



KOMPARATIVNA ANALIZA CEVNIH MATERIJALA U SISTEMIMA POD PRITISKOM

COMPARATIVE ANALYSIS OF PIPE MATERIALS USED IN PRESSURE SYSTEMS

IZVOD

Tržište cevni materijala je razvijeno i nudi širok asortiman različitih materijala koji mogu biti upotrebljeni prilikom izgradnje mreže cevovoda ili derivacionih cevovoda u kojima se transportuje voda pod pritiskom. Posmatrajući cevovode koji su deo vodovodnih i irigacionih sistema ili su energetske derivacije, u najčešćoj primeni su različiti polimeri plastičnih materijala (polietilen – PE, glasfiber plastika – GRP), čelik i nodularni liv. Izbor odgovarajućeg materijala može zavistiti od većeg broja parametara kao što su namena cevovoda, radne karakteristike cevovoda, potrebna otpornost na različita mehanička dejstva (unutrašnji pritisak, spoljašnje opterećenje, abrazija) i pojedini morfološki uslovi koji se javljaju prilikom izvođenja radova (prisustvo podzemne vode, mehaničke karakteristike fundamenta i sl.). Ponekad neki od pomenutih parametara znatno sužavaju izbor ali često je izbor odgovarajućeg cevnog materijala stvar tehno-ekonomske analize.

Ključne reči: cevovod pod pritiskom, cevni materijal, vodovodni sistem, irigacioni sistem, derivacije, tehno-ekonomska analiza

ABSTRACT

The pipe materials market is developed and offers a wide range of different materials that can be used in the construction of pipeline networks or derivation pipelines in which pressurized water is transported. Considering pipelines that are part of water supply and irrigation systems or they are power plant pipelines, the most commonly used materials are various types of plastic materials (Polyethylene - PE, Glassfiber Reinforced Plastic - GRP), steel and ductile iron. The choice of appropriate material may depend on many parameters such as the purpose of the pipeline, the required exploiting performances of the pipeline, the required resistance to various mechanical effects (internal pressure, external load, abrasion) and certain morphological conditions that occur during the pipeline installation (presence of groundwater, mechanical characteristics of the foundation, etc.). Sometimes some of the mentioned parameters significantly narrow the choice, but often the choice of the appropriate pipe material is a matter of techno-economic analysis.

Keywords: pressure pipeline, pipe material, water supply system, irrigation system, derivations, techno-economic analysis

1. UVOD

Poslednjih decenija je došlo do značajnog razvoja industrije za proizvodnju cevni materijala. Najznačajniji pomak je napravljen u proizvodnji plastičnih materijala. Ovi materijali se generalno odlikuju velikom glatkoćom koja omogućava povoljne hidrauličke uslove, malom težinom, mogućnošću lake i brze montaže, kao i otpornošću na koroziju i hemijsko dejstvo vode i okolnog tla. U mnoštvu plastičnih polimera, po masovnosti primene mogu se izdvojiti Poli-Vinil-Hlorid (PVC), Poli-Etilen (PE), Poli-Propilen (PP), Glasfiber Plastika (GRP).

S druge strane, čelični i liveni cevovodi imaju velike čvrstoće što može biti presudno kod odabira cevnog

materijala u slučaju izuzetno visokih pritisaka, u nepovoljnim morfološkim uslovima ili u uslovima postojanja značajnih spoljašnjih opterećenja.

Analizom materijala dostupnih na aktuelnom tržištu, izdvojena je nekolicina materijala koja predstavljaju prilično konvencionalna rešenja kada su u pitanju cevovodi za transport vode pod pritiskom u vodovodnim i irigacionim sistemima, energetskim derivacijama i potisnim cevovodima crpnih stanica različite namene. U nastavku je prikazana uporedna analiza sledećih cevni materijala:

- Polietilen visoke gustoće (PEHD – PolyEthylene High Density);

Miloš Ivetić, mast.inž.građ, Energoprojekt-Hidroinženjering a.d., mivetic@ephydro.com,
Milica Kovačević, mast.inž.građ, Energoprojekt-Hidroinženjering a.d., mkovacevic@ephydro.com



- Glasfiber Plastika (GRP – Glassfiber Reinforced Plastic);
- Molekularno orijentisani Poli-Vinil-Hlorid (PVC-O);
- Nodularno liveno gvožđe (Duktil)
- Čelik.

2. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE CEVOVODA

2.1 Hidraulički kapacitet

Hidraulički kapacitet cevovoda je definisan površinom unutrašnjeg poprečnog preseka cevi i koeficijentom koji reprezentuje hrapavost, tj. otpore duž cevi. Izvođenjem elementarnih hidrauličkih jednačina može se uočiti da je proticaj u cevovodu Q , koji zavisi od karakteristika cevovoda, proporcionalan unutrašnjem prečniku cevi d stepenovanom na vrednost $8/3$ i obrnuto proporcionalan Maningovom koeficijentu trenja n :

$$Q = f \left(\frac{d^{8/3}}{n} \right) \quad (1)$$

Ovo znači da je neophodno svesti različite cevne materijale različitih dimenzija na hidraulički parametar $d^{8/3}/n$ kako bi se mogla izvršiti realna komparacija njihovih hidrauličkih kapaciteta.

Na Sliku 1 se mogu videti razlike u unutrašnjim prečnicima cevovoda DN800 / PN16 za različite cevne materijale. Dimenzije se mogu neznatno razlikovati u zavisnosti od proizvođača. Sa Slika 1 se jasno uočava velika mana HDPE cevovoda, a to je da cevovodi proizvedeni od ovog materijala svoje mehaničke sposobnosti postižu značajnim debljinama zida cevi. Inovativna tehnologija proizvodnje PVC-O cevovoda doprinosi da mehaničke karakteristike cevovoda ne zavise previše od debljine zidova cevi, iako je primetno povećanje debljine cevovoda sa porastom DN i PN. Tehnologija proizvodnje GRP cevovoda je takva da mehaničke sposobnosti ne zavise previše od debljine cevovoda. Povećanje mehaničkih sposobnosti kod GRP cevovoda se postiže povećanjem sadržaja staklenih vlakana unutar strukture zida cevi. Čelik sa svojim izuzetnim mehaničkim karakteristikama

omogućava izuzetno tanke zidove cevi i pri većim DN i PN.

