

Utjecaj sastava betona na vrijednosti koeficijenta difuzije klorida

Načinović, Dalen

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:442515>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Dalen Načinović

**Utjecaj sastava betona na vrijednosti koeficijenta difuzije
klorida**

Završni rad

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Stručni prijediplomski studij
Građevinski materijali

Dalen Načinović
0114033023

Utjecaj sastava betona na vrijednosti koeficijenta difuzije
klorida

Završni rad

Rijeka, 2023.

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Dalen Načinović

U Rijeci, 07.09.2023.

ZAHVALNICA

Zahvaljujem tvrtki Holcim (Hrvatska) d.o.o na suradnji, savjetima, omogućavanju korištenja laboratorija i svih potrebnih resursa za izradu eksperimentalnog dijela završnog rada.

Dalen Načinović

U Rijeci, 07.09.2023.

Utjecaj sastava betona na vrijednosti koeficijenta difuzije klorida

Sažetak: Na armiranobetonskim konstrukcijama koje su izložene agresivnom okolišu obično nastaju oštećenja prilikom korodiranja armature izazvana kloridnim ionima. Najčešće oštećenja nastaju u obliku pukotina i napuknuća zaštitnog sloja betona prilikom bubrenja korozije, koja ima negativne utjecaje na trajnost a time posljedično i na nosivost same konstrukcije. Cilj ovog završnog rada bio je proučiti utjecaj sastava betona korištenjem mineralnih dodataka i cementa koji poboljšavaju trajnost betona određivanjem koeficijent difuzije klorida. U tu svrhu, provedeno je eksperimentalno istraživanje na vlastitim mješavinama betona visokih uporabnih svojstava, od čega se u jednoj mješavini umjesto miješanog portland cementa upotrijebio sulfatnootporni cement a u preostalim četiri mješavine dodani su različiti postotni udjeli silicijske prašine na istu količinu miješanog portland cementa. Na svježem betonu provedeno je ispitivanja konzistencije metodom slijeganja. Na očvrslom betonu provedeno je ispitivanje tlačne čvrstoće betona i otpornosti betona na prodor klorida. Rezultati ispitivanja su uspoređeni s rezultatima ispitivanja referentne betonske mješavine, spravljene sa miješanim portland cementom i bez silicijske prašine. Rezultati ispitivanja su analizirani te je na temelju njih izveden zaključak.

Ključne riječi: beton visokih uporabnih svojstava, koeficijent difuzije klorida, sulfatnootporni cement, silicijska prašina, konzistencija slijeganjem, tlačna čvrstoća

The influence of concrete composition on chloride diffusion coefficient value

Abstract: In reinforced concrete structures exposed to aggressive environments, damages usually occur due to corrosion of the reinforcement caused by chloride ions. The most common damages occur in the form of cracks and spalling of the protective concrete layer during corrosion-induced expansion, which negatively impacts the durability and consequently the load-bearing capacity of the structure. The aim of this thesis was to study the effect of the concrete composition prepared with mineral additives and cement which improve concrete durability on the chloride diffusion coefficient. For this purpose, an experimental study was conducted on own mixtures of high-performance concrete. In one mixture, sulfate-resistant cement was used instead of Portland composite cement, while in the remaining four mixtures, different percentages of silica fume were added to the same amount of Portland cement. Consistency tests were conducted on fresh concrete using the slump method. Compressive strength and chloride penetration resistance tests were performed on hardened concrete. The test results were compared with a reference concrete mixture prepared with Portland composite cement and without silica fume. The test results were analyzed, and a conclusion was drawn based on them.

Keywords: high-performance concrete, chloride diffusion coefficient, sulfate-resistant cement, silica fume, slump consistency, compressive strength.

Sadržaj:

1. UVOD.....	12
2. TRAJNOSNA SVOJSTVA BETONA.....	14
3. TRAJNOST BETONSKIH KONSTRUKCIJA U AGRESIVNOM OKOLIŠU.....	17
3.1. <i>Kemijske degradacije betonskih konstrukcija.....</i>	<i>20</i>
3.2. <i>Sulfatna korozija betona.....</i>	<i>22</i>
4. KOROZIJA ARMATURE U BETONU.....	24
5. TRANSPORT KLORIDA U BETON DIFUZIJOM.....	27
5.1. <i>Matematičke jednadžbe.....</i>	<i>28</i>
6. METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA PRODOR KLORIDA.....	30
6.1. <i>Metoda ispitivanja prema normi NT BUILD 492.....</i>	<i>30</i>
6.2. <i>Metoda ispitivanja prema normi ASTM C1202.....</i>	<i>31</i>
7. METODE ISPITIVANJA BETONA.....	32
7.1. <i>Ispitivanje svojstva svježeg betona – metoda slijeganja (HRN EN 12350-2).....</i>	<i>32</i>
7.2. <i>Ispitivanje tlačne čvrstoće (HRN EN 12390-3).....</i>	<i>33</i>
7.3. <i>Ispitivanje otpornosti betona na prodor klorida prema normama NT BUILD 492 i ASTM C1202... 35</i>	
8. IZRADA MJEŠAVINA BETONA.....	39
8.1. <i>Sastojci za proizvodnju betona.....</i>	<i>40</i>
8.1.2. <i>Sulfatnootporni cement.....</i>	<i>41</i>
8.1.3. <i>Silicijska prašina.....</i>	<i>42</i>
8.1.4. <i>Agregat.....</i>	<i>43</i>
8.1.5. <i>Ispitivanje geometrijskih svojstva agregata – Određivanje granulometrijskog sastava (HRN EN 933-1).....</i>	<i>43</i>
8.2. <i>Svježe betonske mješavine.....</i>	<i>47</i>
8.3. <i>Analiza rezultata ispitivanja betonskih mješavina.....</i>	<i>48</i>
9. USPOREDBA KOEFICIJENTA DIFUZIJE KLORIDA ispitano prema normama NT BUILD 492 i ASTM C1202.....	52
9.1. <i>Rezultati – NT BUILD 492.....</i>	<i>52</i>
9.2. <i>Rezultati – ASTM C1202.....</i>	<i>55</i>
10. ZAKLJUČAK.....	58
11. LITERATURA.....	59

Popis slika:

Slika 1: Korozija armature [3]	15
Slika 2: Otpornost na habanje [2].....	16
Slika 3: Utjecaj morske vode na armiranobetonski stup [2]	18
Slika 4: Betonski stupovi zahvaćeni korozijom – Kostrena, (izvor: vlastita fotografija)	19
Slika 5: Barijera na autocesti napadnuta alkalnom reakcijom [6].....	21
Slika 6: Proces korozije u betonu: a) produkt korozije, b) čelik za armiranje i c) beton [8].....	24
Slika 7: Karbonizacija u betonu: a) izložena površina, b) zona karbonizacije, c) rani stadij, d) napredovanje karbonizacije i e) hrđa [9]	25
Slika 8: Procesi raspadanja betona (s lijeva na desno): a) prije korozije, b) nakupljanje korozije, c)širenje korozije, površinske pukotine, d) otpadanje površinskog sloja betona, izložena korodirana armatura [10]	26
Slika 9: Transport klorida u beton za različita vremenska razdoblja [3]	27
Slika 10: Shematski prikaz ispitivanja uzorka - NT BUILD 492 , a) varijabilni izvor istosmjernog napona , b) rashladni rešetkasti paneli [4]	31
Slika 11: Shematski prikaz ispitivanja - ASTM C1202, a) izvor istosmjernog napona od 60V [4]	31
Slika 12: Postupak ispitivanja metodom slijeganja [15]	32
Slika 13: Oblik slijeganja betonske mješavine (s lijeva na desno): zadovoljavajući pravilan oblik slijeganja, nepravilan oblik slijeganja [16].....	33
Slika 14: Ispitani uzorak betonske kocke [19]	34
Slika 15: Uzrokovani uzorci u kalupima [20].....	35
Slika 16: Ispitni uzorci postavljeni u eksikator, (izvor: vlastita fotografija)	36
Slika 17: Podešavanje napona za odabir ispitivanja [12]	37
Slika 18: Prikaz mjerenja ispitnog uzorka [12].....	38
Slika 19: Izrada mješavina betona (u kalupu), (izvor: vlastita fotografija)	39
Slika 20: Prikaz komponenata betona (materijali) [21] , a) zrak, b) cement, c) voda, d) agregat, e) Beton je mješavina dvaju komponenata: agregata i paste. Pasta se sastoji od portland cementa i vode, koja se potom veže sa pijeskom i šljunkom.....	40
Slika 21: Silicijska prašina [22]	43

Dalen Načinović, Utjecaj sastava betona na vrijednosti koeficijenta difuzije klorida
Završni rad

Slika 22: Granulometrijska krivulja 0-4 mm (izvor: vlastiti prikaz).....	45
Slika 23: Granulometrijska krivulja 8-16 mm (izvor: vlastiti prikaz)	46
Slika 24: Kumulativna krivulja agregata 0-4 mm i 8-16 mm (izvor: vlastiti prikaz).....	46
Slika 25: Presjek cilindričnog uzorka za ispitivanje, (izvor: vlastita fotografija).....	50
Slika 26: Vidljiv prodor klorida u ispitne uzorke – srebrni nitrat (izvor: vlastita fotografija)	54
Slika 27: Slomljeni uzorci poprskani srebrnim nitratom (izvor: vlastita fotografija)..	55

Popis tablica:

<i>Tablica 1: Razredi izloženosti HRN EN 206 [4]</i>	<i>17</i>
<i>Tablica 2: Čvrstoća betona u različitim dobnim fazama [17]</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 3: Fizikalna svojstva sulfatnootpornog cementa korištenog za izradu vlastitih betonskih mješavina i usporedba s normom HRN EN 197-1 [4]</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 4: Minimalna masa agregata [23]</i>	<i>44</i>
<i>Tablica 5: Vrijednosti granulometrijske frakcije 0-4 mm (izvor: vlastiti prikaz)</i>	<i>45</i>
<i>Tablica 6: Vrijednosti granulometrijske frakcije 8-16 mm (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>45</i>
<i>Tablica 7: Komponente sastava mješavina za izradu betona (izvor: vlastiti prikaz)</i>	<i>48</i>
<i>Tablica 8: Rezultati ispitivanja betonske mješavine (izvor: vlastiti prikaz)</i>	<i>49</i>
<i>Tablica 9: Razredi slijeganja [24]</i>	<i>49</i>
<i>Tablica 10: Rezultati ispitivanja mješavine sa dodatkom 10% silicijske prašine, (izvor: vlastiti prikaz)</i>	<i>52</i>
<i>Tablica 11: Rezultati ispitivanja mješavine sa 10% dodatka silicijske prašine (izvor: vlastiti prikaz)</i>	<i>57</i>

ZAHVALA

Želim izraziti iskrenu zahvalnost svojoj mentorici, doc. dr. sc. Nataliji Bede Odorčić, na pomoći, strpljenju i uloženom vremenu pri izradi ovog završnog rada.

Isto tako želim izraziti zahvalnost tvrtki Holcim d.o.o. i njihovom Laboratoriju za beton i agregate pod vodstvom mag.ing.aedif. Marine Marinčić na stručnim savjetima i pristupačnosti. Zahvaljujem se i laborantima Damiru i Nevenu na asistiranju prilikom provođenja stručne prakse.

Želim se zahvaliti svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na neprestanoj podršci i razumijevanju tijekom studiranja. Hvala Vam što ste uvijek bili tu za mene.

1. UVOD

Određivanje koeficijenta difuzije klorida ima veliku važnost u proučavanju trajnosti betona u okruženjima s prisutnošću klorida, poput morske vode ili slanih okoliša. Kloridni ioni mogu prodrijeti u beton i uzrokovati koroziju armature, što može dovesti do oštećenja i smanjenja životnog vijeka konstrukcije.

Jedan od načina za određivanje koeficijenta difuzije klorida je nestacionarno ispitivanje migracije klorida. Nestacionarno ispitivanje migracije klorida uključuje izlaganje uzoraka betona različitim koncentracijama klorida na površini i praćenje prodiranja klorida u unutarnje dijelove uzoraka tijekom određenog vremenskog razdoblja. Na temelju podataka dobivenih ispitivanjem, može se izračunati koeficijent difuzije klorida, koji predstavlja brzinu kojom se kloridni ioni šire kroz beton, a na temelju brzine širenja klorida određuje se razred otpornosti betona.

Precizno određivanje koeficijenta difuzije klorida omogućuje bolje razumijevanje transporta klorida kroz beton i predstavlja važan faktor pri procjeni trajnosti betonskih konstrukcija. Ovi podaci mogu biti od koristi za projektante i inženjere u optimizaciji sastava mješavine betona i odabiru odgovarajućih zaštitnih mjera kako bi se produžio vijek trajanja betona te smanjili negativni učinci korozije.

U nastavku radu opisan je postupak određivanja koeficijenta difuzije klorida na temelju nestacionarnog ispitivanja migracije klorida kroz beton. Nadalje, analizirana je važnost ovog parametra u kontekstu trajnosti betona i njegove primjene u stvarnim inženjerskim projektima. Također, razmatran je faktor sastava betona koji utječe na koeficijent difuzije klorida i moguće metode za poboljšanje otpornosti betona na prodor klorida.

