Plutajuće prednapete betonske konstrukcije

Bašić, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:761684

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split







SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Hrvoje Bašić

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Hrvoje Bašić

Plutajuće prednapete betonske konstrukcije

Diplomski rad

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: SVEUČILIŠNI DODIPLOMSKI

KANDIDAT: Hrvoje Bašić

BROJ INDEKSA: 2951

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali I

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Plutajuće prednapete betonske konstrukcije

Opis zadatka: Zadatak kandidata je obraditi plutajuće konstrukcije. Potrebno je prikazati primjenu ovakvih konstrukcija, način izvedbe, trajnost, te moguću primjenu ovakvih konstrukcija i u našoj zemlji.

U Splitu, 01.03.2016.

Voditelj diplomskog rada: Predsjednik Povjerenstva za završne i diplomske ispite:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin Prof. dr. sc. Ivica Boko

Veliku zahvalnost dugujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Sandri Juradin na strpljenju i brojnim korisnim savjetima pri izradi ovog diplomskog rada. Iznimno zadovoljstvo mi je bilo raditi na ovako zanimljivoj temi.
Hvala i mojoj obitelji na iskazanom razumijevanju i podršci tijekom studiranja.

Hrvoje Bašić

Plutajuće prednapete betonske konstrukcije

Sažetak:

Beton je građevinski materijal koji uz čvrstoću i trajnost nudi široki raspon upotrebe i mogućnosti u pogledu strukturne vrste i oblika, građevinske tehnike, te površinske estetike. Intenzivna potraga za naftom i plinom, pojava katastrofalnih poplava u obalnim područjima, potreba za širenje obalnih gradova, te mnogi zahtjevi za prometnim povezivanjem obalnih površina mostovima i potopljenim tunelima doveli su do razvoja i inovacija novih tehnologija pri izvedbi plutajućih konstrukcija. Takve plutajuće betonske konstrukcije su izložene najtežim uvjetima, gdje su vijek trajanja i stabilnost konstrukcije od iznimne važnosti. Uz prikaz povijesti razvoja i mnogih inovativnih rješenja korištenja betonskih plutajućih konstrukcija, cilj ovog diplomskog rada je prikazati agresivni utjecaj morskog okoliša, te njegovo djelovanje na konstrukciju koje utječe na strukturnu stabilnost i trajnost konstrukcije. Također, cilj ovog rada je prikazati kako je uz određene dodatke i načine izvedbe moguće zaštititi konstrukciju od takvih utjecaja i na taj način produljiti vijek trajanja.

Ključne riječi:

Plutajuće betonske konstrukcije, maritimni uvjeti, agresivni okoliš, korozija betona, korozija armature, trajnost

Floating prestressed concrete structures

Abstract:

Concrete is a construction material that, including its strength and durability, offers a wide range of usage and possibilities in structural type and form, construction techniques and surface aesthetics. The intensified search for oil and gas, the appearance of catastrophic flooding of coastal regions, need for expansion of coastal cities, and many demands for transport connections of coastal areas by bridges and submerged tunnels have led to the development and innovations of new technologies in the making of floating constructions. Floating concrete structures as such are subjected to the harshest conditions, where service life and structural stability are of crucial importance. Including the presentation of the development throughout history and many innovative solutions in using of concrete floating structures, the aim of this study is to show the aggressive impact of the marine environment and its effect on the structure which affects the structural stability and durability. Also, the aim of this study is to show how certain additives and types of production can protect the structure of such influence and thus extend the service life.

Keywords:

Floating structures, maritime conditions, corrosion of concrete, corrosion of the reinforcement bar, aggressive environment, durability

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. RAZVOJ PLUTAJUĆIH KONSTRUKCIJA 4

2.1. Plutajuće nastambe 4

2.2. Plutajući mostovi 5

2.2.1. Plutajući mostovi kroz povijest 5

2.2.2. Suvremeni plutajući mostovi 7

2.3. Plutajuće luke, dokovi i gatovi 9

2.4. Pomorske plutajuće konstrukcije za eksploataciju nafte 11

2.5. Plutajući objekti zabavnog sadržaja 13

2.6. Plutajuća energetska postrojenja 16

2.7. Budućnost korištenja velikih plutajućih konstrukcija 17

3. ULOGA PREDNAPETOG BETONA KOD PLUTAJUĆIH KONSTRUKCIJA 23

3.1. Uvod 23

3.2. Prednapeti beton 24

3.2.1. Razvoj prednapetog betona kroz povijest 27

3.2.2. Prednosti i nedostaci prednapetih konstrukcija 28

3.2.3. Svojstva materijala i elementi sustava 29

3.2.3.1. Čelik za prednapinjanje 29

3.2.3.2. Beton 33

3.2.3.3. Prionljivost između čelika za prednapinjanje i betona 34

3.2.3.4. Mort za injektiranje 35

3.2.3.5. Zaštitne cijevi 36

3.2.3.6. Sidrena glava i klinovi 37

3.2.3.7. Preše 39

3.2.4. Tehnologija prednapetog betona 40

3.2.4.1. Prethodno prednapeti beton 40

3.2.4.2. Naknadno prednapeti beton 41

3.2.5. Gubitci prednapinjanja 42

3.2.5.1. Kratkotrajni gubitci *43*
3.2.5.2. Dugotrajni gubitci *44*
3.3. Izloženost plutajućih prednapetih konstrukcija 44
3.3.1. Djelovanja i utjecaji djelovanja 46
3.3.1.1. Sidreni sustavi *47*
3.4. Težina prednapetog betona kod plutajućih konstrukcija 49
3.5. Problemi izvedbe [9] 50
3.6. Posebni uvjeti betoniranja 50
3.7. Posebne vrste betona 51
3.7.1. Ferocement 51
3.7.2. Lagani beton 52
3.7.3. Mikroarmirani beton 53
3.7.4. Beton ultravelike čvrstoće 54
4. TRAJNOST BETONA 55
4.1. Uvod 55
4.2. Djelovanje morskog okoliša na trajnost betonskih konstrukcija 56
4.2.1. Fizikalni mehanizmi degradacije 57
4.2.2. Biološki mehanizmi degradacije 58
4.2.3. Kemijski mehanizmi degradacije 59
4.2.3.1. Korozija betona *59*
4.2.3.2. Korozija armature u armiranom betonu *60*
4.3. Zahtjevi za beton u morskom okolišu 62
4.3.1. Agregat 63
4.3.2. Vodocementni omjer 63
4.3.3. Cement 65
4.3.4. Postotak klorida u betonu 66
4.3.5. Zaštitni sloj za antikorozivnu zaštitu armature 67
4.3.6. Pukotine 69
4.4. Mogućnosti zaštite od agresivnog morskog okoliša 70
4.4.1. Dodaci cementu 70
4.4.1.1. Silicijska prašina *70*
4.4.1.2. Leteći pepeo *71*

4.4.1.3. Granulirana zgura visokih peći *72*
4.4.1.4. Punilo *73*
4.4.2. Kemijski dodaci betonu 73
4.4.2.1. Aeranti *74*
4.4.2.2. Plastifikatori i superplastifikatori *74*
4.4.2.3. Modifikatori viskoznosti *75*
4.4.2.4. Inhibitori korozije *75*
4.4.2.5. Biocidni dodaci *75*
4.4.2.6. Polimerni dodaci [17] *76*
5. ISKORISTIVOST TEHNOLOGIJE U HRVATSKOJ 78
6. ZAKLJUČAK 83
7. LITERATURA 85

1. UVOD

U posljednjih nekoliko desetljeća zabilježen je velik porast svjetske populacije, te je očekivani nastavak takvog trenda sve dok većina zemalja na svijetu ne dosegne svoj potpuni razvoj u svim djelatnostima. Očekivano povećanje populacije povlači za sobom i potrebu za stvaranjem novih lokacija za stanovanje, rad, infrastrukture, rekreaciju, skladištenje i proizvodnju hrane, kao i potrebu za iskorištavanjem netaknutih pomorskih resursa.

Više od 70 % svjetske površine prekriveno je vodom, zato je kolonizacija oceana jedna od velikih izazova u koje su se inženjeri, arhitekti, te urbanisti upustili kako bi ljudima pružili mogućnost novog prostora za život kao i korištenja obnovljivih izvora energije. Izuzev ekonomičnosti izgradnje i održavanja, to je jedan od glavnih razloga zašto se u posljednjih nekoliko desetljeća povećao broj korištenja betonskih konstrukcija na morskim površinama. Brojni planovi, te ideje na koji način i u koje svrhe bi se plutajuće betonske konstrukcije mogle iskoristiti, su promovirane, te mnoge i izvedene. U takvim projektima prednjači naftna industrija koja je nakon niza uspješnih zahvata izgradnje i korištenja velikih betonskih konstrukcija u Sjevernom moru započela s masovnom uporabom plutajućih betonskih konstrukcija, za sada uglavnom privremenih.

Povijest korištenja betonskih pomorskih konstrukcija je započela još od vremena Rimljana, koji su koristili beton od pucolana[1] prilikom izgradnje podvodnih stupova za riječne mostove. 1848. godine Joseph-Louis Lambot je prvi upotrijebio armirani beton za izgradnju malih brodova. U I. i II. svjetskom ratu je izgrađeno na stotine armirano betonskih brodova međutim takvi se projekti nisu pokazali ekonomičnima. U kasnim 1950. godinama na Filipinima se izgradio veliki broj prednapetih betonskih teglenica za prekooceanske plovidbe. 1960. su se gradili betonski svjetionici kao kesoni[2] usidreni za morsko dno. 1970. godine je započela izgradnja pomorskih platformi za istraživanje nafte, te, kao što je spomenuto na početku, nakon uspješnih projekata do kraja 1986. godine osamnaest betonskih platformi je bilo izvedeno i u uporabi u Sjevernom moru. [1]

[1] Pucolani su vulkanski pepeli koji nastaju erupcijom vulkana a imaju vezivna svojstva. Ime dolazi od mjesta Pozzuoli kod Napulja gdje se pucolan koristio kao vezivo u staroj vijeku. Pucolan nastaje prilikom erupcije vulkana (eksplozivnog izbacivanja magme) kada nastaju velike količine užarenog vulkanskog pepela koji se brzo hladi u atmosferi i pada na tlo. Termički procesi dobivanja pucolana su slični onima dobivanja zgure ili proizvodnji cementa. Sam pucolan nije vezivno sredstvo ali to postaje mješavina pucolana i vapna.

[2] Keson (fr. caisson) je zatvorena čelična ili armirana komora bez dna za podvodne radove

Iako se sam beton u lukama i obalnim konstrukcijama koristi još od početka 20. stoljeća, prednapete betonske konstrukcije, posebno naknadno prednapete, su omogućile svestranu uporabu takvih konstrukcija u pomorskom inženjerstvu.

Plutajuće betonske konstrukcije su ekonomične za izvođenje i održavanje. Kako bi se održavali niski troškovi izvođenja, a ujedno očuvao visoki standard sigurnosti konstrukcija, tijekom izvođenja potreban je razvijen program testiranja kvalitete materijala i konstrukcije. Granice tolerancija za sve vrijednosti moraju biti niske, važno je usko ograničiti varijaciju jedinične težine upotrijebljenih materijala, te se strogo pridržavati određenim dimenzijama. Kombinacija najveće težine i najveće debljine komponenata se mora izbjegavati pod svaku cijenu. Vodocementni omjer treba biti nizak, te je dobra njega betona od velike važnosti. Omjer se može smanjiti pomoću korištenja superplastifikatora kako bi svježi beton bio što prije obradiv. Laki beton je atraktivan za korištenje u ovakvim konstrukcijama jer omogućava bolji uzgon. Trebalo bi napomenuti da se čvrstoće betona smanjuje radi zasićenja materijala morskom vodom.

Velike plutajuće betonske konstrukcije mogu se izvoditi direktno na mjestu gradilišta ili se mogu sastaviti od montažnih prednapetih betonskih elemenata. Također je moguće izvesti konstrukciju u odgovarajućim, sigurnim područjima, te je naknadno dotegliti u ocean. Prednapinjanje omogućava dobivanje tankih elemenata visoke čvrstoće. Naknadno prednapinjanje se može izvoditi u bilo kojem traženom smjeru radi otpora naprezanja od teških i kompleksnih opterećenja. Cikličko opterećivanje ne dovodi do zamora materijala, a pukotine koje se dobiju od preopterećivanja će se opet zatvoriti, kao rezultat naknadnog prednapinjanja, nakon uklanjanja opterećenja. Naknadno prednapete betonske konstrukcije su otporne na koroziju jer se prednapinjanjem održava beton pod tlakom čime ograničava stvaranje i širenje pukotina. Materijal je veoma otporan na vatru. Naknadno prednapinjanje poboljšava vodonepropusnost, te osigurava konstrukcijama veliku izdržljivost na teške oceanske uvjete kao što su opterećenja od leda i jakih udara valova. Takve konstrukcije ne podliježu lomovima uslijed niskih temperatura kao što je slučaj kod čeličnih konstrukcija.

Plutajući betonske konstrukcije su pod povjerenstvom međunarodne federacije za prednapeti beton "*Federation Internationale de la Precontrainte (FIP)*" s ciljem projektiranja i izgradnje takvih konstrukcija [1]. Mogu se koristit u mnogim djelatnostima i u različite svrhe, a među njima su najpoznatije:

- platforme za istraživanje, eksploataciju i proizvodnju nafte

- terminali za ukapljeni naftni plin (propan-butan ili auto plin; *engl. LPG - Liquefied petroleum gas*)
- brodovi i jahte
- plutajući brodogradilišni dokovi
- plutajuća vrata za suhe brodogradilišne dokove
- plutajući aerodromi
- plutajuće elektrane
- postrojenja za konvertiranje oceanske toplinske energije
- plutajući vezovi za brodove
- plutajući hoteli, trgovački centri
- različita plutajuća industrijska postrojenja
- plutajući mostovi, stupovi za mostove, nosači za mostove (pontoni)
- polu-potopljeni tuneli
- plutajući svjetionici
- polu-potopljeni nosači za plutajuće gradove
- plutajuća postrojenja u marikulturi

2. RAZVOJ PLUTAJUĆIH KONSTRUKCIJA

2.1. Plutajuće nastambe

Plutajuće nastambe, slika 2.1, su se kroz povijest razvijale u različitim oblicima, te na različitim vodenim površinama. Pojavljivale su se u svim dijelovima svijeta, kao npr. plutajuća sela na jezerima Kambodže gdje se velike zajednice bave ribarstvom; ili selo Ganvie na jezeru Nokoué, Benin, Afrika, gdje je pleme Tofinu razvilo tip plutajućeg sela u ranom 16. stoljeću kao obrambeni mehanizam protiv trgovine robljem. Osim ova dva primjera povijest plutajućih nastamba imaju i druge zemlje kao što su Vijetnam, Indonezija, Tajland, Kina, Peru i Bolivija. Plutajuće nastambe mogu izgledati kao obične kuće i kolibe ili mogu poprimati izgled kućica na splavi.



Slika 2.1 Plutajuće nastambe u Vijetnamu (a), Tajlandu (b) i Peruu (c i d) [2]

Prve moderne plutajuće kuće se javljaju 1980-ih, a nastaju uslijed nedostatka zemljišta i gospodarskih razloga. Tvrtka *International Marine Floatation System Inc.*, koja je trenutno vodeća u izgradnji inovativnih plutajućih konstrukcija u svijetu, je u to vrijeme razvila novu tehnologiju izgradnje nekretnina na vodi [2]. Ovaj sustav se sastoji od jezgre pjenastog oblika polistirena (stiropora) i betonskog plašta, stvarajući strukturu koja je *plivajuća* i *nepotopiva*. Razvojem ove tehnologije bilo je moguće formiranje velikih plutajućih skupina kuća u Vancouveru, Kanada (slika 2.2).



Slika 2.2 Canoe Pass Village, Vancouver, Kanada [2]

2.2. Plutajući mostovi

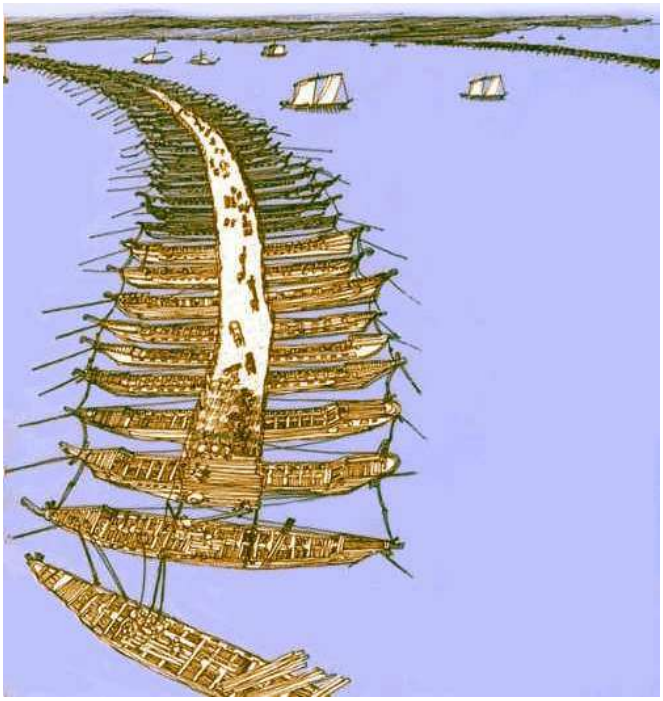
Kao i plutajuće nastambe, kroz povijest su se razvijale različite mostovne plutajuće konstrukcije. Razvijene iz potrebe, ove strukturne inovacije su građene u gradovima kako bi se povezale urbane površine preko dubokih kanala i rijeka, te se tako ublažilo prometne čepove na postojećim prijelazima. Plutajući mostovi su također sagrađeni u vojne svrhe, čime se omogućavalo kretanje vojnika i vojne opreme između kopnenih baza i brodova.

2.2.1. Plutajući mostovi kroz povijest

Plutajući mostovi u povijesti su uglavnom bili drvene šetnice izgrađene na nizu brodova koji su bili međusobno pričvršćeni i usidreni. Te strukture nisu imale poseban dizajn kao ni životni vijek, te su se morale obnavljati na regularnoj bazi. Nisu bile čvrste niti su se mogle koristiti kroz duže vremenske periode u otežanim uvjetima okoliša ili pri velikim opterećenjima. Kako su gradovi rasli tako se i korištenje tih struktura postepeno smanjivalo, te je potreba za trajnijim rješenjima veće nosivosti postala nužnost.

Jedan od najranijih istaknutih plutajućih mostova je izgrađen u 480. god. pr. Kr. tijekom invazije perzijskog kralja Kserksa na Grčku. Želja da se izvrši napad preko mora, a da se krene s

kopna, dovelo je do projektiranja plutajućeg mosta, slika 2.3, preko tjesnaca Dardaneli, Turska, na način da se povezalo 300 manjih brodova međusobno te usidrilo na oba kraja za veće brodove.



Slika 2.3 Kserksov plutajući most izgrađen 480. god. pr. Kr. [2]

Kralj Wen iz Zhou dinastije je u 11. stoljeću pr. Kr., 600 godina prije Kserksa, izgradio pontonski most kako bi prelazio rijeke.

Za vrijeme kineske dinastije *Song*, između 1163. i 1173. godine, u istočnoj Kini je izgrađen most *Dongjin* (slika 2.4). Taj 400 m dugački pontonski most je izgrađen preko rijeka Zhang i Gong prema istom principu gradnje koja se sastoji od drvenih dasaka postavljenim na nizu povezanih drvenih brodova. Cijela struktura se redovito obnavlja, te je i dalje u funkciji.



Slika 2.4 Most Dongjin u Kini [2]

U Španjolskoj je 1171. godine izgrađen pontonski most preko rijeke Guadalquivir koji je povezivao gradove Seville i Triana. Izgrađen je od velikih drvenih teglenica, koji su međusobno zakačeni željeznim čavlima kako bi se ublažio učinak plime i oseke. Popravljan je, te su mu se dijelovi konstantno mijenjali sve do 1852. kada su ga kompletno uklonili.

Jednostavnost raspoređivanja brodova i postavljanja drvenih plutajućih mostova je popularizirало ovu strukturnu opciju u drugoj polovini 19. stoljeća iako je postojala potreba za konstantnom sanacijom strukture. Neki primjeri takve strukture su opstali i u ranom 20. stoljeću. Plutajući most *Woolston* preko rijeke Itchen u Velikoj Britaniji je svečano otvoren 1836. godine. Unatoč tome što je izgrađen kao samo privremeno rješenje radi povećanja prometa, te je smatran nepogodnom rutom za putovati, održavan je preko 140 godina. Drugačiji primjer je 124 m dugi plutajući drveni željeznički most koji je izgrađen 1874. godine preko rijeke Mississippi u gradu Marquette, Iowa. Iako je most bio sastavni dio glavne željezničke pruge toga područja koje je bilo najprometnije u cijeloj regiji, činjenica da se most trebao uzastopno obnavljati je dovela do prestanka korištenja 1961. godine. Pontonski most je demontiran i odnesen u Lacrosse, Wisconsin.

2.2.2. Suvremeni plutajući mostovi

Trenutni model suvremenih plutajućih mostova je implementiran 1943. prilikom projektiranja *Hobart* mosta koji povezuje istočni i zapadni dio Hobart-a, Australija, preko rijeke Derwent. Dizajn takvog mosta je bio prvi takve vrste bilo gdje u svijetu.

Najveći dio mosta je bila plutajući betonska konstrukcija zakrivljena uzvodno u obliku luka. To svojstvo je omogućilo konstrukciji dodatnu izdržljivost na udare vjetra i strujanje vode bez sidrenja koje je korišteno u tradicionalnim oblicima plutajućih mostova. Most je izgrađen od 12 pontona koji su tegljeni u rijeku i krajevima povezani za obalu rijeke, te međusobno u sredini. Međutim most nije dugo korišten. Sredinom 1950-ih, zbog povećanog protoka prometa, most je demontiran, te je predložen novi most *Tasman* koji je dovršen 1964. godine i nakon određenih rekonstrukcija još uvijek u pogonu.

Istovremeno, SAD je 1940. godine preko jezera Washington od Seattle-a do otoka Mercer, Washington, izgradio svoj prvi plutajući betonski most nazvan Lacey V. Murrow memorijalni most *(engl. Lacey V. Murrow Memorial Bridge)*. Sastavljen je kombinacijom nepomičnih i pomičnih raspona koji se uvlače u nepomične raspone kako bi se mogao odvijati riječni promet. Drugi je najveći plutajući most dug 2020 m. Plutajući most Evergreen Point (*eng. Evergreen Point Floating Bridge*) sagrađen 1963. godine na istom jezeru i dugačak 4750 m je trenutno najduži pontonski most.

Drugi primjeri suvremenih plutajućih mostova uključuju 931 m dugačak most *Bergsøysund* i 1614 m dugačak most *Nordhordland* u Norveškoj. Most *Nordhordland* je kombinacija ovješenog i pontonskog mosta s velikim rasponom, te minimalnim osloncima. *Yumemai* most u Japanu raspona 410 m je najveći čelični plutajući lučni most oslonjen na dva velika pontona s obje strane. Betonski plutajući most *Dubai* dužine 365 m svečano je otvoren 2007. godine u Dubaiju.



Slika 2.5 Mostovi redom od gornjeg: Evergreen Point, Bergsøysund, Nordhordland, Dubai, Yumemai [2]

2.3. Plutajuće luke, dokovi i gatovi

Plutajući dokovi su došli do izražaja tijekom Drugog svjetskog rata. Ideja pokretnih luka je začeta nakon što se osiguranje postojećih luka pokazalo nepraktičnim. Luka *Mulberry*, slika 2.6, je izvrstan primjer plutajućih dokova izgrađena za vrijeme Drugog svjetskog rata [2]. Luku su razvili Britanci kako bi se lakše mogao iskrcavati teret tijekom invazije na Normandiju. Luka je projektirana od tri dijela: valobrana, pristaništa, te šetnice od pristaništa do plaže. Uloženo je mnogo u istraživanje i razvoj plutajućih objekata, kao što su inovacije u materijalima, tehnikama sidrenja, te mjerama osiguranja čvrstoće pontona kako bi uopće bila moguća njihova izgradnja u otežanim vremenskim i morskim uvjetima.



Slika 2.6 Dijelovi luke Mulberry [2]

Plutajući dokovi su korišteni i u *Pearl Harbour-u* (izvođač *US Bureau of Yards and Docks*). Izgrađeni su pokretni suhi dokovi namijenjeni za privezivanje podmornica, razarača i drugih brodova sličnih veličina, te su bili ključni element u obrani od napada japanskih bombardera-samoubojica, Kamikaza. Iako je američka flota pretrpjela velike štete dostupnost pokretnih suhih dokova u obližnjim bazama, s već pripremljenom radnom snagom i komponentama potrebnim za popravak brodova, je omogućila popravak mnogih brodova u kratkom vremenu.

Moderne primjene takvih betonskih dokova se mogu pronaći na Aljasci i u Japanu. Kontejnerski terminal (*engl. Container terminal*) *Valdez* (slika 2.7) na Aljasci je prvi, ujedno i najveći takve vrste, prednapeti betonski plutajući terminal. Otvoren je 1982. godine, te na dnevnoj bazi prima brodove kapaciteta do 50000 tona. Dok je dug 215 m, izgrađen od dva predgotovljena vodonepropusna šuplja elementa koji su naknadno prednapeti zajedno i usidreni na mjestu. Prednost ovog morskog terminala, kao i svih plutajućih objekata velikog kapaciteta s niskim zahtjevima održavanja, je mogućnost brzog transporta i sastavljanja, prikladnost korištenja u dubokim vodama i mjestima s lošim stanjem tla, te najkritičnije svojstvo, sposobnost samostalnog prilagođavanja morskim mijenama [2].



Slika 2.7 Kontejner terminal Valdez [3]

Primjer plutajućih gatova u Japanu se nalazi u luci *Ujina, Hiroshima,* koja je prikazana na slici 2.8. Izgrađeni 1993. godine, gatovi su omogućili proširenje kapaciteta luke za uplovljavanje putničkih trajekata. Kako unutarnje more (*engl. Seto Inland Sea*) koje razdvaja otoke Honshū, Shikoku i Kyushu, tri glavna otoka Japana, ima veliku promjenu u plimi i oseci od 4 m, pontonski

gatovi su idealni za prilagođavanje mijenama. Veliki broj plutajućih gatova je primijenjen kako bi se osigurao stabilitet, a time i osjećaj sigurnosti putnika.



