

Tusculum

2023
SOLIN-16

Nakladnik

Javna ustanova u kulturi
Zvonimir Solin
Kralja Zvonimira 50
Solin

Za nakladnika

Tonći Čićerić

Glavni urednik

Marko Matijević

Uredništvo

Joško Belamarić
Nenad Cambi
Dino Demicheli
Josip Dukić
Arsen Duplančić
Miroslav Katić
Dražan Maršić
Ivana Odža
Michael Ursinus

Grafičko oblikovanje i priprema za tisak

Marko Grgić

Izrada UDK-a

Iva Kaić

Tisak

Jafra Print d. o. o.

Naklada

500 primjeraka

Izdavanje časopisa novčano podupire Grad Solin.

UDK 908(497.5-37 Solin)

Tiskana inačica: ISSN 1846-9469

Mrežna inačica: ISSN 1849-0417

Tusculum

Časopis za solinske teme

16

Solin, 2023.

Sadržaj

7-22	Vedran Katavić	Zaštitna arheološka istraživanja na trasi salonitanskoga vodovoda
23-39	Jure Margeta	Utjecaj olovne cijevi na održivost rimskoga vodoopskrbnog sustava
41-61	Luka Donadini	Religija, kult i moralnost u Saloni (II) Misteriji u čast Velikoj Majci
63-76	Nino Švonja	Antički spoliji pronađeni na tzv. Zaobilaznici u Solinu
77-86	Ana Demicheli – Dino Demicheli	Četiri epigrafska spolija <i>in situ</i> u Šupljoj crkvi i predjelu Vukšići u Solinu
87-94	Dino Demicheli – Krešimir Grbavac	Nadgrobní titul djevojčice Valerije Procile iz Kule 15 na sjevernim salonitanskim bedemima
95-99	Saša Denegri	Kasnoantički brodolom kod Slatina na otoku Čiovu
101-111	Marko Matijević	Građa iz solinske povijesti (I)
113-149	Ivan Grubišić – Mario Bubić	Vranjičko-solinski Grubići Patkasi i solinski Grubići Škombre
151-161	Ivana Odža	Emocionalni regionalizam Tome Podruga
163-196	Mirko Jankov	Iz riznice svjetovnoga repertoara Pučkih pivača Gospa od Otoka – Solin: Transkripcije i jezično-glazbena analiza osam tradicijskih napjeva (dio drugi: ženski i dijaloški tekstovi)
197-216	Arsen Duplančić	Bibliografija Milana Ivaniševića (1963. – 2020.)
217-218		Naputak suradnicima <i>Tusculuma</i>



Jure Margeta

Utjecaj olovne cijevi na održivost rimskoga vodoopskrbnog sustava

Jure Margeta,
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva,
arhitekture i geodezije
Matice hrvatske 15
HR, 21000 Split
margeta@gradst.hr

Rad obrađuje problematiku korištenja olovnih cijevi u vodoopskrbnim mrežama rimskih gradova i njihov utjecaj na čovjeka i okoliš. U Rimskom Carstvu olovo se često koristilo, a olovne su cijevi upotrebljavane za gradnju vodovodnih mreža. Olovo je otrovno za čovjeka, što je bilo poznato Rimljanima, tako da proizvodnja, obrada i primjena predstavljaju opasnost za zdravlje ljudi i za okoliš. Da bi se dobio potpuniji uvid u pozitivne i negativne značajke korištenja olovnih cijevi, u radu se analizira životni vijek cijevi i vodoopskrbne mreže te utjecaj na razvoj tehničko-tehnoloških karakteristika rimskih vodovoda, kakvoću vode i okoliša. Prezentiraju se i rezultati ispitivanja na tlak olovne cijevi iz Salone, stare oko 2000 godina. Rezultati analize ukazuju na to da su rimske olovne cijevi bile sigurne, trajne i povoljne za korištenje u vodoopskrbi. Cijevi i vodovodi imali su višestoljetni životni vijek te su osiguravali sigurnu opskrbu zdravom vodom.

Ključne riječi: rimski vodovod, olovne cijevi, održivost vodoopskrbe, kulturno naslijeđe vodne infrastrukture, Salone

UDK: 904:628.1(398 Salone)

Izvorni znanstveni članak
Primljeno: 6. veljače 2023.

1. Uvod

Olovo se počelo koristiti 7000 godina prije Krista, a vrhunac korištenja doživjelo je u rimskom periodu te ponovno oko 1950. godine.¹ Zapisi na cijevima pronađenima u Rimu spominju vrijeme prije 11. godine prije Krista, dok ispitivanja tla i koncentracije olova u tlu u okolici Rima ukazuju da je korištenje počelo ranije, oko 140. godine prije Krista, te je intenzivno trajalo do 250. godine kada je zbog ekonomskih razloga i previranja u Rimskom Carstvu razvoj urbane vodne infrastrukture stagnirao.² Zbog štetnoga utjecaja na zdravlje ljudi upotreba olovnih cijevi u vodovodima zabranjena je 1970. godine.

Olovne su cijevi u rimsko doba bile glavni element vodovodnih mreža koje su stoljećima omogućavale održivost življenja u utvrđenim gradovima. Međutim, olovo je toksično za čovjeka, što otvara pitanja ispravnosti korištenja olovnih cijevi te utjecaja na zdravlje stanovništva i onečišćenje okoliša. Zato se potpuni uvid o utjecaju olovnih cijevi na čovjeka i okoliš može dobiti jedino ako se integralno sagledava cijevni materijal i tehničko-tehnološki

aspekti korištenja cijevi. Mora se sagledati životni ciklus cijevi, od proizvodnje do prestanka korištenja, te način korištenja. Rimski su inženjeri bili svjesni štetnosti olova pa su primjenjivali tehnička rješenja koja su to smanjivala.³

Da bi se stekao cjelovitiji uvid u dobre i loše značajke korištenja olovnih cijevi, treba poznavati tehničko-tehnološki koncept rada rimskih vodovoda te poznavati značajke cijevnoga materijala i utvrditi tehničke značajke olovnih cijevi kao što su strukturna svojstva (životni vijek, otpornost na unutrašnje pritiske, otpornost na vanjske pritiske i otpornost na udarna opterećenja), održivost u urbanom okolišu (otpornost na koroziju tla, otpornost na koroziju podzemnih voda, otpornost na unutrašnju koroziju i otpornost na koroziju lutajućim strujama) te uvjete za izgradnju, rad i održavanje (širina iskopa, instaliranje, potreba za ojačavanjem, jednostavnost spajanja, lakoća otkrivanja curenja, lakoća popravka i težina cijevi). Ovakav pristup koristi se u ovom radu te se analizira prihvatljivost olovnih cijevi, utjecaj na razvoj inženjersko-tehnološkoga

¹ S. Hong *et al.* 2014.

² H. Delile *et al.* 2014.

³ Vitruv. *De arch.* 8. 6. 10-11; Plin. *HNVI.* XXX. 50.

koncepta vodovoda i proizvodne značajke cijevi kao što su izdržljivost na unutrašnji tlak vode, hidrauličke značajke, znanje nužno za instaliranje i cijena.

Cijevi su glavni element vodovoda. Danas se izrađuju iz više vrsta materijala: lijevanoga željeza, čelika, pocinčanih cijevi, bakra, plastike, polietilena, PVC-a te betona, pa je stoga izbor nužno optimizirati. U rimsko doba olovne su cijevi bile najčešći izbor, dok su se cijevi od drveta, pečene gline ili kamena rijetko koristile. Osim mreže međusobno povezanih cijevi, današnji vodoopskrbni sustavi, kao i rimski nekada, uključuju još rezervoare, ventile i korisničke priključke. U sklopu rimskih vodovoda postojali su i protupožarni hidranti i crpne stanice, ali se nisu učestalo koristili.

Današnje cijevi prilagođene su tehničko-tehnološkim značajkama modernih tlačnih vodoopskrbnih sustava kojima se omogućava dovod vode do svakoga mjesta stanovanja, pa tako i u visokim neboderima. Voda se povremeno koristi prema potrebama, a korištenje se plaća. Tlak vode u cijevnoj mreži je visok, oko 6 bara, jer se voda ujedno koristi i za gašenje požara. Da bi se dobio potreban tlak, koriste se crpke, a njihov rad osigurava električna energija zbog čega su troškovi veliki. Rimski je vodovod bio bitno drugačiji jer se rad zasnivao na sili gravitacije, a voda se raspodjeljivala stanovništvu javnim fontanama po gradskom prostoru (ne na katovima zgrada) te je danju i noću bila dostupna bez plaćanja. Privatni korisnici koji su imali kućne priključke plaćali su korištenje vode. Tlak u vodovodnoj mreži je zbog toga bio manji od 1 bara (10 m vodnoga stupca). Ove urbanističke i društvene značajke vodovoda značajno su utjecale na tehničko-tehnološki koncept rimskoga vodovoda i korištenje olovnih cijevi te u konačnici na njihovu stoljetnu održivost.

Rimske olovne cijevi dugo se istražuju, međutim dva nova istraživanja značajno su pridonijela njihovu potpunijem poznavanju i primjeni u rimskim vodovodima. Jedno od njih je ispitivanje na tlak cijevi pronađene u Saloni, stare oko 2000 godina. Ispitivanje je provela firma ANAFORA d. o. o. Split pod vodstvom Tonča Jankovića, u suradnji s Građevinskim fakultetom u Splitu, Arheološkim muzejom u Splitu i Konzervatorskim odjelom u Splitu.⁴ Vjerujemo da je ovaj eksperiment prvi pokušaj u svijetu, tako da su rezultati ispitivanja važan doprinos cjelovitim razumijevanju održivosti rimskih vodovodnih mreža.

Drugo je ispitivanje provedeno na sveučilištu Northumbria University, Newcastle upon Tyne, Ujedinjeno Kraljevstvo, gdje se ispitivalo hidrauličke značajke rimske olovne cijevi stare 2000 godina.⁵ Rezultati ovih dvaju ispitivanja omogućavaju potpunu analizu rimskih vodoopskrbnih mreža i utjecaja olovnih cijevi na održivost rimskih vodovoda.