Stoga je cilj ovog završnog rada uz pomoć vlastitih eksperimenata istražiti na koji način sastav betonske mješavine spravljene s mineralnim dodacima i cementom, koji poboljšavaju trajnost betona, utječu na smanjenje koeficijenta difuzije klorida. U tu svrhu, pripremljeno je pet različitih mješavina betona visokih uporabnih svojstava, od

Dalen Načinović, Utjecaj sastava betona na vrijednosti koeficijenta difuzije klorida
Završni rad

čega se u jednoj mješavini umjesto miješanog portland cementa upotrijebio sulfatootporni cement, a u preostalim četiri mješavine dodani su različiti postotni udjeli silicijske prašine. Rezultati ispitivanja na svježem i očvrslom betonu uspoređeni su s rezultatima ispitivanja referentne betonske mješavine.

2. TRAJNOSNA SVOJSTVA BETONA

Beton je kompozitni materijal koji se stvara miješanjem vezivnog materijala (cement ili vapno) zajedno s agregatom (pijesak, šljunak, kamen, komadići opeke, itd.), vodom i aditivima u određenim omjerima. Nakon što se svi sastojci - cement, agregat i voda - pomiješaju u potrebnim omjerima, cement i voda započinju reakciju koja ih veže u stvrdnutu masu. Mehanička i trajnosna svojstva betona kao i sama kvaliteta betona ovise o omjerima miješanja ali i načinu njege betona.

Upotreba betona seže u doba Rimskog Carstva gdje je bio široko korišten građevinski materijal. U to vrijeme, beton je bio sastavljen od vulkanskog pepela, ili *pozzolane*, i komadića vulkanskog kamena. 1.400 godina kasnije, beton je ponovno otkriven. U sredini 19. stoljeća u Francuskoj, Ernest Ransome je popularizirao armirani beton; njegova metoda je uključivala zalijevanje betona preko željeznih (kasnije čeličnih) šipki radi poboljšanja njegove čvrstoće na rastezanje. Godine 1903., podignut je prvi neboder od betona, 16-katna zgrada koja je postala moguća zahvaljujući Ransomeovoj inovativnoj metodi s armiranjem šipkama. Mogućnosti korištenja betona također su procvjetale u Ohio-u, gdje je prva betonska cesta nadmašila široko korištene asfaltne ceste zbog povećane trajnosti. Thomas Edison je bio inspiriran dizajniranjem i stvaranjem betonskih kuća izlivenih na licu mjesta, koje je zamislio kao masovno proizvedene, s ciljem smanjenja vremena i resursa potrebnih za izgradnju. Iako se Edisonova vizija nikada nije ostvarila, nastavila je inspirirati druge da istražuju mogućnosti betona. Unity Temple Franka Lloyd Wrighta u Oak Parku, Illinois, koji se smatra prvom modernom zgradom na svijetu, izgrađen je od armiranog betona. Danas se beton i dalje istražuje i evoluira [1].

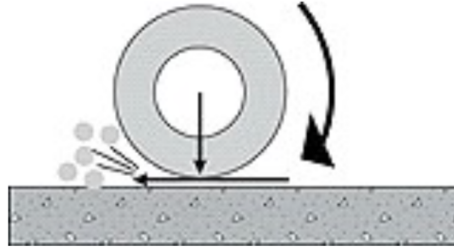
Trajnost betona može se definirati kao sposobnost betona da se odupre djelovanju vremenskih uvjeta, kemijskim napadima i abraziji, istovremeno zadržavajući željena inženjerska svojstva [2]. Različiti betoni zahtijevaju različite razine trajnosti ovisno o okolišu izloženosti i željenim svojstvima. Trajnosa svojstva betona podrazumijevaju sljedeća svojstva:

- a) Otpornost na vremenske uvjete: Beton treba imati dobru otpornost na promjene temperature, mraz, smrzavanje i otapanje. Treba biti u stanju održati svoje mehaničke i kemijske karakteristike unatoč izloženosti ekstremnim vremenskim uvjetima.
- b) Otpornost na kemijske napade: Beton treba biti otporan na štetne tvari kao što su kiseline, soli, ulja, otapala i druge kemikalije. Otpornost na kemijske napade osigurava dugotrajnost betonskih konstrukcija u industrijskim, komercijalnim i okolišima s visokom izloženošću kemikalijama.
- c) Otpornost na abraziju: Beton treba biti otporan na habanje i abraziju uzrokovanu mehaničkim opterećenjem, kao što su trenje, udarci ili habanje površine. Otpornost na abraziju osigurava da beton zadrži svoj strukturalni integritet i estetski izgled tijekom vremena.
- d) Otpornost na koroziju armature: Beton treba pružiti pouzdanu zaštitu za ugrađenu armaturu od korozije uzrokovane kloridima, sulfatima i drugim agresivnim tvarima. Otpornost na koroziju armature ključna je za produženje životnog vijeka betonskih konstrukcija i održavanje njihove strukturne sigurnosti (Slika 1).



Slika 1: Korozija armature [3]

- e) Vodonepropusnost: Beton treba biti vodonepropustan kako bi spriječio prodor vode, vlage i agresivnih tvari u unutrašnjost konstrukcije. Vodonepropusnost je važna za sprječavanje oštećenja betona, korozije armature i gubitka termičke izolacije.
- f) Otpornost na habanje: Površina betona treba imati dovoljnu tvrdoću i otpornost na habanje kako bi se izbjeglo oštećenje prilikom prometnog opterećenja ili drugih mehaničkih naprezanja (Slika 2).



Slika 2: Otpornost na habanje [2]

Sva trajnosna svojstva betona igraju ključnu ulogu u osiguravanju projektiranog životnog vijeka i pouzdanosti betonskih konstrukcija. Kako bi se produljio vijek trajanja betona i betonskih konstrukcija, potrebno je osigurati pravilan odabir materijala – uključujući visokokvalitetni cement (npr. sulfatno otporni cement), agregate za ojačanje, mineralne dodatke kao što su silicijska prašina, leteći pepeo i metakaolin. Jedan od najvažnijih čimbenika pri razmatranju propadanja trajnosti armiranog betona je napad klorida, posebno kod konstrukcija u morskim, prometnim i drugim okruženjima s prisutnošću klorida. Napad klorida dovodi do agresivne korozije čeličnog ojačanja, čak i u alkalnom betonu, što uzrokuje pucanje, oštećenje površine betona i u najgorem slučaju, strukturni slom.

Armaturno ojačanje se štiti od korozije zahvaljujući inherentno visoko alkalnom okolišu betona koji nastaje oslobađanjem kalcijevog hidroksida iz procesa hidratacije cementa. To rezultira stvaranjem pasivnog sloja željezovog oksida na ugrađenoj armaturi (čeliku). Sve dok ovaj površinski sloj postoji, armatura ostaje zaštićena od korozije. Međutim, kada su betonske konstrukcije ciklički izložene raspršivanju soli ili zapluskivanju slane vode, kloridni ioni prodiru kroz pore u beton, s vremenom dolaze do čelika, razgrađujući pasivni sloj oko armature i uzrokuju koroziju.

3. TRAJNOST BETONSKIH KONSTRUKCIJA U AGRESIVNOM OKOLIŠU

Trajnost konstrukcije je njezina sposobnost da uslijed očekivanog opterećenja iz okoliša tijekom uporabnog vijeka zadrži zahtijevanu razinu sigurnosti i uporabljivosti te odgovarajući izgled bez uvećanih troškova za održavanje i popravke [2].

Faktori koji utječu na samu trajnost konstrukcije mogu se podijeliti u tri faze: faza projektiranja, faza izvođenja (izvođenje i nadzor) i faza održavanja tijekom upotrebe. Prilikom projektiranja betona potrebno je voditi računa o razredu izloženosti okoliša u kojima se beton može nalaziti. Prema normi HRN EN 206 postoji šest razreda izloženosti (Tablica 1).

Tablica 1: Razredi izloženosti HRN EN 206 [4]

Oznaka razreda	Razred izloženosti
XO	Bez korozijskog djelovanja
XC1 - XC4	Korozija uzrokovana karbonatizacijom
XD1 - XD3	Korozija kloridima koji nisu iz morske vode
XS1 - XS3	Korozija kloridima iz morske vode
XF1 - XF4	Smrzavanje i odmrzavanja
XA1 - XA3	Kemijska korozija

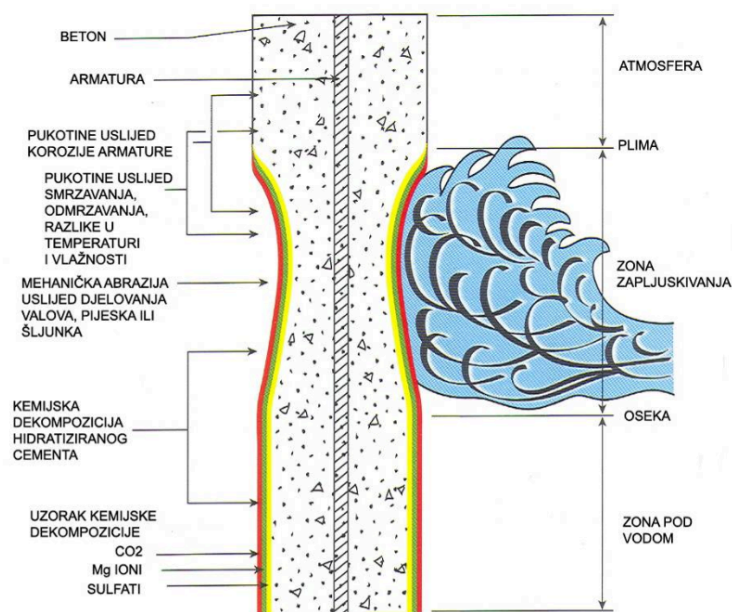
Prvi razred izloženosti je razred koji se odnosi na konstruktivne elemente bez opasnosti korozijskog djelovanja. U taj razred spadaju elementi bez armature u neagresivnom okolišu (npr. temelji koji nisu izloženi smrzavanju i odmrzavanju ili nearmirani temelji).

Kada je beton sa armaturom ili drugim ugrađenim metalom izložen zraku i vlazi, svrstava ga se u razrede izloženosti XC1 – XC4. Kalcijev hidroksid, koji se nalazi u cementnom kamenu, reagira s ugljičnim dioksidom iz zraka i tvori slabo topivi karbonat. Ovaj proces poznat je kao karbonatizacija betona. Karbonatizacija uzrokuje smanjenje alkalnosti betona, što smanjuje njegovu sposobnost zaštite ugrađene

armature od korozije. pH vrijednost betona se također smanjuje tijekom procesa karbonizacije, što dovodi do stvaranja lako topivog kalcijevog bikarbonata u prirodno vlažnom okruženju. Kasnije se kalcijev bikarbonat može opet vezati s vapnom u cementnom kamenu, što pomaže u punjenju pukotina i smanjenju poroznosti i propusnosti betona.

Kada je beton koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni metal u dodiru s vodom koja sadrži kloride i soli za odmrzavanje koje nisu iz mora svrstavaju se u razrede izloženosti XD1 – XD3. Obično su to područja izložena kloridima iz zraka, kolnici na kojima se nalaze soli za posipanje prometnica (zimski uvjeti) i industrijski otpadni materijali.

Jedna od najnepovoljnijih sredina u kojoj se beton može koristiti je morsko okruženje (XS1 – XS3). Unutar takvog okruženja beton je pod djelovanjem različitih fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa između klorida i vegetacije mora s mineralima cementa (Slika 3). Direktna posljedica takvih procesa je smanjena trajnost betonske konstrukcije. Takvi procesi mogu biti opasni jer mogu uzrokovati oštećenja u strukturi betona i koroziju armature, što dovodi do smanjenja trajnosti betonske konstrukcije.



Slika 3: Utjecaj morske vode na armiranobetonski stup [2]

Na Slici 4 dan je primjere korozije koja se pojavila u slučaju oslanjanje čeličnog platoa na betonske stupove u mokrom okruženju. Korozija je u ovom specifičnom slučaju nastala djelovanjem klorida iz morske vode na čelični plato te se proširila na armiranobetonski stup.



Slika 4: Betonski stupovi zahvaćeni korozijom – Kostrena, (izvor: vlastita fotografija)

Smrzavanje i odmrzavanje (XF1 – XF4) kao razred izloženosti odnosi se na uvjete u kojima je beton izložen cikličnom smrzavanju i odmrzavanju vode. Ovo stanje izloženosti je posebno važno u područjima s hladnom klimom gdje su prisutni periodični temperaturni ekstremi. Voda može prodrijeti u betonske konstrukcije kroz kapilarnu apsorpciju. Smrznuta voda ima 9% veći volumen od vode na sobnoj temperaturi. Kada se voda smrzne, stvara mikropukotine na površini betona. Topljenjem leda, otkriva se nastala šteta strukture betona. S ponovljenim ciklusima, oštećenje se širi.

Beton kada je izložen kemijskom djelovanju koji se javlja iz prirodnog tla i podzemne vode, svrstava se u razred izloženosti XA1 – XA3, koji se pak dijele na laganu, umjerenu i vrlo kemijski agresivnu okolinu. Kemijska korozija može biti posebno destruktivna jer se može događati brzo i uzrokovati značajna oštećenja materijala.

Shodno navedenom, kako bi se produljila trajnost betonske konstrukcije prilikom projektiranja sastava betona važno je posvetiti se razredima izloženosti betona.