Slika 2.8 Ujina, Hiroshima [2]

2.4. Pomorske plutajuće konstrukcije za eksploataciju nafte

Važan čimbenik u razvijanju plutajućih konstrukcija je također i razvijanje objekata za istraživanje, vađenje i skladištenje nafte. Prerađivanje nafte u različitim pomorskim konstrukcijama je započelo još u kasnim 1940-im godinama. Koriste se različiti konstrukcije kao npr. konstrukcije za bušenje naftnih bunara, za vađenje i prerađivanje sirove nafte, te objekti za privremeno skladištenje nafte.

Ruski inženjeri su u Kaspijskom moru kraj obale grada Baku, Azerbajdžan, 1949. godine otkrili nalazište nafte vrhunske kvalitete na dubini od 1100 m ispod morskog dna. S tim otkrićem i početkom bušenja izgradila se prva u svijetu pomorska naftna platforma *Neft Daşları*, prikazana na slici 2.9, koja postaje dijelom i prve pomorske metropole u svijetu, *Staljinove Atlantide*. Mreža naftnih platformi opskrbljivala je godišnje oko 175 milijuna barela sirove nafte, te je predstavljala čak 75% Sovjetske cjelokupne naftne proizvodnje [2]. Metropola se sastoji od skoro 2000 bušećih

platformi koje se protežu na moru radijusa 15 km, te su povezane mrežom mostova ukupno dugih preko 300 km.



Slika 2.9 Prva pomorska naftna platforma Neft Daşları [2]

Dok su početne naftne platforme bile fiksne s uronjenom opremom za bušenje, istraživanje nafte na sve većim dubinama je zahtijevalo nove vrste platformi, te su polu-potopljene plutajuće konstrukcije bile jedino izvedivo rješenje [2].

Prva polu-potopljena naftna platforma, *Ocean Driller*, je napravljena 1963. godine, te je kasnije postala prototipna konstrukcija u naftnoj industriji. Koncept je brzo prilagođen, te za manje od 10 godina, 30 polu-potopljenih platformi je izgrađeno.

Naftna industrija je započela s izgradnjom pontonskih konstrukcija velikih dimenzija koje se koriste kao plutajući objekti za skladištenje nafte. U Japanu su te konstrukcije izgrađene kako bi se napravile zalihe nafte u slučaju mogućih scenarija naftne krize. Poznatije plutajuće skladišne baze u Japanu su *Shirashima* i *Kamigoto* (slika 2.10).



Slika 2.10 Plutajuća skladišna baza Kamigoto [2]

2.5. Plutajući objekti zabavnog sadržaja

Urbanisti su u mnogim gradovima započeli s izgradnjom različitih kulturnih i rekreativnih plutajućih objekata, kako bi povećali mogućost razonode rastućoj gradskoj populaciji i poboljšali život uz obalu.

Plutajućih konstrukcije se popularno koriste kao plutajući restorani, nudeći gostima restorana panoramski pogled. Među poznatijim objektima, te ikona Hong Konga, je restoran *Jumbo* postavljen na pontonu dimenzija 24 x 24 x 3,2 m (Slika 2.11). U gradu Yokohoma, Japan, se također nalazi plutajući restoran koji je izgrađen 1992. godine (slika 2.11).



Slika 2.11 Restorani Jumbo u Hong Kongu, te Pukarisanbashi u gradu Yokohomi u Japanu [2]

Plutajući smještajni objekti, kao što su hoteli i domovi, također su izgrađeni u novije vrijeme. Hotel na sedam katova, *Four Seasons*, je izgrađen u Singapuru i dotegljen u *Great Barrier Reef* kraj grada *Townsville* u Australiji. Njegova pokretnost je veoma korisna posebno tijekom ekstremnih ciklona kada se čitava konstrukcija usidri na jednom mjestu što omogućava pokretnost uz vjetar tako smanjujući otpor i oštećenja. Hotel je kasnije dotegljen u Ho-Chi Minh, Vijetnam, a kasnije u Sjevernu Koreju. Kanada također ima plutajući hotel, *King Pacific Lodge Princess Royal Island*, koji se nalazi u Britanskoj Kolumbiji (slika 2.12).



Slika 2.12 Plutajući hotel, King Pacific Lodge Princess Royal Island u Britanskoj Kolumbiji [2]

Objekt zabavnog sadržaja koji je napravljen na velikom plutajućem otoku, dimenzija 130 x 40 x 5 m, nalazi se u manjem gradu *Onomichi, Hiroshima, Japan*. Objekt sadrži kino dvoranu za trodimenzionalne projekcije, akvarij i marinu.

Plutajuća platforma, dovršena 2007. godine, u zaljevu u Singapuru (*Marina Bay, Singapur*) je najveća plutajuća pozornica za nastupe na svijetu. Platforma je zamišljena kao višenamjenski objekt za različita sportska i kulturna događanja koja bi pratila veće skupine ljudi. Svojstvenost ove platforme je pokretnost njezinih sastavnih dijelova koji se mogu prerasporediti i tako prenamijeniti platformu za sportove na vodi ili za sajam brodova.

Plutajući otoci (*Viva, Vista i Terra*), prikazani na slici 2.13, koji se nalaze na rijeci *Han*, *Seoul*, dio su umjetnog arhipelaga u Južnoj Koreji. Razvijeni su kako bi se poboljšao urbani odnos južnokorejskog glavnog grada i rijeke Han, s umjetnim otocima na kojima se nalaze kongresne

dvorane, restorani i druge turističke atrakcije. Struktura otočića služi za primjer inovativne uporabe solarne tehnologije i pametne iskoristivosti prednosti plutajućih struktura za rješavanje problema variranja razine mora.



Slika 2.13 Plutajući otoci na rijeci Han, Seoul [2]

Među novijim projektima koji su još u fazi izvođenja je *Greenstar* plutajući hotel na Maldivima u Indijskom oceanu, koji se izvodi prema projektu nizozemskog arhitektonskog inovativnog studija *Waterstudio.NL* te bi trebao biti otvoren početkom 2016. godine [2]. Hotel bi trebao biti kapaciteta od 800 gostiju te imati konferencijsku salu za 2000 ljudi. Ovakve plutajuće konstrukcije, koje su zapravo i proširenja gradova, postaju ključna strategija otočnih država kojima prijeti dizanje razine mora. S obzirom na značaj turizma na svoje gospodarstvo, Maldivi imaju u planu izgradnju plutajućih golf terena međusobno povezanih podvodnim tunelima (*slika 2.14*).



Slika 2.14 3d prikaz plana izvedbe plutajućeg hotela i golf terena na Maldivima [2]

2.6. Plutajuća energetska postrojenja

Pokretnost plutajućih konstrukcija se iskorištava u industrijske svrhe još od druge polovice 20. stoljeća. Ti se objekti mogu izgraditi na određenom mjestu i dotegliti na traženu lokaciju gdje se mogu trajno postaviti ili samo usidriti, te naknadno dotegliti na drugu lokaciju ako se ukaže potreba.

U Brazilu 1978. godine je izgrađeno plutajuće postrojenje za obradu drvenjače na koju je bio priključen zasebni generator za struju, te je dotegljeno do svoje lokacije gdje kasnije pretvoreno u stalno postrojenje. Bangladeš je 1979. kupio plutajuće elektrane izgrađene u Japanu, a potom dotegljene u mjesto Khulna, Bangladeš. Saudijska Arabija je kupila kupila plutajuće postrojenje za desalinizaciju koja je također naknadno dotegljena na svoju lokaciju.

S obzirom da plutajuće konstrukcije mogu biti smještene u blizini gradskog središta bez da se nalaze u okolici stambenih i poslovnih centara, pogodne su za strukture posebnih namjena kao što su nuklearne elektrane ili obrambeni centri. Prvu plutajuću nuklearnu elektranu izgradila je vojska SAD-a 1968. godine. Mobilnost ovakvih konstrukcija omogućuje objektu da bude dotegljen gdje god je potrebno, posebno za vrijeme hitnog slučaja ili prirodne katastrofe kada je potrebna dodatan izvor električne energije.



Slika 2.15 Mega solarna elektrana Kagoshima Nanatsujima [2]

2013. godine Japan je na jugu svoje zemlje, u regiji Kagoshima, izgradio plutajući solarni pogon *Kagoshima Nanatsujima Mega Solar Power Plant* snage 70 MW (slika 2.15). To je najveća

solarna elektrana u Japanu, te može generirati dovoljno struje za napajanje oko 22000 prosječnih kućanstava [2].

Prvi svjetski plutajući betonski stiroporom ispunjen helidrom se nalazi u Vancouveru, Kanada (slika 2.16). Slični plutajući helidromi se nalaze na više lokacija u Japanu, te se koriste kao baza u hitnim slučajevima, posebno jer su ove plutajuće konstrukcije imune na potresne sile i prikladno projektirane mogu izdržati različita opterećenja.



Slika 2.16 Helidrom u Vancouveru, Kanada [4]

2.7. Budućnost korištenja velikih plutajućih konstrukcija

Jedna od zanimljivih primjena ove tehnologije se nalazi u oživljavaju stare ideje o plutajućoj zračnoj luci. Začeta je još davne 1920. godine kada je kanadski inženjer i izumitelj Edward Armstronga (1876.–1955.) predložio izgradnju aerodroma smještenih na moru (*engl. Seadromes*) za zrakoplove koji bi letjeli preko oceana. Međutim, ideja je bila odbačena zbog tehnoloških ograničenja toga vremena pošto avioni nisu mogli prelaziti velike udaljenosti bez stalnih punjenja gorivom. Za vrijeme II. Svjetskog rata 1943. godine na Pacifiku, prema ideji Armstronga, inženjeri mornarice SAD-a su izgradili plutajući aerodrom dimenzije 550 x 90 metara koji se sastojao od 10920 pontona [2].

Provedeni su različiti testni modeli za izgradnju međunarodnog plutajućeg aerodroma *Kansai* u Japanu koji je prikazan na slici 2.17. S ovim projektom je i započelo istraživanje razvoja tehnologije izgradnje velikih pontonski konstrukcija kako na akademskoj razini tako i u industrijskoj. U prvoj fazi ovog projekta predloženo je 1974. godine izgradnja polu-potopljene

plutajuće konstrukcije dimenzije 300 x 60 m. U drugoj fazi 1994. je predložena izgradnja plutajuće pista pontonskog tipa dimenzije 1000 x 60 (do 121) x 3 m. Zbog gigantskih dimenzija predložene konstrukcije nastao je pojam *Mega-Float*[3] [2]. Iako aerodrom u Kansai-u nije izgrađen prema ovom projektu, predviđena je izgradnja plutajućih civilnih zračnih luka i vojnih mobilnih morskih baza u budućnosti.



Slika 2.17 Međunarodni aerodrom Kansai [5]

Sljedeći na redu u evoluciji razvoja tehnologije velikih pontonskih konstrukcija su velika plutajuća predgrađa i plutajući otok-gradovi. Ove urbane konstrukcije mogu biti usidrene uz obalni pojas gradova kao njihova ekstenzija ili mogu biti slobodno plutajući gradovi u međunarodnim vodama. Belgijski arhitekt *Vincent Callebaut* je osmislio model plutajućeg eko-grada, poznat kao *Lilypad*, za klimatske izbjeglice kao dugoročno rješenje poradi rastućih razina vode diljem svijeta [2]. Grad, prikazan na slici 2.18, je zamišljen da bude samoodrživ, u potpunosti napajan obnovljivim izvorima energije kako bi bio neovisan od vanjske električne mreže.

[3] Mega-Float je vrlo velika plutajuća konstrukcija (*engl. VLFS; Very Large Floating Structure*) s potencijalnom dugoročnom trajnosti uporabe u morskim područjima



Slika 2.18 Model plutajućeg grada Lilypad [2]

Već prethodno spomenuti, nizozemski arhitektonski inovativni studio *Waterstudio.NL* je nedavno osmislio plutajuće apartmansko naselje *Citadela* (slika 2.19) koje će se graditi u nizozemskom gradu Westland nedaleko od Haaga [2]. Projekt će poslužiti kako bi se prikazala mogućnost drugačijeg tipa stambene izgradnje u mjestima koji su skloni poplavama, što je posebno značajno za Nizozemsku koja se velikim dijelom nalazi ispod razine mora.



Slika 2.19 Model plutajućeg apartmanskog naselje Citadela [6]

U budućnosti se planira i korištenje potopljenih plutajućih tunela (*engl. SFT; Submerged Floating Tunnel*) prozvanim kao *Arhimedov most* [2]. Primjer takvog tunela je vidljiv na slici 2.20. Ova primjena plutajućih konstrukcija je možda i početak novog tehnološkog razvoja u inovativnom pristupu prijelaza vodenih površina. Konstrukcija se sastoji od cijevne strukture,

potpuno uronjene i stabilizirane odgovarajućim sidrištem, koja iskorištava sile uzgona kako bi izdržavao prometna opterećenja. Prvi takav konstrukcijski model će biti izgrađena u Qiandao jezeru u Kini iako je takav sustav prvi put predložen u Italiji 2007. godine (*Federico M. Mazzolani, Sveučilište u Napoliju Federico II*). Druge zemlje poput Norveške, Italije, Indonezije i Japana sudjeluju u daljnjim istraživanjima i razvoju navedene tehnologije.



Slika 2.20 Primjer modela potopljenih plutajućih tunela [7]

U sklopu razvoja plutajućih objekata puno se ulaže i u istraživanja tehnologije obnovljivih izvora energije radi rastuće zabrinutosti zbog klimatskih promjena. Trenutno najpoznatije i svjetski priznate takve konstrukcije su plutajuće vjetroelektrane koje su uspješno postavljene diljem Europe. Nakon razornog potresa *Tokoku*, jačine 9 prema Richterovoj ljestvici koji je 2011. godine pogodio Japan, uz goleme štete u području zahvaćenom potresom kao i nuklearne elektrane Fukushima, Japan razmatra projekte koji uključuju izgradnju niza polu-potopljenih vjetroelektrana uz obalu Fukushime [2]. Projekt „*Fukushima FORWARD*“ pomorskih vjetroelektrana će imati potencijal od 1,2 TW u usporedbi s kapacitetom od 0,2 TW iz obnovljivih izvora [8]. Buduće plutajuće nezagađujuće elektrane, koje predlaže Japanska udruga za projektiranje plutajućih konstrukcija, nude potencijal razvoja novoj industriji koja bi osigurala proizvodnju i mogući izvoz električne energije, kako za Japan, tako i za bilo koju zemlju koja bi ulagala u razvoj ove tehnologije (slika 2.21 i slika 2.22) [8].



Slika 2.21 Primjer već izvedene polu-potopljene vjetroelektrane, te različitih 3d modela [8]



Slika 2.22 Primjer plutajuće ne zagađujuće elektrane koju predlaže Japanska udruga za projektiranje plutajućih konstrukcija [2]

Mnogi znanstvenici, koje predvodi vodeći stručnjak nanotehnologije Kang L. Wang, predviđaju da će se u bliskoj budućnosti diljem oceana nalaziti velike plutajuće platforme za pretvorbu toplinske energije (*engl. OTEC; Ocean Thermal Energy Conversion platforms*) koje će iskorištavati sunčevu energiju zarobljenu na površini mora. Koristeći okvirni betonski sustav u obliku saća, OTEC platforme mogu biti veličine 356 x 70,7 x 25 m, te su projektirane da izdrže ekstremne vanjske uvjete kao što su uragani, te jaki udari vjetra i valova (slika 2.23). [2]



Slika 2.23 Primjer modela velike plutajuće platforme za pretvorbu toplinske energije (engl. OTEC) [2]

Tako projektirane konstrukcije omogućuju njihovo korištenje kako uz priobalje tako i na dubokim područjima oceana. Veliki broj takvih projekata je predložen raznim agencijama u svijetu kako bi istaknuli izvedivost izgradnje i implementacije OTEC platformi različitih dimenzija koje bi se mogle koristiti u različitim djelatnostima kao što su proizvodnja električne energije, pitke vode i tekućeg vodika. Neki od predloženih projekata su [2]:

a) Projekt 10 MW OTEC platforme za proizvodnju električne energije i svježe vode za atol Diego Garcia koji se nalazi u Indijskom oceanu. Projekt je trenutno u razmatranju SAD-a i Velike Britanije, te će platforma najvjerojatnije biti izgrađena u Singapuru
b) 125 MW OTEC platforma planirana za izgradnju u Republici Maršalovi Otoci (RMI) korištena za proizvodnju električne energije i svježe vode za lokalno stanovništvo i američku vojnu bazu u Kwajaleinu, uključujući i popratne objekte za proizvodnju tekućeg vodika za svjetsko tržište
c) 60 MW OTEC platforma za proizvodnju električne energije koja bi opskrbljivala američku vojsku na otoku Guam
d) Projekti velikih OTEC platforma u Indijskom oceanu za proizvodnju vode i tekućeg vodika za Singapur

3. ULOGA PREDNAPETOG BETONA KOD PLUTAJUĆIH KONSTRUKCIJA

3.1. Uvod

Ključne kvalitete prednapetog betona kao što su vodonepropusnost, čvrstoća, trajnost, prigušivanje vibracija, otpornost na umaranje, popravljivost, mogućnost oblikovanja u ljuske i dvostruko zakrivljene oblike, ekonomičnost, te niz drugih, čine ga pogodnim za izvedbu različitih plutajućih konstrukcija [9]. Prednapinjanje se koristi kako bi se u potpunosti osiguralo odvijanje dinamičkih utjecaja, uglavnom od valova, u tlačnom području, te nikako u vlačnom. Ovo smanjuje nastanak pukotina uslijed zamora betona, a u konačnici i sloma čelika pri zamoru materijala [9]. Specifični dijelovi i zone plutajućih konstrukcija doživljavaju najkritičnija opterećenja tijekom faza izvedbe, a prednapinjanje se može rabiti u svrhu smanjenja tih sila i neželjenih naprezanja, te progiba tijekom izvedbe.

Jedna od osnovnih prednosti prednapetog betona u usporedbi s armiranim betonom je velika otpornost na zamor. Kako je cikličko opterećenje puno štetnije za saturirani i potopljeni beton, prednapinjanje je nužno za uspješnu primjenu betona u plutajućim konstrukcijama. Prednapeti beton pogodan je za apsorbiranje energije, čak i u iznimnim situacijama kao što su npr. sudar, eksplozija ili nasukavanje broda. Razvijaju se lokalne pukotine, međutim, ne i širenje pukotina, što je tipično za čelik.

Većina plutajućih, potopljenih i polu-potopljenih konstrukcija mora biti otporna na naprezanje savijanjem koje nastoji izazvati izbočavanje omotača. Beton ima osiguranu krutost na lokalno izbočavanje i izobličenje sa određenom debljinom potrebnom za osiguranje potrebne čvrstoće. Djelovanje ljuske može biti iskorišteno vrlo učinkovito primjerenim konstruiranjem.

Prirodno svojstvo betona da se uspješno odupire visokim tlačnim naprezanjima čini ga posebno prikladnim za plovila sa dubokim gazom (npr. polu-uronjena plovila za platforme) gdje su hidrostatske sile dominantne. Plutajuće betonske prednapete konstrukcije imaju vlastitu težinu gaza dva do četiri puta veću od čeličnih pa se prema tome kod kritičnog gaza prednapeti beton može kombinirati s čelikom [9].

Ako je konstrukcija pravilno projektirana i izvedena, održavanje betona u morskoj vodi je samo po sebi minimalno. Tijekom uporabe konstrukcija kondenzacija gotovo da i ne postoji na betonskim ljuskama. Visoka otpornost na udare i čvrstoća na zamor materijala pri iznimno niskim

temperaturama, prednapetom betonu daju prednost kao materijalu za korištenje u arktičkim uvjetima.

S razvojem i korištenjem lakih betona visokih performansi smanjuje se dubina gaza i poboljšava otpornost na zamor, što je od posebnog značaja za plutajuće konstrukcije.

Prednost prednapetog betona je i u ekonomičan aspektu gdje se direktna ušteda realizira nižom cijenom osnovnih materijala, te učinkovitijom uporabom materijala, posebno u uvjetima višeosnog opterećenja. Beton visoke čvrstoće iznimno je učinkovit i ekonomičan u preuzimanju tlačnih naprezanja, bilo da tlak dolazi od vanjskog opterećenja ili unutarnjeg prednaprezanja. Čelik visoke čvrstoće koji je karakterističan za prednapete natege, je također ekonomičan i učinkovit ako se može iskoristiti za vlačna naprezanja i zaštititi od korozije [9].

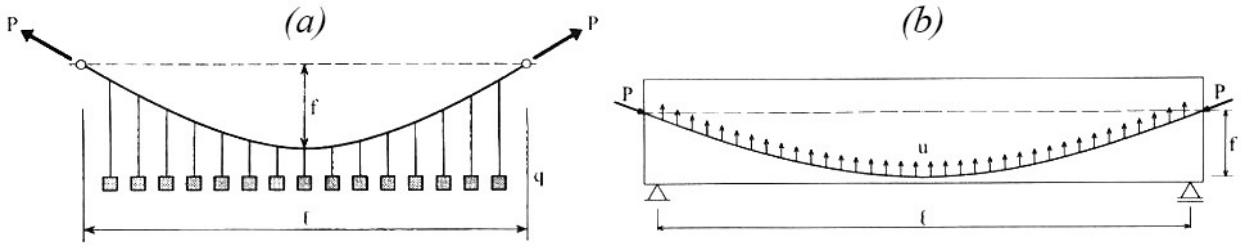
3.2. Prednapeti beton

Beton je materijal velike tlačne, a male vlačne čvrstoće. Vlačna naprezanja izazvana skupljanjem, temperaturom i vanjskim opterećenjem vrlo brzo dostižu vlačnu čvrstoću betona što dovodi do stvaranja pukotina. Kod armiranobetonskih konstrukcija sva vlačna naprezanja prihvaćaju se armaturom.

Cilj prednapinjanja je eliminirati ili barem smanjiti vlačna normalna naprezanja u svim presjecima i to djelovanjem umjetno izazvanim silama. Te sile se nazivaju sile prednapinjanja. Tako dobivena naprezanja moraju biti manja od dopustivih vrijednosti u svima fazama izvedbe i uporabe građevine. [10]

Prednapeti beton je vrsta betona kod kojeg se armaturom svjesno izazivaju unutarnje sile takve veličine i raspodjele pri kojima se naprezanje uslijed vanjskog djelovanja djelomično ili potpuno eliminira. Za razliku od djelovanja armature u armiranobetonskim konstrukcijama koje je pasivno tj. armatura samo prenosi vlačna naprezanja od vanjskog opterećenja, prednost prednapetog betona leži u mogućnosti aktivnog mijenjanja raspodjele unutarnjih sila u konstrukciji. Aktivna uloga prednapinjanja postaje očitija ako se zamijeni prednapeta armatura sa sustavom sila koje djeluju uzduž nosača, čija je svrha postići ravnotežu s djelovanjem od npr. stalnog opterećenja. Princip je sličan pojavi skretnih sila kod klasičnog armiranja kada savijena armatura u uglovima zbog vlačnog opterećenja djeluje tlačnom silom na beton. Posebno je važan slučaj kada armatura ima oblik parabole jer za taj slučaj skretna sila dobiva karakter jednoliko rasprostrtog opterećenja. Kao što uže koje je jednoliko opterećeno vlastitom težinom prirodno

poprima oblik kvadratne parabole, prikazano na slici 3.1., tako vrijedni i obrnuto da skretne sile od parabolične natege djeluju kao jednoliko opterećenje. U oba slučaja vrijedi $u = 8 \cdot f \cdot P / l^2$ [9].



Slika 3.1 (a) oblik užeta pod jednoliko rasprostrtim opterećenjem; (b) skretne sile od napinjanja paraboličnog kabela [9]

Za granično stanje nosivosti prednapetog betona vrijedi isti princip kao i kod armiranog betona. Vanjskoj sili i momentu suprotstavlja se par unutarnjih sila tj. rezultanti tlačnih i vlačnih naprezanja (beton, čelik) koje djeluju kao spreg sila [9].

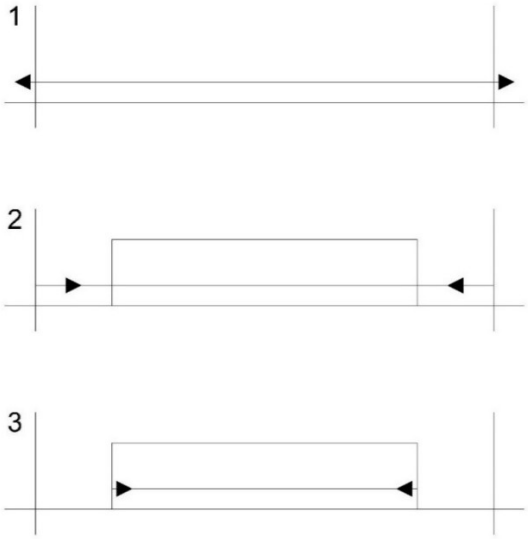
Tehnologija prednapinjanja se razlikuje od sustava do sustava, ovisno o kompaniji koja ga je razvila. Vodeće kompanije su *VSL (Vorspann System Losinger), Freyssinet, DYWIDAG (Dyckerhoff-Widmann Aktiengesellschaft), CCL i BBR (Birkenmaier, Brandestin, Roš u suradnji s Vogt-om)*.