2. Primjena olovnih cijevi

Rimski koncept vodoopskrbe oslanjao se na gravitaciju za transport i raspodjelu vode u naselju.⁶ Rimski arhitekt Vitruvije napisao je smjernice za gradnju akvedukta ovisno o načinu dovoda vode u grad: zidanim kanalima, olovnim cijevima ili u cijevima od pečene gline, pa navodi: *ako se koriste kanali, neka zidanje bude što čvršće, i neka korito kanala ima nagib ne manji od četvrtine stope (pes – stopa = 29,6 cm) na svakih stotinu stopa, a neka zidana konstrukcija bude nadsvođena, tako da sunce ne može udarati u vodu. Kad dođe do grada, sagradite rezervoar s raspodjelnim spremnikom u tri odjeljka spojen s rezervoarom za primanje vode, a rezervoar neka ima tri cijevi, po jednu za svaki od spojnih spremnika; kada voda teče iz spremnika na krajevima, neka može doći do onoga između njih. Iz ovoga središnjeg spremnika bit će postavljene cijevi do svih bazena i fontana; od drugoga rezervoara do kupatila, tako da mogu donositi godišnji prihod državi; a s trećega u privatne kuće, da vode za javne potrebe ne ponestane; jer ljudi neće moći preusmjeriti vodu ako imaju opskrbu samo iz raspodjelne građevine. To je razlog zašto sam napravio ove podjele, a i da pojedinci koji uzimaju vodu u svoje kuće mogu svojim poruzima pomoći u održavanju dovoda vode.*⁷ Ovo je tehničko-tehnološka shema koju su rimski inženjeri uglavnom primjenjivali, ali ne doslovno. Naime, svaki od tri glavna cjevovoda često istovremeno opskrbljuju javne fontane, privatne korisnike (kuće i zanatlije) i terme, s time da srednja – centralna grana opskrbe ima prioritet pred ostalim dvjema jer opskrbljuje vodom javni gradski prostor. Javne su fontane imale prioritet pred ostalim korisnicima. Ostali su se morali prilagođavati trenutno raspoloživom kapacitetu javnoga sustava opskrbe vodom. Zato su imali svoje rezervne sustave opskrbe, tj. rezervoare ili lokalne zahvate podzemne vode i/ili kišnice.

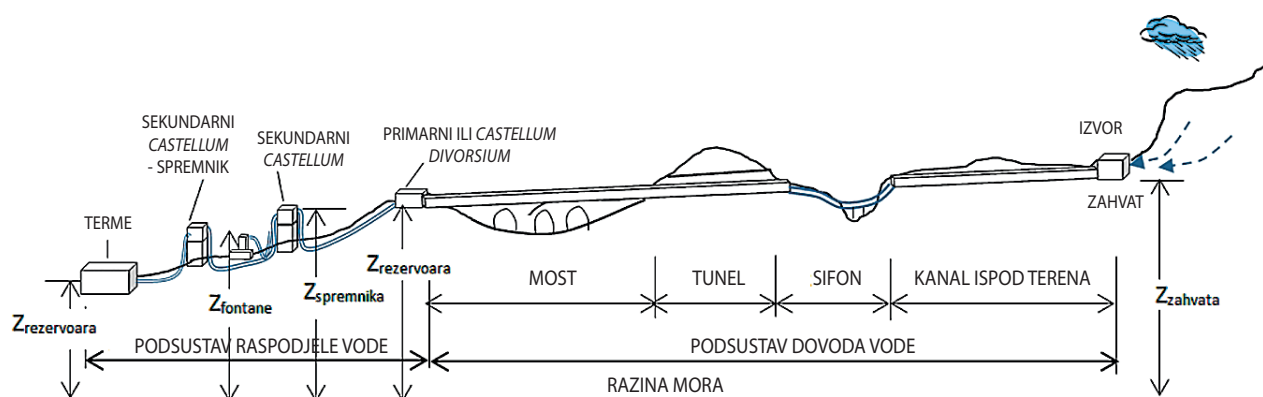
Vodoopskrbni sustav ima dva podsustava: podsustav dovoda vode do grada i podsustav raspodjele vode u

4 ANAFORA 2020.

5 M. Crapper *et al.* 2021.

6 A. T. Hodge 2002, str. 273; L. W. Mays 2010, str. 115-137; J. Margeta – K. Marasović 2020.

7 Vitruv. *De arch.* 8. 6. 1.



Slika 1

Glavni podsustavi rimskoga vodovoda i visinska hijerarhija objekata opskrbe vodom

gradu (sl. 1). Granicu između podsustava određuje položaj raspodjelnoga rezervoara. Prema tome, rezervoar za raspodjelu vode (*castellum divisorium*, tj. primarni *castellum*) krajnji je objekt sustava dovoda vode do grada, a ujedno je početni objekt sustava raspodjele vode u gradu. Kota dna rezervoara najviša je točka gradske vodovodne mreže i određuje raspoloživu potencijalnu energiju za raspodjelu vode u gradu. Zato visinski položaj rezervoara, ali i njegov položaj u prostoru, utječe na prostorni obuhvat jer gradski teren mora biti niži od kote dna rezervoara da bi voda mogla teći do svih dijelova grada, do svih fontana, termi, obrtničkih radionica itd. Položaj rezervoara za raspodjelu vode integralno se sagledava i analizira s urbanizmom, jer se grad nije mogao opskrbiti vodom i time formirati izvan granica dosega raspoložive potencijalne energije koja proizlazi iz visinskoga položaja rezervoara. Sustav je bio niskotlačan jer se voda distribuirala korisnicima samo na razini terena, tj. u prizemlju zgrada, a ne na katovima. Za opskrbu vodom na katovima zgrada zaduženi su korisnici – stanari, a ne javni vodovod.

Voda se iz rezervoara za raspodjelu trima glavnim olovnim cijevima odvodi do sekundarnih spremnika koji formiraju tri odvojene opskrbe grane, kao što je to naveo Vitruvije. Sekundarni spremnici služe za lokalnu raspodjelu vode u gradu, kontrolu tlaka u vodovodnoj mreži i na izljevnom mjestu, tj. mlaza vode na fontanama (sl. 2). Zbog toga se spremnici postavljaju na tornjevima ili na objektima, na visini od 2 do 8 m iznad cijevi iz koje voda

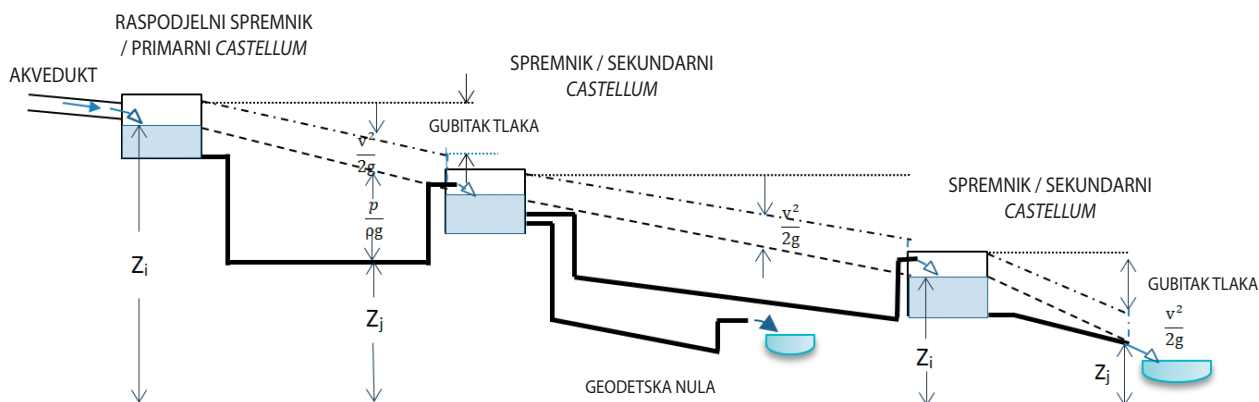
istječe na fontanama.⁸ Razina vode u spremniku mora biti dovoljno visoka kako bi osigurala gravitacijsku raspodjelu vode korisnicima koji se opskrbljuju iz toga spremnika te tlak za punjenje vodom sljedećega nižeg spremnika radi opskrbe njegovih korisnika i tako redom do granice grada. U rimskom sustavu svako izljevno mjesto, npr. fontana, uvijek je zasebnim olovnom cjevovodom povezano s pripadajućim spremnikom, obično 5 do 50 m udaljenim od spremnika.⁹ Time se lakše kontroliralo tlak (mlaz vode) na izljevnom mjestu i kapacitet istjecanja, a prekid opskrbe na jednom cjevovodu ne uzrokuje prestanak opskrbe na ostalim mjestima. Zato je sigurnost opskrbe vodom bila velika.

U vodoopskrbnoj mreži razlikujemo tranzitne olovne cijevi koje povezuju i opskrbljuju spremnike te priključke koji povezuju spremnik i opskrbeno mjesto (npr. fontanu). Najveću važnost imaju tranzitni cjevovodi i to redom kako voda teče od najvišega do najnižega, jer eventualni prekid rada jednoga od njih uzrokuje prekid opskrbe vodom na svim nizvodnim spremnicima i s njima povezanim korisnicima. Kraću rezervu osigurava volumen vode u spremniku te volumen vode u bazenima u koje voda istječe. Vjerujemo da su dimenzije spremnika, a time i volumeni vode u njima, planirani imajući u vidu moguće kraće trajanje prekida rada. Poznato je da su u gradovima podizani i znatno veći spremnici za slučaj duljih prekida rada vodovodne mreže.¹⁰ O svemu se vodilo računa kako sigurnost življenja ne bi bila ugrožena. Posebnu kategoriju čine

⁸ R. Olsson 2015, str. 30-32.

⁹ A. T. Hodge 2002, str. 305.

¹⁰ *Ibid.*, str 279.



Slika 2

Prikaz linije energije (crta-točka linija) i piezometarska linija (crtkana linija) u raspodjelnom sustavu

visokotlačne olovne cijevi koje su se koristile u izvedbi sifona na akveduktima.

