

Ispitivanje na tlak rimske olovne cijevi i procjena utjecaja na vodoopskrbu

PRIPREMILI:
Jure Margeta, Tonči Janković

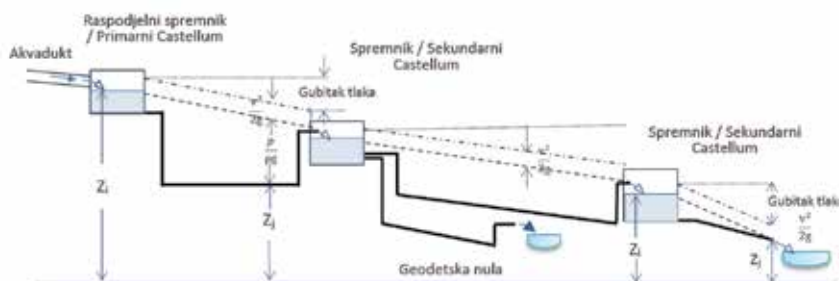
Rimska olovna cijev iz Salone stara oko 2000 godina ispitivana je na tlak. Analiziran je utjecaj primjene olovnih cijevi u vodoopskrbnim mrežama antičkih naselja, obrađeno je trajanje cijevi te utjecaj na hidrotehničke značajke sustava, kakvoću vode i okoliš. Rezultati pokazuju da su rimske olovne cijevi bile sigurne, trajne i povoljne za korištenje u vodoopskrbi.

1. Uvod

Da bi se dobio cjelovitiji uvid u dobre i loše značajke korištenja olovnih cijevi u rimskom urbanom vodoopskrbnom sustavu i razmotrio utjecaj cijevi na održivost sustava, organizirano je tlačno ispitivanje cijevi pronađene u Saloni, stare oko 2000 godina. Ispitivanje je provela tvrtka ANAFRA d.o.o. Split pod vodstvom Tončija Jankovića, u suradnji s Fakultetom građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu i Arheološkim muzejom u Splitu. Mi vjerujemo da je naš eksperiment prvi pokušaj u svijetu, tako da su rezultati obavljenog ispitivanja od velike važnosti za cjelovitije razumijevanje održivosti rimskih vodovodnih mreža. Zapisi na cijevima pronađenim u Rimu pokazuju da su se cijevi počele koristiti 11 g. pr. Kr., dok ispitivanja tla i koncentracije olova u tlu u okolici Rima pokazuju da je korištenje počelo ranije oko 140 g. pr. Kr. te je intenzivno trajalo do 250 g. kada je zbog ekonomskih razloga i previranja u Rimskom Carstvu razvoj urbane vodne infrastrukture stagnirao [1]. Poznavanje značajki olovnih cijevi kao što su čvrstoća, žilavost, otpornost na unutrašnji tlak, te značajke spojeva vrlo je važno za razumijevanje rimskih vodovoda. Rimski koncept vodoopskrbe oslanjao se na gravitaciju za transport i raspodjelu vode u naselju [2-4]. Antički 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 *inča* 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 onog između njih. Iz ovog središnjeg spremnika bit će postavljene cijevi do svih bazena i fontana; od drugog rezervoara do kupatila, tako da mogu donositi godišnji prihod državi; a s trećeg 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 također i da pojedinci koji uzimaju

vodu u svoje kuće mogu svojim porezima pomoći u održavanju dovoda vode [5]. U skladu s navedenim smjernicama građeni su vodovodi u Rimskom Carstvu pa time i u Saloni, Dioklecijanovoj palači i drugim rimskim gradovima u Hrvatskoj [4]. Prema tome, raspodjelni rezervoar (*castellum divisorium* ili *primarni castellum*) je krajnji objekt sustava dovoda vode do grada, te ujedno početni objekt sustava raspodjele vode u gradu. Voda iz *castellum divisorium* se olovnim cijevima odvodila do nadzemnih spremnika (*sekundarnih castellum*) koji su korišteni za raspodjelu vode stanovnicima, te kontrolu i stabilizaciju tlaka u vodovodnoj mreži (slika 1.). Zbog toga se grade na tornjevima ili zgradama na visini od 3 do 8 m [6]. Razina vode u spremniku mora biti dovoljno visoka da osigura gravitacijsku raspodjelu vode uz potrebni tlak na javnim fontanama i kupalištima, obrtničkim radionicama, ukrasnim fontanama, itd., te osigura tlak za punjenje vodom slijedećeg spremnika. U rimskom sustavu svako izljevano mjesto (recimo fontana) uvijek je zasebnim olovnim cjevovodom povezano sa spremnikom. Time se lakše kontroliralo uzimanje vode, a prekid opskrbe na jednom izljevanom mjestu ne uzrokuje prestanak opskrbe na ostalim mjestima. Tečenje u sustavu je pretežito stacionarno [7]. Visinska hijerarhija transporta i



Slika 1. Prikaz linije energije (crta-točka linija) i piezometarska linija (crtkana linija) u raspodjelnom sustavu

raspodjele vode u sustavu utječe na izbor dimenzija cijevi, kvalitetu izvedbe i način gradnje. Dotok i istjecanje iz spremnika je regulirano izborom visine/kote vode spremnika, duljine i dimenzija cijevi, te primjenom posebnog baždarenog brončanog komada cijevi (calix) koji se postavljao na spoju cijevi sa spremnikom, a koji se koristi za službeno mjerenje kapaciteta istjecanja [8]. Kombinacijom ovih elemenata ostvarivao se potrebni kapacitet vodoopskrbne mreže.

Sustav je bio uglavnom bez mrtvih završetaka/zatvarača, tako da je voda neprestano protjecala kroz sustav od zahvata do mjesta istjecanja, a neutrošena voda na fontanama i drugim mjestima se prelijevala u kanalizaciju koju je ispirala. Stalna protočnost 24 sata u danu je vrlo važna tehnološka značajka antičkih vodovoda jer stalna izmjena vode u sustavu osigurava svježiju 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 hijerarhijom tečenja vode u sustavu. Na fontanama najbližim *castellum divisorium* je nekoliko minuta, da bi postupno raslo s tečenjem vode prema krajnjim/rubnim spremnicima najnižim fontanama. U gradu veličine Salone vrijeme kontakta nije bilo dulje od 30 minuta. U tako kratkom vremenu kontakta vode i unutrašnje stijenke olovnih cijevi samo male količine olova su se mogle izdvojiti u vodu vodoopskrbnog sustava tako da olovo nije moglo ugrožavati kakvoću vode. Navedene značajke su važne socijalne i zdravstvene karakteristike antičkog vodoopskrbnog sustava koje su dobro planirane.

