



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

**Skirtingose cheminėse aplinkose paveikto savaimė
atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas**

Baigiamasis magistro projektas

Gytis Rozplochas
Projekto autorius

Doc. dr. Algirdas Augonis
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Skirtingose cheminėse aplinkose paveikto savaimė atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas

Baigiamasis magistro projektas
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Gytis Rozplochas
Projekto autorius

Doc. dr. Algirdas Augonis
Vadovas

Doc. dr. Ernestas Ivanauskas
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Gytis Rozplochas

Skirtingose cheminėse aplinkose paveikto savaimė atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Gyčio Rozplocho, baigiamasis projektas tema „Skirtingose cheminėse aplinkose paveikto savaimė atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Rozplochas, Gytis. Skirtingose cheminėse aplinkose paveikto savaimė atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algirdas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05)

Reikšminiai žodžiai: betonas, plyšiai, korozija, priedai, užsitaisymas.

Kaunas, 2019. 47 p.

Santrauka

Lietuvoje, betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų gamyboje, vis dažniau naudojami savaimė atsinaujinančio betono priedai. Tačiau jų efektyvumui užtikrinti nėra paruoštų normatyvinių dokumentų. Tai sąlygoja mažas Lietuvos mokslininkų susidomėjimas šia kryptimi, atliekamų tyrimų trūkumas. Šiame magistro baigiamajame projekte apžvelgiamas kristalinių priedų veikimas bei jų efektyvumas gamtinėmis sąlygomis, pristatomi Europos tarpvyriausybinių bendradarbiavimo mokslo ir technologijų srityje (COST asociacijos) tyrimai su savaimė atsinaujinančio betono priedais.

Gelžbetoninės konstrukcijos savo gyvavimo laikotarpiu yra veikiamos įvairių aplinkos veiksnių ir cheminių elementų. Šie poveikiai turi didelę įtaką konstrukcijų gyvavimo trukmei, kadangi gali sukelti tiek armatūros, tiek pačio betono koroziją. Lygiai taip pat šie veiksniai gali neigiamai arba teigiamai sąlygoti betono priedų veikimą.

Šio projekto tiriamasis objektas yra betoniniai ir gelžbetoniniai bandiniai, kurie buvo gaminami su kristaliniiais priedais. Bandymų metu buvo nustatinėjamas cheminių tirpalų poveikis plyšių užgydymui, palygintos plyšių užgydymo efektyvumo vertinimo metodikos, priedų įtaka armatūros korozijos procesams, susitraukimo deformacijoms. Be to, nustatomas karbonizacijos gylis bandiniuose su priedais ir be jų.

Atlikti bandymai gali būti panaudoti savaimė atsinaujinančio betono plyšių užgydymo efektyvumui vertinti. Be to, atsižvelgiant į veikiančias aplinkos sąlygas, kuriose bus naudojamos konstrukcijos, galima nustatyti, ar racionalu naudoti kristalinius priedus konstrukcijų ilgaamžiškumui padidinti, kadangi tam tikromis sąlygomis yra sumažinamas šių priedų veikimas.

Darbo apimtis yra 45 puslapiai, neskaitant anotacijos anglų kalba ir priedų.

Rozplochas, Gytis. Evaluation of the effectiveness of self-healing concrete in different chemical environments. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Algirdas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering (E05)

Keywords: concrete, crack, corrosion, admixtures, healing.

Kaunas, 2019. 47 pages.

Summary

In Lithuania, self-healing concrete additives are increasingly used in the production of concrete and reinforced concrete structures. However, there are no prepared regulatory documents to ensure their effectiveness. This is caused by the low interest of Lithuanian scientists in this direction and the lack of research. This master's final degree project reviews the performance of crystalline admixtures and their effectiveness under natural conditions, and presents the European Cooperation in Science and Technology (COST Association) research on self-healing concrete additives.

Reinforced concrete structures are exposed to various environmental factors and chemical elements during their lifetime. These effects have a major impact on the life span of the structures, as they can cause corrosion of both the reinforcement and the concrete itself. Similarly, these factors can negatively or positively influence the performance of concrete admixtures.

Concrete and reinforced concrete samples, which were made using crystalline admixtures, are the subject of this project. During the experiments, the effect of chemical solutions on healing of cracks was determined, methods of evaluation of crack healing efficiency were compared, influence of additives in reinforcement corrosion processes, shrinkage deformations were considered. In addition, the depth of carbonation in samples with and without additives is determined.

Performed tests can be used to evaluate the crack healing efficiency of self-healing concrete. In addition, considering the environmental conditions under which the structures will be used, it can be determined whether it is rational to use crystalline additives to increase the durability of the structures, since under certain conditions the performance of these additives is reduced.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Savaimė atsinaujinančio betono tyrimų analizė	11
1.1. Savaiminio plyšių užsitaisymo poreikis	11
1.2. Pasaulinė ir Lietuvos statybos inžinerijos mokslo ir praktikos patirtis	14
1.3. COST „Savaiminis užsitaisymas – kaip prevencinis betono konstrukcijų remontas“	22
2. Tyrimams naudotos medžiagos ir metodikos.....	24
2.1. Naudotos medžiagos.....	24
2.2. Betono mišinio sudėtys ir suformavimas	25
2.3. Betoninių ir gelžbetoninių bandinių bandymų metodikos.....	29
2.3.1. Betono fizikinių ir mechaninių savybių nustatymo metodikos	29
2.3.2. Plyšių užsitaisymo efektyvumo vertinimo metodika visiškai perskėlus bandinius.....	29
2.3.3. Plyšių užsitaisymo efektyvumo vertinimo metodika nepilnai perskėlus bandinius.....	31
2.3.4. Savaimė atsinaujinančio betono priedų įtaka armatūros korozijos procesams	32
2.3.5. Savaimė atsinaujinančio betono priedų įtaka karbonizacijos gyliui.....	32
3. Eksperimentų rezultatai ir jų analizė	33
3.1. Savaimė atsinaujinančio betono fizikinės ir mechaninės savybės	33
3.2. Savaimė atsinaujinančio betono plyšių užsitaisymo efektyvumas	34
3.3. Savaimė atsinaujinančio betono atsparumo korozijos procesams tyrimai	39
3.4. Savaimė atsinaujinančio betono atsparumo karbonizacijai tyrimai	41
Išvados	44
Literatūros sąrašas	45
Priedai.....	47
1 priedas. Bandinių su šlaku plyšiai prieš ir po užsitaisymo	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Betono skiedinio savybės ir gniuždomasis stipris po 28-ių parų [20].....	17
2 lentelė. Portlandcemenčio cheminė sudėtis (pagal gamintojo duomenis)	24
3 lentelė. Portlandcemenčio fizikinės ir mechaninės savybės (pagal gamintojo duomenis)	24
4 lentelė. Aukštakrosnių šlako cheminė sudėtis.....	25
5 lentelė. Superplastiklio savybės	25
6 lentelė. Plieninių fibrų techninės savybės	25
7 lentelė. Betono skiedinio sudėtys, 1m ³ betono pagaminti.....	26
8 lentelė. Bandinių kiekių specifikacija	28
9 lentelė. COST projekto betono skiedinio sudėtys, 1m ³ betono pagaminti.....	28
10 lentelė. Pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis.....	36
11 lentelė. Kontrolinės sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo pokytis.....	37
12 lentelė. „B“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo pokytis	37
13 lentelė. „S“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo pokytis.....	37
14 lentelė. Išmatuotas karbonizacijos gylis bandiniuose	41

Paveikslų sąrašas

1 pav. Defektai ir pažaidos gelžbetoniniuose elementuose [6]	11
2 pav. Apklaustos rezultatai apie pagrindinius betoninių konstrukcijų defektus [22]	12
3 pav. Apklaustos rezultatai apie betono defektų sukeltas pasekmes [22].....	12
4 pav. Apklaustos rezultatai apie priemones betono defektams sumažinti [22]	13
5 pav. Konstrukcijų laikomosios galios priklausomybė nuo laiko remontuojant savarankiškai (kairėje) ir savaimė atsinaujinančiu betonu (dešinėje) [1].....	14
6 pav. Daugiabučių gyvenamojo namo pamatai Palangoje: čia betonavimo darbams buvo naudojami kristaliniai priedai, taip pat ir betonuojant visas balkonų plokštes (Arimanto Knašo nuotr.)	15
7 pav. Bakterijų veikimas atsivėrus plyšiui betone [13]	16
8 pav. Vandens įsiskverbimo gylio kontroliniuose bandiniuose [20]	17
9 pav. Vandens įsiskverbimo gylio bandiniuose su kristaliniais priedais [20].....	18
10 pav. Maksimalios ir vidutinės vandens įsiskverbimo gylio reikšmės [20]	18
11 pav. Bandinių laikomosios galios atstatymo priklausomybė nuo laiko [21]	19
12 pav. Vaizdo apdorojimas plyšiams nustatyti: (a) įtrūkimų srities apibrėžimas, b) vaizdo binarizacijos išvestis, c) galutinė išvestis. [23].....	20
13 pav. a) Originalus vaizdas su įtrūkimu. b) Dvejetainis vaizdas su įtrūkimu. c) Originalus vaizdas užgijimo. d) Dvejetainis vaizdas po užgijimo [23].....	20
14 pav. Šviesos atspindys įtrūkimo vidiniuose paviršiuose [23]	21
15 pav. Vaizdai, atitinkantys didžiausią plyšio plotį turinčius įtrūkimus, yra: a) vidutiniai įtrūkimai (0,30–0,15 mm) ir b) maži įtrūkimai (<0,15 mm) [23].	22
16 pav. „B“ kristalinio priedo XRD analizė	26
17 pav. „S“ kristalinio priedo XRD analizė	27
18 pav. Susitraukimo deformacijų indikatorius	29
19 pav. PILOT4 hidraulinis presas	29
20 pav. Bandinių skėlimas gniuždymo presu.....	30
21 pav. Bandiniai po skėlimo.....	30
22 pav. 0,3mm pločio plyšio suformavimas	30
23 pav. Vamzdžio ir bandinių sandarinimas	30
24 pav. Cilindrai supjaustyti į reikiamo dydžio bandinius.....	31
25 pav. Įpjovos bandiniuose.....	31
26 pav. Bandiniai su atvertais plyšiais	31
27 pav. Armatūros karkasas	32
28 pav. Armatūros karkasas formose	32
29 pav. Betono gniuždymo stiprio priklausomybė nuo kietėjimo trukmės	33
30 pav. Santykinių betono susitraukimo deformacijų priklausomybė nuo kietėjimo trukmės	34
31 pav. „K“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo trukmės	35
32 pav. „B“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo trukmės	35
33 pav. „S“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo trukmės	36
34 pav. Betono be šlako plyšių užsitaismo efektyvumas po 28 parų.....	38
35 pav. Betono su šlaku plyšių užsitaismo efektyvumas po 28 parų.....	38
36 pav. Plyšių užsitaismo efektyvumo įvertinimo metodikų palyginimas	39

