

Primljen / Received: 8.4.2015.

Ispravljen / Corrected: 16.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 15.4.2016.

Dostupno online / Available online: 10.11.2016.

Prostorna nelinearna numerička analiza podzemnih čeličnih cjevovoda uslijed pomaka rasjeda

Autori:



Doc.dr.sc. **Ercan Serif Kaya**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Alanya Alaaddin Keykubat, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
ercan.kaya@alanya.edu.tr



Izv.prof.dr.sc. **Eren Uckan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Bogazici, Turska
Kandilli ppservatorij i institut za potresna
istraživanja (KOERI)
eren.uckan@boun.edu.tr



Doc.dr.sc. **Ferit Cakir**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Yildiz, Turska
Kalifornijsko Sveučilište Berkeley
ferit.cakir@amasya.edu.tr



Prof.dr.sc. **Bulent Akbas**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Gebze
Zavod potres i konstrukcije
akbasb@gtu.edu.tr

Stručni rad

Ercan Serif Kaya, Eren Uckan, Ferit Cakir, Bulent Akbas

Prostorna nelinearna numerička analiza podzemnih čeličnih cjevovoda uslijed pomaka rasjeda

U ovom se radu prikazuje trodimenzionalni nelinearni model interakcije između tla i cijevi, koji se koristi za proračun odziva čeličnih cijevi prilikom pomaka pružnih rasjeda. Za određivanje seizmičkog odziva čeličnih cijevi visoke čvrstoće i raznih uvjeta okolnog tla, te za proračun odnosa promjera i debljine, (D/t) korišten je računalni program ABAQUS. Cijev X65 koja se odlikuje relativno niskom čvrstoćom, te cijevi visoke čvrstoće tipa X70 i X80, koje odgovaraju cijevima L450, L485 i L555 prema europskoj klasifikaciji, analiziraju se za razne promjere i debljine cijevi.

Ključne riječi:

podzemne čelične cijevi, prijelazi preko rasjeda, cjevovodi, cijevi velikog promjera, transportni sustavi

Professional paper

Ercan Serif Kaya, Eren Uckan, Ferit Cakir, Bulent Akbas

A 3D nonlinear numerical analysis of buried steel pipes at strike-slip fault crossings

A 3D nonlinear soil-pipe interaction model is presented in this study to calculate the response of steel pipes subjected to strike-slip fault displacements. The general-purpose finite element analysis program ABAQUS is used to determine the seismic response of high strength steel pipes, as well as for various surrounding soil conditions and diameter to thickness, D/t, ratios. Relatively low strength pipes X65, and high strength pipes X70 and X80, which correspond to European pipes L450, L485 and L555, respectively, have been studied for various pipe diameters and thicknesses.

Ključne riječi:

buried steel pipes, fault crossings, pipelines, large-diameter pipes, transmitting systems

Fachbericht

Ercan Serif Kaya, Eren Uckan, Ferit Cakir, Bulent Akbas

Dreidimensionale numerische Analyse unterirdischer Stahlrohre an Blattverschiebungen

In dieser Arbeit wird ein dreidimensionales nichtlineares Modell der Interaktion zwischen Boden und Rohr dargestellt, das für die Berechnung des Verhaltens von Stahlrohren bei Blattverschiebungen angewandt wird. Um die seismische Antwort von hochfesten Stahlrohren und durch die Umgebung entstehende Randbedingungen, sowie das Verhältnis von Durchmesser und Stärke D/t zu ermitteln, wird das Programm für Finite-Elemente-Analysen ABAQUS angewendet. Das Rohr X65, dem eine relativ kleine Festigkeit entspricht, sowie die Rohre X70 und X80, die gemäss europäischer Klassifikation den Typen L450, L485 und L555 entsprechen, werden für verschiedene Durchmesser und Rohrstärken analysiert.

Ključne riječi:

unterirdische Stahlrohre, Übergänge von Verwerfungen, Rohrleitungen, Rohre großen Durchmessers, Transportsysteme

1. Uvod

Podzemne čelične cijevi često se u industriji nafte i plina koriste za transport ugljikovodičnih proizvoda od samog polazišta pa sve do raznih destinacija. Za takve kvalitetne cjevovode najveće su opasnosti: a) nagle i b) prostorno varijabilne trajne deformacije tla (eng. *permanent ground deformations* - PGD). Do naglih trajnih deformacija tla dolazi zbog pomicanja rasjeda. Smatra se da je to jedan od najznačajnijih ekstremnih utjecaja na podzemne cijevi jer cijevi u ograničenoj zoni trebaju izdržati izuzetno visoke vrijednosti pomaka. U takvim slučajevima osne deformacije u cijevima mogu doseći visoke vrijednosti zbog kombiniranog utjecaja sila savijanja i osnih deformacija.

Raniji potresi (potres Kocaeli, 1999., Turska, potres Chi-Chi, 1999., Tajvan) upozorili su na činjenicu da deformacije cijevi koje prolaze kroz aktivne rasjede mogu biti izuzetno velike zbog pomaka rasjeda u odnosu na os cijevi [1]. Kada na kontinuiranu cijev utječe trajna deformacija tla zbog loma rasjeda, tada uzrok oštećenja ovisi o vrsti rasjeda, materijalu i geometrijskim svojstvima cijevi. Cijevi s visokim omjerom D/t (a to je omjer promjera i debljine cijevi) obično su osjetljivije od onih s niskim omjerom D/t [2, 3]. Jedan od najbolje dokumentiranih primjera odziva podzemne kontinuirane cijevi na pomak rasjeda vjerojatno je cjevovod Thames Water na koji je djelovao potres koji je 1999. godine zadesio Izmit (Turska) [4, 5]. Radi se o čeličnom zavarenom vodovodu, cijevi promjera 2,2 m, s omjerom $D/t = 122$, koji prelazi dio sjevernog anatolijskog rasjeda poznatog kao Sapanca i to pod kutom od $\beta = 125^\circ$ u Kullaru u jugoistočnom Izmitu, u području Kocaeli u Turskoj (slika 1.). Na taj je vodovod djelovao desni bočni rasjed koji se pomaknuo za 2,45 m. Pomak rasjeda uzrokovao je pojavu znatnijeg boranja i manjeg izbočivanja cijevi na tri različite lokacije duž trase cjevovoda. Granična stanja podzemnih čeličnih cijevi su:

- maksimalna vlačna deformacija
- lokalno izbočivanje zbog osne tlačne deformacije (kritična deformacija izbočivanja)
- izobličenje (distorzija) poprečnog presjeka cjevovoda
- pucanje stijenke cijevi [2].



Slika 1. Detalj cijevi s borama u Kullaru, u Izmiru, oštećene tijekom potresa Kocaeli (1999.)

Veličina deformacije ovisi o vrsti i orijentaciji rasjeda u odnosu na os cijevi, o geometrijskim i materijalnim svojstvima cijevi (kvaliteta čelika, promjer i debljina cijevi), o dubini na koju se polaže cijev (duboko ili nisko polaganje) te o svojstvima okolnog tla [2, 8]. U inženjerskoj se praksi obično primjenjuje pojednostavljen model za određivanje seizmičkih karakteristika čeličnih cijevi u zonama prijelaza preko rasjeda [9]. Za detaljno i točno predviđanje spomenutih seizmičkih karakteristika potrebna je nelinearna analiza sustava interakcije između tla i cijevi.