Da bi sustav bio siguran i vodonepropustan, tlak u sustavu mora biti manji od dopuštenoga kako ne bi došlo do pucanja cijevi ili razdvajanja spojeva. Konfiguracija elemenata sustava i hidraulički odnosi u sustavu određuju tlak vode u cijevima [7]. Na svakoj dionici vodovodne mreže vrijedi: $p/\rho g + v^2/2g + Z = \text{konstanta}$, odnosno za idealnu tekućinu vrijedi (tlačna visina) + (brzinska visina) + (statička visina) = konstanta (slika 1.). U skladu s time visina vode u cijevi na nekoj razmatranoj lokaciji se mijenja kako se mijenja protok,

odnosno brzina vode u cijevi i time brzinska visina: $h = v^2/2g$. Na slici 1. prezentirana je piezometarska visina ($p/\rho g + Z$), a to je linija visine vode (crtkana linija), te ukupna visina ($p/\rho g + v^2/2g + Z$), to jest linija energije vode (crta-točka linija), gdje je h visina vode (m), ρ gustoća vode (kg/m^3), g akceleracija sile teže $g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$, v brzina vode (m/s), p tlak vode (N/m^2). U skladu s navedenim u antičkom sustavu tlačni udar se u pravilu nije trebao javiti.

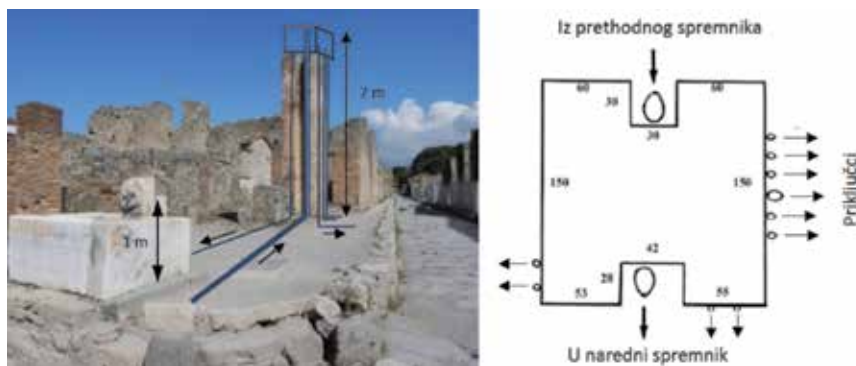
Kada se na izlazu zatvori istjecanje vode, javlja se najveći tlak vode u cijevi ($v = 0$). Tlak (h) je tada visinska razlika između visine slobodne površine vode u spremniku Z_i (m) i visine cijevi Z_j (m); to jest $h \text{ (m)} = Z_i - Z_j$ (slika 1.). To je situacija koja se javlja kada se iz određenih razloga (kvadra) izlazni otvor cijevi zatvori. To je statički tlak vode na unutrašnje stijene cijevi, ili sila po jedinici površine nastala vodom određene visine do osi cijevi. Tlak uzrokovan visinom vode je $p = \rho \cdot g \cdot h \text{ (N/m}^2\text{)}$ i treba biti manji od tlačne nosivosti cijevi kao i cijevnih spojeva. Rimski spremnici/vodotornjevi su bili niži od 8 m tako da je razlika između visine vode u spremniku i najniže kote osi cijevi uglavnom manja od 8 m, pa je i tlak vode u cijevi manji od 8 m [6] (slika 2.). Ovo se ne odnosi na cijevi koje se koriste za izvedbu sifona na akveduktu kod koji su tlakovi vode bili značajno veći.

Tečenjem kroz cijevi tlak vode u cijevima se smanjuje zbog gubitka energije. Gubitak tlaka se uglavnom izražava sa stupcem vode u metrima, koji se zove gubitak visine (h_f), koji predstavlja smanjenje ukupne visine ili tlaka vode koja teče kroz cijevi: $Dp = (\rho v^2)/(x^2)$, gdje je x koeficijent

gubitka tlaka: $x = f(L/D) + \sum K$, gdje je f je koeficijent otpora, L duljina cijevi (m), D promjer cijevi (m), K koeficijent lokalnih gubitaka, v brzina vode u cijevi (m/s) [7]. Razlikujemo glavni ili linijski gubitak uslijed trenja vode u cijevi i manji lokalni koji nastaje zbog lokalnih promjena/elementa cjevovoda kao što su skretanja, grananja, ventili itd. Protok u cijevi $Q \text{ (m}^3\text{/s)}$ ovisi o koti/vodostaju spremnika ($castellum$) (h_R), koti izljevno mjestu (Z_j), promjeru cijevi i značajkama cjevovoda na računskoj dionici:

$$Q = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_R - Z_j)}}{\sqrt{\sum K + f \frac{L}{D}}} \cdot D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \tag{1}$$

Planiranje i gradnja vodovodne mreže se odvijala u skladu s Rimskim pravilima i smjernicama. Rimski inženjeri su znali što se događa na izljevnom mjestima ako se mijenja tlak vode, odnosno visina slobodnog lica vode u spremniku u odnosu na položaj izljeva, ali to nisu znali izračunati. Pliny the Elder [9] jasno tumači funkcioniranje cjevovoda navodeći koncept spojenih posuda, "Tamo gdje se voda želi dizati uvis, treba je prenositi u olovnim cijevima; voda se, treba zapamtiti, uvijek diže do razine svog izvora." Ove jednostavne smjernice inače navedene za planiranje akvedukata i sifona u biti su primjenjene za planiranje vodovodne mreže, cjevovoda i spremnika. Olovne cijevi su dio sustava raspodjele vode u naseljima pa su se stoga koristile u velikim količinama. Kvaliteta cijevi i spojeva cijevi je vrlo važna za održivost funkcioniranja sustava. Kako su rimski vodovodi imali dugi rok trajanja, više stotina godina, ci-



Slika 2. Spremnik na tornju i raspored cijevi spremnika, prilagođeno [6]

jevi su očito imale dobru kvalitetu i trajnost. Kako bi se to dokazalo, izvršeno je tlačno ispitivanje rimske olovne cijevi, te analiza proizvodnje i korištenja.