37 pav. Prizmių lenkimas	39
38 pav. Įstrižieji plyšiai prizmėse	39
39 pav. Bandinio paviršius užpurškus sidabro nitrato	40
40 pav. Bandinio paviršius užpurškus fenolftaleino	40
41 pav. Įpjovos prizmėse	40
42 pav. Prizmių skėlimas	40
43 pav. Armatūros korozijos židiniai bandiniuose.....	41
44 pav. Karbonizacijos gylio nustatymas	42
45 pav. Karbonizacijos gylis bandinyje K4	42
46 pav. Karbonizacijos gylis bandinyje S9	43

Įvadas

Darbo tikslas

Darbo tikslas – imituojant natūralioje aplinkoje veikiančius fizikinius ir cheminius procesus įvertinti savaime atsinaujinančio betono priedų veikimą ir jų efektyvumą skirtingose aplinkose.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti atliekami sekantys uždaviniai:

1. Išanalizuoti ir parinkti savaime atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimo metodikas.
2. Eksperimentiniais bandymais ištirti betono priedų veikimą įvairiomis betono išlaikymo sąlygomis (gėlame vandenyje, jūros vandenyje, kelių barstymui naudojamų chloridų tirpale).
3. Nustatyti aukštakrosnių šlako panaudojimą betono plyšių savaiminiam užsitaismui.
4. Įvertinti betono su kristaliniiais priedais efektyvumą armatūros korozijos prevencijai.
5. Ištirti betono su kristaliniiais priedais karbonizacijos gylį.

Mokslinis naujumas

Lietuvoje savaime atsinaujinančio betono efektyvumo tyrimas pasižymi moksliniu naujumu, kadangi ši sritis, remiantis esamais straipsniais ir tyrimais lietuvių kalba, yra mažai Lietuvos mokslininkų nagrinėjama tema. Dalyvavaujant COST asociacijos tyrimų projekte gautos naujos mokslinės žinios apie naują plyšių užsitaismo efektyvumo įvertinimo metodiką. Tai leido palyginti skirtingas efektyvumo vertinimo metodikas. Be to, kristaliniai priedai išbandyti ir su gelžbetoniniais bandiniais, gautos žinios apie jų veikimą vykstant armatūros korozijos procesams.

Praktinis pritaikomumas

Šio betono analizė gali paskatinti Lietuvos mokslininkų susidomėjimą, rezultatus galima panaudoti normatyvinių dokumentų formavimui. Vertinama, kuriomis sąlygomis yra protinga naudoti betono priedus. Aukštakrosnių šlako panaudojimas plyšių užgydymui parodo, kad galima rasti ir alternatyvų komerciniams betono priedams.

1. Savaimė atsinaujinančio betono tyrimų analizė

1.1. Savaiminio plyšių užsitaisymo poreikis

Šiuolaikiniame pasaulyje tobulėjant pastatų išvaizdai ir architektūrai, neatsilieka ir medžiagos, naudojamos statyboje. Bene svarbiausias statybinių tyrimų aspektas yra pastatų priežiūros sumažinimas bei jų gyvavimo laiko pailginimas, kuriuos veikia atsiradę defektai. Konstrukcijos defektas – tai konkrečios savybės, matmens, įrengimo technologijos ir pan. neatitiktis norminių ar projektinių dokumentų reikalavimų. Kai statybos ir ypač naudojimo metu statinio konstrukcijos ar jų elementai ir medžiagos yra veikiami atmosferos, agresyvosios aplinkos ir kt. poveikių, ilgainiui atsiradę jų gedimai vadinami pažaidomis [6].



1 pav. Defektai ir pažaidos gelžbetoniniuose elementuose [6]

Tyrimai rodo, kad Nyderlanduose iš tūkstančio apžiūrimų tiltų ir kitų statinių, apie 50 % iš jų reikalingi detalesni bandymai dėl jų laikomosios galios įvertinimo. Trečdalis šios šalies pelno, gaunamo iš statybų sektoriaus, yra išleidžiama konstrukcijų tyrimams, stebėjimams, priežiūrai ir remontui. Jungtinėje Karalystėje statinių remonto ir priežiūros išlaidos sudaro apie 45 % visų pajamų, gaunamų iš statybų industrijos [19].

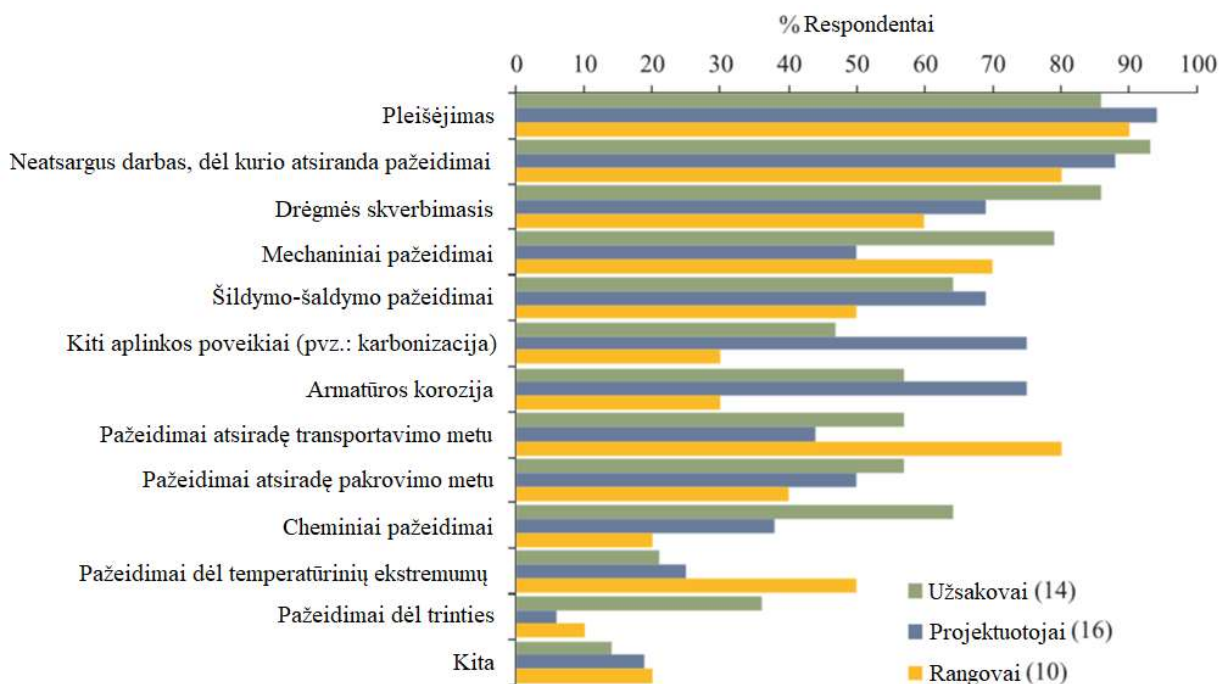
Betonas, kuris yra vienas pagrindinių statybinių medžiagų, taip pat yra ir vienas iš daugiausiai problemų keliančių pastatuose ir statiniuose. Silpnoji šios medžiagos vieta yra mažas atsparumas tempimo įtempimams, tai nulemia plyšių atsivėrimą tiek gamybos metu dėl broko, tiek eksploatuojant dėl susitraukimo ar temperatūrinių deformacijų. Gamybos metu atsiradę mikroplyšiai, apkrovus konstrukcijas, gali pavirsti į plika akimi matomus makroplyšius. Nors šių plyšių atsivėrimas yra aprašomas normatyviniuose dokumentuose (iki tam tikros ribos jie yra leidžiami), tačiau nekontroliuojami jie gali tapti saugos ribinių būvių viršijimo priežastimi. Tai lemia drėgmės ir cheminių medžiagų skverbimasis per plyšius, kurių gylis gali siekti net armatūros paviršių. Šis nepageidaujamas kontaktas sukelia chemines reakcijas, kurios paspartina koroziją ir armatūros rūdijimą. Dažnu atveju plyšių atsivėrimas griežtai reikalauja remonto, tačiau ne visada patogiu ir paprastu jį atlikti, o tai ženkliai padidina statinių priežiūros išlaidas.

Kad būtų galima geriau suprasti neigiamą betono įtrūkimų įtaką konstrukcijoms ir visam statybų procesui, 2018 metais buvo atlikta apklausa [22], kurioje dalyvavo statybų dalyviai - užsakovai, projektuotojai ir rangovai. Apklausos tikslas buvo nustatyti tris pagrindinius dalykus:

- dažniausiai pasitaikantys betono defektai;
- pasekmės, atsiradusios dėl betono defektų;

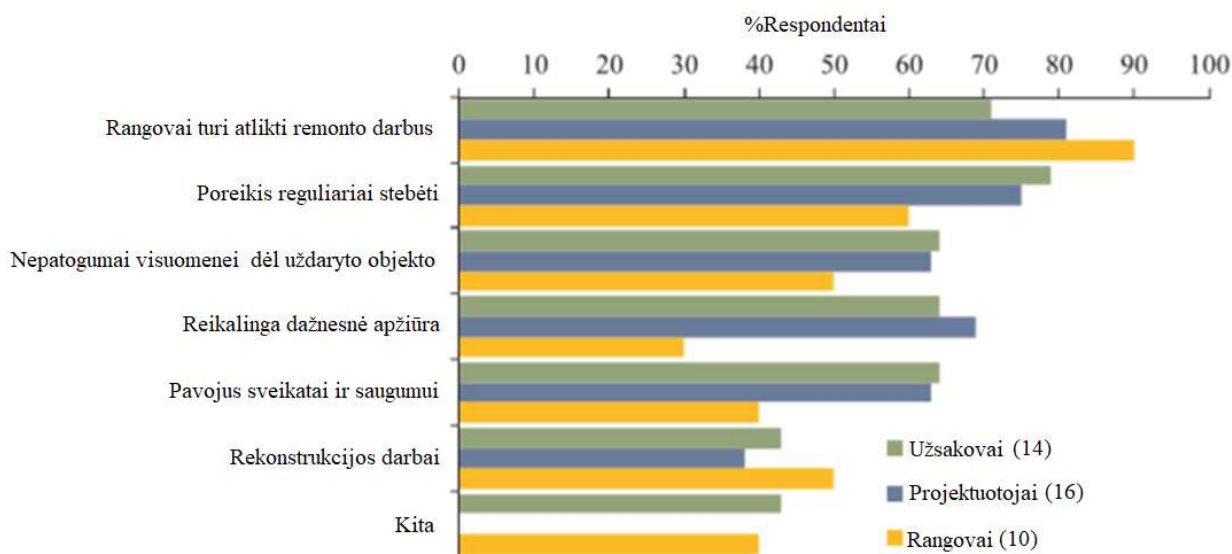
- dabartinės rinkos priemonės betono defektams sumažinti.