U ovom je radu numerička analiza provedena na trodimenzionalnom nelinearnom sustavu "tlo-cijev" primjenom modela konačnih elemenata u kojem se u obzir uzimaju velike deformacije i pomaci. Izračunan je odziv nelinearnog interakcijskog sustava na postupno nanošenje sile pomaka tla (poprečno na os cijevi). Deformacije i izobličeni dijelovi cijevi odabrani su kao osnovni parametri odziva duž kritične duljine cjevovoda L_{cr} , a ta se duljina definira kao udaljenost na kojoj dolazi do prve pojave plastičnog zgloba na obje strane linije rasjeda. Ona se na trodimenzionalnom modelu mjeri kao duljina deformirane cijevi u obliku slova S. Predloženi model omogućuje formiranje plastičnog zgloba u cijevi postupnim nanošenjem sile pomaka rasjeda, određivanje kritične duljine cjevovoda te mjerenje deformacije na vlačnim i tlačnim stranama cijevi. Minimalni kriteriji ponašanja cjevovoda predlažu se na bazi analiza provedenih u okviru prethodnih istraživanja. Za cjevovode su definirane dvije razine ponašanja: potpuno funkcionalno i djelomično funkcionalno.

2. Čelični cjevovodi na prolazu kroz zonu rasjeda

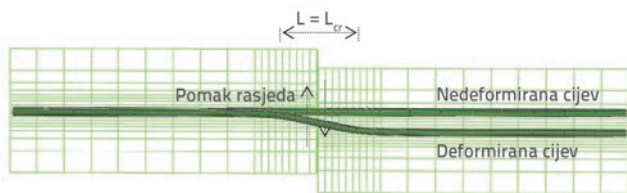
Projektiranje čeličnih cjevovoda na križanju s većim rasjednim linijama bazira se na određivanju osnih deformacija. Općenito uzevši u cijevi se javljaju dvije vrste deformacija, prema [3]:

- uzdužna deformacija savijanjem uslijed djelovanja poprečne komponente pomaka rasjeda
- neto uzdužne deformacije cijevi uslijed djelovanja osne (uzdužne) komponente pomaka rasjeda.

Magnituda deformacije cijevi obično ovisi o orijentaciji cjevovoda u odnosu na os cijevi te o smjeru klizanja. Pomak pružnog rasjeda dovodi do osnih i poprečnih pomaka čeličnih cijevi. Osna komponenta uzrokuje ravnomjernu osnu deformaciju u vidu vlačnog ili tlačnog djelovanja. U smjeru poprečnom na pružanje rasjeda (90° u odnosu na os cijevi), osna će deformacija biti jednaka nuli, dok će osna deformacija (vlak/tlak) postupno rasti usporedo s veličinom pomaka rasjeda. Kako pomak rasjeda raste, tako raste i vlačna deformacija zbog razvlačenja cijevi u suprotnom smjeru. To će uzrokovati smanjenje tlačne deformacije nakon postizanja vršne tlačne deformacije [3]. Do najznačajnije deformacije dolazi u efektivnoj duljini, L , segmenta cijevi u obliku slova S (slika 2.). Pritom je L udaljenost na kojoj nastaje prvi plastični zglob na obje strane linije rasjeda, mjeri se kao duljina deformiranog cjevovoda u obliku slova S pomoću

trodimenzionalnog modela, a ta duljina je također jednaka duljini L_{cr} (slika 2.).

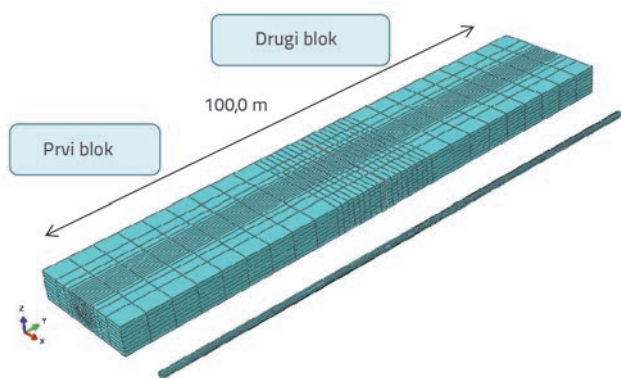
Seizmičko projektiranje i analize čeličnih cijevi koje prolaze kroz rasjedne zone detaljno su prikazane u uputama ALA [10] i ASCE [12] te u Eurokodu 8 [11]. Seizmička ocjena tih cijevi treba se oslanjati na načela bazirana na ponašanju, kao što se to predlaže u ovom radu.



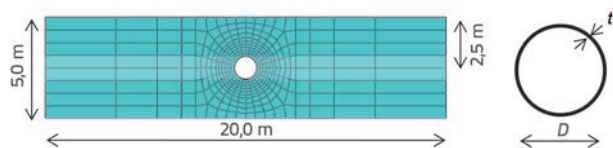
Slika 2. Kritična duljina deformacije cijevi u obliku slova "S" (L)

3. Numerička analiza

Seizmički odziv čeličnih cijevi analizira se na relevantnom primjeru. U tu se svrhu modelira nelinearni trodimenzionalni sustav "tlo-cijev" pomoću programa ABAQUS koji se koristi za analize konačnih elemenata opće namjene [13]. Pretpostavlja se da je cijev okomita na liniju pružnog rasjeda u horizontalnoj ravnini. Model konstrukcije sastoji se od dva segmenta (prvi blok i drugi blok) čija ukupna duljina iznosi 100,0 m, širina im je 20,0 m, a dubina 5,0 m (slike 3. i 4.). Sila pomaka rasjeda postupno se nanosi na drugi blok do ukupnog pomaka rasjeda od 3,0 m, pri čemu prvi blok ostaje nepomičan.



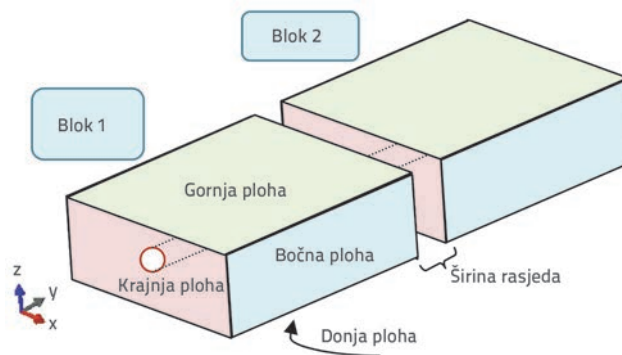
Slika 3. Model konačnih elemenata segmenata tla podijeljenih na mrežu konačnih elemenata i pogled na izdvojenu čeličnu cijev



