



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivana Novosel

# **VODOTORNJEVI**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivana Novosel

# **VODOTORNJEVI**

ZAVRŠNI ISPIT

izv. prof. dr. sc. Ivan Halkijević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivana Novosel

# **WATER TOWERS**

FINAL EXAM

izv. prof. dr. sc. Ivan Halkijević

Zagreb, 2024.

## SAŽETAK

Ovaj rad bavi se analizom čeličnih spremnika za vodu kao ključnih dijelova vodoopskrbnih sustava. Razmatra se njihova konstrukcija, funkcionalnost, održavanje, te očuvanje kvalitete vode koju skladišti. Obuhvaćene su različite vrste spremnika, uključujući spremnike na tlu i povišene spremnike. Opisuje tehnologije i procese koji se koriste u njihovoj izgradnji, te materijale i metode primijenjene za osiguravanje dugotrajnosti i otpornosti spremnika. Poseban naglasak stavljen je na zavarene čelične spremnike – opisuje se proces njihove izgradnje od izrade čelika pa sve do montaže na terenu. Rad također naglašava važnost pravilne cirkulacije vode, stabilizacije tlaka i očuvanja kvalitete vode u vodoopskrbnim sustavima. Objašnjavaju se razne metode za predviđanje ponašanja tekućine i tehnologije za udaljeno praćenje stanja spremnika. Zaključuje se da su vodotornevi ključni za očuvanje stabilnog tlaka u vodoopskrbnoj mreži, uz smanjenje troškova energije i povećanje sigurnosti distribucije vode.

**Ključne riječi:** vodotoranj, spremnik za vodu, čelik, vodoopskrbni sustav, kvaliteta vode, dinamika fluida

## SUMMARY

This paper focuses on the analysis of steel water tanks as key components of water distribution systems. It examines their construction, functionality, maintenance, and the preservation of the quality of stored water. Various types of tanks are covered, including ground-level tanks and elevated tanks. The paper describes the technologies and processes used in their construction, as well as the materials and methods applied to ensure the durability and resilience of the tanks. Special emphasis is placed on welded steel tanks – describing the process of their construction from steel production to on-site assembly. The paper also highlights the importance of proper water circulation, pressure stabilization, and maintaining water quality in water distribution systems. Various methods for predicting fluid behavior and technologies for remote monitoring of tank conditions are explained. The conclusion states that water towers are crucial for maintaining stable pressure in the water supply network, reducing energy costs, and enhancing the safety of water distribution.

**Keywords:** water tower, water tank, steel, water distribution system, water quality, fluid dynamics

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	<b>i</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>ii</b>
<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>iii</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TIPIČNI KAPACITETI I KONFIGURACIJE</b> .....	<b>2</b>
2.1. Rezervoari.....	2
2.2. Cilindrični vodotornjevi.....	3
2.3. Spremnici na nosačima.....	3
2.3.1. Spremnici sa više nosača.....	3
2.3.2. Spremnici na centralnom nosaču.....	4
<b>3. PROJEKTIRANJE KROVNIH KONSTRUKCIJA ZA REZERVOARE I CILINDRIČNE SPREMNIKE</b> .....	<b>6</b>
3.1. Krovovi podržani stupovima i gredama.....	6
3.2. Samonosivi krovovi.....	7
<b>4. PROJEKTIRANJE I IZGRADNJA SPREMNIKA</b> .....	<b>9</b>
4.1. Standardi za dizajn.....	9
4.2. Izvođač.....	9
4.3. Određivanje lokacije spremnika.....	9
4.4. Troškovi energije.....	11
4.5. Odabir vrste spremnika.....	12
4.6. Određivanje veličine spremnika.....	13
4.7. Kvaliteta vode.....	14
4.8. Temeljenje.....	15
4.8.1. Temelji spremnika na tlu.....	15
4.8.2. Temelji spremnika na nosačima.....	16
4.9. Premazivanje spremnika.....	16
4.9.1. Zavareni spremnici.....	16
4.9.2. Spremnici sastavljeni vijcima.....	17
<b>5. IZGRADNJA ZAVARENIH ČELIČNIH SPREMNIKA</b> .....	<b>18</b>
5.1. Izrada čelika.....	18
5.1.1. Materijal.....	18
5.1.2. Rezanje.....	18
5.1.3. Oblikovanje.....	19
5.1.4. Sastavljanje (zavarivanje).....	20
5.1.5. Priprema površine i prvi sloj.....	21
5.2. Konstrukcija zavarenih spremnika na tlu.....	21

5.2.1. Osiguranje stabilnosti.....	21
5.2.2. Konstrukcija dna rezervoara.....	21
5.2.3. Konstrukcija stijenke.....	23
5.2.4. Konstrukcija krova.....	24
5.3. Konstrukcija povišenih čeličnih spremnika.....	25
5.3.1. Spremnik na centralnom nosaču.....	25
5.3.2. Spremnik na više nosača.....	26
<b>6. ISTRAŽIVANJE DINAMIKE VODE U SPREMNICIMA.....</b>	<b>27</b>
6.1. Mrežni model.....	27
6.2. Laboratorijske makete.....	28
6.3. Pokazne boje.....	28
6.4. Poluempirijski matematički modeli.....	29
6.5. Računalna dinamika fluida.....	29
<b>7. PRAĆENJE I ODRŽAVANJE KVALITETE VODE U SPREMNICIMA.....</b>	<b>31</b>
7.1. Pokretanje vode u spremniku.....	31
<b>8. DINAMIKA FLUIDA U SPREMNICIMA.....</b>	<b>32</b>
8.1. <i>Plug flow</i> .....	33
8.2. Miješano tečenje.....	33
<b>9. VENTILACIJA SPREMNIKA.....</b>	<b>36</b>
<b>10. TELEMETRIJA.....</b>	<b>37</b>
<b>11. UŠTEDA ELEKTRIČNE ENERGIJE U VODOOPSKRBNOM SUSTAVU.....</b>	<b>39</b>
<b>12. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>40</b>
<b>POPIS LITERATURE.....</b>	<b>41</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>42</b>

## 1. UVOD

Vodotoranj je građevinski objekt u kojemu se voda pohranjuje u sklopu vodovodne mreže. Ima ključnu ulogu u osiguravanju stalne i pouzdane opskrbe pitkom vodom korisnicima vode iz tog spremnika. Uz to, osigurava dodatne zalihe vode za hitne slučajeve poput požara ili prekida električne energije i drugih poremećaja vodovodne mreže. Njihov volumen treba biti dovoljan da osigura dovoljnu količinu vode u satima najveće potrošnje, maksimalno opterećenog dana ili za gašenje požara. Vodotornjevi ne moraju nužno biti povezani s javnim vodoopskrbnim sustavom već mogu služiti isključivo za rad protupožarnih sustava ili industrijske svrhe.

Služe za osiguravanje stabilnog pritiska u vodoopskrbnom sustavu. Visina na kojoj se nalazi spremnik odabire se ovisno o potrebnom iznosu tlaka vode. Korisni su u nizinskim područjima gdje nadmorska visina nije dovoljna za osiguranje opskrbe vodom pomoću gravitacije. Visoki spremnici omogućavaju postavljanje spremnika na dovoljnoj visini da bi se voda iz njega mogla gravitacijski propuštati, odnosno da bi se stvorio potreban tlak u vodoopskrbnom sustavu. Punjenje spremnika noću kada je potražnja niska i gravitacijsko pražnjenje tijekom dana smanjuje potrebu za crpljenjem vode tijekom vršnih opterećenja. Time predstavljaju ekonomično rješenje zbog smanjenja rada crpki i korištenja jeftinije električne energije.

Važan su dio infrastrukture koji omogućuje siguran rad vodoopskrbnih sustava i smanjenje opterećenja na crpke. Osim toga, igraju ključnu ulogu u smanjenju gubitaka u mreži, jer pomažu u održavanju konstantnog tlaka vode, čime se smanjuje rizik od pucanja cijevi i curenja. Građeni su uglavnom od čelika, a njihov dizajn može varirati od jednostavnih funkcionalnih struktura do složenih arhitektonskih rješenja koja postaju prepoznatljivi simboli naselja. U nekim slučajevima služe kao turističke atrakcije ili vidikovci.

Kroz povijest su se razvijali različiti tipovi vodotornjeva, a njihov oblik i veličina prilagođavali su se specifičnim potrebama i tehničkim mogućnostima određenog razdoblja. Moderni vodotornjevi često uključuju napredne tehnologije za nadzor i upravljanje protokom vode, što omogućuje još učinkovitije upravljanje vodnim resursima i prilagodbu promjenjivim uvjetima potrošnje. [1], [2]



## 2. TIPIČNI KAPACITETI I KONFIGURACIJE

Čelični spremnici za vodu mogu biti različitih oblika ovisno o potrebnom kapacitetu, nadmorskoj visini, troškovima ili željenom izgledu. Postoje tri tipa.

### 2.1. Rezervoari

Prvi tip spremnika cilindričnog je oblika sa ravnim dnom kojim leži na tlu, visine spremnika manje ili jednake njegovom promjeru. Najčešći su tip spremnika za skladištenje vode. Ako skladište pitku vodu, pokriveni su krovnom konstrukcijom koja može biti podržana stupovima ili samonosiva. [1], [2]



*Slika 1: Rezervoar sastavljen vijcima*



*Slika 2: Zavareni rezervoar*

## 2.2. Cilindrični vodotornjevi

Drugi tip spremnika cilindričnog je oblika sa ravnim dnom kojim leži na tlu, visine veće od svog promjera. Obično se grade tamo gdje nema uzvišenog terena, a potrebna je dodatna visina za stvaranje vodnog tlaka za distribuciju vode. Dizajnirani su tako da voda u spremniku, kad dosegne određenu razinu, održava tlak sustava putem gravitacije. [1], [2]



*Slike 3 i 4: Cilindrični vodotornjevi*

## 2.3. Spremnici na nosačima

Treći tip sastoji se od spremnika za vodu i njegove potpore koja ga uzdiže na potrebnu visinu. Takvi se spremnici obično koriste tamo gdje nadmorska visina tla nije dovoljna da osigura distribuciju vode pod odgovarajućim tlakom pomoću gravitacije. [1], [2]

### 2.3.1. Spremnici sa više nosača

Sastoji se od čeličnog spremnika poduprtog sa više ojačanih čeličnih nosača i središnjim čeličnim ljestvama. Većina također ima vanjski balkon koji olakšava inspekciju i održavanje spremnika. Prednost ovih spremnika je njihova izrazita stabilnost i strukturalna čvrstoća.

Horizontalni i dijagonalni podupirači dodatno ojačavaju konstrukciju te povećavaju njenu otpornost na različite sile iz okoliša. [1], [2]



*Slike 5 i 6: Povišeni spremnik na više nosača*

### **2.3.2. Spremnici na centralnom nosaču**

Vodotoranj na centralnom nosaču je tip vodotornja kojeg odlikuje jedan, centralno smješteni nosač koji služi kao potporna struktura spremniku za vodu. Ovakav dizajn zauzima malo prostora te olakšava inspekciju i održavanje oko baze tornja zbog dostupnosti koju pruža centralni nosač. Proširena baza nosača sadržava dovoljno prostora za operativnu opremu. Ljestve za pristup spremniku i krovu postavljaju se unutar nosača kako bi se zaštitilo od neovlaštenog pristupa.

Modificirani spremnik ima središnji potporni stup, izrađen od čelika ili betona, obično sa žljebovima radi strukturalne čvrstoće. Svojom velikom širinom ograđuje potpornu cijev, cijev za prelijevanje i ljestve za pristup spremniku. Prostor unutar stupa još može sadržavati i crpke, skladište ili urede.