3.1. Kemijske degradacije betonskih konstrukcija

Kemijske degradacije betonskih konstrukcija mogu se javiti iz različitih razloga. Betonske konstrukcije mogu se suočiti s kemijski agresivnim okruženjima koja uzrokuju njihovu degradaciju, poput karbonizacije, alkalne reakcije te sulfatne reakcije. Postoje i drugi čimbenici kao što su smrzavanje i odmrzavanje, prisutnost klorida i kemijski agresivni okoliš. Agresivnim kemijskim okolišem smatraju se tvari poput kiselina, lužina, soli i industrijskih otpadnih voda. Neki od primjera uključuju industrijska postrojenja, postrojenja za preradu otpada, postrojenja za proizvodnju kemikalija, bazene s kloriranim vodama.

Kako bi se minimizirala kemijska degradacija, važna je upotreba visokokvalitetnog betona s pravilnim omjerima sastojaka, kemijska zaštita poput primjene adekvatnog premaza ili impregnacije na površini betona, upotreba dodataka za beton kao što su aditivi koji pomažu pri smanjenju prodora vode i štetnih tvari kroz beton, također važno je i redovito održavanje i čišćenje betonskih površina kako bi se uklonile naslage kiselina, soli i drugih štetnih tvari koje mogu uzrokovati štetu.

Neki od glavnih čimbenika koji mogu uzrokovati kemijske degradacije uključuju [5]:

- Alkalnu reakciju koja se javlja između reaktivnih silikatnih minerala u agregatu i alkalnih spojeva u betonu. Takva reakcija uzrokuje formiranje proširenih gelova i pukotina u betonu što dovodi do smanjenja mehaničke otpornosti i trajnosti betonske strukture (Slika 5). Alkalna reakcija povezuje se s upotrebom

reaktivnih agregata koji sadrže silicij-dioksid ili druga reaktivna mineralna vlakna.



Slika 5: Barijera na autocesti napadnuta alkalnom reakcijom [6]

- Sulfatnu reakciju koja se javlja između sulfata prisutnih u tlu ili vodi i aluminata i silikata u betonu. Spomenuta reakcija dovodi do stvaranja sulfatne soli koja sadržava veći volumen od izvornih minerala što rezultira povećanjem tlaka unutar betona i pucanja strukture. Posebno može biti problematična u područjima s visokim udjelom sulfata u tlu ili vodi kao i u prisutnosti vlage.
- Kloride, soli koje se mogu naći u tlu, vodi ili dodavati kao aditivi u beton. Visoka koncentracija klorida može potaknuti koroziju armature unutar betona. U beton mogu prodrijeti putem kontaminirane vode, morske vode te kloridnih soli koje se koriste tijekom zimskih mjeseci kod održavanja ceste. Korozija armature može izazvati njeno pucanje i ljuštenje betona te time smanjiti nosivost konstrukcije.

Zaštita betonskih konstrukcija od kemijske degradacije prilagođava se o specifičnosti zahtjeva i uvjeta izloženosti betona. Svaka situacija zahtjeva temeljitu analizu koja obuhvaća vrstu kemikalija s kojima je u dodiru, mehanička opterećenja, temperaturne i vremenske uvjete kao i druge faktore. Neki od uobičajenih premaza koji se koriste za zaštitu betona su [7]:

- Epoksidni premazi su vrlo popularni zbog svoje iznimne kemijske otpornosti i adhezije na beton. Oni formiraju izdržljivu zaštitnu barijeru koja sprječava

- prodiranje vode, kemikalija i drugih štetnih tvari. Dodatno, epoksidni premazi mogu poboljšati mehaničku otpornost betona i olakšati održavanje površine.
- Poliuretanski premazi pružaju izvrsnu zaštitu betonskih površina. Otporni su na abraziju, kemikalije i UV zračenje. Elastičnost poliuretanskih premaza daje moć prilagodbe mehaničkim i termičkim promjenama, što efikasno pomaže u sprječavanju pucanja betonske površine.
 - Polimerni cementni premazi su kombinacija cementa i polimernih aditiva pomoću kojih se stvaraju izdržljive i kemijski otporne površine betona. Pružaju dobru zaštitu od abrazije, kemikalija i udara.
 - Silikatni premazi se primjenjuju kako bi ostvarili kemijsku vezu s površinom betona što rezultira poboljšanom otpornošću na prodiranje kemikalija i vode. Oni također pružaju otpornost na abraziju i UV zračenje, ali su manje fleksibilni od epoksidnih i poliuretanskih premaza.
 - Hidrofobni premazi poput premaza na bazi silikona ili silana, stvaraju hidrofobnu barijeru koja odbija vodu i sprječava prodor vlage u beton. Oni su učinkoviti u zaštiti od vode, ali su manje otporni na kemikalije u usporedbi s drugim premazima.

3.2. Sulfatna korozija betona

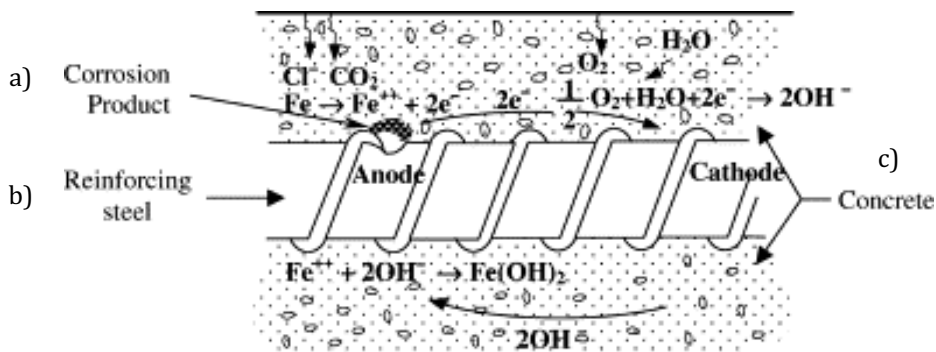
Sulfatna korozija betona je postupan proces korozije betona koji počinje od površinskog sloja betona do same jezgre. Nastaje kada sulfati iz okoline ulaze u pore betona. Sulfati mogu biti prisutni u tlu, otpadnim vodama, podzemnim vodama i drugim izvorima. Proces koji izaziva pucanje betona je sastav cementne paste, hidrati kalcijev aluminat jer nastaje kalcijev hidrat sulfat. Među brojnim korozivnim tvarima, sulfati su najrazornija korozivna tvar za beton. Dubina sulfatne korozije betona može se dobiti metodom ispitivanja tehnike ultrazvučnog ispitivanja. Takva metoda ispitivanja daje osnovu za analizu čvrstoće i predviđanje betonskih konstrukcija nakon sulfatne korozije. Postoji i kemijska analiza kojom u laboratoriju uzorkom betona možemo saznati postotak koncentracije sulfata u betonu koja pomaže u procjeni rizika od sulfatne korozije te kako bi se jednostavnije donijele odgovarajuće mjere zaštite betona [2].

Sulfatnu koroziju betona možemo prepoznati pojavom pukotina koje se mogu pojaviti na samoj površini ili dublje u strukturi betona. Također, beton može promijeniti boju stvaranjem bijelih ili sivih naslaga po površini betona, može nastati promjena teksture tako što će postati hrapav tj. grub. Sulfati mogu izazvati raslojavanje i oticanje betona poput pojave ispupčenja, ljuštenja ili odlamanja površinskog sloja. Ona može dovesti i do smanjenja čvrstoće i otpornosti betona. Beton postaje krhkiji te je manje otporan na vanjska opterećenja što najčešće dovodi do pucanja.

4. KOROZIJA ARMATURE U BETONU

Korozija armature uzrokovana pojavom kloridnih iona jedan je od bitnijih uzroka za smanjivanje vijeka trajanja armiranobetonskih konstrukcija izloženih u morsko-agresivnim sredinama ili sredinama izloženim solima za odmrzavanje. Armatura koja je zahvaćena procesom korozije postepeno smanjuje površinu poprečnog presjeka i istodobno nastaju produkti korozije čiji su volumeni nekoliko puta veći od volumena pasivne armature (Slika 6). Samim povećanjem volumena prouzrokuju se dodatna naprezanja u betonu koja mogu rezultirati pojavom pukotina te otpadanjem zaštitnog sloja betona. Oštećenje zaštitnog sloja betona dodatno ubrzava proces korodiranja.

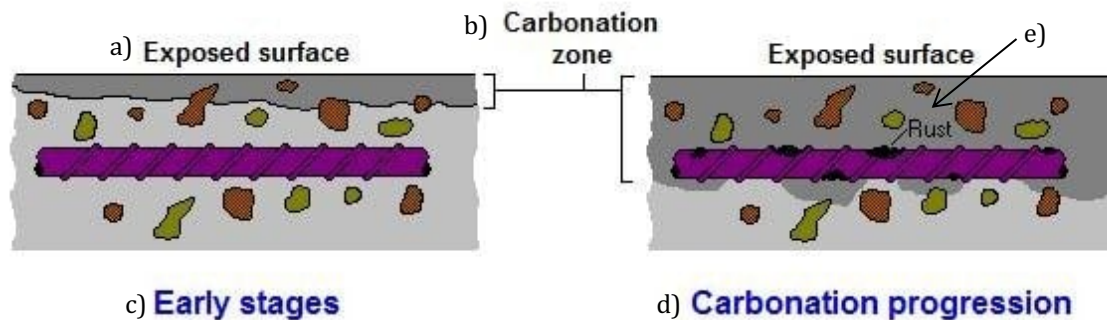
U novijim armiranobetonskim konstrukcijama armatura je u potpunosti zaštićena, pH porne vode je visok i postoji mala količina klorida u betonu ako nisu korišteni materijali zahvaćeni kloridima.



Slika 6: Proces korozije u betonu: a) produkt korozije, b) čelik za armiranje i c) beton [8]

Karbonizacija betona smanjuje pH vrijednost betona; smanjenje pH vrijednosti betona smanjuje pasivnost armature u betonu te se javlja korozija. Stoga, mjerenje niskog pH područja betona može ukazivati na dubinu karbonizacije (Slika 7). Dubina karbonizacije jedan je od najvažnijih parametara prilikom razmatranja oštećenja betona.

Često korištena metoda za mjerenje dubine karbonizacije je nanošenje spreja fenolftaleina (indikatora pH vrijednosti) na svježe polomljene dijelove betona. Sprej mijenja boju iz sive u tamno ružičastu ako pH vrijednost betona nije promijenjena (pH je oko 13). Nasuprot tome, boja betona se ne mijenja ako je pH područja smanjen na 8-9, što ukazuje na dubinu karbonizacije. Više faktora doprinosi dubini karbonizacije, uključujući koncentraciju CO₂ u okolišu, relativnu vlažnost zraka i vrstu cementa. CO₂ ulazi u beton nekoliko sati nakon lijevanja, a dubina njegove penetracije postupno se povećava. Može se zaključiti da karbonizacija u betonskim konstrukcijama ne nastaje izolirano; nametnuta ili nastala naprezanja, progresivne promjene u betonu i okolini, nehomogenost i aditivi značajno doprinose dubini karbonizacije.



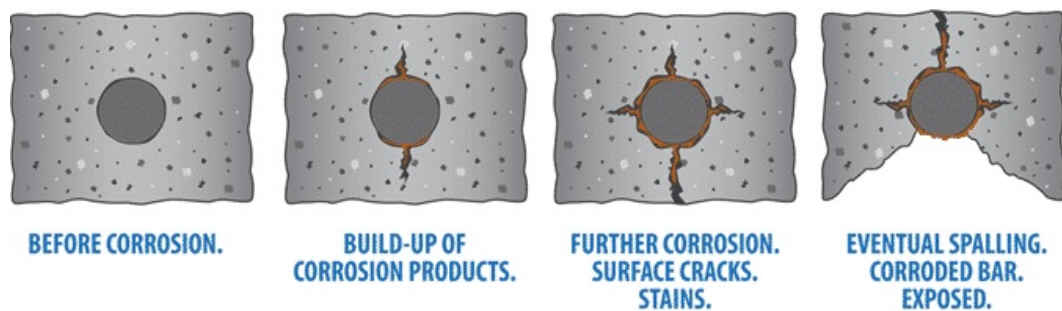
Slika 7: Karbonizacija u betonu: a) izložena površina, b) zona karbonizacije, c) rani stadij, d) napredovanje karbonizacije i e) hrđa [9]

Produkt korozije rezultira propadanjem i oštećenjem betonske i armirano betonske konstrukcije. Faze propadanja prema redoslijedu nastanka objašnjene su u nastavku te prikazane na Slici 8:

- a) Formiranje bijelih mrlja – kod betona koji je dovoljno propustan da omogući prolazak vode i CO₂ dolazi do procesa karbonizacije koji napreduje od površine prema unutrašnjosti betona. Ugljični dioksid reagira s kalcijevim hidroksidom u cementnoj pasti i stvara kalcijev karbonat. Slobodno kretanje vode nosi nestabilne kalcijeve karbonate prema površini betona i formira bijele mrlje. Bijele mrlje na površini betona ukazuju na pojavu karbonizacije.
- b) Tamne mrlje uzduž armature - kada armatura počne korodirati formira se sloj oksida na površini armature. Takav smeđi produkt koji nastaje uslijed korozije

i može se proširiti zajedno s vlagom do površine betona bez pucanja betona. Obično prati pucanje betona ili se pucanje betona se događa ubrzo nakon toga.