Taip pat buvo norima nustatyti, koks yra savaime atsinaujinančio betono priedų panaudojimo potencialas betono gamyboje. Pirmojoje apklausos dalyje (2 paveikslas) buvo nustatinėjama, su kokiais betono defektais dažniausia susiduriama statybose. Apie 90 % visų apklaustųjų atsakė, kad betono pleišėjimas yra daugiausia pasitaikantis betono defektas. Iš betono pleišėjimo atsiranda ir kiti paminėti defektai, pavyzdžiui, šildymo ir šaldymo ciklo pažeidimai, armatūros korozija ir t. t.



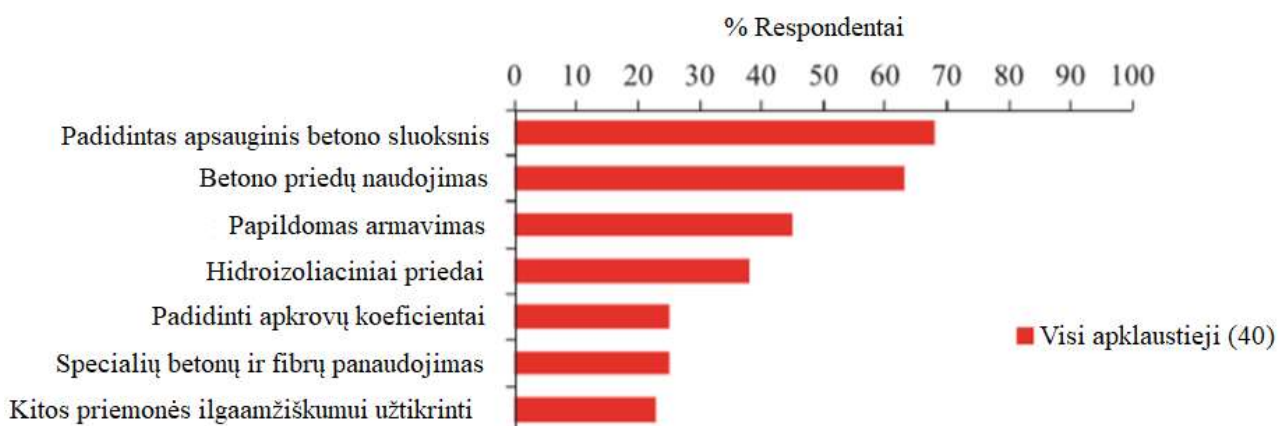
2 pav. Apklausos rezultatai apie pagrindinius betoninių konstrukcijų defektus [22]

Toliau buvo norima sužinoti, kokius nepatogumus sukelia betone atsirandantys defektai. 3 paveiksle pateikta apklausos diagrama, kurioje matoma, kad dažniausiai rangovai yra įpareigoti grįžti į statybų aikštelę ir atlikti remonto darbus. Taip pat reikalingi pastovūs pastatų ir konstrukcijų stebėjimai užbaigus statybos darbus.



3 pav. Apklausos rezultatai apie betono defektų sukeltas pasekmes [22]

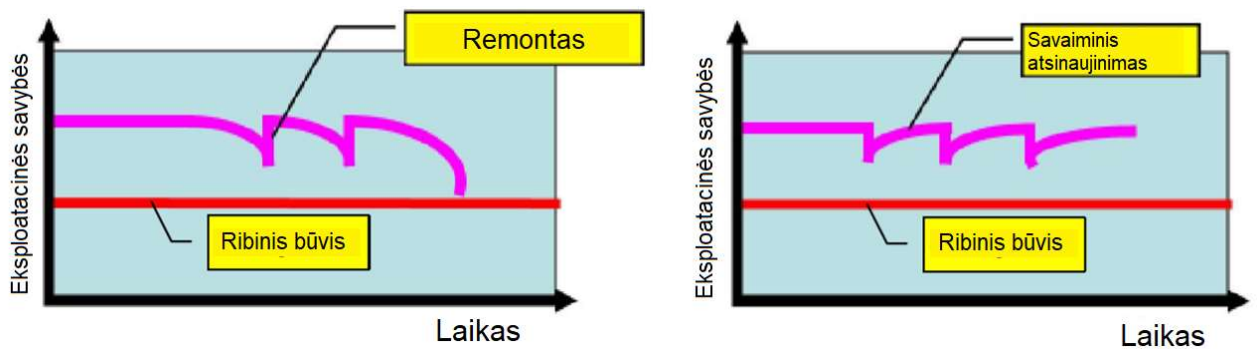
Galiausiai buvo norima sužinoti, kokios yra žinomos priemonės, kurios padėtų apsaugoti betoną nuo defektų atsiradimo. 4 paveiksle pateiktoje diagramoje nurodoma, jog apklausoje daugiausiai buvo pažymimas betono apsauginio sluoksnio didinimas. Nors iš pirmo žvilgsnio tai atrodo protingas ir paprastas sprendimas, tačiau tai labai riboja projektuotojų galimybes armuojant konstrukcijas. Antrasis daugiausiai balsų surinkęs variantas yra betono priedų naudojimas. Užsienio rinka turi platesnį požiūrį į betono priedų naudojimą, todėl šis pasirinkimas užima tokią aukštą vietą. Šios apklausos atsakymai parodo, jog betono sudėtis ir jo priedai turi būti tiriami ir tobulinami tam, kad būtų sutaupyta žmoniškųjų išteklių ir ekonominių sąnaudų.



4 pav. Apklausos rezultatai apie priemones betono defektams sumažinti [22]

Ypatingai aktyviai betoną ardo cheminė agresyvi aplinka, dėl kurios kinta betono struktūra ir jo savybės, mažėja betono stiprumas. Betono atsparumas agresyvios aplinkos poveikiams lemia iš jo pagamintų konstrukcijų ilgaamžiškumą. Viena iš labai dažnai sutinkamų vandens agresyvumo betonui priežasčių yra sulfatų poveikiai. Sulfatų jonų kiekis upių vandenyje gali svyruoti nuo 50 mg/l iki 4000-5000 mg/l mineraliniame vandenyje. Pramonės įmonių nutekamuosiuose vandenyse sulfatų jonų gali būti 5000 – 10000 mg/l. Betoną veikia rūgštūs lietūs, jūros vandenyje esantys sulfatai bei natūraliai dirvoje esantys arba gruntiniame vandenyje ištirpę natrio, kalio, kalcio arba magnio sulfatai. Garuojant nuo betono paviršiaus vandeniui, sulfatai gali akumuliuotis. Jų koncentracija didėja, ir sulfatai gali sukelti betono koroziją. Betono sulfatinė korozija gali vykti ir pramoninės paskirties pastatuose bei nutekamųjų vandenų valymo įrenginiuose, kuriuose vandenų mineralizacijos lygis aukštas [10].

Kadangi visiškai užtikrinti įtrūkimų neatsiradimą betone šiuo metu yra neįmanoma, todėl mokslininkai ieško būdų, kaip užtikrinti savaiminį plyšių užsitaisymą. Betono savybė užtaisyti mikroįtrūkimus esant didelei drėgmei buvo pastebėta jau apie 1920 metus. Kaip nurodo mokslininkas Glanville [5], apie 20 % cemento kiekio tradiciniame betone nesureaguoja, todėl atsivėrus mikroįtrūkimams, šios cemento dalelės hidratuojasi ir užpildo plyšelius. 2006 metais olandų mokslininkai pagaliau pristatė priedą savaiminiam betono atsinaujinimui – bakterijas, kurios maistą perdirba į kalcio karbonatą [7]. Alternatyva bakterijoms yra įvairūs kristaliniai priedai, kurie gaminami naudojant amorfinį SiO₂ turinčius cheminius junginius, kurie sukelia chemines reakcijas, skatinančias plyšių užsivėrimą betone.



5 pav. Konstrukcijų laikomosios galios priklausomybė nuo laiko remontuojant savarankiškai (kairėje) ir savaime atsinaujinančiu betonu (dešinėje) [1]

Būtina paminėti, jog visi šie priedai veikia tik esant ilgalaikiam kontaktui su vandeniu. Sausoje aplinkoje plyšių užsivėrimo procesas praktiškai nevyksta. Šie betono priedai sėkmingai naudojami užsienio šalyse, tačiau neaplenkia ir Lietuvos. Vis dėlto, esminė tokio betono naudojimo problema yra efektyvumo vertinimo standartų ir normatyvų nebuvimas. Nepaisant to, ši problema mokslininkams suteikia galimybę pasižymėti bei tobulinti savo žinias sudarant metodinę medžiagą.

Kita vertus, šiuolaikinio savaime atsinaujinančio betono veikimo galimybės yra ribotos. Tai reiškia, kad neracionalu tikėtis pastatų ir statinių apžiūros, stebėjimo, priežiūros ir remonto visiško atsisakymo. Tačiau dėl šių priedų statybų sektorius gali sutaupyti lėšų, kadangi yra suteikiama galimybė atitolinti reikalingas periodines statinių priežiūras. Svarbu suprasti, kokiomis apimtimis ir kiekiais yra gaminamas betonas bei jo konstrukcijos visame pasaulyje – taip galima apytiksliai numatyti finansų sutaupymo galimybes net menkiausiai patobulinus betono savybes [1].