Visinska hijerarhija transporta i raspodjele vode u sustavu utječe na izbor dimenzije i izvedbu cijevi. Tranzitne cijevi trebale su biti najkvalitetnije izvedbe. Nije poznato jesu li se postavljali dvojni tranzitni cjevovodi kako bi se povećala sigurnost transporta vode, kako mi to danas radimo. Raspored javnih fontana planiran je tako da one nisu previše udaljene kako prekid na jednoj ne bi predstavljao veći problem za stanovnike. Dotok i istjecanje iz spremnika regulirano je izborom kote dna spremnika, duljine i dimenzija cijevi te primjenom posebnoga baždarenoga brončanog komada cijevi (*calix*) koji se postavljao na spoju cijevi sa spremnikom, a koji se koristio za službeno mjerenje kapaciteta istjecanja i bilanciranje vode u spremniku.¹¹ Kombinacijom ovih elemenata ostvarivao se potrebni kapacitet vodoopskrbne mreže i stabilna razina vode u spremniku potrebna za rad sustava.

Sustav je uglavnom bio bez mrtvih završetaka – zatvarača, tako da je od zahvata do mjesta istjecanja voda neprestano protjecala kroz sustav, a neutrošena pitka voda na fontanama i drugim mjestima prelijevala se direktno u kanalizaciju ili na ulice i potom u odvodni sustav oborinskih voda. Privatni korisnici imali su zatvarače radi kontrole uzimanja vode iz javnoga sustava. Tečenje je stacionarno (tlak, količina, brzina), sve dok se ne promjene uvjeti tečenja, npr. profil cijevi, visina tornja i

slično. Stalna protočnost, 24 sata u danu, tehnološka je značajka rimskih vodovoda koja osigurava stalnu izmjenu vode u spremnicima i cijevima i time svježju i zdravu vodu te stalnu besplatnu dostupnost vode stanovnicima u naselju. Vrijeme kontakta vode u cijevima s olovom bilo je relativno kratko i raslo je s tečenjem vode u sustavu, od raspodjelnoga rezervoara prema kraju mreže. U gradu veličine Salone vrijeme kontakta nije bilo dulje od 60 minuta. U tako kratkom vremenu kontakta vode i unutrašnje stijenke olovnih cijevi mogle su se otopiti u vodi samo male količine olova, tako da olovo nije ugrožavalo kakvoću vode. Navedene značajke važna su socijalna i zdravstvena karakteristika rimskoga vodoopskrbnog sustava koja je utjecala i na korištenje olovnih cijevi. Naime, rimski su inženjeri bili svjesni štetnosti olova za zdravlje ljudi, ali su olovne cijevi koristili za gradnju vodovoda jer su vjerojatno znali da kraći kontakt olova s vodom neće ugrožavati zdravlje.¹² Međutim, štetnost je velika ako se analizira životni ciklus olovnih cijevi, od rudarenja, proizvodnje do odlaganja u okolišu.¹³ To se može reći i za korištenje olovnih posuda za pripremu toplih pripravaka, kao spremnika za razne napitke različitoga kemijskog sastava, te pripremu lijekova od olova.¹⁴

Hidraulički je koncept rada rimskih vodovoda jednostavan jer se zasniva na sili gravitacije te stalnom slobodnom otjecanju vode kao i u prirodnom okolišu. Kažemo da je to »zeleni koncept« pogonjen prirodnim silama. Da

¹¹ Frontin. *Aq.* I. 35-36.

¹² Vitruv. *De arch.* 8. 6. 8-11.

¹³ M. Boldyrev 2018, str. 15.

¹⁴ Plin. *HN VI.* XXXIV. 47-56.

gubitaka, v brzina vode u cijevi (m/s).¹⁶ Kao što je rečeno, režim strujanja uglavnom se nije mijenjao ako nije došlo do promjena u izvedbi sustava. Razlikujemo glavni ili linijski gubitak uslijed trenja vode u cijevi i manji lokalni koji nastaje zbog lokalnih promjena – elemenata cjevovoda kao što su spojevi, skretanja, grananja, ventili itd. U skladu s time protok u cijevi Q (m³/s) ovisi o koti – vodostaju spremnika (*castellum*) (h_R), koti izljevnaog mjesta (Z_j), promjeru cijevi, duljini i značajkama cjevovoda na računskoj/razmatranoj dionici (f, K):

$$Q = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_R - Z_j)}}{\sqrt{\sum K + f \cdot \frac{L}{D}}} \cdot D^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

Rimski su inženjeri znali što se događa na izljevima mjestima ako se mijenja tlak vode, odnosno visina slobodnoga lica vode u spremniku u odnosu na položaj izljeva, ali to nisu znali izračunati. Plinije Stariji jasno tumači funkcioniranje cjevovoda navodeći koncept spojenih posuda: *Tamo gdje se voda želi dizati uvis, treba je prenositi u olovim cijevima; voda se, treba zapamtiti, uvijek diže do razine svoga izvora.*¹⁷ Ove jednostavne smjernice, inače navedene za planiranje akvedukata i sifona, u suštini su korištene za planiranje vodovodne mreže, cjevovoda i spremnika.

3. Olovne cijevi i izvedba cjevovoda

3.1. Proizvodnja i značajke cijevi

U Rimskom Carstvu olovo je bilo lako dostupno i jeftino, a dobivalo se najviše kao usputni produkt kod proizvodnje srebra.¹⁸ Rimljani su razlikovali dva tipa olova: »bijelo«, danas poznato kao kositar, i »crno«, olovo kakvo i danas poznajemo. Samo se crno olovo koristilo za proizvodnju cijevi. Naime, bijelo je bilo daleko skuplje od crnoga. Međutim, oba su tipa bila potrebna za proizvodnju. Crno olovo dobiva se iz prirodnih galenitnih ruda ili kao nusprodukt iz ruda iz kojih se proizvodi srebro. Prvo se izdvaja srebro, a potom iz ostatka prerade olovo. Sve je to detaljno opisao Plinije Stariji.¹⁹ Lako se kuje i obrađuje, a otporno je na koroziju vode. Unutrašnje i vanjske stijenke cijevi relativno su glatke i postojeane te povoljne za vodoopskrbu.

Čvrstoća popuštanja olova je 5,5 MPa, dok je krajnja vlačna čvrstoća 17 MPa, što je deset puta manje od aluminijske ili bronzne. Olovo je mekano i sklono puzanju

– deformiranju. Puzanje je pojava kada se dugotrajno opterećeni materijali, koji su pod utjecajem neke konstantne (statičke) sile, ovisno o temperaturi, počinju postupno rastezati. To je utjecalo na proizvodne značajke cijevi jer su trebale imati veću tvrdoću, odnosno debljinu stijenke. Čvrstoća je morala biti dovoljna u odnosu na unutrašnji tlak vode i aksijalnu silu tlaka vode koja se javlja u cijevi na mjestima skretanja, grananja, završetcima i drugim mjestima gdje se nalaze promjene na cjevovodu. Najveće opterećenje imaju vertikalni cjevovodi jer su još opterećeni i težinom same cijevi. Tipičan primjer je cjevovod koji se nalazi na zidu vodotornja (sl. 3). Uz navedeno, cijevi i spojevi moraju imati potrebnu čvrstoću na opterećenje koje se javlja kod transporta, prenošenja i instaliranja. Sve je to utjecalo na proizvodnju cijevi i tehniku spajanja.

Cijevi se proizvode tako da se olovo najprije zagrije i rastali te potom rastaljeno izlijeva u kalup koji oblikuje ravnu ploču duljine oko 3 m (10 rimskih stopa, *pes* – stopa = 29,6 cm) (sl. 4a), potom zakrivljuje oko čvrstoga okruglog drveta radi formiranja cijevi (sl. 4c(i)), čiji se krajevi spajaju i potom zatvaraju po cijeloj duljini uz lemljenje olovom (sl. 4a). Tako se stvara izduženi profil cijevi (sl. 4b).²⁰ Olovne ploče koristile su se i za oblaganje kanala akvedukta i spremnika, ali u manjoj mjeri.

Uzdužni spoj cijevi izvodio se na više načina ovisno o veličini cijevi, debljini stijenke i potrebnoj čvrstoći (sl. 4c). Bitno je napraviti homogen spojni materijal brtvećih smjesa kako bi se dobila vlačna čvrstoća jednaka u svim smjerovima. Tako je okomita otpornost na tlak dva puta veća od uzdužne otpornosti, a cijev može izdržati visok unutrašnji tlak vode prije nego što uzdužno pukne. U slučaju kada je okomita čvrstoća veća od uzdužne, cijevi su sklone pucanju na uzdužnom spoju. Zbog toga spoj prikazan na slici 4c(ii) nije povoljan za veće unutrašnje tlakove, dok je spoj na slici 4c(iii) povoljniji i najčešće se koristio, a čvrstoća spoja je ovisila o kvaliteti lemljenja. Spoj na slici 4c(iv) povoljan je kod tankih cijevi čiji se lim može dobro zavrtati u čvrst spoj otporan na razdvajanje. Kvaliteta lemljenja važan je čimbenik za čvrstoću i vodonepropusnost spoja tako da je debljina lemljenja bila velika.

Veličina cijevi određena je širinom ravne ploče. Na taj način veličina cijevi u jedinici *digiti* odgovara opsegu cijevi ili je nešto manja. Vitruvije je opisao osam standardnih dimenzija cijevi na osnovu veličine opsega u jedinici prst

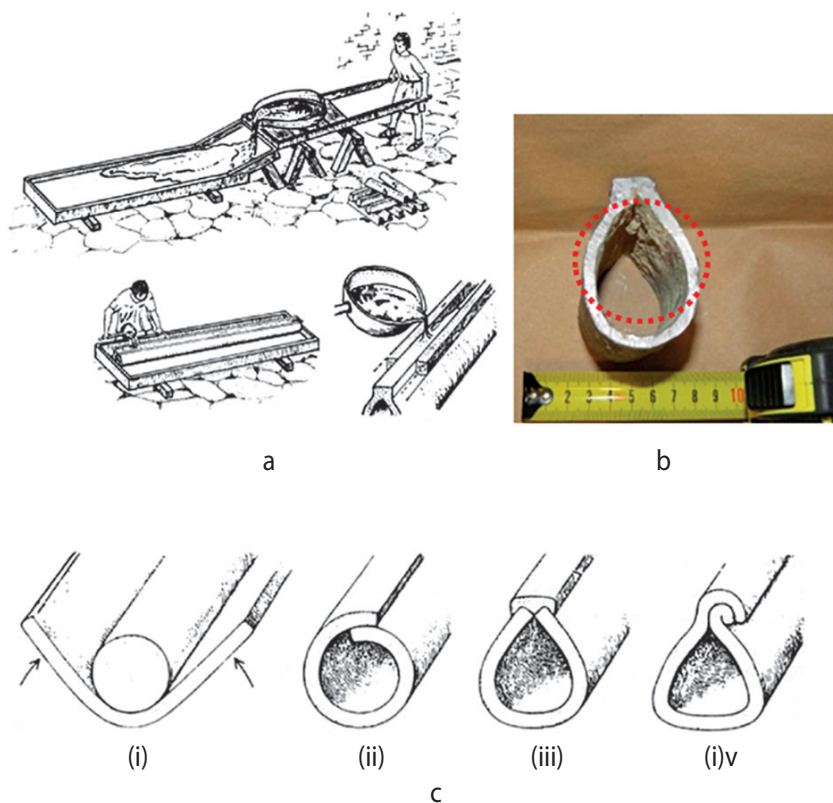
¹⁶ J. Margeta 2010, str. 647-649.

