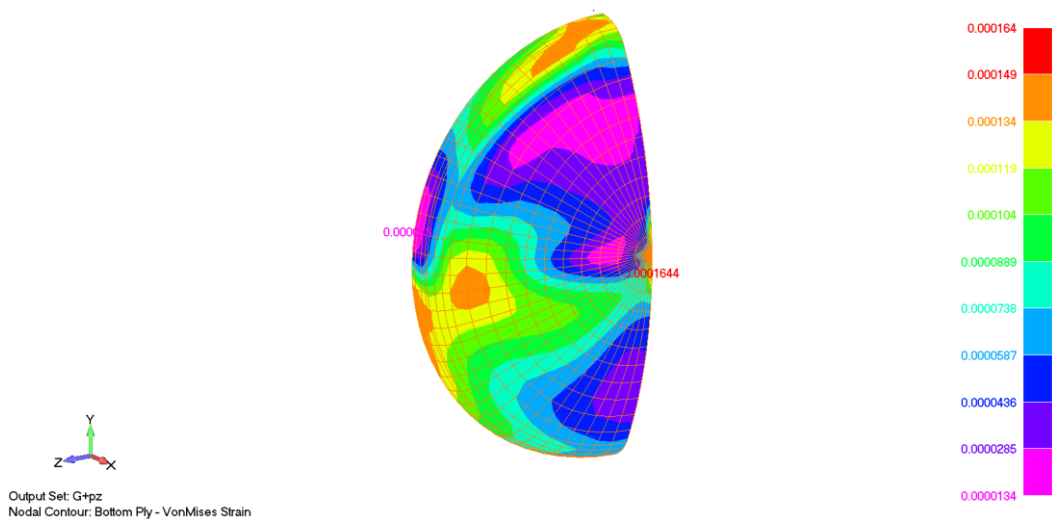
Slika 13 – Opterećenje: G+pz. Ekvivalentne dilatacije. Max. vrednost: 0.085 %



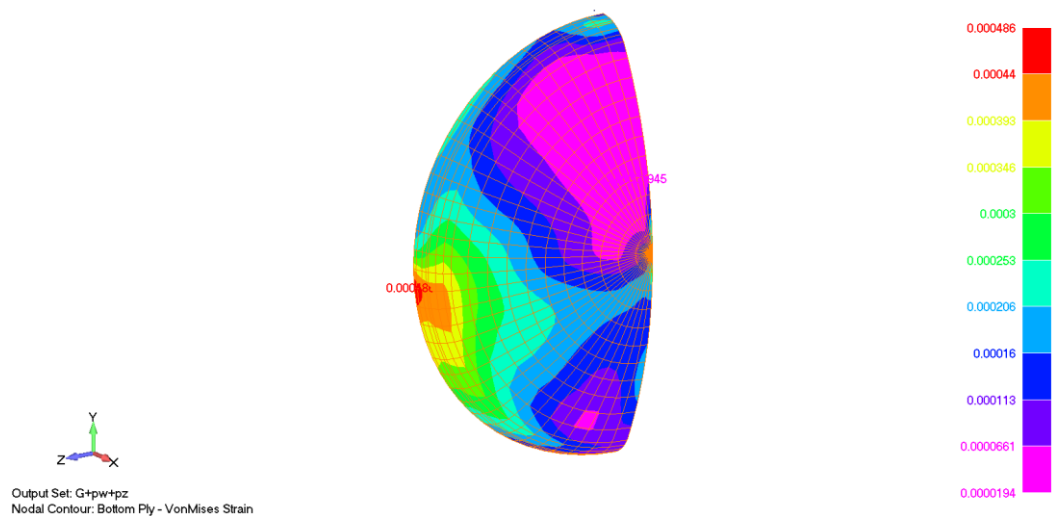
Slika 14 – Opterećenje: G+pw+pz. Ekvivalentne dilatacije. Max. vrednost: 0.214 %



Slika 15 – Opterećenje: G+pw. Detalj danca. Ekvivalentne dilatacije. Max. vrednost: 0.0361 %



Slika 16 – Opterećenje: G+pz. Detalj danca. Ekvivalentne dilatacije. Max. vrednost: 0.0164 %



Slika 17 – Opterećenje: G+pw+pz. Detalj danca. Ekvivalentne dilatacije. Max. vrednost: 0.0486 %



## 5 ZAKLJUČCI

Modeliranje prikazane konstrukcije je zapravo sinteza proizvodne tehnologije, merodavnih standarda i metodologije date u primenjenom softveru. Na relativno skromnom primeru, koji nije uključivao sve funkcionalne detalje konstrukcije (revizioni otvori, priključci za punjenje, pražnjenje i ventilaciju), pokazano je da napredno modeliranje i analiza mogu do detalja prikazati raspodelu deformacija, dilatacija, i drugih uticaja.

Očigledno je da je kombinacija opterećenja  $G+pw+pz$  kritična i po pitanju pomeranja i po pitanju dilatacija. Ovo je očekivano, jer se u tom slučaju superponiraju veliki hidrostatički pritisci iznutra pri dnu rezervoara sa velikim pritiscima spolja u temenu od nadsloja zemlje.

Pomeranja konstrukcije, iako van regulativnih kriterijuma, se mogu smatrati relativno malim i prihvatljivim za ovu vrstu konstrukcije. Dobijene dilatacije su ispod vrednosti dopuštenih standardima, što znači da je konstrukcija zadovoljavajuće nosivosti. Detalji danca pokazuju da su ove vrednosti veoma neiskorišćene, tako da postoji mogućnost optimizacije konstrukcije, tj. smanjenje debljine. Takođe bi se potencijalno mogao smanjiti broj rebara za ukrucenje, ali ovo umnogome zavisi od slučaja ugradnje, tj. oslanjanja.

Dalje analize bi svakako uključivale modeliranje otvora, proširenje analize do nelinearnog domena, i analizu optimizacije. Takođe se u skladu sa raspoloživom tehnologijom izrade može optimizovati i izrada spojeva, odnosno ojačanja koje Standard [7] preporučuje.

## LITERATURA

- [1] [tehnikakb.rs/srl/proizvodi/](http://tehnikakb.rs/srl/proizvodi/)
- [2] *Suitability of using coir fiber/polymeric composite for the design of liquid storage tanks*, Yousif, Belal, Yousif, B. F., Ku, H., *Materials & Design*, 2012, Oxford, UK, str. 847-853
- [3] *Construction of Fiberglass Water Tanks*, Kenneth, M., *The Progressive Fish-Culturist*, vol. 26, 2011, str. 91-92
- [4] [poliesterprijboj.com/cevi-tehnologije](http://poliesterprijboj.com/cevi-tehnologije)
- [5] [dubaipipes.com/general.html](http://dubaipipes.com/general.html)
- [6] *Design recommendation for storage tanks and their supports with emphasis on seismic design*, Architectural Institute of Japan, 2010, Tokio, Japan
- [7] *EN 13121-3:2008+A1 - GRP tanks and vessels for use above ground - Part 3: Design and workmanship*, European Committee for Standardization, 2010, Brisel, Belgija
- [8] *BS 4994(1987) - Specification for the design and construction of vessels and storage tanks in reinforced plastics*
- [9] FEMAP-NX NASTRAN – Software Manual
- [10] *BS EN 1993-4-1:2007 – Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-1: Silos*, British Standards Institution, 2007, London, UK