Slika 4. Poprečni presjek segmenta tla i čelične cijevi

Segmenti tla modeliraju se pomoću *brick* elemenata s osam čvorova (C3D8R), sa smanjenom integracijom i s kontrolom

nefizikalne deformacije tipa pješčanog sata (eng. *hour-glassing control*). Što se tiče cijevi, primjenjuju se ljuskasti *shell* elementi (S4R) s četiri čvora sa smanjenom integracijom i s kontrolom nefizikalne deformacije tipa pješčanog sata. U ovom se radu koriste tri različita promjera cijevi (D): 1136 mm, 914 mm i 1422 mm. Cijev promjera 1136 mm analizira se s relativno niskom granicom popuštanja čelika "X65", što odgovara europskim cijevima kvalitete L450. Preostala dva promjera cijevi, 914 mm i 1422 mm, analiziraju se s čeličima visoke čvrstoće, X70 i X80, što odgovara europskim cijevima koje nose oznake L485 i L555. Debljina (t) iznosi 9 mm za cijev promjera 1136, a omjer D/t iznosi 127. Kod cijevi visoke čvrstoće i promjera 914 mm i 1422 mm, debljina iznosi 15,9 mm ($D/t = 57$), tj. 9,1 mm ($D/t = 156$). Algoritam površinskog kontakta koristi se za kontakt između vanjskog lica čelične cijevi i okolnog tla (cijev je glavna površina pa čvorovi glavne površine prodiru u podložnu površinu okolnog tla [13]). Svojstva interakcije između površina pretpostavljena su kao krajnje kontaktno trenje pomoću tangencijalnog ponašanja. Normalno ponašanje dopušta odjeljivanje površina nakon kontakta. Pretpostavljeno je da koeficijent trenja između površina iznosi $\mu = 0.3$. Numerička se analiza sastoji od dva koraka, tj. od geostatičke i statičke analize. Nelinearna statička analiza provodi se da bi se izračunali plastični zglobovi, deformacije i lokalna izobličenja cijevi u okviru sustava interakcije između cijevi i tla. Da bi se smanjilo vrijeme proračuna, odlučeno je da mreža bude detaljnija u zoni rasjeda gdje se očekuju značajne deformacije. Ustanovljeno je da efekt širine rasjeda ima mali utjecaj na odziv cjevovoda [2]. Stoga je pretpostavljeno da širina rasjeda između bloka 1 i bloka 2 iznosi $w = 30$ mm, slika 5.



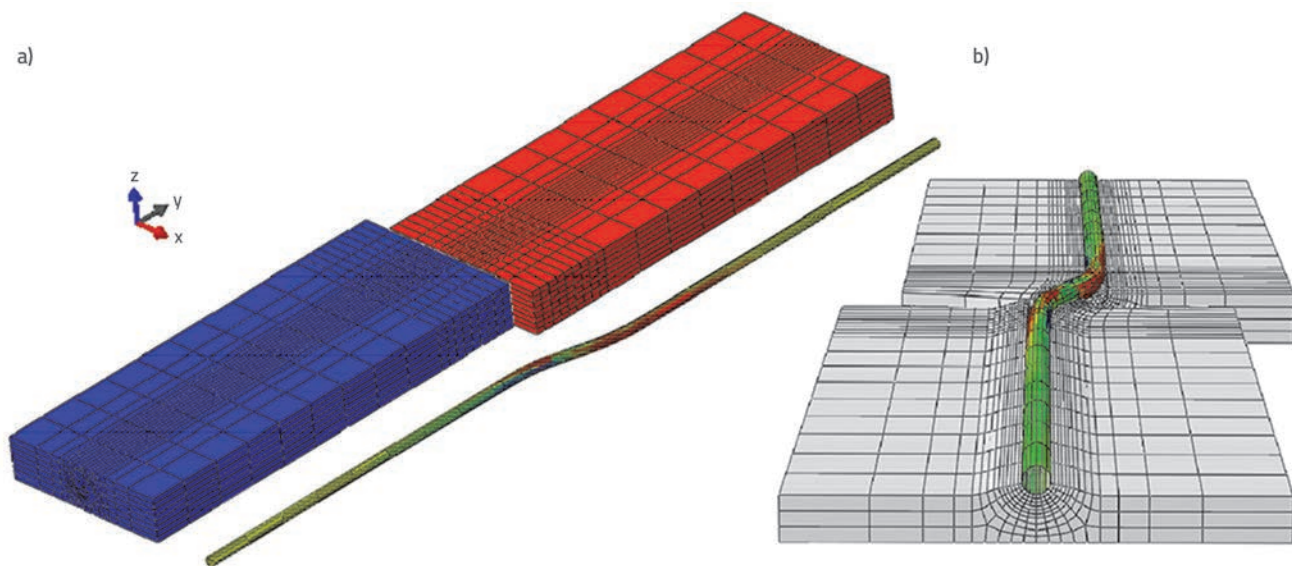
Slika 5. Kontaktne plohe tla i kontaktna ploha kraja cijevi za rubne uvjete

U prvom koraku se uzimaju fiksni uvjeti rubnog pomaka okolnog tla za kontaktne plohe na dnu, na stranama i na krajevima. Kontaktne plohe na krajevima cjevovoda također su fiksne. Nakon toga je proveden geostatički korak analize da bi se odredilo početno naprezanje zbog opterećenja tla. I konačno je na drugi blok nanosena sila radi postizanja postupnog pomaka rasjeda uzduž smjera x pri čemu je prvi blok bio fiksni. Zadano je da je krajnja kontaktna ploha