2. Olovne cijevi i izvedba cjevovoda

2.1. Proizvodnja i značajke cijevi

Brojni stari narodi su upotrebljavali olovo (Pb) u različite svrhe tisućama godina prije rimske ere. U Rimskom Carstvu olovo je bilo dostupno i jeftino, a dobivalo se najviše kao usputni proizvod tijekom proizvodnje srebra. To je prirodni metal koji se dobiva iz galenitnih ruda, lako se kuje i obrađuje, otporan je na koroziju vode. Unutrašnje i vanjske stijenke cijevi su relativno glatke, prema Crapperu i sur. [15] oko 0,9 mm, pa su linijski gubici mali. Međutim, olovo je otrovno za čovjeka što je bilo poznato Rimljanima.

Čvrstoća popuštanja olova je 5,5 MPa, a krajnja vlačna čvrstoća 17 MPa. To je dovoljna čvrstoća u odnosu na tlak koji se javlja u vodovodnoj mreži. Međutim, olovo je mekano i sklono puzanju/deformiranju. Zato je limitirajući čimbenik za korištenje olova kao građevnog materijala bila osjetljivost na puzanje, a ne njegova vlačna čvrstoća. To je utjecalo na proizvodnju cijevi jer su cijevi zbog toga trebale imati veću debljinu stijenke. Moguće popuštanje čvrstoće je posebno kritično za uzdužni spoj cijevi i spoj dviju cijevi. Kritična mjesta u cijevnom sustavu su promjene pravca cjevovoda jer su cijevi na tim mjestima opterećene aksijalnom silom. Dodatnom opterećenju posebno su izloženi vertikalni cjevovodi jer su opterećeni unutrašnjim tlakom vode, aksijalnom silom i težinom same cijevi. Tipični primjer je cjevovod koji se nalazi na zidu vodotornja (slika 2.). Međutim, cijevi i spojevi su morali imati potrebnu čvrstoću na naprezanje koje se javlja kod građenja, recimo prenošenja, transporta, slaganja i polaganja. Sve je to utjecalo na potrebne karakteristike olovnih cijevi i tehnologiju gradnje vodovodne mreže. Cijevi se proizvode na način da se olovo prvo zagrije i rastali, te potom rastaljeno izlijeva u kalup koji oblikuje ravnu ploču duljine oko 3 m (10 *foot*, gdje 1 *foot* =

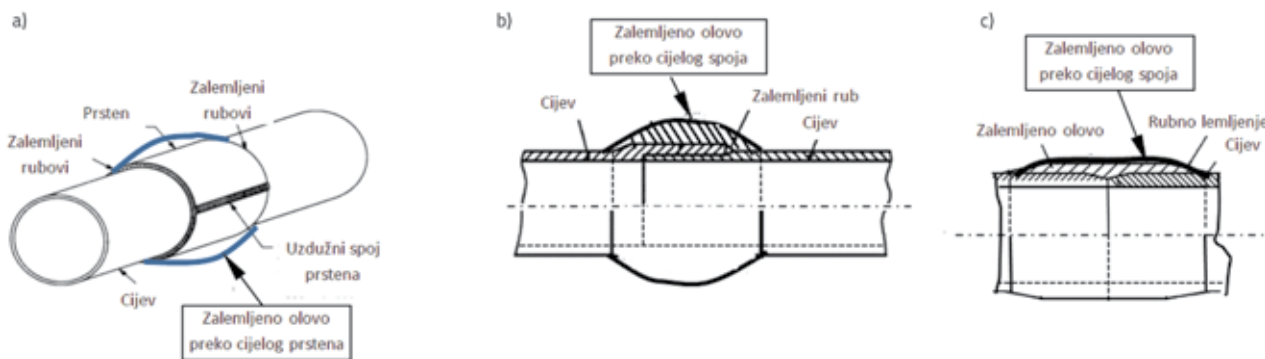


Slika 3. Proizvodnja cijevi [2] i presjek cijevi pronađeni u Salonu

29.6 cm), potom zakrivljuje oko čvrstog okruglog drva radi formiranja cijevi, čiji se krajevi spajaju i potom zatvaraju po cijeloj duljini uz lemljenje olovom, stvarajući tako malo izduženi, a ne okrugli profil cijevi kako se to vidi na slici 3. [2, 5, 9]. Olovne ploče su se također koristile i za druge potrebe, kao što je to oblaganje kanala akvedukta i protočnih spremnika vode [5].

Uzdužni spoj cijevi se izvodio na više načina ovisno o veličini cijevi, debljini stijenke i potrebnoj čvrstoći (slika 3.c). Spoj (ii) nije povoljan za veće unutrašnje tlakove, dok je spoj (iii) povoljniji i dosta se koristio a čvrstoća spoja je ovisila o kvaliteti lemljenja. Spoj (iv) povoljan je u slučaju tanjih cijevi kod kojih se lim može dobro oblikovati u čvrst spoj. Kvaliteta lemljenja je važan čimbenik za čvrstoću i vodonpropusnost spoja tako da je debljina lemljena bila velika. Kako bi se poboljšala kvaliteta lemljenja, za lemljenje se koristila mješavina 60/40 (kositar/olovo) [9]. Veličina cijevi je određena širinom ravne ploče. Na taj način veličina cijevi u jedinici *digiti* odgovara opsegu cijevi ili nešto manje. Vitruvius je opisao osam standardnih dimenzija cijevi na osnovi veličine opsega u jedinici *digiti* (1 *digitus* = 1,85 cm) [5].