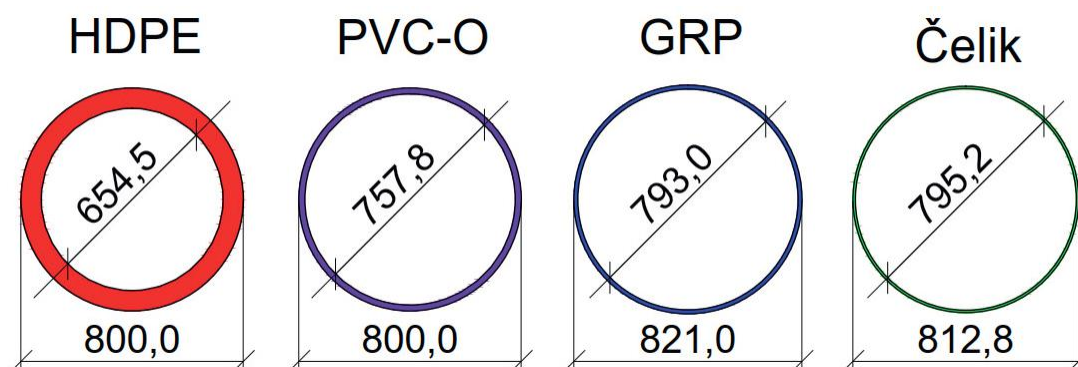
Sa Slika 2 se može uočiti da u istoj klasi pritiska, sa porastom nominalnog prečnika dolazi do porasta odstupanja između efektivnih površina poprečnih preseka HDPE i drugih cevovoda. Ova odstupanja su značajnija sa porastom klase pritiska cevovoda. Duktilni cevovodi (nodularni liv) su nezavisni od klase pritiska jer njihova konvencionalna proizvodnja podrazumeva cevovode jedne klase pritiska koja zavisi od prečnika varira između PN25 i PN50, a ponekad i više. Porast DN i PN nema apsolutno veliki značaj na redukciju površine efektivnog poprečnog preseka čeličnih i GRP cevovoda. Kod PVC-O cevovoda, redukcija efektivne površine poprečnog preseka postoji ali ona nije ni približno značajna kao kod HDPE cevovoda. Važno je napomenuti da je trenutno na domaćem tržištu minimalna klasa pritiska PVC-O cevovoda koja je dostupna jednaka PN12,5.

Kako bi se realno sagledali eksploatacioni uslovi i izvršila komparacija hidrauličkog kapaciteta između cevi izrađenih od različitih cevni materijala, za svaki cevni materijal definisani su Maningovi koeficijenti trenja (otpore) – n . Ovi koeficijenti se odnose na eksploatacione karakteristike i definisani su na osnovu preporuka proizvođača, iskustva i aproksimativne zavisnosti Maningovog koeficijenta n od apsolutne hrapavosti k za oblast turbulentnog strujanja [3]:

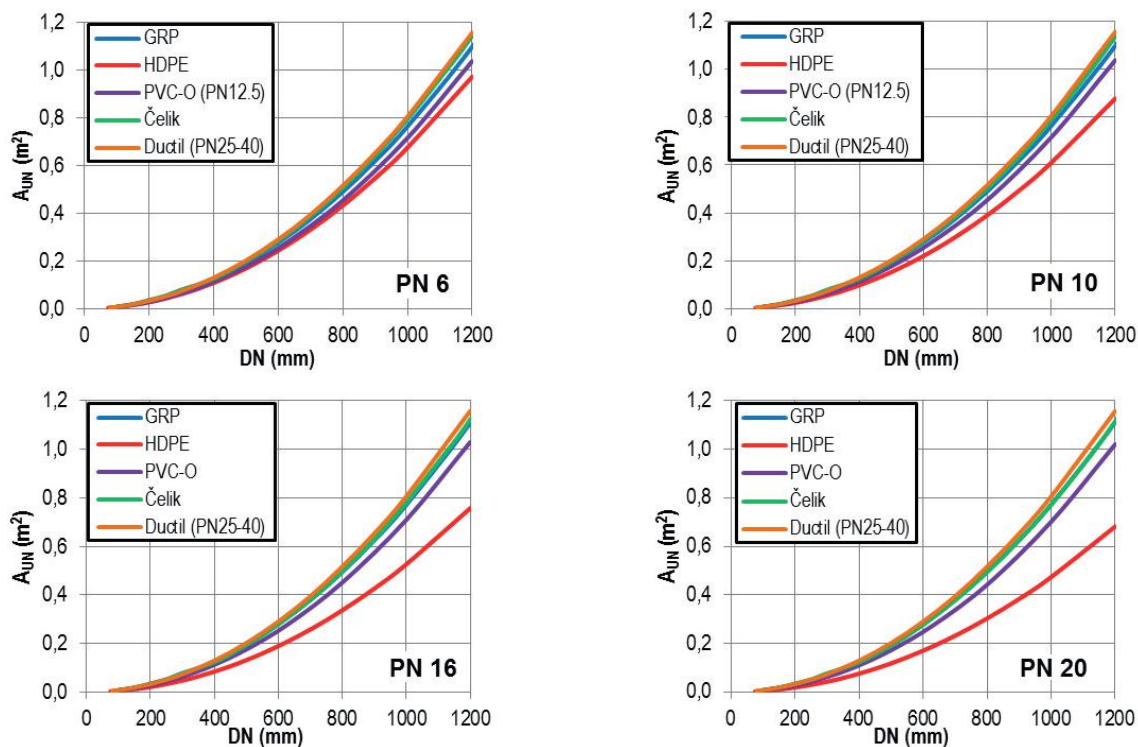
$$n = \frac{k^{1/6}}{26} \quad (2)$$

Bitno je napomenuti da su u jednačini (2) korišćene apsolutne hrapavosti koje prema literaturi i iskustvu odgovaraju eksploatacionom stanju cevovoda, a ne karakteristikama novih pojedinačnih cevi. U Tabela 1 su prikazani približni Maningovi koeficijenti hrapavosti korišćeni u daljim analizama.

Komparacija hidrauličkog kapaciteta cevovoda je izvršena komparacijom hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$. Na Slika 3 su prikazane vrednosti zavisnosti pomenutog hidrauličkog parametra zavisno od tipa cevi, nominalnog prečnika i klase pritiska cevni materijala.



Slika 1. Dimenzije unutrašnjih i spoljašnjih prečnika (mm) cevovoda DN800/PN16 za različite cevne materijale