1.2. Pasaulinė ir Lietuvos statybos inžinerijos mokslo ir praktikos patirtis

Lietuvoje savaime atsinaujinančio betono efektyvumo vertinimas pasižymi moksliniu naujumu, kadangi ši sritis, remiantis esamais straipsniais ir tyrimais lietuvių kalba, yra mažai Lietuvos mokslininkų nagrinėjama tema. Šiuo metu pavyko rasti tik Kauno technologijos universiteto mokslininko dr. Algirdo Augonio pranešimą „Savaime atsinaujinantis betonas ir jo naudojimo perspektyvos“ 2-ojoje respublikinėje konferencijoje „Betonas ir gelžbetonis 2018“.

Kaip jau minėta, savaime atsinaujinančio betono priedai Lietuvos statybų objektuose panaudoti jau ne kartą. Veiksmingumui užtikrinti pakanka naudotis gamintojų nurodymais arba pasinaudoti mokslo įstaigų tyrimų paslaugomis. Kita problema, kuri riboja šių tyrimų informacijos sklaidą, yra konkretaus termino nebuvimas. Anglų kalboje toks betonas vadinamas „self-healing concrete“ – verčiant į lietuvių kalbą šį terminą galime gauti net keletą skirtingų variantų:

- savaime „atsinaujinantis“ betonas;
- savaime „užsitaisantis“ betonas.



6 pav. Daugiabučių gyvenamojo namo pamatai Palangoje: čia betonavimo darbams buvo naudojami kristaliniai priedai, taip pat ir betonuojant visas balkonų plokštes (Arimanto Knašo nuotr.)

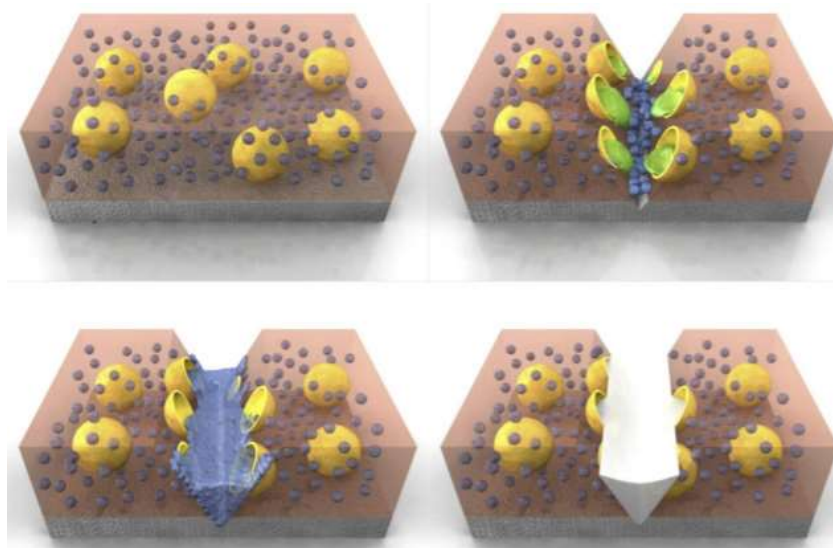
Užsienio šalyse savaime atsinaujinančio betono panaudojimas ir tyrimai vykdomi žymiai platesniu mastu. Bakteriniu pagrindu atsinaujinančio betono pradininku laikomas H. Jonkersas [7] pateikia sekančias charakteristikas, kurias turi atitikti betono priedai plyšių užsitaisymui:

1. galimybė užtaisyti plyšius jų ankstyvojoje stadijoje;
2. turi veikti nepriklausomai nuo betono sudėties ir savarankiškai užverti plyšius;
3. neturėti neigiamos įtakos betono charakteristikoms;
4. ilgalaikio veikimo galimybė, kadangi betoninės ir gelžbetoninės konstrukcijos statomos bent jau 50-ties metų gyvavimo trukmei;
5. turi veikti kaip katalizatorius, plyšių užsitaisymo procesas privalo būti ne vienkartinis;
6. išlaikyti prieinamą konstrukcijų kainą ekonominiu požiūriu.

Nors bakterijų veikimas betono plyšių užtaisymui buvo įrodytas [7], tačiau jis nėra visapusiškai efektyvus. Betono kietėjimo sąlygos apsunkina bakterijų išgyvenimą dėl kelių priežasčių: betone esanti didelio šarminumo aplinka (pH iki 13), aukšta temperatūra gamybos proceso metu, ribotas deguonies kiekis [8].

Šioms problemoms išspręsti mokslininkai rado būdą, kaip bakterijų sporas ir jų maisto medžiagas patalpinti į kapsules, kurios suveiktų tik plyšių atsivėrimo atveju ir kontaktuojant su vandeniu, taip pat padėtų išgyventi netinkamomis aplinkos sąlygomis [11]. Tačiau šis kapsuliavimo metodas ženkliai pabrangina tokio betono priedo kainą, tai atitinkamai sumažina šio produkto populiarumą. Buvo bandoma bakterijas patalpinti įvairiausiose medžiagose: silicio gelyje ir poliuretane [9], keramzite [17, 18], diatomite [12], melamino-formaldehido mikrokapsulėse [2,13], hidrogeliuose [14-16]. Daugelis šių kapsulių neigiamai paveikia gniuždomąjį betono stiprį, ypač jei dozės viršija 1 % cemento masės [3]. Todėl galima daryti išvadą, kad šiuo metu bakterijų kapsuliavimas yra

priskiriamas prie šio plyšių šalinimo priedo trūkumų. Nepaisant to, šis priedas turi pranašumą lyginant su kristaliniiais priedais – jis gali užtaisyti didesnius (iki 1 mm) plyšius.



7 pav. Bakterijų veikimas atsivėrus plyšiui betone [13]

Analizuojant užsienio literatūros šaltinius, ypač mažai kalbama apie kristalinių priedų panaudojimą savaime atsinaujinančiame betone. Manoma, kad taip yra dėl mažesnių šio priedo tobulinimo galimybių, lyginant su bakteriniais priedais. Be to, kristalinių priedų gaminimo būdai bei cheminė sudėtis yra komercinė paslaptis, todėl tai irgi gali būti literatūros nebūvimo priežastimi. Vis dėl to žinoma, jog kristaliniai priedai Lietuvoje yra populiariesni dėl savo prieinamos kainos, nors jų plyšių užtaisymo galimybės menkesnės – iki 0,4 mm plyšio pločio.

Savaime atsinaujinančio betono priedų įtaką konstrukcijų ilgaamžiškumui vertinama atsparumu šildymo-šaldymo ciklams, mechaninių sąvybių atstatymo galimybėmis, vandens pralaidumu ir t.t. Mokslininkai P. Azarsa, R. Gupta, A. Biparva [20], 2019 metais tyrė savaime atsinaujinančio betono su kristaliniiais priedais ilgaamžiškumą ir mechanines tokio betono sąvybes. Priedų cheminė sudėtis nėra žinoma, tačiau nurodoma, kad, pagal rekomendacijas, naudojama 2 % priedo nuo cemento masės. Rezultatų palyginimui gaminami dviejų sudėčių bandiniai – kontroliniai (be priedų) ir su kristaliniiais priedais. Po 28 parų išlaikymo buvo bandomi cilindriniai bandiniai gniuždomojo stiprio nustatymui. 1-oje lentelėje, pateiktoje žemiau, nurodomos šviežio skiedinio sąvybės ir bandinių gniuždomojo stiprio reikšmės. Kaip matome, kristalinių priedų įmaišymas 11 % padidino betono gniuždomąjį stiprį su standartiniu portlandcemenčiu ir 8 % padidino betono gniuždomąjį stiprį su klinties portlandcemenčiu. Manoma, kad šio padidėjimo priežastis gali būti susijusi su užpildymo efektu, t.y. kristaliniai priedai užpildo tuštymas betone arba veikia kaip cemento hidratacijos aktyvatoriai. Taip pat, skiediniai su kristaliniiais priedais parodė mažesnes suslūgimo reikšmes ir padidėjusį oro kiekį procentais. Taip gali būti dėl to, kad kristaliniai priedai yra hidrofiliiniai elementai – turi sąvybę maišymo metu sutraukia vandens molekules, dėl to skiedinys pasidaro mažiau patogus darbui, neleidžia pasišalinti oro poroms.

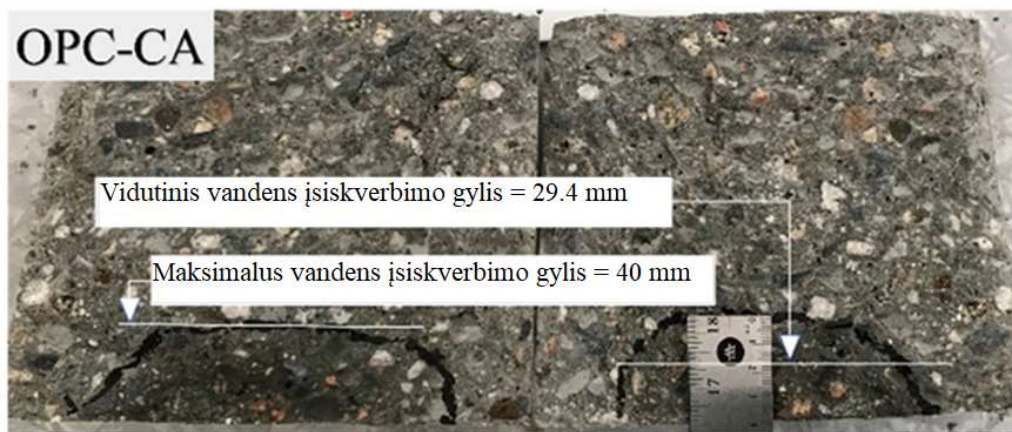
1 lentelė. Betono skiedinio savybės ir gniuždomasis stipris po 28-ių parų [20]

Sudėtis	Skiedinio savybės				Gniuždomasis stipris po 28-ių parų (MPa)
	Suslūgimas (mm)	Oro kiekis (%)	Tankis (kg/m ³)	Temperatūra (°C)	
OPC	130	2.0	2400	21.0	41.54
OPC-CA	110	2.2	2394	21.0	46.35
PLC	130	1.9	2394	20.5	42.07
PLC-CA	85	2.2	2396	21.0	45.62