- c) Pojava pukotina – produkti korozije zauzimaju znatno veći volumen, otprilike od 6 do 10 puta, u odnosu na volumen nekorodiranog metala. Povećanjem volumena stvara se značajan pritisak na okolni beton, rezultirajući pucanjem. Tanke pukotine na površini betona koje se nalaze izravno iznad armature i paralelno s njom su jasan vidljivi znak da armatura korodira. Ove pukotine ukazuju da se rastuća hrđa dovoljno proširila da razbije beton. Čak i u ovoj fazi, armatura izgleda kao da je bez hrđe ako se beton odstrani.
- d) Odvajanje površinskog sloja betona – zbog gubitka veze između betona i čelika dolazi do stvaranja višestrukih slojeva ljuskica, što rezultira otpadanjem površinskog sloja betona. U ovoj fazi dolazi do značajnog smanjenja veličine šipke armature.

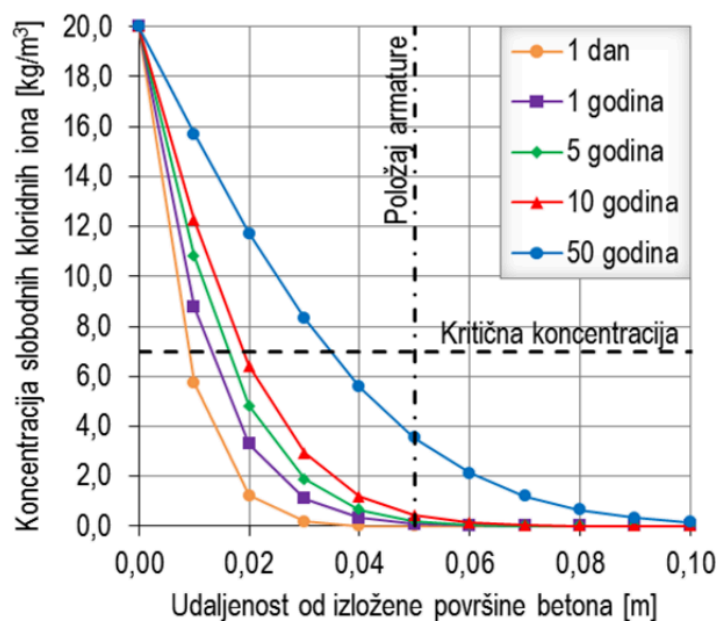


Slika 8: Proces raspadanja betona (s lijeva na desno): a) prije korozije, b) nakupljanje korozije, c) širenje korozije, površinske pukotine, d) otpadanje površinskog sloja betona, izložena korodirana armatura [10]

5. TRANSPORT KLORIDA U BETON DIFUZIJOM

Prodor kloridnih iona u beton može se desiti na više načina, međutim difuzija je najčešći oblik transporta klorida u beton. Kloridni ioni u konstrukciju prodiru apsorpcijom, migracijom, difuzijom i kretanjem zbog razlike u tlakovima. Prvotni sustav prodora klorida je apsorpcija, posebno kada je površina betona suha i upijanje slane vode se odvija poprilično ubrzano. Nakon toga dolazi do kapilarnog kretanja slane vode kroz pore te proces difuzije.

Kod elemenata koji su naizmjenice suhi i mokri, prodiranje kloridnih iona dešava se postepeno. Apsorpcijom morska voda ulazi u beton tijekom mokrog razdoblja, a tijekom suhog isparavanjem izlazi iz betona ostavljajući klorirane ione tijekom suhog razdoblja. Prodiranje kloriranih iona kod takvih elemenata bazira se na potiskivanju iona od površine (suho razdoblje) prema unutrašnjosti betona svakog puta kada stignu nove količine klorida (mokro razdoblje). Koncentracija soli koja će ulaziti i izlaziti iz betona ovisi o trajanju mokrih i suhih razdoblja. Direktna posljedica prodora klorida u beton do razine armature je proces korozije armature.



Slika 9: Transport klorida u beton za različita vremenska razdoblja [3]

Na Slici 9 prikazana je korelacija slobodnih iona i udaljenost od izložene površine betona za određene vremenske udaljenosti. Niti nakon 50 godina (projektirani uporabni vijek za građevine) koncentracije kloridnih iona nije dostigla kritičnu vrijednost. Nemamo oštećenje presjeka i zaštitni sloj betona je dovoljno velik, što znači da probleme sa oštećenjima armature ne bismo trebali imati još dugi niz godina. Međutim betonsku konstrukciju vrlo je teško predvidjeti zbog različitih razloga kao što su opterećenje, skupljanje i puzanje betona.

5.1. Matematičke jednadžbe

a) Prvi Fickov zakon difuzije

Adolf Fick 1855. godine definirao je zakone difuzije pomoću direktne poveznice s jednadžbom toplinske vodljivosti. Implementacija prvog Fickovog zakona za mehanizme kloridnih iona u betonu počela se koristiti tek 1970.-ih. Fickov prvi zakon difuzije (1) može se koristiti kao najosnovniji proračun za objašnjenje kloridnih iona kroz beton temelji se na pretpostavci da je koeficijent difuzije konstantan odnosno $D=D_0$.

Spomenuti zakon obrazlaže da transport kloridnih iona kroz određeno područje betona u jedinici vremena proporcionalan koncentracijskom gradijentu kloridnih iona izmjerenih u tom području. Difuzija kloridnih iona provodi se u suprotnom smjeru od porasta koncentracije kloridnih iona u betonu, stoga imamo negativni predznak u prvom Fickovom zakonu difuzije [11].

$$J(x) = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

gdje je:

$J(x)$ – difuzijski tok čestica, količina čestica koji prolazi kroz površinu u jedinici vremena

D – koeficijent difuzije, m^2/s

$\frac{\partial c}{\partial x}$ – gradijent koncentracije, (promjena koncentracije po jedinici udaljenosti)

Prvi Fickov zakon difuzije primjenjuje se kod konstantnog i jednosmjernog stacionarnog toka, što ipak nije slučaj kod betona. Kao kod tekućina definiramo tok (difuziju) $J(x)$ kao broj atoma koji prelaze u jedinici vremena kroz jediničnu površinu okomitu na smjer gibanja.

b) Drugi Fickov zakon difuzije

U nestacionarnim uvjetima prilikom prijenosa tvari, koncentracija u zadanoj točki mijenja se s vremenom uslijed promjene gustoće toka. Kako bi se riješio problem nestacionarne difuzije koristi se drugi Fickov zakon određen prema izrazu (2) [11] .

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \Delta C \quad (2)$$

gdje je:

C – koncentracija čestica u materijalu

t – vrijeme, s

D – koeficijent difuzije, m^2/s

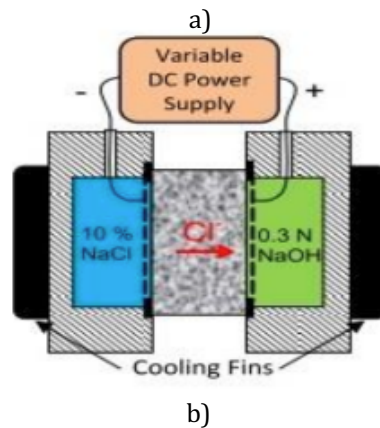
Navedeni zakon koristi se za prodor klorida kroz beton, uz pretpostavku da je D konstantna.

6. METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA PRODOR KLORIDA

Armirano betonske konstrukcije izložene su teškim okolišnim uvjetima, ali se često predviđa da će dugo vremena trajati s malo ili bez popravaka ili održavanja. Kako bi se to postiglo, potrebno je proizvesti trajnu strukturu betona. Kod armirano-betonskih mostova, jedan od glavnih oblika napada i smanjenja vijeka trajanja jesu prodiranje klorida, što dovodi do korozije armaturnog čelika, smanjenja čvrstoće i upotrebljivosti. Takve nepovoljne situacije dovode nas do ranog popravka ili prijevremenog zamjene konstrukcije. Najčešća metoda sprječavanja takvog propadanja je korištenje relativno nepropusnog betona. Prodiranje kloridnih iona u beton je spor proces, stoga se koriste metode ispitivanja koje ubrzavaju postupak određivanja difuzijskih vrijednosti u razumnom vremenu. Najčešće eksperimentalne korištene metode kod ispitivanja otpornosti betona na prodor kloridnih iona jesu dvije metode: NT BUILD 492 i ASTM C1202.

6.1. Metoda ispitivanja prema normi NT BUILD 492

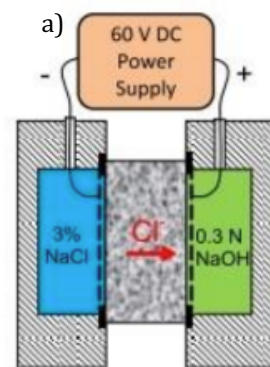
NT BUILD 492 (Nordic Test Method for Determination of Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments) također poznat kao – test brze migracije kloridnih iona (RMT), postupak je namijenjen određivanju koeficijentu migracije klorida u betonu, mortu ili materijalima za popravak na bazi cementa putem eksperimenata nestacionarne migracije [12]. Na uzorku se primjenjuje vanjski električni potencijal koji prisiljava kloridne ione izvana da migriraju u uzorak. Postupak ispitivanja provodi se pomoću dvaju spremnika. Negativno nabijena ćelija spaja se s 10% otopinom NaCl, dok se pozitivno nabijena ćelija spaja s 0,3 N otopinom NaOH (Slika 10). Vrijednostima izmjerene početne struje određuje se ispitni napon i trajanje ispitivanja. Po završetku ispitivanja, uzorak se cijepa u hidrauličnoj preši te se mjeri prodor kloridnih iona u uzorak.



Slika 10: Shematski prikaz ispitivanja uzorka - NT BUILD 492 , a) varijabilni izvor istosmjernog napona , b) rashladni rešetkasti paneli [4]

6.2. Metoda ispitivanja prema normi ASTM C1202

ASTM (American Society of Testing and Materials) test metoda, također je poznata kao brzi test propusnosti klorida (RCPT) [13]. Da bi se odredila propusnost betona za kloridne ione, mjeri se ukupni naboj koji prolazi kroz beton uslijed razlike potencijala. Ovaj postupak ispitivanja sastoji se od praćenja količine električne struje koja prolazi kroz uzorke debljine 50 mm, izrezane iz cilindra nominalnog promjera 100 mm, tijekom razdoblja od 6 sati. Potencijalna razlika od 60 V jednosmjerne struje održava se između krajeva ispitnog uzorka, pri čemu je jedan kraj uronjen u otopinu natrijevog klorida, a drugi u otopinu natrijevog hidroksida (Slika 11). Ukupni preneseni naboj, izražen u Coulonima [C], pokazao se povezanim s otpornošću uzoraka na prodor kloridnih iona. Pri završetku ispitivanja, uzorak se cijepa u hidrauličnoj preši te se mjeri prodor kloridnih iona.



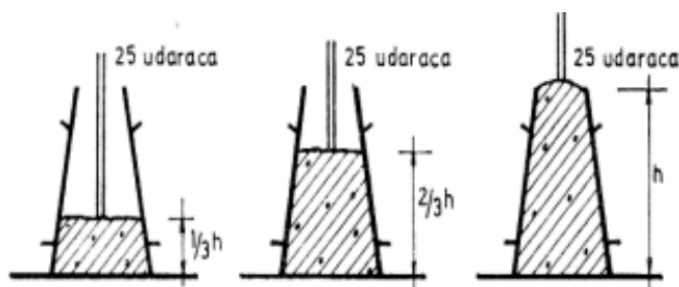
Slika 11: Shematski prikaz ispitivanja - ASTM C1202, a) izvor istosmjernog napona od 60V [4]

7. METODE ISPITIVANJA BETONA

Ispitivanje svježeg i očvrslog betona je potrebno kako bi se provjerilo da su postignuta željena svojstva betona. Ispitivanja su provedena prema važećim standardima u Hrvatskoj u Laboratoriju za beton i agregate tvrtke Holcim (Hrvatska) d.o.o a manji dio ispitivanja u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci.

7.1. Ispitivanje svojstva svježeg betona – metoda slijeganja (HRN EN 12350-2)

Kako bi se osigurala konstantna kvaliteta svježeg betona provodi se test ispitivanja konzistencije betona slijeganjem [14]. Ispitivanje konzistencije svježeg betona slijeganjem je najčešće korištena metoda za mjerenje konzistencije betona koja se može primijeniti kako u laboratoriju tako i na gradilištu. Prilikom ispitivanja metodom slijeganja svježja betonska smjesa postavlja se u specijalni kalup u obliku krnjeg stošca. Tijekom punjenja kalupa, važno je da kalup bude čvrsto pričvršćen na podlogu i da stoji na svojim papučicama kako bi se osiguralo stabilno postavljanje betona. Betonska smjesa se obično puni u kalup u tri jednaka sloja, pri čemu se svaki sloj puni s približno jednom trećinom ukupne visine kalupa. Svaki sloj treba biti pažljivo poravnati kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela betona. Nakon što se svaki sloj betona ispuni u kalup, vrši se postupak zbijanja betona kako bi se uklonile eventualne zračne džepove i osigurala bolja kompaktnost. Za zbijanje betona u kalupu koristi se čelična šipka koja se slobodno spušta na beton 25 puta uzastopno (Slika 12).