Prema stupnju prednapinjanja razlikuje se:

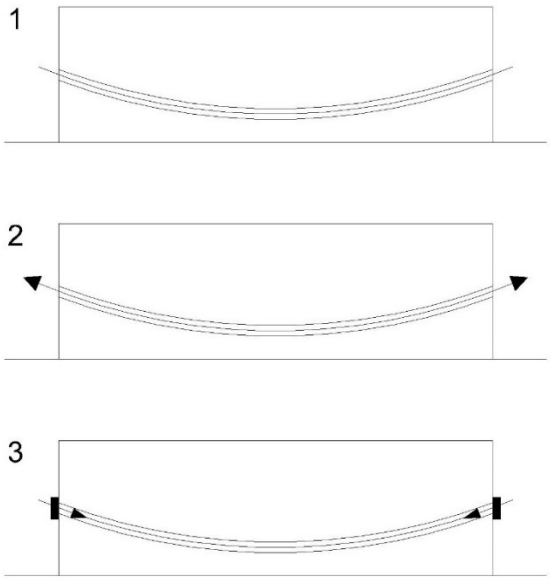
- Potpuno prednapinjanje – napinjanjem armature u betonu unesu se tlačna naprezanja kako bi se sva naprezanja u eksploataciji mogla preuzeti sudjelovanjem čitavog presjeka. Nedostaci ovakvih konstrukcija su velika potrošnja čelika za prednapinjanje, pojava nepredviđenih pukotina, nepotrebna velika sigurnost, te nemogućnost korištenja duktilnosti.
- Djelomično prednapinjanje – pukotine koje se otvaraju djelovanjem pokretnog opterećenja ne utječu na trajnost konstrukcije zbog njihovog kraćeg trajanja, pa nije potrebno prednapinjanje za ukupno opterećenje. Nakon prestanka djelovanja pokretnog opterećenja pukotine se zatvaraju pa su takve konstrukcije dovoljno sigurne od korozije i drugih štetnih utjecaja.
- Ograničeno prednapinjanje – kod ograničenog prednapinjanja za najnepovoljnije kombinacije opterećenja u tijeku građenja i eksploatacije dopuštaju se vlačna naprezanja ograničenih veličina, odnosno manjih od dopuštenih.

Prema načinu prednapinjanja razlikujemo:

- prethodno ili adhezijsko prednapinjanje, tj. prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona (slika 3.2)
- naknadno ili kablovsko prednapinjanje, tj. prednapinjanje nakon stvrdnjavanja betona (slika 3.3)



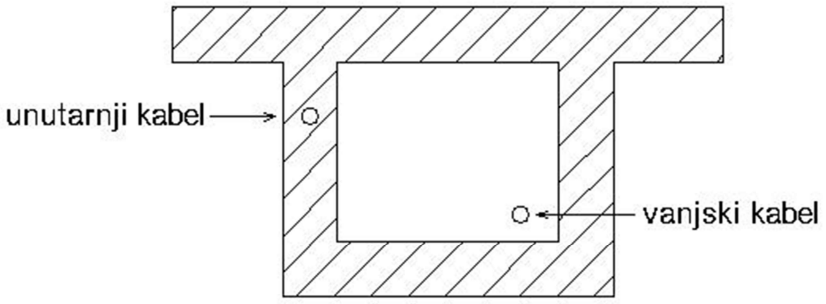
Slika 3.2 Prethodno ili adhezijsko prednapinjanje (prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona) [10]



Slika 3.3 Naknadno ili kablovsko prednapinjanje (prednapinjanje nakon stvrdnjavanja betona) [10]

Naknadno kabelsko prednapinjanje, kao što je prikazano na slici 3.4., može biti:

- unutarnje – kabel se nalazi u presjeku
- vanjsko – kabel se nalazi izvan presjeka



Slika 3.4 Unutarnje i vanjsko prednapinjanje [10]

3.2.1. Razvoj prednapetog betona kroz povijest

Kako bi se smanjilo raspucavanje betona, ideja prednapinjanja betona je dosta stara. Oko 1890. god. prvi zabilježeni patent prednapetog betona registrirao je američki inženjer iz San Francisca imenom *Henry Jackson* izgradivši betonski nadvoj s prednapetim zategama. Međutim, nakon godinu dana nadvoj se srušio. Jackson nije znao za fenomen puzanja betona i opuštanja mekog čelika, što je u konačnici rezultiralo nestankom učinka prednapinjanja. Nijemac *C.E.W. Doehring* pokrenuo proizvodnju betonskih greda i ploča s prednapregnutim žicama, što je također završilo neuspjehom zbog gubitka efekta prednapinjanja.

Nakon početnih neuspjeha Jacksona i Doehringa, *Eugéne Freyssinet* 1908. godine eksperimentalno je izgradio prvi prednapeti betonski luk. Do 1928. je uspio riješiti većinu tehničkih problema i patentirao sustav prednapinjanja, koji je komercijalnu primjenu doživio tek 1930. godine na lučnom mostu Plougastel blizu mjesta Brest u Francuskoj. Taj most s tri raspona od 186,5 m je primjer prednapinjanja betonske konstrukcije bez uporabe prednapetih natega. Na njemu je Freyssinet primijenio metodu kompenzacije luka tako što je izazvao naprezanja u rebru luka uz pomoć hidrauličkih preša stavljenih u luk. Tako je uspio neutralizirati utjecaj skupljanja, skraćenja rebra i pada temperature u luku. Freyssinet je uzeo u obzir i efekte skupljanja i puzanja betona te relaksacije čelika u vremenu, zbog kojih je dolazilo do gubitka efekta prednapinjanja, te je shvatio nužnost korištenja visokokvalitetnih materijala –betona visoke tlačne čvrstoće i čelika visoke vlačne čvrstoće i elastičnog produljenja. U prijašnjim pokušajima prednapinjanja koristila se armatura s puno manjom maksimalnom deformacijom, što je u konačnici zbog skupljanja i puzanja rezultiralo gubitkom efekta prednapinjanja od oko 60%. Upotrebom kvalitetnije armature taj gubitak je smanjen na samo 20%.

Njegovi prvi patenti do danas su nadopunjeni raznim postupcima tj. sustavima patentiranima u svim industrijaliziranim zemljama, a sama tehnologija je doživjela nagli razvoj nakon II. svjetskog rata djelomično zato jer je trebalo obnoviti i sagraditi veliki broj mostova.

Drugi važniji datumi:

- 1930. Vianini - centrifugiranje cijevi omotane prednapetom žicom
- 1937. prvi cestovni mostovi od prednapetog betona
- 1943. Mörsch piše prvu knjiga o prednapetom betonu
- 1944. Magnel, Bruxelles - prvi željeznički most od prednapetog betona
- 1946. Mirko Roš, EMPA, Zürich – laboratorijska ispitivanja
- 1950. Pariz, prvi međunarodni kongres o prednapetom betonu
- 1952. Osnovana Međunarodna federacija za prednapinjanje (FIP - Fédération Internationale de la Précontrainte)
- 1953. Osnovan Europski odbor za beton (CEB - Comité Européen du Béton)
- 1997. Udruživanjem CEB i FIP nastaje organizacija FIB

3.2.2. Prednosti i nedostaci prednapetih konstrukcija

Prednosti prednapetih konstrukcija:

- značajna ušteda u betonu i mekom čeliku zbog bolje raspoređenih naprezanja u betonu na istim rasponima
- mogućnost neprekinutog vođenja armature direktno vodi do većih raspona i vitkijih konstrukcija
- omogućeni su veći rasponi za isti oblik konstrukcije
- smanjeni su kratkotrajni i krajnji dugotrajni progibi konstrukcije
- prednapeta konstrukcija se puno bolje ponaša prilikom nastajanja pukotina - zbog tlaka u betonu količina i širina pukotina je smanjena, a samim time je konstrukcija otpornija na vanjske utjecaje i koroziju, tj. dugotrajnija
- bolje podnose znatna preopterećenja – pukotine koje pritom nastanu se potpuno zatvaraju nakon uklanjanja tereta ako naponi čelika nisu prešli granicu popuštanja
- bolja svojstva kod ciklički promjenjivog djelovanja opterećenja, tj. zamora materijala (posljedica male promjene naprezanja u čeliku za prednapinjanje)
- zbog manjeg presjeka prednapete konstrukcije imaju manju masu, te su pogodnije u seizmičkim područjima
- manja masa konstrukcije automatski vodi do manjih presjeka zidova i stupova, te manjih opterećenja temelja
- etažne ploče su manje debljine

- uz dobro planiranje gradnje naknadnim naprezanjem može se reducirati vrijeme gradnje zbog omogućenog bržeg skidanja etažne oplate
- savladavanje velikih raspona uz veću vitkost i manju masu,
- povećana trajnost zbog izostanka pukotina
- ubrzanje i racionalizacija montažnog građenja

Nedostaci prednapetih konstrukcija:

- potrebna je stručna radna snaga zbog zahtjevnijih radova
- potrebna je posebna oprema
- velika preciznost u projektiranju i izvođenju
- skuplji materijal

3.2.3. Svojstva materijala i elementi sustava

3.2.3.1. Čelik za prednapinjanje

Čelik za prednapinjanje je osnovna nosiva armatura u prednapetim betonskim konstrukcijama. Zahtjevana svojstva čelika za prednapinjanje postižu se kemijskim sastavom i posebnim postupkom proizvodnje. Koristi se nelegirani ili niskolegirani čelik. Za razliku od čelika za armiranje, vlačna čvrstoća je povećana većim udjelom ugljika, do 0,9%. Ovisno o tehnološkom postupku, može se postići vlačna čvrstoća do 2000 MPa. Vareni čelični proizvodi nisu dopušteni za prednapinjanje betona.

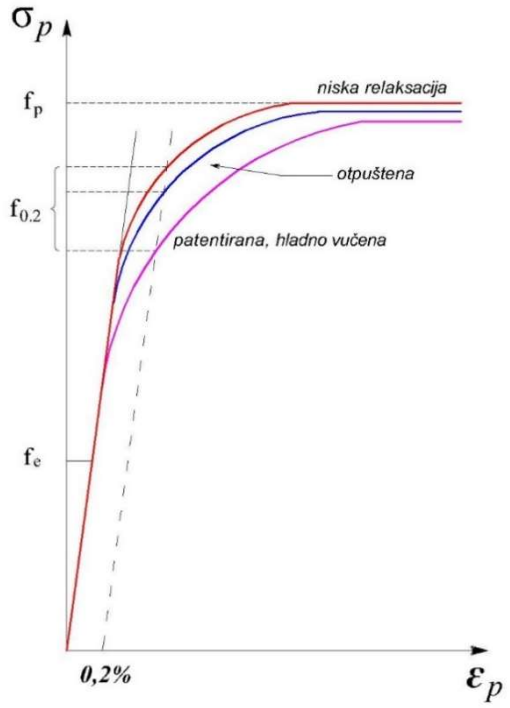
Čelik za prednapinjanje dijeli se, ovisno o veličini relaksacije, na 3 klase [10]:

- Klasa 1: žice i užad s visokom relaksacijom
- Klasa 2: žice i užad s niskom relaksacijom
- Klasa 3: šipke

Osnovni materijal za prednapetu armaturu je toplo valjani čelik. Odgovarajućim legiranim elementima može se povećati granica popuštanja do 800 MPa, a čvrstoća do 1000 MPa.

Toplo valjani čelik koristi se za proizvodnju prednapetih šipki koje su se prve rabile za prednapinjanje. Šipke mogu biti glatke ili rebraste, a proizvode se duljine od 6 do 30 m, te promjera od 12 do 75 mm. Radi jednostavnijeg sidrenja i povezivanja, rebra rebraste šipke su u obliku navoja. Šipke većeg promjera obično se obrađuju ubrzanim hlađenjem a zatim otpuštanjem kratkotrajnom toplinskom obradom.

Žice su najčešće korištena vrsta čelika za prednapinjanje. Osnovni materijal je toplo valjani, niskolegirani čelik s visokim sadržajem ugljika. Hladno-vučena čelična žica proizvodi se hladnom obradom od toplo valjane žice. Hladnom obradom povećava se čvrstoća žice koja se kreće od 1500 MPa do 1800 MPa te karakteristično naprezanje pri zaostaloj deformaciji od 0,2% koje dostiže 75% karakteristične vlačne čvrstoće. Istodobno, duktilnost žice je smanjena, a unutarnje naprezanje pojavljuje se kao rezultat hladne obrade. Slika 3.5 prikazuje glatki oblik dijagrama naprezanje-deformacija bez izražene granice popuštanja koji je karakterističan za hladno-vučenu čeličnu žicu. Umjesto granice popuštanja, uvodi se karakteristično naprezanje $f_{0,2}$ pri zaostaloj deformaciji od 0,2% ili karakteristično naprezanje pri zaostaloj deformaciji od 0,1% [9].



Slika 3.5 Radni dijagram naprezanje-deformacija čelika za prednapinjanje (žice/užad) [9]

Prednapete žice proizvode se promjera od 3 do 10 mm, a površina žice može biti glatka ili profilirana, koja je hladno proizvedena. Žice se isporučuju u kolutovima. Najčešće se koristi uže koje se sastoji od sedam žica. Uže se sastoji od središnje žice, oko koje je ostalih šest žica spiralno ovijeno. Užad se proizvodi promjera od 9 do 17,5 mm, a najčešće se koristi uže promjera 15 mm. Užad s tri žice se koristi kod nekih lagano napetih, serijski proizvedenih prethodno prednapetih stropnih ploča. Užad s 19 i 37 žica, slično oblikovane u žičano uže, su također dostupne. Užad se također isporučuje u kolutovima (slika 3.6). Prednost užadi je jednostavnije napinjanje većeg broja žica u isto vrijeme. Pored toga, spiralnim ovijanjem žica u uže poboljšava se prionljivost između užeta i morta za injektiranje ili betona. Unutarnje naprezanje izazvano u žici uslijed hladne obrade, toplinskim postupcima ili mehanički tijekom sukanja može se ukloniti otpuštanjem naprezanja ili

temperiranjem deformacije. Kod otpuštanja naprezanja žica se zagrijava na temperaturi od 350 do 400 °C a zatim sporo hladi. Otpuštenu užad ili žice karakterizira povećana granica proporcionalnosti f_e kao i karakteristično naprezanje pri zaostaloj deformaciji od 0,2% koje dostiže do 85% čvrstoće [9]. Otpuštanjem se djelomično smanjuje opuštanje čelika.

Modul elastičnosti obično se uzima od 205 do 210 GPa za šipke, 190 do 205 GPa za žice, i 175 do 195 GPa za užad [9].



Slika 3.6 Čelik za prednapinjanje u kolutovima [11]

Zahtjevi čelika za prednapinjanje:

- Visoka čvrstoća
- Niska relaksacija tj. opuštanje
- Mogućnost oblikovanja savijanjem na hladno
- Dobra zavarljivost
- Niska osjetljivost na koroziju (posebno naponsku)
- Geometrijska pravilnost
- Velike dužine pri isporuci
- Ponekad dobra prionljivost
- Ponekad otpornost na zamor

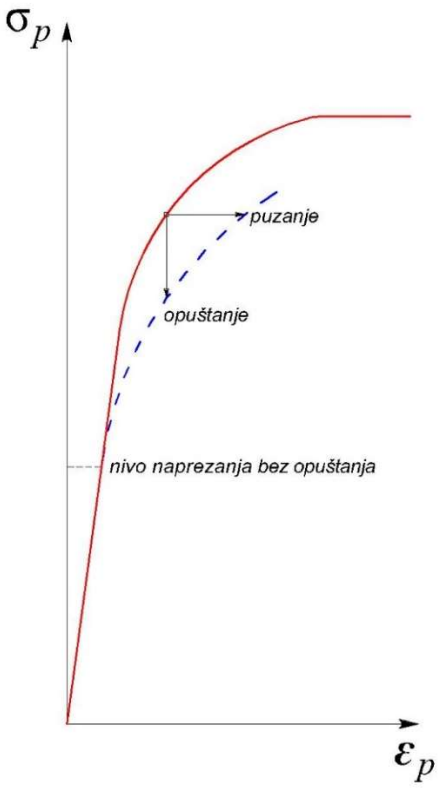
Vrsta natege	Najmanji broj
Pojedinačna šipka ili žica	3
Šipke i žice, skupljene u nategu ili uže	7
Natege osim užadi*	3

Tablica 3.1 Najmanji broj natega [10]

Tablica vrijedi ako se pretpostavi jednak promjer svih žica, šipki ili natega. *Taj zahtjev može se također smatrati ispunjenim ako element sadrži najmanje jedno uže sa sedam ili više žica (promjer žice ≥ 4,0 mm). [10]

Opuštanje (relaksacija) čelika za prednapinjanje [9]

Vrlo važna karakteristika koja ima utjecaj na projektiranje prednapetih betonskih konstrukcija je puzanje, ili opuštanje. Puzanje se manifestira kao povećanje deformacije čelika izloženog konstantnom vlačnom naprezanju visokog inteziteta. Deformacija se s vremenom povećava. Inverzna pojava je opuštanje. Opuštanjem se smanjuju naprezanja u čeliku tijekom vremena koji je izložen konstantnom deformacijskom opterećenju tj. izduženju.



Slika 3.7 Vremenski ovisna svojstva čelika za prednapinjanje [9]

Opuštanje se manifestira smanjenjem naprezanja u čeliku za prednapinjanje nategnutom između dva mjesta (sidra) na gredi. Nakon određenog nivoa počinje opuštanje koje se povećava s povećanjem naprezanja u čeliku. Taj nivo naprezanja dostiže približno 50% karakterističnog naprezanja pri zaostaloj deformaciji od 0,2%.

3.2.3.2. Beton

Zahtjevi na beton u prednapetim konstrukcijama su visoka tlačna čvrstoća, mali iznos skupljanja i puzanja, te trajnost.

Beton je heterogeni materijal sastavljen od vapnenačkog ili silikatnog sirovog agregata (drobljena stijena ili šljunak i pijesak), portland cementa, vode i aditiva. Prednapeti beton je načinjen od kvalitetnog betona čvrstoće od 40 do 60 MPa, dok neke države također proizvode beton visoke čvrstoće s čvrstoćom od 80 do 120 MPa. Sastav betonske smjese za prednapeti beton je uvjetovan zahtjevom za visokom čvrstoćom, obradivošću, brzinom očvršćivanja i reološkim svojstvima[4].

Cement je glavni sastojak betona. Za prednapeti beton koristi se kvalitetan portland cement razreda čvrstoće 42,5 ili 52,5 u količini od 400 do 420 kg/m^3. Veći udio cementa rezultira većom čvrstoćom betona do količine od oko 550 kg/m^3, dok daljnje povećanje količine cementa više ne očvršćava beton već dovodi do većeg skupljanja i puzanja.

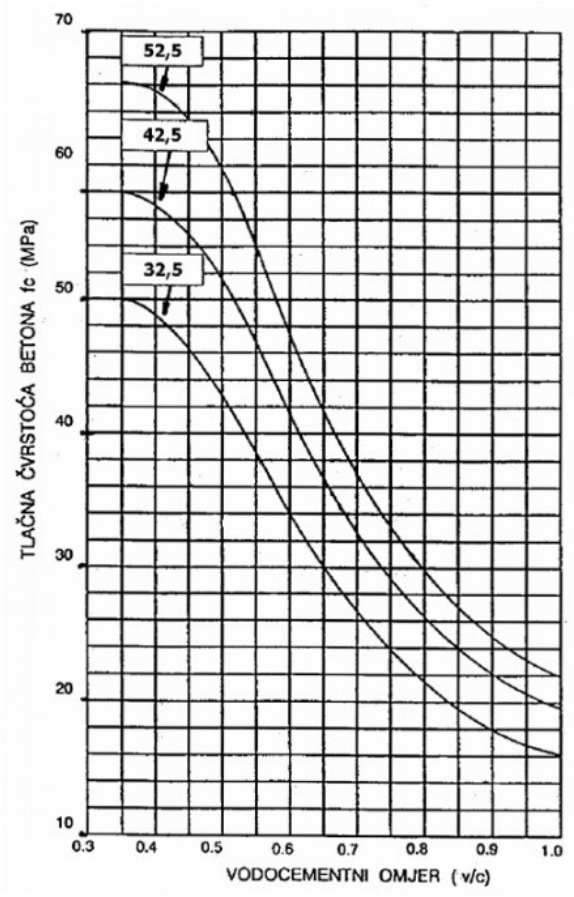
Količina vode u betonu je specificirana relativno u odnosu na količinu cementa preko vodocementnog *v/c* omjera. Postoji približno hiperbolički odnos između tlačne čvrstoće betona i vodocementnog omjera, kao što je vidljivo na slici 3.8. Donja granica za vodocementni omjer je oko *v/c* = 0,25 koja predstavlja količinu vode koja je s kemijskog gledišta neophodna za hidrataciju. Veći *v/c* omjer smanjuje čvrstoću betona koji je dobre kvalitete glede šupljina i pora koje se formiraju u betonu dok s povećanjem *v/c* omjera raste propusnost, skupljanje i puzanje.

Radi postizanja zahtjevane kvalitete, agregat mora biti inertan, tvrd, bez pora, stalnog volumena i bez primjesa. Omjer krupnog i sitnog agregata treba biti oko 65:35.

Beton visoke čvrstoće sadrži uz već spomenute sastojke i mikro-agregat. Najčešći mikro-agregat je silicijska prašina koja je dobivena kao nusproizvod u proizvodnji silicijskih legura ili silicijskog metala u električnoj lučnoj peći. Vrlo fina silicijska prašina sadržava uglavnom silicijski

[4] Reologija je znanost o deformaciji i karakteristikama tečenja materijala pod djelovanjem vanjskih sila. Bavi se predviđanjima mehaničkog ponašanja zasnovanih na mikro- i nano- strukturama materijala, npr. molekularnoj veličini i arhitekturi polimera u otopini ili raspodjelom veličine čestica u čvrstim suspenzijama.

dioksid i približno je 100 puta sitnija od portland cementa te može zamijeniti oko 5 do 10 % cementa.



Slika 3.8 Ovisnost tlačne čvrstoće betona i vodocementnog omjera za različite razrede portland cementa [9]

Svojstva betonske smjese se također kontroliraju pomoću dodataka, među najvažnijima su plastifikatori i superplastifikatori koji poboljšavaju obradivost svježeg betona, te aditivi za ubrzavanje očvršćivanja. Ovisno o sastavu betonske smjese, gustoća običnog betona varira od 2200 do 2600 kg/m^3. Tipična gustoća običnog betona bez armature je 2400 kg/m^3, dok propisi za analizu konstrukcija od prednapetog betona uglavnom specificiraju gustoću od 2500 do 2600 kg/m^3 [9].

3.2.3.3. Prionljivost između čelika za prednapinjanje i betona

Prionljivost između čelika za prednapinjanje i betona ovisi o vrsti prednapinjanja. Kod prethodno prednapetog betona u potpunosti se oslanja na sidrenje čelika za prednapinjanje pomoću prionljivosti s betonom. Kod naknadno prednapetog betona ukupna sila prednapinjanja mora se prenijeti preko čeličnog sidra, iako postoji prionljivost između morta i čelika za prednapinjanje. Pokazatelj prionljivosti između betona i čelika je duljina sidrenja, a ona je definirana u propisima za pojedine vrste čelika za prednapinjanje ovisno o kvaliteti betona.

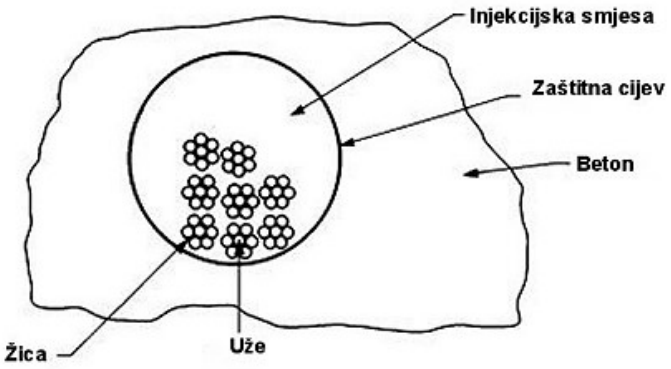
3.2.3.4. Mort za injektiranje

Injektiranje cijevi natega se izvodi normiranim postupcima s mortovima čija su svojstva propisana normama:

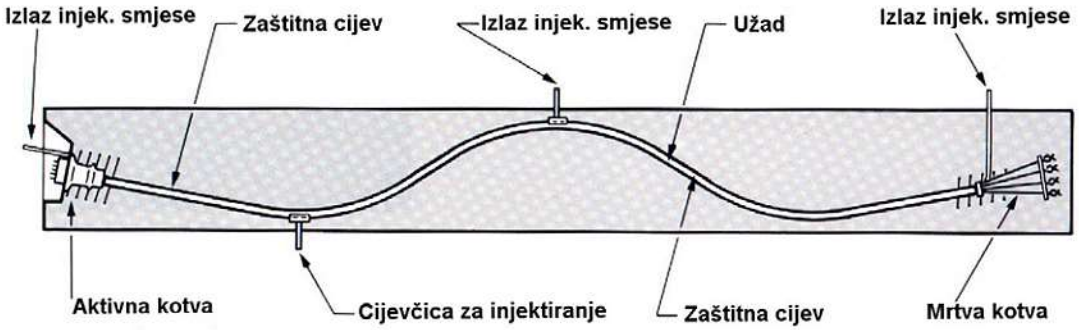
HRN EN 446	Mort za injektiranje kabela za prednapinjanje – Postupci injektiranja
HRN EN 447	Mort za injektiranje kabela za prednapinjanje – Svojstva uobičajenih mortova za injektiranje

Tablica 3.2 Hrvatske norme za svojstva morta za injektiranje kabela [10]

Prostor između kabela i zaštitnih cijevi potrebno je ispuniti mortom za injektiranje ili uljem, ne smije biti zraka ni vode (slika 3.9). Mort za injektiranje se pod pritiskom ubrizgava u najnižoj točki kabela, a odzračivanje i izlaz morta se događaju u najvišoj točki, kao što je prikazano na slici 3.10.



Slika 3.9 Poprečni presjek kabela za prednapinjanje [10]



Slika 3.10 Uzdužni presjek prednapete grede [10]

Cementni mort za injektiranje ima dva zadatka [10]:

1. Prvi zadatak je zaštita natege od korozije. Kako bi se ostvarila dobra zaštita od korozije, čelik mora biti potpuno obavijen cementnim mortom dostatne gustoće. Ne smiju se

pojavljivati nezapunjeni dijelovi gdje se zadržao zrak ili voda. Voda se zimi može zaleditи i izazvati odlamanje zaštitnog sloja betona.

2. Drugi zadatak cementnog morta za injektiranje je osiguranje sprezanja natege i konstruktivnog elementa. Za to je potrebna dostatna čvrstoća.