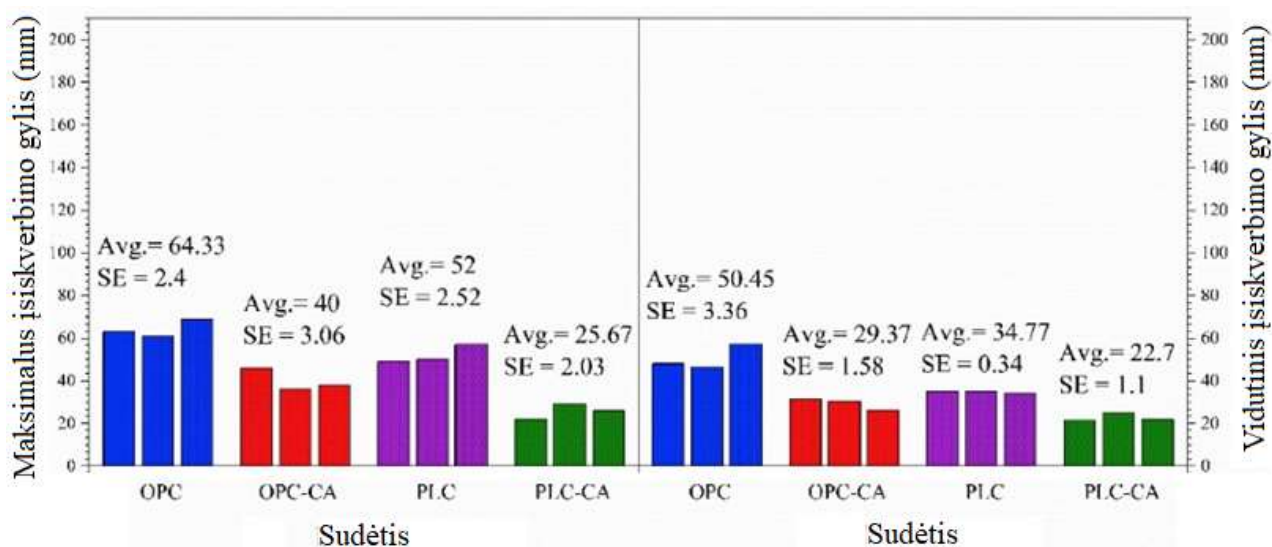
Betono vandens pralaidumas dažniausiai nurodo jo mechaninių savybių prastėjimą ir įtakoja konstrukcijų ilgaamžiškumą. Paprastai, kuo mažesnis betono vandens pralaidumas, tuo didesnis jo ilgaamžiškumas. Su minėtais bandiniais buvo atliekami vandens pralaidumo tyrimai. Jie buvo 72h veikiami hidrostatinio slėgio, o po to perskelti per pusę, kad būtų aiškiai matomas vandens įsiskverbimo gylis į betono bandinius. 8-ame ir 9-ame paveikslėliuose, pateiktuose žemiau, nurodyti maksimalūs ir vidutiniai vandens įsiskverbimo gyiai į bandinius. Pagal pateiktus grafikus 10-ame paveikslėlyje aiškiai matyti, kad kristaliniai priedai apie 40-50% sumažino vandens pralaidumą betone. Tai įrodo šių priedų naudą betono hidroizoliacinėms savybėms gerinti. Pagal Hedegaard ir Hansen [21] mokslinį tyrimą galima teigti, kad betonas laikomas nepralaidžiu vandeniui, kai vandens įsiskverbimo gylis yra mažiau nei 50mm.



8 pav. Vandens įsiskverbimo gylis kontroliniuose bandiniuose [20]



9 pav. Vandens įsiskverbimo gylis bandiniuose su kristaliniais priedais [20]

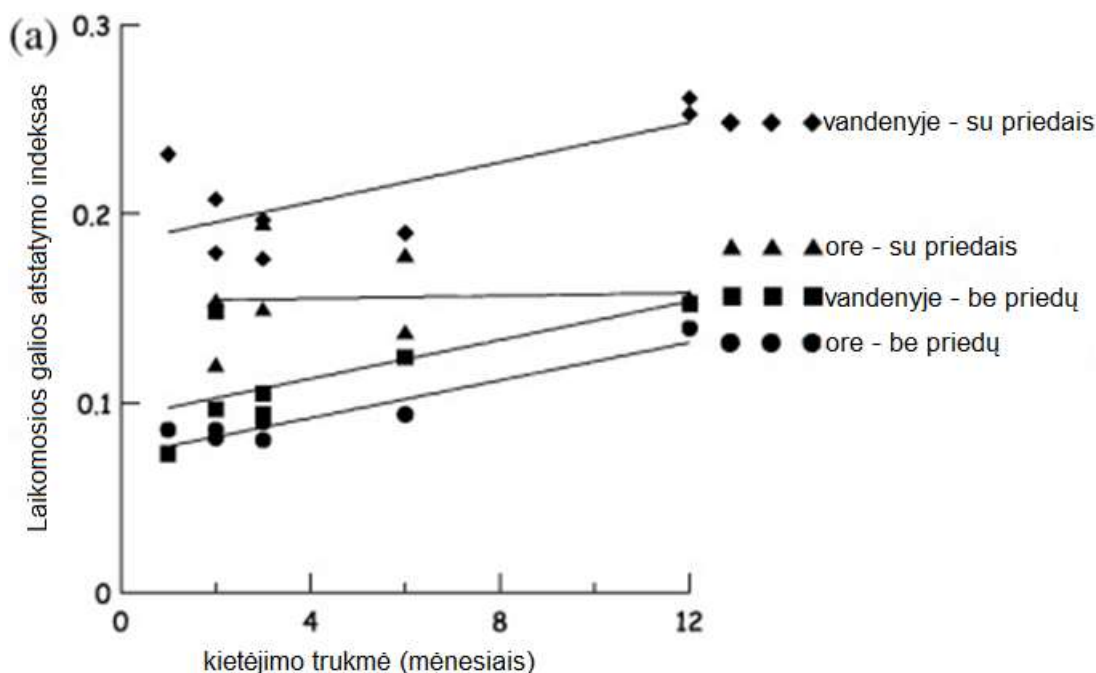


10 pav. Maksimalios ir vidutinės vandens įsiskverbimo gylio reikšmės [20]

Šį teiginį tenkina tik bandiniai su savaime atsinaujinančio betono kristaliniais priedais. Betono su standartiniu portlandcemenčiu vidutinis vandens įsiskverbimo gylis yra 50.45mm, o betono su klinties portlandcemenčiu – 34.77mm. Betonas su standartiniu portlandcemenčiu be kristalinių priedų (OPC žymėjimas) parodė didžiausią vandens pralaidumo gylį, toliau seka betonas su klinties portlandcemenčiu be priedų (PLC žymėjimas), betonas su standartiniu portlandcemenčiu su priedais (OPC-CA žymėjimas) ir betonas su klinties portlandcemenčiu su priedais (PLC-CA žymėjimas).

Atliekant tyrimus apie savaime atsinaujinančio betono plyšių užvėrimą buvo pastebėta ypatybė dalinai atstatyti mechanines savybes, kurios prarandamos dėl plyšių atsivėrimo. Mokslininkai L. Ferrara, V. Krelani, M. Carsana [21] atliko detalesnius tyrimus šiai ypatybei įvertinti. Vertinimas atliekamas testuojant bandinius tritaškio lenkimo bandyme. Gaminami kontroliniai bandiniai be kristalinių priedų ir bandiniai su priedais. Bandiniams pilnai sukietėjus, tritaškio lenkimo staklėse dirbtiniai sukuriama mikroplyšiai, kurių užsitaisymas bus stebimas. Dalis bandinių buvo palikti nesupleišę, tam, kad būtų galima nustatyti projektinį betono stiprumą. Pagal 11-ame paveikslėlyje pateiktą priklausomybės grafiką matyti, jog vandenyje mirkyti bandiniai su kristaliniais priedais atgavo didesnę dalį laikomosios galios ir standumo, lyginant su bandiniais be kristalinių priedų. Ore kietėjusių bandinių plyšių užsitaisymas vyko žymiai ilgiau ir mechaninės savybės atsistatė ne taip

žymiai. Tai dar kart patvirtina teiginį, jog pilnavertis savaime atsinaujinančio betono priedo veikimas vyksta tik esant ilgalaikiam kontaktui su vandeniu. Taip pat, šis tyrimas įrodo, jog priedai padeda iš dalies atstatyti mechanines savybes, o tai tiesiogiai proporcinga konstrukcijos ilgalaikiškumo atstatymui.

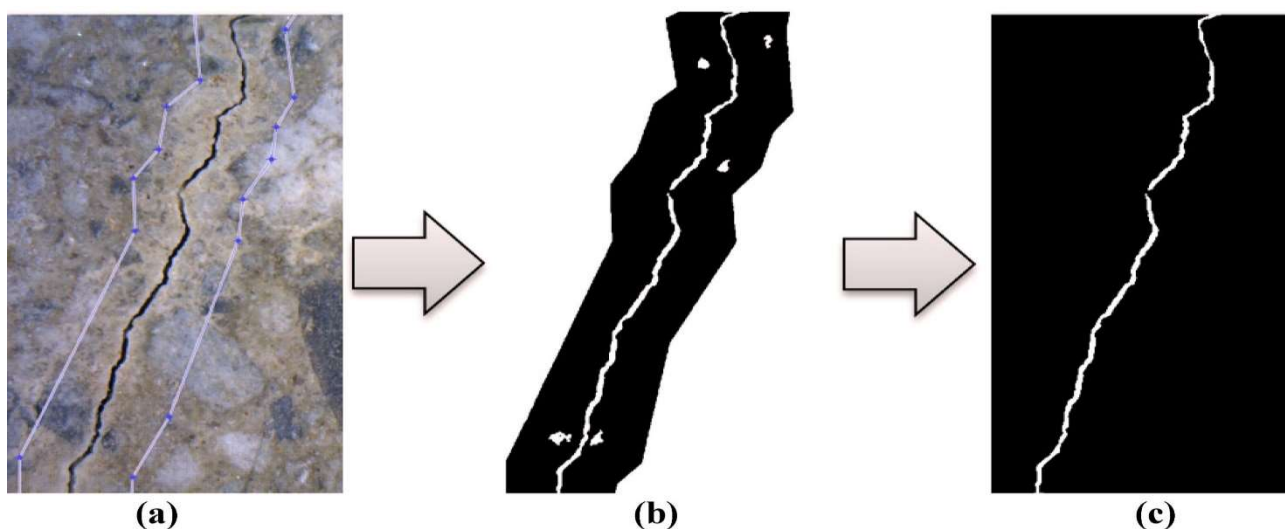


11 pav. Bandinių laikomosios galios atstatymo priklausomybė nuo laiko [21]