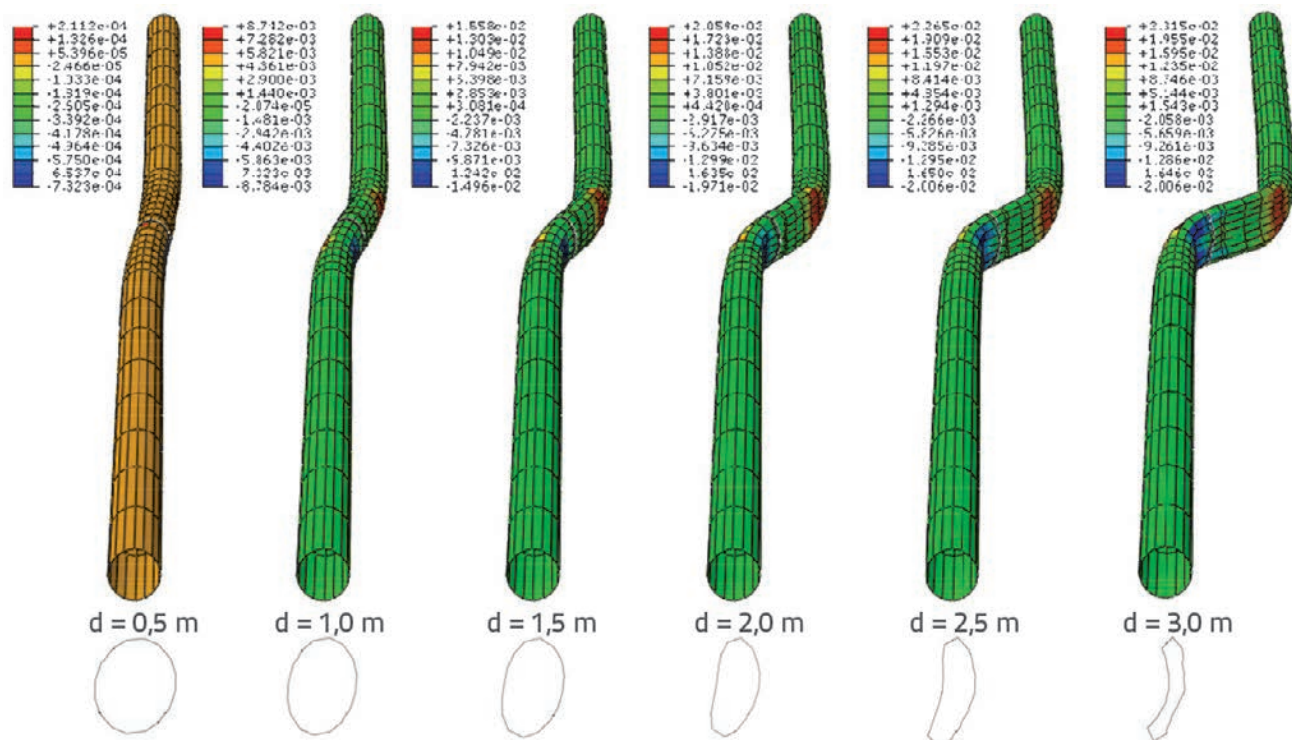
cjevovoda na bloku 1 fiksna, ali je otpuštena na bloku 2 duž smjera x da bi se izbjeglo pretjerano razvlačenje cijevi zbog rastućeg pomaka rasjeda. Može se vidjeti da rubni uvjet kontroliran pomakom na kraju cijevi, ili na spoju između kraja cijevi i bloka tla, može uzrokovati pretjerane deformacije zbog efekta razvlačenja cijevi. Cijev uglavnom popušta pod utjecajem vlačnog naprezanja te zbog stvarnih deformacija uslijed tlačnog popuštanja na naborima, sve dok na blok tla utječu bočne deformacije tla.

4. Rasprava i analiza rezultata

Sila postupnog pomicanja rasjeda nanosi se na drugi blok sve do ukupnog pomaka rasjeda od 3,0 m (slika 6.). U ovom su radu usvojeni sljedeći uvjeti tla: glina polučvrstog konzistentnog stanja i pijesak srednje gustoće, s parametrima srednje krutosti i meke gline, te sa slabo i dobro granuliranim pijeskom. Pretpostavljeno je da kohezija gline iznosi $c = 200$ kPa, modul elastičnosti je $E = 50$ MPa, Poissonov koeficijent iznosi $\nu = 0,4$ a



Slika 6. a) Sustav interakcije tla nakon pomaka rasjeda od 3,0 m; b) presjek



Slika 7. Deformacije cijevi, izobličenja poprečnog presjeka i osne deformacije cijevi X65 za uvjete pijeska, $D/t = 126$ (debljina cijevi $t = 9$ mm)

kut trenja i širenja iznosi $\phi = \psi = 0^\circ$. Kohezija pijeska iznosi $c = 10$ kPa, modul elastičnosti je $E = 25$ MPa, Poissonov koeficijent je $\nu = 0,2$, kut trenja je $\phi = 30^\circ$, a kut širenja iznosi $\psi = 2^\circ$. Modeli elastičnoplastičnog materijala usvojeni su za sustave cijevi i tla, a za mehaničko ponašanje čelične cijevi usvojen je model izotropnog očvršćivanja. Za sustav tla odabran je Mohr-Coulombov model.

4.1. Čelična cijev X65

Prve analize provedene su za cijev X65, promjera (D) 1136 mm, debljine (t) 9 mm i omjera $D/t = 127$. Deformacije cijevi, izobličenja (ovalizacija) poprečnog presjeka i vrijednosti osne deformacije određivane su na svakih 0,5 m do ukupnog pomaka rasjeda od 3 m ili do popuštanja cijevi (slike 7. i 8.). Pretpostavljeno je da koeficijent trenja između cijevi i površine tla iznosi $\mu = 0,3$.

Odziv podzemnog cjevovoda zbog pomaka rasjeda podijeljen je u tri faze. U prvj fazi (mali pomaci) značajne su kako

osne tako i savojne deformacije, i obje rastu usporedo s veličinom pomaka rasjeda. Savojne deformacije dovoljno su velike tako da imamo nenultu neto tlačnu deformaciju. U drugoj fazi (srednji pomaci) osna deformacija veća je od granice popuštanja a savojna se krutost (pa stoga i savojna deformacija) smanjuje, a neto tlačne deformacije približavaju se nultoj vrijednosti. U trećoj fazi (veliki pomaci), savojna deformacija ostaje konstantna a osna deformacija povećava se usporedo s povećanjem pomaka rasjeda [4].

Kritična duljina $L_{cr} = 15,2$ m dobivena je za cijev debljine 9 mm ($D/t = 126$) za uvjete pijeska, dok je kritična duljina $L_{cr} = 12,8$ m dobivena za uvjete gline. Plastični zglobovi za oba uvjeta okolnog tla prikazani su na slici 9. Kako je za sustav interakcije cijev-tlo u ovom istraživanju usvojena gruba mreža, potreban je precizniji model da bi se dobili pouzdaniji rezultati, iako bi to s druge strane povećalo troškove proračuna.

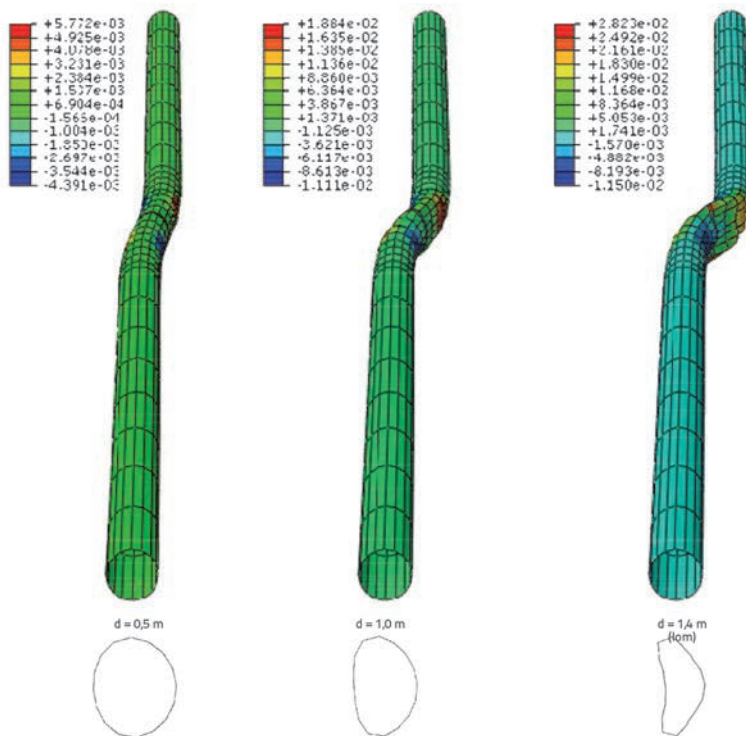
Što se tiče okolnog tla, na cijev lošije djeluje glina nego pijesak. Do popuštanja cijevi X65 dolazi kod pomaka rasjeda od otprilike 1,4 m u glini, dok je u uvjetima pijeska postignut ukupan pomak od 3 m. Kritične duljine cijevi određene trodimenzionalnim modelom prikazane su na slici 9.