¹⁷ Plin. *HN V*. XXXI. 32.

¹⁸ M. Boldyrev 2018, str. 7.

¹⁹ Plin. *HN VI*. XXXIV. 47-56.

²⁰ Plin. *HN V*. XXXI. 32; Vitruv. *De arch.* 8. 6. 4; A. T. Hodge 2002, str. 309-313.



Slika 4

Proizvodnja cijevi i presjek cijevi pronađene u Saloni: a) proizvodnja cijevi, b) poprečni presjek, c) izrada uzdužnoga spoja cijevi; prilagođeno prema <http://www.romanaqueducts.info/technicalintro/lead1.htm> (18. 10. 2021.)

(*digitus* = 1,85 cm).²¹ On navodi da je potrebna minimalna duljina ploče – cijevi 10 stopa (*pes* = 29,6 cm) te navodi težinu ploče za svaku dimenziju cijevi u librama (*libra* = 0,3289 kg). Najlakša cijev je bila *quinaria*, težine od 60 libri (cca 20 kg), opsega 9,25 cm (Ø 2,94 cm), a najveća *centenaria*, težine 1200 libri (cca 393 kg) te opsega 185 cm (Ø 58,89 cm).²² Težine koje navodi za svaku veličinu cijevi daju sličnu debljinu cijevi, približno 1 cm. Ovaj podatak često je dovodio do različitih interpretacija debljine stijenke cijevi.²³ Iz doslovne interpretacije proizlazi da sve olovne cijevi, bez razlike na širinu ploče i veličinu cijevi, imaju istu debljinu stijenke. To bi značilo da se otpornost cijevi na unutrašnji tlak u suštini smanjuje s veličinom cijevi, a što nije teoretski ispravno. Međutim, razlog zbog kojega je predložena debljina od 1 cm vezana je uz

izvedbu cjevovoda i dodatno opterećenje koje se javlja s položajem u mreži, a ne samo uz unutrašnji tlak koji je u vodovodnoj mreži mali. Cjevovod mora biti dovoljno čvrst i krut što se dobiva debljinom od 1 cm ili više, ovisno o težini cijevi. Rezultati provedenoga ispitivanja to potvrđuju. Iako je Car August 11. godine propisao sustav od 25 standardnih dimenzija cijevi, u praksi se koristio samo manji broj.²⁴

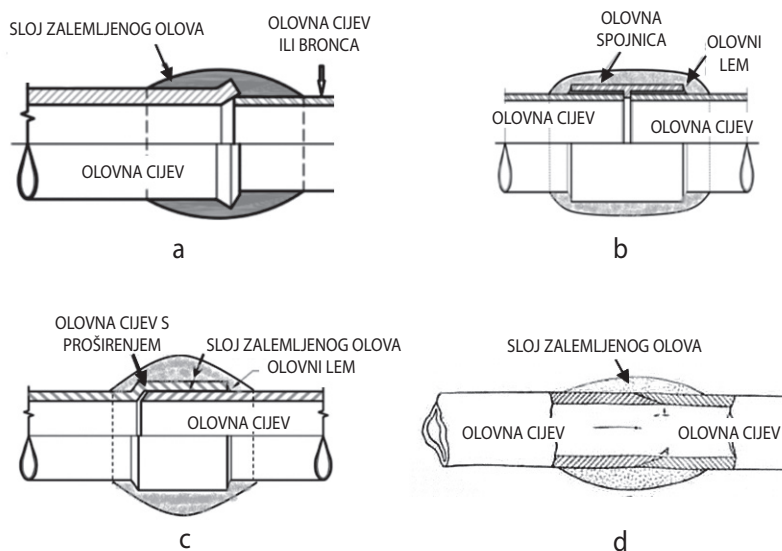
Rimski su inženjeri proces proizvodnje cijevi detaljno opisali, ali nisu proces i način međusobnoga spajanja. Prema nalazima može se zaključiti da su se u praksi koristili različite tehnike (sl. 5). Cijevi su najčešće pričvršćene jedna na drugu pomoću olovnoga omotača od lemljenoga olova oko obaju krajeva cijevi, s tim da je jedna cijev bila malo proširena, odnosno imala vrlo kratki naglavak (sl. 5a). To

²¹ Vitr. *De arch.* 8. 6. 4.

²² B. Ilakovac 1982, str. 175.

²³ D. Deming 2020.

²⁴ Frontin. *Aq.* I. 37-63.



Slika 5
Moguća rješenja spajanja olovnih cijevi: a) olovni lem, b) olovna obujmica, c) spoj naglavak, d) izravni spoj

je tehnika spajanja koja se koristi i danas. Koristile su se i obujmice izrađene iz olovnoga lima koje se leme oko obaju krajeva cijevi (sl. 5b), što je vrlo siguran i čvrst spoj, ali složen za izvedbu. Cijevi su se povezivale spojem na naglavak, tj. umetanjem jednoga kraja u drugi prošireni kraj cijevi (sl. 5c). Zatim je spoj zabrtvljen slojem zalemljenoga olova. To je slična izvedba kao u prvom primjeru (sl. 5a), ali složenija jer zahtijeva dulju izvedbu naglavka. Koristila se kod većih cijevi kod kojih je lakša izvedba naglavka. Spoj opterećen silom razvlačenja dodatno je ojačavan zabijanjem većega čavla kroz oba kraja cijevi, primjerice kod cjevovoda na kosim terenima. Koristili su se i direktni sučelni spojevi koji se brtve debljim slojem zalemljenoga olova, ali rjeđe zbog manje čvrstoće spoja kod savijanja cijevi (sl. 5d). Sve navedene tehnike spajanja koriste se i danas, ali prilagođene drugim cijevnim materijalima.

Rimljani su razvili vrlo kvalitetnu tehniku obrade olova i lemljenja tako da su spojevi bili pouzdani. Za lemljenje cijevi koristili su mješavinu zvanu *tertiarrum*, dvije trećine crnoga olova i trećinu bijeloga, a sve kako bi se postigla potrebna kvaliteta lemljenja.²⁵ Koristili su i druge mješavine crnoga i bijeloga olova i drugih metala ovisno o potrebama.

Izgradnja vodovodne mreže

Tehnika gradnje cjevovoda prilagođava se cijevnom materijalu. Gradnja počinje trasiranjem cjevovoda po gradskoj površini. Raspored korištenja prostora (stambenih, javnih), ulica, trgova i objekata sličan je u svakom rimskom gradu (hramovi, forum, tržnica, terme, teatar, amfiteatar), a određuju ga pravokutno raspoređene ulice oko dviju glavnih, *cardo* (sjever-jug) i *decumanus* (istok-zapad).²⁶ Time je određen raspored korisnika vode te javnih fontana. One su bile najbrojnije, a nalazile su se pretežno po uglovima ulica na udaljenosti 50 do 100 m (sl. 6).²⁷ Privatni korisnici (kuće i obrtnici) uglavnom su bili smješteni unutar stambenih zona grada (*insula*). Grad je bio utvrđen te su obrambeni zidovi grada bili granica vođooskrbnoga područja, odnosno gradskoga vodovoda.

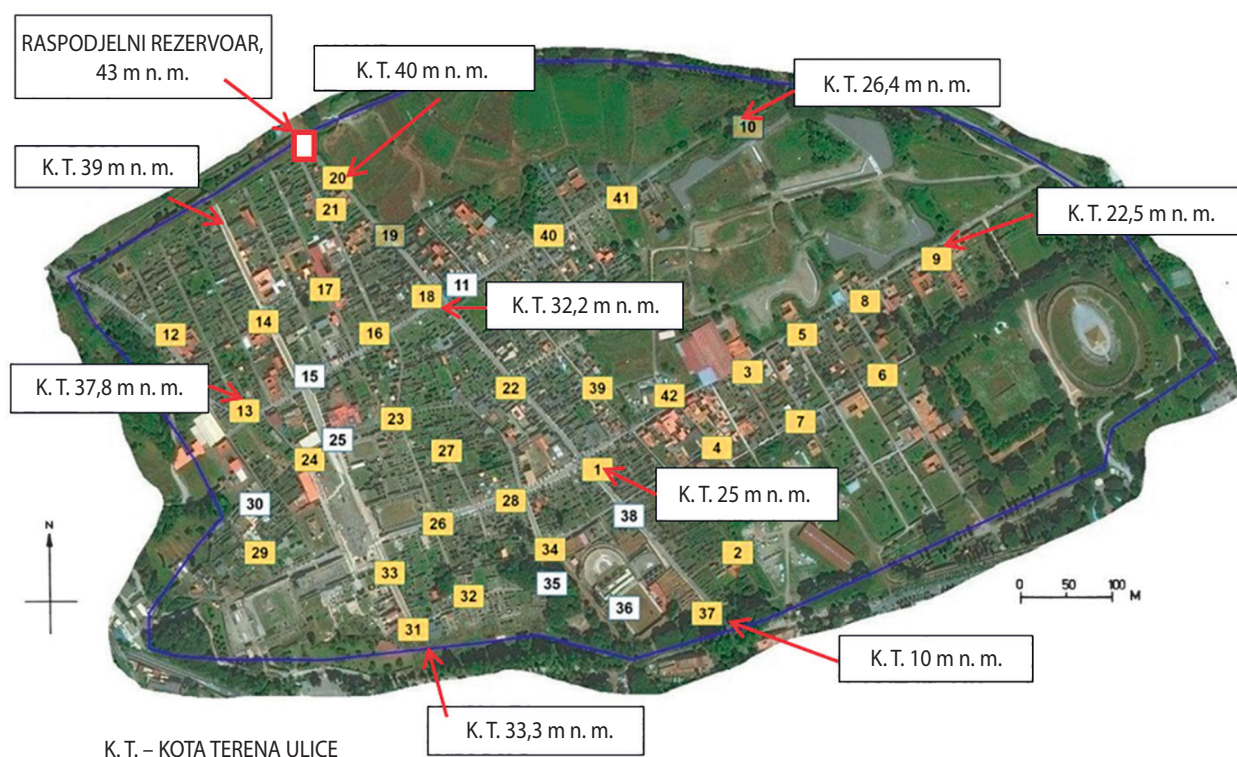
Ulične javne fontane jednostavne su izvedbe (sl. 3). Na važnijim mjestima u gradu te u dvorištima privatnih kuća grade se manje ili veće ukrasne fontane. U gradu veličine i značenja Salone bio je veći broj jednostavnih uličnih fontana te ukrasnih i dvorišnih fontana različite izvedbe. Ostaci kamene posude koja je možda bila bazen manje ukrasne fontane pronađeni su u Saloni (sl. 7a, 7b).²⁸ To bi mogla biti ukrasna fontana na stupu, kakve se