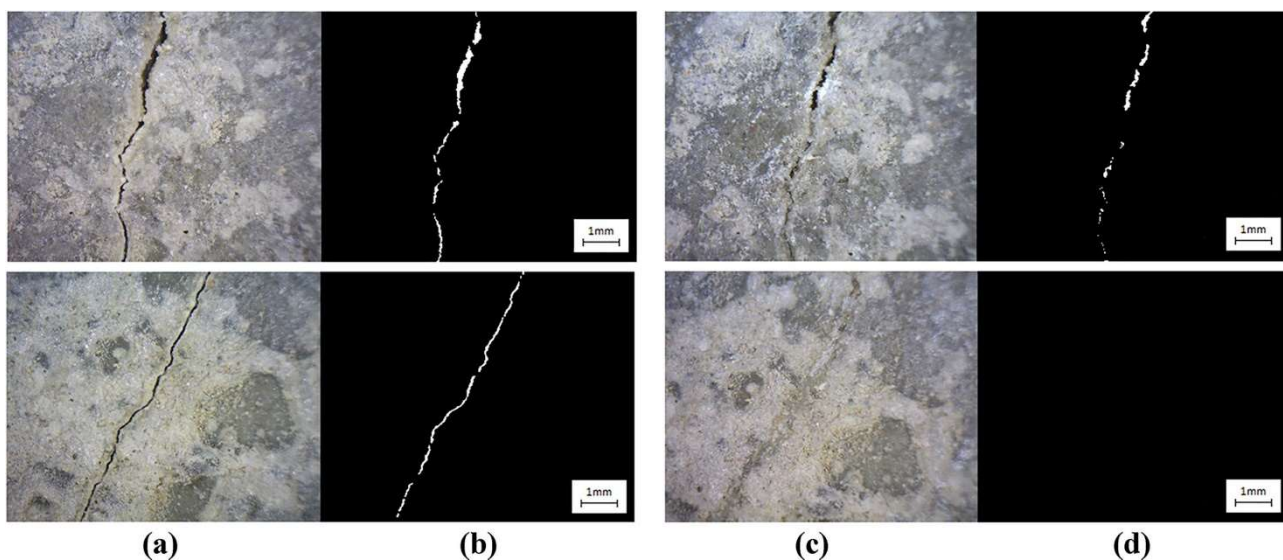
Apie vaizdų analizės metodų panaudojimą betono plyšiams įvertinti rašo mokslininkai E. Cuenca, A. Tejedor, L. Ferrara [23]. Per pastarąjį dešimtmetį patobulinius fotogrametrinius ir vaizdų analizės metodus, buvo sukurti keli įtrūkimų aptikimo ir charakterizavimo algoritmai [24]. Šios procedūros gali išvesti aukšto tikslumo rezultatus, ypač paviršiams su vienalyčia tekstūra ir apšvietimu [25]. Aptikimo algoritmas pradedamas taikyti filtrais, kurie išlygina defektus ir sustiprina kraštus. Vėliau taikoma procedūra, leidžianti atpažinti įtrūkimą. Ryškiausi metodai šiandien yra vadinamieji binarizacijos algoritmai [26]. Šie metodai klasifikuoja kiekvieną tašką į dvi kategorijas; balta arba juoda (įtrūkimai arba paviršius be įtrūkimų), remiantis radiometrinės ribos apibrėžimu [27]. Šio proceso rezultatas vadinamas „segmentiniu vaizdu“. Keli autoriai, tokie kaip [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], pasinaudojo šiais skaitmeninio vaizdo apdorojimo metodais plyšių betone aptikimui ir kiekybiniam įvertinimui. Procedūra turi būti pritaikyta atsižvelgiant į reikalingus rezultatus: įtrūkimo plotį, ilgį, gylį ar plotą, kurie dažniausiai naudojami plyšių pokyčiui tirti. Vaizdų analizės metodu nustatytų įtrūkimų parametų tikslumas svyruoja nuo 75% iki 95%, palyginti su rankiniais matavimais [24].

Savaiminio užsitaisymo efektyvumą reikia įvertinti nuo plyšio užsitaisymo kiekybinio įvertinimo, palyginant plyšio parametrus prieš ir po užgijimo. Dėl netaisyklingos plyšio formos sumažėja taškinių matavimų tikslumas (pvz., rankinis plyšio pločio matavimas). Kita vertus, pagrindinis vaizdo apdorojimo pranašumas yra tai, kad leidžiama nuolat vertinti pasirinktą parametą visame plyšio ilgyje. Norint išmatuoti savaiminį betono užgijimą keliomis skirtingomis sąlygomis, reikia nustatyti įtrūkimo plotį ar jo paviršių ir palyginti jį skirtingais gijimo proceso etapais.

Siekiant išskirti įtrūkimo vietą iš kiekvieno paveikslėlio, MATLAB programoje buvo įdiegta pusiau automatinė sistema. Vaizdo apdorojimo metodas grindžiamas trimis pagrindiniais etapais: išankstiniu vaizdo apdorojimu, vaizdo dvejetainiu formavimu ir nereikalingos aplinkos pašalinimu. 12 paveiksle parodyta siūloma metodika. Pradinis apdorojimas pradedamas konvertuojant atvaizdą iš RGB (spalvų maišymo sistema: raudona, žalia, mėlyna) į juodai-baltos spalvos ir pasirinkus sritį, kurioje yra plyšys (12a pav.). Taip galima išvengti nereikšmingų paviršiaus defektų, pavyzdžiui antrinių įtrūkimų. Vėliau, siekiant sumažinti vaizdo triukšmą, taikomas žemų dažnių filtras. Tuomet atvaizduojamas dvejetainis vaizdas (12b pav.), kuriame kiekvienam pikseliui priskiriama viena iš dviejų galimų verčių: „1“ įtrūkimui priklausantiems vaizdo elementams arba „0“ tiems pikseliams, kurie nėra įtrūkimo vietoje. 13 paveiksle parodytas įtrūkimų palyginimas. Vaizdas išanalizuotas pagal aukščiau aprašytą metodiką, atvėrus plyšius (13a-b pav.) ir po užgijimo (13c-d pav.).



12 pav. Vaizdo apdorojimas plyšiams nustatyti: (a) įtrūkimų srities apibrėžimas, b) vaizdo binarizacijos išvestis, c) galutinė išvestis. [23]



13 pav. a) Originalus vaizdas su įtrūkimu. b) Dvejetainis vaizdas su įtrūkimu. c) Originalus vaizdas užgijimo. d) Dvejetainis vaizdas po užgijimo [23].

Buvo sukurta duomenų bazė, kurioje yra daugiau nei 6300 vaizdų. Vėlesnė duomenų analizė leido nustatyti plyšių užgydymo galimybes atsižvelgiant į kiekvieną reikšmingą kintamąjį (pvz.: aplinkos poveikį ir mišinio sudėtį).

Kaip jau minėta, bandiniai buvo fotografuojami skaitmeniniu mikroskopu plyšių užgijimo pradžioje ir pabaigoje. Įtrūkimų sandarumas buvo įvertintas nustatant plyšių paviršiaus užsivėrimą. Plyšių užsivėrimas vertinamas procentais po kiekvieno matavimo laikotarpio ir yra vadinamas užsitaismo indeksu. Jis apskaičiuojamas:

$$S.I.^j_i = \frac{\sum_1^8 CA_{i,cracked}^{j-1} - \sum_1^8 CA_{i,healed}^j}{\sum_1^8 CA_{i,cracked}^{j-1}} \cdot 100 \quad (1)$$

čia: S.I. – užsitaismo indeksas, %

$\sum_1^8 CA_{i,cracked}^{j-1}$ – įtrūkimo ploto suma 8-iose bandinio nuotraukose, padarytose iškart po plyšio atvėrimo;

$\sum_1^8 CA_{i,healed}^j$ – įtrūkimo ploto suma 8-iose bandinio nuotraukose, padarytose po plyšio užgijimo;

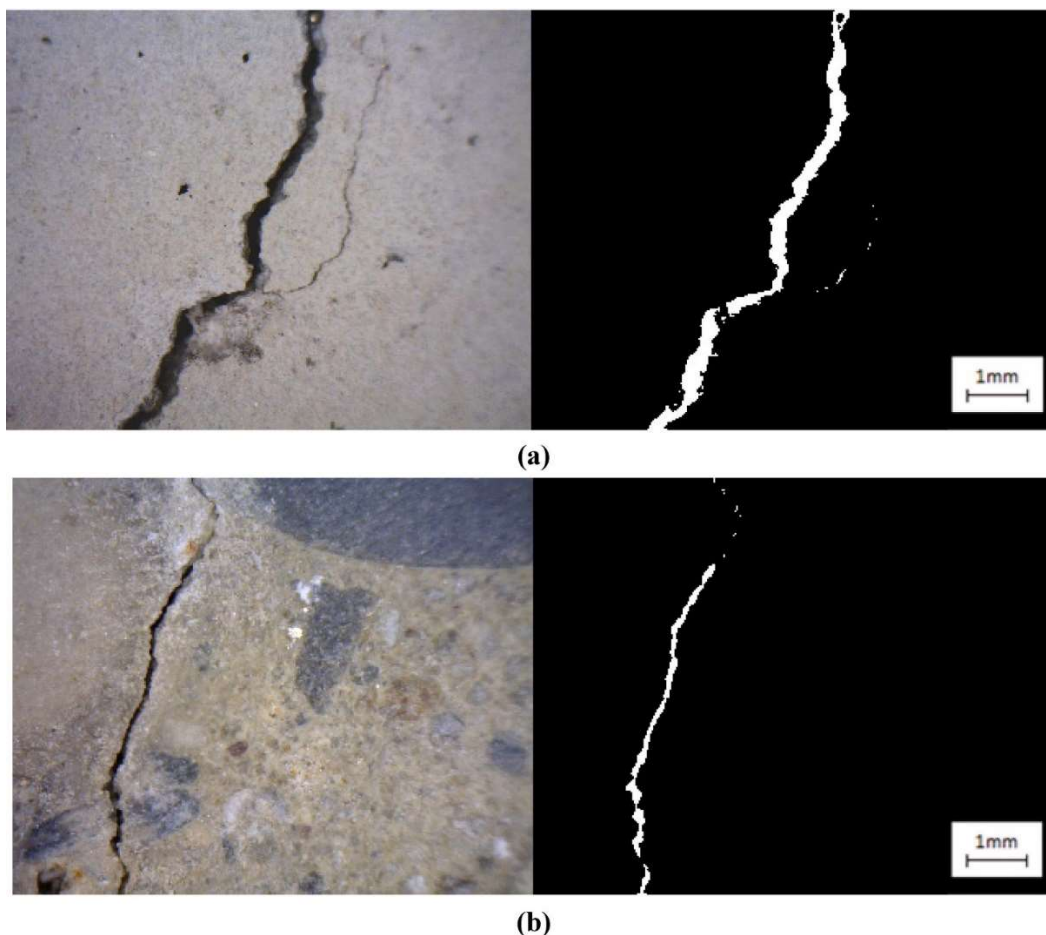
Stebint įtrūkimus viso bandymo laikotarpiu buvo siekiama įvertinti kelių kintamųjų įtaką savaiminio užsitaismo reiškiniams. Plyšius, kurių plotis yra didesnis nei 0,20 mm, sunku visiškai užsandarinti. Be to, naudojamas vaizdo apdorojimo metodas tampa ne toks efektyvus, jei įtrūkimo plotis yra didesnis nei 0,50 mm. Tokiais atvejais, palyginti su mažesniais įtrūkimais, vidinių įtrūkimo paviršius yra ryškesnis, ir tai gali apsunkinti automatizavimo procesą dėl to, kad šviesa atsispindi nuo plyšio vidinio paviršiaus ir taip trikdo tinkama vaizdo binarizacija (14 pav.). Kita priežastis, dėl kurios pradinis plyšio plotis buvo įtrauktas kaip užsitaismo įtakos parametras, yra susijusi su mišinio sudėtimi. Visų pirma, buvo svarbu nustatyti, ar kristalinis priedas pagerina savaiminio užsitaismo galimybes lyginant su etaloniniu betonu (be kristalinių priedų), esant mažiems ir (arba) dideliems įtrūkimams.