U 11. godini sustav od 25 standardnih dimenzija cijevi je propisan i potvrđen od cara Augustus [8]. Međutim, u praksi se koristilo samo 15 veličina [8]. Vitruvius navodi da je potrebna minimalna duljina ploče/cijevi 10 *foot*, (1 *foot* = 29,6 cm), te navodi težinu ploče za svaku dimenziju cijevi u *pounds*, (1 *pounds* = 0,45 kg). Najlakša cijev je bila *fives* težine od 60 *poundsa* (27 kg), opsega 9,25 cm (\varnothing 2,94 cm), a najveća *hundreds* težine 1200 *poundsa* (540 kg), te opsega od 185 cm (\varnothing 58,89 cm). Time daje sve nužne informacije potrebne za izgradnju cjevovoda. Težine koje navodi za svaku veličinu cijevi daju sličnu debljinu cijevi, približno 1 cm. Ova podatak je često dovodio do različitih interpretacija o debljini stijenke cijevi [2, 10]. Iz doslovne interpretacije proizlazi da sve olovne cijevi, bez razlike na širinu ploče i time 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 kojeg je predložena debljina od 1 cm vezana je uz potrebnu krutost cijevi kod izvedbe vodoopskrbnog cjevovoda, te zbog dodatnog (većeg) opterećenja cijevi koje se javlja s promjenom smjera i polo-



Slika 4. Moguća rješenja spajanja olovnih cijevi na temelju sličnosti s modernim spojevima: a) Spoj s prirubicom; b) Spoj s naglavkom; c) Sučelni spoj

žaja cijevi u mreži. Da bi se cjevovod mogao graditi, mora biti dovoljno čvrst/krut, što se dobiva s debljinom od 1 cm ili više. Uz to, veća čvrstoća cjevovoda je potrebna radi zaštite od vanjskog opterećenja jer se cjevovod često polagao po površini prostora grada. Rezultati provedenog ispitivanja ove tvrdnje to dokazuju.

Proces proizvodnje je dokumentiran [8], ali nije proces i način spajanja dviju cijevi. Pretpostavlja se da je korišten sličan postupak kao u moderno doba jer su antički spojevi između dviju cijevi tehnološki slični današnjim. Prema nalazima može se zaključiti da se u praksi koristilo više tipova spoja, slično kao i danas (slika 4.). Cijevi su najčešće pričvršćene jedna na drugu pomoću olovne objumice/omotača oko oba kraja cijevi koji se lemio debelim slojem olova po obodu omotača i uzdužnom spoju omotača (slika 4.a). Cijevi su se povezivale i umetanjem jednog kraja cijevi u drugi prošireni kraj cijevi (spoj na naglavak) (slika 4.b). Zatim je spoj zabrtvljen debljim slojem zalemljenog olova. Spoj je na jako opterećenim spojevima na silu razvlačenja dodatno ojačavan i zabijanjem većeg čavla kroz oba kraja cijevi. Koristili su se i sučelni spojevi koji se zabrtve debljim slojem zalemljenog olova, ali rjeđe

zbog manje čvrstoće spoja, slika 4.c. Spoj s objumicom najviše jača krutost cjevovoda, spoj na naglavak manje a sučelni vrlo malo tko da se spoj s objumicom najviše koristio. Za lemljenje se koristila mješavina metala 60/40 (kositar/olovo).

2.2. Izgradnja vodovodne mreže

Izvedba cjevovoda izvodila se na sličan način kako se to danas radi [11]. Cijevi duljine od 3 m donose se i polažu duž trase cjevovoda, potom spajaju izdašnim količinama lema, ispituju na vododrživost, te na kraju zatrpavaju u slučaju polaganja u roveve. Montirani cjevovod se provjerava da ne curi tako da se izlaz iz cijevi zatvori, a cijev napuni vodom. Time se javlja maksimalni radni tlak vode u cijevi.

U vodovodnoj mreži cjevovodi mijenjaju pravac, granaju se, te se rade priključci. Nisu se proizvodili standardni komadi kao što su to lukovi, redukcija, križni komadi. Umjesto toga koristili su se komadi cijevi koje su se oblikovale i prilagođavale potrebama te spajale lemljenjem, recimo skretanju cjevovoda, ili su se koristile olovne posude s jednim ulazom i više izlaza na različite strane. To nije bilo

teško izvesti jer je olovo mekano, posebno kad se zagrije. Nešto složenija je bila izvedba bočnih priključaka, križnih komada, ventila i vertikalnih skretanja. Spojeni cjevovod se polaže po planiranoj trasi, uglavnom rubom prometnice ili izvan prometnice, te učvršćuju objumicama za teren (slika 5.c) ili se u slučaju kamenog tla polaže u žlijeb (slika 5.b) ili ispod površine terena (slika 5.d). Nastojalo se više cijevi voditi paralelno istim koridorom, to jest instalacijskim koridorima, kako se to i danas prakticira [11].

Cjevovod položen po terenu izložen je vanjskom djelovanju tako da su deformacije bile uobičajene (slika 5.a). Cijevi su se štitele polaganjem u žlijeb (slika 5.b) ili polaganjem u zaštićene koridore, (slika 5.c). Polaganjem ispod površine terena cijevi se štite od opterećenja i od visokih temperatura (slika 5.d). Horizontalna i vertikalna skretanja cjevovoda su se dodatno ojačavala kako bi se spriječilo oštećenje uzdužnog 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, posebno u sunčanom mediteranskom podneblju (slika 5.d).



Slika 5. Primjeri polaganja cijevi u naselju

Međutim, cijevi su se najčešće polagale po terenu, a sve kako bi kvarovi/curenja bili vidljivi, te cijevi lako dostupne za popravak. Promjene u sustavu su se lako primijetile, a time i ilegalni spojevi te krađa vode. Osim lakšeg nadzora i održavanja, to je i jeftinije rješenje od polaganja ispod terena. Kako je tlak u cijevima mali, istjecanja vode su bila uglavnom mala, a time i gubici vode. Preljevanja viška vode na fontanama su bila mnogo veća tako da manja curenja cjevovoda nisu bila od većeg utjecaja na opskrbu vodom, osim ako cijev nije značajno oštećena. Kvar je bio lako uočljiv pa se mogao brzo otkloniti. Polaganjem po površini terena nije se štitilo cijevi i vodu u cijevima od zagrijavanja i time negativnih posljedica za kakvoću vode i čvrstoću cijevi. Očito da inženjerima to nije bilo posebno važno jer su procijenili da je vrijeme kontakta olova i vode u cijevi kratko da bi utjecalo na kvalitetu vode. To je dobra značajka rimskih vodovoda u Saloni.