Kompozitni vodotoranj koristi kombinaciju čelika i betona na najisplativiji način. Beton, koji je vrlo otporan za tlačna opterećenja, koristi se za izradu potpornog stupa za vodonepropusni čelični spremnik za vodu. Betonski potporni stup ujedno pruža dodatni prostor unutar stupa za skladištenje ili uredski prostor. Kod ove vrste vodotornja postoje dva tipa spremnika: zavareni i sastavljeni vijcima. Zavareni spremnici mogu imati konusni ili

kupolasti krov te kupolasto dno od betona sa čeličnom oblogom. Spremnici sastavljeni vijcima podržani su pločom od ojačanog betona postavljenom na vrhu betonskog nosivog stupa. Ploča služi kao temelj za spremnik te se može dizajnirati i izgraditi tako da služi kao dno spremnika. Krov u obliku kupole može biti od čelika ili aluminija sastavljenog vijcima. [1], [2]



*Slika 7: Povišeni spremnik na centralnom nosaču*



*Slika 8: Modificirani povišeni spremnik*



*Slika 9: Kompozitni povišeni spremnik*

### 3. PROJEKTIRANJE KROVNIH KONSTRUKCIJA ZA REZERVOARE I CILINDRIČNE SPREMNIKE

S ciljem da budu atraktivni, ali i funkcionalni, došlo je do razvoja širokog spektra dizajna krovova. Zavareni spremnici za krov koriste oblik konusa, kišobrana, kupole i elipsoida. Spremnici sastavljeni vijcima koriste uglavnom konus, ili mogu imati aluminijsku kupolu. Neki od njih su podržani stupovima, dok su drugi samonosivi.

Sve dijelove krovne konstrukcije potrebno je dizajnirati tako da se minimiziraju potencijalna mjesta korozije, a zaštitni premazi trebaju se primijeniti na sve površine koje to zahtijevaju. [1], [2]

#### 3.1. Krovovi podržani stupovima i gredama

Krov u obliku stošca podržan stupovima i gredama (Slika 10) najekonomičniji je izbor za rezervoar jer ima minimalan nagib radi odvodnje i omogućuje lak pristup otvoru za inspekciju unutrašnjosti. Opterećenja se preko stupova prenose u baze stupova. Prijelaz sa stijenke na krov može se, umjesto oštrog prijelaza, oblikovati u glatku krivulju. [1], [2]



*Slika 10: Unutarnji pogled na rezervoar i njegovu krovnu konstrukciju*

### 3.2. Samonosivi krovovi

Samonosivi čelični krovovi oslonjeni su direktno na vrhu stijenke spremnika, bez dodatnih nosača. Unutar samonosivih krovova velikog promjera, mogu se koristiti strukturalna ojačanja kako bi se izbjegla prekomjerna debljina ploča. Rešetke bi trebale biti postavljene iznad razine vode kako bi se spriječila oštećenja od leda i ubrzana stopa korozije.

Krov u obliku kupole ili kišobrana (slike 11 i 12) izrađen je od više ploča međusobno spojenih vijcima ili zavarivanjem.

Samonosivi elipsoidni krov (slika 13) oblikovan je s omjerima velike i male poluosi elipse od približno 2:1. Prijelaz sa stijenke spremnika na krov je glatka, neprekinuta krivulja. Spremnici većeg promjera obično imaju unutarnja strukturalna ojačanja ili grede, koji mogu biti podložni koroziji ako nisu pravilno dizajnirani ili održavani.

Za cilindrične vodotornjeve i rezervoare malog promjera, najekonomičniji je samonosivi konusni krov (slika 14) bez unutarnjih strukturalnih elemenata. Za takve krovove potrebno je osigurati pristup revizijskim otvorima i ventilima jer je prestrm za hodanje. [1], [2]



*Slike 11 i 12: Samonosivi aluminijski krov u obliku kupole*



*Slika 13: Samonosivi elipsoidni krov*



*Slika 14: Samonosivi konusni krov*

## **4. PROJEKTIRANJE I IZGRADNJA SPREMNIKA**

### **4.1. Standardi za dizajn**

U američkim nacionalnim standardima (American Water Works Association, skr. AWWA) određene su minimalne dopuštene vrijednosti za proračun opterećenja od vode, snijega, vjetra i korisnog opterećenja. Ti standardi dodjeljuju specifične odgovornosti vlasniku i izvođaču za izgradnju čeličnih spremnika. Iznimka su standardi za seizmički dizajn jer se stalno mijenjaju. Stoga je potrebno koristiti najnovije izdanje AWWA standarda i lokalnih građevinskih propisa kako bi se pravilno odredili kriteriji seizmičkog dizajna za spremnik. [1]

### **4.2. Izvođač**

Nakon natječaja za izvođača za izradu spremnika i dodjele ugovora odabranom izvođaču, on zatim treba pripremiti planove za izradu temelja i detaljne nacрте čeličnog spremnika. Ti se planovi onda dostavljaju vlasniku na pregled nakon čega može početi izrada. Bilo koji posao izgradnje spremnika obavlja izvođač spremnika ili druga zadužena osoba uz pismeno odobrenje izvođača. Opremu nabavljaju od konstruktora zaduženih za specijaliziranu opremu i lokalnih dobavljača za dodatnu opremu. Nakon završetka izrade, vlasnik specificira garanciju spremnika na određeno vrijeme. [1]

### **4.3. Određivanje lokacije spremnika**

Pri odabiru lokacije treba paziti na mnogo faktora. Brojni uvjeti mogu značajno utjecati na izbor prikladne lokacije i time na ukupne troškove projekta spremnika.

Treba uzeti u obzir dostupnost i prikladnost zemljišta; dobivanje odgovarajuće prostorne dozvole, troškovi zemljišta, potrebne pomoćne komunalne usluge, duljine priključaka na postojeći vodoopskrbni sustav, uvjeti okoline.

Potrebno je provesti cjelovito istraživanje tla da bi se utvrdilo je li tlo dovoljno nosivo, razine slijeganja, prisutnost stijena, razina podzemne vode, stabilnost pokosa, seizmičko projektiranje te koji tip temelja će se koristiti. Neke lokacije mogu zahtijevati duboko temeljenje i metode stabilizacije tla, što bi moglo značajno povećati troškove projektiranja i izgradnje. Dubina na kojoj se postiže potrebna nosivost tla za podupiranje temelja, zajedno sa stabilnošću pokosa, uvelike može utjecati na potrebnu veličinu lokacije.



Veličina lokacije mora biti dovoljna za montažu, skladištenje opreme i materijala, pomoćne objekte, korištenje strojevima, pjeskarenje i bojanje. Završne granice posjeda trebale bi biti dovoljno udaljene od temelja kako bi ostalo prostora za buduće održavanje spremnika, cijevi i lokacije.

Trebala bi biti udaljena od zgrada i prometa na udaljenosti dovoljnoj da se spriječi buka, materijalna šteta ili ozljeda rezultirana građevinskim aktivnostima, a da nije na području podložnom vandalizmu. Spremnik ne smije predstavljati smetnju okolnim građanima i sadašnja lokacija spremnika ne smije biti područje budućeg rasta zajednice. Treba uzeti u obzir budući rast broja stanovnika i izgradnje i hoće li spremnik moći opskrbiti ta područja. Ne smije ugrožavati vegetaciju, životinje, vode, povijesne znamenitosti i grobna mjesta.

Lokacija spremnika trebala bi biti slobodna od svih nadzemnih i podzemnih prepreka kao što su električne i komunalne linije, plinske i kanalizacijske cijevi te postojeće strukture. Također ne smije predstavljati smetnju zrakoplovnom prometu. Prije početka izgradnje potrebno je ispuniti i podnijeti odgovarajuće obrasce Federalnoj upravi za avijaciju (FAA) kako bi se utvrdilo hoće li spremnik biti prepreka u zračnom prostoru ili prilazu uzletno-sletne staze zračne luke. Ako FAA utvrdi da se spremnik nalazi blizu prilaza, treba ga osvijetliti ili označiti bojama za upozorenje zrakoplovstvu. Najčešći dizajn na spremnicima blizu zračnih luka je crveno-bijela šahovska oznaka.

Mora postojati pristupna cesta ili prikladan pravni put za pristup iz najbliže javne ceste do lokacije spremnika. Ako se spremnik nalazi na udaljenom mjestu izvan ceste, potrebna je izgradnja nove ceste ili privremeno pravo prolaza za pristup lokaciji tijekom izgradnje.

Reljef lokacije trebao bi imati dobru prirodnu drenažu kako bi se spriječila korozija pri dnu spremnika i slijeganje ispod temelja zbog dugotrajne infiltracije površinske vode. Zadržavanje vode na lokaciji može dodati troškove isušivanja i čak zahtijevati promjene u dizajnu temelja.

Treba paziti na postojeće opasnosti kao što su abrazivno pjeskarenje, bojanje, vibracije prilikom zabijanja pilota, buka, požar te valovi i energija koju proizvode AM antene (svi metalni elementi spremnika mogu djelovati kao prijemne antene koje skupljaju i pohranjuju energiju AM valova što potencijalno može šokirati radnika i učiniti gradilište nesigurnim).

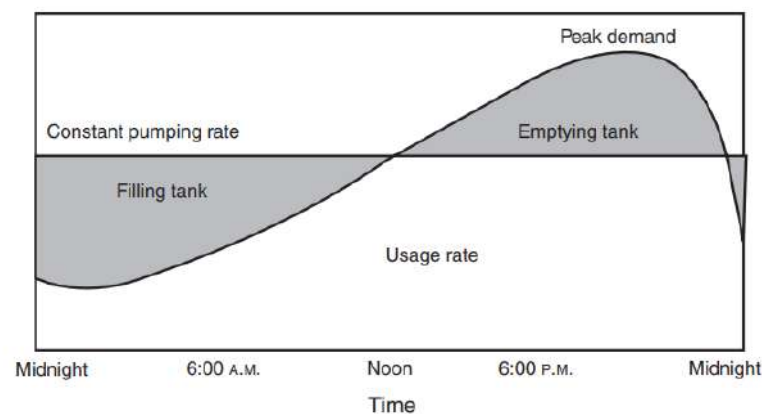
Potrebno je znati maksimalne i minimalne potrebne tlakove i hoće li se koristiti pumpe ili gravitacija za postizanje potrebnog tlaka. Također je potrebno razmotriti probleme s povezivanjem i usklađivanjem operacija drugih vodovodih objekata. [1], [2]



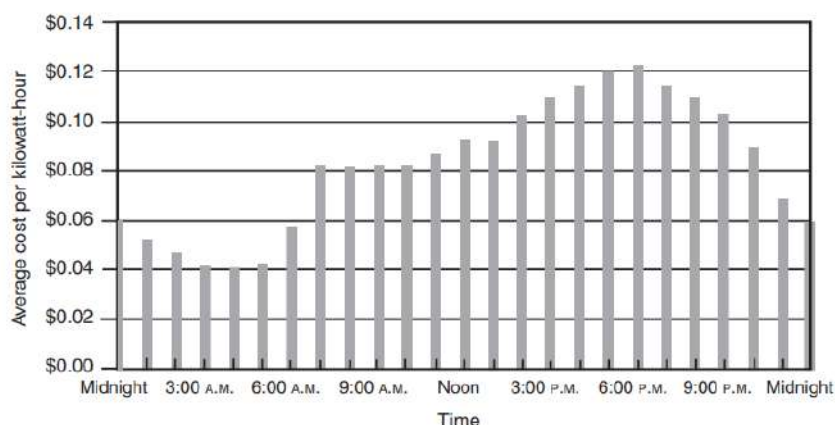
Slika 15: Primjer lokacije spremnika

#### 4.4. Troškovi energije

Obzirom na vrijeme kada se i koliko električne energije koristi, može se kontrolirati količina crpljenja vode kako bi se smanjila maksimalna potrošnja električne energije. Tipičan grafikon potrošnje vode (slika 16) pokazuje punjenje spremnika tijekom noći i ranih jutarnjih sati kada je potražnja niska. Spremnik se zatim prazni tijekom dana, a potražnja za vodom doseže vrhunac negdje između 17:00 i 21:00 sat. U otprilike isto vrijeme događa se i vršna potražnja za električnom energijom. Električna energija je znatno skuplja tijekom svojih vršnih perioda potražnje (slika 17). Kako bi se postigla najbolja stopa potrošnje električne energije, crpljenje se mora smanjiti tijekom razdoblja kada je električna energija skuplja, a pojačati tijekom sati kada je niska. [1], [2]