14 pav. Šviesos atspindys įtrūkimo vidiniuose paviršiuose [23]

Norint įvertinti plyšių užgydymo efektyvumo priklausomybę nuo plyšio pločio, buvo pasiūlytas toks vaizdų analizės duomenų išdėstymas. Visas duomenų rinkinys buvo išskaidytas į tris skirtingas kategorijas: didelius plyšius, vidutinius plyšius ir mažus plyšius. Išmatavus vidutinį didžiausio

įtrūkimo plotį kiekvienoje iš kategorijų, šias kategorijas galima suderinti su tam tikru plyšio pločio intervalu. Pirmoji grupė svyruoja nuo maždaug 2,5 mm įtrūkimo pločio, kuris atitinka didžiausią išmatuotą vertę, iki maždaug 0,3 mm (didžiausias įtrūkimo plotis, kurį paprastai leidžia projektavimo normos). Antroje grupėje yra įtrūkimai nuo maždaug 0,3 mm pločio, kaip parodyta 15a pav., iki 0,15 mm, tai yra ir grupės, turinčios mažiausius įtrūkimus, didžiausias plotis, parodytas 15b pav. Įtrūkimo plotis nuo 0,15 iki 0,3 mm paprastai leidžiamas eksploataavimo sąlygomis, tuo tarpu labai agresyvioje aplinkoje plyšių plotis neturėtų viršyti 0,15 mm.



15 pav. Vaizdai, atitinkantys didžiausią plyšio plotį turinčius įtrūkimus, yra: a) vidutiniai įtrūkimai (0,30–0,15 mm) ir b) maži įtrūkimai (<0,15 mm) [23].

Išanalizavus Lietuvos bei užsienio literatūrą nustatyta, jog:

- bakteriniai priedai turi didesnę plyšių užgydymo potencialą, tačiau bakterijoms yra nepalankūs pH svyravimai, kapsuliavimas žymiai pabrangina produktą;
- kristaliniai priedai turi mažesnę plyšių užgydymo potencialą, tačiau yra populiariesni dėl savo kainos ir žymiai dažniau naudojami praktikoje;
- mažai tyrimų apie kristalinių priedų efektyvumą, neatsikleidžiama cheminė sudėtis, todėl sunku palyginti gautus rezultatus;

1.3. COST „Savaiminis užsitaishymas – kaip prevencinis betono konstrukcijų remontas“

COST – Europos tarpvyriausybinis bendradarbiavimas mokslo ir technologijų srityje (angl. European Cooperation in Science and Technology). COST bendradarbiavime dalyvauja 39 valstybės. Lietuvos

dalyvavimą COST administruoja Lietuvos mokslo taryba. COST tikslas – remti Europos valstybių tyrėjų bendradarbiavimą visose mokslinių tyrimų srityse, kuriant tarptautinius bendradarbiavimo tinklus. COST asociacija suteikia bendradarbiavimo galimybes tyrėjams ir novatoriams, siekiant sustiprinti Europos gebėjimą spręsti mokslo, technologijų ir visuomenės problemas.

Pirminis šio COST CA15202 projekto tikslas yra palyginti betono plyšių užsitaismo galimybes su metodais, naudojamais esamiems betono elementams taisyti. Nepaisant perspektyvių sukurtų užsitaismo technologijų potencialo, jos gali būti konkurencingos alternatyvos tik tada, kai bus sukurti pagrįsti ir palyginamieji charakteristikų įvertinimo būdai, skirti atlikti veiksmingumo patikrinimą. Tolimesnis dėmesys skiriamas gydomųjų mechanizmų, naudojamų skirtinguose projektuose, modeliavimui ir numatant šių metodų suteikiamą tarnavimo laiko padidėjimą.

„SARCOS COST“ projektui vadovauja tyrimų institucijos, ieškančios skirtingų savaiminio užsitaismo technologijų ir remonto sprendimų tam, kad pratęsti naujų ir esamų betoninių konstrukcijų tarnavimo laiką, taip pat turinčios didelę patirtį charakteristikų formavime. Be to, prie projekto įgyvendinimo prisideda užsitaismo mechanizmų modeliavimo specialistai ir gyvavimo ciklo modeliavimo ekspertai. Ši kompozicija suteikia tvirtą pagrindą pažangiems ir tvariems sprendimams, prailginantiems betoninių konstrukcijų tarnavimo laiką, įgyvendinti.

2. Tyrimams naudotos medžiagos ir metodikos

Šiame skyriuje aprašomos bandinių paruošime naudotos medžiagos, bandinių formavimas, bandymams naudota įranga ir metodikos, kuriomis remiantis buvo atliekami eksperimentiniai bandymai. Pateiktos betono skiedinio sudėtys.

2.1. Naudotos medžiagos

Tyrimuose naudotų bandinių formavimui panaudotas portlandcementis Rocket M-600 CEM I 42,5R, kurio cheminė sudėtis ir fizikinės, mechaninės savybės pateikiamos atitinkamai 2-oje ir 3-oje lentelėse žemiau. Nurodytas cementas atitinka LST EN 197-1 standarto reikalavimus.

2 lentelė. Portlandcemenčio cheminė sudėtis (pagal gamintojo duomenis)

Cheminė sudėtis	Kiekis, %
SiO ₂	21,01
Al ₂ O ₃	5,39
Fe ₂ O ₃	3,23
CaO	62,11
MgO	1,98
Na ₂ O	0,38
K ₂ O	0,82
SO ₃	3,1

3 lentelė. Portlandcemenčio fizikinės ir mechaninės savybės (pagal gamintojo duomenis)

Cemento savybės	
Savitasis paviršius, cm ² /g	3307
Rišimosi pradžia, min	216
Rišimosi pabaiga, min	291
Gniuždomasis stipris po 2 parų, MPa	26,7
Gniuždomasis stipris po 28 parų, MPa	55,7
Tankis, g/cm ³	3,1
Vandens sąnaudos, %	27,7

Savaime atsinaujinančio betono bandiniams formuoti naudojami dviejų skirtingų gamintojų kristaliniai priedai, taip pat aukštakrosnių šlakas, kad nustatyti jo panaudojimo galimybes plyšių užgydymui. Kristalinių priedų kiekis betono mišinyje yra 1% nuo cemento kiekio mišinyje. Naudojant aukštakrosnių šlaką, jis pakeičia 20% cemento kiekio mišinyje. Jo cheminė sudėtis pateikta 4-oje lentelėje.

4 lentelė. Aukštakrosnių šlako cheminė sudėtis

Cheminė sudėtis	Kiekis, %
SiO ₂	35,48
Al ₂ O ₃	6,33
Fe ₂ O ₃	1,11
CaO	48,88
MgO	5,36
Na ₂ O	0,29
K ₂ O	0,45
SO ₃	1,99

Naudojamas superplastiklis Sika ViscoCrete-D187, kurio techniniai duomenys pateikti 5-oje lentelėje žemiau. Pagamintas polikarboksilato pagrindu.

5 lentelė. Superplastiklio savybės

Superplastiklio savybės	
Tankis, kg/l	1,08
pH vertė	4,3
Sausoji liekana, %	35
Dozavimas, % (nuo cemento masės)	0,2-1,5%

Užpildams naudojami 0/4mm frakcijos smėlis ir 4/16mm frakcijos žvirgždas.

Panaudotos plienės fibros Hendix Prime 60/32 lenktais galais. Pagrindinės savybės pateiktos 6-oje lentelėje.