2.3. Tlačna nosivost cijevi

Cijevi i spojevi trebaju biti dovoljno čvrsti da izdrže unutrašnji tlak vode, aksijalnu silu i težinu cijevi. Iz toga je vidljivo da bi uzdužni spoj ploče iz koje je oblikovana cijev mogao biti slaba točka u odnosu na unutrašnji tlak, a potom spoj dviju cijevi. To su mjesta na kojima bi moglo doći do razdvajanja spoja i time curenja vode. Antičke smjernice za izbor debljine cijevi u odnosu na mogući unutrašnji tlak nisu poznate, tako da su donosili odluke na temelju iskustva proizvođača i montera vezano uz tehnologiju izvedbe cjevovoda i radni tlak. Tijekom 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).

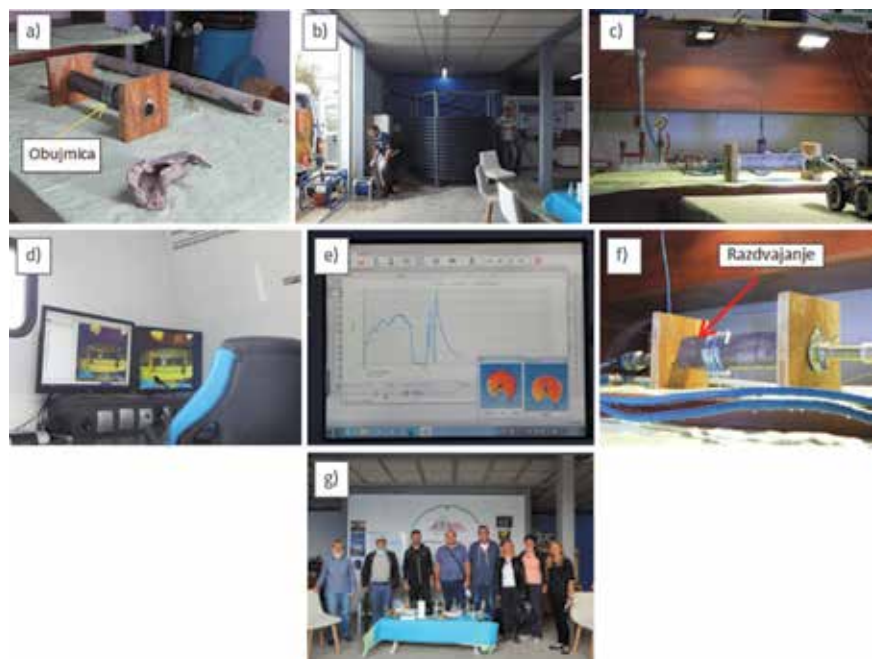
Cijevi pronađene u Saloni kao i na drugim lokacijama imaju različite debljine stijenke cijevi. Tako je pronađena cijev dimenzija 10 *digiti (denaria)* koja ima opseg od 18,5 cm, i debljinu od 5 mm, te cijev dimenzija 20 *digiti (vicenaria)* s opsegom od 37,0 cm, i debljinom od 10 mm. U pravilu

veće cijevi, te cijevi namijenjene većem tlaku vode imaju veće debljine stijenke; na primjer 25 mm u slučaju cijevi promjera 15 cm pronađene u Ostiji [2]. Očito je da su rimski inženjeri bili svjesni utjecaja debljine stijenke cijevi na izdržljivost u odnosu na unutrašnji tlak vode i vanjska naprezanja, ali to nisu znali izračunati niti izraziti.

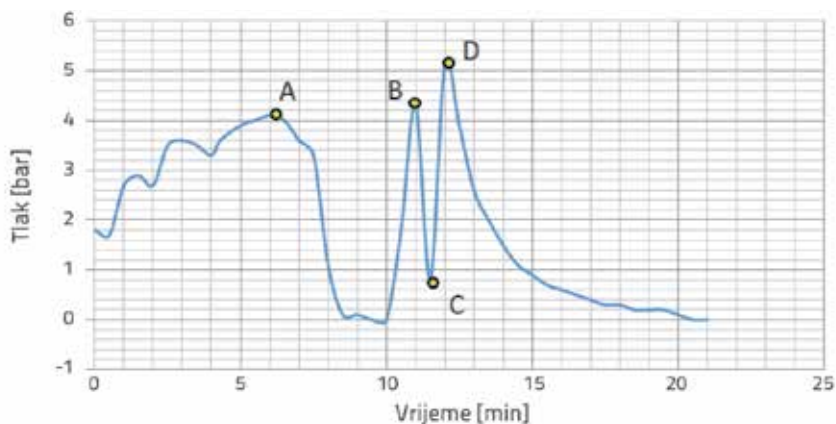
Da bi se razjasnile navedene pretpostavke vezene uz značajke cijevi i izvedbu cjevovoda, organizirano je ispitivanje cijevi na unutrašnji tlak. Ispitivanje cijevi je obavila tvrtka ANAFORA d.o.o. Split (slika 6). Korištena je cijev od 10 *digiti (denaria)*, veličine opsega od 18,5 cm te debljine od 5 mm (slika 6a). Ova cijev je imala uzdužni spoj kao na slici 3.c (iii). Ispitivanje je planirano u skladu s Hrvatskim standardom za tlačne cijevi [12] (slika 6.). S obzirom na to da se radi o nestandardnom ispitivanju cijevi, bilo je potrebno projektirati i izvesti novi tehnološki sustav ispitivanja cijevi na tlak, slika 6. To su obavili stručnjaci tvrtke ANAFORA d.o.o. Split na temelju iskustva koje su stekli kod standardnih (zakonom propisanih) ispitivanja. Korištena je duljina cijevi od 40 cm

izrezana od cijevi duljine 2 m koja je bila dosta deformirana (slika 6.a). Zbog deformacije raspoložive cijevi, dulji komad cijevi se nije mogao izrezati. Postupak ispitivanja je snimam kamerom (slike 6.c i 6.d), a rezultati bilježeni digitalno, slika 6.e.

Očekivano, ispitivanje cijevi stare 2000 godina donosi nepredviđene izazove. Tako je na početku ispitivanja utvrđeno da se kod tlaka od 0,8 bara (8 m) pojavljuje vlaženje na jednom dijelu uzdužnog spoja cijevi. Oštećenje je vrlo malo i nije se moglo prije uočiti. Kako na raspolaganju nije bio drugi komad cijevi, odlučeno je da se ispitivanje nastavi tako da se oštećeni dio ojača kako se kod povećanja tlaka vode u cijevi ne bi razdvojio spoj cijevi na tom mjestu. Time je skraćena duljina slobodnog/neoštećenog dijela za 5 cm. Nakon sanacije mjesta propuštanja stavljanjem uske stege/klampe, ispitivanje je nastavljeno. Oprema za ispitivanje je izvedena tako da se mogući gubitak vode i time tlaka mogao regulirati s dotokom vode a sve kako bi se postigao potrebni tlak vode u cijevi.