Slika 16: Dnevna potrošnja vode



Slika 17: Cijena električne energije tijekom dana

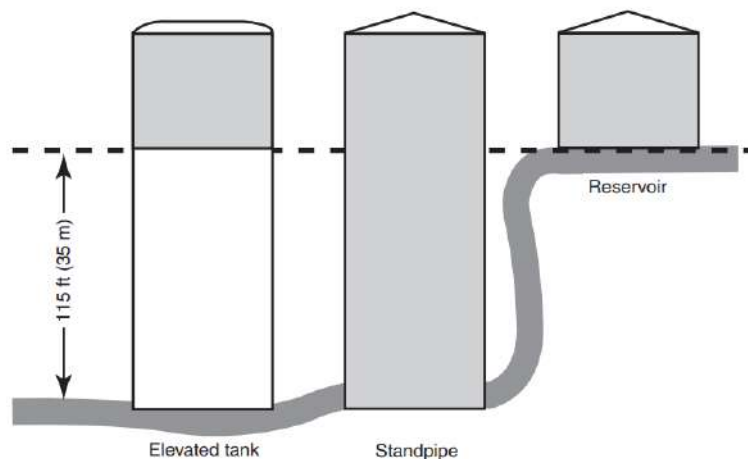
#### 4.5. Odabir vrste spremnika

Hoće li se graditi spremnik na tlu ili povišeni spremnik, ovisi prvenstveno o konfiguraciji terena. Ako lokacija na kojoj se gradi spremnik ima prirodno uzvišenje koje bi moglo osigurati potreban tlak gravitacijskim tečenjem, ekonomičniji izbor bio bi rezervoar. Ako prevladava nizinski teren, gradit će se povišeni spremnik na nosačima ili visoki cilindrični vodotoranj. Izgradnja bilo kojeg tipa spremnika na povišenom području smanjuje troškove i potrebnu visinu spremnika.

Ako se koristi rezervoar u područjima gdje je topografija relativno ravna i nije dostupna lokacija na većoj visini, potreban tlak za distribuciju vode može se postići i pumpama. Ako se rezervoar nalazi na nadmorskoj visini većoj od područja potražnje, potreban tlak postiže se samom gravitacijom.

Na nizinskim područjima ekonomičnije je koristiti povišene spremnike na nosačima da bi se, podizanjem visine spremnika do visine iznad područja potražnje, gravitacijom postigao potreban tlak.

Kad je potpuno pun, gornja trećina pohranjene vode u cilindričnom vodotoranju na dovoljnoj je visini da osigura tlak za gravitacijsko tečenje. Ako je dvije trećine pun, gornja polovica vode osigurava tlak za hitne slučajeve. Ako je samo jednu trećinu pun, ne postiže se dovoljan tlak i moralo bi se koristiti pumpe. Slika 18 prikazuje kako različite vrste spremnika osiguravaju tlak koristeći gravitacijsko tečenje. Ako postoji dostatan gravitacijski potencijal, odnosno dovoljno velika razlika u visini između spremnika i točke potrošnje, voda će teći s točke višeg potencijala prema točki nižeg potencijala bez potrebe za korištenjem pumpi. Težina vode stvara tlak potreban za kretanje vode prema područjima potrošnje. Što je veća visinska razlika između spremnika i mjesta potrošnje, to je veći tlak vode i time učinkovitija distribucija.



Slika 18: Osiguravanje tlaka korištenjem gravitacijskog tečenja

Poželjno je birati lokacije sa višim terenom jer je korištenje pumpi znatno skuplje od gravitacijskog tečenja. Najveći rad pumpi događa se u vrijeme kad je potražnja za vodom najveća, u otprilike isto vrijeme kada je električna energija najskuplja. Ako uz to uzmemo u obzir i sve dodatne troškove rezervne opreme, očito je da su pumpe skuplje rješenje.

Kod gravitacijskog tečenja, spremnik se puni pomoću manjih pumpi tijekom noći i rano ujutro, kada su cijene električne energije niske. Zatim, tijekom razdoblja velike potražnje, spremnik se prazni pomoću gravitacije čime se izbjegava korištenje najviših cijena električne energije tijekom tog razdoblja. Zbog ovih prednosti, gravitacijsko tečenje je isplativiji način osiguravanja tlaka vode.

Iznos za minimalnu potrebnu visinu da bi se osigurao pretpostavljeni minimalni tlak za distribuciju vode putem gravitacijskog tečenja može se dobiti hidrauličkim proračunom. Na proračunatu visinu dodaje se dodatna visina potrebna za nadoknadu gubitka zbog trenja vode u cijevima vodoopskrbnog sustava.

Drugi faktori koji mogu utjecati na izbor vrste spremnika su njegova estetska privlačnost i uklapanje s okolinom, kolike su potrebe i troškovi budućeg održavanja, zahtijeva li dodatne kapacitete i opremu, kolika je razina zaštite od neovlaštenog pristupa spremniku i slično. [2], [3]

#### 4.6. Određivanje veličine spremnika

Spremnik treba opskrbiti određeno područje pa je prema tome potrebno odrediti koliko vode treba pohraniti, odnosno kolika je potrebna veličina spremnika kako bi se zadovoljio kapacitet potražnje u uobičajenim i hitnim situacijama. U kapacitet spremnika ulaze

prosječna dnevna potrošnja, zahtjevi protupožarne zaštite, dodatni kapacitet zbog održavanja ili prekida u cijevima te dodatni kapacitet za buduću potražnju.

Trenutna prosječna dnevna potrošnja je količina vode koja se koristi u prosjeku tijekom razdoblja od 24 sata. Rezultat je prosječne potrošnje vode po osobi pomnožene s brojem ljudi koje spremnik trenutno opslužuje. Obično je potražnja najniža po noći i rano ujutro, a tijekom dana raste i doseže vrhunac kasno poslijepodne. Vršna satna potrošnja obično iznosi polovicu prosječne dnevne potrošnje. Količina vode za zaštitu od požara iznosi polovicu do jedne trećine prosječne dnevne potrošnje. Kao mjeru opreza, trebalo bi dodati 10 posto za dodatno skladištenje u slučaju curenja u cjevovodima. Za proračun količine vode za buduće potrebe potrebno je predvidjeti broj ljudi buduće populacije i pomnožiti ga s trenutnom prosječnom dnevnom potrošnjom vode po osobi.

Treba voditi brigu o tome da temelj spremnika i tlo moraju moći podržati težinu i vode i samog spremnika. Izračun težine vodenog stupca od dna spremnika do njegove maksimalne visine kapaciteta može dati ideju o težini koju treba poduprijeti i prema tome prilagoditi kapacitet spremnika.

Za povišene spremnike na nosačima, najekonomičnije skladištenje postiže se odabirom standardnog kapaciteta i raspona visine na temelju preporuka izvođača spremnika. Rezervoari i cilindrični vodotornjevi imaju veću fleksibilnost u svojim ograničenjima dimenzija. Razmatra se omjer visine i promjera te kako to utječe na otpornost na vanjske čimbenike. Što je viši i tanji, osjetljiviji je na seizmička djelovanja. Što je viši i širi, osjetljiviji je na utjecaj vjetra. Za područja s lošijom nosivosti tla, jakim vjetrovima i visokim faktorom potresa najekonomičniji izbor su spremnici čiji je promjer veći od visine. [1], [2]

#### **4.7. Kvaliteta vode**

Na kvalitetu vode u sustavu možemo bitno utjecati odabirom dizajna spremnika i konfiguracije cjevovoda. Tijekom faze dizajniranja spremnika potrebno je razmotriti kako oblikovati sustav da bi se osigurala cirkulacija vode i izbjeglo dugo zadržavanje vode unutar spremnika. Starost vode može se izbjeći pokretanjem vode pomoću sustava za cirkulaciju ili miješanjem koji sprečavaju stagnaciju vode. Kvaliteta vode može se povećati i dodatnom dezinfekcijom. Postupci dezinfekcije spremnika obično se provode prema standardima ili strožim zahtjevima lokalnih zdravstvenih agencija. Spremnik se mora testirati prije premazivanja jer ispitivanje vode prije premazivanja omogućuje identifikaciju i ispravak bilo kakvih deformacija zbog slijeganja temelja i bilo kakvih propuštanja koja su privremeno bila prekrivena unutarnjim premaznim sustavom. [1]

## 4.8. Temeljenje

Prije ugradnje temelja, ključno je najprije provesti ispitivanje tla. Opterećenje koje se mora prenositi u tlo varira ovisno o vrsti spremnika. Neki od podataka koje bi trebao uključivati detaljni izvještaj o ispitivanju tla na području spremnika su detaljan zapis o izvedenim bušotinama, laboratorijska analiza uzoraka tla, klasifikacija slojeva tla, homogenost i stlačivost tla, visina podzemnih voda, informacije o prisutnosti stijena, starih iskopa ili nasipanja, topografska obilježja, nosivost tla, preporuka o vrsti temelja, informacije za pseudo-dinamički seizmički dizajn itd.

Nakon terenskih istraživanja i laboratorijskih ispitivanja, najidealniji sustav temelja može preporučiti geotehničar. [1]

### 4.8.1. Temelji spremnika na tlu

Postoji pet vrsta temelja za zavarene čelične spremnike s ravnim dnom: temelj u obliku betonskog prstenastog zida gdje spremnik leži na ili unutar tog zida, temelj u obliku betonske ploče te granulirani nasip sa ili bez čeličnih ojačavajućih prstenova. Postoji i šesti tip za vijčane čelične spremnike: spremnici s bočnim zidom ugrađenim u betonsku ploču.

Temelji u obliku prstenastog zida i granuliranog nasipa koriste fino granulirani materijal ispod dna spremnika. Za zaštitu podloge od korozije, može se dodati ulje ili vapnenac. Ako spremnik ne treba biti ukopan, najekonomičniji tip temelja je granulirani nasip. Bitno je obratiti pažnju na odabir materijala nasipa i odvodnju oko spremnika kako bi se osigurala zaštita od ispiranja temelja. Čelični ojačavajući prstenovi mogu se instalirati kako bi se osigurala stabilnost nasipa.

Najčešći tip temelja za rezervoare je onaj na kojemu se spremnik izvana oslanja na betonski prstenasti zid, a dno spremnika na dobro odvodnjeno, nekorozivno, kompaktno punjenje. Spremnici se mogu postaviti unutar zida prstena, ali nužno je osigurati odvodnjavanje jer nakupljena voda unutar zida može izazvati koroziju pri dnu spremnika.

Visoki spremnici na tlu izgrađeni na nestabilnim tlima mogu biti izgrađeni na temeljima od betonskih ploča. Radi odvodnje, ploča mora biti pod nagibom kako bi se izbjegla korozija pri dnu spremnika.

Kod vijčanih čeličnih spremnika sa zidom ukopanim u beton (temeljni tip 6), temelj se sastoji se od betonskog prstena i unutarnjeg granuliranog temeljnog sloja preko kojeg se postavlja ojačana betonska donja ploča. Ojačana betonska ploča direktno služi kao dno spremnika, a čelični zid je ukopan u tu ploču. [1]

#### 4.8.2. Temelji spremnika na nosačima

Sva opterećenja od vanjskih utjecaja prenose se sa spremnika u tlo preko nosača, kružnog prstenastog zida ili njihovom kombinacijom. Ispod nosača i zida postavlja se podloga ili ploča veličine ovisne o količini opterećenja i nosivosti tla. Ako je tlo loše kvalitete, mogu se primijeniti piloti ili kesoni kao potpora za stupove ili zid, a ponekad je potrebna potpuna zamjena tla ili konsolidacija na gradilištu. [1]



Slika 19: Temelj u obliku betonskog prstenastog zida



Slika 20: Temelj nosača povišenog spremnika

#### 4.9. Premazivanje spremnika

##### 4.9.1. Zavareni spremnici

Na spremniku se koristi dvoslojni sustav premaza. Vanjski završni sloj važan je zbog estetike. Međutim, unutarnja površina znatno je važnija jer se najagresivniji i najštetniji uvjeti korozije javljaju unutar spremnika, a čistoća vode mora se očuvati. U donjem unutarnjem dijelu spremnik je u stalnom doticaju s vodom, a u gornjem mora izdržati konstantnu izmjenu vlaženja i sušenja te visoku vlažnost iznad razine visoke vode. Mora biti otporan na djelovanje abrazije leda u hladnim klimama i mora moći izdržati lokalne temperaturne ekstreme i karakteristike vode.