Slika 12: Postupak ispitivanja metodom slijeganja [15]

Ovaj postupak pomaže da se postigne bolja gustoća betona i osigura da betonska smjesa ispunjava kalup bez praznina ili šupljina. Važno je voditi računa o točnom broju

udara čeličnom šipkom kako bi se osigurala dosljednost i pouzdanost rezultata. Ovaj postupak se ponavlja za svaki sloj betona kako bi se osigurala cjelokupna kompaktnost cijelog elementa. Nakon zbijanja betona, kalup se izravna te se uklanja višak betona pri vrhu stošca. Potom podižemo konus i promatramo pad betona unutar kalupa. Visina pada betona pruža nam bitne vrijednosti o konzistenciji betonske smjese. Veća vrijednost ukazuje na veću obradivost, dok manja slump vrijednost sugerira manju pokretljivost betona. Također, važno je voditi računa i o obliku slegnutog uzorka svježeg betona (Slika 13).



Slika 13: Oblik slijeganja betonske mješavine (s lijeva na desno): zadovoljavajući pravilan oblik slijeganja, nepravilan oblik slijeganja [16]

7.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće (HRN EN 12390-3)

Tlačna čvrstoća je test koji pokazuje kvalitetu betona i njegovu izdržljivost u trenutku djelovanja opterećenja na sami beton. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona je jedno od najosnovnijih razornih ispitivanja očvrslog betona kako bi saznali podatke o veličini opterećenja koju beton može podnijeti. U svježem stanju, beton se postavlja u kalupe (dimenzija 150x150x150mm) napravljene od vodonepropusnih čeličnih materijala. Kalupi imaju precizne dimenzije s minimalnim odstupanjima. Prilikom ugradbe beton se zbija pomoću vibratora ili vibrostola, a nakon vibriranja gornja površina se zagladi. Nakon što je beton ugrađen u kalup, ostavlja se 24 sata pri relativnoj vlažnosti zraka od 95% i temperaturi od $20\pm 3^{\circ}\text{C}$. Kada beton dostigne zadovoljavajuću čvrstoću, vadi se iz kalupa i čuva se u vodenom bazenu pri temperaturi od $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ i optimalnoj vlažnosti prostoriji od 95% sve do dana ispitivanja.

Beton se na tlak obično ispituje u vremenskim intervalima prikazanim u Tablici 2. Nakon mjesec dana beton ima najveći porast tlačne čvrstoće, međutim taj porast nastavlja se i dalje iako s vremenom usporava. Beton koji je star godinu dana ima čak 30% veću tlačnu čvrstoću nego beton star 28 dana [17].

Tablica 2: Čvrstoća betona u različitim dobnim fazama [17]

Starost uzorka	Čvrstoća
1 dan	16%
3 dana	40%
7 dana	65%
14 dana	90%
28 dana	99%

Kada se odlučimo za ispitivanje, betonsku kocku vadimo iz vode te ostavljamo da se osuši površinska voda. Poslije sušenja, kocka se važe te postavlja u hidrauličnu prešu. Treba voditi računa da uzorak mora biti dobro centriran. Opterećenje se iz preše nanosi postepeno, propisano brzinom od 0.6 ± 0.4 MPa/s do loma prema normi [18]. Pucanjem betonske kocke (Slika 14), hidraulična preša se zaustavlja te se očitava sila sloma a na temelju nje izračunava vrijednost tlačne čvrstoće.



Slika 14: Ispitani uzorak betonske kocke [19]

7.3. Ispitivanje otpornosti betona na prodor klorida prema normama NT BUILD 492 i ASTM C1202

Prije samog ispitivanja uzoraka betona dvjema metodama, uzorke je potrebno pripremiti za ispitivanje. Beton se za ispitivanje otpornosti postavlja u cilindrične kalupe, te se nakon ugradnje vibrira na vibrostolu. Nakon 24h uzorci se vade iz kalupa i postavljaju u sobu s posebnim uvjetima. Poslije 28. dana negovanja, uzorke se vadi iz vode te ostavlja da se osuše. Zatim uzorke pilom za rezanje betona izrežemo na debljinu 50 ± 2 mm.



Slika 15: Uzrokovani uzorci u kalupima [20]

Za ispitni uzorak potrebno je iz vanjskog sloja valjka izrezati od 10 do 20 mm betona te sljedećih 50 ± 2 mm. Površina koja je bila bliže vanjskom dijelu (površini betona koja je zaglađena) kod ispitivanja treba biti izložena otopini klorida. Nakon piljenja, očistiti, oprati i obrisati ispitne uzorke. Kada su ispitni uzorci površinski suhi, postavljaju se u eksikator. Obje površine trebaju biti izložene, a uzorci se polažu bočno kako je i prikazano (Slika 16).

Vakuuskom pumpom kontrolira se pritisak između 10 i 50 mbara. Zadani vakuum treba održati tri sata. Nakon tri sata, dok pumpa radi uzorci se potapaju otopinom kalcijevog hidroksida. Poslije potapanja vakuum zadržavamo još jedan sat. Pri završetku ispušta se vakuum a ispitni uzorci ostavljaju potopljeni u otopini kalcijevog hidroksida 18 ± 2 sata.



Slika 16: Ispitni uzorci postavljeni u eksikator, (izvor: vlastita fotografija)

Uzorci se zatim namjeste u ćelije i zategnu se matice. Katodna ćelija napuni se otopinom NaCl, a anodna ćelija otopinom NaOH. Ćelije se kablovima spajaju na uređaj za migraciju klorida. Nakon što su spojene ćelije na uređaj, pokreće se uređaj s naponom namještenim na 30 V i zabilježi se početna jakost struje kroz svaki ispitni uzorak. Prilikom namještanja napona mora se zabilježiti početna temperatura u svakoj anodnoj otopini. Ukoliko napon od 30 V ne zadovolji uvjete početne struje $40 \leq I_0 < 60$, povećava se početni napon sve dok ne zadovolji uvjet naveden iz tablice. Pri završetku trajanja ispitivanja potrebno je zabilježiti završnu struju i temperaturu prije prekidanja samog ispitivanja.

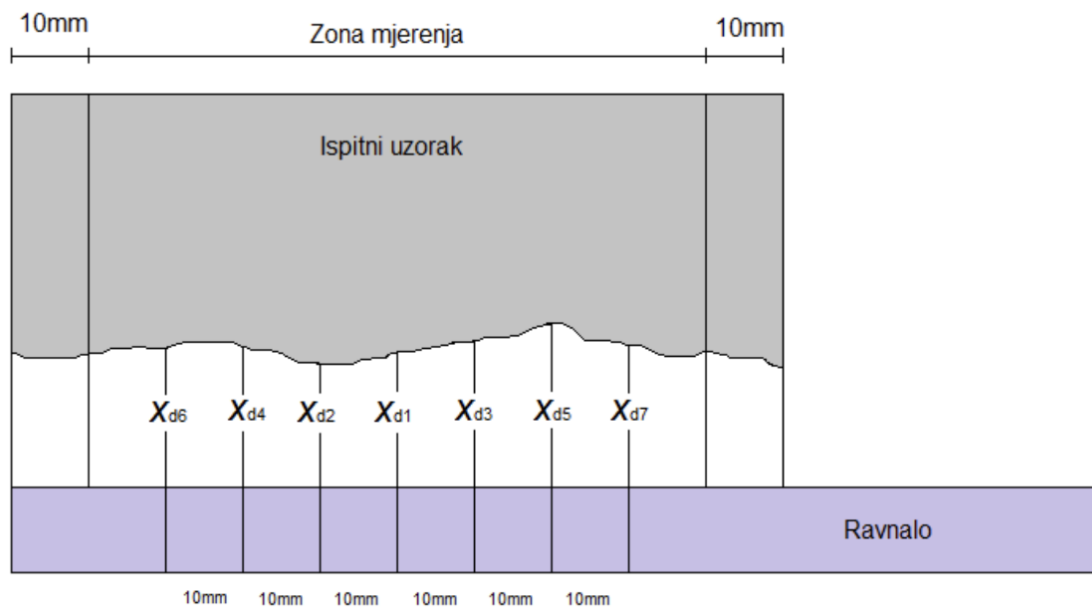
Početna struja I_{30V} (mA)	Napon U (nakon podešavanja) (V)	Moguća nova početna struja I_0 (mA)	Trajanje ispitivanja t (sati)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Slika 17: Podešavanje napona za odabir ispitivanja [12]

Pri završetku ispitivanja rastavljaju se ćelije i oslobađaju ispitni uzorci. Ispitne uzorke treba isprati u pitkoj vodi, a zatim vodu obrisati sa uzoraka. Uzorke prepolažljamo pomoću hidraulične preše. Odabire se polovica s okomitijim lomom te se srebrni nitrat rasprši po prepolažljenoj površini ispitnog uzorka. Kada postane vidljiv bijeli trag, mjeri se dubina penetracije pomičnim mjerilom i ravnalom prema pozicijama danim na slici 9. Uz točnost od 0,1 mm. Pritom se mjerenja ne vrše na udaljenosti od 10 mm od samih krajeva ispitnih uzoraka.

Ako je na poziciji mjerenja zrno agregata, mjerenje treba pomaknuti na mjesto gdje nema zrna agregata ili ignorirati to mjerenje ako ima više od pet dobrih mjerenja. Ukoliko ispitni uzorak ima značajno oštećenje koje rezultira penetracijom klorida znatno većim od prosjeka, dobiveni uzorak se odbacuje iz rezultata mjerenja. Ako ispitni uzorak ima manje od pet dobrih mjerenja, uzorak se ignorira kao rezultat i srednja vrijednost koeficijenta migracije klorida D_{nssm} se izražava kao prosjek koeficijenta migracije klorida na preostala dva ispitna uzorka koji imaju više od pet dobrih mjerenja. Ispitivanje je potrebno ponoviti ukoliko rezultat ispitivanja nije zadovoljavajući na više od jednom ispitnom uzorku.

Razlike između NT BUILD 492 i ASTM C1202 metode, jesu što se kod norme ASTM C1202 uzorci silikoniraju dok se kod NT BUILD 492 norme polažu u ćelije te zatežu maticama. Isto tako kod ASTM C1202 pri spajanju na mjerni instrument podese se napon od 60 ± 1 V, dok kod prvotno opisane metode napon ovisi o početnoj struji. Najznačajnija razlika odnosi se na vremenu spojenim na mjerni instrument. ASTM metodi potrebno je samo 6 sati dok je za isti proces NT BUILD-u metodi potrebno čak 24 ± 2 sata.



Slika 18: Prikaz mjerenja ispitnog uzorka [12]

8. IZRADA MJEŠAVINA BETONA

Eksperimentalni dio rada proveden je u akreditiranom Laboratoriju za beton i agregate u tvrtki Holcim (Hrvatska) d.o.o te na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Kako bi dobiveni rezultati bili usporedivi s ispitivanjima ostalih laboratorija ispitivanja su izvršena prema normama za beton i agregate (HRN EN 206-1:2006 i HRN EN 12620:2013).

Za potrebe ispitivanja spravljeno je ukupno 6 mješavina betona visokih uporabnih svojstava, od čega jedna referentna mješavina, jedna mješavina sa sulfatnootpornim cementom niske topline hidratacije oznake CEM III/B 32,5 N SR-LH, komercijalnog naziva Holcim Protektor cement; te četiri mješavine sa miješanim Portland cementom oznake CEM II/B-M (S-V) 42,5 N, komercijalnog naziva Holcim Ekspert cement te 2,5%, 4,0%, 7,0% i 10% dodatka silicijske prašine.

Osnovni cilj ispitivanja je bio odrediti najoptimalniju mješavinu s obzirom na otpornost na prodor klorida u beton.

Izrađeno je ukupno 18 uzoraka betona, na kojima se ispitala tlačna čvrstoća i trajnost betona u smislu otpornosti na prodor klorida (Slika 19). Od 18 uzrokovanih uzoraka, od čega su 12 betonskih kocki dimenzija 150 x 150 x 150 mm i preostalih 6 valjaka dimenzija 100 x 200 mm.

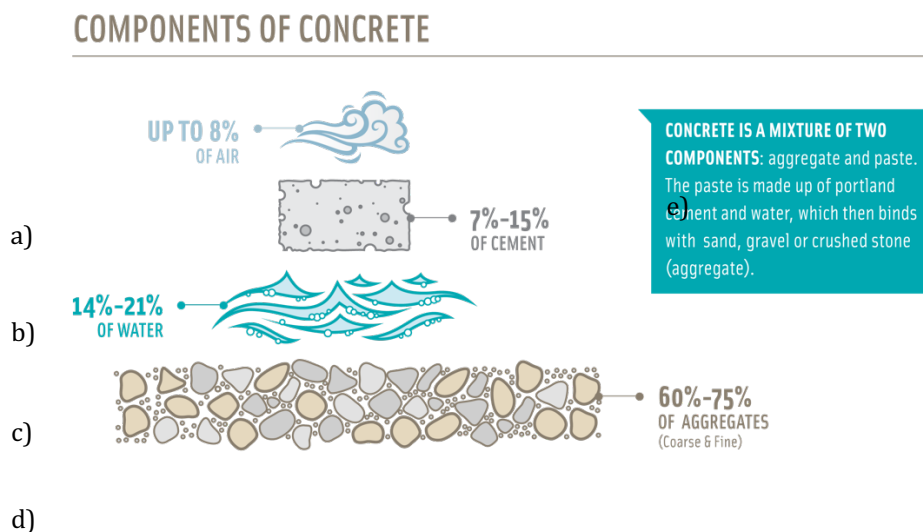
Od 6 cilindričnih uzoraka (Slika 19) dobiveno je 12 betonskih uzoraka koji su bili podvrgnuti ispitivanju u Laboratoriju za beton i agregate u Holcimu (prema normi NT BUILD 492) i Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci (prema normi ASTM C1202).