Slika 6. Oprema za ispitivanje tvrtke ANAFORA d.o.o. Split i donirana cijev (Arheološki muzej u Splitu): a) cijev, uzorak, ojačanje oštećenog dijela spoja; b) oprema za tlačanje vode; c) ispitni stol i oprema; d) nadzor i snimanje ispitivanja; e) grafički ispis tlaka vode u cijevi; f) mjesto razdvajanja uzdužnog spoja cijevi; g) organizator i suradnici



Slika 7. Rezultat ispitivanja

Ispitivanjem se najprije htjelo utvrditi može li cijev izdržati tlak od 1 bara, a da se vlaženje ne pojavi na ostalom (slobodnom) dijelu uzdužnog spoja (radni tlak), te potom utvrditi tlak kod kojeg dolazi do pucanja cijevi ili razdvajanja uzdužnog spoja (maksimalno mogući tlak). Rezultati su grafički prikazani na slici 7. [13].

Tlak u cijevi je postupno povećavan do veličine od 4 bara. Cijev je pregledana te je utvrđeno da se nikakve promjene na cijevi i uzdužnom spoju nisu pojavile osim manjeg curenja vode na oštećenom mjestu. Gubitak vode je bio mali te se tlak održavao stalnim dotjecanjem vode. Zaključeno je da cijev i uzdužni spoj mogu izdržati unutrašnji tlak od 4 bara, točka A na slici 7. Potom je ponovljeno tlačenje vode u cijevi, ali sada brzim dizanjem tlaka. Stanje je bilo isto, te je tlak relaksiran na 0,8 bara. Curenje vode iz oštećenog dijela je bilo relativno malo, a kod tlaka od 0,8 bara zanemarivo, točka C. Zbog curenja vode na oštećenom dijelu, cijela procedura nije idealna, ali ne treba zaboraviti da se radi o cijevi koja je stara oko 2000 godina, tako da je za ove potrebe ispitivanja modificirana procedura prihvatljiva. Potom je odlučeno da se tlak stalno podiže do razine loma cijevi, do kojeg je došlo kod tlaka od 5,1 bar, i to do razdvajanja uzdužnog spoja cijevi širine oko 3mm (točka D). Pucanje stijenke cijevi se nije dogodilo pa proizlazi da stijenka cijevi ima veću nosivost od uzdužnog spoja, što je i očekivano za lemljeni spoj.

3. Rasprava

Rezultati jasno pokazuju da cijev pronađena u Salonu može s velikom sigurnošću izdržati unutrašnji tlak od 4 bara, te da do razdvajanja spoja cijevi dolazi kod tlaka većeg 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 s obzirom na način spajanja dviju cijevi.

Međutim, dodatno opterećenje koje nastaje izvedbom također utječe na potrebne značajke cijevi. Cjevovodi na ravnim dionicama vodovodne mreže su najmanje dodatno opterećeni, dok su promjene na cjevovodu izvor dodatnog opterećenja. Na svim promjenama oblika i smjera cjevovoda (skretanja, grananja, promjena profila, završetcima, 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 je $F = p \cdot A$, gdje je A površina poprečnog presjeka (m^2), a p unutrašnji tlak (Pa), nije bila velika jer su poprečne površine cjevovoda kao i tlak vode u cjevovodima bili mali. Ta sila nema djelovanje na ravnim dionicama. Međutim, rezultanta aksijalne sile na mjestima promjene pravca nastoji pomaknuti/izmaknuti cjevovod u smjeru djelovanja sile što opterećuje cijevi i spoj cijevi. Veličina sile F je funkcija i veličine skretanja

cjevovoda α , tako da je kod skretanja od 90° sila najveća, $F = 2 \cdot p \cdot \sin \alpha/2$ [11]. Nastala sila povećava vlačno naprezanje cijevi kao i spojeva koje nastoji razdvojiti. To su mjesta na kojima cijevi treba ojačati i zaštititi. Rimskim inženjerima je ovaj problem bio poznat, te su ga najčešće rješavali sa sidrenim blokovima betona na koje se oslanjala cijev. To se i danas radi na isti način. Ako je cijev položena u kameni žlijeb nogostupa, tada ploča nogostupa preuzima/neutralizira aksijalnu silu. To je prednost polaganja cijevi u žljebovima. Rimski inženjeri nisu znali izračunati veličinu sile koja se javlja na skretanjima cijevi, pa su primjenjivali iskustva iz prakse.

Nešto veće opterećenje se javlja kod izvedbe vertikalnog cjevovoda, recimo dovoda i odvoda vode iz spremnika na tornju zbog težine cijevi (gustoća olova $11,34 \text{ g/cm}^3$) (slika 2.). Skretanje cijevi na ulazu i izlazu u spremnik nije stvaralo veću aksijalnu silu jer je tlak vode na tim mjestima vrlo mali, oko 1m. Sidrenje cijevi obujmicama na zid tornja je spriječilo naprezanje spojeva i izmicanje cjevovoda. Međutim, vertikalne cijevi i njihovi spojevi su dodatno opterećeni težinom same cijevi, što je moglo uzrokovati izvijanje cijevi jer je olovo osjetljivo na puzanje posebno kod viših temperatura. Zato su se teže (veće) cijevi polagale u vertikalne žljebove/utor te obujmicama fiksirale na zid tornja. Slično radimo i danas. Najveće opterećenje cijevi i spojeva se javlja na dnu vertikale gdje se ujedno javlja skretanje cjevovoda. Olovo je teško tako da je cijev kao i tlo na koje se oslanja znatno opterećeno. Tu se vertikalna cijev oslanja na teren koji preuzima aksijalnu silu i opterećenje nastalo uslijed težine cijevi i vode u njoj. Na ovim mjestima su stoga cijevi i spoj morali imati veću čvrstoću nego što je potrebna u odnosu na ravne dionice.