25 Plin. *HN* VI. XXXIV. 48.

26 P. MacKendrik 1956; J. Sewell 2014.

27 A. T. Hodge 2002, str. 305; R. Olsson 2015, str. 48.

28 M. Topić 2010, str. 46, 48-49, 55, kat. br. 21. Crtež po kojemu je izrađen prijedlog izgleda fontane napravila je Ivanka Vukšić. Vanjski promjer je 90 cm, unutrašnji 72 cm; debljina stijenske na obodu je 7 – 9 cm, na dnu sačuvanoga dijela 8 cm.



Slika 6

Zračni snimak Pompeja s položajem glavnih cjevovoda, gradskih fontana i kotama ulica na mjestu fontana; prilagođeno prema M. Monteleone – M. Crapper – D. Motta 2021.

i danas proizvode po uzoru na antičke fontane (sl.7c), a njezin mogući originalni izgled je vidljiv na detalju freske iz Pompeja (sl. 7d).

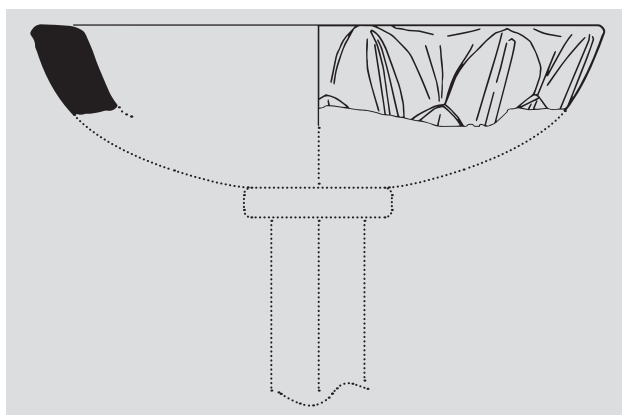
Nakon trasiranja kopa se rov ili, kod kamenih podloga, kleše žlijeb za polaganje cijevi. Cijevi se izvan rova spajaju, a potom polažu u žlijeb ili u rov. Instaliraju se u nogostup ili u drugi prostor izvan ulica (sl. 8). Nastojalo se više cijevi voditi paralelno istim koridorom kako bi se zauzimao manji prostor te olakšao nadzor i održavanje (sl. 8c). Cjevovodi se nisu smjeli polagati na mjestima gdje može doći do nagnječenja cijevi (sl. 8a). Zbog plitkoga polaganja radna širina rova ili žlijeba nije bila veća od 20 cm sa svake strane cijevi (sl. 8b i d). Visina tjemena cijevi morala je biti ispod razine nogostupa kako ne bi došlo do njezina nagnječenja. Ako se polagala direktno na ravan teren, što nije bila rijetkost, nije se kopao rov niti se izvodila zaštita od nagnječenja (sl. 8c). To su bili tereni po kojima nije bilo javnoga prometa. Cijevi koje ulaze u spremnik ili izlaze iz njega na vodotornjevima također su bile vidljive, a za zid tornja pričvršćivane su metalnim obujmicama (sl. 3).

Montirani cjevovod provjerava se tako da se izlaz iz cijevi zatvori, a cijev napuni vodom. Time se javlja maksimalni radni tlak vode u cijevi. Nakon provjere cjevovodi se zatrpavaju ili pričvršćuju obujmicama, ovisno o tome polažu li se u roveve ili se razvlače po terenu. Pri instaliranju u kamene žljebove pričvršćenje nije potrebno.

U vodovodnoj mreži cjevovodi mijenjaju pravac, granaju se, te se izrađuju priključci. Nisu se proizvodili standardni spojni komadi kao što su lukovi, redukcije profila, križni komadi i slično, kako se to radi danas. Umjesto toga koristili su se komadi cijevi koje su se oblikovali i prilagođavali potrebama te spajali lemljenjem olovom. Koristile su se i tlačne posude s jednim ulazom i više izlaza na različite strane cjevovoda (sl. 9). Primjena olovnih posuda na mjestima grananja vrlo je domišljato rješenje jer je posuda veća od dovodne cijevi i omogućava lakše spajanje više manjih cijevi, a volumen posude ublažava brzinu vode i promjenu tlaka te ujedno osigurava bolju raspodjelu vode na priključke, posebno ako ih ima više. Posudu nije bilo teško proizvesti jer je zagrijano olovo



a



b



c



d

Slika 7

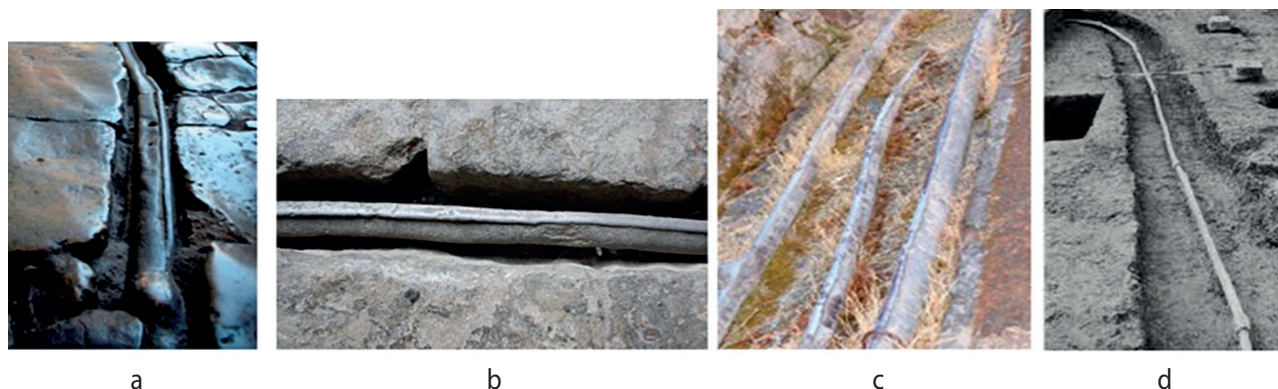
Ukrasna dvorišna fontana: a) ulomci fontane pronađeni u Saloni, b) prijedlog izgleda fontane iz Salone, c) moderna imitacija rimske fontane, d) detalj freske iz Pompeja na kojoj je naslikana fontana

mekano, lako se oblikuje i spaja. Nešto je složenija bila izvedba direktnih bočnih priključaka »cijev na cijev« koji su se koristili kada su cijevi slične veličine (sl. 9c), križnih komada, ventila i vertikalnih skretanja, kako se to danas radi. Spojevi olovnih cijevi i bronce (ventila) izvodili su se direktno na cijev ili na tlačnu posudu uz intenzivno lemljenje olovom (sl. 9b).

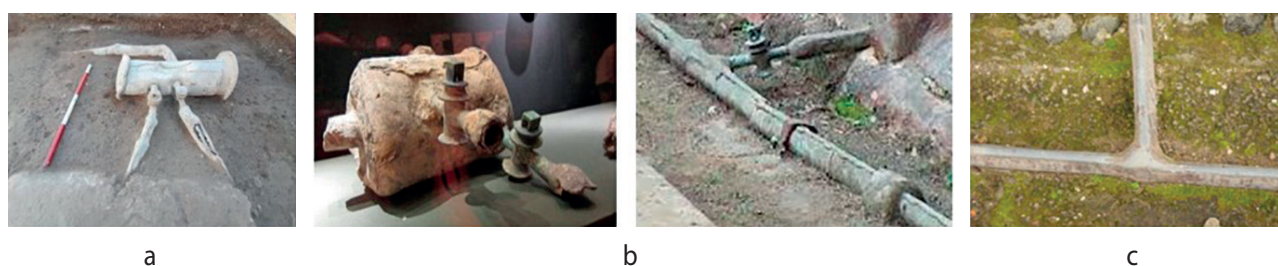
Instalacija cjevovoda dobro je planirana kako bi se ostvarila njegova zaštita i sigurnost opskrbe vodom. Cjevovod položen po terenu kao i na zidovima tornjeva za vodu izložen je vanjskom djelovanju tako da su deformacije bile uobičajene (sl. 8a). Cijevi su se štatile polaganjem u žlijeb (sl. 7b) ili polaganjem u zaštićene koridore (sl.

8c). Polaganjem ispod površine terena cijevi se štite od opterećenja i od visokih temperatura (sl. 8d). Međutim, polaganje ispod terena najčešće se izvodilo kod ilegalnih priključaka kako bi se oni sakrili. Horizontalna i vertikalna skretanja cjevovoda dodatno su se ojačavala kako bi se spriječilo oštećenje uzdužnoga spoja i spoja dviju cijevi. Rast temperature olova i vode u cijevima povećava veličinu otapanja olova u vodi tako da je najbolje polagati cijevi ispod površine terena ili je zaštititi od sunca polaganjem po manje sunčanim dijelovima površine, posebno u sunčanom mediteranskom podneblju (sl. 8d).