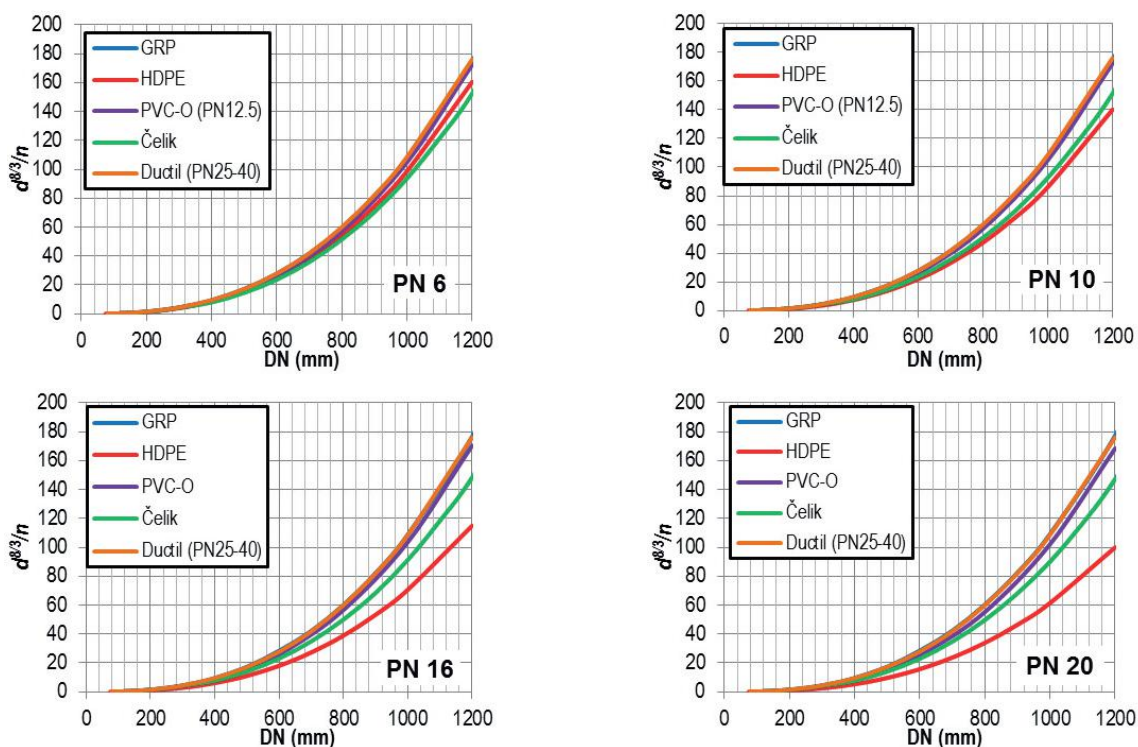


Slika 2. Zavisnost površine unutrašnjeg poprečnog preseka cevi od vrste materijala, DN i PN

Tabela 1. Manningov koefijenti hrapavost n za različite materijale

Materijal	HDPE	GRP	PVC-O	Čelik	Duktibil*
n ($m^{-1/3}s$)	0,0083	0,0090	0,0084	0,0108	0,0095

* hrapavost duktilnih cevi reprezentuje sloj cementnog morta sa unutrašnje strane cevi



Slika 3. Zavisnost hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$ od vrste materijala, DN i PN



Poređenjem Slika 2 i Slika 3 može se sagledati uticaj hrapavosti na hidraulički kapacitet cevovoda. Može se uočiti da je kapacitet čeličnog cevovoda u celom rasponu nominalnih prečnika manji od kapaciteta HDPE cevovoda za cevovode klase pritiska PN6, iako su odgovarajući unutrašnji prečnici čeličnih cevovoda veći. Kako PN raste, smanjuje se unutrašnji prečnik HDPE cevovoda, koji je ipak dominantni činilac razmatranog hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$. U svim razmatranim klasama pritiska najveće kapacitete po nominalnim prečnicima poseduju GRP i duktilne cevi. Što se tiče PVC-O cevovoda, njihovi kapaciteti po DN ne zaostaju znatno za pomenutim GRP i duktilnim cevovodima. Razlog tome je racionalna debljina zida i velika glatkoća njegove površine.

2.2 Otpornost na hidraulički udar

Jedna od bitnih pojava vezana za otpornost na dejstvo unutrašnjeg pritiska fluida jeste hidraulički udar. Prilikom hidrauličkog pritiska može doći do pojave natpritiska koji prevazilazi maksimalne pritiske koje cev može izdržati shodno svojim koeficijentima sigurnosti. Vrednost natpritiska Δp je shodno jednačini Žukovskog (3) [2] direktno proporcionalna vrednosti brzine širenja elastičnog talasa a u materijalu od kojeg je napravljena cev.

$$\Delta p = \frac{a \times \Delta v}{g} [mvs] \quad (3)$$

gde je g - gravitaciona brzina, a Δv - promena brzine kretanja fluida u cevi.

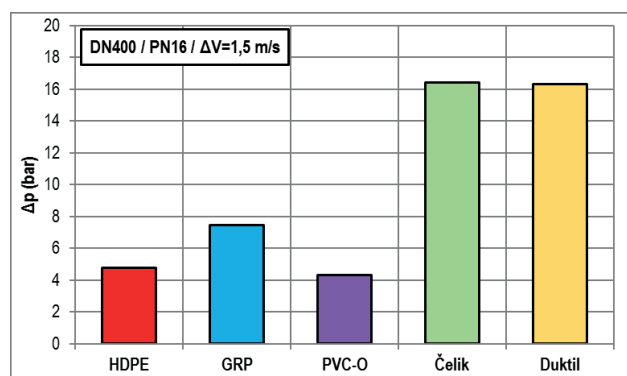
Vrednost brzine širenja elastičnog talasa a se dobija na osnovu jednačine (4) [2] :

$$a = \frac{1425}{\left(1 + \frac{K}{E} \times \frac{D}{s_{min}}\right)} [m/s] \quad (4)$$

gde su K – zapreminski modul elastičnosti vode, E – modul elastičnosti materijala od kojeg je napravljena cev, OD – spoljašnji prečnik razmatranog cevovoda, s_{min} – minimalna debljina zida cevi.

Korišćenjem reprezentativnih vrednosti promenljivih iz jednačine (4) za cevi PN16, sračunate su referentne vrednosti brzine širenja elastičnog talasa. Ova vrednost je najmanja za cevovode izrađene od PVC-O materijala i iznosi oko 282 m/s (neznačajne razlike između različitih nominalnih prečnika). Nešto veću vrednost parametra a imaju cevi od HDPE materijala i ova vrednost iznosi cca 313 m/s, nezavisno od nominalnog prečnika. Kada su u pitanju GRP cevovodi, sračunata vrednost parametra a se kreće u rasponu od 478,2 do 543,8 m/s. Najveće vrednosti brzine širenja elastičnog talasa imaju čelični i duktilno liveni cevovodi. Kod ovih cevovoda predmetni

parametar varira oko vrednosti 1000 m/s (uglavnom ispod 1100 m/s).



Slika 4. Vrednosti Δp pri trenutnom zatvaranju cevovoda DN400/PN16 i brzini vode 1,5 m/s

Kako bi se pokazao red veličine natpritiska koji se javlja u cevovodima PN16, korišćenjem jednačine (3) i sa vrednostima brzine a za DN400 sračunate su vrednosti natpritiska koji se javlja pri trenutnom zatvaranju cevovoda u kome se voda kreće brzinom 1,5 m/s. Na Slika 4 se uočavaju relativni odnosi natpritisaka zavisno od cevnog materijala. Uočava se da su vrednosti natpritiska u čeličnom i duktilnom cevovodu reda veličine radnog pritiska. Najmanji natpritisak u cevi se javlja u PVC-O cevovodima - 4,32 bara što odgovara oko 27% vrednosti nominalnog pritiska. Nešto veći natpritisak se javlja kod HDPE cevovoda – 4,8 bari što odgovara cca 30% nominalnog pritiska. U GRP cevima prilikom hidrauličkog udara dolazi do pojave natpritiska koji je u slučaju PN16 nešto manji od 47% nominalnog pritiska.

2.3 Otpornost na spoljašnje opterećenje

Otpornost na spoljašnje opterećenje se iskazuje preko krutosti cevi, odnosno njene sposobnosti da preuzme temeno opterećenje najčešće od zemlje i/ili saobraćaja. Krutost cevi se najčešće izražava pomoću koeficijenta/oznake SN koji se deklariše kao obodna krutost cevi (ring nominal stiffness). Krutost cevi je proizvod modula elastičnosti prstenastog savijanja materijala zida cevi i momenta inercije jedinice dužine cevi (5) [4].

$$SN = \frac{E \times I}{(OD - s)^3} = \frac{E \times s^3}{12 \times (OD - s)^3} [N/m^2] \quad (5)$$

gde su E – modul elastičnosti materijala, s – debljina zida cevi, OD – spoljni prečnik cevi.