Tijekom izgradnje nužna je inspekcija unutarnjeg premaza spremnika. Kontroliranje materijala premaza, čišćenja, primjene i sušenja nužno je kako bi se osigurala kvaliteta. Inspekcija se mora redovito provoditi i nakon izgradnje. [1]

#### 4.9.2. Spremnici sastavljeni vijcima

Dijelovi spremnika moraju se tretirati pjeskarenjem ili žarenjem i premazivanjem. Kritične unutarnje površine moraju dobiti zaštitni premaz, poput aminske termostabilne tekućine ili prah epoksidne prevlake, premazivanje od taljenog stakla; ili pocinčavanje. To osigurava da spremnik može sigurno skladištiti vodu dugoročno, u različitim temperaturama, uvjetima vlage i vode. [1]



*Slika 21: Zaštitni premaz unutarnje površine*



*Slika 22: Pjeskarenje*



## **5. IZGRADNJA ZAVARENIH ČELIČNIH SPREMNIKA**

### **5.1. Izrada čelika**

Izvođači spremnika razvili su specijaliziranu opremu, alate i postupke za izgradnju spremnika za vodu. Kako bi bilo što manje zavarivanja, odnosno što više cijelih dijelova, izvođač mora izraditi raspored čeličnih elemenata spremnika uzimajući u obzir ograničenja veličine i težine ploča za transport. Čelični dijelovi izrađuju se u radionici i otpremaju na mjesto izgradnje spremnika, gdje se zatim sklapaju i zavaruju. [2]

#### **5.1.1. Materijal**

Materijal za ploče može se nabaviti iz skladišta čelika ili iz čeličane. Čelične ploče iz skladišta dostupne su u standardnim dimenzijama. Vrijeme isporuke materijala iz skladišta je kraći, ali trošak je veći nego za materijal kupljen izravno iz čeličane. Materijal ploča kupljen iz čeličane može se naručiti prema širini, duljini i debljini koje je specificirao kupac. Materijal koji ispunjava određene dodatne zahtjeve dostupan je u većini čeličana. Čeličane obično zahtijevaju minimalnu količinu narudžbe, a vrijeme isporuke je značajno duže nego za materijal kupljen u skladištu. [2]

#### **5.1.2. Rezanje**

Dostupno je nekoliko metoda rezanja ploča na odgovarajuću veličinu u radionici. Jedna od metoda je termalno rezanje (slika 23) pomoću plinskih baklji s kisikom i gorivom ili pomoću električnog luka (plazma rezanje), a moguće je i rezanje laserom. Termalno rezanje može se obavljati na numerički upravljanoj CNC stroju za rezanje. Kako bi se osiguralo dobro prijanjanje i slaganje dijelova na terenu, ploča se reže na potrebnu veličinu, a rubovi se radi zavarivanja mogu suziti i zakositi pomoću više glava za rezanje. Druga metoda je strojno rezanje ploča i obrada rubova. [2]



*Slika 23: Termalno rezanje čelične ploče*

### **5.1.3. Oblikovanje**

Ploče s jednom zakrivljenošću se hladno savijaju u radionici do odgovarajuće zakrivljenosti pomoću valjka (slika 24). Takve ploče često se koriste za izradu površine s dvostrukom zakrivljenošću, primjerice ploče za izradu kupolastog krova.

Ploče s dvostrukom zakrivljenošću oblikuju se hladnim prešanjem koje se izvodi ponavljanim udarcima u ploču postavljene na kalup. Primjeri spremnika s takvim pločama su spremnik sa proširenjem i okrugli spremnik na centralnom nosaču.

Preše za savijanje koriste se i za oblikovanje oštih zavoja na ploči, kao što su rebra. Također se može, udaranjem u ravni kalup uz ostavljanje razmaka između udaraca, napraviti zakrivljena ploča (slika 25). Ova metoda korisna je za debele ploče i za oblikovanje stošca. [2]



*Slika 24: Savijanje ploče pomoću valjka*



*Slika 25: Savijanje ploče pomoću ravnog kalupa*

#### **5.1.4. Sastavljanje (zavarivanje)**

Gotove ploče mogu se sastaviti i zavariti u radionici, što je poželjno jer se izvodi u kontroliranim uvjetima radionice koristeći optimalne procese zavarivanja. Međutim, to je moguće samo do neke mjere zbog ograničenja s dostavom.

Na nekim dijelovima mogu biti potrebna brušenja zavara i oštih rubova kako bi se osiguralo da je konačni profil zavara prikladan za čišćenje i bojanje te da neće štetiti životnom vijeku premaza. [2]



*Slika 26: Zavarivanje dijelova spremnika*

### **5.1.5. Priprema površine i prvi sloj**

Prije premazivanja treba osigurati glatku površinu, bez nedostataka i oštih rubova. Ispravna površina pružit će dobru osnovu za primjenu zaštitnog premaza i zajamčiti njegovu dugotrajnost. Čišćenje se u radionici provodi abrazivnim pjeskarenjem površine nakon čega odmah slijedi prvi sloj premaza. Premazivanje treba izbjegavati oko svih rubova ploča koje će se zavarivati na terenu. Nakon ovog postupka, ploče su spremne za isporuku. [2]

## **5.2. Konstrukcija zavarenih spremnika na tlu**

### **5.2.1. Osiguranje stabilnosti**

Ako rezervoar nije pričvršćen za tlo sidrenim vijcima, razmak između dna spremnika i betonskog temelja može se ispuniti malterom ili postavljanjem ploče vlaknatice prekrivene asfaltom. Ako je rezervoar pričvršćen, preporučuje se upotreba maltera jer ploča vlaknatice može s vremenom propadati čime dolazi do vertikalnih pomaka spremnika i potrebe za zatezanjem sidrenih vijaka. [2]

### **5.2.2. Konstrukcija dna rezervoara**

Dno spremnika koji se oslanja na tlo je nenapregnuta membrana preko koje se opterećenje od sadržaja spremnika prenosi na temelje. Dno spremnika treba biti blago uzdignuto prema centru spremnika.

Sastavlja se od pravokutnih ploča prema točno određenom rasporedu sastavljanja (slika 27). Po tri ploče se međusobno spajaju preklopnim zavarom koji međusobno i od ljuske spremnika moraju biti udaljeni minimalno 30 cm. Ploče se tako sastavljaju dok se ne pokrije dovoljna površina, a zatim se kružno izrezuju, s radijusom minimalno 5 cm većim od radijusa spremnika.



*Slika 27: Raspored pravokutnih ploča dna spremnika*

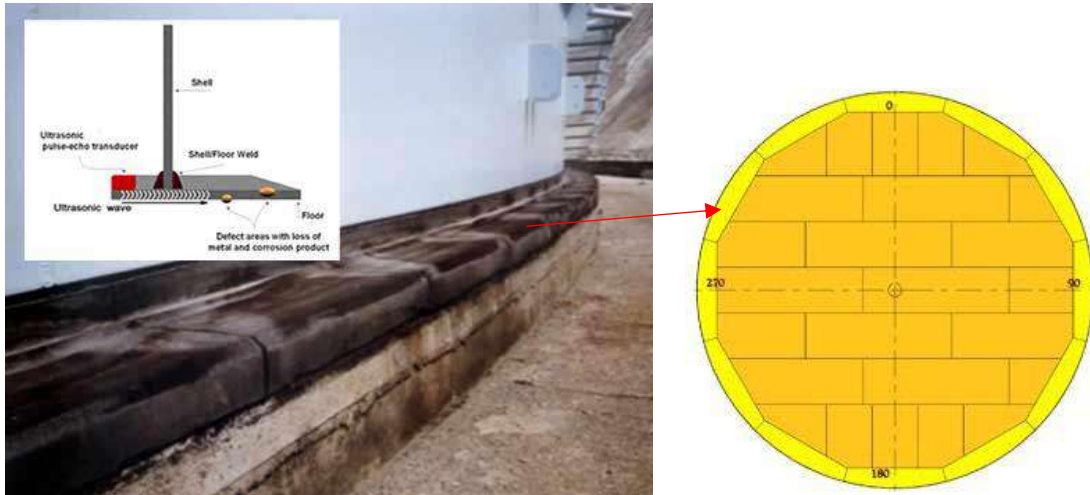
Ploče se obično zavaruju preklopnim zavarivanjem samo s gornje strane (slika 28). Ako je ploča veće debljine i ako je potrebno zatvoriti donju stranu dna, s donje strane se spajaju sučelnim zavarivanjem.



*Slika 28: Preklopno zavarivanje ploča dna spremnika*

Ako je podizanje spremnika uslijed potresa veliko, može se postaviti anularni prsten (slika 29) radi povećanja otpornosti na podizanje. U tom slučaju nisu potrebni sidreni vijci. Dijelovi anularnog prstena moraju biti sučelno zavareni, a na donju ploču preklopno. Spoj spremnika s donjom pločom treba biti kontinuirani kutni zavar s obje strane ljuske. Anularni prsten ključan je za cjelovitost spremnika jer trpi najveća mehanička naprezanja. Slijeganje može

rastvoriti zavar i izložiti donju stranu spremnika zraku i vodi, što može potaknuti koroziju. Prstenasti dio također je podložan ubrzanoj koroziji zbog dodatnih naprezanja uzrokovanih težinom stijenke spremnika i veće mogućnosti zadržavanja vode ispod prstenaste ploče. Zbog toga je bitno redovito raditi inspekcije prstena. [2], [4]



*Slika 29: Anularni prsten*

### 5.2.3. Konstrukcija stijenke

Proces sastavljanja stijenke spremnika kreće od postavljanja najprije donjeg prstena nakon čega se dizalicom redom montira svaka ploča stijenke dok nije kompletna.

Tijekom sastavljanja, nedovršena stijenka može se lako saviti pod utjecajem vjetra zbog čega bi morala biti ojačana korištenjem skela za gradnju. Skele se sastoje od nosača i dasaka međusobno pričvršćenih tako da djeluju kao prstenasti ojačivač spremnika.