Vodovodna mreža olovnih cijevi u gradovima većim je dijelom otvorena i vidljiva. To je specifično za rimske



Slika 8
Primjeri polaganja cijevi u naselju; prilagođeno prema https://en.wikipedia.org/wiki/Roman_lead_pipe_inscription



Slika 9
Spojni komadi i ventili: a) korištenje posuda, b) spoj ventila i cijevi, c) direktna izvedba ogranka; prilagođeno prema <http://www.romanaqueducts.info/technicalintro/lead1.htm> (18. 10. 2021.)

vodovode jer se u kasnijem periodu, kao i danas, vodovodna cijevna mreža polaže isključivo ispod razine terena. Danas se koriste takozvani zatvoreni tlačni sustavi u kojima se svako domaćinstvo povezuje direktno s raspodjelnom mrežom cijevi. Time se u gradu dobiva velik broj cjevovoda koji prelaze ulice pa se moraju zaštititi polaganjem ispod površine. Voda se otvaranjem slavine koristi prema potrebi, jer se voda plaća, zbog čega je vrijeme zadržavanje vode u cijevima dugo, a time je moguće i njezino onečišćenje cijevnim materijalom. Zato u modernim sustavima olovne cijevi nisu prihvatljive.

Cijevi položene po površini terena te po zidovima tornjeva za vodu bile su lako vidljive, a time i svi nedostaci, kvarovi i curenja. Uz to, cijevi su bile dostupne za brz popravak. Sve su se promjene brzo uočavale, pa i ilegalni spojevi i krađa vode. Osim toga, to je rješenje jeftinije od polaganja ispod površine. Kako je tlak u cijevima nizak, istjecanja su bila uglavnom mala, a time i gubitci vode. Preljevanja viška vode na fontanama bila su daleko veća,

tako da manja curenja cjevovoda nisu bila od većega utjecaja na opskrbu vodom, osim ako cijev nije značajno oštećena. Voda je stalno tekla kroz cijevi pa nije bilo većega zagrijavanja, a time ni većih negativnih utjecaja na njezinu kakvoću. Uz to, stalni je protok smanjivao mogućnost smrzavanja pri niskim temperaturama. Vidljivost cijevne mreže nije značajno narušavala izgled urbanoga prostora jer nije bilo mnogo cijevi. Već rekoso da su kućni priključci bili rijetkost, imali su ih samo obrtnici i bogatiji građani koji su plaćali vodu.

3.2. Ispitivanje cijevi

Izdržljivost cijevi i spojeva na unutrašnji tlak vode te hrapavost unutrašnje stijenke cijevi i veličina lokalnoga gubitka tlaka vode na spoju cijevi, odnosno hidrauličke značajke, osnovni su podatci koji se koriste za vrjednovanje cijevnih materijala i cijevi. Rimske smjernice za izbor debljine cijevi u odnosu na mogući unutrašnji tlak nisu poznate, tako da su odluke donosili na temelju iskustva

proizvođača i montera. Kod gradnje sifona tlak je imao najveći utjecaj na izbor duljine, debljine cijevi i izvedbu spoja. To su specifične gradnje u kojima su se upotrebljavale posebne cijevi većih dimenzija (28 – 30 cm), debljina stijenke (2,5 – 3 cm) i duljina (do 11 m). Cijevi pronađene u Saloni, kao i na drugim lokacijama, imaju različite debljine stijenke. Tako je u Saloni pronađena cijev dimenzija 10 *digiti* (*denaria*) koja ima opseg 18,5 cm i debljinu 5 mm, te cijev dimenzija 20 *digiti* (*vicenaria*) s opsegom 37 cm i debljinom 10 mm. Veće cijevi te cijevi namijenjene većem tlaku vode u pravilu imaju deblje stijenke; tako je u Ostiji nađena cijev promjera 15 cm i debljine stijenke 25 mm.²⁹ Očito je da su rimski inženjeri bili svjesni utjecaja debljine stijenke cijevi na izdržljivost u odnosu na unutrašnji tlak vode i vanjska naprezanja, ali, kako smo već kazali, to nisu znali izračunati niti izraziti.

Da bi se razjasnile navedene pretpostavke provedeno je ispitivanje cijevi na unutrašnji tlak. Ispitivanje cijevi provela je tvrtka ANAFORA d. o. o. Split (sl. 10). Korištena je cijev pronađena u Saloni od 10 *digiti* (*denaria*), opsega 18,5 cm, debljine 5 mm i duljine 40 cm. Izrezana je od deformirane cijevi duljine 2 m (sl. 10a). Ispitivanje je planirano u skladu s hrvatskim standardom za tlačne cijevi (sl. 10b).³⁰

Na početku ispitivanja utvrđeno je da se kod tlaka od 0,8 bara (8 m) pojavljuje vlaženje na jednom dijelu uzdužnoga spoja. Oštećenje je vrlo malo tako da se moglo sanirati, a ispitivanje nastaviti. Tlak u cijevi povećan je na 4 bara. Cijev je pregledana te je utvrđeno da se promjene nisu pojavile. Zaključeno je da cijev i uzdužni spoj mogu izdržati unutrašnji tlak od 4 bara. Potom je odlučeno da se tlak podiže do razine loma cijevi, do čega je došlo kod tlaka od 5,1 bara i to do razdvajanja uzdužnoga spoja. Tada se, očekivano, pojavilo jako istjecanje i pad tlaka vode u cijevi (sl. 10c).

Crapper i suradnici (2021.) ustvrdili su da je unutrašnja hrapavost korištene i dijelom kamencem obložene olovne cijevi stare oko 2000 godina 0,9 mm, što je identično hrapavosti betonskih cijevi (0,9 mm).³¹ Utvrđeno je i da je lokalni koeficijent gubitaka spoja dvaju cijevi $K = 1,159$, a što je slično gubitku kod oštrog skretanja cjevovoda za 90° ($K = 1,1$).³² To je velika hrapavost i lokalni gubitak spoja, što je utjecalo na hidrauličke značajke olovnih cijevi tako da su ukupni gubitci tlaka vode bili veliki u usporedbi s

današnjim cjevovodima (hrapavost lijevanoželjezne cijevi 0,25 mm). O tome je trebalo voditi računa kod planiranja rasporeda fontana i spremnika, jer cijevi nisu smjele biti preduge kako bi tlak vode na izlaznom cjevovodu bio dovoljan za formiranje željenoga mlaza vode na fontanama. Međutim, olovo je otporno na koroziju vode tako da se tijekom vremena hrapavost cijevi malo mijenja, a time i hidrauličke značajke raspodjele vode, pa je životni vijek cijevne mreže bio vrlo dugačak. Kod ispitivanih cijevi to je 2000 godina, što je nezamislivo za moderne cijevne materijale kod kojih je to 50 do 100 godina. Zato su olovne cijevi bile vrlo povoljne.

4. Diskusija

Rezultati jasno pokazuju da cijev pronađena u Saloni može s velikom sigurnošću izdržati unutrašnji tlak od 4 bara (40 m vodnoga stupca) te da do razdvajanja spoja cijevi dolazi kod tlaka većega od 5 bara. Budući da je razina vode u spremnicima vodotornjeva u vodovodnoj mreži naselja u odnosu na os cijevi u vodovodnoj mreži bila niža od 10 m, u Pompejima manje od 8 m, proizlazi da su cijevi bile vrlo pouzdane u odnosu na unutrašnji tlak. Iako spoj dviju cijevi nije ispitivan, može se pretpostaviti da se to odnosi i na njega jer je način spajanja cijevi bio čvršći od uzdužnoga spoja koji je izdržao tlak do 5 bara.

Dodatno opterećenje koje nastaje izvedbom i tečenjem vode također utječe na potrebnu čvrstoću cijevi. Na svim promjenama cijevi i smjera cjevovoda (skretanja, grananja, promjena profila, završetci itd.) javlja se dodatno opterećenje jer tlak u cijevi izaziva aksijalnu silu koja djeluje na cjevovod i spojeve. Aksijalna sila F koja djeluje uzduž osi cjevovoda $F = p \cdot A$, gdje je A površina poprečnoga presjeka (m^2), a p unutrašnji tlak (Pa), nije bila velika jer su poprečne površine cjevovoda, kao i tlak vode u cjevovodima, bili mali. Ova sila nema djelovanje na ravnim diionicama. Međutim, rezultanta aksijalne sile na mjestima promjene pravca nastoji pomaknuti/izmaknuti cjevovod u smjeru djelovanja sile što opterećuje cijevi i spoj dvaju cijevi. Veličina sile F je funkcija i veličine skretanja cjevovoda α , tako da je kod skretanja od 90° sila najveća, $F = 2 \cdot p \cdot \sin \alpha / 2$.³³ Nastala sila povećava vlačno naprezanje cijevi kao i spojeva koje nastoji razdvojiti. To su mjesta na kojima cijevi treba ojačati i zaštititi. Rimskim inženjerima ovaj je problem bio poznat te su ga najčešće rješavali sidrenim

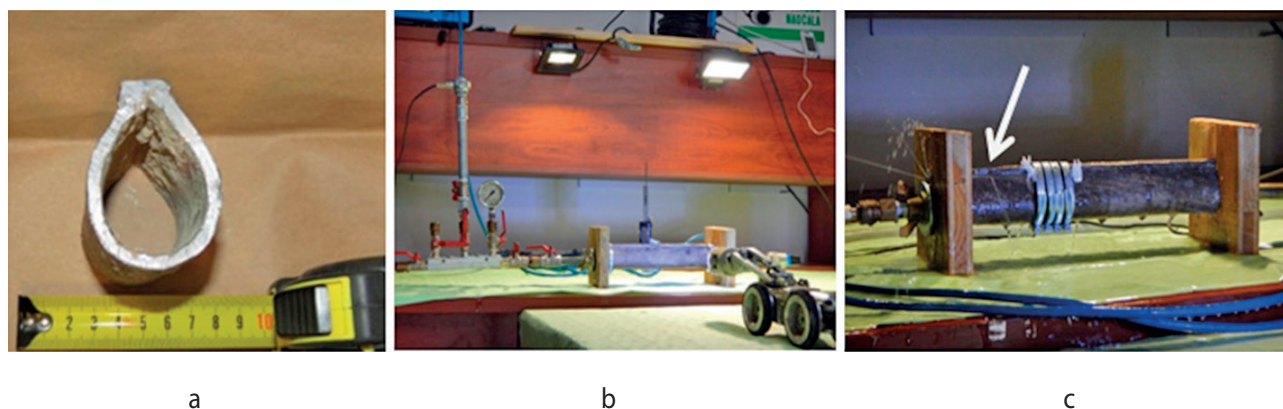
29 A. T. Hodge 2002, str. 309.