Prilikom izvedba najveći problem predstavlja osiguranje potpune ispunjenosti zaštitne cijevi cementnim mortom bez šupljina jer najmanje šupljine mogu dovesti do korozije čelika. Cementni mort ne smije biti proizveden s previše vode jer se ona ne može upiti u okolni beton zbog zaštitne cijevi. Izlučena zaostala voda povećava opasnost od korozije i pri niskim temperaturama može se zamrzavati. Cementni mort se ne smije injektirati pod velikom brzinom niti pod velikim tlakom. Time se onemogućuje stvaranje zračnih čepova, segregacija, oštećivanje konstrukcije, opreme i ventila, te se omogućuje kontrola protoka morta.

3.2.3.5. Zaštitne cijevi

Zaštitne cijevi osiguravaju oblik vođenja natega. Moraju biti fleksibilne kako bi se omogućile blage promjene ekscentriciteta natege, ali i dovoljno krute da bi spriječile štetne deformacije tijekom betoniranja. Cijevi mogu biti tankostjene čelične ili polietilenske (slika 3.11). Čelične se izrađuju od profilirianog lima debljine 0,2 do 0,5 mm, ovisno o tipu natege i tehnologiji, duljine 5 do 6 m. Presjek je naboran kako bi se povećala krutost, prianjanje s betonom i smjesom za injektiranje.

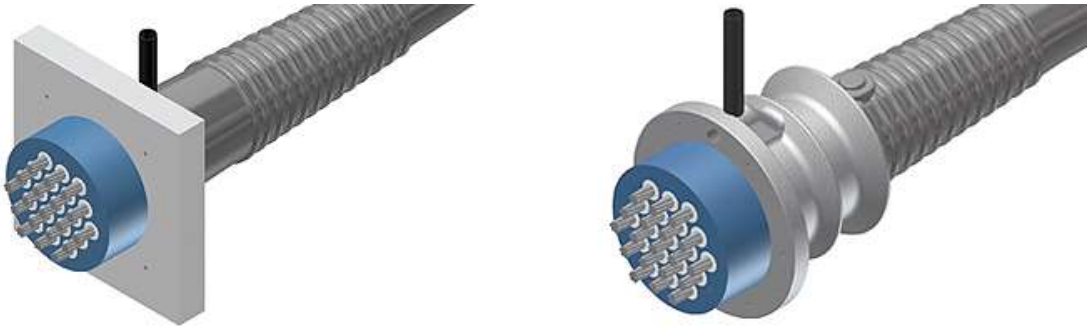


Slika 3.11 Zaštitne cijevi u kojima se nalaze natege kod naknadnog prednapinjanja (čelične ili plastične) [9]

Prednosti polietilenskih (PE) cijevi su bolja zaštita natega od korozije i na zamor, imaju bolju kemijsku otpornost i bitno manje trenje između stijenke cijevi i natege, što smanjuje gubitke prednapinjanja [9]. Debljine cijevi su 2 do 3 mm, ovisno o veličini natege. Obično su profilirane s naborima ili su rebraste, a međusobno se povezuju ili navojem ili postupkom toplog zavarivanja.

3.2.3.6. Sidrena glava i klinovi

Sidrena glava i klinovi, prikazani na slikama 3.12 i 3.13, su dijelovi čeličnog sidra. Sidra su mehaničke naprave koje se koriste za prijenos sile prednapinjanja iz natege u beton pomoću koncentriranog pritiska ispod sidrene ploče. Sidrena ploča je obično postavljena u armaturni koš prije betoniranja i pričvršćena vijcima na oplatu sa strane lica betonskog elementa. Sidro mora biti postavljeno koaksijalno s cijevi natege, a sidrena glava mora biti okomita na os cijevi. Za sidra nagnutih natega oblikuje se udubljenje ili sidreni džep na čelu grede, koji predstavlja prostor između sidrene ploče i vertikalne ravnine kraja grede.



Slika 3.12 Sidro sustava prednapinjanja od snopa paralelnih žica, sustav BBR [12]

Druga skupina sidara ima čeličnu glavu u kojoj je svaka pojedinačna žica usidrena pomoću hladno oblikovane glavice, takav sustav praktički nema gubitaka prenapinjanja zbog prokliznuća.



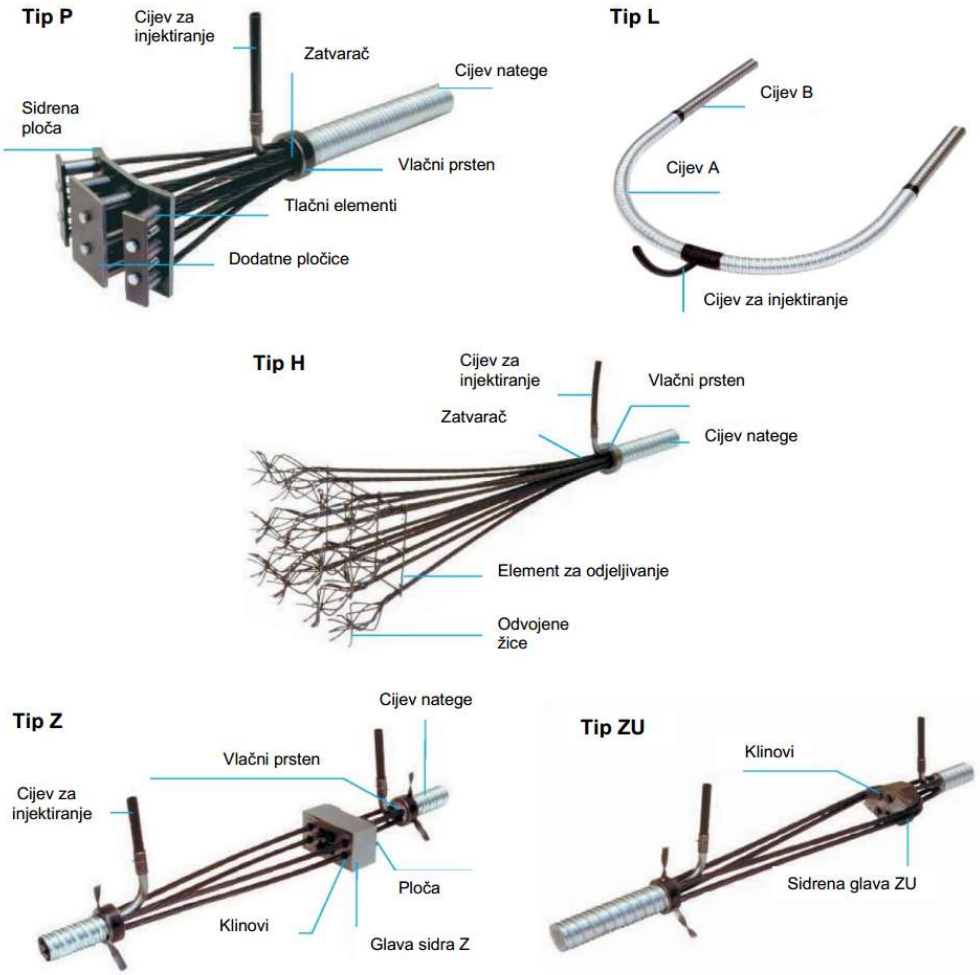
Slika 3.13 Sidro sustava prednapinjanja SOLO [9]

Klinovi (slika 3.14) su dijelovi sidra koji služe za sidrenje užadi u sidrenu glavu i rađeni su od visokokvalitetnog čelika. Obično se sastoje od dva ili tri dijela, ovisno o sustavu koji se koristi, koji sastavljeni ostavljaju otvor za uže u sredini klina. Jednim klinom se mogu usidriti do tri užeta.



Slika 3.14 Klin i sidrena glava [Mek_1]

Ukoliko je potrebno sidriti nepomičan kraj nategе na nepristupačnom mjestu, čelično sidro se mora zamijeniti s tzv. *pasivnim sidrom*. Prijenos sile prednapinjanja na beton vrši se preko sidrene ploče, radijalnog pritiska i prianjanja (*sidro petlja*), ili prianjanja iskrivljenih krajeva užadi s izvijenim žicama (*fen sidro*). Kod prednapinjanja elemenata na nepristupačnom mjestu na krajevima konstrukcije se koriste pasivna sidra, a u sredini nategе međusidra (*plivajuće sidro*).



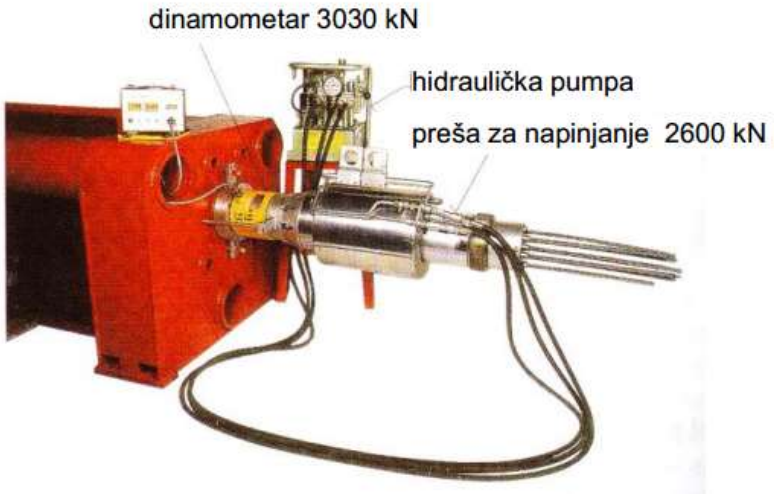
Slika 3.15 Sidra sustav VSL; pasivna sidra: tip P, tip L – sidro petlja, tip H – fen sidro; međusidro (plivajuće): tip Z, ZU [9]

3.2.3.7. Preše

Hidrauličke preše se koriste za napinjanje natega. Primjer hidrauličke preše prikazan je na slici 3.16. Napinjanje je moguće izvoditi u više faza ukoliko jedan hod preše nije bio dovoljan. Kako je iznimno bitno utvrditi kolika je sila unesena prešama u element, one se moraju redovito ispitivati i verificirati. Također, tijekom napinjanja treba provoditi razna mjerenja kako bi se odredila stvarno prenesena sila, kao sustavom prikazanom na slici 3.17. Njena vrijednost se dobije preko tlaka ulja u cilindrima hidrauličke preše. Osim navedenog, treba paziti da ne dođe do blokiranja natege u cijevi, što se mjeri izduženjem natege, te do prevelikog proklizavanja klina.



Slika 3.16 Primjer hidrauličke preše [13]

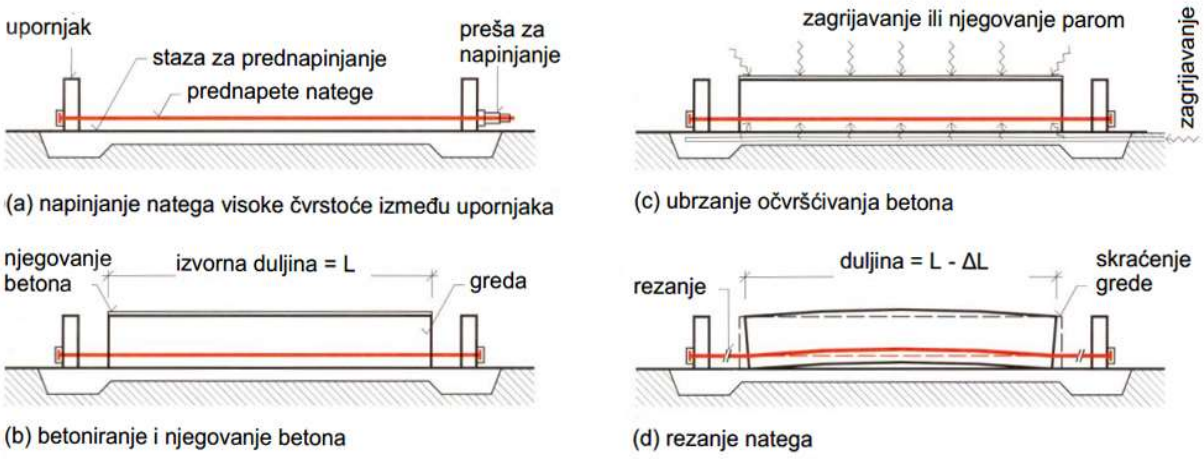


Slika 3.17 Kontrola rada preše na ispitnom užetu [9]

3.2.4. Tehnologija prednapetog betona

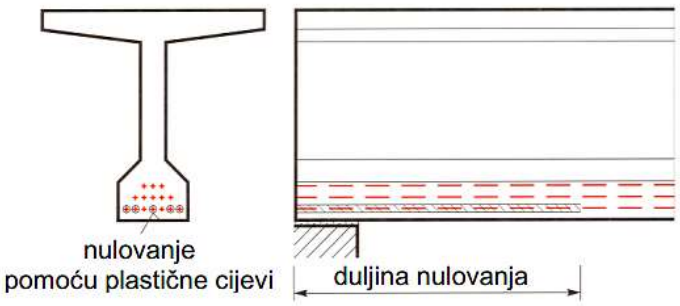
3.2.4.1. Prethodno prednapeti beton

Kod prethodnog prednapinjanja, primjer na slici 3.18, element se betonira oko prije nategnutih i privremeno usidrenih čeličnih žica, kablova ili užadi u metalnom kalupu ili na stazi za prednapinjanje. Odmah dolazi do prianjanja između armature i betona. Nakon što beton dovoljno očvrsne, krajevi žica se otpuste i odvajaju od sidrenih blokova, čime se opterećenje putem prianjanja sa žice ili užeta prenosi na beton. Čelik je tada usidren pomoću prionjivosti s betonom. Dolazi do minimalnog skraćenja jako nategnutih žica, predstlačenjem i skraćenjem betonskog elementa. Kod prethodnog napinjanja uglavnom se koristi pojedinačna užad, ali se mogu grupirati i dva ili tri užeta. Cijeli se postupak odvija u specijaliziranim tvornicama, u kalupima ili na proizvodnoj stazi čija duljina može dosegnuti i do 200 m. Princip proizvodnje je identičan za oba pristupa, dok je osnovna razlika u prijenosu sile prednapinjanja koji se ostvaruje ili preko krutih upornjaka za usidrenje na krajevima staze ili preko krutosti samog kalupa.



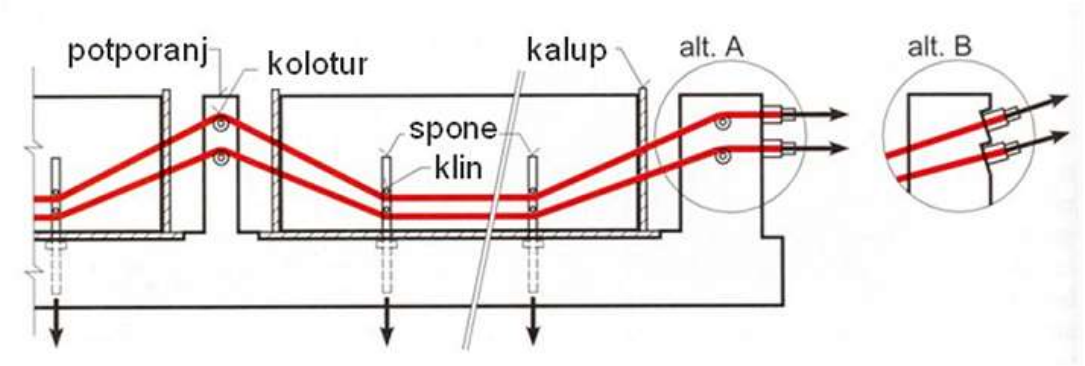
Slika 3.18 Princip proizvodnje prethodno prednapetog betona [9]

Staza za prednapinjanje može se koristiti za proizvodnju prefabriciranih ploča armiranih ravnim nategama postavljenima s donje strane ploče. Radi postizanja maksimalne čvrstoće na savijanje, natege su postavljene s maksimalnim i konstantnim ekscentricitetom od težišta poprečnog presjeka ploče. Međutim, u područjima s malim ili nepostojećim momentom savijanja od vlastite težine i promjenljivog opterećenja od slobodno oslonjenog elementa, tj. na njegovim krajevima, gornje vlakno poprečnog presjeka može se raspucati. Stoga se prionljivost užadi s betonom u tim zonama onemogući nulovanjem užadi, prikazano na slici 3.19, po prilici na jednoj trećini do jedne polovine ukupne količine užadi, što smanjuje silu prednapinjanja i time također i moment od prednapinjanja.



Slika 3.19 Nulovanje užadi [9]

Alternativni pristup, prikazan na slici 3.20, eliminira rizik od raspucavanja na gornjem rubu poprečnog presjeka u blizini ležaja je primjena statički povoljnijeg oblika vođenja čelika za prednapinjanje duž elementa. Skretanje čelika za prednapinjanje iz pravca u neki drugi položaj (kosina) može se izvesti s najvišeg ili najnižeg mjesta nakon napinjanja, ili se čelik direktno napinje u obliku poligonalne linije pomoću sustava kolotura koja smanjuju trenje. Skretanje čelika za prednapinjanje rjeđe se rabi i prikladno je samo kod relativno visokih greda (greda TT presjeka i I-presjeka).



Slika 3.20 Poligonalno vođenje prednapete užadi (alternativni pristup) [9]

3.2.4.2. Naknadno prednapeti beton

Naknadno prednapinjanje rezultira slično kao prethodno prednapinjanje, samo se tek nakon stvrdnjavanja betonskog presjeka u kablove unosi sila. Primjena naknadnog prednapinjanja omogućuje korištenje tanjih betonskih presjeka, veće udaljenosti između potpornih točki, čvršće zidove koji mogu izdržati bočna opterećenja, te čvršće temelje koji mogu podnijeti učinke slijeganja i bubrenja tla. Sustavi naknadnog prednapinjanja pružaju aktivno ojačanje. Cilj je tlačiti betonsku konstrukciju na mjestima gdje opterećenje uzrokuje vlačno naprezanje. Naknadno prednapinjanje primjenjuje tlačno naprezanje na materijal, čime se poništava vlačno naprezanje kojemu bi beton mogao biti izložen pod opterećenjem.

Naknadno prednapinjanje se primjenjuje korištenjem natega za naknadno prednapinjanje - opreme koja uključuje snažnu čeličnu užad ili šipke za prednapinjanje, oblogu ili zaštitnu cijev, plus eventualno injekcijsku smjesu ili anti-korozijski premaz oko čelične užadi ili šipki, te potrebna sidra s obje strane.

Tipično čelično uže koje se koristi za naknadno prednapinjanje ima promjer 15,7 mm i vlačnu čvrstoću koja je četiri puta veća od prosječne šipke za armiranje koja nije prednapeta. Zaštitna obloga ili cijev nalazi se oko čelika za prednapinjanje. Prilikom napinjanja, čelik se rasteže, a u potrebni položaj se fiksira korištenjem sidrenog elementa, pri čemu se sila zadržava u užetu kroz cijeli životi vijek konstrukcije.

Sidrenje prednapete armature može se riješiti:

- prianjanjem s betonom
- sidrenjem na krajevima posebnim sidrima koja se najčešće sastoje od čeličnih ploča se za koje se natege učvrste navrtkama, klinovima i sl.
- sidrenje na krajevima u betoniranim petljama, kukama i sl.

Razlikuje se:

- *Prednapinjanje unutarnjim nategama s prianjanjem* – Prednapinjanje unutarnjim nategama s prianjanjem je danas najčešće primjenjivana metoda prednapinjanja kod koje prijenos sile s natege na beton mora biti osiguran cijelom dužinom natege. Armatura se postavi u zaštitne cijevi, te se tako izbetonira element. Tek tada se kablovi napinju preko pokretnog sidra hidrauličkim prešama koje se upiru o beton elementa. Trenutačna elastična deformacija se dogodi i dolazi do produljenja armature i malog skraćenja elementa, a taj je pomak omogućen zbog zaštićenosti armature cijevima. Nakon toga se cijevi pune masom za injektiranje (cementno mlijeko s dodatcima), čime se postiže veća sigurnost pri slomu i zaštita od korozije.
- *Prednapinjanje vanjskim nategama bez prianjanja* – Sustav kod kojeg je natega pojedinačno usidrena preko sidra, i samo se na sidrima unosi sila prednapinjanja u betonski element. Prionjivost duž natege je uglavnom namjerno spriječena iako ne mora biti uz primjenu naknadnog injektiranja.

3.2.5. Gubitci prednapinjanja

Iako djelovanje prednapinjanja ima brojne pozitivne utjecaje na konstrukciju, ono nije konstanto već se s vremenom mijenja. Tako dolazi do gubitaka sile prednapinjanja koji mogu

drastično smanjiti nosivost konstrukcije. Ukoliko se ovi gubitci pravovremeno ne uzmu u obzir i saniraju u najvećoj mogućoj mjeri, može doći do deformacija ili rušenja čitave konstrukcije, čak i nakon što je ona dulje vrijeme nakon završetka bila u uporabi.

Sila prednapinjanja određuje se iz naprezanja registriranog na preši tijekom napinjanja (prije sidrenja) u presjeku na mjestu sidra na napinjanom kraju. Ovo naprezanje djeluje vrlo kratko vrijeme i stoga se u propisima navodi relativno visoka dopuštena vrijednost. Prema eurokodu 2, EN 1992-1-1, 2004, vrijedi:

$$\sigma_{p,max} = min\begin{cases}0{,}80 \cdot f_{pk} \\ 0{,}90 \cdot f_{p0.1,k}\end{cases}$$ [9], gdje je:

f_{pk} - karakteristična vlačna čvrstoća čelika za prednapinjanje

$f_{p0.1,k}$ - karakteristično naprezanje čelika za prednapinjanje pri zaostaloj deformaciji od 0,1 %

Gubitke sile prednapinjanja, početne i vremenske, valja proračunati. Ponekad se rabe opće preporuke prema kojima gubitci sile prednapinjanja iznose 25 - 30 %. Stvarne vrijednosti gubitaka sile prednapinjanja za vrijeme napinjanja provjeravaju se mjerenjem sile koja se prenosi od jednog do drugog kraja natege.

Proračunska vrijednost sile prednapinjanja može se općenito uzeti sa:

$$P_d = \gamma_P \cdot P_{m,t}$$ [11], gdje je:

γ_P - parcijalni koeficijent za prednapinjanje (prednapinjanje uglavnom djeluje povoljno pa se primjenjuje $\gamma_{P,fav}$ čija se vrijednost preporučuje =1,0 za stalne i prolazne proračunske situacije; kada se provjerava stabilnost s vanjskim kabelima, gdje povećanje prednapinjanja može biti nepovoljno primjenjuje se $\gamma_{P,unfav}$ čija se vrijednost preporučuje =1,3; kod lokalnih učinaka primjenjuje se $\gamma_{P,unfav}$ čija se vrijednost preporučuje =1,2)

$P_{m,t}$ - srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku *t* na udaljenosti *x* od aktivnog kraja kabela koja se dobiva kao maksimalna sila prednapinjanja koja se primjenjuje na aktivnom kraju kabela minus trenutni i vremenski gubitci

3.2.5.1. Kratkotrajni gubitci

Već u trenutku napinjanja i tijekom sidrenja nastaju promjene prednapinjanja uzduž natege. Ove promjene dovode do promjene naprezanja u natezi, koje nazivamo *kratkotrajnim* ili *početnim gubitcima*, te se javljaju tijekom procesa proizvodnje prednapetog betona (prije ili tijekom prijenosa sile) zbog:

- trenja između natege i stijenki zaštitnih cijevi (ili staze za prednapinjanje)
- sidrenja (prokliznuća klina)
- elastične deformacije betona
- uzastopnog napinjanja
- relaksacije čelika za prednapinjanje
- deformiranja upornjaka na stazi za prednapinjanje
- temperaturnih razlika između čelika i staze za prednapinjanje
- deformacije betona uslijed tlačnog pritiska izazvanog obodnim nategama malog radijusa zakrivljenosti

3.2.5.2. Dugotrajni gubitci

Dugotrajni gubitci ili *gubitci tijekom uporabnog vijeka* su vremenski gubitci koji nastaju nakon sidrenja ili nakon prijenosa sile prednapinjanja (kod prethodnog napinjanja) na beton. Oni utječu na vrijednost sile prednapinjanja tijekom vijeka trajanja konstrukcije i nastaju zbog:

- relaksacije (opuštanja) čelika
- skupljanja betona
- puzanja betona
- puzanja betona uslijed mnogo puta ponovljenog cikličkog opterećenja
- trenutne elastične deformacije betona od promjenljivog opterećenja

3.3. Izloženost plutajućih prednapetih konstrukcija

U usporedbi s drugim konstrukcijskim materijalima, pravilno projektirane i izvedene konstrukcije od prednapetog betona su najtrajnije za morski okoliš. Ta trajnost naravno nije automatski dobivena prednapinjanjem pošto nemarnost i nedovoljno znanje pri izvedbi mogu dovesti do kobnih posljedica, najčešće zbog korozije armaturnog čelika. Takve nezgode su uvijek sveopće i progresivne.

Plutajuće konstrukcije su najizloženije utjecajima okoliša u potopljenom dijelu konstrukcije, te u zoni zapljuskivanja.

Kod duboke potopljenosti posebno sa zrakom u unutrašnjosti, npr. trup plovila dubokog gaza, slana voda prolazi kroz beton i ishlapljuje s unutarnje površine. Kloridi prodiru u vodenu otopinu pomoću zasićenosti i kapilarnosti, kao i pomoću ionske difuzije. Na unutarnjoj površini, kristali soli ostaju nakon isparavanja i može nastati elektrolit molekula soli, te kako je kisik

dostupan, korozija može započeti. Što je veća propusnost i difuznost betona, korozija će biti izraženija, posebno jer je ugljični dioksid dostupan iz zraka a on smanjuje pH vrijednost cementne paste (karbonatizacija betona) [9]. Za takve konstrukcije beton bi trebao biti što je moguće gušći i nepropusniji, adekvatni zaštitni sloj čelika trebao bi biti izveden, te bi trebalo razmotriti nepropustan vanjski premaz.

U zoni zapljuskivanja gdje je beton izložen naizmjeničnom vlaženju i sušenju, uz dovoljno prisustvo kisika dolazi do početak korozijskog procesa. U nekim okolišima, potrebno je uzeti u obzir djelovanje smrzavanja-odmrzavanja i abraziju ledom. Uporaba maksimalnog uvlačenja zraka i visoko nepropusnog betona pokazalo se ključnim u morskom okolišu sa smrzavanjem-odmrzavanjem. U ovoj zoni zapljuskivanja naglasak se mora dati na [9]:

- niski *v/c* omjer
- dodavanje cementu mikrosilicijske prašine u određenim količinama (od 3 do 4%)
- dobru njegu betona
- visoki cementi faktor
- antikorozivne zaštite armature
- upotrebu aeranata u zoni smrzavanja-odmrzavanja

Od iznimne važnosti je stvaranje nepropusne obloge za površine u toj zoni, bilo na bazi bitumena ili epoksi smola. Moguća alternativa takvim premazima su drvene i čelične obloge, kameni nabačaj tj. kamenomet (rip-rap ili školjera).