Proizvođači HDPE punozidnih cevovoda obično ne ističu ovu karakteristiku kao osnovnu kada su u pitanju karakteristike cevi. Vrednost SN je u direktnoj

vezi odnosa nominalnog (spoljnog prečnika) i debljine zida cevi. S obzirom da cevi svih dijametara unutar jedne klase pritiska imaju isti pomenuti odnos, tako im je ista vrednost SN. Proračunska vrednost SN varira zavisno od karakteristika osnovnog materijala (modul elastičnosti). U Tabela 2 su prikazani rasponi proračunske vrednosti SN za HDPE cevi zavisno od PN, odnosno koeficijenta SDR. Iz Tabela 2 se vidi da su sa povećanjem klase pritiska, odnosno debljine zida HDPE cevi, značajno veće obodne krutosti cevovoda.

Tabela 2. Vrednosti SN zavisno od PN kod HDPE cevi

PN	6	10	16	20
<i>minSN (kN/m²)</i>	3,7	14,2	58,3	113,9
<i>maxSN (kN/m²)</i>	6,4	24,4	100,0	195,3

Kada je u pitanju obodna krutost GRP cevovoda, ona predstavlja deo asortimana serijske proizvodnje. GRP cevi, nezavisno od PN se obično proizvode sa obodnim krutostima 1250, 2500, 5.000 i 10.000 N/m². Po porudžbini se izrađuju i cevi obodne krutosti 20.000 N/m² ili druge.

PVC-O cevovodi imaju definisane debljine zidova i obodne krutosti SN za svaku od nominalnih klasa pritiska PN. Zavisnost parametra SN od PN je prikazana u Tabela 3.

Tabela 3. Vrednosti SN zavisno od PN kod PVC-O cevi

PN	12,5	16	20	25
<i>minSN (kN/m²)</i>	5,0	7,0	11,0	20,0

Poređenjem tabela 2 i 3 se može uočiti da HDPE cevi imaju znatno veće obodne krutosti u odnosu na PVC-O cevi iste nominalne klase pritiska. Razlog ovome jeste što i pored boljih mehaničkih svojstava PVC-O cevi (modul elastičnosti) debljina zida HDPE cevovoda je značajno veća nego kod PVC-O cevovoda. Ipak, vrednosti SN za PVC-O cevi su sasvim dovoljne kada je u pitanju instalacija cevovoda u zemljištu sa konvencionalnim dubinama ukopavanja ($3 \div 4$ m dubine) i opterećenjem od drumskog saobraćaja.

Značajne vrednosti modula elastičnosti čelika i nodularnog liva doprinose velikim obodnim krutostima cevovoda napravljenih od ovih materijala. Dimenzionisanje čeličnih cevovoda prema unutrašnjim prečnicima nekad ima za posledicu previše male debljine zidova, sa kojima se i pored velikih vrednosti modula elastičnosti postižu relativno male vrednosti obodne krutosti. Imajući to u vidu, prilikom dimenzionisanja debljine zida čelične cevi potrebno je izvršiti i proveru obodne krutosti.

2.4 Trasiranje cevovoda

Jedan od najzahtevnijih projektantskih zadataka jeste definisanje trase cevovoda. Trasa po pravilu mora biti što kraća kako bi se minimizirali hidraulički gubici. Pritom treba voditi računa o što manjem broju horizontalnih i vertikalnih preloma trase koji uglavnom iziskuju izgradnju anker blova za stabilizaciju krivina. Cilj trasiranja je da niveleta cevovoda u što većoj meri prati liniju terena kako bi se minimizirao obim zemljanih radova, a da s druge strane takva niveleta ne zahteva ugradnju velikog broja vazušnih ventila i ispusta na lokalno najvišim i najnižim delovima cevovoda.

HDPE cevovodi su verovatno najzahvalniji za trasiranje. Cevi se najčešće spajaju zavarivanjem u kontinualnu cev. Zahvaljujući svojim mehaničkim karakteristikama, ove cevovode je moguće kriviti do određenog stepena bez upotrebe fazonskih komada. Najveći dozvoljeni radijus krivine je obično $20 \times \text{DN(OD)}$, osim za cevovode sa tanjim zida (PN6) kod kojih je neophodno da radijus krivine bude veći ili jednak $30 \times \text{DN(OD)}$.

Pored HDPE cevovoda, PVC-O cevovodi imaju nešto manju mogućnost savijanja samih cevi radi postizanja veće zakrivljenosti trase. Uz krivljenje cevi, na svakoj spojnici, odnosno na rastojanju od cca 6 m moguće je izvršiti defleksiju pravca trase za 2° , nezavisno od nominalnog prečnika cevovoda.

GRP cevovodi takođe imaju mogućnost preloma trase u spojnicama. Za manje DN i PN su dozvoljeni veći stepeni defleksije. Tako za cevovode $\text{PN} \leq 16$ bari, najčešće sretane granične vrednosti ugla defleksije (α) su zavisno od DN prikazane u Tabela 4.

Tabela 4. Uobičajene vrednosti ugla defleksije na spojnicama GRP cevovoda

DN (mm)	≤ 500	$500 < \text{DN} \leq 900$	$900 < \text{DN} \leq 1800$	> 1800
α (°)	3	2	1	0,5



Slika 5. Krivljenje trase PVC-O cevovoda na spojnicama



Slično GRP cevovodima, moguće su promene pravca trase cevovoda na mestu spojnica, zavisno od tipa spojnica koja se koristi i proizvođača. Za cevovode manjih DN moguće su vrednosti promene pravca na spojnica i za 5°. Kako rastu vrednosti DN, tako opada mogući ugao defleksije, pa je za najveće vrednosti DN (oko DN1000) na spojnica moguća promena pravca za manje od 1°.

Čelični cevovodi mogu imati fleksibilne nastavke kao i duktilni, ali se češće nastavljaju zavarivanjem.

2.5 Ugradnja cevovoda

Pod ugradnjom cevovoda mogu se uvrstiti monsterni radovi na spajanju cevi i njihovoj montaži u rov, kao i svi neophodni zemljani, tesarski, armirački i betonski radovi. Građevinski radovi najčešće obuhvataju iskop i podgrađivanje rova za polaganje cevovoda, pripremu podloge, formiranje posteljice, zasipanje cevovoda nekoherentnim sitnozrnim materijalom, zatrpavanje rova sa nabijanjem zemlje iz iskopa, kao i eventualni odvoz viška materijala iz iskopa. Pored ovih radova, ne računajući izgradnju objekata (šahtova različite namene) duž trase cevovoda, često su neophodni armirački i betonski radovi na izradi anker blokova.