4.2. Cijevi visoke čvrstoće (X70 i X80)

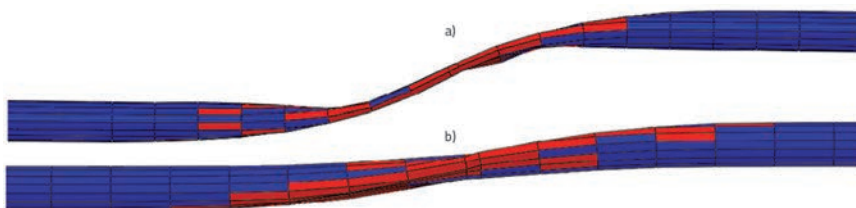
Nakon čeličnih cijevi X65 analizirane su i dvije cijevi promjera 914 mm i 1422 mm, koje su izvedene od čelika visoke čvrstoće. Njihove oznake X70 i X80 odgovaraju oznakama europskih cijevi L485 i L555. Debljine (t) iznose 9,1 mm ($D/t = 100$) i 15,9 mm ($D/t = 57$) za cijev promjera 914 mm, dok debljina cijevi promjera 1422 mm iznosi 9 mm ($D/t = 156$). Najprije su dobivene vrijednosti osne deformacije i izobličenja za čeličnu cijev X70 promjera 914 mm i debljine 9,1 mm i 15,9 mm za koeficijent trenja od $\mu = 0,3$, između vanjske površine čelične cijevi i okolnog pijeska i gline (slike 10. do 13.).

Cijevi s visokim omjerom D/t osjetljivije su od cijevi s niskim omjerom D/t , a deformacije i izobličenja cijevi počinju kod ranih vrijednosti pomaka rasjeda za cijevi s visokim omjerom D/t (slike 10. do 13.). Kritične duljine određene trodimenzionalnim modelom za čelične cijevi visoke čvrstoće prikazane su na slici 14.

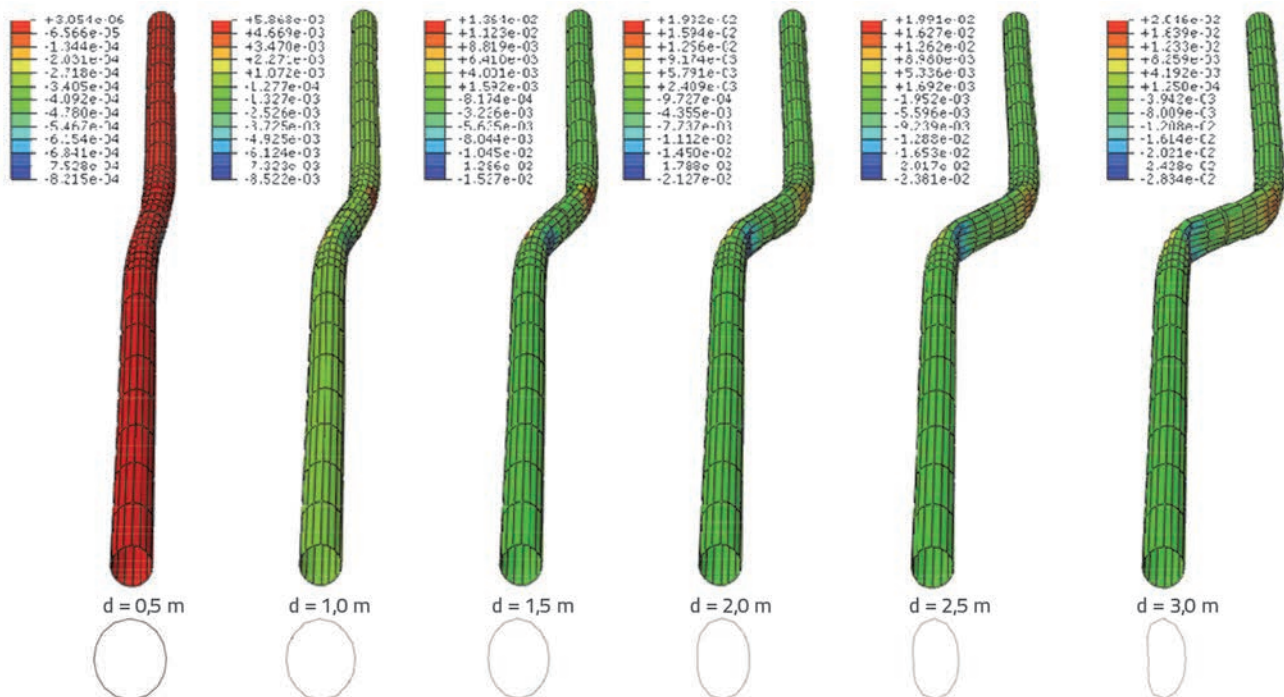
Vrijednosti osnih deformacija i izobličenja cijevi za čeličnu cijev X80 također su dobivene za promjer 914 mm i debljinu 15,9 mm i za koeficijent trenja od $\mu = 0,3$ između površina, i to kako za glinu tako i za pijesak (slike 15. i 16.).