Pretpostavlja se da su rimski inženjeri na temelju iskustva iz prakse znali za probleme koji se javljaju kod vertikalno vođenih cjevovoda i skretanja 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. Zato su smjernicama za

proizvodnju cijevi predviđene veće debljine stijenke od onih koje su potrebne za unutrašnji tlak vode koji je u vodovodnoj mreži bio mali, uglavnom manji od 1 bara. Horizontalno skretanje vertikalne cijevi u kontaktu s terenom se izvodilo na specifičan način povećanjem površine oslonca cijevi na tlo (olovno stopalo) kako bi se spriječila deformacija cijevi i čvrst oslonac za vertikalnu cijev, te smanjilo opterećenje tla na koje se oslanja vertikalna cijev. Slično se radi i danas, samo što se koristi gotovi lučni komad sa stopalom. U antici se cijev na tom mjestu ojačala dodatnom olovnom obujmicom [14]. O svemu se vodilo računa pa su cjevovodi dobro funkcionirali stoljećima. To dokazuje provedeno ispitivanje cijevi. Da bi se potvrdile navedene tvrdnje ukratko se analizira potrebna debljina stijenke cijevi. Potrebna debljina stijenke cijevi ili dopušteni tlak vode u cijevima koje cijev može izdržati računa se po Barlow-voj formuli, izraz (2):

$$t = pD/2SE; p = 2Est/D \quad (2)$$

gdje je t debljina stijenke cijevi (mm), p unutrašnji tlak (MPa), D vanjski promjer cijevi (mm), S dopušteno naprezanje materijala (MPa) te E faktor sigurnosti.

Iz izraza (2) vidljivo je da je potrebno povećavati debljinu stijenke cijevi kako se povećavaju unutrašnji tlak te vanjski promjer cijevi. Rimski inženjeri su bili svjesni ovih odnosa ali nisu znali formulu, pa su koristili iskustva iz prakse. Takve cijevi bile su u funkciji stotinama godina, što je nezamislivo za suvremene cijevi (duktil, PEHD, PVC, poliester).

Za unutrašnji tlak od 1 bara i faktor sigurnosti od 0,6 dobije se potrebna debljina cijevi od 1,6 mm; $t = (0,1 \cdot 58,9)/(2 \cdot 5,5 \cdot 0,6) = 1,6$ mm, a što je značajno manje od proizvodne debljine od 5 mm. Tanki stijenka cijevi nije uvijek praktična za gradnju cjevovoda jer je krutost takve cijevi mala zbog čega je očito debljina morala biti veća. Manja cijev s debljinom od 5 mm je dovoljno kruta za primjenu kod izgradnje cjevovoda. U slučaju većih cijevi, debljine su trebale biti veće (10 mm) kako je to Vitruvius [5] predložio. To potvrđuju pronađene manje cijevi u naseljima koje

su imale debljinu 5-7 mm, a veće 10-15 mm [2].

Ako se analizira ispitivana cijev za unutrašnji tlak od 4 bara i faktor sigurnosti od 0,6, tada se dobije potrebna debljina cijevi od 3,56 mm; $t = (0,4 \cdot 58,9)/(2 \cdot 5,5 \cdot 0,6) = 3,56$ mm < 5 mm. Za slučaj tlaka od 5,1 bara, potrebna debljina stijenke cijevi je 4,51 mm, a što je manje od 5 mm ali ne značajno. 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 može podnijeti i značajno veći tlak od utvrđenog, ali ne uzdužni spoj. Izraz (2) ne može se egzaktno primijeniti na rimske olovne cijevi zbog postojanja uzdužnog spoja i izduženog profila. Zato je za analizu antičkih cijevi testiranje cijevi na hidrauličko opterećenje ispravni postupak, a dobiveni rezultati prihvatljivo pouzdani. U tom smislu valjalo bi ispitati i spoj dviju cijevi. Očito je da su cijevi imale veliki faktor sigurnosti, to jest dovoljnu čvrstoću i za dodatna opterećenja koja nastaju zbog aksijalne sile i težine cijevi, te smanjenja čvrstoće zbog povećanja temperature. Uz to, cijevi su bile dovoljno čvrste i krute za naprezanja koja se javljaju tijekom izgradnje cjevovoda. Unutrašnja površina cijevi je relativno glatka, otporna na koroziju i trajna, što cijev čini vrlo povoljnim za korištenje. Prema istraživanjima Crappera i sur. [15] utvrđeno je da je unutrašnja hrapavost olovne cijevi stare oko 2000 godina $k_s = 0,9$ mm, lokalni koeficijent gubitaka spoja dviju cijevi $K = 1,159$. Očito da su linijski gubici relativno mali, a životni vijek iznimno dugačak.

Negativna strana korištenja olovnih cijevi je moguće onečišćenje vode u cijevima uslijed ispuštanja olova te moguće 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, recimo tijekom popravaka i izmjena. Kako je sustav protočan eventualno onečišćenje brzo istječe s vodom iz sustava. Međutim, olovo negativno utječe na svaki organ i sustav u čovjeku. U tijelo može dospjeti udisanjem plinova, probavom ili apsorpcijom. Trovanje naj-

češće nastaje s vodom i hranom te posebno oštećuje mozak i bubrege.

Posebno je problematično korištenje olovnih cijevi u slučaju transporta mekih ili kiselih voda koje otapaju olovne cijevi. Za razliku od tih voda, tvrde vode koje sadrže kalcijev bikarbonat (vapnenačko područje) reagira i stvara netopivi sloj na unutrašnjoj površini cijevi čime se sprječava izdvajanje olova u vodi, te se stvara olovni sulfat na cijevi. Poznato je da topivost olova u vodi raste s temperaturom vode zbog čega je nužno spriječiti zagrijavanje cijevi. Rimski inženjeri su znali za negativni zdravstveni učinak olova koji nastaje kod rudarenja, prerade i korištenja [5]. Nije poznato jesu li bili svjesni da opasnost raste s porastom temperature vode. Kako voda stalno 24 sata otječe kroz sustav, kontakt vode i cijevi nije bio dugotrajan, u Saloni kraće od 30 minuta, pa se nije događala značajnija kontaminacija vode. Uz to, zbog stalne protočnosti voda u sustavu se malo zagrijavalo. Zbog toga je primijenjeni koncept rada vodoopskrbne mreže osiguravao dobru kakvoću i pitkost vode. To je vrlo važno znati radi potpunijeg razumijevanja antičkih vodovoda.