Spajanje cevovoda se vrši zavisno od tipa cevovoda. Polietilenske cevi se spajaju uglavnom varenjem koje može biti sučeono (tope se i spajaju krajevi dve cevi) ili elektrofuziono (oko krajeva dve cevi se topi fazonski komad za njihovo spajanje). Ređe se ove cevi spajaju prirubničkim spojem. Često se, naročito za manje cevovode, varenje cevi vrši na površini terena gde je manevar olakšan, a zatim se cevi simultano, deo po deo spuštaju u prethodno pripremljene rove. Varenje je praktično jer se njime omogućava kontinuitet cevovoda i izbegava potencijalno slabo mesto na spoju dve cevi. S druge strane proces varenja ima svoje trajanje koje donekle usporava radni proces ugradnje cevovoda. Varenje HDPE cevovoda može biti skupo, naročito za veće prečnike cevovoda.

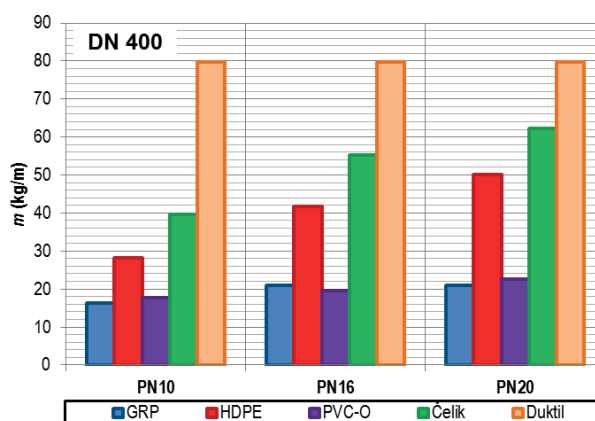
GRP cevi se proizvode bez naglavaka za međusobno spajanje. Spoj ovih cevi se omogućava prstenastom spojnicom sa zaptivkama koja obavlja spoj dve cevi. Krajevi cevi naležu do gumenog graničnika (stopera), a oko obe cevi naleže po jedan gumeni prsten za zaptivanje. Montaža se vrši na prethodno pripremljenoj posteljici rova, gde se cevi građevinskom mehanizacijom uguravaju u prsten spojnica. Postoji mogućnost integrisanja GRP ili čeličnih prirubnica univerzalnih dimenzija za spajanje dve GRP cevi, spajanje GRP cevi sa cevima drugog materijala ili hidromehaničkom opremom. Pored navedenih vrsta spojeva, posebna vrsta GRP cevi koje se nazivaju biaksijalne cevi se spajaju putem prstenaste spojnica koja se lepi oko krajeva cevi. Na taj način se postiže kruta veza cevovoda koji funkcioniše spregnuto i redukuje potrebu za izgradnjom anker blokova.

Spojnice za spajanje PVC-O cevi su integrisane u cevi i podrazumevaju naglavak na kraju cevi u koji naleže ravni deo druge cevi. U sklopu naglavka je integrisan polipropilenski prsten sa gumenim delom koji služe za sprečavanje pomeranja tokom montaže i obezbeđuju vodonepropusnost spoja. Ova vrsta spoja omogućava laku i brzu montažu cevovoda, naročito uzimajući u obzir njihovu malu težinu.

Čelične cevi se uglavnom spajaju varenjem, a mogu imati i naglavke ili se spajati prirubnicama.

Duktilne cevi se spajaju pomoću integrisanih prirubnicama sa zaptivanjem na krajevima cevi ili vezom na muf koja podrazumeva naglavke na krajevima cevi i prsten za zaptivanje. Postoje i pojedine vrste spojnica na muf koje omogućuju zaključavanje cevovoda i spregnuta pomeranja spojenih cevi. Na taj način se može izbeći česta ugradnja anker blokova na promenama pravca.

Brzina montaže cevovoda dosta zavisi i od težine cevi koja se ugrađuje. Težina HDPE cevovoda značajno varira zavisno od klase pritiska PN. Izuzev duktilnih koje su dimenzionisane na velike klase pritiska, najmanju zavisnost težine od klase pritiska imaju GRP cevi. S druge strane, debljina zida, kao i težina GRP cevi zavisi od SN faktora koji je veći za veće debljine zidova cevi. Na Slika 6 su prikazane jedinične težine cevi DN400 izrađene od pojedinih materijala, kako bi stekao uvid u relativne odnose između njih. Za težinu GRP cevi korišćene su vrednosti materijala SN5000 za PN10, a za PN16 i PN20 su korišćene vrednosti SN10000.



Slika 6. Jedinične težine cevi DN400 za pojedine cevne materijale

Slika 6 pokazuje da su daleko najlakše PVC-O i GRP cevi. Duktilne cevi su dimezionisane za veće pritiske i očekivano imaju najveću težinu. Težina HDPE i čeličnih cevi značajno raste sa povećanjem PN, s tim što su čelične cevi nešto teže.

Razlike u količini zemljanih radova mogu nastati u potrebnim dimenzijama rova za polaganje cevovoda,

vrsti materijala kojim se zasipa cev i u broju anker blokova duž trase cevovoda.

Plastični cevovodi generalno ne zahtevaju velike širine rovova za njihovu ugradnju, dovoljno je da oko cevi postoji dovoljno prostora da se izvrši pravilno nabijanje nasutog materijala (min 20 cm). Slično je i kod duktilnih cevovoda sa vezom na muf. Kada su u pitanju čelični cevovodi, potreban je nešto malo veći prostor za manevrisanje prilikom varenja cevovoda.

Razlike u dubinama rovova su uslovljene neophodnom dubinom ukopavanja koja je u slučaju postojanja saobraćajnog opterećenja obrnuto proporcionalna obodnoj krutosti. HDPE cevovodi generalno imaju zavidne krutosti i ne zahtevaju velike dubine ukopavanja, kao ni čelični i duktilni cevovodi. Nešto malo veće dubine su nekad potrebne u slučaju ugradnje GRP i PVC-O cevovoda.

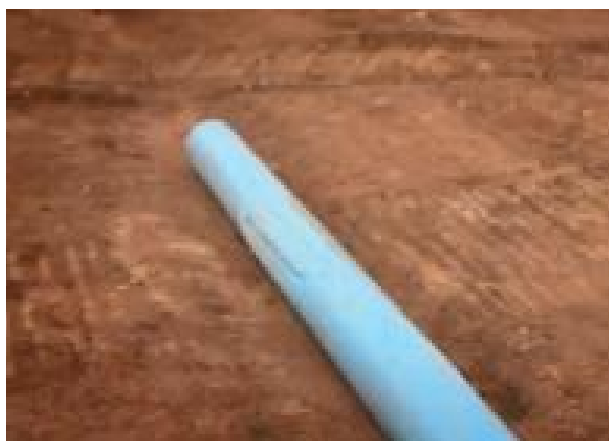
Plastične cevi, pa i duktilne se po pravilu zatrpavaju sitnozrnim nekoherentnim materijalom (najčešće peskom) oko cevi i do 30ak cm iznad vrha cevi. Na taj način se zid cevi štiti od mogućih oštećenja koja mogu nastati prilikom zasipanja neselektiranim materijalom iz iskopa. Čelične cevi nisu toliko osetljive pa je moguća ugradnja neselektiranog materijala iz iskopa oko cevi.