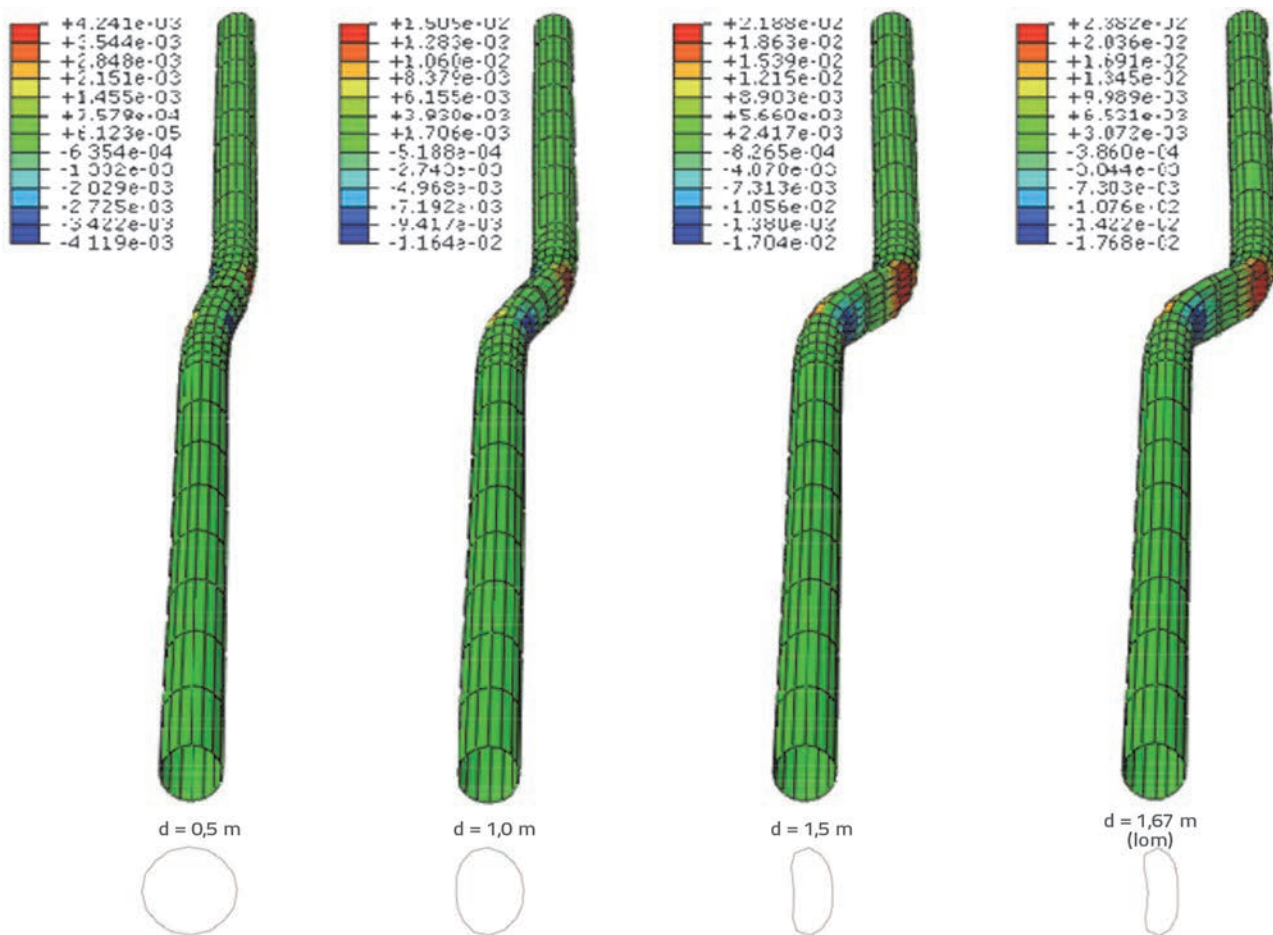
Slika 8. Deformacije cijevi, izobličenja poprečnog presjeka i osne deformacije cijevi X65 za uvjete gline, $D/t = 126$ (debljina cijevi $t = 9$ mm)



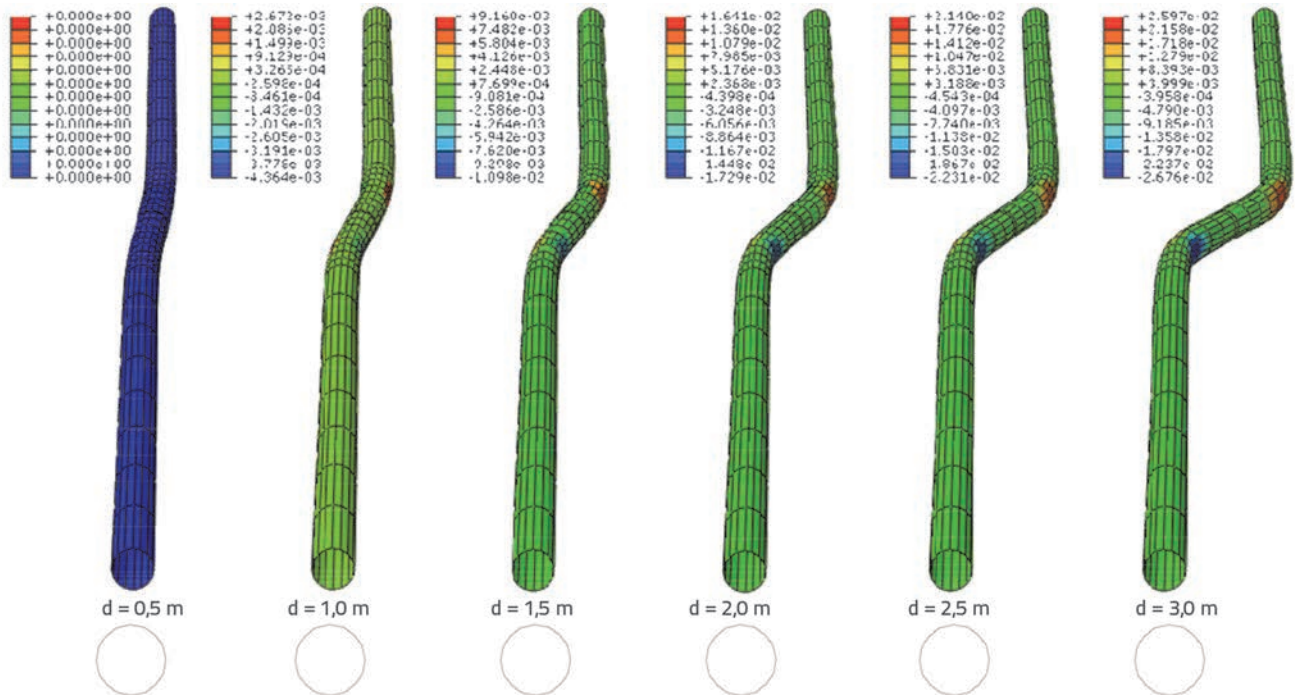
Slika 9. Elementi kod kojih je došlo do popuštanja i kritične duljine za cijev debljine 9 mm su a) $L_{cr} = 15,2$ m (pijesak), b) $L_{cr} = 12,8$ m (glina)