Plutajuće konstrukcije, osim izložene vanjskom utjecaju, mogu biti izložene i utjecaju posebnih kemikalija. Taj tip izloženosti se pojavljuje kada se betonske konstrukcije rabe za skladištenje tekućina kao što su nafta i petrokemijski produkti, te je potrebno poduzeti sve specifične mjere opreza koje se odnose na te kemikalije. Korisno je primijeniti opća pravila za gust, nepropustan beton, niski *v/c* omjer, visoki cementni faktor i adekvatni zaštitni sloj, dok neki specijalni aditivi, npr. aditivi za uvlačenje zraka, pucolani, uključivo filterska silikatna prašina, ili specijalni premazi, kao što su poliuretanski ili epoksidni, mogu biti od koristi [9].

Jedan od najvećih izazova za očuvanje trajnosti, te zašto je iznimno važno pravilno projektiranje i izvedba, su dinamička djelovanja valova na konstrukcije koje izazivaju više stotina tisuća pa čak i milijuna ciklusa savijanja što čini plutajuće konstrukcije veoma podložne zamoru materijala. Najutjecajniji na zamor materijala su oni ciklusi koji prouzrokuju pojavu vlačnih naprezanja u betonskom trupu što može dovesti do pojave pukotina iako magnituda vlačnih naprezanja može biti manja od polovice statičke vlačne čvrstoće. U tipičnoj plutajućoj

konstrukciji, dno i krov trupa imaju membranska naprezanja, više ili manje jednolična kroz njihovu debljinu radi čega je bilo koja pukotina izložena procurivanju vode. Kontinuirano cikličko opterećenje s vremenom proširuje pukotine što dovesti do gubitka prionljivosti čelika za armiranje, te na kraju i do sloma. Prednapinjanje se općenito smatra ključnim za održavanje dna i krova trupa uvijek u tlaku kako bi se smanjio utjecaj kontinuiranog cikličkog opterećenja pod dinamičkim djelovanjem valova, a samim time povećao otpornost na zamor.

3.3.1. Djelovanja i utjecaji djelovanja

Prilikom analize i projektiranja plutajućih konstrukcija u obzir se uzimaju specifična djelovanja koja se ne javljaju kod klasičkih konstrukcija na tlu.

Horizontalne sile od valova su općenito više puta veće od horizontalnih djelovanja na konstrukcije na tlu, izuzev potresa. Najveći utjecaj djelovanja horizontalnih sila ovisi o vezi konstrukcije s podlogom ispod mora. Kod plutajućih konstrukcija stalno i pokretno opterećenje preuzima uzgon. Ako je plutajuća konstrukcija vezana za podlogu s popustljivim sidrenim sustavom, horizontalne sile od valova uravnotežuju inercijalne sile. Osnovna svrha sidrenog sustava je sprječavanje odplutavanja konstrukcija uslijed nepromjenjivih sila vjetra i strujanja, kao i mogućih nepromjenjivih sila od polaganih valova, koji su obično reda veličine manje od sila valova prvog reda.

Dimenzioniranje plutajuće konstrukcije i njenog sidrenog sustava ovisi o funkciji i uvjetima okoliša, valovima, strujama i vjetru. Dominantni utjecaj na projektiranje konstrukcije može imati maksimalno opterećenje od stalnih i promjenjivih djelovanja ili čvrstoća na zamornost uslijed cikličkog opterećenja valovima. U obzir se uzimaju i moguća izvanredna i ekstremna djelovanja, kao npr. udar broda ili eksplozija te se mora osigurati da sigurnost konstrukcije nije ugrožena mogućim progresivnim otkazivanjem uslijed takvog oštećenja.

Djelovanja prema kojima se plutajuće konstrukcije projektiraju su sljedeća [14]:

- osnovna i dopunska opterećenja
- hidrostatski pritisak (uzgon - proračunava se integracijom hidrostatičkog pritiska. Specifična težina morske vode uzima se sa vrijednošću 10,09 kN/m^3)
- pritisak tla na sidreni sustav
- pomaci dna mora i pomaci ležajeva
- valovi, morske struje, plima i oseka, tsunami, vjetar, oluje
- sile tijekom izvedbe

- promjena temperature
- utjecaj nanošenja i pritiska leda
- morski rast (korozija i trenje)

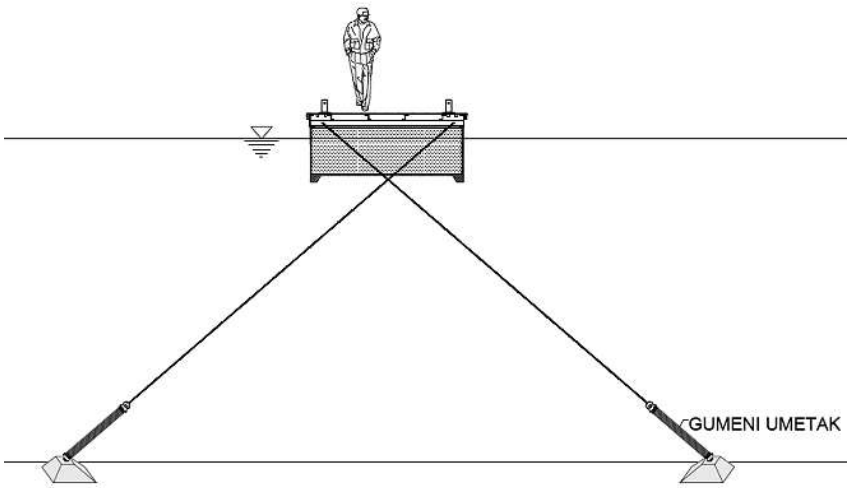
Za velike plutajuće konstrukcije (*engl. VLFS – Very Large Floating Structure*) dominantan je elastični odgovor konstrukcije, te se ona sukladno i proračunava kao elastična konstrukcija kod koje se uzima u obzir interakcija između elastičnog odgovora konstrukcije i fluida u kojoj se nalazi. Krutost konstrukcije je sukladno mjerodavni parametar za projektiranje. Odnos između krutosti konstrukcije i globalnog elastičnog odgovora je općenito složen, jer je rezultat utjecaja interakcije konstrukcije i fluida. Primjerice, povećanje krutosti konstrukcije može dovesti do povećanja unutarnjih sila i naprezanja, što opet utječe na hidroelastični odgovor. Hidroelastični proračun se sukladno mora provesti za svaku fazu projekta da bi se uzeli u obzir utjecaji promjena u projektu na krutost konstrukcije i odgovor konstrukcije i fluida. [14]

3.3.1.1. Sidreni sustavi

Sidreni sustav plutajućih konstrukcija, posebno pontona, se koristi za povezivanje konstrukcije i morskog dna u svrhu sprečavanja gibanja pod utjecajem vjetra, valova ili morskih struja. Postoje klasični načini vezivanja u obliku lančanice, te noviji sustavi s poboljšanim dijelovima koji bolje apsorbiraju sile vanjskih djelovanja.

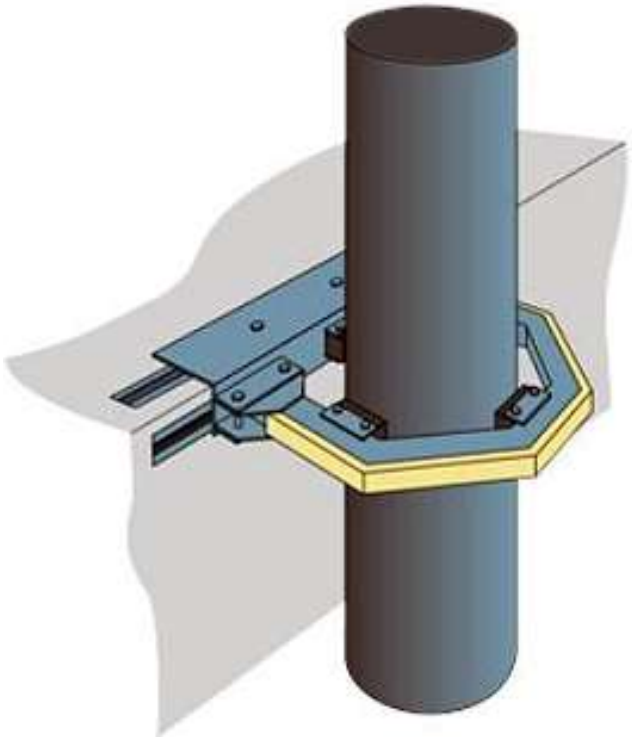
Klasični sidreni sustav pontona, sastoji se od četiri lanca, te se veže na krajnje točke segmenta pontona i na betonske blokove koji se nalaze na dnu mora. Tzv. pridneni blokovi se međusobno povezuju lancima koji tvore bazu za sidrenje lanaca sidrenog sustava konstrukcija. Sidreni sustavi se uobičajeno sastoje od lanaca i konopa koji se međusobno nastavljaju. Na lance se dodatno postavljaju betonski utezi čija se težina aktivira pri povlačenju lanca/konopca, te na taj način djeluju stabilizacijski pri jačim vjetrovima ili valovima.

Seaflex sidreni sustav [15] pontona je noviji, poboljšani, načini sidrenja koji se bazira na visoko elastičnim gumenim umecima koji imaju zadatak apsorbirati sile. Kao što je vidljivo na slici 3.21, gumeni umeci drže privezane lance/konope zategnutima te na taj način sprečavaju pomicanje pontona. Ovisno o lokacijama sa različitim oscilacijama plime i oseke, te različitoj izloženosti valova i struja, primjenjuju se gumeni umeci različitih elastičnosti. Gumeni umeci napravljeni su oko homogene gumene jezgre koja je omotana gumom visoke čvrstoće. Kada se izloži opterećenju guma se steže oko elastične gumene jezgre pružajući otpor kojim se smanjuje gibanje pontona. Jedan gumeni umetak sadrži i do 10 gumenih elemenata, svaki može izdržati opterećenja do 10 kN. Moguća je primjena u dubinama od 1 do 90 m.



Slika 3.21 Seaflex sustav [16]

Postoji i mogućnost sidrenja pilotima. Piloti se koriste kao sidreni sustav u situacijama kada su oscilacije plime i oseke takve da onemogućuju primjenu klasičnog sidrenog sustava (lanaca), te u situacijama u kojima su ograničeni prostorni gabariti. Sidrenje pontona pomoću pilota se vrši posebnim vodilicama koje omogućuju vertikalni pomak pontona, a onemogućuju horizontalni (slika 3.22). Ovisno o opterećenjima, za sidrenje pontonskih gatova koriste se piloti promjera od 20 do 40 cm, a za sidrenje pontonskih lukobrana promjeri od 50 do 70 cm. Najveću trajnost su pokazali prednapeti betonski piloti s pretpostavkom da su ispravno projektirani i ugrađeni.



Slika 3.22 Vodilica za sidrenje pontona pomoću pilota [16]

3.4. Težina prednapetog betona kod plutajućih konstrukcija

Iako se prednapinjanjem osigurava krutost konstrukcije i povećava otpornost na lokalne deformacije, omjer vlastite težine i čvrstoće kod prednapetog betona u odnosu na čelične trupove sličnih svojstava u nekim slučajevima može biti nepogodan za korištenje. To se najčešće odnosi za korištenje u plitkim vodama gdje se moraju primijeniti određene metode kako bi se minimizirao gaz.

S obzirom da je debljina zidova betonskih teglenica, brodova, i sanduka obično određena i nekim drugim parametrima pored same čvrstoće, uporaba betona od lakog agregata će često pokazati znatnu redukciju ukupne težine i gaza. Težina elementa od lakog betona je otprilike 75% težine konvencionalnog betona, sa specifičnom težinom od oko 1,8. Francuski inženjeri su izumili polimerni beton specifične težine od približno 1,0 koji može razviti tlačnu čvrstoću od 30 do 35 MPa [9].

Težina konstrukcija se može smanjiti i samim smanjenjem debljine zidova. Iako je debljina zidova već određena iz uvjeta potrebnog razmještaja čelika za armiranje i prednapetih natega u poprečnom presjeku, ponekad je izvediva uporaba prethodnog prednapinjanja umjesto naknadno napetih natega sa znatnim cijevima. Moguće je i kod naknadno napetih natega smanjiti njihove zaštitne cijevi u poprečnom presjeku uporabom specijalne užadi i smanjenim brojem užadi u natezi. Za ojačanje plutajućih mostova učinkovito se primjenjuju vanjske natege koje bi se osim u mostogradnji mogle početi primjenjivati i za druge vrste konstrukcija. Vanjske natege bile bi smještene unutar pontonskih mostova, postavljene u polietilenske obloge i injektirane nakon napinjanja kako bi se u potpunosti zaštitile od korozije. Takva tehnika izvođenja omogućava redukciju debljine zidova unutrašnjih pregrada i omogućava zamjenu natega. Kao u mostovima, detaljan nacrt sidara i skretnica od velike je važnosti.

Još jedna metoda kojom bi se mogla smanjiti težina smanjivanjem debljine zida posebno za vrste konstrukcija kojima je najvažniji faktor za debljinu zidova lokalna čvrstoća i krutost, je mogućost izvođenja rebra koja bi osigurala potrebnu krutost i fleksibilnost bočnih strana, stropa, trupa, te unutarnjih pregrada.

Kako bi se smanjila težina posebno velikim plutajućim konstrukcijama, kao što su npr. ploveći spremnici nafte i drugih petrokemijskih proizvoda, predlaže se korištenje ćelijskih konstrukcija. Ćelijska konstrukcija, odnosno šuplja jezgra, u praksi daje dupli zid sa povezujućim dijafragmama, što je vrlo efektivan poprečni presjek za preuzimanje naprezanja savijanjem.

Minimalna debljina pojedinačnih zidova mora biti dostatna za smještaj armature uz odgovarajući zaštitni sloj te ugradbu betona.

3.5. Problemi izvedbe [9]

Plutajuće konstrukcije su vrlo osjetljive na dozvoljena odstupanja, posebice u pogledu debljine zidova. Zidovi i ploče obično imaju armaturu s obje strane, u oba smjera, kao i centralne prednapete cijevi. Zbog toga je vrlo teško ugraditi beton i vibrirati ga kako bi očvrsnuo bez mjehurića zraka i pukotina.

Prethodno izrađene betonske ploče su u uporabi na brojnim plutajućim konstrukcijama uključivo i plutajuće kontejnerske terminale u gradu *Valdezu* na Aljaski. Ostali sustavi proizvodnje su uključivali prethodno izrađene odgovarajuće odljeve elemenata trupa, svaki betoniran jedan za drugim, kako bi kasnije točno i čvrsto mogli biti spojeni u konstrukciju. Dva elementa koja graniče jedan s drugim trebaju biti zajedno njegovani zaparivanjem. Naročito kritične zone javljaju se na dnu i na vrhu trupa gdje je negativan moment maksimalan, a posebno kritično može biti na donjoj ploči, gdje se javlja i veliki posmik zbog hidrostatskih sila. Pravila klasifikacije općenito nalažu da nema pojave vlačnih naprezanja u 20-godišnjem povratnom periodu vala, a taj je uvjet teško zadovoljiti. Važno je osigurati slobodnu odvodnju vode koja je prodrla u dok ili bazen. Beton trupa općenito ne treba prednapeti dok trup nije na vodi, jer će naknadno napinjanje biti otežano zbog trenja na dnu.

3.6. Posebni uvjeti betoniranja

Zahtjevi za beton plutajućih konstrukcija su često vrlo egzaktni i zahtijevaju optimalizaciju odabira materijala, načina miješanja, uključivo odabir aditiva i tehnologiju ugradnje.

Ovi zahtjevi uključuju [9]:

- visoku tlačnu čvrstoću (od 50 do 75 N/mm^2 na valjku 150/300 mm)
- veliku vlačnu čvrstoću (od 5 do 6 N/mm^2) radi dobre otpornosti na otvaranje pukotina i posmik
- niska toplina hidratacije radi smanjenja toplinskih naprezanja
- niska propusnost i difuznost kako bi se osigurala trajnost konstrukcije
- dobra prionljivost s armaturom radi povećanja otpornosti na zamor
- mala zapreminska težina kako bi se olakšao transport i poboljšala stabilnost kod plutajućih faza

- otpornost na abraziju i smrzavanje kod arktičkih i subarktičkih konstrukcija
- otpornost na požar i dobra toplinska vodljivost
- otpornost na kiseline u slučaju prisustva anaerobnih sulfidnih bakterija koje razvijaju H_2S koji s vodom daje H_2SO_4 (javlja se često u kanalizaciji i spremnicima nafte)
- agregat mora biti otporan na alkalne i sulfatne reakcije zbog iona u morskoj vodi (kloridi, sulfati)
- odgovarajuća konzistencija betona kako bi se osigurala dobra ugradnja i ispunjenost sa što manje zraka
- tehnologija ugradnje mora osigurati dobru konsolidaciju betona i jednoliku površinu bez rupa i gnijezda. Rupe na površini moraju biti minimalne i ne dublje od 5 do 10 mm

3.7. Posebne vrste betona

Posebni beton je beton s posebnim zahtjevima i svojstvima koji se ne mogu postići običnim betonom i uobičajenim komponentama sastava betona ili uobičajenom ugradnjom i njegom [17].

3.7.1. Ferocement

Ferocement je atraktivan građevinski materijal, širokih mogućnosti uporabe kao i vrlo dobrih fizičko-mehaničkih svojstava [17]. Načinjen je od portland cementnog morta i više slojeva finih, najčešće žičanih, mreža različitih oblika, te se koristi za izradu tankih elemenata. Ferocement se razlikuje od standardnog armiranog betona uglavnom po načinu armiranja, upotrebe samo sitnih frakcija agregata (pijeska) za izradu morta, što mu daje bitno drukčija svojstva i mogućnosti primjene. Ugrađena armatura vrlo se lako savija u završni oblik, pa se ferocement može upotrebljavati za izradu zakrivljenih ploča raznovrsnih oblika i namjena.

Uspješno je primjenjivan dugi niz godina za manja plovila, a sama ideja ferocementa je započela 1855. kada je francuski izumitelj Joseph-Louis Lambot napravio betonski čamac armiran mrežama od čelične žice postavljene na čelične šipke prema obliku čamca. Ta tehnologija je bila zapuštena skoro stotinu godina, do 1940-ih godina, kada talijanski inženjer Pier Luigi Nervi nastavlja s korištenjem. Nakon toga, korištenje ferocementa postaje dokazana metoda u brodogradnji, iako je danas većinom zamijenjen kompozitnim materijalima i plastikom.

Gradnja ferocementom se sastoji od četiri faze [18]:

1) Postavljanje skeleta (okvirnog sustava) prema obliku buduće konstrukcije

2) Postavljanje čeličnih šipki i slojeva mreže na skelet
3) Zapunjavanje cementnim mortom
4) Njegovanje

Glavne karakteristike ferocementa su otpornost na pojavu pukotina i velika elastičnost što je od iznimne važnosti za plutajuće konstrukcije koje su izložene dugotrajnim cikličkim nanosima opterećenja od valova, vjetra i ostalih atmosferskih prilika.

Nosivost ferocementnog elementa opterećenog na zatezanje ne zavisi od njegove debljine, jer mort (matrica) ispuca znatno prije nego što popusti element. Prve pukotine, iako male i raspodijeljene po cijelome elementu, nisu takve da bi kroz njih penetrirao korozivni medij koji bi izazvao korodiranje armature. Tek nakon povećanja opterećenja povećavaju se i pukotine. Nosivost na vlak jednaka je nosivosti same armature tj. umnošku poprečnog presjeka armature u tom smjeru i granične čvrstoće čelika. Kad je ferocement opterećen na tlak, nosivost ovisi o omjeru udjela armature i morta u presjeku, ali i o orijentaciji presjeka prema smjeru armiranja. [9]

Prednapinjanje i tehnike ferocementa su kompatibilne [9]. Sposobnost da se pomoću prednapinjanja, beton zadrži u tlaku i struktura ponaša kao jedna cjelina (monolitno) je važna jer se strukturalna čvrstoća ostvaruje pomoću prednapetih rebara i greda.

Plutajuće i potopljene konstrukcije od prednapetog betona mogu mnogo toga dobiti uporabom ferocementa. Uporaba gustih žičanih mreža blizu betonske površine čini beton cjelovitim pod udarima i sudarima te ograničava pukotine od skupljanja i puzanja. U nekim slučajevima, uporaba više slojeva žičanih mreža može osigurati potrebnu elastičnost i fleksibilnost.

3.7.2. Lagani beton

Lagani betoni su betoni napravljeni od agregata male mase. Koriste se kako bi se smanjila vlastita težina konstrukcije. Prema HRN EN 206 gustoća laganog betona se kreće od 800 do 2000 kg/m^3 [17]. Tlačna čvrstoća laganog betona je od 1 do 60 N/mm^2, a toplinska provodljivost od 0,2 do 1,0 W/mK [17].

Agregat koji se koristi kod laganih betona je skuplji i zahtjeva više cementne paste, što uzrokuje veću cijenu samog betona. Različite vrste agregata se mogu koristiti kod laganih betona te se time razlikuju i njihove karakteristike. Lagani beton se može proizvoditi upotrebom laganog agregata (plovućac; toplinski obrađeni prirodni materijali kao npr. glinopor i perlit; materijali dobiveni stlačivanjem plina pod pritiskom kao npr. ekspandirani polistiren – EPS; sekundarne

sirovine kao npr. grubi leteći pepeo), običnog ili jednakozrnatog agregata, te primjenom sredstva za proizvodnju plina ili pjene [17].

Za razliku od običnog betona, lagani beton sporije razvija željenu čvrstoću i ima veći koeficijent skupljanja i puzanja. Mort ima veću elastičnost, a time i manju sklonost razvijanju mikropukotina, ali zbog manje otpornosti na habanje površina postaje porozna. Kako bi se spriječio porozitet i time zaštitio beton, može se koristiti određena vrsta završnog sloja [9]. Lagani betoni imaju bolju vatrootpornost zbog manjeg koeficijenta provodljivosti, te pri velikim temperaturama sporije gube čvrstoću od običnog betona. Zbog manje gustoće laganog betona potrebno je intenzivnije vibriranje betona prilikom izvedbe.

Prilikom prednapinjanja nedostatak laganog betona je njegov mali modul elastičnosti što znači veće elastično skraćenje za isto jedinično naprezanje. Kao gruba aproksimacija, može se navesti da je modul elastičnosti laganog betona prosječno oko 55% vrijednosti modula elastičnosti običnog betona [9]. Betoni koji sadrže lagane agregate imaju veći postotak vlage pa time i veće skupljanje betona koje može biti i do 40% veće od skupljanja običnog betona [9]. Puzanje laganog betona je izraženije u odnosu na obični beton što uzrokuje smanjenje sile prednapinjanja, te zbog toga unos početne sile prednapinjanja mora biti povećan.

Primjer primjene prednapete konstrukcije od laganog betona je naknadno prednapeta betonska teglenica izvedena 1982. godine u Japanu. Teglenica dužine 62 m, širine 23 m i dubine 10 m je korištena za dostavljanje materijala potrebnog za izvedbu mosta *Great Seto Bridge* [1].

U današnje vrijeme lagani betoni se sve više upotrebljavaju kao konstrukcijski betoni. U Hrvatskoj se primjenjuju u stanogradnji, dok se u Norveškoj primjenjuju i u mostogradnji [17].

3.7.3. Mikroarmirani beton

Mikroarmirani beton je vrsta betona kojem se u procesu miješanja uz uobičajene sastojke betona dodaju i diskontinuirana vlakna velike vlačne čvrstoće. Svrha mikroarmiranja je povećanje vlačne i tlačne čvrstoće na savijanje betona i odgađanje širenja mikropukotina prenošenjem naprezanja s već napukla presjeka na susjedne presjeke. [17]

Vlakna koja se najčešće koriste mogu biti čelična, staklena (koja moraju biti posebno alkalno otporna), polimerna (sprječavaju pojavu pukotina u fazi očvršćivanja; mogu biti polipropilenska, polietilenska, ugljična i aramidna), te prirodna vlakna (kao npr. agava, bambus, drvo, juta). Moguće je upotrebljavati dvije ili više vrsta različitih vlakana, ovisno o svojstvima betona na koja se želi utjecati. Takav beton se zove hibridni mikroarmirani beton.

3.7.4. Beton ultravelike čvrstoće

Betoni ultravelikih čvrstoća se koriste većinom za nearmirane konstrukcijske elemente s prednapinjanjem ili bez njega. Uglavnom se primjenjuju za mostove konstrukcijske elemente u iznimno agresivnom okolišu, konstrukcije velikih raspona, kod sanacija, za elemente složenog oblika i obrade površine. To su betoni razreda tlačne čvrstoće većeg od C100/115 [17].

Radi postizanja betonske mješavine dobre obradivosti, potrebna je pravilna analiza kemijskog sastava i finoće cementa te njegove kompatibilnosti s kemijskim dodacima. Koristi se vrlo mali vodocementni omjer. Homogenost se povećava djelomičnim ili potpunim izbacivanjem krupnog agregata, te povećanjem gustoće betona dodavanjem mineralnih dodataka. Dodavanjem mikrovlakana se povećava duktilnost, a toplinskim tretiranjem ugrađenog betona dodatno se poboljšava mikrostruktura. [17]

Primjenom betona ultravelike čvrstoće može se smanjiti [17] dimenzija elemenata, volumen potrebnog betona, težina elemenata, površina oplate, potrebno vrijeme njege betona, broj potrebnih podupirača, potreba za održavanjem i popravcima, te stalni trošak. Također, primjenom betona ultravelike čvrstoće može se očekivat [17] manje skupljanje i puzanje, veća krutost kao rezultat većeg modula elastičnosti, veća otpornost na zamrzavanja i odmrzavanje, veća otpornost na kemijska djelovanja i znatno poboljšanu trajnost i smanjenje pukotina, te zadovoljavajuća svojstva pod statičkim i dinamičkim opterećenjem.