Slika 19: Izrada mješavina betona (u kalupu), (izvor: vlastita fotografija)

8.1. Sastojci za proizvodnju betona

Premda je izrada betona vrlo jednostavna, pravilan postupak betoniranja poprilično je zahtjevan i zahtijeva dodatnu pažnju, posebno pri miješanju betonskih sastojaka (Slika 20).



Slika 20: Prikaz komponenata betona (materijali) [21], a) zrak, b) cement, c) voda, d) agregat, e) Beton je mješavina dvaju komponenata: agregata i paste. Pasta se sastoji od portland cementa i vode, koja se potom veže sa pijeskom i šljunkom.

8.1.1. Cement

Cement je na mnoge načine "ljepilo" koji drži beton zajedno, te kao takav ima važnu ulogu u svojstvima svježeg i očvrstnalog betona. Bez odgovarajuće količine cementa u smjesi, možemo se suočiti sa problemom nisko razvijene čvrstoće betona ili prekomjernog skupljanja. Odabir cementa i drugih komponenata betona u nepovoljnom i agresivnom okolišu imati će značajan utjecaj na trajnost betona. Sadržaj cementa i vodo-cementnog omjera imati će ključnu ulogu u utjecaju na obradivost betona. Ukoliko smjesa ima previše cementa u odnosu na količinu vode, obradivost betona biti će loša. Međutim, previše vode uzrokovat će segregaciju agregata čineći je jednako teškom za upotrebu u predviđene svrhe na gradilištu. Stoga, odabir odgovarajuće količine cementa za smjesu ključan je za betonske mješavine, utječući na obradivost i ukupne troškove.

8.1.2. Sulfatnootporni cement

Kako bi se smanjio rizik od oštećenja betona, koristio se sulfatno otporni cement – CEM III/B 32,5 N SR-LH; sulfatnootporni cement niske topline hidratacije prema HRN EN 197-1. Sulfatno otporni cement je vrsta Portland cementa niske toplinske hidratacije koji se sastoji od 20-34% portlandskog cementnog klinkera, 66-80% granulirane zgre visoke peći (S), do 5% filtarske prašine, dobivene iz procesa proizvodnje portlandskog cementnog klinkera i industrijskog gipsa dihidrat (regulator vezanja). Fizikalna svojstva sulfatnootpornog cementa korištenog za izradu vlastitih betonskih mješavina i usporedba s normom HRN EN 197-1 dana su u Tablici 3. Ima svojstvo otpornosti na mineraliziranu vodu koja sadrži sulfata i uglavnom se koristi u podvodnoj gradnji. Ovaj tip cementa povećava trajnost betona kada je izložen agresivnim uvjetima okoline, smanjujući rizik od propadanja i strukturnog oštećenja. Sulfatnootporni cement ima mnoge prednosti u odnosu na druge vrste cementa. Neke od prednosti su: otporan je na napad sulfata, ne razvija visoku toplinu hidratacijom, čuva trajnost konstrukcija na područjima koja su podložna napadu sulfata i olakšava betoniranje u područjima s agresivnim okolišem. Glavni nedostatak sulfatnootpornog cementa je njegova veća cijena u usporedbi s drugim vrstama cementa. Sulfatnootporni cement zahtijeva posebne sirovine i postupke proizvodnje kako bi se osigurala visoka otpornost na sulfatne napade.

Tablica 3: Fizikalna svojstva sulfatnootpornog cementa korištenog za izradu vlastitih betonskih mješavina i usporedba s normom HRN EN 197-1 [4]

Fizikalna svojstva	JM	cement CEM III/B 32,5 N SR-LH	Uvjet norme
Postojanost volumena (Le Chatelier)	mm	0	≤ 10
Početak vezivanja	min	205	≥ 75
Tlačna čvrstoća na 7 dana	MPa	24,0	≥ 16
Tlačna čvrstoća na 28 dana	MPa	43,0	≥ 32,5 ≤ 52,5
Toplina hidratacije	J/kg	217	< 270

8.1.3. Silicijska prašina

Silicijska prašina je nusprodukt proizvodnje silicija ili ferosilikona, koja se sastoji od ultrafina (submikronskih), amorfnih, neporoznih i potpuno sfernih čestica silicijevog dioksida (SiO_2), čija čistoća iznosi od 85 do 99 % (Slika 21). Glavni učinak ovih ultrafinih čestica je znatno poboljšanje pakiranja čestica i stvaranje visoko pucolanskog reakcijskog procesa u betonu i drugim vezanim sustavima za cement gdje silicijev dioksid reagira s kalcijevim hidroksidom, povećavajući razinu performansi, čvrstoću i trajnost tih materijala.

Kada se dodaje silicijeva prašina u beton, u početku ostaje inertna. Nakon što se portland cement i voda u smjesi počnu reagirati (hidratizirati), primarne kemijske reakcije proizvode dva kemijska spoja: kalcijev silikat hidrat (CSH), koji je odgovoran za stvaranje čvrstoće, i kalcijev hidroksid (CH), nusprodukt koji se naziva slobodno vapno, a koji služi kao punilo ili može iscuriti iz slabijeg betona. Pozzolanska reakcija se odvija između silicijske prašine i kalcijevog hidroksida, stvarajući dodatni kalcijev silikat hidrat u mnogim prazninama oko hidratiziranih cementnih čestica. Ovaj dodatni kalcijev silikat hidrat pruža betonu ne samo poboljšanu tlačnu, savojnu i posmičnu čvrstoću, već i mnogo gušću matricu, posebno na područjima koja bi inače ostala kao male praznine podložne mogućem prodoru štetnih tvari. Transportne karakteristike kroz medij silicijevog praška su dramatično smanjene, tj. tekući spojevi i čak električne struje imaju smanjenu sposobnost migracije, rezultirajući vrlo niskom propusnošću i visokom električnom otpornosti. Prednosti silicijske prašine već su vidljive u svježem stanju betona prije nego što započne stvrdnjavanje. Mala veličina čestica, do 100 puta manja od čestica običnog portland cementa, nadopunjuje modul finosti betona i pruža efekt kugličnih ležajeva, što poboljšava tiksotropno ponašanje i mijenja viskoznost betona. Zbog velike specifične površine čestica silicijske prašine koja utječe na pokretljivost vode u betonu, segregacija je u betonu gotovo eliminirana. Reološke prednosti betona spravljenog sa silicijskom prašinom omogućuju dobivanje svježeg betona vrlo visoke kohezije, obradivosti i fluidnosti betona da zadrži nagib i/ili pumpanje betona na velike udaljenosti.



Slika 21: Silicijska prašina [22]

8.1.4. Agregat

Agregati su neaktivni zrnati materijali poput pijeska, šljunka ili drobljenog kamena. Za dobru betonsku smjesu, agregati moraju biti čisti, tvrdi i snažni, a čestice oslobođene apsorbiranih kemikalija ili obloga gline i drugih sitnih materijala koji bi mogli uzrokovati propadanje betona. Agregati, koji čine 60 do 75 posto ukupnog volumena betona, dijele se na dvije različite kategorije - sitni i krupni. Kada se beton razređuje prema maksimalnom zrnju agregata, za razredovanje treba koristiti nazivnu gornju veličinu krupne frakcije agregata (D_{max}). Za potrebu mješavina koristio se agregat 0-4 i 8-16mm. Frakcija agregata do 4 mm predstavljaju sitni agregat ili pijesak, dok frakcije veće od toga predstavljaju krupni agregat. U svim mješavinama koristili su se omjeri agregata od 60% za 0-4mm naprema 40% za 8-16mm.

8.1.5. Ispitivanje geometrijskih svojstva agregata – Određivanje granulometrijskog sastava (HRN EN 933-1)

Za pripremu vlastitih betonskih mješavina korišten je drobljeni agregat frakcija 0-4 i 8-16mm. Količine ispitnih uzoraka agregata dobavljene su iz Holcimovog kamenoloma Vranja shodno preporukama o minimalnoj masi agregati (Tablica 4) prema normi HRN EN 932-2.

Tablica 4: Minimalna masa agregata [23]

Maksimalno zrno agregata, D (mm)	Masa agregata (kg)
90	80
63	40
32	10
16	2.6
8	0.6
≤ 4	0.2

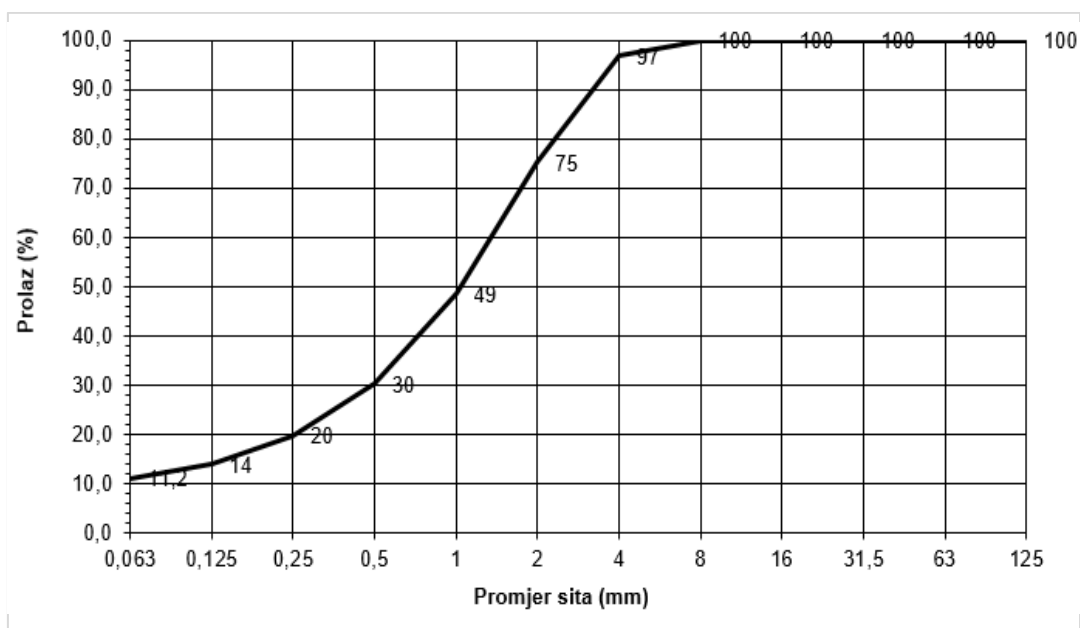
Za potrebe određivanja granulometrijskog sastava agregata prosijana su dva ispitna uzorka, dakle za svaku frakciju po dva testna uzorka. Sita otvora 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm i 31,5 mm poredana su od većeg otvora prema manjem, gledano odozgo prema dole u uređaj za prosijavanje - sijačicu. Na sito najvećeg otvora 31,5 mm postavljena je pripremljena masa uzorka agregata za prosijavanje, nakon čega su sita poklopljena i osigurana pomoću vijaka za prečišćavanje na vibracijskoj ploči. Preporučeno trajanje prosijavanje po svakom situ iznosi 120 sekundi, što u ovom konkretnom slučaju, za deset različitih sita iznosi 1200 sekundi. Prilikom završetka namještanja vremena na satu sijačice pokreće se postupak prosijavanja.

Nakon isteka zadanog vremenskog perioda, sita su pažljivo izvađena iz sijačice počevši od sita s većim otvorima i nastavljajući prema onima s manjim. Na svakom pojedinom situ izmjerena je masa preostalog materijala kako bi se analizirala raspodjela veličina čestica u ukupnom sastavu uzorka prosijanog agregata. Dobivene vrijednosti masa nakon postupka prosijavanja prikazane su u Tablici 5 za frakciju 0-4 mm i Tablici 6 za frakciju 8-16 mm. Na Slici 22 dana je granulometrijska krivulja dobivena za frakciju 0-4 mm dok je na Slici 23 prikazana granulometrijska krivulja dobivena za frakciju 8-16 mm.