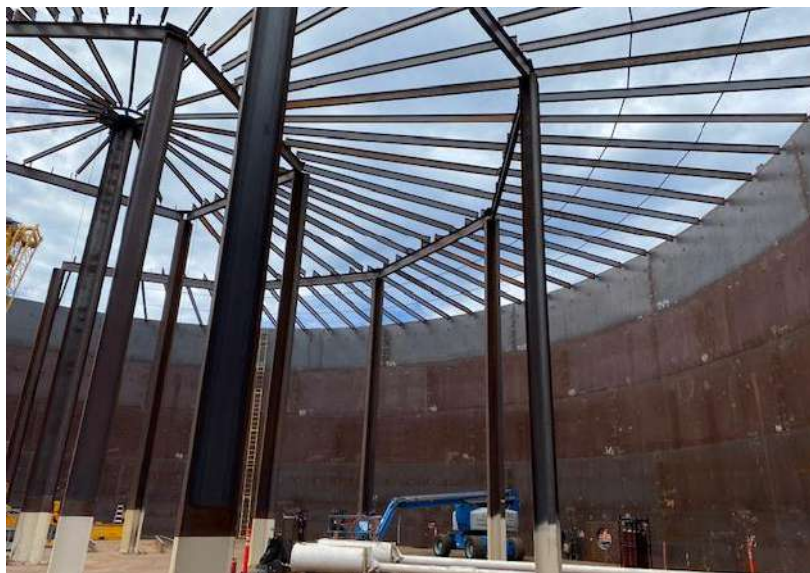
Prodori na stijenci spremnika potrebni su za pristup unutrašnjosti radi inspekcije i za prelijevanje vode ako dođe do prepunjavanja. Također se rade prodori za postavljanje cijevi, najčešće kroz dno. [2]



*Slika 30: Sastavljanje stijenke spremnika*

#### **5.2.4. Konstrukcija krova**

Nakon što su dno i stijenka spremnika postavljena, na vrh se montira krovna konstrukcija. Ako je krov poduprt, za postavljanje komponenti krovne konstrukcije direktno na vrh spremnika koristi se dizalica. Ako je samonosivi tip krova, može se izgraditi direktno uz pomoć dizalice i privremene potpore za krov, ili se može izgraditi na privremenim potpornjima izvan spremnika i zatim kao gotova konstrukcija podići na spremnik. [2]



*Slika 31: Montiranje krovne konstrukcije*

### 5.3. Konstrukcija povišenih čeličnih spremnika

Povišeni spremnici postavljaju se korištenjem jarbolne dizalice, toranjske dizalice ili mobilne dizalice.

Sastavni dijelovi spremnika često se sklapaju na tlu na gradilištu zbog čega moraju biti u dopuštenim rasponima težine i veličine radi lakšeg montiranja.

Za pomoć u podizanju, postavljanju, usklađivanju i razmještanju ploča s odgovarajućim razmacima za zavarivanje koristi se specijalizirana pomoćna oprema. Održavanje točnih razmaka, usklađenosti i cjelokupne dimenzijske točnosti je ključno. Dimenzijska točnost održava se stalnim provjeravanjem dimenzija radi utvrđivanja da je komponenta u ravnini. [2]

#### 5.3.1. Spremnik na centralnom nosaču

Sučelno zavarivanje s punim prodiranjem koristi se za sve komponente spremnika na centralnom nosaču osim krova. Krov je obično povezan preklopnim zavarima s gornje strane.

Baza centralnog nosača u obliku konusa zavarena je za debelu baznu ploču koja je sučelno zavarena punim prodiranjem, postavljena na podloške i učvršćena za temelj pomoću sidrenih vijaka. Nakon što je spremnik postavljen, prostor ispod bazne ploče ispunjava se malterom. [2]



*Slika 32: Montiranje spremnika na centralnom nosaču*



### 5.3.2. Spremnik na više nosača

Montaža obično započinje sastavljanjem prvog panela nosive konstrukcije. Sastoji se od parova stupova, jednog učvršćenog nosača i slobodno povezanih poprečnih nosača. Dno stupova zavareno je za bazne ploče postavljene na podloške na temeljnim postoljima i učvršćene sidrenim vijcima. Nakon što je prvi panel sastavljen, poprečni nosači se podešavaju i učvršćuju kako bi se osiguralo da je panel pravokutan i ravan prije nego što se prijeđe na sljedeći panel. Sljedeći paneli sastavljaju se na isti način, ali se stupovi gornjeg panela zavaruju na stupove donjeg panela.

Donji dio spremnika zavaruje se na gornje stupove prije nego što se spremnik postavi. Ploče spremnika spajaju se zavarom sa punim prodiranjem.

Postoji i obrnuti redoslijed gradnje gdje se spremnik sa gornjim panelom sastavlja na tlu nakon čega se podiže dizalicama, a donji stupovi se postavljaju ispod. Struktura se zatim spušta na odgovarajuću visinu i postavlja na stupove.

Nakon što je spremnik završen, izvršava se konačno zatezanje ili zavarivanje poprečnih nosača, a prostor ispod baznih ploča ispunjava se malterom. [2]

## 6. ISTRAŽIVANJE DINAMIKE VODE U SPREMNICIMA

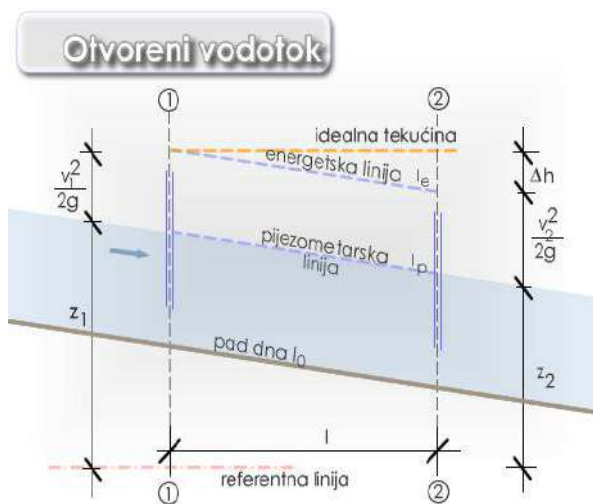
### 6.1. Mrežni model

Modeliranje sustava distribucije vode izvodi se pomoću mrežnog modela u kojemu se mogu simulirati različiti hidraulički scenariji. Ispituje se ponašanje vode u stacionarnom stanju i u pokretu. Mrežni model sastavljen je od skupa cijevi međusobno povezanih u prostoru preko čvorišta kroz koje voda može ulaziti ili izlaziti iz sustava. Na rubovima mreže su spremnici koji definiraju granice piezometarske linije na tim točkama.

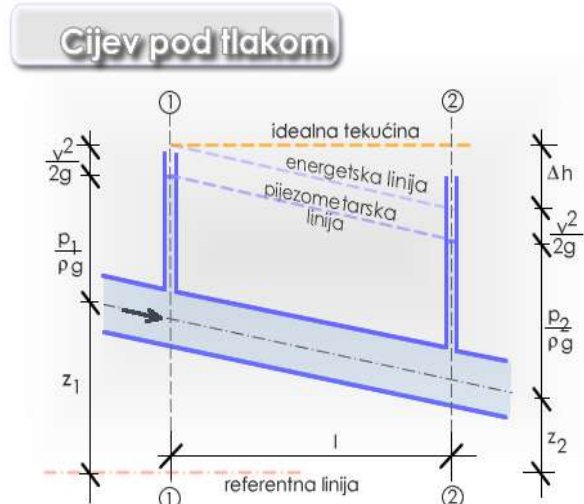
Kod ispitivanja, važan parametar u sustavu distribucije vode je tlak. Tlak raste s dubinom i uvijek je isti na istoj dubini stacionarne tekućine bez obzira na oblik ili volumen spremnika. Tlak se jednako širi u svim pravcima i uvijek djeluje okomito na uronjenu površinu bez obzira na njen oblik (Pascalov zakon). To znači da će se na svakoj točki cjevovoda ili spremnika koja je u kontaktu s vodom stvarati kontinuirani pritisak okomito na tu površinu, uz povećanje s dubinom. Drugi važan parametar je protok. Predstavlja količinu vode koja proteče promatranim presjekom cijevi u jedinici vremena.

Za modeliranje vodoopskrbnog sustava pomoću mrežnog modela, bitno je poznavati razine energetske i piezometarske linije. Svaka točka u sustavu ima razinu energije koja se može prikazati pomoću energetske linije. Energetska linija (EGL) je graf ukupne energije u odnosu na poziciju u cijevi od referentne linije. Drugim riječima, to je visina do koje tekućina raste iz sonde za ukupni tlak koja je usklađena paralelno s tokom i okrenuta prema toku. Gubitci zbog trenja u cijevi uzrokuju da EGL kontinuirano pada u smjeru protoka. Što je protok brži, EGL ima strmiji pad. Prema Bernoullijevoj jednadžbi, ako se poprečni presjek strujne cijevi smanji, kako bi se održao isti protok, mora doći do povećanja brzine u smjeru tečenja. Zbog povećanja brzine raste kinetička energija čime se smanjuje tlak i potencijalna energija. Graf kojim se prikazuje zbroj tlaka i potencijalne energije u odnosu na poziciju u sustavu od referentne linije zove se piezometarska linija (HGL). Drugim riječima, to je visina do koje se tekućina uzdigne unutar otvorene cijevi vertikalne na tok (piezometar). Također predstavlja visinu vode u spremniku povezanim sa tim sustavom. Razlika EGL i HGL daje iznos kinetičke energije u promatranj točki. Stoga, piezometarska linija nikada ne može biti iznad energetske linije, a u mirovanju se poklapaju. Pumpe u tok unose mehaničku energiju zbog čega se na poziciji ugrađenih pumpi pojavljuje lokalni skok energetske i piezometarske linije.

Razine energetske i piezometarske linije na mrežnom modelu pomažu opisati dinamiku fluida te raspodjelu energije i tlaka unutar sustava distribucije vode. [2], [5], [6]



Slika 33: Razine EGL i HGL u otvorenom vodotoku



Slika 34: Razine EGL i HGL u cijevi pod tlakom

## 6.2. Laboratorijske makete

Makete su geometrijski slični smanjeni modeli kojima se u laboratorijskim uvjetima simuliraju stvarni radni uvjeti i otkrivaju stvarne performanse spremnika. Izrađuju se u omjerima od 1:30 do 1:50.

Glavni bezdimenzionalni parametri koji se koriste kod izrade maketa spremnika su Froudeov broj, Reynoldsov broj i Weberov broj. Spremnik i njegova maketa su sukladni ako su ti brojevi isti. [2]

## 6.3. Pokazne boje

Za istraživanje raspodjele vode u spremniku koriste se pokazne boje ili kemikalije, optičke tehnologije i laseri. Kako se miješaju s vodom, ostavljaju trag koji pokazuje strujanje vode u modelu od ulaza do izlaza i njeno vrijeme zadržavanja.

Pokazne boje uključuju kloridne ione, fluoridne ione i fluorescentnu boju rodamin. Ispuštaju se u poznatoj koncentraciji pomoću pumpe za doziranje na ulaznom cjevovodu spremnika. Prate se pomoću ionsko-selektivnih elektroda, sonde za vodljivost, kolorimetara ili vizualnih/fotografskih promatranja. Pokazne boje mogu se ubrizgavati metodom postupnog doziranja ili metodom jednokratnog doziranja. U slučaju kontinuiranog dodavanja, mjeri se koncentracija boje u krajnjoj točki spremnika sve dok ne postigne stabilnu razinu. U slučaju jednokratnog dodavanja mjeri se koncentracija boje u krajnjoj točki spremnika sve dok cijela doza ne prođe kroz spremnik.

Toplina se također prenosi vodom pa se i temperaturne razlike koriste za praćenje kretanja vode, a posebno njen učinak na uzgon ulazne vode. Raspodjela temperature u spremnicima može se mjeriti na različitim mjestima i dubinama u modelu pomoću temperaturnih sonde. [2], [7]

#### **6.4. Poluempirijski matematički modeli**

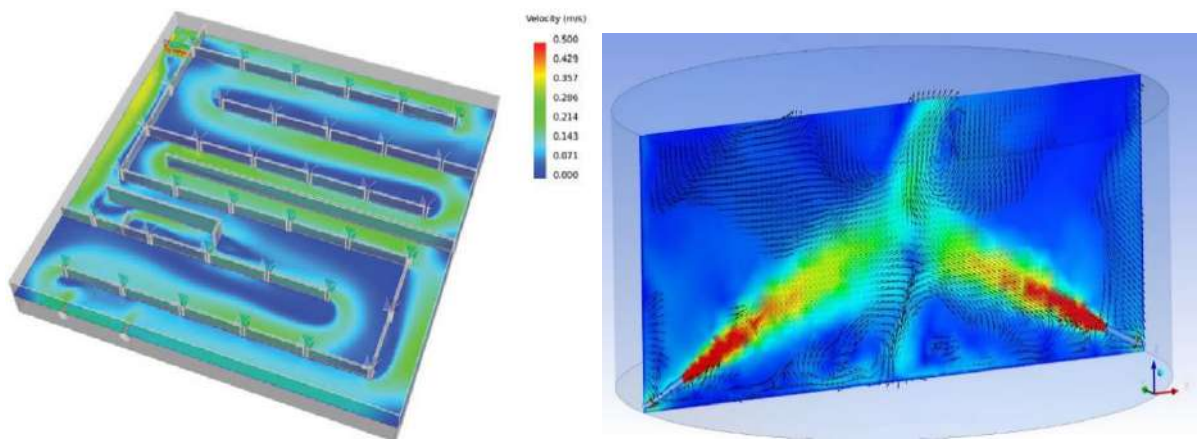
Poluempirijski matematički modeli kombiniraju teorijska načela s empirijskim podacima kako bi opisao i predvidio ponašanje složenih sustava. Koriste jednostavne matematičke odnose kako bi predvidjeli performanse spremnika na temelju operativnih uvjeta na ulazu i izlazu te pojednostavljenih geometrijskih parametara. Neki od ovih modela imaju opsežnu bazu eksperimentalnih podataka, tako da mogu proizvesti vrlo točne rezultate.