4. TRAJNOST BETONA

4.1. Uvod

Trajnost materijala se definira kao sposobnost materijala da se suprotstavi promjenama svojstava dok je *trajnost konstrukcije* njezina sposobnost da uslijed očekivanog opterećenja iz okoliša tijekom uporabe zadrži zahtijevanu razinu sigurnosti i uporabljivosti, te odgovarajući izgled bez povećanih troškova za održavanje i popravke [19]. Treba biti projektirana ili zaštićena tako da se u periodu između uzastopnih pregleda značajno ne pogorša njena uporabljivost. U proračunu treba predvidjeti pristup kritičnim dijelovima za pregled izbjegavajući zahtjevna rasklapanja ili onesposobljavanja konstrukcije.

Sigurnost neke nosive konstrukcije protiv otkazivanja nosivosti određena je kriterijem $R > S$ kojim se uvjetuje da njena otpornost R bude veća od ekstremnog djelovanja S, koje će na nju djelovati u vijeku njenog trajanja. Zona sigurnosti ili veličina stanja nosivosti definirana je kao razlika između otpornosti i djelovanja na konstrukciju tj. $Z = R - S$ [20].

Trajnost građevine ovisi o kvaliteti i vodonepropusnosti betona, zaštiti armature od korozije, kvaliteti izvedbe, prekidu betoniranja, rješenju spojeva elemenata, širini pukotina, te o drugim manje važnim uzrocima.

Glavni uzroci preranog dotrajavanja odnosno pojave oštećenja konstrukcija su:

- Nedovoljne pozornosti posvećene pitanju trajnosti u projektu kao i tijekom izvođenja konstrukcije
- Neredovito održavanje ili neodržavanje tijekom uporabe konstrukcije
- Nepravilan izbor i kvaliteta materijala
- Agresivnost okoliša konstrukcije

Do oštećenja dolazi radi vanjskih utjecaja na konstrukciju kao što su atmosfera (klimatski uvjeti, plinovi, zagađenja), tlo i voda (posebno morska), te unutarnjih utjecaja. Pod unutarnje utjecaje se smatraju svojstva konstrukcije, gdje najveći utjecaj imaju cement (velik udio kloridnih iona ili drugih agresivnih sastojaka, visoka toplina hidratacije, isušivanje mladog betona), agregat (sadržaj klorida smanjuje vezu agregata i cementa povećavajući propusnost betona dok alkalno-agregatne reakcije uzrokuju pojavu oštećenja čak nakon 20 do 30 godina), te voda i dodaci (sadržaj kloridnih i sulfatnih iona u vodi ili dodacima koji su korozivni ili nekompatibilni s cementom ili čelikom).

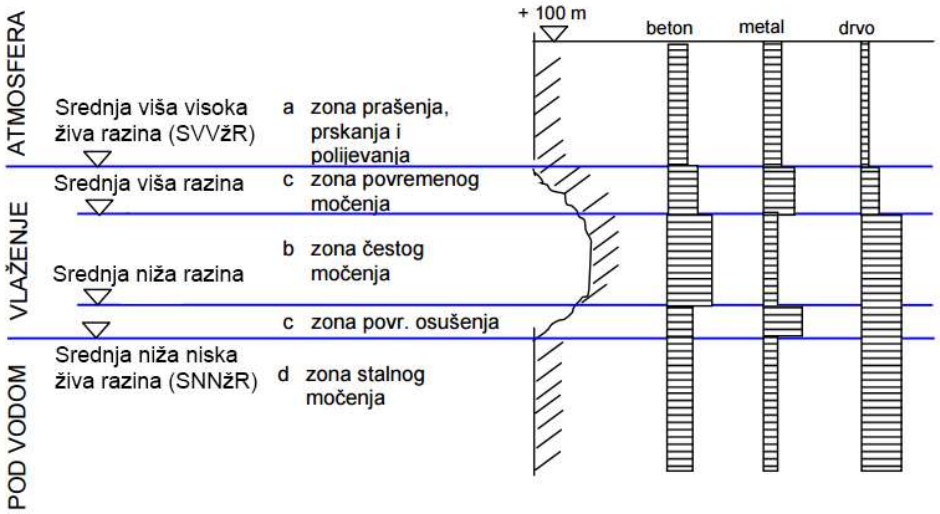
4.2. Djelovanje morskog okoliša na trajnost betonskih konstrukcija

Od svih vrsta okoliša u kojem se neka betonska konstrukcija može nalaziti tijekom svoje uporabljivosti, morski okoliš se ubraja u jedan od agresivnijih i kompleksnijih. U takvom okolišu betonske konstrukcije su izložene djelovanju različitih fizikalno-kemijskih procesa koji uzrokuju degradaciju mikrostrukture betona, te samim time umanjuju trajnost betonske konstrukcije. Na slici 4.1 prikazana je jačina oštećenja konstrukcije ovisno o visinskoj zoni. Radi toga je iznimno važno za projektiranje i održavanje različitih tipova pomorskih betonskih građevina poznavati dugotrajni utjecaj Jadranskog mora na beton.

Glavni razlog agresivnosti morskog okoliša je kemijski sastav morske vode koja sadrži znatne količine otopljenih soli, kisika, ugljičnog dioksida te sulfata. Morska voda u prosjeku sadrži 3,5% (35 g/l) otopljenih soli, uglavnom natrijevog klorida, dok prosječna količina soli u Jadranskom moru iznosi 38,3 g/l, što je više od prosjeka u ostalim morskim vodama [21]. Osim klorida, propadanje betona može biti uzrokovano kemijskom korozijom induciranom ionima magnezija Mg^{2+}, sulfatnim ionima i kiselinama koje su također prisutne u Jadranskom moru.

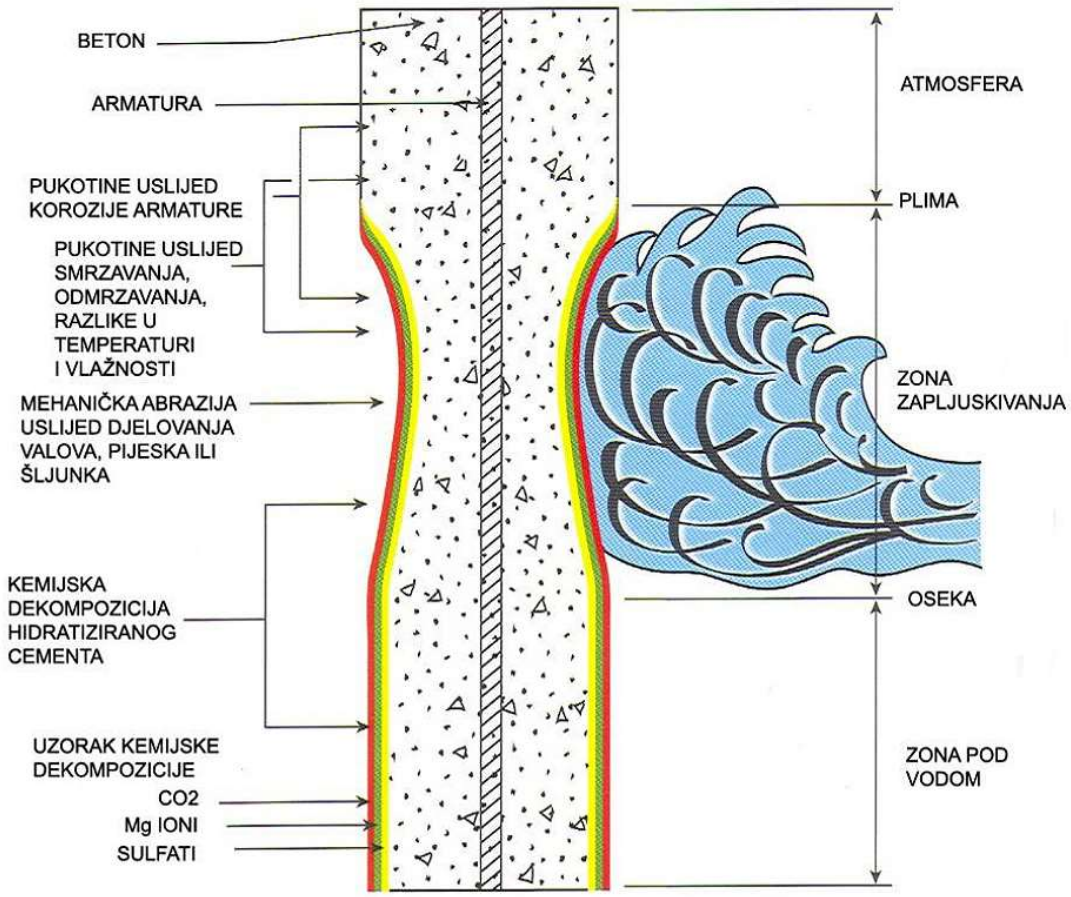
Otopljeni ioni	SO_4^{2-}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^{+}	K^{+}
Koncentracija (g/l)	2,97	1,42	0,46	21,25	0,39

Tablica 4.1 Prosječna količina soli u Jadranskom moru [21]



Slika 4.1 Visinske zone utjecaja mora na konstrukcije [22]

Osim kemijskih mehanizama degradacije, građevine u morskom okolišu su izložene i nizu fizikalnih i bioloških mehanizama degradacije kao što su izmjene ciklusa vlaženja i sušenja, promjene temperature, erozije, te djelovanju mikroorganizama koji se razvijaju unutar strukture betona. S obzirom na složenost mehanizama djelovanja morskog okoliša promatramo ih zajedno uzimajući u obzir njihovu međusobnu ovisnost i sinergiju. Na slici 4.2 prikazani su osnovni fizikalno-kemijski procesi degradacije koji nastupaju prilikom dužeg izlaganja konstrukcije morskoj vodi.



Slika 4.2 Utjecaj morske vode na armiranobetonsku konstrukciju [21]

4.2.1. Fizikalni mehanizmi degradacije

Fizikalna djelovanja obuhvaćaju četiri osnovna mehanizma degradacije betona [21]:

- erozija
- kavitacija
- kristalizacija soli
- ciklusi smrzavanja i odmrzavanja

U mediteranskim klimama javljaju se svi navedeni mehanizmi degradacije osim smrzavanja i odmrzavanja.

Soli iz mora (Na_2SO_4, Na_2CO_3, NaCl) tijekom ciklusa vlaženja i sušenja betona prodiru sve dublje u pore betona, te prilikom kristalizacije povećavaju volumen i tako stvaraju dodatne tlakove u cementnoj matrici betona. Ako naprezanje koje je nastalo kristalizacijom soli u porama postane veće od vlačne čvrstoće betona tada može doći do nastanka pukotina unutar strukture betona. [21]

Djelovanjem valova dolazi do degradacije betona erozijom i kavitacijom. Ovakve vrste degradacija rjeđe su u toplim morima poput Jadranskoga, a češće u nemirnim vodama i hladnim morima gdje je tijekom godine prisutan i led koji, nošen valovima, abrazijom oštećuje površinu betona.

Kod ove vrste degradacije najizloženija zona je zona zapljuskivanja, gdje je prisutna morska voda nošena valovima i vjetrom te dovoljna količina zraka čime se soli iz morske vode kristaliziraju te uzrokuju vlačna naprezanja u betonu, koje uzrokuju površinske pukotine kao i povećanje površinske propusnosti betona.

4.2.2. Biološki mehanizmi degradacije

Najčešći mehanizam degradacije površine betona u morima je djelovanje mekušaca, školjkaša i ljuskara, koji se nastanjuju na samoj površini betona te ga s vremenom erodiraju. Gljivice i lišajevi zahtijevaju manje vlage pa se mogu naći na površini betona u zonama izloženima ciklusima vlaženja i sušenja. Alge, kojima je za život nužna vlaga, se češće nalaze u dijelovima betonskih konstrukcija koji su stalno uronjeni u more. Svi spomenuti organizmi za svoja staništa koriste sva postojeća udubljenja u betonu, od otvorenih pora do neravnina na površini ili mehaničkih oštećenja. Tijekom vremena takvi organizmi buše beton i na taj način stvaraju tunele koji oslabljuju strukturu betona. Različitim provedenim biološkim analizama betona koji su izloženi morskom okolišu, bilo da su potpuno uronjeni ili se samo nalaze uz obalni pojas, u Jadranskom moru pronađeno je mnogo školjkaša (Rocellaria dubia, Hiatella rugosta, Irus irus i urchin Paracentrotus lividus - ježinci), spužvi (Cliona vastifica i Cliona vermifera) i algi [21].

Najizloženija zona kod ovih mehanizama degradacije je zona ispod razine mora, gdje je stalno prisutna morska voda, a beton je potpuno saturiran. Prethodno spomenuti organizmi u svom metabolizmu koriste sastojke hidratacije, razrahljuju beton, te kroz njega buše sitne kanaliće do dubine od 2 cm čime se povećava površinska propusnost betona.

4.2.3. Kemijski mehanizmi degradacije

Kod ove vrste degradacije dolazi do korozija i izluživanja sastojaka hidratacije. Najizloženija zona je zona plime i oseke, gdje je prisutna manja količina klorida, a znatnija količina sulfata. Posljedice ovakve degradacije su površinske pukotine, te povećanje površinske propusnosti betona čime se otvara put unutarnjoj koroziji čelika. Prema tome, razlikuju se dvije vrste korozije koje smanjuju funkcionalnost konstrukcija, a to su korozija betona i korozija armature u betonu.

4.2.3.1. Korozija betona

Degradacija betona uslijed djelovanja morske vode nastaje zbog kemijske razgradnje i luženja sastojaka hidratiziranog cementa, ekspanzije i pojave pukotina, te ljuštenja i pucanja betona.

Ugljični dioksid (CO_2), koji se nalazi u manjim količinama u morskoj vodi, zajedno sa solima magnezija, koje su uvijek prisutne u morskoj vodi, mogu sa sastojcima hidratacije iz betona ući u kemijske reakcije koje štetno djeluju na beton [22]. U normalnim okolnostima beton je zaštićen aragonitom [5]($CaCO_3$) koji je jedan od najstabilnijih minerala betona u morskoj vodi. Takva vrsta prirodne zaštite betona nije moguća u zoni zapljuskivanja jer valovi uklanjaju aragonit čim se stvori u betonu [22].

Karbonatizacija je kemijski proces pri kojem ugljični-dioksid CO_2 iz zraka reagira s kalcij hidroksidom $Ca(OH)_2$ iz površinskog sloja betona, pri čemu nastaju slabo topljivi kalcij karbonat [22]. Proces karbonatizacije na beton djeluje pozitivno, produkti karbonatizacije zapunjavaju strukturu betona i povećavaju nepropusnost, ali djeluje negativno na armaturu u armiranom betonu, jer se uslijed karbonatizacije snizuje pH vrijednost porne vode u betonu čime se povećava rizik od korozije.

Kada su prisutne veće koncentracije CO_2 (npr. bočata voda), aragonit prelazi u kalcijev bikarbonat koji se izlužuje iz betona, ostavljajući porozniju strukturu betona smanjene čvrstoće [22]. Količina CO_2 koja je uobičajeno prisutna u morskoj vodi, dovoljna je za otapanje sastojaka hidratacije u propusnom betonu.

Koncentracija magnezijevog sulfata u morskoj vodi (oko 2000 mg/l) i više je nego dovoljna za sulfatnu koroziju betona. Reakcijom sulfatnih iona s ionima hidratizirane cementne matrice

[5] Aragonit - karbonatni mineral, jedan od kristalnih oblika vapnenca (drugi oblici su kalcit i vaterit). Kemijskog je sastava $CaCO_3$.

(kalcijevog aluminata) nastaje gips ili etringit. Nastali kristali etringita povećavaju volumen koji uzrokuje tlakove unutar cemente matrice tj. između paste i agregata, što kasnije uzrokuje pojavu pukotina u betonu ili gubitak veze između cementnog kamena i agregata. Prisutnost klorida iz morske vode ograničava ekspanzivno stvaranje etringita. [21]

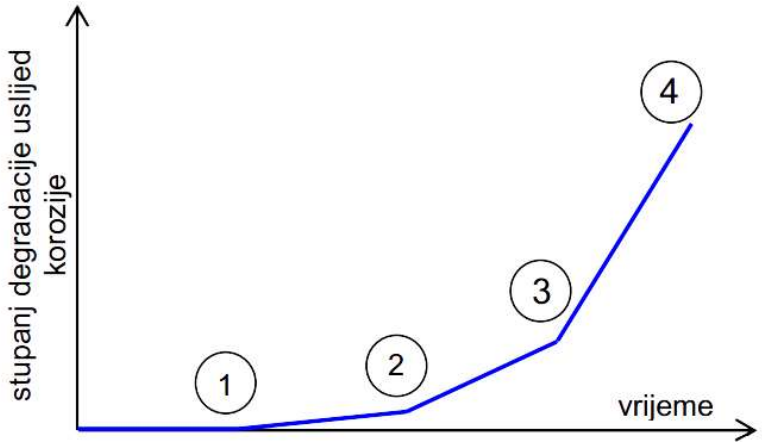
4.2.3.2. Korozija armature u armiranom betonu

Korozija armature u armiranom betonu je uzročnik brojnih otkazivanja nosivih armiranobetonskih konstrukcija, te zato i predstavlja jedan od značajnijih čimbenika pri proračunu novih i održavanju postojećih građevina.

Korozijski ciklus se može objasniti i kao elektrokemijski proces kojim se metal koji je u visoko energetskom stanju, dobiven iz rude uz upotrebu energije, vraća u niže stabilnije energetsko stanje reagirajući s okolinom i oslobađajući energiju, pri čemu nastaje korozijski produkt (hrđa na čeliku) koji je sličan početnoj rudi iz koje je dobiven [22].

Glavni uzročnik korozije armature su ioni klora iz porne vode u betonu i iz okoline, koji pak mogu mijenjati koncentraciju klora u pornoj vodi. Koroziji uzrokovanoj kloridima najviše su izložene armiranobetonske konstrukcije u morskom okolišu.

Ukupna količina klorida u betonu sastoji se od vezanih i slobodnih iona klora u pornoj vodi i betonu, čiji zbroj čini ukupan sadržaj klorida, a može se izraziti na masu cementa u betonu ili na ukupnu masu betona. U procesu korozije sudjeluju samo slobodni ioni klora otopljeni u pornoj vodi. Korozija uzrokovana ionima klorida može se podijeliti u četiri osnovna stupnja, kao što je prikazano na slici 4.3. [22]



Slika 4.3 Stupnjevi degradacije armiranobetonske konstrukcije uslijed korozije [22]

1. Razaranje pasivnog sloja armature uz koroziju čelika i smanjenje površine presjeka armaturnih šipki,

2. Raspucavanje betona uz otvaranje puta jačem procesu korozije,

3. Ljuštenje betona uz otvaranje puta masovnom procesu korozije i

4. Slom konstrukcije.

Ako u betonu ima ili naknadno prodru kloridni ioni, onda zavisno od molarnog omjera [Cl^-]/[OH^-], može doći do razaranja sloja pasivne zaštite, čak i ako je pH vrijednost veća od 11,5. Ako je molarni omjer [Cl-]/[OH-] veći od 0,6, čelik više nije zaštićen od korozije, jer zaštitni sloj postaje nestabilan i propustan za kloridne ione. To stanje odgovara približno ukupnoj količini od 0,4% iona klora na količinu cementa, što je prema mnogim propisima maksimalna količina, dopustiva u armiranom betonu. [23]

Općenito se smatra da kloridni ioni koji su prodrli do armature kemijski reagiraju i nastaje željezni klorid ($FeCl_3$), koji s vodom prelazi u željezni hidroksid (hrđu), slobodni vodik i ponovno kloridni ion koji djeluje kao katalizator u korozijskoj reakciji. Tako nastaje galvanski članak s lokalno ograničenom anodom i velikom katodom pa ne nastaje površinska korozija armature, nego koncentrirano otapanje željeza, koje brzo napreduje u dubinu i progrizava čelik kao igličasta korozija (engl. pitting). Kloridni ioni smanjuju pH porne otopine u betonu, čime se uništava pasivni film čelika. Rezultirajući produkti korozije stvaraju kiselu otopinu s kloridnim ionima koja neutralizira alkalitet betona [23].

Brzina korozije čelika u betonu zavisi od uvjeta okoline. Važni uvjeti okoline su relativna vlažnost i temperatura. Brzina korozije armature u betonu može se procijeniti iz sljedećeg izraza [23]:

$$r = c_T \cdot r_0 \qquad c_T - temperaturni\ koeficijent$$

$$r_0 - brzina\ korozije\ na\ 20^oC, \mu m/godinu$$

Relativna vlažnost zraka (%)	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	99
r_0 (µm/godinu)	9	14	19	27	36	47	61	78	98	122	134

Tablica 4.2 Brzina korozije, r_o, armature pri 20°C u betonu kontaminiranom kloridima određene iz eksperimentalnih podataka [23]

Primarni čimbenici koji djeluju na brzinu korozije armature u betonu na +20 °C su relativna vlažnost zraka (odnosno ravnotežna mokrina betona) i sadržina kloridnih iona. Drugi čimbenici kao vodocementni omjer i tip cementa mogu također utjecati.

Poznato je, da se brzina korozije s vremenom postepeno smanjuje. Zbog utjecaja uvjeta okoline ovisnost brzine korozije o vremenu nije linearna. Međutim, o tome postoji malo podataka, pa se u proračunima uzima konstantna brzina korozije [23].

Dvije su glavne posljedice korozije armaturnog čelika na betonsku konstrukciju. Prva posljedica procesa korozije armature je da smanjenje poprečnog presjek armature, a time i nosivost armature. Druga posljedica je da produkti korozije zauzimaju i do šest puta veći volumen nego čelik, što uzrokuje vlačna naprezanja u betonu. Ako su vlačna naprezanja u betonu veća od njegove vlačne čvrstoće, rezultat je pucanje betona i ljuštenje zaštitnog sloja što otvara put još jačem procesu korozije [22].

4.3. Zahtjevi za beton u morskom okolišu

Postupci proračuna stabilnosti, nosivosti i deformacija konstrukcija dobro su definirani i matematički određeni na principima tehničke mehanike u propisima, normama i raznim preporukama za projektiranje armiranobetonskih i prednapetih konstrukcija. Trajnost konstrukcija se još uvijek propisuje iskustvenim pravilima za materijale i tehnologiju, što uključuje propisana marka betona, minimalna količina cementa, vodocementni omjer, aeriranje i vrijeme njegovanja betona.

Prema **Tehničkom propisu za betonske konstrukcije** (*TPBK*, 2006.) [24], koji je aktivan od srpnja 2006., a oslanja se na europske norme, zahtjevi za beton u pogledu trajnosti su postali bitno stroži. Konvencionalni pristup je proširen s novim klasama izloženosti, uz posebne zahtjeve na trajnost u specijalnim uvjetima izloženosti, minimalnu debljinu zaštitnog sloja betona, minimalni sadržaj pora, te vodocementni omjer (max *v/c*). Tehnička svojstva betona i materijal od kojih se beton proizvodi moraju osim prema *TPBK* moraju biti specificirana i prema normi iz niza HRN EN 1504, te normama specifikacijama za materijale [22]. Svojstva svježeg betona specificira izvođač betonskih radova, ili su prema potrebi specificirana u projektu betonske konstrukcije. Svojstva očvrsnulog betona specificiraju se u projektu betonske konstrukcije.

Trajnost betona direktno ovisi o njegovoj sposobnosti sprečavanja prodiranja supstanci koje uzrokuju degradaciju betona, kao što su:

- voda – povećava volumen prilikom smrzavanja/odmrzavanja, prenosi ione klorida koji uzrokuju koroziju, reagira s kalcij-dioksidom iz cementa pri čemu nastaje kalcij-karbonat koji smanjuje pH vrijednost betona
- kloridi – glavni uzročnici korozije

- kisik – potpomaže koroziju čelika
- sulfati – reagiraju s aluminatnim sastojcima.

Projektirati trajni beton znači projektirati beton koji će imati malu propusnost i mali koeficijent difuzije klorida. Mala propusnost betona postiže se odgovarajućom kombinacijom sniženog vodocementnog omjera, njegovanja betona i korištenja sastojaka koji zamjenjuju cement, poput silikatne prašine [22].

4.3.1. Agregat

Agregat nema velikog utjecaja na koroziju armature u betonu, osim ako je izrazito porozan i/ili sadrži veću količinu klorida. Najvažnije je posvetiti pažnju na veličinu zrna agregata u zaštitnom sloju betona jer je poroznost cementne paste u okolini zrna agregata veća od poroznosti u ostatku cementne paste. Najnepovoljniji primjer je u slučaju kada je veličina zrna agregata približno jednaka debljini zaštitnog betonskog sloja, te je time i prodor klorida kroz beton do armature olakšan. Prema normi HRN EN 12620, tip agregata, granulometriju i razrede obzirom na specificirana svojstva bira se uzimajući u obzir [22]:

- izvedbu radova i krajnju uporabu betona
- uvjete okoliša kojima će beton biti izložen
- sve uvjete za izloženi agregat ili agregat za završnu obradu betona

Sadržaj klorida izraženih kao kloridni ioni (Cl^-), ispitan prema normi HRN EN 1744-1 ne smije biti veći od slijedećih vrijednosti [22]:

Maksimalni sadržaj kloridnih iona (%)	**Namjena**
0,15	Nearmirani beton
0,06	Armirani beton
0,03	Prednapeti beton

Tablica 4.3 Sadržaj kloridnih iona ispitan prema HRN EN 1744-1 [22]

4.3.2. Vodocementni omjer

Poroznost betona i koeficijent difuzije direktno ovise o vodocementnom omjeru. Smanjenjem vodocementnog omjera smanjuje se i poroznost betona, što uzrokuje sporiji prodor klorida i bolju korozijsku pasivnost armature u betonu [22]. Glavni opisi razreda izloženosti se nalaze u tablici 4.4, a preporučene vrijednosti maksimalnih vodocementnih omjera za određene razrede okoliša prikazani su u tablici 4.5.