Tablica 5: Vrijednosti granulometrijske frakcije 0-4 mm (izvor: vlastiti prikaz)

masa suhog uzorka	M_1	276
masa suhog ispranog uzorka	M_2	249,2

pod porcija 1													
sito(mm)	dno	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125
ostatak (g)	2,6	7,6	16,3	28,8	50,2	73,8	59,5	8,8					

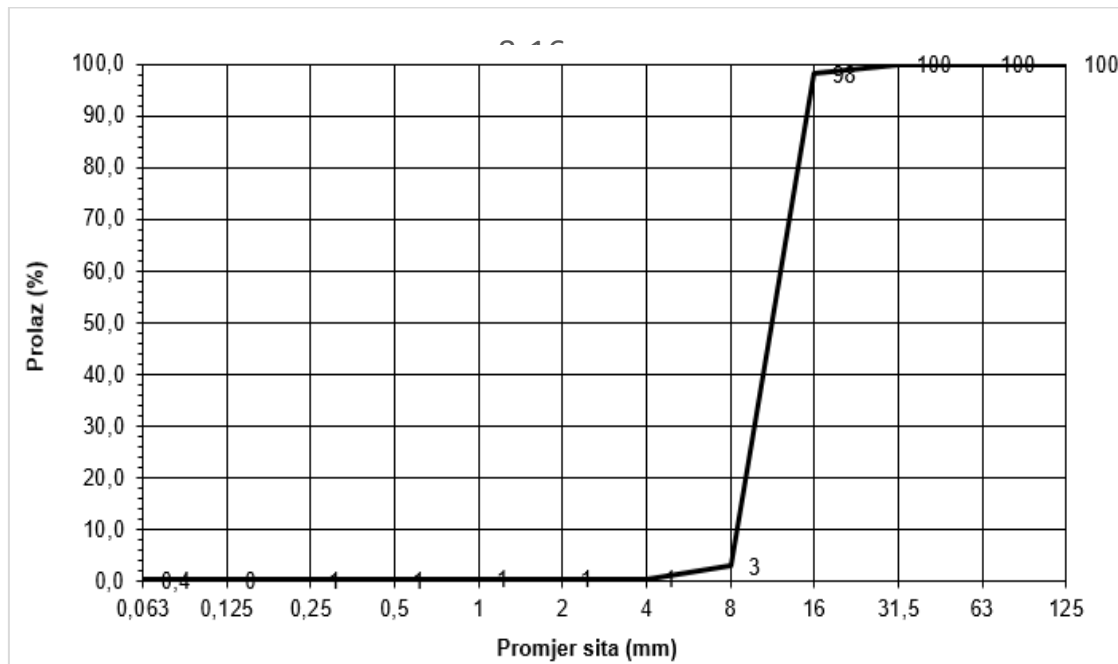


Slika 22: Granulometrijska krivulja 0-4 mm (izvor: vlastiti prikaz)

Tablica 6: Vrijednosti granulometrijske frakcije 8-16 mm (izvor: vlastiti prikaz)

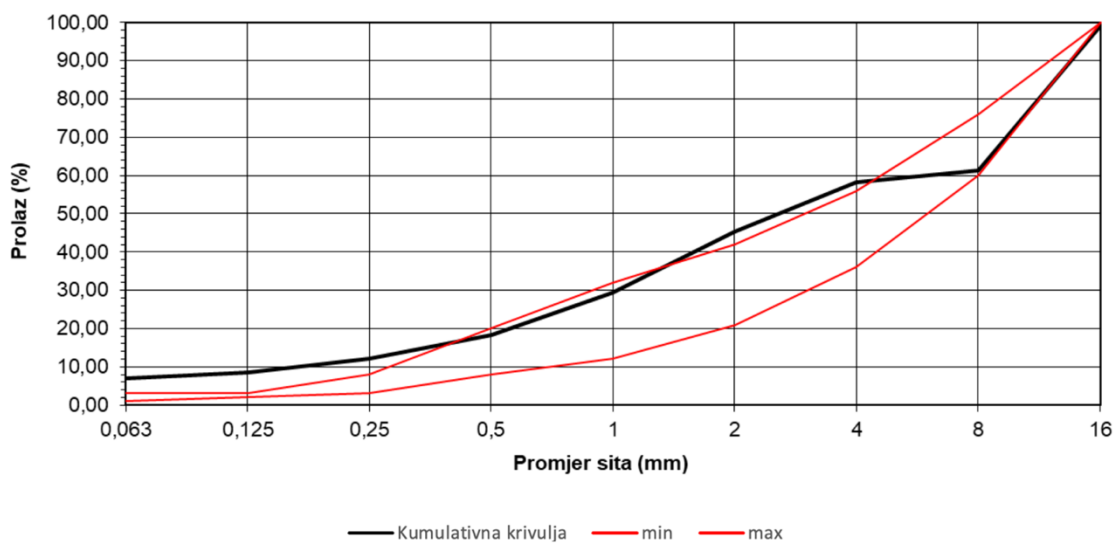
masa suhog uzorka	M_1	3165
masa suhog ispranog uzorka	M_2	3153

pod porcija 1													
sito(mm)	dno	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125
ostatak (g)	0,8	2,4	2	1,2	0,8	0,3	0,5	79,1	3012	54,7			



Slika 23: Granulometrijska krivulja 8-16 mm (izvor: vlastiti prikaz)

Kumulativna krivulja



Slika 24: Kumulativna krivulja agregata 0-4 mm i 8-16 mm (izvor: vlastiti prikaz)

Nakon što su ispitane pojedine frakcije agregata u rasponu od 0-4 i 8-16 mm, izrađena je kumulativne krivulja za kombinaciju ovih frakcija agregata. Ova kumulativna krivulja je grafički prikaz postotka čestica prema njihovoj veličini u ukupnom sastavu agregata

te ključan alat za planiranje i pravilno doziranje agregata u procesu izrade betonskih mješavina.

Rezultati analize ispitivanja granulometrijskog svojstva agregata 0-4 i 8-16 mm pokazuju da uzorci materijala zadovoljavaju kriterije za granulometrijski sastav agregata – minimalne i maksimalne granice (HRN EN 12620). Ispitivanje ukazuje da se distribucija čestica u materijalu poklapa sa standardnim parametrima definiranim ovim krivuljama.

8.2. Svježe betonske mješavine

Glavna karakteristika svježeg betona je njegova plastičnost koja mu omogućuje oblikovanje, iako ova svojstva nisu trajna. Betonom se smatra svježim od trenutka kada je stvoren do početka stvrdnjavanja cementa. Taj vremenski okvir je potpuno promjenjiv jer ovisi o korištenim aditivima, temperaturi, količini vode, vrsti korištenog cementa i drugim čimbenicima. Takozvano povijesno pravilo koje se koristi kao smjernica je da rok ugradnje betona ne bi smio prelaziti 2 sata, što se temelji na podacima o vremenu vezanja dobivenim od proizvođača cementa. Kako bismo izbjegli problem s vremenskim faktorom, koriste se različiti aditivi. Postoje aditivi s različitim funkcijama, a koriste se kako bi se postigle određene karakteristike i performanse betona. Najkorišteniji aditivi jesu; superplastifikatori (omogućavaju smanjeno korištenje vode – povećavaju obradivost i poboljšavaju ugradnju betona), retarderi (usporavaju vezanje betona) i ubrzivači (ubrzavaju proces vezivanja betona).

U Tablici 7 prikazane su komponente sastava za 1m³ betona za pojedinu mješavinu. Za svaku mješavinu (etalon, CEM III B, silicijska prašina 2,5%, 4%, 7% i 10%) napravljena su 3 uzorka betonskih kocaka i 3 cilindričnih uzoraka za ispitivanje prodora klorida. Iz tablice je vidljivo da su se za sve mješavine osim mješavine koja sadrži CEM III B korištene jednake količine svih korištenih sastojaka osim dodatka silicijske prašine. Silicijska prašina dodana je na vrijednost cementa u postotnom omjeru. Za izradu mješavine sa CEM III B cementom korišten je vodo/cementni omjer od 0,44% i dodatak superplastifikatora 0,38%.

Tablica 7: Komponente sastava mješavina za izradu betona (izvor: vlastiti prikaz)

KOMPONENTE SASTAVA	NAZIVI MJEŠAVINA					
			SILICIJSKA PRAŠINA			
	ETALON	CEM III B	2,5%	4%	7%	10%
	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Cement	420	440	420	420	420	420
Voda	168	193,6	168	168	168	168
Superplastifikator	1,76	1,67	1,76	1,76	1,76	1,76
Agregat 0-4 mm	252	264	252	252	252	252
Agregat 8-16 mm	168	168	168	168	168	168
Silicijska prašina	0,0	0,0	10,5	16,8	29,4	42,0

8.3. Analiza rezultata ispitivanja betonskih mješavina

Kao što smo prethodno naveli spravljene betonske mješavine su najprije ispitane u svježem stanju - ispitivanje konzistencije metodom slijeganja a potom u očvrslom stanju - tlačna čvrstoće i otpornosti betona na prodor klorida. Sve mješavine pripremljene su i podvrgnute ispitivanju istoga dana kako bi se minimalizirao utjecaj na ispitni uzorak.

Rezultati navedenih ispitivanja dani su u Tablici 8. Na temelju rezultata ispitivanja , vidljivo je da sve betonske mješavine zadovoljavaju S4 razred konzistencije slijeganjem (Tablica 9). Betonska smjesa u razredu S4 ima blago tekuću konzistenciju koja omogućuje lako razlijevanje i oblikovanje, ali ipak zadržava svoj oblik bez rasipanja. Ova konzistencija je prikladna za mnoge građevinske primjene. Usporedbom rezultata može se primijetiti da mješavina sa 4% silicijske prašine ima najmanje slijeganje zbog omjera silicijske prašine i cementa.

Tablica 8: Rezultati ispitivanja betonske mješavine (izvor: vlastiti prikaz)

NAZIV	CEM	AGG	IZMJERENO SLIJEGANJE [MM]	STAROST UZORKA [DAN]	MASA UZORKA [KG]	SILA LOMA [kN]	TLAČNA ČVRSTOĆA [MPa]	VRIJEDNOST MIGRACIJE KLORIDA D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)
	VRSTA	FRAKCI- JA						
ETALON (REFERENTNA MJEŠAVINA)	HOLCIM EKSPERT	0/4	200	28	8,02	1472,00	65,42	7,1
		8/16		28	7,97	1450,00	64,44	
MJEŠAVINA SA CEM III B	CEM III B	0/4	200	28	8,03	1403,00	62,36	3,7
		8/16		28	7,95	1422,00	63,20	
SILICIJSKA PRAŠINA 2,5%	HOLCIM EKSPERT	0/4	210	28	8	1556,00	69,16	8,0
		8/16		28	7,97	1525,00	67,78	
SILICIJSKA PRAŠINA 4%	HOLCIM EKSPERT	0/4	180	28	7,87	1402,00	62,31	7,5
		8/16		28	7,86	1417,00	62,98	
				28	7,92	1433,00	63,69	
SILICIJSKA PRAŠINA 7%	HOLCIM EKSPERT	0/4	190	28	7,9	1408,00	62,58	6,9
		8/16		28	7,82	1448,00	64,36	
SILICIJSKA PRAŠINA 10%	HOLCIM EKSPERT	0/4	200	28	7,85	1700,00	75,56	4,0
		8/16		28	7,89	1699,00	75,51	

Tablica 9: Razredi slijeganja [24]

Razred	Slijeganje u mm
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220

Nakon ispitivanja konzistencije, izrađene su betonske kocke dimenzija 150 mm × 150 mm × 150 mm i valjci 100 mm × 200 mm te postavljeni u sobu sa posebnim uvjetima pri temperaturi od 20±3°C i optimalnoj vlažnosti prostoriji od 95%. Nakon 24h uzorci su raskalupljeni i ostavljaju se u istoj prostoriji ili vodenom bazen sljedećih 28 dana do

ispitivanja. Na dan ispitivanja uzorci su izvađeni iz navedene prostorije i ostavljeni da se površinski osuše. Po završetku sušenja, uzorci se važu i mjere se dimenzije nakon čega se ispituje tlačna čvrstoća u hidrauličnoj preši. Rezultati tlačne čvrstoće prikazanih u Tablici 8 prikazuju približnu konstantnost za prvih pet betonskih mješavina, dok je za mješavinu betona sa udjelom 10% silicijske prašine tlačna čvrstoća 15% veća od srednje vrijednosti preostalih ispitivanja. Uzrok tome je da silicijska prašina djeluje kao punilo i pojačivač u betonu. Povećanje udjela silicijske prašine može povećati gustoću smjese betona i kontakt između čestica. Samim time dobiva se kvalitetnija unutarnja struktura betona sa smanjenim udjelom pora i povećanje tlačne čvrstoće.



Slika 25: Presjek cilindričnog uzorka za ispitivanje, (izvor: vlastita fotografija)

Nakon ispitivanja tlačne čvrstoće provedeno je ispitivanje prodora klorida. Na prepolovljenim cilindričnim uzorcima mjerena je dubina prodora klorida te je za svaki uzorak izmjerena srednja vrijednost migracije klorida.

Rezultati ispitivanja pokazali su da povećanjem udjela silicijske prašine smanjuje se prodor klorida. Razlog tome je što silicijska prašina smanjuje veličinu i količinu pora u

cementnoj pasti čime se otežava prodiranje klorida kroz betonsku strukturu. Isto tako, silicijska prašina može doprinijeti stvaranju dodatnih silikatnih spojeva koji dodatno povećavaju otpornost betona na vanjske agresivne utjecaje. Iz Tablice 8 zaključujemo da mješavina sa CEM III B ima najveću otpornost na prodor klorida u beton.

9. USPOREDBA KOEFICIJENTA DIFUZIJE KLORIDA ispitnog prema normama NT BUILD 492 i ASTM C1202

U ovom poglavlju napravljena je usporedba vrijednost koeficijenta difuzije klorida dobivena ispitivanjem prema dvjema najčešće korištenim metodama: NT BUILD 492 i ASTM C1202. Za svaku od metoda ispitivanja ispitano je šest ispitnih uzoraka betonske mješavine sa dodatkom od 10% silicijske prašine čime se namjeravala prikazati usporedivost dobivenih rezultata.

9.1. Rezultati – NT BUILD 492

Rezultati ispitivanja dobiveni prema normi NT BUILD 492 prikazani su u Tablici 10. NT BUILD metoda koristi promjenjivi napon koji ovisi o početnoj struji prilikom namještanja samog instrumenta (Tablica 10) za razliku od ASTM metode (Tablica 11).