Odstupanje od pravila kod plastičnih cevi čine PVC-O cevi koje se najčešće mogu ugrađivati bez

peščane zaštite, uz zasipanje delimično selektiranim materijalom iz iskopa. Ovo je posledica njihove strukture koja je veoma otporna na površinska tačkasta oštećenja i koja ne dozvoljava širenje eventualne pukotine u dubinu zida cevi. Na Slika 7 se mogu videti metode testiranja PVC-O cevi na površinska oštećenja. Sa slike se vidi kako i nakon prelaska bagera i udara kamena težine 250 kg sa visine 2,5 m zidovi cevi ostaju funkcionalni i u stanju da sprovedu vodu pod pritiskom bez pojave curenja.

Specijalna edicija HDPE cevi sa oznakom RC (Resistance to Crack) omogućava ugradnju cevi bez potrebe za zasipanjem peskom. Modifikovani proces proizvodnje u odnosu na standardni omogućava otpornost cevi na dejstvo tačkastog opterećenja i brzo širenje eventualno nastale pukotine. Odsustvo potrebe za ugradnjom peščanog materijala doprinosi mnogo bržem i jeftinijem izvođenju zemljanih radova.

Što se tiče količine anker blokova, ona je ubedljivo najmanje potrebna u slučaju instalacije HDPE cevovoda kod kojih se krivine mahom savlađuju krivljenjem samih cevi. PVC-O cevi zbog svoje savitljivosti i mogućnosti promene pravca na spojnicama u velikoj meri oslobađaju od potrebe za izgradnjom anker blokova. GRP i duktilne cevi imaju mogućnost promene pravca na spojnicama (ekstremno do 5%), dok je za veće promene pravca neophodna ugradnja fazonskih komada



Slika 7. Testiranje PVC-O cevi na mehanička oštećenja



ubetoniranih u anker blokove. I za GRP i duktilne cevi postoje aplikacije koje omogućavaju spregnuto funkcionisanje više cevi u nizu i izostanak potrebe za anker blokovima. U pojedinim slučajevima, duktilni i čelični cevovodi za manje skretne uglove (<10%) mogu izdržati skretne sile bez ugradnje anker blokova.



Slika 8. Instalacija HDPE_RC cevi u rov bez posteljice

2.6 Eksploatacioni vek cevovoda

Svi plastični cevovodi deklarišu rok trajanja na 50 godina, iako mali broj njih daje zvaničnu garanciju. Izuzetak čini španska kompanija Molecor Tecnologia, koja na svoje PVC-O cevi daje pisanu garanciju na pomenuti period od 50 godina. Naravno, ovaj vek trajanja podrazumeva adekvatno projektovane, pravilno ugrađene i eksploatisane cevovode. HDPE i GRP cevovodi imaju tradiciju ugradnje koja je duža od 50 godina i pojedine cevi koje su ugrađene 50-ih godina 20.og veka i danas su funkcionalne.

Liveni cevovodi imaju najdužu tradiciju ugradnje i korišćenja u sistemima pod pritiskom. Karakteristike cevovoda nodularnog (duktilnog) liva koje uključuju spoljašnje u unutrašnje antikorozivne zaštite, omogućuju eksploatacioni vek duži od 50 godina (80 godina).

Čelični cevovodi zbog svoje slabe otpornosti na koroziju, često imaju najkraći rok trajanja. Procenjeni eksploatacioni vek čeličnog cevovoda iznosi 30 godina.

3. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Kada na osnovu uslova izgradnje ne postoje jasni indikatori za izbor cevnog materijala, izbor se najčešće svodi na najpovoljnije rešenje. U izboru najpovoljnijeg rešenja analizirani su HDPE (PE100), HDPE_RC (PE100), GRP (poliester), PVC-O 500, duktilni liveni i čelični cevni materijal. Raspon analiziranih vrednosti DN je od 75 do 1400 mm, dok su u analizu uvrštene klase pritiska PN6, PN10, PN16 i PN20.

Kako bi se analizirani materijali mogli uporediti, izvršena je tehno-ekonomska analiza instalacije cevovoda u zemljištu II i III kategorije. Analiziran je slučaj sa srednje teškim saobraćajnim opterećenjem, kako bi se istakle razlike između cevovoda sa različitim obodnim krutostima (dubina ukopavanja).

3.1 Određivanje jediničnih cena

Tehno-ekonomska analiza se svela na procenu jediničnog koštanja izgradnje cevovoda za svaki od razmatranih cevni materijala. U sklopu jedinične cene su uvrštene sledeće pozicije:

- Cevni materijal
 - ✓ Nabavka cevi
 - ✓ Nabavka fittinga
 - ✓ Transport
 - ✓ Montaža
- Građevinski radovi
 - ✓ Iskop
 - ✓ Podgrada rova
 - ✓ Planiranje dna
 - ✓ Izrada posteljice od peščano-šljunkovitog materijala
 - ✓ Zasipanje cevi peščano-šljunkovitim materijalom ili selektiranim materijalom iz iskopa
 - ✓ Zatrpavanje preostalog dela rova materijalom iz iskopa
 - ✓ Odvoz viška materijala na deponiju približne udaljenosti 5 km

Radi određivanja nabavke cevovoda, izvršeno je ispitivanje tržišta slanjem upita komercijalnim službama svih relevantnih kompanija koje se bave prodajom cevnog materijala na srpskom tržištu. Poslednja aktuelizacija cena je izvršena u periodu od juna do avgusta 2021.g. Većina firmi u svojim ponudama uvrštava i cenu transporta koja za tržište Srbije ne zavisi previše od tačne lokacije gradilišta. S obzirom da cene za pojedine proizvode variraju u širokom opsegu, za analizu su usvojene najpovoljnije tržišne cene ali isključivo od renomiranih proizvođača sa odgovarajućim referencama:

- HDPE i HDPE_RC – Peštan doo, Srbija
- GRP – Grandpipe, Turska (uvoznik i zastupnik za Srbiju – Vatra doo)
- PVC-O – Molecor Tecnologia, Španija (uvoznik i prodavac – Mima komerc doo)
- Duktil – PAM Saint Gobain, Francuska i JINDAL SAW, Italija (prodavac – Mima komerc doo)

Izuzetak u postupku formiranja nabavne cene čine čelični cevovodi za koje je umesto komercijalnih ponuda gotovih cevi, koštanje određeno na osnovu jedinične težine svake cevi i tržišnih cena čelika za takav oblik proizvoda. Treba napomenuti da je za cenu GRP cevovoda usvojena cena za SN10000 materijal.