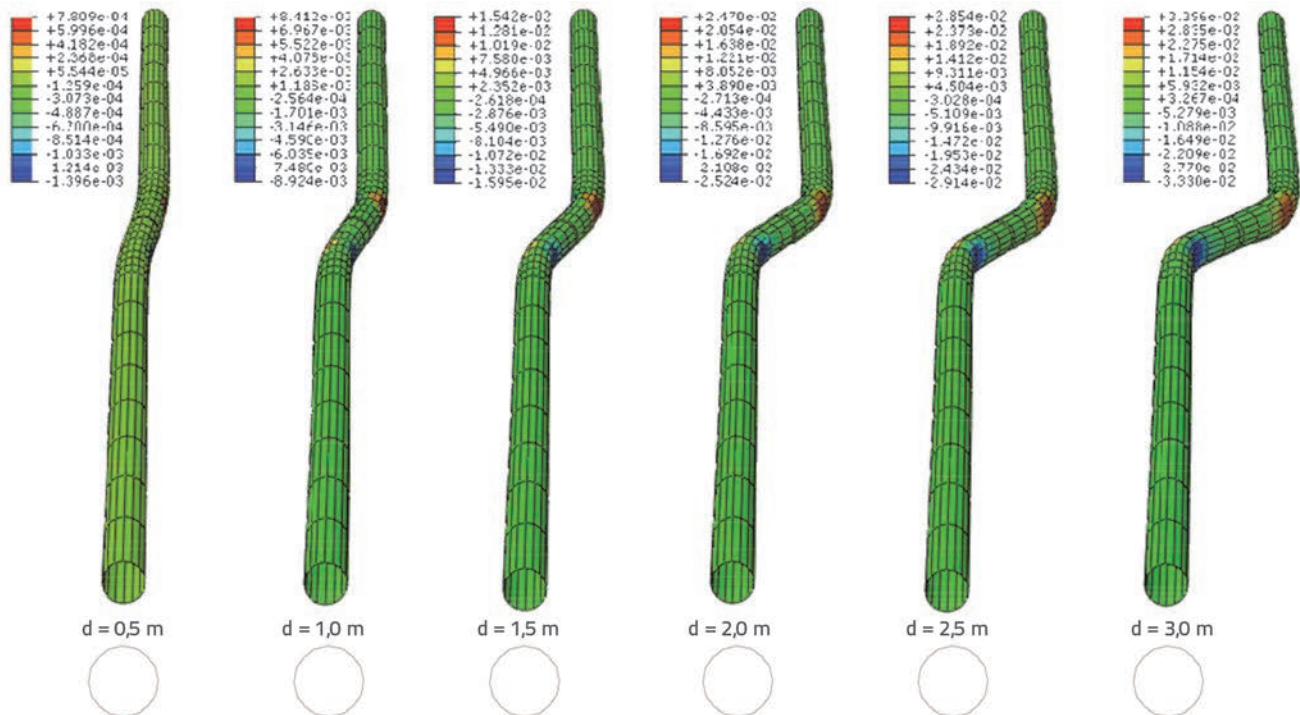
Slika 10. Deformacije cijevi, izobličenja poprečnog presjeka i osne deformacije cijevi X70 za uvjete pijeska, $D/t = 100$ (debljina cijevi $t = 9,1$ mm) i koeficijent trenja $\mu = 0,3$



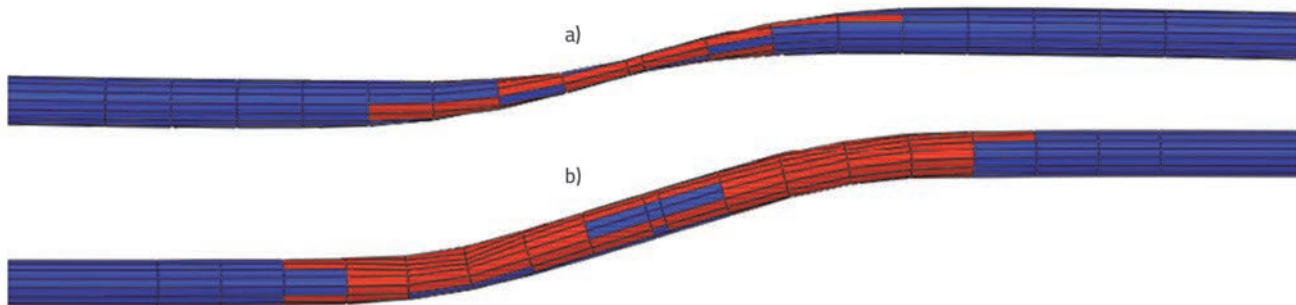
Slika 11. Deformacije cijevi, izobličenja poprečnog presjeka i osne deformacije cijevi X70 za uvjete gline, $D/t = 100$ (debljina cijevi $t = 9,1$ mm) i koeficijent trenja $\mu = 0,3$



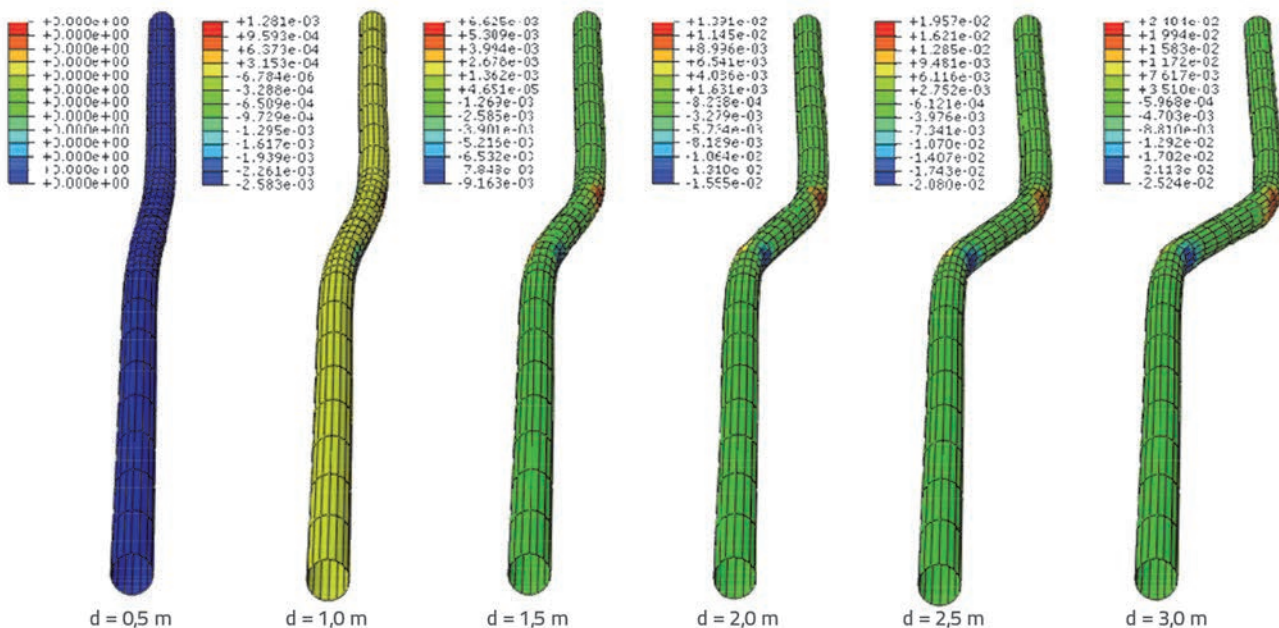
Slika 12. Deformacije cijevi, izobličenja poprečnog presjeka i osne deformacije cijevi X70 za uvjete pijeska, $D/t = 57$ (debljina cijevi $t = 15,9 \text{ mm}$) i koeficijent trenja $\mu = 0,3$