#### **6.5. Računalna dinamika fluida**

Za istraživanje ponašanja tekućine unutar spremnika također se upotrebljava računalna dinamika fluida (CFD) pomoću metode konačnih elemenata ili metode konačnih volumena. Cilj CFD je primjena znanja i iskustava s područja mehanike fluida uz izradu računalnih modela, kako bi se dobila nova saznanja i rješenja za pojedine probleme.

Rješavanjem osnovnih jednadžbi, CFD pruža detaljno razumijevanje protoka, raspodjele temperature i vremena zadržavanja vode. Simuliranjem različitih scenarija i analizom rezultata omogućuje identificirati potencijalne probleme, poput stacionarnih područja ili područja s prekomjernom turbulencijom. Također analizira utjecaj različitih geometrija spremnika na ponašanje protoka. To omogućuje optimizaciju dizajna spremnika ili procjenu potencijalnih modifikacija sustavu kako bi se postigao željeni protok.

Međutim, kod ovih softvera postoje ograničenja jer nemaju sposobnost shvaćanja kompleksne geometrije, učinke uzgona i rubnih uvjeta. Zbog matematičkih ograničenja ne predviđaju točno prijelazne tokove, vrtloge, odvajanje i spajanje toka. Zbog toga su korisniji za optimizaciju pregrada i protočnosti nego za miješanje tekućine. Služi samo kao dio procesa za brže pronalaženje rješenja i minimiziranje pogrešaka pa je usporedba rezultata računalnog modela sa onima u stvarnom svijetu ili sa eksperimentalnim podacima nužna kako bi se spriječila pogrešna ili netočna rješenja. [2], [8]



*Slike 35 i 36: Prikaz brzine gibanja tekućine pomoću računalne dinamike fluida*

## **7. PRAĆENJE I ODRŽAVANJE KVALITETE VODE U SPREMNICIMA**

Voda koja dolazi do korisnika mora biti sigurna za konzumiranje, a to zahtjeva proces njene obrade. Neobrađena voda se crpi pa obrađuje prema pravilima i propisima. Nakon obrade, voda se skladišti u spremnicima i zatim pumpa u sustav vodoopskrbe. Obrada uključuje metode filtracije i dezinfekcije, smanjenje ili uklanjanje onečišćivača, kontrolu okusa i mirisa, sprječavanje povratnog toka i ostalo.

U spremnicima može doći do ispiranja premaza, hrđanja, nakupljanja sedimenta koji može sadržavati biofilme, taloženja metalnih čestica ili drugih štetnih tvari, dužeg zadržavanja iste vode i ostalih utjecaja koji negativno utječu na kvalitetu. Iz ovih je razloga bitno redovito provoditi testiranje kvalitete vode.

Za provjeru kvalitete vode koriste se parametri. Ispituje se prisutnost kontaminanata kao što su ukupne bakterije, koliformne i heterotrofne bakterije, nusproizvodi dezinfekcije poput trihalometana i halooctenih kiselina, nitriti, nitrati, olovo i bakar. Također je ograničena koncentracija preostalih dezinfekcijskih sredstava poput klora ili kloramina te koncentracija sekundarnih kontaminanata. Sedimenti na dnu i biofilmovi na površinama rezervoara trebaju se prikupiti i analizirati kako bi se utvrdio njihov uzrok. Još neki od parametra koji se ispituju su alkalnost, aluminij, amonijak, željezo, vodljivost, pH, okus i miris, temperatura i zamućenje.

Kvaliteta vode u spremniku može se redovito pratiti preko programa koji daje podatke o parametrima spremnika. U slučaju kontaminacije, program šalje alarm i izolira spremnik iz mreže vodoopskrbe, a potrošači su obaviješteni. [2], [9]

### **7.1. Pokretanje vode u spremniku**

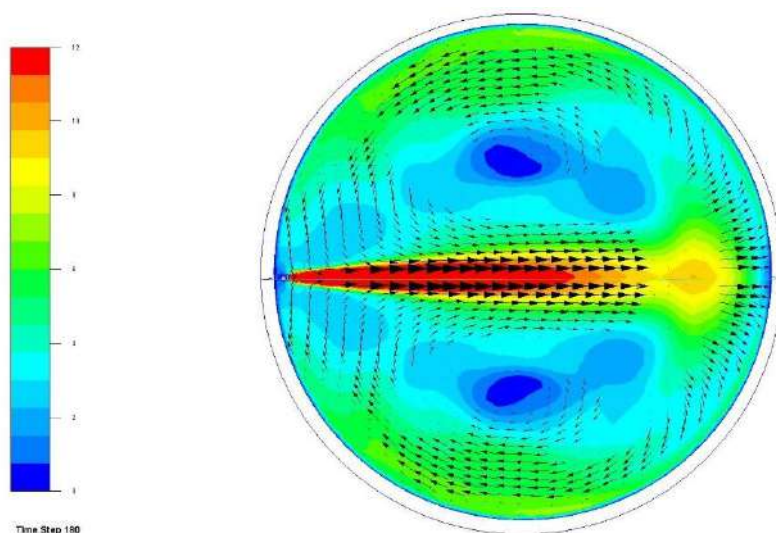
Ako neiskorištena voda u spremniku duže stoji, može poprimiti neželjeni okus i miris, a u hladnim uvjetima može doći i do stvaranja leda. Zbog toga se u spremnicima, za vrijeme kad potražnja nije na vrhuncu, mora odvijati pokretanje vode pomoću sustava za cirkulaciju ili miješanje koji sprečavaju stagnaciju vode. Druga opcija je puniti spremnik do niže razine kapaciteta koji odgovara smanjenju potražnje da bi se izbjeglo zaostajanje neiskorištene vode. [2], [9]

## 8. DINAMIKA FLUIDA U SPREMNICIMA

Spremnik za pohranu vode treba biti jedan povezan sustav u kojem dinamičko ponašanje ovisi o interakciji tekućine i zidova spremnika. Kako će se voda ponašati pri ulasku u spremnik i kontaktu s okolnom vodom ovisi o karakteristikama protoka i geometriji ulaznih/izlaznih cijevi. Obzirom da to uvelike utječe na kvalitetu vode koja se skladišti, važno je pažljivo projektirati ulazne i izlazne točke te uzeti u obzir dinamiku protoka unutar spremnika.

Da bi se očuvala kvaliteta i spriječila starost vode, u spremnicima je potrebno eliminirati kratkospojno tečenje i postići cjelokupno miješanje. Kratkospojno tečenje nastaje kada voda koja ulazi u spremnik zaobilazi veći dio volumena spremnika, ima minimalnu interakciju s okolnom vodom i teče izravno prema izlazu. Time se stvaraju stagnirajuća područja, a voda u tim zonama može biti stara danima ili tjednima, što dovodi do gubitka ostatka dezinfekcijskog sredstva. Slika 37 prikazuje ulazni tok vode u rezervoar (crveno) i okolna stagnirajuća područja (plavo). Kad bi se izlazni tok napravio sa suprotne strane, došlo bi do kratkospojnog tečenja i stvaranja stagnirajućih područja. Ispravan dizajn izlaza bio bi smjestiti izlaznu cijev u svako od tih dvaju područja.

Idealno je da voda izlazi iz spremnika onim redom kojim je ulazila, tako da najstarija voda uvijek izlazi prva (*plug flow*) ili da se redovito miješa tako da izlazna voda uvijek ima prosječnu starost ukupne vode (miješani protok). [2], [9]



Slika 37: CFD prikaz ulaznog toka vode u rezervoar

## **8.1. Plug flow**

"Plug flow" predstavlja idealni način strujanja tekućine. Najbolje se može zamisliti kao cijev u kojoj protok ide u jednom smjeru. Nema raspršivanja ili povratnog miješanja koje bi izjednačilo ili pomiješalo protoke iz različitih vremenskih razdoblja. Brzina vode je konstantna duž svakog presjeka okomito na os cijevi i ne postoji granični sloj uz unutarnji zid cijevi. Svi slojevi tekućine imaju istu brzinu i kreću se paralelno bez značajnog miješanja među slojevima.

Jedan od načina približavanja ovakvom tečenju je uvođenje pregrada unutar spremnika. Pregrade kontroliraju i usmjeravaju protok u spremnicima tako da najstarija voda izlazi prva, čime eliminiraju kratkospojno tečenje. Konfiguracija pregrada može biti mnogo, ali neke proizvode bolji protok od drugih. Potrebno ih je pravilno dizajnirati kako bi se eliminiralo kratkospojno tečenje i područja stagnacije oko pregrada. Idealno bi bilo da cijeli volumen vode bude jednoliko u pokretu u jednom smjeru bez recirkulacije, stagnacije ili miješanja.

Broj promjena smjera među pregradama trebao bi biti što manji jer zavoji uzrokuju da se voda na vanjskom (konkavnom) rubu zavoja kreće brže nego na unutarnjem (konveksnom) kraju. Oblik i kut promjene smjera protoka također utječu na ponašanje vode. Ako je kut oštar, može doći do značajnog ometanja toka, stvaranja vrtloga i zona odvajanja gdje se tekućina recirkulira ili stagnira. Zakrivljenja ili blagi zavoji su bolji od oštih kutova jer je promjena smjera postepena, a tok ravnomjerniji. Poželjno je da se kod svake promjene smjera protoka nalazi perforirani zid da bi se postigla jednolika distribucija vode po cijelom poprečnom presjeku. Perforirani zidovi mogu se postaviti na različitim intervalima duž puta protoka kako bi se strujanje promijenilo s laminarnog na turbulentno radi ravnomjernije distribucije duž poprečnog presjeka protoka.

Da bi se spriječilo stvaranje prijelaznih područja kad voda s visokom brzinom ulazi u područja s nižom brzinom, protok ulaza i izlaza iz spremnika treba kontrolirati kako bi se održali stacionarni uvjeti. [2], [9]

## **8.2. Miješano tečenje**

Miješano tečenje nastaje kada se dotok nove vode koja ulazi u spremnik miješa s vodom koja je već prisutna. U tom slučaju, voda koja izlazi iz spremnika nije najstarija voda u spremniku, već uvijek ima prosječnu starost ukupne vode ovisno o učestalosti zamjene i učinkovitosti miješanja. Ravnomjerna distribucija nove i postojeće vode utječe na kvalitetu vode i učinkovitost dezinficijensa ili kontrole temperature. Ako miješanje nije potpuno, može doći do formiranja slojeva, kratkih spojeva ili stagnerajućih područja što negativno utječe na kvalitetu.