Koštanje fittinga i montaže su usvojeni procentualno u odnosu na koštanje cevnog materijala. Kao reference za određivanje procentualnog udela nabavke fittinga i montaže cevovoda su korišćeni podaci sa realizovanih i/ili projekata u završnim fazama izrade tehničke dokumentacije, pre svih:

- Deponija Vinča (>10km cevovoda pod pritiskom, $25 \leq DN \leq 560\text{mm}$)
- Sistem za navodnjavanje Negotinske nizije (>30 km cevovoda pod pritiskom, $110 \leq DN \leq 1100\text{mm}$)
- Sistem za navodnjavanje Koceljeva (cca60km cevovoda pod pritiskom, $125 \leq DN \leq 800\text{mm}$)
- Sistem za navodnjavanje Ub (cca60km cevovoda pod pritiskom, $140 \leq DN \leq 1200\text{mm}$)

Potrebne količine svih zemljanih radova, kao i za podgrađivanje rova su sračunate na osnovu konstruisanih dimenzija tipskih rovova za svaki razmatrani cevovod. Konstrukcije rovova su formirane na osnovu preporuka proizvođača. Količina materijala za anker blokove je procenjena na osnovu iskustvenih podataka iz gore pomenutih projekata u skladu sa tipom cevnog materijala, DN i PN.

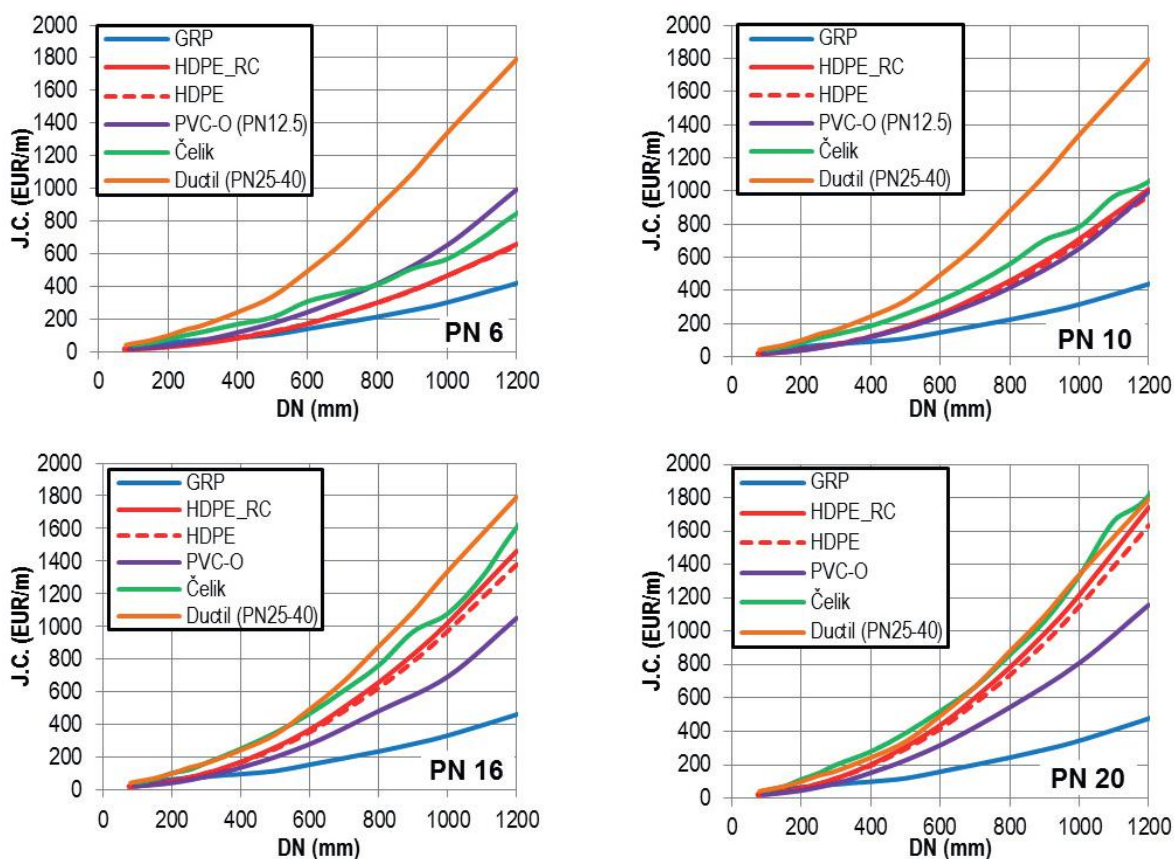
3.2 Rezultati analize

Slika 9 daje okvirni prikaz isplativosti primene pojedinih cevnih materijala zavisno od DN i PN. U slučaju PN6, za manje prečnike (<400mm) najisplativija je primena HDPE, a zatim PVC-O

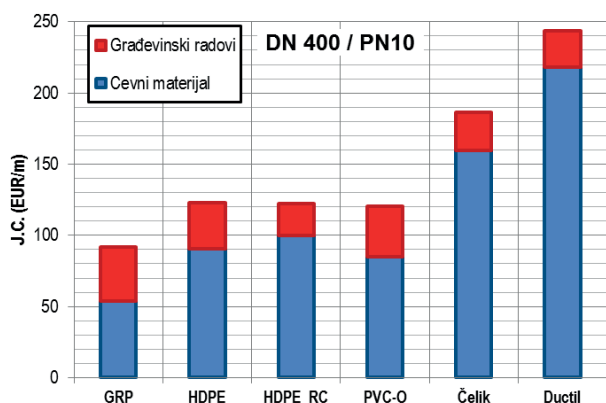
materijala, iako minimalna proizvodna klasa pritiska PVC-O materijala iznosi PN12.5. Kada su u pitanju veći prečnici (>400mm), ubedljivo najpovoljnija je instalacija GRP cevovoda. Razlika u isplativosti između GRP i ostalih cevovoda se povećava sa porastom PN. Koštanje HDPE cevovoda se izjednačuje sa PVC-O cevovodima već za PN10, dok sa daljim povećanjem PN koštanje HDPE cevovoda postaje znatno nepovoljnije od PVC-O. Logično, duktilni cevovodi dimenzionisani na veće pritiske su daleko najskuplji, sve dok ih ne uporedimo sa koštanjima ostalih materijala dimenzionisanih na slične vrednosti PN.

Veoma je bitno napomenuti da su ovi dijagrami samo indikativni i da ne daju preciznu sliku o isplativosti upravo zbog različitih hidrauličkih kapaciteta istih DN različitih cevni materijala.

Slika 10 govori u strukturi jediničnog koštanja jednog od cevovoda (DN400/PN10). Sa slike se uočava da je HDPE_RC cevovod nešto povoljniji od običnog HDPE cevovoda, iako je sam cevni materijal za oko 10% skuplji ali su jeftiniji zemljani radovi zbog izostanka nasipanja peska. Duktilni, čelični pa i HDPE cevovod imaju manje dubine ukopavanja pa je obim zemljanih radova manji nego kod PVC-O i GRP cevovoda. Bez obzira na to, zbog niske cene samog cevni materijal GRP cevovod je najpovoljniji, a za njim sledi PVC-O cevovod.