30 Hrvatski normativni dokument HRN-EN 805:2005.

31 M. Crapper *et al.* 2021.

32 J. Margeta 2010, str. 653-655.

33 *Ibid.*, str. 680.



Slika 10

Ispitivanje na tlak koje je provela tvrtka ANAFORA d. o. o. Split: a) testirana cijev, b) ispitni stol, c) pucanje spoja cijevi

blokovima betona na koje se oslanjala cijev. To se i danas radi na sličan način. Ako je cijev položena u kameni žlijeb nogostupa, tada kameni blok nogostupa preuzima i neutralizira aksijalnu silu. To je prednost polaganja cijevi u žljebove. Rimski inženjeri nisu znali izračunati veličinu sile koja se javlja na skretanjima cijevi pa su primjenjivali iskustva iz prakse.

Značajno veće opterećenje javlja se kod izvedbe vertikalnoga cjevovoda i cjevovoda položena na strmim terenima, poput dovoda i odvoda vode iz spremnika na vodotornju, prvenstveno zbog težine cijevi (gustoća olova $11,34 \text{ g/cm}^3$) (sl. 3.). Sidrenjem cijevi obujmicama na zid tornja spriječilo se izmicanje i izvijanje cjevovoda. Slično radimo i danas. Međutim, vertikalne cijevi i njihovi spojevi dodatno su opterećeni težinom same cijevi, što je moglo uzrokovati njezinu deformaciju jer je olovo osjetljivo na puzanje, posebno kod viših temperatura. Najveće opterećenje cijevi i spojeva javlja se na dnu vertikale gdje se ujedno javlja skretanje cjevovoda na teren. Olovo je teško tako da su i cijev i tlo na koje se ona oslanja značajno opterećeni. Tu se vertikalna cijev oslanja na teren koji preuzima aksijalnu silu i opterećenje težine cijevi i vode u njoj (sl. 3 i 11a). Na tim mjestima cijevi i spoj moraju imati veću čvrstoću nego što je potrebna u odnosu na horizontalne dionice te dodatak kojim se smanjuje tlak na teren (sl. 11b). Danas se radi na sličan način korištenjem posebnoga cijevnog elementa. Uz to, mjesto skretanja ojača se debljim slojem olova, tj. obujmicom (sl. 11c). Skretanje cijevi na ulazu i izlazu u spremnik nije stvaralo veću aksijalnu silu jer je tlak vode na tim mjestima vrlo mali, oko 1 m.

Rimski su inženjeri znali za ove probleme te su proizvodili i koristili cijevi veće čvrstoće nego što je to potrebno u odnosu na unutrašnji tlak, a što je dokazano provedenim ispitivanjem cijevi. O svemu se vodilo računa pa su cjevovodi dobro funkcionirali stoljećima.

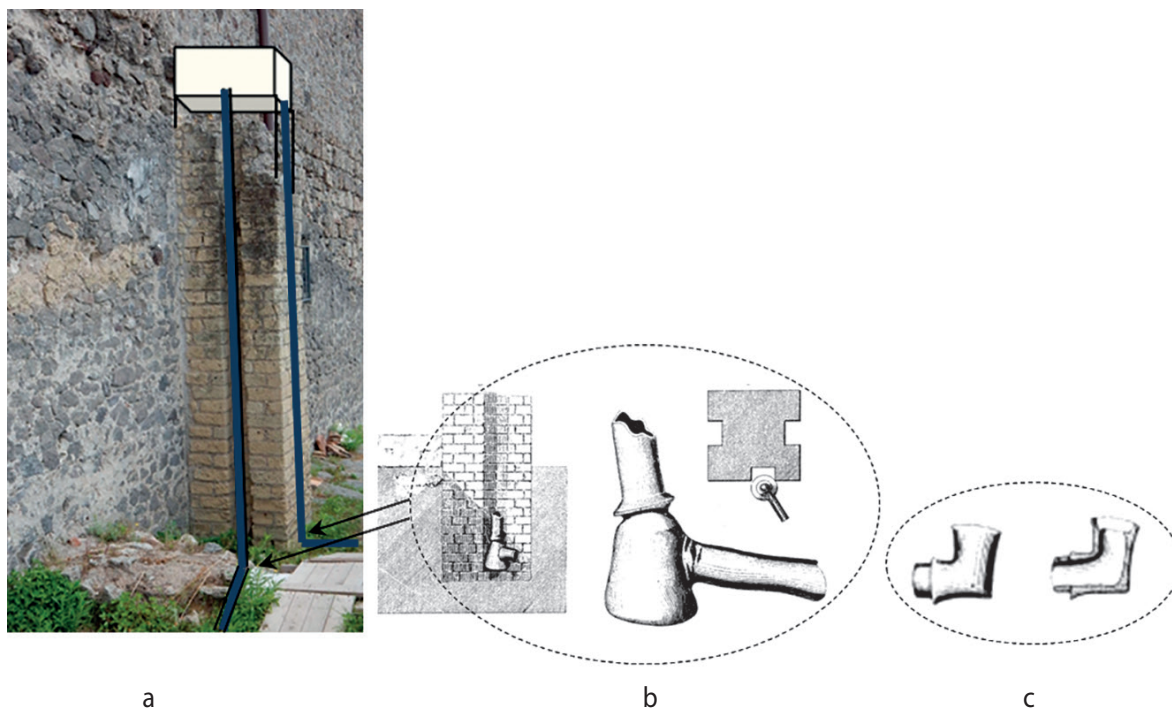
Da bi se dokazale navedene tvrdnje, ukratko se analizira potrebna debljina stijenke cijevi. Potrebna debljina stijenke cijevi ili dozvoljeni tlak vode u cijevima koje cijev može izdržati računa se po Barlowljevoj formuli:³⁴

$$t = \frac{PD}{2SE}; \quad P = \frac{2Est}{D}$$

gdje je t debljina stijenke cijevi (mm), P unutrašnji tlak (MPa), D vanjski promjer cijevi (mm), S dozvoljeno naprezanje homogenoga cijevnog materijala (MPa) te E faktor sigurnosti. Iz ove formule vidljivo je da je potrebno povećavati debljinu stijenke cijevi kako se povećavaju unutrašnji tlak te vanjski promjer cijevi.

Ako se analizira ispitivana cijev za unutrašnji tlak od 4 bara uz faktor sigurnosti od 0,6, dobije se potrebna debljina cijevi od 3,56 mm; $t = (0,4 \times 58,9) / (2 \times 5,5 \times 0,6) = 3,56 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$. Za tlak od 5,1 bara potrebna debljina stijenke cijevi je 4,51 mm. Moglo bi se zaključiti da su dobiveni rezultati ispitivanja vjerodostojni ako se pretpostavi da je primijenjen faktor sigurnosti 0,6. Proizlazi da cijev iz Salone, stijenke debljine 5 mm, može podnijeti značajno veći tlak od izmjenenoga, ali to ne može uzdužni spoj. Jednadžba se ne može egzaktno primijeniti na rimske olovne cijevi zbog postojanja uzdužnoga spoja i izduženoga profila. Zato je testiranje cijevi na hidrauličko opterećenje ispravan postupak analiziranja rimskih cijevi, a dobiveni

34 Vidi: https://en.wikipedia.org/wiki/Barlow%27s_formula (23. 6. 2022.).



Slika 11

Spojni komadi i ojačanja: a) vertikalna cijev na tornju, b) stopa vertikale, c) ojačanje skretanja; prilagođeno prema <http://www.romanaqueducts.info/technicalintro/lead1.htm> (18. 10. 2021.)

rezultati pouzdani. U tom smislu valjalo bi ispitati i spoj dviju cijevi.

Negativna strana korištenja olovnih cijevi moguće je onečišćenje vode u cijevima uslijed otapanja olova te eventualne infiltracije onečišćene površinske i/ili podzemne vode u cijevi. S obzirom na to da su cijevi stalno pod tlakom, infiltracija je nemoguća, osim u periodima kada su cijevi prazne, kod popravaka i izmjena. Kako je sustav stalno protočan, eventualno onečišćenje brzo istječe s vodom iz sustava. Olovo je velika prijetnja jer negativno utječe na svaki organ i sustav u čovjeku. Trovanje najčešće nastaje s vodom i hranom te posebno oštećuje mozak i bubrege. Kod normalnih uvjeta rada olovo iz cijevi ne otapa se u vodi i cijevi stoga nisu opasne za zdravlje ljudi. Donekle je problematično korištenje olovnih cijevi u slučaju transporta mekih ili kiselih voda koje otapaju olovne cijevi. Za razliku od njih, tvrde vode, koje sadrže kalcijev bikarbonat, reagiraju i stvaraju netopivi sloj na unutrašnjoj površini cijevi čime se sprječava izdvajanje olova u vodi, jer se stvara olovni sulfat na cijevi.³⁵ To su inače značajke podzemnih voda u Hrvatskoj. Poznato je

da topivost olova u vodi raste s temperaturom vode zbog čega je nužno spriječiti zagrijavanje cijevi. Rimski su inženjeri znali za negativni zdravstveni učinak olova koji nastaje kod rudarenja, prerade i korištenja, ali nije poznato jesu li bili svjesni da opasnost raste s porastom temperature vode i njezinom kiselosti. Kako voda stalno, 24 sata, otječe kroz sustav, kontakt vode i cijevi nije dugotrajan pa se nije događala kontaminacija vode. Uz to, zbog stalne protočnosti voda u cijevima i spremnicima malo se zagrijavala. Zbog toga je primijenjeni tehničko-tehnološki koncept rada vodoopskrbne mreže osiguravao dobru kakovu i pitkost vode. To je vrlo važno znati radi potpunijega razumijevanja rimskih vodovoda.