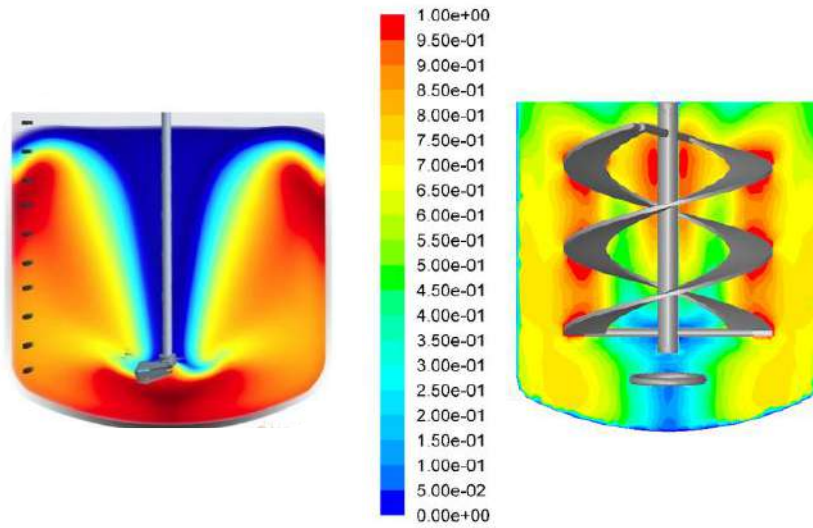
Proces miješanja može se odvojiti na makromiješanje i mikromiješanje. Makromiješanje se odnosi na ravnomjernu raspodjelu različitih komponenti unutar smjese, dok mikromiješanje uključuje miješanje na molekularnoj razini. Većina problema s miješanjem ovise o topljivosti ili lakoći miješanja komponenti. Na primjer, za bržu reakciju između komponenti kao što je voda i dezinfekcijsko sredstvo, važno je dobro rasporediti komponente (makromiješanje). Za miješanje nemješljivih sastojaka, treba se fokusirati na smanjenje veličine čestica (mikromiješanje).

Učinkovitost miješanja može varirati ovisno o metodi koja se koristi i specifičnim uvjetima unutar spremnika. Postoji više metoda koje se koriste, od prirodne cirkulacije do mehaničkog miješanja. Za postizanje makromiješanja, koriste se rotirajući dijelovi ili usmjereni protok za stvaranje vrtloga koji povećava ujednačenost raspodjele komponenti u tekućini. Za mikromiješanje, koristi se smicanje za smanjenje veličine čestica u smjesi, što poboljšava homogenost.

Stupanj miješanja može se iskazati koeficijentom varijacije, koji se smatra mjerom makromiješanja. Dakle, ako je blizu 1,0, fluid nije izmiješan; ako je blizu nuli, homogen je. Za analizu stupnja mikromiješanja, koristi se funkcija raspada.

Za provjeru učinkovitosti miješanja u spremnicima, manji modeli nisu uvijek pouzdani zbog učinaka molekularne difuzije, koja se očituje većom brzinom u manjim spremnicima nego u većim. Najprecizniji način je uzimanje više uzoraka iz različitih područja i visina spremnika te izračunavanje koeficijenta varijacije. Preporučuje se uzimanje najmanje šest uzoraka i ispitivanje različitih parametara poput ostatka dezinfekcijskog sredstva, zamućenja i temperature. Što je miješanje bolje, koeficijent varijacije je bliži nuli. Ako je koeficijent varijacije viši, to može biti prihvatljivo u slučaju da se poveća vrijeme miješanja ili da se provedu druge prilagodbe koje poboljšavaju kvalitetu vode ili usporavaju pogoršanje dezinfekcijskog sredstva. Još jedan široko korišteni parametar za praćenje učinkovitosti miješanja je opseg učinkovitosti miješanja. Prednost ove metode je što se lako može pratiti u stvarnom vremenu, budući da je potrebno samo kontinuirano uzorkovanje i testiranje parametara kvalitete vode na ulazu i izlazu.

Turbulentno mlazno miješanje uključuje korištenje mlaznica za stvaranje turbulencije i promicanje brzog miješanja dotoka sa skladištenom vodom. Međutim, obzirom na veličinu spremnika, brzina i količina vode koja ulazi možda neće biti dovoljna da izazove promjene u volumenu i distribuciji tekućine. U zoni ulaza vode u spremnik, turbulencija uzrokuje ravnomjernu raspodjelu koncentracije, ali ona se ne može održati kako se protok udaljava od izvora. Za poboljšanje učinkovitosti miješanja u velikim spremnicima, sustav miješanja morao bi obuhvatiti što veći volumen vode tijekom dotoka i stvarati slojne tokove koji se sijeku ili djeluju zajedno, te koristiti više ulaza koji stvaraju tokove na različitim visinama. [2], [9]



*Slike 38 i 39: CFD prikaz miješanja vode u spremniku*

## 9. VENTILACIJA SPREMNIKA

Spremnici za skladištenje vode zahtijevaju odgovarajuću ventilaciju kako bi se omogućilo uklanjanje ili nadopunjavanje zraka dok voda ulazi ili izlazi iz spremnika. To sprječava stvaranje prekomjernog tlaka ili vakuuma unutar spremnika, što može uzrokovati preveliki tlak na njegove stijenke, ili čak njihovo savijanje i deformaciju. Zbog toga barem jedna ventilacija mora uvijek biti smještena blizu središta krova spremnika, a veliki spremnici ih moraju sadržavati više.

Dizajn ventilacije mora spriječiti ulazak insekata i životinja (pomoću nekorodirajuće mreže), prašine i krhotina, onemogućiti ulazak kišnice, površinske vode i izravne sunčeve svjetlosti, osigurati određenu razinu zaštite od kontaminacije, biti otporan na mraz u hladnim klimama te biti dovoljno visok da ga ne blokira nanos snijega ili krhotina. [2]



*Slika 40: Ventilacija spremnika*

## 10. TELEMETRIJA

Telemetrija je postupak automatskog mjerenja i prijenosa podataka s udaljenih područja do prijemnih stanica za snimanje i analizu gdje se podaci pohranjuju u elektroničkom obliku ili na papiru. Većina telemetrijskih sustava koje koriste vodovodna poduzeća poznati su kao SCADA (sustavi za nadzor, kontrolu i prikupljanje podataka).

Vodovodna poduzeća koja upravljaju SCADA sustavom imaju centraliziranu nadzornu jedinicu u kojoj operateri mogu daljinski upravljati punjenjem ili pražnjenjem spremnika, otvaranjem i zatvaranjem ventila te procesima kemijskog doziranja. SCADA sustav nadzire, bilježi, analizira i prepoznaje trendove brojnih parametara putem internetskih senzora, analizatora i odašiljača na svakom objektu u komunikacijskoj mreži.

Za postavljanje senzora (koji obično radi putem ultrazvuka) potrebno je dati informacije o spremniku u kojem je senzor instaliran. Nakon instalacije, senzor očitava potrebne parametre, povezuje se putem mobilne mreže te prenosi podatke u sustav. Senzori su napajani solarnom energijom ili baterijama i mogu prenositi informacije u stvarnom vremenu ili prema rasporedu.

Jedan od parametara koji se mjeri je razina vode u spremniku. Podaci o razini vode pružaju uvid u dnevne cikluse punjenja i pražnjenja na temelju čega se mogu procijeniti stope dotoka i odtoka te izračunati promjene volumena tijekom vremena. Ovi podaci pomažu u praćenju i poboljšanju miješanja vode, što je važno za održavanje njene kvalitete. Ako razina vode postane previsoka, sustav aktivira alarm, a operater zatim može reagirati isključivanjem pumpi uzvodno ili zatvaranjem motoriziranog izolacijskog ventila.

Neke od najčešćih tehnologija mjerenja razine vode su senzori s kontaktom i senzori bez kontakta. Tehnologija senzora razine s kontaktom obuhvaća sustave s mjehurićima koji koriste komprimirani zrak za mjerenje razine vode na temelju tlaka potrebnog za ispuštanje mjehurića. Radiofrekvencijski kapacitivni senzori, tuning-fork senzori i plovci su prekidači koji se aktiviraju kad su uronjeni u vodu i koriste se za mjerenje razine na različitim dubinama. Tehnologija senzora razine bez kontakta obuhvaća ultrazvučne i radarske senzore koji se postavljaju iznad površine vode i mjere udaljenost između senzora i površine vode; te senzore tlaka koji mjere tlak u cijevima spremnika da bi odredili razinu vode.

Tlak s vanjske strane visinskog ili izolacijskog ventila spremnika mjeri se pomoću senzora tlaka koji zatim šalje kontinuirani analogni signal SCADA operateru. Praćenje tlaka pomaže operaterima osigurati odgovarajući tlak u distribucijskim cijevima i spriječiti potencijalne probleme i kvarove zbog neprihvatljivih razina tlaka.

Senzori količine dezinfekcijskih sredstava mjere koncentracije klora ili drugih kemikalija za dezinfekciju, a senzori temperature, poput termopara i transmitera, mjere i prenose iznose temperature u telemetrijski sustav. Niska temperatura može upozoriti SCADA operatera na potencijalne uvjete smrzavanja koji bi mogli oštetiti opremu.

Za mjerenje protoka vode koriste se razni uređaji koji prenose podatke u SCADA sustav kako bi omogućili operaterima praćenje i upravljanje protokom u stvarnom vremenu.

Također postoje sigurnosni senzori koji detektiraju neovlašteni pristup ili manipulacije dijelovima spremnika te šalju digitalne signale SCADA sustavu radi poduzimanja odgovarajućih sigurnosnih mjera. [2], [10]

## 11. UŠTEDA ELEKTRIČNE ENERGIJE U VODOOPSKRBNOM SUSTAVU

Kako bi se troškovi električne energije smanjili, punjenje spremnika se može odvijati tijekom sati niske potražnje kako bi se iskoristile niže cijene električne energije. Smanjenje vršnog opterećenja također pomaže smanjiti veličinu crpnih stanica i glavnih vodova što znači i smanjenje operativnih troškova energije. Međutim, crpljenje za vrijeme niske električne potražnje je teško provesti u velikim sustavima zbog potrebe za velikim volumenom spremnika. Ovi spremnici bi se preko noći trebali napuniti dovoljnom količinom vode da zadovolje potražnju tijekom cijelog dana, uključujući i sate visoke potražnje. Kod velikih sustava moguće je samo djelomično koristiti ovu metodu.

Crpke imaju određene uvjete (kombinacije protoka i tlaka) pri kojima rade s najvišom učinkovitošću, što znači da koriste minimalnu količinu električne energije za maksimalan radni učinak. Ako crpke rade izvan tih optimalnih uvjeta, troše više energije nego što je potrebno, što povećava operativne troškove. Usklađivanjem minimalnih i maksimalnih granica tlakova sustava s radom crpki osigurava se da crpke rade što je moguće bliže svojoj optimalnoj učinkovitosti. Električnu energiju može se dodatno uštedjeti izbjegavanjem stalnog uključivanja i isključivanja crpki što uzrokuje velike skokove u potrošnji.

Za zadovoljenje promjenjive potražnje mogu se koristiti pogoni s promjenjivom brzinom, tzv. frekventni regulatori koji omogućuju crpkama da prilagode svoj radni kapacitet prema trenutnim potrebama, čime se smanjuje potrošnja pri nižim potrebama jer se koristi samo dio ukupne potencijalne snage crpke. Ipak, učinkovitost crpljenja može biti veća ako se koristi sustav s konstantnom brzinom crpki. Idealno bi bilo imati dvije crpke koje rade stalno na optimalnoj brzini. Ako se potražnja poveća, obje crpke mogu raditi zajedno; ako je potražnja manja, jedna crpka radi, dok se druga privremeno zaustavi ili uspori, sve dok se ne postigne optimalna ravnoteža između potražnje i energetske učinkovitosti.