Slika 9. Zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od vrste materijala, DN i PN



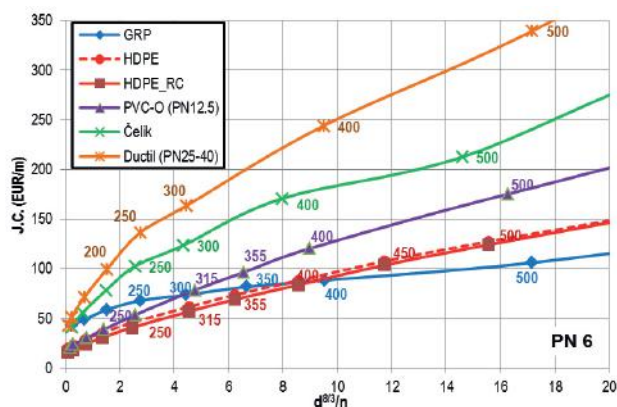
Slika 10. Struktura koštanja cevovoda DN400/PN10

Do sada smo u analizi govorili o nominalnim prečnicima. Iz poglavlja 2 se može videti koliko se nominalni i unutrašnji prečnici mogu razlikovati i koliko to može uticati na kapacitet pojedinih cevovoda. Da bi se ove razlike anulirale, prvo je izvršeno poređenje jediničnih cena u zavisnosti od unutrašnjih prečnika cevovoda, a zatim je izvršena i fina analiza poređenja jediničnih koštanja različitih cevni materijala u zavisnosti od hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$, koji reprezentuje hidraulički kapacitet cevovoda. Rezultati obe analize daju gotovo identične rezultate iako se parametar n (Manningov koeficijent hrapavosti) nešto razlikuje od materijala do materijala. U nastavku u prikazani dijagrami zavisnosti jediničnog koštanja cevovoda od njihovog hidrauličkog kapaciteta.

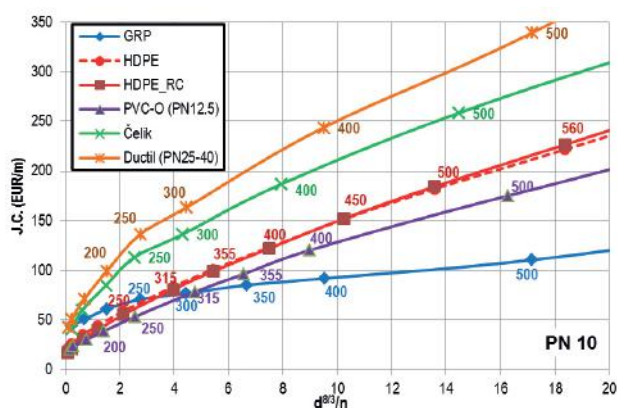
Slika 11 opisuje zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$ za cevovode PN6. Pojedine vrednosti DN su istaknute na dijagramu, kako bi se stekao uvid u vezu DN i parametra $d^{8/3}/n$. Rezultati govore da je za nominalne prečnike manje od 400 mm, najisplativija upotreba HDPE_RC cevovoda. Nešto nepovoljniji su obični HDPE cevovodi, jer kod većih prečnika je dominantno koštanje cevni materijala, a ne građevinskih radova. Za vrednosti DN preko 400mm najpovoljnija je primena GRP cevovoda. Isplativost GRP cevovoda značajno raste sa porastom DN, što se može videti i na Slika 9.

Slika 12 pokazuje odnos koštanja različitih cevni materijala za klasu pritiska PN10. Poređenjem sa Slika 11 se vidi koliko je značajan porast jedinične cene HDPE cevovoda istih hidrauličkih performansi sa porastom PN. Osnovni razlog tome je značajno povećanje debljine zida cevi koje uzrokuje smanjenje hidrauličkog kapaciteta usled smanjenja unutrašnjeg prečnika, a pored toga i povećanje cene materijala. Za cevi PN10, u slučaju DN manjih od 300(315)mm, najpovoljnija je izgradnja PVC-O cevovoda. Za cevi

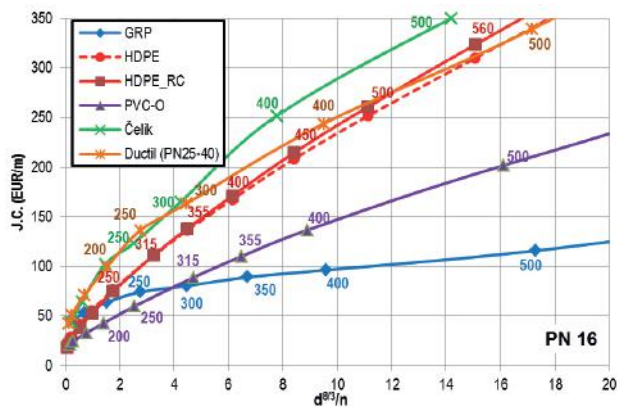
većeg prečnika od DN300(315) primat opet imaju GRP cevi, čija isplativost raste sa porastom prečnika. Treba napomenuti da su PVC-O cevi minimalne klase pritiska PN12,5 i da im je u pomenutoj PN isplativost sigurno značajnija.



Slika 11. Zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$ za PN6



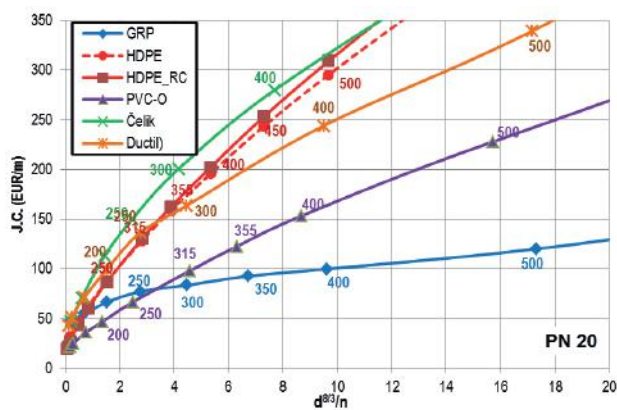
Slika 12. Zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$ za PN10



Slika 13. Zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$ za PN16

Kada su u pitanju cevovodi PN16 (Slika 13) rezultati su još nepovoljniji po HDPE cevovode, koji za veće prečnike imaju isplativost sličnu čeličnim i duktilnim cevovodima. Za manje prečnike od cca 300(315)mm i dalje je najisplativija primena PVC-O cevovoda, dok je za veće prečnike najpovoljniji GRP materijal.

Na Slika 14 se vidi kako za cevi PN20 primena HDPE cevovoda postaje nepovoljnije rešenje od duktilnih cevovoda za DN preko 315 mm. Za manje prečnike, ovaj put od 250-280mm, najpovoljnije rešenje je i dalje PVC-O cevni materijal. GRP cevovodi sa povećanjem klase pritiska pokazuju svoju dominaciju u isplativosti nad drugim cevni materijalima.



Slika 14. Zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra $d^{8/3}/n$ za PN20

LITERATURA

1. Đorđević B. (1984), *Korišćenje vodnih snaga: objekti hidroelektrana*, Naučna knjiga, Beograd.
2. Ivetić M. (1996), *Računska hidraulika: tečenje u cevima*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
3. Ivetić, M. i Kovačević, M. (2021). Izbor cevnog materijala prilikom projektovanja cevovoda pod pritiskom. *Savetovanje SDHI i SDH Beograd*
4. Kapor R. (2015), *Hidraulika*, Akademska misao, Beograd.
5. The European Standard 13244 (2002), *Plastics piping systems for buried and above-ground pressure systems for water for general purposes, drainage and sewerage - Polyethylene (PE)*