Međutim, rudarenje, proizvodnja, korištenje i odlaganje olova i olovnih materijala uzrokuje onečišćenje okoliša, vode i tla. Olovo se može akumulirati u okolišu i zadržati stotinama godina te dugo negativno utjecati na tlo, vodu i biocenozu, odnosno hranidbeni lanac ekosustava i na kraju čovjeka [1]. To znači da je vodoopskrbna mreža naselja izgrađena iz olovnih cijevi stalni izvor onečišćenja tla i voda u okolišu, recimo u Saloni više od 600 godina. Na sreću, u antici je bio mali broj stanovnika i naselja pa time i cijevi kao izvora onečišćenja. Grad Rim je u tome bio iznimka jer se i danas u tlu ispod antičkog grada može utvrditi olovo [1].

4. Zaključak

Korištenje olovnih cijevi u antici je imalo pozitivne i negativne posljedice za čovjeka i okoliš. Cijevi, uzdužni spoj cijevi i spoj dviju cijevi bili su učinkoviti i pouzdani. Faktor sigurnosti cijevi je u odnosu

na unutrašnji tlak vode velik, a u odnosu na ukupna opterećenja koja se javljaju izvedbom cijevne mreže, zadovoljavajući. Rezultati ispitivanja pokazuju da je uzdužni spoj osjetljiviji dio cijevi.

Kontaminacija vode olovom nije bila značajna zbog kratkog kontakta vode s cijevima, posebno ne u slučaju tvrdih voda. Stalna protočnost vode u sustavu osiguravala je svježiu i zdravu pitku vodu te štiti vodu od onečišćenja. Međutim, značajni negativni utjecaji na čovjeka i okoliš se javljaju proizvodnjom olova i cijevi. Radnici u proizvodnji bili su vrlo izloženi štetnom djelovanju olova, što je ugrožavalo njihovo zdravlje. Olovo dugo ostaje u tlu i 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 Rimskog 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 veliki izvor onečišćenja okoliša. Naprotiv, olovne cijevi su bile sigurne i pouzdane, te omogućavale dugotrajno funkcioniranje vodoopskrbe stanovništva zdravom pitkom vodom čime su značajno doprinosile poboljšanju zdravstvenih uvjeta i standarda življenja.

Najveći utjecaj na standard življenja i zdravlje ljudi imala je praksa po kojoj je voda s javnih fontana koje se nalaze na javnim površinama grada besplatna. Ako je fontana ili izljevno mjesto smješteno u privatnom domu ili pogonu manufakture, tada se korištenje mjeri i plaća. Vlasnik vodovoda bila je republika/car koji su financirali gradnju i održavanje vodovoda. Sve je bilo regulirano propisima i zakonima, uključujući i pravo služnosti na dijelu privatnog zemljišta preko kojeg prolaze javne instalacije. Temeljem navedenog može se zaključiti da su olovne cijevi bile funkcionalne, pouzdane i vrlo trajne za gravitacijski koncept opskrbe vodom koji

su Rimljani koristili. Za njihovu primjenu u modernim sustavima to se ne može reći. Nadamo se da će rad pridonijeti boljem razumijevanju inženjerskog kulturnog nasljeđa u području vodoopskrbe, te pomoći u rekonstrukciji antičkih vodovoda.

Zahvala

Autori zahvaljuju tvrtki ANAFRA d.o.o. Split, za organizaciju ispitivanja cijevi i korištenje rezultata ispitivanja. Posebno zahvaljujemo vlasniku Tončiju Jankoviću i cijelom timu koji je sve organizirao u jeku pandemije. Zahvaljujemo Arheološkom muzeju u Splitu na donaciji cijevi za ispitivanje.

Napomena o uatorima

prof.dr.sc. Jure Margeta¹, Tonči Janković²
¹Sveučilište u Splitu, Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split
²ANAFEA d.o.o. Split,
 Korespondencija: margeta@gradst.hr

Literatura

- [1] Delile H., Blichert-Toftb, J., Goirand, J.P., Keaye, S., Albarède, F.: Lead in ancient Rome's city waters, PNAS, May 6, 111 (2014) 18, pp. 6594–6599, doi/10.1073/pnas.1400097111
- [2] Hodge, T.: Roman water aqueducts & supply, Duckworth, USA. 2002.
- [3] Mays, L.W.: Chapter 7, A Brief History of Roman Water Technology, in Book Ancient Water Technology, Springer, Boston, 2010.
- [4] Margeta, J., Marasović, K.: Interdisciplinarno istraživanje Rimskog urbanog vodnog sustava Salone, Izdanja Hrvatskog arheološkog društva, Zagreb 33/2019, 80–81.
- [5] Vitruvius, P.: The Ten Books on Architecture, Book 8, Morris Hicky Morgan, Ed. Cambridge: Harvard University Press. London: Humphrey Milford, Oxford University Press, 1914.
- [6] Olson, R.: The water-supply system in Roman Pompeii. Dissertation, Lund University, Sweden, 2015.
- [7] Lonačar, G., Andročec, V.: Mehanika tekucina, https://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/mehanika_tekucina.pdf
- [8] Frontinus: The two books on the Water Supply of the City of Rome of Sextus Julius Frontinus, translated by Clements Herchel, Boston, Massachusetts, and Dana Ester, 1899.
- [9] Pliny the Elder: The Natural History of Pliny, 5 (1857), translated by John Bostock and H.T. Riley, London: Henry G. Bohn.
- [10] Deming, D.: The Aqueducts and Water Supply of Ancient Rome. Groundwater, 58 (2020) 1, pp. 152–161.
- [11] Margeta, J.: Vodoopskrba naselja; planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, 2010.
- [12] EN 805:2000 Water supply - Requirements for systems and components outside buildings. European committee for standardisation.
- [13] ANAFRA d.o.o. (2020.): Izvješće 355. Split.
- [14] Lead in Roman aqueducts, <http://www.romanaqueducts.info/technicalintro/lead1.htm> 13.10.2021.
- [15] Crapper, M., Motta, D., Sinclair, C., Cole, D., Monteleone, M., Cosheril, A., Tree, J., Parkin, A.: The hydraulic characteristics of Roman lead water pipes: An experimental investigation, The International Journal for the History of Engineering & Technology, 2022. doi.org/10.1080/17581206.2022.2054395