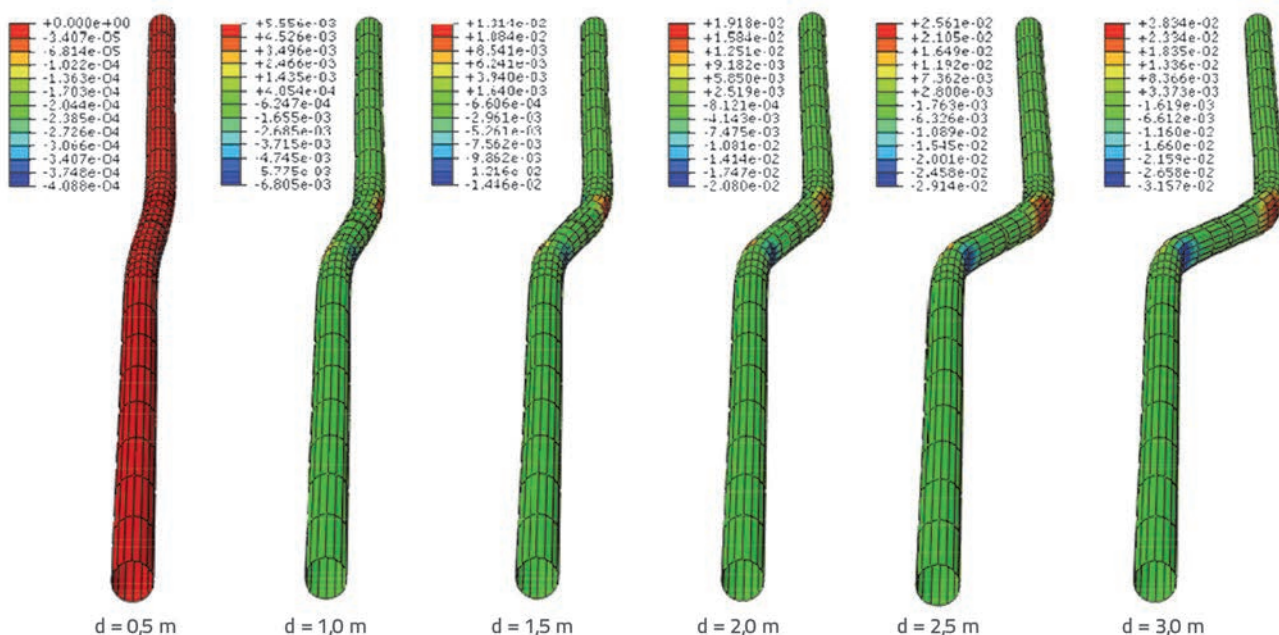
Slika 13. Deformacije cijevi, izobličenja poprečnog presjeka i osne deformacije cijevi X70 za uvjete gline, $D/t = 57$ (debljina cijevi $t = 15,9 \text{ mm}$) i koeficijent trenja $\mu = 0,3$



Slika 14. Elementi kod kojih je došlo do popuštanja i kritične duljine za cijev promjera 914 mm su a) $L_{cr} = 10.4$ m ($t = 9$ mm) i b) $L_{cr} = 15.2$ m ($t = 15.9$ mm) u uvjetima gline i za $\mu = 0,3$



Slika 15. Deformacije cijevi i osne deformacije za razne vrijednosti pomaka rasjeda od 0,5 do 3,0 m (cijev X80, $D = 914$ mm, $t = 15,9$ mm, $D/t = 57$, $\mu = 0,3$, pijesak)



Slika 16. Deformacije cijevi i osne deformacije za pomak rasjeda od 3,0 m (cijev X80, $D = 914$ mm, $t = 15,9$ mm, $D/t = 57$, $\mu = 0,3$, glina)

5. Zaključak

U radu se istražuje seizmički odziv podzemnih čeličnih cijevi prilikom prolaska kroz zonu pružnih rasjeda u horizontalnoj ravnini, kada dolazi do naprezanja i deformacija u cjevovodu. Pretpostavljeno je da su cijevi položene poprečno na liniju rasjeda.

Također je pretpostavljeno da je ponašanje cijevi neovisno o brzini klizanja, a unutarnji tlak cijevi nije uzet u obzir. Pretpostavlja se da taj tlak povoljno utječe na odziv cijevi. Prikazan je detaljni trodimenzionalni nelinearni statički model interakcije cijevi i tla, u kojem se u obzir uzimaju neelastična svojstva tla i materijala cijevi. Prikazan je deformirani oblik cijevi, isto kao i plastične deformacije i izobličenja cijevi zbog savijanja i razvlačenja. Na osnovi navedenoga mogu se dati sljedeći zaključci:

- Kritična duljina segmenta cijevi (duljina segmenta cijevi u obliku slova S) povećava se usporedo s povećanjem mekoće tla. To bi trebalo značiti da se manja deformacija može očekivati kod duljeg segmenta cijevi pri istom pomaku rasjeda.
- U tlu čvršćeg konzistentnog stanja cijevi se trebaju zatrpavati mekim materijalom kako bi se povećala kritična duljina cjevovoda.
- Očekuje se da će rezultati ovog istraživanja povoljno utjecati na metode projektiranja koje danas primjenjuju projektanti u svrhu projektiranja podzemnih čeličnih cjevovoda. Preporuke za daljnja istraživanja su: analiza unutarnjeg tlaka cjevovodnog sustava za kriterije popuštanja te analiza utjecaja krutosti čeličnih cijevi i okolnog tla na seizmički odziv.

LITERATURA

- [1] Takada, N., Hassani, K., Fukuda, A.: A New Proposal for Simplified Design of Buried Steel Pipes Crossing Active Faults, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(2001), pp. 1243-1257, <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.62>
- [2] Vazouras, P., Karamanos, S.A., Dakoulas, P.D.: Finite Element Analysis of Buried Steel Pipelines Under Strike-Slip Fault Displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(2010), pp. 1361-1376, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.011>
- [3] Vazouras, P., Karamanos, S.A., Dakoulas, P.D.: Mechanical Behavior of Buried Steel Pipes Crossing Strike-Slip Faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41(2012), pp. 164-18, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.012>
- [4] O'Rourke, M., Liu, X.: Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines, *MCEER-12-MNO4*, 2011.
- [5] Edinger, J.M., O'Rourke, M., Bachhuber, J.: Performance of a Pipeline at a Fault Crossing, *Proc 7th U.S. Nat. Conf. on Earthquake Engineering*, Oakland, California, 2002.
- [6] Uckan, E.: Lifeline Damage Caused In the 23 October (Mw=7.2) 2011 and 9 November (M=5.6) 2011, Van Earthquakes in Eastern Turkey, *International efforts in Lifeline earthquake Engineering, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering*, Monograph No: 38, ASCE, 2013.
- [7] O'Rourke, M., Filipov, E., Uckan, E.: Towards Robust Fragility Relations for Buried Segmented Pipe in Ground Strain Areas, *Earthquake Spectra*, 2014.
- [8] Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., Gkesouli V.: An Analytical Method for Strength Verification of Buried Steel Pipelines at Normal Fault Crossings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2011), pp. 1452-1464, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.05.012>
- [9] Uckan, E., Akbas, B., Shen, J., Wen, R., Seker, O., Paolacci, F., Kaya, E.S.: Soil Effect on Response of Buried Steel Pipes at Strike-Slip Fault Crossings, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Special Session: Seismic Assessment of Lifelines*, Istanbul, 2014.
- [10] ALA, American Lifelines Alliance Guidelines for the design of buried steel pipes, 2005.
- [11] Eurocode 8: EN 1998-4, Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines, 2006.
- [12] ASCE, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, Committee on Gas and Liquid Fuel Life- lines, *Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, New York, 1984.
- [13] ABAQUS Version 6.13, Documentation Collection.