Tablica 10: Rezultati ispitivanja mješavine sa dodatkom 10% silicijske prašine, (izvor: vlastiti prikaz)

Oznaka ispitnog uzorka	1.	2.	3.
Visina ispitnog uzorka (mm)	50	50	50
Temperatura na početku ispitivanja (°C)	22,4	19,6	20,5
Temperatura na kraju ispitivanja (°C)	/	21,5	22,2
Prosječna temperatura (°C)	/	20,6	21,4
Napon (V)	40	40	40
Vrijeme trajanja ispitivanja (sati)	24	24	24
Pojedinačna vrijednost prodora xd6	/	11,6	14,0
Pojedinačna vrijednost prodora xd4	/	12,4	12,1
Pojedinačna vrijednost prodora xd2	/	11,9	11,3
Pojedinačna vrijednost prodora xd1	/	11,6	11,9
Pojedinačna vrijednost prodora xd3	/	11,9	11,1
Pojedinačna vrijednost prodora xd5	/	12,0	12,2
Pojedinačna vrijednost prodora xd7	/	/	11,3
Srednja vrijednost prodora xd (mm)	/	11,9	12,0
Koeficijent migracije klorida Dnssm	/	4,0	4,0
Srednja vrijednost koeficijenta migracije klorida Dnssm (×10 ⁻¹² m ² /s)	4,0		

Oznaka ispitnog uzorka	4.	5.	6.
Visina ispitnog uzorka (mm)	50	50	50
Temperatura na početku ispitivanja (°C)	20,5	20,3	20,1
Temperatura na kraju ispitivanja (°C)	24,3	24,2	24,3
Prosječna temperatura (°C)	22,4	22,3	22,2
Napon (V)	50	50	50
Vrijeme trajanja ispitivanja (sati)	24	24	24
Pojedinačna vrijednost prodora xd6	14,1	/	18,9
Pojedinačna vrijednost prodora xd4	15,2	11,0	14,9
Pojedinačna vrijednost prodora xd2	18,4	11,8	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd1	19,1	13,4	15,0
Pojedinačna vrijednost prodora xd3	13,0	/	12,1
Pojedinačna vrijednost prodora xd5	13,5	13,4	13,5
Pojedinačna vrijednost prodora xd7	11,6	14,9	22,2
Srednja vrijednost prodora xd (mm)	15,0	12,9	16,1
Koeficijent migracije klorida D _{nssm}	4,1	3,5	4,4
Srednja vrijednost koeficijenta migracije klorida D _{nssm} (×10 ⁻¹² m ² /s)	4,0		

Tijekom ispitivanja senzor sonde na prvom uzorku prestao je raditi, stoga je taj uzorak odbačen. Ostalim uzorcima (2.-6.) izmjerena je pojedinačna vrijednost prodora na svakih 10mm u zoni mjerenja – odmaknuto za 10mm od rubova uzorka (Slika 26). U tablici 10 je vidljivo da na određenim mjestima (npr. pojedinačna vrijednost prodora xd6 za uzorak 5.) nije izmjerena dubina prodora klorida. Dubina prodora klorida nije izmjerena zbog blokiranja fronte agregatom stoga je ta pojedinačna vrijednost ignorirana. Izmjerene vrijednosti su zatim upisane u tablicu te je za svaki uzorak izračunata srednja vrijednost prodora klorida te koeficijent migracije klorida D_{nssm}. Koeficijent migracije klorida izračunat je prema izrazu (3).

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} (x_d - 0.0238) \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}}$$

(3) [12]

gdje je:

D_{nssm} – nestalni koeficijent migracije [m^2/s]

U – apsolutna vrijednost napona [v]

T – prosječna vrijednost početne i završne temperature u anodnoj otopini [$^{\circ}C$]

L – debljina ispitnog uzorka [mm]

x_d – prosječna vrijednost dubine penetracije [mm]

t – trajanje ispitivanja [sati]

Konzistentni rezultati ukazuju na to da su mjerenja točna i da nema značajnih varijacija između uzoraka.



Slika 26: Vidljiv prodor klorida u ispitne uzorke – srebrni nitrat (izvor: vlastita fotografija)

9.2. Rezultati – ASTM C1202

Rezultati ispitivanja dobiveni prema normi ASTM C1202 prikazani su u Tablici 11. Kao i kod NT BUILD 492 dogodilo se do kvara na sondi koja održava temperature stoga je uzorak morao biti odbačen kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata.

Uzorci su postavljeni pod konstantnim naponom u trajanju od 6h. Nakon isteka 6h uzorci su slomljeni na preši te poprskani srebrnim nitratom (Slika 27). Nakon pojave zone prodora (svijetlo siva boja na Slici 27) izmjerena je dubina prodora na mjerenim mjestima kao i kod prijašnje metode.



Slika 27: Slomljeni uzorci poprskani srebrnim nitratom (izvor: vlastita fotografija)

Kao i kod prethodno ispitanih uzoraka postojale su zone u kojima je agregat blokirao prodor klorida stoga je to mjerno mjesto odbačeno.

Vrijednosti koeficijenta migracije klorida po pojedinom uzorku ukazuju veću raspršenost rezultata ispitivanja od srednje vrijednost nego kod prethodne metode

Iz srednje vrijednosti koeficijenta migracije klorida vidljivo je da su rezultati za oba ispitivanja približno jednaki što znači da su obje metode ispitivanja pouzdane. Jednaki

rezultati omogućuju validaciju metode i postupka ispitivanja te potvrdu da su uvjeti ispitivanja bili dosljedni.

Usporedba rezultata između ove dvije metode može biti korisna kako bi se utvrdila konzistentnost i pouzdanost rezultata i postupka ispitivanja. Međutim, važno je imati na umu da različite metode ispitivanja rezultiraju različitim rezultatima.

Tablica 11: Rezultati ispitivanja mješavine sa 10% dodataka silicijske prašine (izvor: vlastiti prikaz)

Oznaka ispitnog uzorka	1.	2.	3.
Visina ispitnog uzorka (mm)	50	50	50
Temperatura na početku ispitivanja (°C)	25	25	25
Temperatura na kraju ispitivanja (°C)	31	31	31
Prosječna temperatura (°C)	28	28	28
Napon (V)	60	60	60
Vrijeme trajanja ispitivanja (sati)	6	6	6
Pojedinačna vrijednost prodora xd6	5,7	5,0	6,0
Pojedinačna vrijednost prodora xd4	7,5	6,4	4,6
Pojedinačna vrijednost prodora xd2	/	7,7	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd1	6,8	6,3	7,9
Pojedinačna vrijednost prodora xd3	5,7	4,8	3,8
Pojedinačna vrijednost prodora xd5	/	/	4,0
Pojedinačna vrijednost prodora xd7	6,8	6,0	5,1
Srednja vrijednost prodora xd (mm)	6,5	6,0	5,2
Koeficijent migracije klorida Dnssm	5,7	5,3	4,5
Srednja vrijednost koeficijenta migracije klorida Dnssm (×10 ⁻¹² m ² /s)	5,2		

Oznaka ispitnog uzorka	4.	5.	6.
Visina ispitnog uzorka (mm)	50	50	/
Temperatura na početku ispitivanja (°C)	25	25	/
Temperatura na kraju ispitivanja (°C)	31,3	31,3	/
Prosječna temperatura (°C)	28,2	28,2	/
Napon (V)	60	60	/
Vrijeme trajanja ispitivanja (sati)	6	6	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd6	7,7	/	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd4	8,7	7,5	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd2	/	5,0	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd1	5,8	5,0	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd3	7,6	3,1	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd5	7,0	3,1	/
Pojedinačna vrijednost prodora xd7	/	/	/
Srednja vrijednost prodora xd (mm)	7,4	4,7	/
Koeficijent migracije klorida Dnssm	6,5	4,0	/
Srednja vrijednost koeficijenta migracije klorida Dnssm (×10 ⁻¹² m ² /s)	5,3		

10. ZAKLJUČAK

Beton je bio i ostat će nezamjenjiv i osnovni građevinski materijal koji ima ključnu ulogu u gradnji infrastrukture i različitih građevina. Njegova svestranost, trajnost i ekonomska isplativost čine ga ne samo popularnim već i neizostavnim dijelom modernog građenja. U betonu nastojimo smanjiti prodor klorida kako bi smanjili rizik od korozije armature. Istraživanja o utjecaju sastava betona na vrijednosti koeficijenta difuzije klorida ukazuje na važnost pažljivog odabira vrste i udjela komponenata betona kako bi se postigla optimalna otpornost na prodor klorida.

Osnovni cilj istraživanja bio je spraviti optimalnu betonsku mješavinu u pogledu cijene i dostupnosti materijala s visokom otpornošću na prodiranje klorida. S obzirom na jednostavnu dobavljaljivost materijala i dobivene rezultate ispitivanja otpornosti betona na prodor klorida mješavina sa sulfatno otpornim cementom CEM III B se pokazala najoptimalnijom za proizvodnju betona visoke otpornosti na prodor klorida.

Utvrđeno je da povećanje omjera vode i cementa može negativno utjecati na difuzijska svojstva betona, povećavajući njegovu propusnost za kloridne ione. Stoga, kontroliranje vodo-cementnog omjera ključno je za postizanje veće otpornosti na prodor klorida i poboljšanje trajnosti betonskih konstrukcija.

Također, primijećeno je da korištenje visokokvalitetnih agregata s malom poroznošću i dobro odabranog granulometrijskog sastava može pozitivno utjecati na difuzijska svojstva betona i povećati njegovu otpornost na prodor klorida.

U konačnici, razumijevanje utjecaja sastava betona na koeficijent difuzije klorida ključno je za projektante i inženjere kako bi mogli pravilno projektirati i izgraditi betonske konstrukcije koje će imati visoku otpornost na koroziju i dugi vijek trajanja.

11. LITERATURA

- [1] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=7337> , pristup 15.07.2023.
- [2] Stipanović Oslaković, I: Trajnost materijala https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/images/1_HFOG_Irina_Stipanovic_Oslakovic_Trajnost_materijala.pdf, pristup 10.06.2023.
- [3] Chloride Attacks on Concrete Structures, <https://www.ctlgrouppqatar.com/single-post/2019/02/02/chloride-attacks-on-concrete-structures>, pristup 10.06.2023.
- [4] Dumančić, K., Beton u morskom okruženju, Završni rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2020.
- [5] https://www.researchgate.net/publication/340438954_PREGLED_VRSTA_SU_LFATNOG_DJELOVANJA_NA_BETON Types of sulfate attack on concrete An [Overview](#) , pristup 30.07.2023.
- [6] Akhnoukh, A., Overview of Nanotechnology Applications in Construction Industry in the United States, *Micro and Nanosystems* 5(2):147-153, 2013
- [7] <https://cortecros.com/wp-content/uploads/2017/05/Zastita-i-sanacija-AB-konstrukcija-zastitom-armature-MCI-inhibitorima-i-AK-materijalima.pdf> , pristup 30.07.2023.
- [8] Zaki A., Johari, M.A.M, Hussin W.M.A.W, Yessi, J., Experimental Assesment of Rebar Corrosion in Concrete Slab Using Ground Penetrating Radar, *International Journal of Corrosion*, 2018 (23), pp.1-10, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/5389829>
- [9] Parrott, Lj., Killoh, DC., *Cement and Concrete Research*, 1989 <https://ronacrete.co.uk/carbonation-reinforced-concrete/>
- [10] <https://seblog.strongtie.com/2017/05/specify-stainless-steel-screw-anchors-designing-corrosive-environments/stages-of-corrosion/>, pristup 10.06.2023.
- [11] <https://www.phy.pmf.unizg.hr/~atonejc/1-8%20Difuzija.pdf> , pristup 04.06.2023.
- [12] NT BUILD 492, 'Nordtest Metho, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments', Nordtest, Espoo, Finland, 1999

- [13] ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration“, ASTM International, 2012
- [14] HRN EN 12350-6: 2019 Ispitivanje svježega betona -- 6. dio: Gustoća“, Hrvatski zavod za norme, 2019
- [15] https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Primjer_-_uputa_zs_ispitivanje.pdf, pristup 10.06.2023.
- [16] <https://edu.speakarch.com/workability-of-concrete/>, pristup 14.06.2023.
- [17] Beretin, M., Utjecaj veličine ispitnog tijela i maksimalnog zrna agregata na mehaničke karakteristike očvrsllog betona, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2020
- [18] HRN EN 12390-3 Ispitivanje očvrslnoga betona -- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka“, Hrvatski zavod za norme, 2019
- [19] <https://www.dreamstime.com/photos-images/concrete-laboratory-test.html>, pristup 27.06.2023.
- [20] Classon, L., ASTM C31 – Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, <https://owlcation.com/humanities/ASTM-C31-Making-Concrete-Cylinders-For-Compressive-Strength-Testing>, pristup 15.06.2023.
- [21] <https://www.cement.org/cement-concrete/cement-specific-materials/how-concrete-is-made>, pristup 14.06.2023.
- [22] <https://www.bbchem.co/blog/microsilica-concrete/>, pristup 27.06.2023.
- [23] HRN EN 933-1:2012 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sisanja (EN 933-1:2012), Hrvatski zavod za norme, 2019
- [24] <https://www.totalconcrete.co.uk/news/what-is-concrete-slump-and-why-does-it-matter/>, pristup 14.06.2023.