Razred izloženosti	*Opis okoliša*	*Primjer moguće pojave razreda izloženosti*
1. Nema rizika od oštećenja		
X0	Bez rizika djelovanja	Elementi bez armature u neagresivnom okolišu (npr. Nearmirani temelji koji nisu izloženi smrzavanju i odmrzavanju, nearmirani unutarnji elementi)
2. Korozija armature uzrokovana karbonitizacijom		
XC1	Suho ili trajno vlažno	Elementi u prostorijama obične vlažnosti zraka (uključujući kuhinje, kupaonice, praonice rublja u stambenim zgradama); elementi stalno uronjeni u vodu
XC2	Vlažno, rijetko suho	Dijelovi spremnika za vodu; dijelovi temelja
XC3	Umjerena vlažnost	Dijelovi do kojih vanjski zrak ima stalni ili povremeni pristup (npr. Zgrade otvorenih oblika); prostorije s atmosferom visoke vlažnosti (npr. Javne kuhinje, kupališta, praonice, vlažni prostori zatvorenih bazena za kupanje,…)
XC4	Cikličko vlažno i suho	Vanjski betonski elementi izravno izloženi kiši; elementi u području vlaženja vodom (slatkovodna jezera i/ili rijeke,…
3. Korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora		
XD1	Suho ili trajno vlažno	Područja prskanja vode s prometnih površina; privatne garaže
XD2	Vlažno, rijetko suho	Bazeni za plivanje i kupališta sa slanom vodom; elementi izloženi industrijskim vodama koji sadrže kloride
XD3	Cikličko vlažno i suho	Elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje; parkirališne ploče bez zaštitnog sloja
4. Korozija armature uzrokovana kloridima iz mora		
XS1	Izloženi soli iz zraka, ali ne u direktnom dodiru s morskom vodom	Vanjski elementi u blizini obale
XS2	Uronjeno u more	Stalno uronjeni elementi u lukama
XS3	U zonama plime i prskanja vode	Zidovi lukobrana i molova
XF1	Umjereno zasićeno vodom bez sredstava za odleđivanje	Vanjski elementi
XF2	Umjereno zasićeno vodom sa sredstvom za odleđivanje ili morska voda	Područja prskanja vode s prometnih površina, sa sredstvom za odleđivanje (ali drukčije od onog kod XF4); područje prskanja morskom vodom
XF3	Jako zasićeno vodom bez sredstava za odleđivanje	Otvoreni spremnici za vodu; elementi u području kvašenja vodom (slatkovodna jezera i/ili rijeke)
XF4	Jako zasićeno vodom sa sredstvom za odleđivanje ili morska voda	Prometne površine tretirane sredstvima za odleđivanje; pretežno vodoravni elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje; parkirališne ploče bez zaštitnog sloja); elementi u području morske plime; mjesta na kojima može doći do struganja u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije
XA1	Slabo kemijski agresivan okoliš	Spremnici u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije; spremnici tekućih umjetnih gnojiva
XA2	Umjereno kem. agresivan okoliš; konstrukcije u marinama	Betonski elementi u dodiru s morskom vodom; elementi u agresivnom tlu
XA3	Jako kemijski agresivan okoliš	Kemijski agresivne vode u postrojenjima za tretiranje otpadnih voda; spremnici za silažu i korita (žlijebovi) za hranjenje životinja; rashladni tornjevi s dimnjacima za odvođenje dimnih plinova
XM1	Umjereno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu vozila s pneumatskim gumama na kotačima
XM2	Znatno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu viljuškara s pneumatskim ili tvrdim gumama na kotačima
XM3	Ekstremno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu viljuškara s pneumatskim gumama ili čeličnim kotačima; hidrauličke konstrukcije u vrtložnim (uzburkanim) vodama (npr. Bazeni za destilaciju); površine izložene prometu gusjeničara

Tablica 4.4 Razredi izloženosti [20]

Razred izloženosti	**Max *v/c* omjer**	**Min razred čvrstoće**	**Min količina cementa (kg/m3)**	**Min količina zraka (%)**	**Drugi zahtjevi**
Nema rizika korozije					
X0	-	C20/25	-	-	-
Korozija armature uzrokovana karbonatizacijom					
XC1	0,65	C25/30	260	-	-
XC2	0,60	C30/37	280	-	
XC3	0,55	C30/37	280	-	
XC4	0,50	C30/37	300	-	
Korozija armature uzrokovana kloridima iz mora					
XS1	0,50	C30/37	300	-	-
XS2	0,45	C35/45	320	-	
XS3	0,45	C35/45	340	-	
Korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora					
XD1	0,55	C30/37	300	-	-
XD2	0,55	C30/37	300	-	
XD3	0,45	C35/45	320	-	
Smrzavanje i odmrzavanje					
XF1	0,55	C30/37	300	-	Agregat s dovoljnom otpornošću na smrzavanje
XF2	0,55	C25/30	300	4.0[a]	
XF3	0,50	C30/37	320	4.0[a]	
XF4	0,45	C30/37	340	4.0[a]	
Kemijski agresivan okoliš					
XA1	0,55	C30/37	300	-	Sulfatno otporni cement[b]
XA2	0,50	C30/37	320	-	
XA3	0,45	C35/45	360	-	
Beton izložen habanju					
XM1	-	C30/37	-	-	Manje maksimalno zrno agregata
XM2	-	C30/37	-	-	
XM3	-	C35/45	-	-	
[a] Kada beton nije aeriran, ponašanje betona treba ispitivati prema prikladnoj metodi u usporedbi s betonom kojemu je otpornost na smrzavanje za relevantni razred izloženosti dokazana.					
[b] Kada SO_4^2 vodi ka razredu izloženosti XA2 i XA3 ispravno je koristiti sulfatno-otporni cement. Kada je cement razredovan prema sulfatnoj otpornosti, umjereno ili visoko sulfatno otporni cement treba rabiti u razredu izloženosti XA2 (i u razredu izloženosti XA1 kad je primjenljiv), a visoko sulfatno otporni cement treba rabiti u razredu izloženosti XA3.					

Tablica 4.5 Preporučene vrijednosti sastava i svojstava betona prema razredima izloženosti [22]

4.3.3. Cement

Za inicijaciju i napredovanje korozije armature utjecajan faktor je količina i sastav porne vode u betonu. Upravo su zato za korozijski proces jako bitni oni sastavi betona koji određuju pH vrijednost porne vode, ukupnu poroznost i veličinu pora. Prilikom hidratacije cementa kalcijev silikat reagira s vodom te nastaje kalcij hidroksid $Ca(OH)_2$ koji je jedan od glavnih uzročnika visoke alkalnosti porne vode. Iz toga proizlazi, što je veća prisutnost alkalija ($CaOH_2$, NaOH i

KOH) u cementu, veća je i pasivnost armature u betonu, odnosno manja je vjerojatnost pojave korozije [22].

Izbor cementa, u mnogim primjenama, naročito u nepovoljnim uvjetima okoliša ima utjecaj na trajnost betona, morta ili injekcijske mase, npr. otpornost na smrzavanje, kemijsku otpornost i zaštitu armature.

Ovisno o razredu okoliša u kojem se konstrukcija nalazi odabire se cement odgovarajuće vrste i razreda čvrstoće koja se može naći u tablici 4.5, ali ujedno prema tome razredu okoliša postoje i određena ograničenja tipa cementa koji se ne smije primjenjivati u betonu (tablica 4.6).

Razred izloženosti	**Tip cementa koji se NE primjenjuje u betonu**
XC2, XC3	CEM III/C
XD	CEM IV
XS	CEM V
Svi razredi okoline	CEM II/AiB-P/Q
	CEM II/AiB-M
Za elemente betonske konstrukcije izvedene prethodnim prednapinjanjem	CEM II/AiB-W
	CEM III
	CEM IV
	CEM V

Tablica 4.6 Ograničenja primjene cementa u betonu po razredima izloženosti (TPBK 2006) [22]

4.3.4. Postotak klorida u betonu

Porijeklo klorida u betonu može biti iz samih sastojaka betona (u agregatu ili vodi) te iz okoline, uslijed djelovanja mora ili soli za odmrzavanje. Ako je sadržaj kloridnih iona dostatan (veći od kritične koncentracije), može doći do razaranja pasivnog zaštitnog sloja i početka procesa korozije. [22]

Granična količina kloridnih iona potrebna za početak korozije zavisi od više čimbenika koji se ne mogu točno kvantificirati. Ta višestruka ovisnost onemogućava definiranje jedne granične vrijednosti.

Prema preporukama Američkog instituta za beton dozvoljena količina topljivih kloridnih iona u betonu je 0,15% na masu cementa. Većina drugih propisa, zbog nepouzdanosti podataka o vezanim i slobodnim (djelujućim) kloridima, kao dopustivu granicu kloridnih iona u betonu daju ukupne (vezane + topljive) kloridne ione između 0,4% i 0,6% na masu cementa. [23]

Mnogi građevinski propisi za betonske konstrukcije za praktične potrebe projektiranja uvjetuju, da količina kloridnih iona ne smije biti veća od 0,4% Cl^- na masu cementa armiranog betona, a 0,2% Cl^- za prednapeti beton. Početak korozije zavisi od omjera Cl^-/OH^-, tako da su veće

količine Cl^- prihvatljive pri većim pH vrijednostima. U miješanim cementima se obično povećava količina vezanih klorida, ali istovremeno je smanjena količina OH- iona, pa se djelovanje hidrauličnih dodatka ne može tumačiti jednoznačno. [23]

Uporaba betona	***Razred sadržaja klorida (a)***	***Najveći sadržaj Cl^- na masu cementa (b)***
Ne sadrži čeličnu armaturu ni drugi ugrađeni metal osim nehrđajućih vodilica	Cl 1,0	1,00%
Sadrži čeličnu armaturu ili drugi ugrađeni metal	Cl 0,2	0,20%
	Cl 0,4	0,40%
Sadrži čelik za prednapinjanje	Cl 0,1	0,10%
	Cl 0,2	0,20%
(a) u određenim uvjetima uporabe betona izbor razreda ovisi o odredbama važećim na mjestu uporabe betona.		
(b) pri rabljenju mineralnih dodataka tipa II koji su uključeni u proračun količine cementa, sadržaj klorida se izražava kao postotak klornih iona na masu cementa plus ukupna količina uračunatog mineralnog dodatka.		

Tablica 4.7 Najveći dozvoljeni sadržaj klorida u betonu [19]

Za debljine betona zaštitnog sloja armature propisane **Pravilnikom za beton i armirani beton** (*PBAB*) je teorijsko vrijeme potrebno da se dostigne granični postotak klorida od 0,4% vrlo kratko. Međutim, kako je vidljivi početak korozije obično tek nakon nekih 20-tak godina, vjerojatno je propisana granična količina kloridnih iona znatno na strani sigurnosti, a prema prijedlogu engleskog inženjera *P.B. Bamfortha*[6] rizik od korozije se definira probabilistički (tablica 4.8). [23]

Količina kloridnih iona (% na masu cementa)	***Rizik od početka korozije***
< 0.40	*Neznatna*
0.40 - 1.00	*Moguća*
1.00 - 2.00	*Vjerojatna*
> 2.00	*Sigurna*

Tablica 4.8 Rizik od korozije armature u betonu zavisno od količine kloridnih iona u području armature [23]

4.3.5. Zaštitni sloj za antikorozivnu zaštitu armature

Jedna od glavnih mjera zaštite od korozije armature, ali i povećanja trajnosti, je ostvarivanje kvalitetnog betona u zoni zaštitnog sloja, te projektiranje i izvedba dovoljne debljine zaštitnog sloja.

$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$ [25], gdje je:

[6] P.B. Bamforth – Chloride ingress into marine structures: the effects of location, materials, curing and formwork

c_{min} – je najmanja debljina zaštitnog sloja koja osigurava siguran prijenos sila prionjivošću, zaštitu čelika od korozije i propisanu zaštitu od požara.

Δc_{dev} – je dodatna vrijednost odstupanja koja ovisi o veličini, obliku i vrsti konstruktivnog elementa, vrsti konstrukcije, izvedbi i provedbi postupaka kontrole kvalitete.

Minimalna debljina zaštitnog sloja betona utvrđuje se u ovisnosti o uvjetu okoliša i razredu izloženosti te načinu armiranja elementa. Za istovremene utjecaje više razreda izloženosti mora se usvojiti zahtjev većeg zaštitnog sloja.

$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10mm)$ [25], gdje je:

$c_{min,b}$ – najmanji zaštitni sloj zbog prionljivosti

$c_{min,dur}$ – najmanji zaštitni sloj zbog uvjeta okoliša

$\Delta c_{dur,\gamma}$ – dodatni zaštitni sloj zbog sigurnosti

$\Delta c_{dur,st}$ – smanjenje zaštitnog sloja za nehrđajući čelik

$\Delta c_{dur,add}$ – smanjenje zaštitnog sloja zbog dodatne zaštite

Za osiguranje prijenosa sila c_{min} ne smije biti manji od promjera armature ili zaštitne cijevi natega (d_s), odnosno zamjenskog profila za grupiranu armaturu (snop) (d_{sv}) [25].

Za osiguranje trajnosti uzimajući u obzir razrede izloženosti i razrede konstrukcije, c_{min} ne smije biti manji od vrijednosti u tablici koje se prilagođavaju ovisno o projektiranom vijeku uporabe, razredu čvrstoće, o tome da li je u pitanju pločasti konstrukcijski element, te o tome da li je osigurana posebna kontrola kvalitete. Preporučeni razred konstrukcije za vijek uporabe od 50 godina je S4 [25].

Razred konstrukcije							
Kriterij	*Razred izloženosti*						
	X0	*XC1*	*XC2/XC3*	*XC4*	*XD1*	*XD2/XS1*	*XD2/XS2/XS3*
proračunski vijek 100 god	povećati razred za 2	povećati razred za 2	povećati razred za 2	povećati razred za 2	povećati razred za 2	povećati razred za 2	povećati razred za 2
razred čvrstoće	≥ C30/37 smanjiti razred za 1	≥ C30/37 smanjiti razred za 1	≥ C35/45 smanjiti razred za 1	≥ C40/50 smanjiti razred za 1	≥ C40/50 smanjiti razred za 1	≥ C40/50 smanjiti razred za 1	≥ C45/55 smanjiti razred za 1
pločasti elementi	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1

posebna kontrola kvalitete betona	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1	smanjiti razred za 1

Tablica 4.9 Određivanje razreda konstrukcije [25]

Najmanja debljina zaštitnog sloja iz uvjeta okoliša prema EN 1992-1-1: PREDNAPETA ARMATURA							
Razred konstrukcije	***Razredi izloženosti***						
	X0	***XC1***	***XC2/XC3***	***XC4***	***XD1***	***XD2/XS1***	***XD2/XS2/ XS3***
S1	*10*	*15*	*20*	*25*	*30*	*35*	*40*
S2	*10*	*15*	*25*	*30*	*35*	*40*	*45*
S3	*10*	*20*	*30*	*35*	*40*	*45*	*50*
S4	*10*	*25*	*35*	*40*	*45*	*50*	*55*
S5	*15*	*30*	*40*	*45*	*50*	*55*	*60*
S6	*20*	*35*	*45*	*50*	*55*	*60*	*65*

Tablica 4.10 Najmanji zaštitni sloj zbog uvjeta okoliša; ovisi o uvjetima okoliša i razredu konstrukcije [25]

4.3.6. Pukotine

Pukotine su bitan element trajnosti. Prema EC proračunavaju se u sklopu proračuna uporabljivosti, a proračun se svodi na provjeru graničnog stanja oštećenja po kriteriju da proračunska vrijednost širine pukotine w_k, dobivena iz proračuna konstrukcije u kojem su primijenjeni parcijalni koeficijenti sigurnosti za granično stanje uporabljivosti, mora biti manja ili jednaka od preporučene granične vrijednosti širine pukotine w_{max} prema EC. [22]

$$w_k \leq w_{max}$$

Razred izloženosti	***Armirani elementi i prednapeti elementi s neprianjajućim nategama w_{max} [mm]***	***Prednapeti elementi s prianjajućim nategama w_{max} [mm]***	
	Nazovi-stalna kombinacija opterećenja	***Česta kombinacija opterećenja***	
X0	*0.4*	*0.2*	
XC1			
XC2	*0.3*	*0.2 + kontrola rastlačenja pri nazovi-stalnoj kombinaciji djelovanja*	*kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku*
XC3			
XC4			
XD1		*kontrola rastlačenja*	
XD2			
XD3	*zahtijevaju se posebne mjere zaštite*		
XS1	*0.3*	*kontrola rastlačenja*	*kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku*
XS2			
XS3			

Tablica 4.11 Preporučene granične vrijednosti širine pukotina betona w_{max}[mm] za razrede izloženosti prema EN 1992 1-1 [22]

4.4. Mogućnosti zaštite od agresivnog morskog okoliša

4.4.1. Dodaci cementu

Duži niz godina razvija se inicijativa za smanjenjem štetnog utjecaja cementne industrije na okoliš i za stvaranjem održive i ekološki zadovoljavajuće industrije cementa, a time i tehnologije betona. Jedno od rješenja kako zaštititi okoliš je to da se dio cementa, potrebnog za proizvodnju betona, zamijeni nusproduktima dobivenim iz termoelektrana i metalurških industrija. To su produkti poput zgure, letećeg pepela ili silicijske prašine. Nedavna istraživanja pokazala su da betoni u čijem je sastavu dio cementa zamijenjen s materijalima poput silicijske prašine, zgure, letećeg pepela i sl. imaju manju propusnost od betona klasičnog sastava [22]. Kako gotovo sve korozije razaranja betona započnu kemijskom reakcijom agresivne tvari s vapnom, koje se oslobađa pri hidrataciji cementa, otporniji cementi su oni koji proizvode manje vapna hidratacijom. Željeni efekt se može postići i dodavanjem cementu gore spomenutih dodataka poput zgure ili pucolana.

Zaštita od razarajućeg korozivnog djelovanja agresivnih morskih soli može se dobiti tvorničkom obradom i dobivanjem cementa specijalnog za pomorske radove. To su posebni portland cementi s reguliranom izradom sa što manje slobodnih Ca i Al, te portland cementi s prethodno spomenutima dodacima (zgura, silicijska prašina, leteći pepeo). Posebno za nearmirane betonske konstrukcije mogu se koristiti sulfatno otporni portland cementi.

4.4.1.1. Silicijska prašina

Poznata pod različitim nazivima kao što su mikrosilika, silica fume (SF), condensed silica fume (CSF), silicijska prašina je sporedni proizvod koji nastaje pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura u elektrolučnim pećima, a sastoji se od nekristaliziranih sferičnih amorfnih čestica silicijevog dioksida (SiO_2).

Silicijska prašina utječe na svojstva betona s dva mehanizma: pucolanskim reakcijama i ulčinkom sitnih čestica. Pucolanskim reakcijama povećava se količina C-S-H[7] gela, a sitne čestice doprinose poboljšanju obradivosti i povećanju kohezivnosti te zapunjavaju unutrašnju strukturu, jer su znatno sitnije od čestica cementa. Silicijska prašina utječe na povećanje čvrstoće i smanjenje propusnosti betona. Povećana je i kohezija, te nema sklonost segregaciji i izdvajanju vode. [17]

[7] C-S-H – kalcijev silikat hidrat – glavni produkt hidratacije portland cementa, te je prvenstveno odgovoran za čvrstoću materijala na bazi cementa

Količina silicijske prašine se prilikom dodavanja mora dozirati i optimirati. Silicijev dioksid ulazi u vezu s kalcijevim hidroksidom što može znatno utjecati na smanjenje pH, te kako je kalcijev hidroksid bitan za bazičnost betona, prekomjerno vezivanje može imati negativan utjecaj. Preporučeno doziranje silicijske prašine je od 7 do 10 % na količinu cementa, a maksimalna količina je do 15% [17].

Radi specifične ploštine, silicijska prašina utječe na povećanje potrebe za vodom u betonu, te se preporučuje njeno korištenje s kemijskim dodatkom plastifikatorom ili superplastifikatorom. Prilikom korištenja s kemijskim dodatkom aerantom, potrebno je povećati količinu aeranta kako bi se dobila zahtijevana količina zračnih pora u odnosu na beton bez silicijske prašine. [17]

Silicijska prašina je od iznimne korisnosti u morskom agresivnom okolišu jer smanjuje propusnost betona na kloride radi svoje velike specifične ploštine čestica i fizičkog zapunjavanja pora gela i kapilarnih pora u strukturi betona.

Prema istraživanjima, ukupan efekt silicijske prašine se može prikazati kao što je dano u tablici 4.12. Zbog svih pozitivnih svojstava betona s dodatkom silicijske prašine ona je upotrebljavana i pri betoniranju za sada najviše građevine na svijetu, Burj Khalifa u Dubaiju [17].

Svojstva betona	***Povećanje***	***Smanjenje***	***Poboljšanje***
Tlačna čvrstoća	+		
Vlačna čvrstoća	+		
Tlačni modul elastičnosti	+		
Vlačni modul elastičnosti	+		
Žilavost	+		
Sadržaj pora	+		
Otpornost na zamrzavanje			+
Otpornost na habanje			+
Prionjivost armature i betona			+
Otpornost na kemijske utjecaje			+
Otpornost armature na koroziju			+
Skupljanje od sušenja		+	
Puzanje		+	
Propusnost		+	
Toplinski koeficijenti		+	
Toplinska provodljivost		+	
Izdvajanje vode		+	

Tablica 4.12 Utjecaj dodatka silicijske prašine na svojstva betona [17]

4.4.1.2. Leteći pepeo

Leteći pepeo (*engl. fly ash*) je fini prah ne izgorjelih staklastih dijelova ugljene prašine koji se dobivaju iz elektrofiltera npr. termoelektrana na ugljen, te se uglavnom sastoji od čestica

sferičnog oblika. Prema mineraloškom sastavu i svojstvima dijeli se prema postotku sadržaja kalcijevog oksida (CaO).

Leteći pepeo poboljšava svojstva betona na dva načina [17]:

- fizičkim efektom povezanim s povišenjem udjela finih čestica – čestice letećih pepela su manje nego čestice cementa (1 do 20 μm)
- pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama

Korištenjem letećeg pepela smanjuje se potreba za vodom u betonu i izdvajanje vode, poboljšava obradivost, smanjuje propusnost betona i usporava oslobađanje topline hidratacije što je veoma povoljno za korištenje kod masivnih betona. Prednosti su mala cijena i mala potrošnja jer nastaje kao sporedni proizvod, a kao glavni nedostaci su smanjena početna čvrstoća i produljenje vremena vezivanja betona što bi se moglo riješiti u kombinaciji s kemijskim dodacima, primjerice superplastifikatorima.

Smanjenje vodovezivnog omjera uporabom letećeg pepela u kombinaciji s kemijskim dodacima rezultira smanjenom povezanošću pora u strukturi betona i s tim u vezi i smanjenom propusnošću. Smanjena propusnost betona povećava trajnost betona i otpornost betona konstrukcije na različite agresivne utjecaje iz okoliša [17]. Prema tome s povećanjem udjela letećeg pepela u betonu, u za nas bitnom morskom okolišu, na taj način se smanjuje prodor klorida i smanjuje brzinu korozije.

Zahtjevi održivog razvoja doprinose sve većoj primjeni letećeg pepela betona u svijetu, od poznatijih primjera korišten je u betonskim elementima mosta *Sunshine Skyway* u zaljevu Tampa [17].

4.4.1.3. Granulirana zgura visokih peći

Granulirana zgura visokih peći je otpadni proizvod iz proizvodnje sirovog željeza, a sadrži uglavnom iste okside kao i portland cementni klinker samo u drugim omjerima. Upotreba zgure u proizvodnji cementa je poznata više od sto godina, a u novije vrijeme se zamjenjuju sa letećim pepelom velikog udjela kalcija unatoč sličnim svojstvima. Granulirana zgura s velikim udjelom kalcija može značajno doprinijeti čvrstoći najranije 7 dana od početka hidratacije. Čestice granulirane zgure koje su manje od 10 μm doprinose ranim čvrstoćama betona do starosti 28 dana, a čestice veličina od 10 do 45 μm doprinose kasnijim čvrstoćama. Sve čestice se usitnjavaju na maksimalnu veličinu od 45 μm jer čestice veće od toga teško hidratiziraju. Fine čestice manjih dimenzija smanjuju izdvajanje vode dok veće imaju manji utjecaj na izdvajanje.

Granulirana zgura u betonu [17]:

- poboljšava obradivost betona
- poboljšava pumpabilnost
- povećava čvrstoće
- smanjuje propusnost
- smanjuje toplinu hidratacije
- povećava otpornost na prodiranje klorida, djelovanje sulfata, djelovanje alkalnoagregatne reakcije, te iscvjetavanje
- produljuje trajnost
- poboljšava izgled površine
- smanjuje troškove održavanja i popravka
- produljuje životni vijek betonske konstrukcije
- povoljno utječe na čimbenike održivosti

Dugotrajna istraživanja provedena na laboratorijskim uzorcima i na stvarnim građevinama u morskom okolišu u starosti i preko 50 godina npr. u Nizozemskoj, potvrđuju pozitivan utjecaj dodatka granulirane zgure u betonu na trajnost konstrukcije [17].

4.4.1.4. Punilo

Punilo ili filer se dodaje betonu najčešće radi poboljšanja obradivosti te smanjenja segregacije i izdvajanja vode. Punilo je dio agregata koji prolazi kroz sito otvora 0,063 mm, a upotreba takvih finih čestica ubrzava hidrataciju cementa, povećava čvrstoću betona, poboljšava mikrostrukturu, povećava učinkovitosti silicijske prašine, te utječe na smanjenje količine cementa bez gubitka čvrstoće betona. Jedan od novijih istraživanja utjecaja miješanih punila (letećeg pepela i ostatka od spaljivanja biomase) bavi se određivanjem korozijske otpornosti armature iskazane mjerenjem gustoće korozijske struje iz koje je vidljiv veoma pozitivan utjecaj dodavanja ostatka do spaljivanja bio mase na svojstva betona [17].

4.4.2. Kemijski dodaci betonu

Aditivi ili kemijski dodaci su tvari koje se dodaju betonu radi poboljšanja nekih njegovih svojstava ili mijenjanja jednog ili više svojstava, radi postizanja željenih efekata. Tehnička svojstva kemijskih dodatka betonu moraju ispunjavati opće i posebne zahtjeve bitne za svojstva betona prema normama HRN EN 934 [22].

4.4.2.1. Aeranti

Aeranti se primarno upotrebljavaju kao dodaci za poboljšanje otpornosti betona na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja. Aeranti posebno poboljšavaju otpornost na zamrzavanja i odmrzavanje sa solima, te također poboljšavaju sulfatnu otpornost.