Uz sve ovo, treba paziti da spremnici imaju dovoljno kapaciteta za hitne slučajeve, poput požara, te da održavaju kvalitetu vode redovitim obrtanjem. Nije uvijek lako pronaći idealnu veličinu i oblik spremnika koji zadovoljava sve ove potrebe. [2]

## **12. ZAKLJUČAK**

Vodotornjevi predstavljaju ključnu komponentu vodovodne infrastrukture. Služe za skladištenje pitke vode i kontinuiranu opskrbu korisnicima. Osiguravaju stabilan tlak u sustavu i smanjuju opterećenje na crpke. Pravilno dimenzionirani i pozicionirani spremnici omogućuju korištenje gravitacijskog pražnjenja, čime se smanjuju troškovi električne energije. Različite konfiguracije vodotornjeva prilagođene su terenu i potrebama sustava. Većina vodotornjeva danas koristi napredne tehnologije za nadzor i upravljanje protokom, čime se povećava učinkovitost i sigurnost opskrbe vodom. Primjena naprednih simulacija i eksperimentalnih metoda doprinosi boljem razumijevanju dinamike tekućina u spremnicima i time optimizaciji njihovog dizajna. Pravilan protok i miješanje vode te redovita kontrola kvalitete nužne su kako bi se održala kvaliteta pitke vode i spriječila stagnacija.

Vodotornjevi su nezamjenjiv element u vodoopskrbnim sustavima jer kombiniraju ekonomičnost, sigurnost i prilagodljivost različitim uvjetima, što ih čini ključnim za održavanje stabilne opskrbe vodom i upravljanje vodenim resursima u suvremenom društvu.

## POPIS LITERATURE

- [1] American Water Works Association, Steel Water-Storage Tanks, SAD, 2003.
- [2] American Water Works Association, Steel Water Storage Tanks, SAD, 2010.
- [3] [https://www.researchgate.net/publication/292015064\\_Gravity\\_flow\\_water\\_distribution\\_system\\_design](https://www.researchgate.net/publication/292015064_Gravity_flow_water_distribution_system_design)
- [4] <https://www.ndts.co.in/2022/12/23/in-service-inspection-of-storage-tank-annular-plate/>
- [5] <https://sino-inst.com/pipe-flow-vs-pressure-relationship-calculate/>
- [6] [https://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/mehanika\\_tekucina.pdf](https://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/mehanika_tekucina.pdf)
- [7] <https://pubs.usgs.gov/publication/70190114>
- [8] <https://www.resolvedanalytics.com/cfd-applications/cfd-for-water-tanks>
- [9] <https://www.processonline.com.au/content/process-control-systems/article/water-storage-tanks-the-science-of-mixing-and-improving-water-quality-850228344>
- [10] <https://business.blogthinkbig.com/what-is-tank-telemetry/>



## POPIS SLIKA

Slika 1: Rezervoar sastavljen vijcima (Izvor: <a href="https://africantanks.co.za/municipal-water-bulk-reservoir/">https://africantanks.co.za/municipal-water-bulk-reservoir/</a> ).....	2
Slika 2: Zavareni rezervoar (Izvor: <a href="https://www.mknassociates.us/blog/tank-alternatives/">https://www.mknassociates.us/blog/tank-alternatives/</a> ).....	2
Slika 3: Cilindrični vodotornjevi (Izvor: <a href="https://ecsol-eg.com/supplies-3.html">https://ecsol-eg.com/supplies-3.html</a> ).....	3
Slika 4: Cilindrični vodotornjevi (Izvor: <a href="https://aststorage.com/gallery/">https://aststorage.com/gallery/</a> ).....	3
Slika 5: Povišeni spremnik na više nosača (Izvor: <a href="https://www.flickr.com/photos/grantlairdj/5752894">https://www.flickr.com/photos/grantlairdj/5752894</a> ).....	4
Slika 6: Povišeni spremnik na više nosača (Izvor: <a href="https://www.dreamstime.com/water-tower-mckinney-tx-texas-united-states-america-january-image138030744">https://www.dreamstime.com/water-tower-mckinney-tx-texas-united-states-america-january-image138030744</a> ).....	4
Slika 7: Povišeni spremnik na centralnom nosaču (Izvor: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mauston_water_tower_with_cellular_tower_on_top.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mauston_water_tower_with_cellular_tower_on_top.jpg</a> ).....	5
Slika 8: Modificirani povišeni spremnik (Izvor: <a href="https://www.sedaliademocrat.com/stories/water-tower-to-receive-sedalia-logo,40228">https://www.sedaliademocrat.com/stories/water-tower-to-receive-sedalia-logo,40228</a> ).....	5
Slika 9: Kompozitni povišeni spremnik (Izvor: <a href="https://htt.io/resources/elevated-storage-tank-monitoring-and-automation/">https://htt.io/resources/elevated-storage-tank-monitoring-and-automation/</a> ).....	5
Slika 10: Unutarnji pogled na rezervoar i njegovu krovnu konstrukciju (Izvor: <a href="https://www.carboline.com/solution-spot/posts/protecting-the-structural-integrity-of-steel-water-storage-tanks/">https://www.carboline.com/solution-spot/posts/protecting-the-structural-integrity-of-steel-water-storage-tanks/</a> ).....	6
Slika 11: Samonosivi aluminijski krov u obliku kupole (Izvor: <a href="https://atecotank.com/about-floating-roofs/">https://atecotank.com/about-floating-roofs/</a> ).....	7
Slika 12: Samonosivi aluminijski krov u obliku kupole (Izvor: <a href="https://unitedind.com/uig-recent-tank-projects/">https://unitedind.com/uig-recent-tank-projects/</a> ).....	7
Slika 13: Samonosivi elipsoidni krov (Izvor: <a href="https://www.petrosync.com/blog/what-is-pressure-vessel-head/">https://www.petrosync.com/blog/what-is-pressure-vessel-head/</a> ).....	8
Slika 14: Samonosivi konusni krov (Izvor: <a href="https://www.saikrupaent.in/storage_tank.html">https://www.saikrupaent.in/storage_tank.html</a> ).....	8
Slika 15: Primjer lokacije spremnika (Izvor: <a href="https://www.istockphoto.com/videos/water-storage-tank">https://www.istockphoto.com/videos/water-storage-tank</a> ).....	11
Slika 16: Dnevna potrošnja vode (Izvor: [2]).....	11

Slika 17: Cijena električne energije tijekom dana (Izvor: [2]).....	12
Slika 18: Osiguravanje tlaka korištenjem gravitacijskog tečenja (Izvor: [2]).....	13
Slika 19: Temelj u obliku betonskog prstenastog zida (Izvor: <a href="https://www.simpsonandbrown.com/portfolio/imtt-ringwall-foundation/">https://www.simpsonandbrown.com/portfolio/imtt-ringwall-foundation/</a> ).....	16
Slika 20: Temelj nosača povišenog spremnika (Izvor: <a href="https://www.indiamart.com/proddetail/rcc-work-18182496633.html">https://www.indiamart.com/proddetail/rcc-work-18182496633.html</a> ).....	16
Slika 21: Zaštitni premaz unutarnje površine (Izvor: <a href="https://www.indiamart.com/proddetail/acid-proof-tank-lining-15175259030.html">https://www.indiamart.com/proddetail/acid-proof-tank-lining-15175259030.html</a> ).....	17
Slika 22: Pjeskarenje (Izvor: <a href="https://www.witcoolmachining.com/professional-sandblasting-treatment/">https://www.witcoolmachining.com/professional-sandblasting-treatment/</a> ).....	17
Slika 23: Termalno rezanje čelične ploče (Izvor: <a href="https://www.leecosteel.com/news/post/steel-plate-processing/">https://www.leecosteel.com/news/post/steel-plate-processing/</a> ).....	19
Slika 24: Savijanje ploče pomoću valjka (Izvor: <a href="https://www.boydmetal.com.au/steel-tanks/">https://www.boydmetal.com.au/steel-tanks/</a> ).....	19
Slika 25: Savijanje ploče pomoću ravnog kalupa (Izvor: <a href="https://www.nssco.com/plate-forming/">https://www.nssco.com/plate-forming/</a> ).....	20
Slika 26: Zavarivanje dijelova spremnika (Izvor: <a href="https://www.linkedin.com/pulse/api-650-tank-joint-welding-casagrande-consultant-casagrande-júnior">https://www.linkedin.com/pulse/api-650-tank-joint-welding-casagrande-consultant-casagrande-júnior</a> ) .....	20
Slika 27: Raspored pravokutnih ploča dna spremnika (Izvor: <a href="https://www.profisteelholding.sk/en/reference/ivens-construction/">https://www.profisteelholding.sk/en/reference/ivens-construction/</a> ).....	22
Slika 28: Preklopno zavarivanje ploča dna spremnika (Izvor: <a href="https://www.freepik.com/premium-photo/repair-welding-storage-tank-bottom-plate_38011930.htm">https://www.freepik.com/premium-photo/repair-welding-storage-tank-bottom-plate_38011930.htm</a> ).....	22
Slika 29: Anularni prsten (Izvor: <a href="https://structuralinsights.com/SI/oil-and-chemical-annular-ring-inspection/">https://structuralinsights.com/SI/oil-and-chemical-annular-ring-inspection/</a> ).....	23
Slika 30: Sastavljanje stijenske spremnika (Izvor: <a href="http://www.ansonindustry.com/tank-erection-jacking-method.html">http://www.ansonindustry.com/tank-erection-jacking-method.html</a> ).....	24
Slika 31: Montiranje krovne konstrukcije (Izvor: <a href="https://www.matrixnac.com/project/chevron-tank-493/">https://www.matrixnac.com/project/chevron-tank-493/</a> ).....	24
Slika 32: Montiranje spremnika na centralnom nosaču (Izvor: <a href="https://phoenixtank.com/projects/penn-state-university/">https://phoenixtank.com/projects/penn-state-university/</a> ).....	25
Slika 33: Razine EGL i HGL u otvorenom vodotoku (Izvor: <a href="https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Otvoreni_vodotok_bernoullieva_jednadžba.png">https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Otvoreni_vodotok_bernoullieva_jednadžba.png</a> ).....	28

Slika 34: Razine EGL i HGL u cijevi pod tlakom (Izvor: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cijev_pod_tlakom_bernoullieva_jednadzba.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cijev_pod_tlakom_bernoullieva_jednadzba.png</a> ).....	28
Slika 35: Prikaz brzine gibanja tekućine pomoću računalne dinamike fluida (Izvor: <a href="https://waterprojectsonline.com/wp-content/uploads/case_studies/2015/Restormel-WTW-2015.pdf">https://waterprojectsonline.com/wp-content/uploads/case_studies/2015/Restormel-WTW-2015.pdf</a> ).....	30
Slika 36: Prikaz brzine gibanja tekućine pomoću računalne dinamike fluida (Izvor: <a href="https://www.transvac.co.uk/utilising-cfd-analysis-for-perfect-tank-mixing/">https://www.transvac.co.uk/utilising-cfd-analysis-for-perfect-tank-mixing/</a> ).....	30
Slika 37: CFD prikaz ulaznog toka vode u rezervoar (Izvor: <a href="https://www.processonline.com.au/content/process-control-systems/article/water-storage-tanks-the-science-of-mixing-and-improving-water-quality-850228344">https://www.processonline.com.au/content/process-control-systems/article/water-storage-tanks-the-science-of-mixing-and-improving-water-quality-850228344</a> ).....	32
Slika 38: CFD prikaz miješanja vode u spremniku (Izvor: <a href="https://www.iqsdirectory.com/articles/mixer/high-shear-mixer.html">https://www.iqsdirectory.com/articles/mixer/high-shear-mixer.html</a> ).....	35
Slika 39: CFD prikaz miješanja vode u spremniku (Izvor: <a href="https://www.semanticscholar.org/paper/Gas-Liquid-Hydrodynamics-Simulation-using-CFD-in-a-Niño-Peñuela/7aa8e6607ab3b1b92bf3e3cfc283a9958b15f44e">https://www.semanticscholar.org/paper/Gas-Liquid-Hydrodynamics-Simulation-using-CFD-in-a-Niño-Peñuela/7aa8e6607ab3b1b92bf3e3cfc283a9958b15f44e</a> ).....	35
Slika 40: Ventilacija spremnika (Izvor: <a href="https://www.tomcatconsultants.com/2002/01/13/roof-vents-and-stacks/">https://www.tomcatconsultants.com/2002/01/13/roof-vents-and-stacks/</a> ).....	36