Međutim, rudarenje, proizvodnja, oblikovanje proizvoda te odlaganje olova i olovnih materijala uzrokuje onečišćenje vode i tla u okolišu. Cijevi položene ili odložene na površini terena izložene su kiši i površinskim vodama, a cijevi položene ispod površine vlazi i podzemnim vodama. Olovo kemijski reagira i otapa se u vodi te s vodom otječe u okolne vodne resurse i na kraju u more. Akumulira se u tlu i zadržava stotinama godina te dugo

35 M. Boldyrev 2018, str. 15.

negativno utječe na tlo, vodu i biocenozu, odnosno hranidbeni lanac ekosustava i na kraju na čovjeka. To znači da je vodoopskrbna mreža naselja izgrađena iz olovnih cijevi stalni izvor onečišćenja tla i voda u okolišu grada, u Saloni više od 600 godina, jednako kao i eventualni olovni otpad. Na sreću, u antici je broj stanovnika i naselja bio razmjerno malen, pa time i cijevi kao izvora onečišćenja okoliša, a olovnoga otpada uglavnom nije ni bilo jer se ponovno koristio. Zato se kod analize utjecaja olovnih cijevi na održivost življenja u rimskim gradovima problem mora sagledavati cjelovito i multidisciplinarno.

5. Zaključak

Korištenje olovnih cijevi u rimskim gradovima imalo je pozitivne i negativne posljedice za čovjeka i okoliš. Cijevi, uzdužni spoj cijevi i spoj dviju cijevi bili su učinkoviti i pouzdani. Faktor sigurnosti cijevi u odnosu na unutrašnji tlak vode je velik, a u odnosu na ukupna opterećenja koja se javljaju izvedbom cijevne mreže zadovoljavajući. Rezultati ispitivanja ukazuju da je uzdužni spoj osjetljiviji dio cijevi.

Strukturna svojstva olovnih cijevi (životni vijek, otpornost na unutrašnje pritiske, otpornost na vanjske pritiske i otpornost na udarna opterećenja), otpornost na uvjete okoline, tj. koroziju tla i podzemnih voda, otpornost na unutrašnju koroziju i otpornost na koroziju lutajućim strujama te svojstva vezana uz izgradnju, rad i održavanje (širina trase, potreba za posebnim slojem, potreba za potisnim blokovima, jednostavnost spajanja, lakoća otkrivanja curenja, lakoća popravka i težina cijevi) bili su vrlo povoljni za rimski tehničko-tehnološki koncept vodoopskrbe. Proizlazi da je rimski koncept vodoopskrbe, tj. tlak vode u sustavu, kontinuitet tečenja vode, stacionarno tečenje te površinska izvedba cijevne mreže, bio prilagođen značajkama olovnih cijevi, što je nužno ako se želi ostvariti dugoročna održivost opskrbe zdravom vodom. U primjeru Salone to je bilo više od 600 godina.

Kontaminacija vode zbog njezina kontakta s olovnim cijevima nije bila značajna, a to je posebno izraženo kod tvrdih voda. Stalna protočnost vode u sustavu osiguravala je svježiu i zdravu pitku vodu te ga je štitila od onečišćenja i zagrijavanja. Međutim, značajni negativni utjecaji na čovjeka i okoliš javljaju se proizvodnjom olova i cijevi. Radnici u proizvodnji bili su izloženi štetnom djelovanju olova, što je ugrožavalo njihovo zdravlje. Olovo dugo ostaje u tlu i u vodi te se akumulira u hranidbenom lancu ekosustava, što u konačnici štetno utječe na čovjeka. Neki moderni autori pretpostavljaju da je korištenje olova bilo jedan od uzroka slabljenja i pada Rimskoga Carstva. Teško je pretpostaviti da bi olovne cijevi bile uzrok tome, jer je naseljenost bila slaba, a gradovi mali i malobrojni tako da olovne cijevi nisu bile velik izvor onečišćenja okoliša. Naprotiv, olovne su cijevi bile sigurne i pouzdane te su omogućavale dugotrajno funkcioniranje vodoopskrbe stanovništva zdravom pitkom vodom čime su pridonosile poboljšanju zdravstvenih uvjeta i standarda življenja. Kako olovo reagira s vodom i tlom u okolišu, olovne cijevi instalirane u gradovima ostavljaju svoj kemijski otisak u tlu na gradskom prostoru. Ta činjenica omogućava preciznije određivanje starosti rimskih vodovoda i njihova prostornog obuhvata, indirektno i postanka komunalno uređenoga grada.

Može se zaključiti da su cijevi bile funkcionalne, pouzdane i trajne za koncept opskrbe vodom koji su Rimljani primjenjivali. Za njihovu primjenu u modernim sustavima to se ne može reći.

Zahvala

Autor zahvaljuje tvrtki ANAFORA d. o. o. Split za organizaciju i korištenje rezultata ispitivanja, njezinu vlasniku Tonču Jankoviću i cijelom timu koji je u jeku pandemije organizirao ispitivanje bez novčane naknade te Konzervatorskom odjelu u Splitu i Arheološkom muzeju u Splitu na donaciji ulomka cijevi za potrebe ispitivanja.

Izvori

- Frontin. *Aq.* Sextus Julius Frontinus, *The two Books on the Water Supply of the City of Rome of Sextus Julius Frontinus (De aquae ductu urbis Romae)*, prijevod Clemens Herschel, Boston MA 1899.
- Plin. *HN* Gaius Plinius Secundus, *The Natural History of Pliny, Vol. V; Vol. VI (Naturalis historia, Vol. V; Vol. VI)*, prijevod John Bostock – Henry Thomas Riley, London 1857.
- Vitr. *De arch.* Marcus Vitruvius Pollio, *The Ten Books on Architecture (De architectura)*, prijevod Morris Hicky Morgan, Cambridge – London 1914.

Literatura

- ANAFORA 2020 ANAFORA d.o.o., *Izješće 355*, Split 2020.
- M. Boldyrev 2018 Mikhail Boldyrev, *Lead: properties, history, and applications*, WikiJournal of Science 1(2):7, 2018, <https://doi.org/10.15347/wjs/2018.007> (13. 3. 2022.)
- M. Crapper *et al.* 2021 Martin Crapper – Davide Motta – Coree Sinclair – Dominic Cole – Maria Monteleone – Adam Cosheril – Jonathan Tree – Andrew Parkin, *The hydraulic characteristics of Roman lead water pipes: An experimental investigation*, The International Journal for the History of Engineering & Technology 91/2, 2021, <https://doi.org/10.1080/17581206.2022.2054395> (15. 4. 2022.)
- H. Delilela *et al.* 2014 Hugo Delilela – Janne Blichert-Toft – Jean-Philippe Goiran – Simon Keay – Francis Albarède, *Lead in ancient Rome's city waters*, PNAS 111/18, 2014, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1400097111 (10. 2. 2022.), 6594-6599.
- D. Deming 2020 David Deming, *The Aqueducts and Water Supply of Ancient Rome*, Groundwater 58/1, 2020, <https://doi.org/10.1111/gwat.12958> (15. 4. 2022.), 152-161.
- A. T. Hodge 2002 Alfred Trevor Hodge, *Roman Aqueducts & Water Supply*, London 2002.
- S. Hong *et al.* 1994 Sungmin Hong – Jean-Pierre Candelone – Clair C. Patterson – Claude F. Bourton, *Greenland Ice Evidence of Hemispheric Lead Pollution Two Millennia Ago by Greek and Roman Civilizations*, Science 265/5180, 23. 9. 1994, doi: 10.1126/science.265.5180.1841 (25. 6. 2022.), 1841-1843.
- B. Ilakovac 1982 Boris Ilakovac, *Rimski akvedukti na području sjeverne Dalmacije*, Zagreb 1982.
- P. M. Kessener 2022 Paul M. Kessener, *Water Transport: Pressure Lines*, Water 14/28, <https://doi.org/10.3390/w14010028> (25. 6. 2022.)
- P. MacKendrik 1956 Paul MacKendrik, *Roman Town Planning*, Archaeology 9/2, Boston MA 1956, 126-133.
- J. Margeta 2010 Jure Margeta, *Vodoopskrba naselja. Planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode*, Split 2010.

- J. Margeta – K. Marasović 2020 Jure Margeta – Katja Marasović, *Interdisciplinarna istraživanja antičkog urbanog vodnog sustava Salone*, Izdanja Hrvatskog arheološkog društva 33/2019, Zagreb 2020, 81-98.
- L. W. Mays 2010 Lary W. Mays, *A Brief History of Roman Water Technology*, u: Lary W. Mays (ur.), *Ancient Water Technology*, Heidelberg – London – New York 2010, 115-138.
- M. Monteleone – M. Crapper – D. Motta 2021 Maria C. Monteleone – Martin Crapper – Davide Motta, *The supply of the public lacus of Pompeii, estimated from the discharge of their overflow channels*, *Water History* 13/2, 2021, <https://doi.org/10.1007/s12685-021-00281-9> (20. 8. 2022.), 189-216.
- R. Olsson 2015 Richard Olsson, *The water-supply system in Roman Pompeii*, Licentiate Thesis, Classical archaeology and ancient history, Lund 2015.
- J. Sewell 2014 Jamie Sewell, *Urban Planning, Roman*, u: Claire Smith (ur.), *Encyclopedia of Global Archaeology*, New York 2014, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_1488 (20. 8. 2022.)
- M. Topić 2010 Topić, Miroslava, *Apud basilicam orientalem, Tusculum 3*, *Solin* 2010, 43-62.

Summary

Jure Margeta

The impact of lead pipes on the sustainability of the Roman water supply system

Key words: Roman water supply system, lead pipes, sustainability of water supply, water service heritage, Salona

This paper analyses the impact of lead pipes on human's health and the livelihood sustainability in Roman cities. Lead began to be used 7000 years before Christ, and it reached its peak in the Roman period and again around 1950. In the Roman Empire lead pipes were mostly used to build water supply networks. Lead is poisonous to humans, which was known to the Romans. Today, some authors assume that the use of lead was one of the causes of the weakening and fall of the Roman Empire. It turns out that one of the causes could be lead pipes. In order to gain a more complete insight into the positive and negative impacts of the use of lead pipes, the paper analyses the lifetime pipe impacts on water supply network, water quality and the environment. A pressure test of a lead pipe excavated in Salona was organized. The obtained results indicate that Roman lead pipes are safe, reliable, and provide appropriate leak tightness in Roman water pressure systems. This is the result of the open and low pressure natural concept of water supply in which water constantly flows through a pipe system and had serpentine paths similar to rivers. However, lead has had negative effects on human health and the environment during production and processing and on soil and water by disposal and installation. The lead pipes and Roman water supply network had a lifespan of several centuries and ensured a safe supply of healthy water. In the example of Salona, it was more than 600 years.

Translated by Jure Margeta