Kod svježeg betona uvlačenjem stabilnih mjehurića zraka povećava se količina paste u betonu. Time se poboljšava konzistencija i znatno smanjuje sklonost betona segregaciji. Beton s uvučenim zrakom naziva se aerirani beton.

Kod očvrsnulog betona što je manji vodocementni omjer i bolja zbijenost, bit će manja propusnost betona, a samim time i otpornost na agresivne tvari. U očvrsnulom betonu mjehurići uvučenog zraka prekidaju kapilare, čime se smanjuje visina kapilarnog dizanja vode. Ako na beton djeluje voda pod pritiskom, aeranti povećavaju njegovu vodonepropusnost.

4.4.2.2. Plastifikatori i superplastifikatori

Plastifikatori i superplastifikatori su kemijski dodaci koji omogućavaju smanjivanje potrebe za vodom uz zadržavanje iste konzistencije betona. Na taj se način zapravo smanjuje vodocementni omjer te se postižu i drugi učinci kao što su povećanje čvrstoće, smanjenje propusnosti i općenito poboljšanje trajnosti svojstava [17].

Plastifikator se definira kao aditiv koji omogućava smanjenje sadržaja vode u određenoj betonskoj mješavini, a da se ne promijeni njena obradivost, ili kao aditiv koji omogućava poboljšanje obradivosti, a da se ne mijenja sadržaj vode u dotičnoj betonskoj mješavini.

Superplastifikator ima mnogo jače djelovanje na žitkost paste nego plastifikator, te je nestabilnost paste s nedovoljnim sadržajem cementa odgovarajuće jače izražena, a ušteda cementa je još manje moguća. Superplastifikatori su pogodni za izradu betona koji iz određenih razloga mora imati visoki sadržaj veziva.

Svi superplastifikatori imaju jedan značajan nedostatak. Već oko 20 min nakon pripreme betona, njihovo djelovanje na svježi beton naglo slabi. To se manifestira kao veliki gubitak konzistencije betona. Međutim, istodobnim dodavanjem čistog usporivača vezanja, taj nepovoljan efekt može se samo neutralizirati, već i značajno smanjiti gubitak konzistencije u odnosu na etalon. Svi plastifikatori i superplastifikatori uvlače nešto zraka u beton, ali u pravilu ta količina nije značajna. [26]

4.4.2.3. Modifikatori viskoznosti

Za povećanje viskoznosti vode upotrebljavaju se polimeri topljivi u vodi velike molekularne težine. Takve tvari povećavaju kohezivnost svježeg betona i smanjuju sklonost segregaciji i izdvajanju vode. Po sastavu, dodaci za promjenu viskoznosti su polietilenski oksidi, celulozni eteri, alginati, prirodne gume i polivinilni alkohol. Mogu se upotrijebiti i fino usitnjene čvrste tvari kao što su glina, vapnenac, polimerne emulzije i dr. Čvrsti materijali smanjuju čvrstoću betona i primarno se upotrebljavaju kada čvrstoća nije od primarne važnosti međutim oni istovremeno utječu na reološko ponašanje betona te smanjuju autogene deformacije što je veoma pozitivno za kasniju pojavi prvih pukotina i smanjenje koeficijenta difuzije kloridnih iona u betona [17].

4.4.2.4. Inhibitori korozije

Inhibitori su dodaci kojima se smanjuje mogućnost nastanka korozije čelične armature. Ne sprječavaju u potpunosti korozijske reakcije već smanjuju stupanj korozije. Dijelimo ih na anodne, katodne i mješovite (migracijske) inhibitore.

Anodni inhibitori potiču formiranje zaštitnog pasivnog filma, a oni su uglavno, kalcijev nitrit, natrijev kromat, natrijev benzoat, kositrov klorid. Takvi inhibitori stvaraju na anodnim mjestima filmove oksida ili slabo topljivih soli te čine barijeru koja izolira temeljni metal.

Katodni inhibitori smanjuju brzinu korozije usporenjem katodne reakcije korozijskog procesa ili smanjenjem površine katodnih dijelova.

Miješani ili migracijski inhibitori imaju dvostruko djelovanje, anodno i katodno. Mehanizam djelovanja se zasniva na adsorbciji na metalnu površinu, tvoreći barijeru molekularnih dimenzija i time utječe na smanjenje brzine elektrodnih reakcija.

Brojna se istraživanja o učinkovitosti inhibitora korozije armature u betonu provode u istraživačkim centrima diljem svijeta i nema jednoznačnih zaključaka. Prema istraživanjima može se zaključiti da inhibitori odgađaju pojavu inicijacije korozije, a kad korozija započne učinkovitost inhibitora ovisi o njegovoj koncentraciji u betonu, kao i o koncentraciji klorida u betonu. [17]

4.4.2.5. Biocidni dodaci

Različiti baktericidni i fungicidni dodaci se koriste za sprječavanje djelovanja mikroorganizama, insekata, školjki i dr. Provedena su opsežna istraživanja djelovanja biocidnih dodataka na sprečavanje rasta algi u laboratorijskim uvjetima i na konstrukcijama kao dodaci mortu i kao dodaci premazima za beton bilo kao pojedinačni dodaci ili kao kombinacija dodataka.

Dodatak	***Primjena***
Cinkov oksid	U drugim područjima poznat kao biocidni materijal, no ne i u betonu. Pogodan za konstrukcije s vodom jer je teško topljiv u vodi
Leteći pepeo	Primjenjuje se kao mineralni dodatka, poboljšava svojstva sučeljka, smanjuju kapilarnu poroznost
Bakrena zgura	Poznat kao biocidni materijal, no ne i u betonu, kao dodatak u betonu povoljno djeluje na razvoj čvrstoće
Amonijev klorid	Općenito upotrebljavan u morskom okolišu
Natrijev bromid	Općenito upotrebljavan u premazima za brodove i marine
Cetil-trimetil amonijev bromid	Novi materijal na tržištu s obećavajućim antibiocidnim učincima

Tablica 4.13 Biocidni dodaci i njihove karakteristike [17]

4.4.2.6. Polimerni dodaci [17]

Polimeri se kao dodaci upotrebljavaju za izradu polimerom poboljšanih betona (PPB). Dodavanjem polimerne disperzije svježem betonu se poboljšava obradivost (kohezija, kut močenja na podlogu, zagladivost), a u očvrsnulom stanju prionjivost (adhezija) na podlogu, nepropusnost za fluide, istezljivost (smanjenjem modula elastičnosti i povećanjem koeficijenta puzanja), povećava se otpornost na udar, otpor ulasku agresivnih tvari i otpornost na djelovanje zamrzavanja i odmrzavanja i soli za odleđivanje. Najčešće se za izradu PPB-a kao polimerna disperzija upotrebljava lateks koji se proizvodi polimerizacijom monomera pri čemu se izdvaja voda. Prosječna veličina čestica varira od 0,05 do 2 μm. Kao modifikatori svojstava upotrebljavaju se stiren-butadijenski kopolimeri, akrilno-esterni homopolimeri i kopolimeri, vinil-acetatni kopolimeri i homopolimeri.

Miješanjem PPB-a započima i hidratacija cementa. Gubitkom vode koja se troši na hidrataciju cementa i evaporaciju, čestice polimera se u lateksu povezuju i lijepe na površinu cementnog gela. Lateks je najdjelotvorniji u kapilarama i porama pošto je većina čestica veća od 1 μm i ne mogu prodrijeti u najmanje pore cementnog gela.

Dodavanjem lateksa smanjuje se stupanj kretanja vlage blokiranjem putova, a nakon formiranja mikropukotina u cementnom kamenu, polimerni film premošćuje te pukotine i sprječava njihovo širenje. Time se povećava vlačna čvrstoća i žilavost betona.

Određene vrste lateksa mogu sadržavati reaktivne grupe koje reagiraju s kalcijem i drugim metalnim ionima u cementu i sa silikatima i drugim kemijskim radikalima na površini agregata, te takvim reakcijama treba poboljšati međuveze i povećati čvrstoću kompozita.

Ako PPB sadrži preveliku količinu lateksa, može se dogoditi da polimerna matrica uz površinu smjese formira vodonepropusnu koru koja može usporiti ili spriječiti stvaranje polimerne matrice u unutrašnjosti ili prouzročiti skupljanje i nastanak plastičnih pukotina prije nego što se razvije dovoljna vlačna čvrstoća cementnog kamena.

Vrše se različita nova istraživanja sa novim formulacijama polimera međutim njihova primjena se očekuje tek nakon potvrde tih istraživanja.

5. ISKORISTIVOST TEHNOLOGIJE U HRVATSKOJ

Iako se u Republici Hrvatskoj najviše ulaže u izgradnju konvencionalnih konstrukcija sa standardnim tehnologijama izgradnje, dolazi do polaganog napretka u izgradnji plutajućih betonskih konstrukcija. Glavni pokretač na Jadranu je razvoj turizma. Povećanjem broja ljudi se povećala i potražnja za iznajmljivanjem plovila, što je natjeralo brojne marine na njihovo proširenje. Također radi bolje povezanosti obale i otoka, odnedavno je započela upotreba hidroaviona kojima je bilo potrebno na brzi način osigurati privezište i prostor za iskrcaj putnika.

Kao najbolje rješenje za takve zahvate iskoristili su se pontoni. Plutajući pontoni su stabilni, prostrani i sigurni objekti, lako se transportiraju i instaliraju, imaju širok raspon nosivosti, dugotrajni su i ekološki prihvatljivi. Najzanimljiviji projekti su pontonske luke i marine, pontonska pristaništa za hidroavione, pontonski mostovi, te pontonske garaže.

Pontonske marine, poput prikazane na slikama 5.1 i 5.2, mogu služiti kao zaštita luka od valova i kao prometni objekti za prijevoz robe, ljudi i prometnih sredstava. Djelomično uronjene konstrukcije pružaju efikasan otpor valovima na površini, jer uspijevaju apsorbirati većinu energije, a da su pritom ostvareni ekološki uvjeti unutar bazena marine. Zatvaranjem prostora marine lukobranom (npr. nasip), stvara se bazen unutar kojeg može doći do onečišćenja, što bitno smanjuje atraktivnost turističkom potencijalu mjesta u kojem je smještena takva marina.



Slika 5.1 Primjer pontonske marine u Cresu koju je izvela tvrtka Marinetek NCP [27]



Slika 5.2 3D prikaz ACI Marine "Veljko Barbieri" Slano; izvođivač Marinetek NCP [27]

Dolaskom hidroaviona pojačala se povezanost obale s otocima i drugim gradovima. Međutim, pojavili su se i problemi oko vezova za te avione. Takav problem je posebno nastao u gradu Splitu gdje se premještalo pristanište sa Matejuške u gradsku luku. Najveći problem je što su gradske luke i marine iznimno projektirane za ulazak trajekta, jahti i jedrilica, te hidroavioni na neki način zauzimaju prostor plovilima. Zato je idealno korištenje pontonskih konstrukcija koje ne ovise o poziciji jer ih je moguće usidriti na traženoj lokaciji, a da su zadovoljeni uvjeti sigurnosti što se tiče vjetra i valova. Primjer takvog pristaništa se može vidjeti na slici 5.3.



Slika 5.3 Hidroavionsko pristanište u Divuljama na Hvaru [27]

Tvrtka *Marinetek Finland Oy* [27] iz Finske je sa neprekidnim proizvodnim razvojem, usavršavanjem procesa proizvodnje u modernim tvornicama i sa više od 30 godina iskustva u razvijanju marina i gradnji pontona, postala najveći europski proizvođač betonskih pontona i opreme za marine. Sjedište u Hrvatskoj se nalazi u Šibeniku, te su kao jedina „Marinetekova“ tvornica pontona na Sredozemlju, odradili mnoge velike poslove u Bugarskoj, Malti, Turskoj, Italiji, Španjolskoj, Crnoj Gori i, naravno, u Hrvatskoj.

Betonske pontone moguće je koristiti i za plutajuće mostove. Takva rješenja su trenutno veoma zanemarivana u Hrvatskoj. *Adriatic grupa* i *Lotus Architecti* [28] su 2012. godine imali zanimljiv prijedlog vezan za izvedbu pelješkog mosta (slika 5.4) kao plutajućeg mosta, međutim takav prijedlog je zasada odbijen.



Slika 5.4 Pelješki most "Marko Polo" [28]

Moguća alternativa klasičnim pontonskim mostovima su potopljeni plivajući mostovi zauzdani vanjskim vertikalnim i bočnim sidrima. Prednost takvog tipa mostova se realizira izbjegavanjem utjecaja valova i površinskog smrzavanja vode tijekom zimskog perioda. Navedene konstrukcije nužno je izvesti po principu ćelija. U slučaju oštećenja, prodor vode mora biti što prije ograničen i saniran. Kritična djelovanja na navedene konstrukcije predstavljaju morske struje, sudar sa podmornicom ili brodom. Slične idejne projekte za izvedbu ovakvih podmorskih tunela predstavili su inženjer Stanko Ferle kao rješenje poblema pelješkog mosta, te inženjer Boženko Jelić kao potencijalno rješenje za povezivanje jadranskih otoka.

Jedan od problema većih gradova kao što su Split, Šibenik i Zadar su parkirna mjesta. Povećanjem broja automobila i nedostatkom površina na kojima bi se mogle izvoditi garaže, poteže jednu veoma zanimljivu ideju plutajućih garaža. Dominantno zatvoreni prostor trupa pontona može se iskoristiti za dragocjeni prostor parkinga u urbanim sredinama ograničenim parkirnim prostorom u blizini gradskih jezgri. Drugi razlog iskorištenja šupljine pontona za

parkirališni prostor je što navedeni nema stroge zahtjeve uporabljivosti (progibe i vibracije), koji mogu biti kritični zbog dinamičkog utjecaja valova. Prednosti pontonskih građevina se upravo realiziraju učinkovitošću iskorištenja korisnog prostora. Primjer takvog rješenja [29] dan je na slici 5.5.



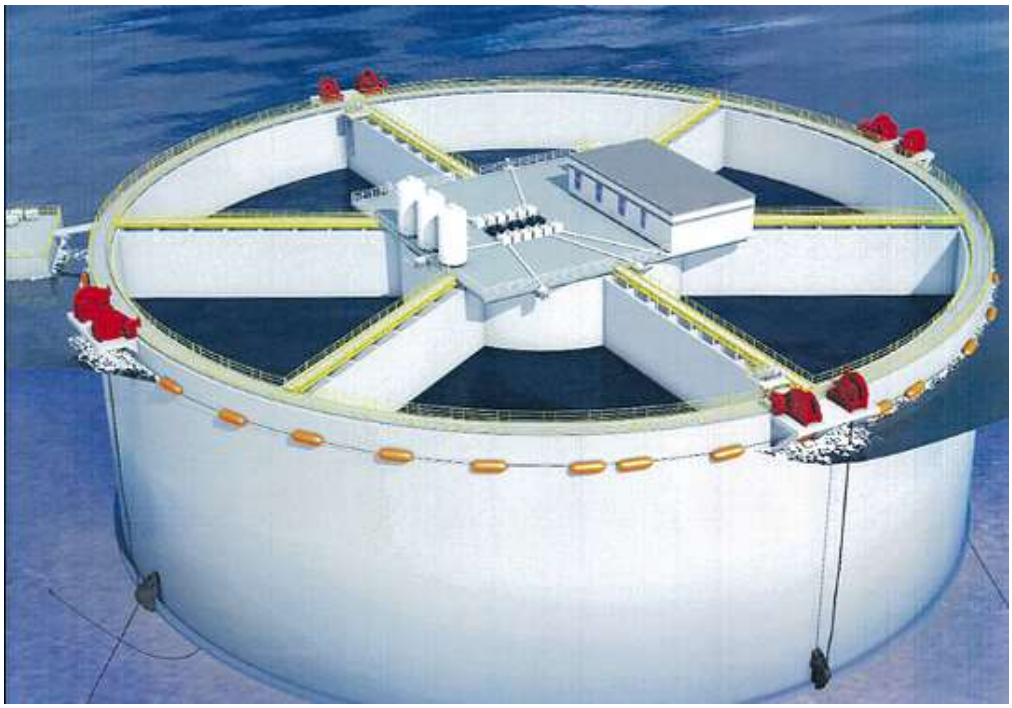
Slika 5.5 Primjer plutajućih garaža; idejni projekt norveške tvrtke FloatCon [29]

Osim već spomenutih zahvata proširenja marina i luka, povezivanja otoka međusobno ili sa kontinentom, te rješavanja pitanja parkirnih mjesta, ova tehnologija može biti rješenje za dovođenje neophodne električne energije i do najudaljenijih otoka. Koristeći polu-potopljene plutajuće vjetroelektrane izbjegava se dodatni trošak otkupljivanja zemljišta, posebno na mjestima gdje nisu ni vlasništva zakonski uređena, te se ulaže u obnovljive izvore energije. Vjetroelektrane se mogu projektirati samostalno za pojedini otok, npr. Vis, Lastovo ili veoma udaljenu Palagružu, ili kao farma vjetroelektrana za cijeli arhipelag. Prednosti izrade polu-potopljenih plutajućih vjetroelektrana uključuju mogućnost sidrenja na proizvoljnim lokacijama te transporta zbog veće iskoristivosti, remonta i sl.

Jedna od mogućih primjena plutajućih betonskih konstrukcija je u marikulturi. U Republici Hrvatskoj marikultura uključuje uzgoj bijele ribe, plave ribe i školjkaša. Prema statistici ministarstva poljoprivrede, uprava ribarstva, ukupna proizvodnja u marikulturi za 2015. godinu je iznosila 12.043 tone [30]. Kraljevina Norveška, prema statistici njihovog ministarstva ribarstva, je u istoj godini imala proizvodnju od otprilike 1.3 milijuna tone [31]. U Norveškoj se svake godine ulaže u istraživanje novih tehnologija i inovativnih rješenja kako povećati uzgoj ribe. Od 2010. godine se radi na razvijanju zatvorenih betonskih plutajućih kaveza [32]. Prvo takvo betonsko postrojenje (slika 5.6 i slika 5.7) je porinuto u more 1. veljače 2016. godine. To je veoma važan događaj za svjetsku akvakulturu, te bi Norveški princip uzgoja mogao doprinijeti razvoju marikulture u svijetu. Velika potražnja za ribom u prehrani, kvaliteta ribe u Jadranskom moru, te isplativost pomorskih objekata predstavljaju ogroman potencijal Republike Hrvatske koju bi trebala iskoristiti.



Slika 5.6 Zatvoreni betonski plutajući kavez za uzgoj ribe [32]



Slika 5.7 Idejni projekt kaveza [32]

Nažalost hrvatsko tržište još uvijek nije spremno za mega projekte tipa plutajuće garaže ili vjetroelektrane, jer kao u svemu poteže se pitanje ekonomske isplativosti tih projekata. Garaže u većim gradskim sredinama bi se čak i mogle ekonomski isplatiti, međutim, vjetroelektrane teže. Pitanje je isplativosti ulaganja velikih iznosa novca u izgradnju novih, kod nas neispitanih, tehnologija za manji broj stanovništva koji živi na našim otocima. Iako se ova tehnologija minimalno koristi u Hrvatskoj, ipak se koristi, te uvijek postoji prostora za unaprjeđenje i izvođenje ambicioznijih projekata od samo plutajućih pontona.

6. ZAKLJUČAK

Plutajuće betonske konstrukcije predstavljaju veliki izazov u projektiranju i izvedbi. Takve konstrukcije se nalaze u iznimno agresivnom morskom okolišu, te projektanti trebaju zadovoljiti potrebne zahtjeve velike strukturalne čvrstoće i trajnosti, te stabiliteta plutajuće konstrukcije. Odgovor na takve zahtjeve proizlazi iz kombiniranog znanja i iskustava dviju tehnologija, tehnologije betona i pomorske tehnologije, koje se unaprjeđuju godinama.

U morskom okolišu, gdje su betonske konstrukcije izložene različitim fizikalno-kemijskim utjecajima, dominantni utjecaji na trajnost betona, a ponajviše na veličinu oštećenja od korozije, imaju: starost konstrukcije, vlažnost betona, zona zapljuskivanja, visina nad morem, uronjenost betona, položaj konstrukcije prema dominantnim vjetrovima, debljina zaštitnog sloja armature, koncentracija kloridnih iona u površinskom sloju betona, te koncentracija kloridnih iona na razini armature.

Kada bi se plutajuće konstrukcije promatrale samo kroz proračune s najnepovoljnijim kombinacijama djelovanja moglo bi se iz nedostatka iskustva i neupućenosti u tehnologije izvedbe pomorskih konstrukcija zaključiti da je njihovo korištenje ekonomski neisplativo. Proračunavanjem različitih kombinacija dominantnih utjecaja u ekstremnim situacijama moguće je procijeniti njihovu zastupljenost i nastanak oštećenja konstrukcije tijekom vremena njenog korištenja. Prema tome, izvodljivost i prihvatljivost korištenja temelji se na optimalizaciji razmatranja najnepovoljnije kombinacije djelovanja koja bi mogla dovesti do smanjenja funkcionalnosti konstrukcije, te eventualnog urušavanja konstrukcije.

Dosadašnji projekti pa tako i mega projekti koji su tek u fazi projektiranja potvrđuju korisnost prednapetog betona u pomorskim konstrukcijama, kako u trajnosti tako i u pogledu ekonomske održivosti. Posebni naglasak je stavljen na naknadno prednapinjanje koje omogućuje izgradnju konstrukcija bilo kojeg oblika, te se može izvoditi u bilo kojem traženom smjeru. Naknadno prednapinjanje primjenjuje tlačno naprezanje na materijal, čime se poništava vlačno naprezanje kojemu bi beton mogao biti izložen pod opterećenjem. Sve se to realizira kroz veću nosivost elemenata konstrukcije, kvalitetnu izvedbu spojeva elemenata, masovnu proizvodnju predgotovljenih elemenata te standardizaciju i modularnu gradnju.

Velika prednost plutajućih betonskih konstrukcija je njihova mobilnost. Radi mogućnosti prebacivanja konstrukcije po potrebi s jedne na drugu lokaciju te neovisnost o dubini vodene površine, ovakve konstrukcije imaju širok spektar korištenja. Prednost pred stalnim

konstrukcijama na tlu je i u brzini izgradnje gdje se ne ovisi o konsolidaciji tla. Razvoju plutajućih betonskih konstrukcija je u početku najviše doprinijela naftna industrija, međutim, sve se više ulaže u tehnologije obnovljivih izvora energije koje je moguće iskoristiti na moru (solarna energija, termo energija, te energija vjetra i vala). Među brojnim projektima se nalaze projekti vezani za marikulturu, različiti projekti stambenog i zabavnog sadržaja, te mnogi projekti kojima se osnažuje prometna infrastruktura, kao što su plutajući mostovi, pontonske marine, helidromi i zračne luke.

Dodatnim ulaganjima u napredak tehnologije betona i u istraživanja iskoristivosti pomorskih betonskih konstrukcija omogućila bi se još svestranija upotreba prednapetih konstrukcija u pomorskom inženjerstvu koja već sada doživljava procvat, te inspirira brojne nove ideje i projekte.

7. LITERATURA

[1] VSL: *Floating Concrete Structures - Examples from Practice*, Second printing, VSL International LTD., Berne, 1992.

[2] Wang, C.M.; Wang, B.T.: *Large Floating Structures – Technological Advances*, Springer, Singapore, 2015.

[3] http://www.northstarak.com/valdez.htm

[4] http://airwaysnews.com/blog/2013/07/28/inside-the-worlds-highest-atc-tower-vancouver-yhc/

[5] https://www.pinterest.com/downesy/amazing-airports/

[6] http://www.waterstudio.nl/projects/54

[7] http://www.archdaily.com/792121/submerged-floating-tunnels-may-be-the-solution-to-crossing-norways-treacherous-fjords

[8] Karimirad, M.: *Offshore Energy Structures – For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms*, Springer, Switzerland, 2014.

[9] Mekjavić, I.: *Prednapeti beton – teorija i praksa*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2008.

[10] Gukov, I.: *Prednapeti beton – predavanja,* Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2007.

[11] http://www.tmgglobals.com/pc-strand-0

[12] http://www.bbr-adria.com/index.php?id=203

[13] Herak-Marović, V.: *Osnove prednapetih konstrukcija – Kolegij: Betonske konstrukcije 2*, Sveučilište u Splitu – Građevinski fakultet, Split, 2006.

[14] Radić, J.: *Separati s predavanja i vježbi: 10.2. Plutajuće strukture*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2016.

[15] http://www.seaflex.net/

[16] Carević, D.: *Pomorske građevine – Poglavlje 3: Luke nautičkog turizma (Marine)*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.

[17] Bjegović, D.; Štirmer N.: *Teorija i tehnologija betona*, Sveučilište u Zagrebu –Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.

[18] Ukrainczyk, V.: *Beton: struktura, svojstva, tehnologija*, Alcor, Zagreb, 1994.

[19] Stipanović Oslaković, I.: *Trajnost materijala*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zagreb, Prvi hrvatski forum o održivoj gradnji, Zagreb, 2007.

[20] Gukov, I.: *Betonske konstrukcije I - predavanja*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.

[21] Bjegović, D.; Serdar, M.; Baričević, A.; Jelčić Rukavina, M.: *Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 godina*, Građevinar 67 (2015) 12, 1155-1164, 2015.

[22] Pršić, M.; Bjegović D.; Serdar, M.: *Plovni putevi i luke – Poglavlje 2: Građenje u moru*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2009.

[23] Ukrainczyk, N.: *Predviđanje korozije armature u betonu pri maritimnim uvjetima pomoću živčevne mreže*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2004.

[24] *Tehnički propis za betonske konstrukcije*, NN br. 139/09 http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_11_139_3381.html

[25] Mandić, A.; Kindij, A.: *Prednapeti beton, predavanja objavljena na webu*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.

[26] Krstulović, P.: *Svojstva i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut Građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.

[27] http://www.marinetek.hr

[28] http://www.lotusarchitecti.com/Marko_Polo_Bridge.html

[29] http://www.floatcon.as/projects/floating-car-park-storage/

[30] http://www.mps.hr/ribarstvo/default.aspx?id=14

[31] http://www.fiskeridir.no/English/Aquaculture/Statistics/Total

[32] http://www.fishfarminginnovation.com/