6 lentelė. Plieninių fibrų techninės savybės

Plieninių fibrų savybės	
Plaušo storis, mm	0,6±0,04
Plaušo ilgis, mm	32±1,5
Lenktų galų ilgis, mm	2,0±1,0
Užlenkimo aukštis, mm	21,7±0,3
Lenkimo kampas, °	40±5,0
Atsparumas tempimui, MPa	1450
Atsparumas deformacijai, MPa	≥190000

2.2. Betono mišinio sudėtys ir suformavimas

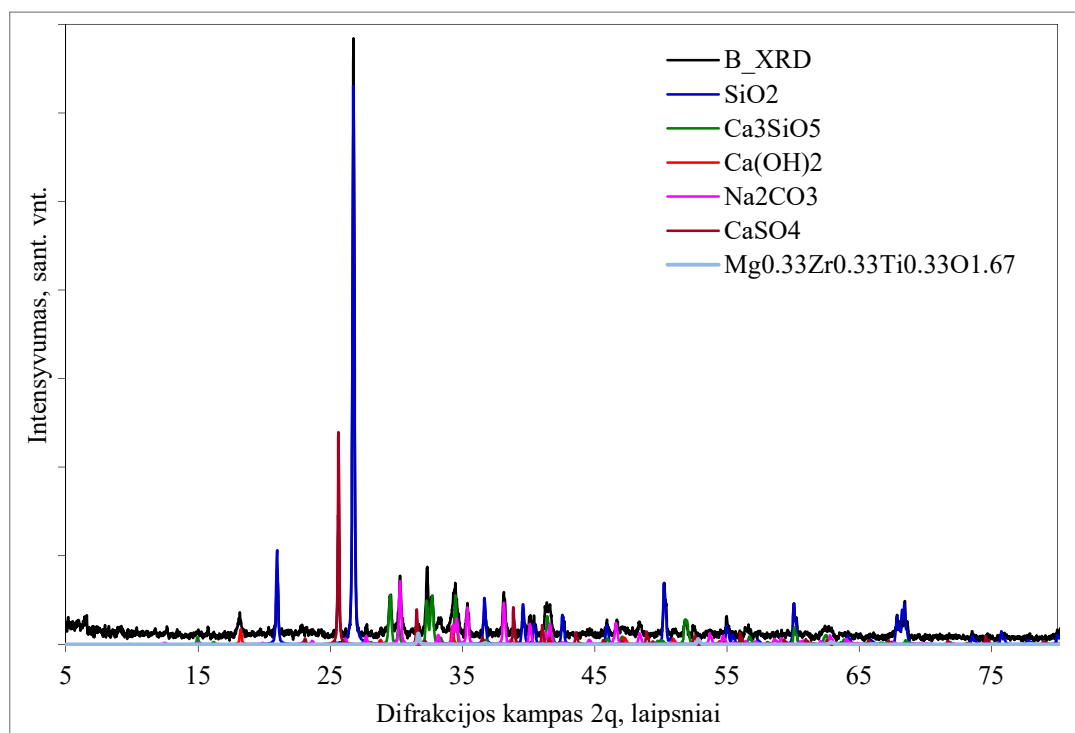
Formuojant kontrolinius ir tiriamuosius bandinius buvo naudojami sausi užpildai. Visos medžiagos buvo dozuojamos masės vienetais. Maišymas atliekamas laboratorinėje maišyklėje – iš pradžių supilama pusė vandens kiekio, sausi užpildai ir maišoma 1 minutę. Sumaišius laukiama 1,5 minutės. Tada dedamas cementas (ir kristalinis priedas, jei maišoma pagal sudėtį su priedais) ir pradedamas maišymas, kuris trunka 2 minutes. Jo metu supilamas likęs vandens kiekis ir superplastiklis. Paruošus betono skiedinį, šis supilamas į tam tikras metalines formas, kurios prieš tai buvo išteptos specialiu

tepalu, kad būtų lengviau išformuoti sukietėjusius bandinius. Kietinimas formose trunka vieną parą, laikoma 20 ± 2 °C temperatūroje, ore. Po paros bandiniai išimami iš formų.

Bandiniai gaminami pagal tris sudėtis, kurios pateiktos 7-oje lentelėje. Bandiniams su priedais buvo naudojami du skirtingi kristaliniai priedai, kad gauti palyginamuosius rezultatus ir didesnę rezultatų sklaidą. Kiekviena sudėtis turi po vienodą skaičių tam tikros formos bandinių, kurių rezultatai bus lyginami tarpusavyje atlikus eksperimentinius tyrimus. Bandinių formos ir kiekiai pateikti 8-oje lentelėje. 16 ir 17 paveikslėliuose, pateiktuose žemiau, matomos atitinkamai „B“ ir „S“ kristalinių priedų cheminės sudėtys, nustatytos atlikus rentgeno spindulių difrakciją.

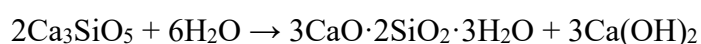
7 lentelė. Betono skiedinio sudėtys, 1m^3 betono pagaminti

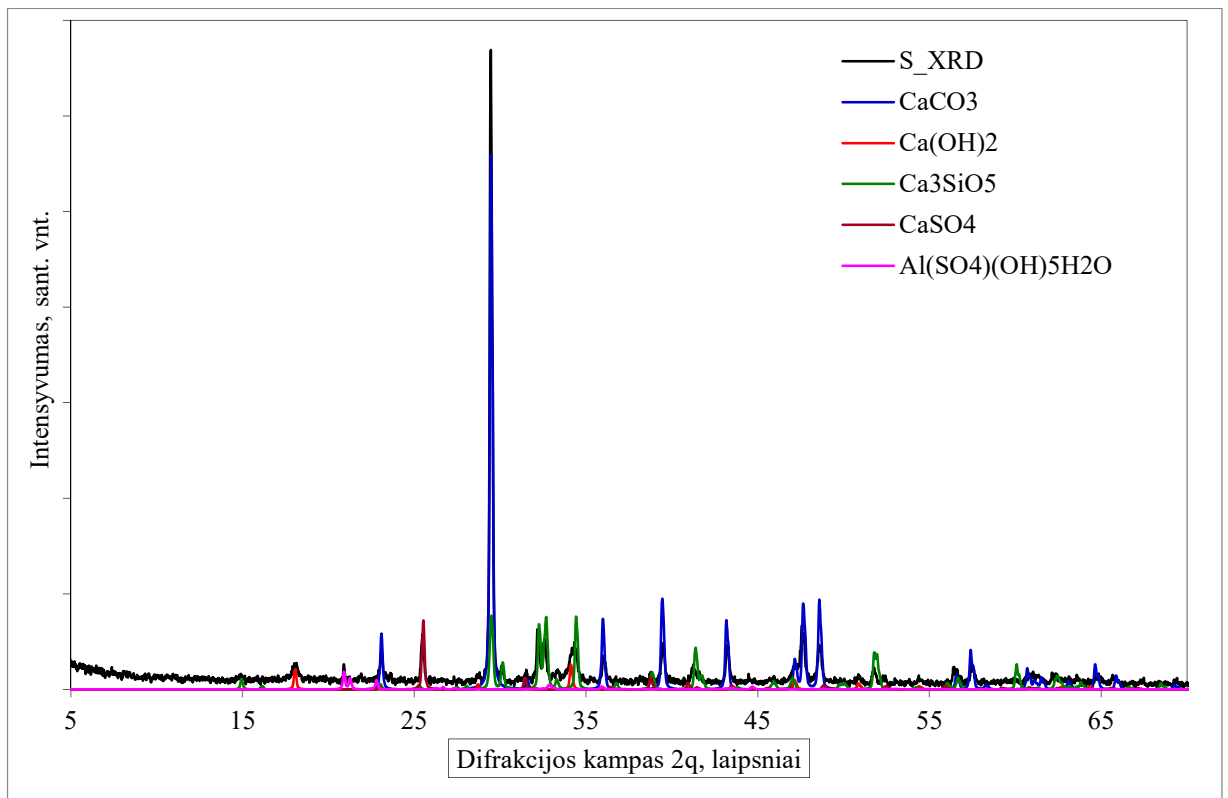
Sudėtis žymuo	Cementas, kg	V/C	Vanduo, kg	Stambus užpildas, kg	Smulkus užpildas, kg	Superplastiklis 0,7% cemento masės, kg	Kristalinis priedas 1% cemento masės, kg
K	350	0,45	157,5	990	890	2,45	-
B	350	0,45	157,5	990	890	2,45	3,5
S	350	0,45	157,5	990	890	2,45	3,5



16 pav. „B“ kristalinio priedo XRD analizė

„B“ kristalinio priedo sudėtyje vyrauja SiO_2 (kvarcas), kuris sumaltas iki nano dalelių padeda greičiau susiformuoti kalcio hidrosilikatų gelį – pagrindinį portlandcemenčio hidratacijos reakcijos produktą. Taip pat svarbus Ca_3SiO_5 (trikalčio silikatas arba alitas), kuris yra vienas pagrindinių cemento mineralų. Alitas greitai kietėja ir įgauna didelį stiprį. Reaguodamas su vandeniu sudaro $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (kalcio hidroksidas arba portlanditas), kuris dalyvauja plyšių užsitaisyme:





17 pav. „S“ kristalinio priedo XRD analizė

„S“ kristalinio priedo sudėtis panaši, tačiau papildomai dedama ir daugiausia aptikta CaCO_3 (kalcio karbonatas arba kalcitas), kuris yra pagrindinis elementas užtaisantis atsiradusius plyšius. Atvirkščiai nei „B“ priede, nėra dedama SiO_2 (kvarco).

8 lentelė. Bandinių kiekių specifikacija

Kontrolinė sudėtis		
Bandinio matmenys, cm	Bandinių kiekis, vnt.	Panaudojimo tikslas
15x15x15	6	Plyšių užgydymo efektas tirpaluose
10x10x10	6	Betono gniuždomojo stiprio nustatymas
7,5x7,5x25	3	Betono susitraukimo deformacijų matavimas
10x10x40	2	Betono susitraukimo plyšių užgydymas gelžbetoniniame elemente

Kristalinio priedo "B" sudėtis		
Bandinio matmenys, cm	Bandinių kiekis, vnt.	Panaudojimo tikslas
15x15x15	6	Plyšių užgydymo efektas tirpaluose
10x10x10	6	Betono gniuždomojo stiprio nustatymas
7,5x7,5x25	3	Betono susitraukimo deformacijų matavimas
10x10x40	2	Betono susitraukimo plyšių užgydymas gelžbetoniniame elemente

Kristalinio priedo "S" sudėtis		
Bandinio matmenys, cm	Bandinių kiekis, vnt.	Panaudojimo tikslas
15x15x15	6	Plyšių užgydymo efektas tirpaluose
10x10x10	6	Betono gniuždomojo stiprio nustatymas
7,5x7,5x25	3	Betono susitraukimo deformacijų matavimas
10x10x40	2	Betono susitraukimo plyšių užgydymas gelžbetoniniame elemente

COST projektui naudojamos kitokios betono skiedinio sudėty, pateiktos 9-oje lentelėje. Papildomai dedamos plieninės fibros ir vietoje kristalinio priedo naudojamas aukštakrosnių šlakas. Maišymas atliekamas tokia pačia, prieš tai aprašyta, eiga. Paruoštas skiedinys supilamas į cilindrinės Ø10x20cm formas. Bandiniai išformuojami po paros kietėjimo, 28 paras laikomi režiminėje kameroje kurioje palaikomas 95% santykinis oro drėgnumas ir 20±2 °C temperatūra.

9 lentelė. COST projekto betono skiedinio sudėtis, 1m³ betono pagaminti

Sudėties žymuo	Cementas, kg	V/C	Vanduo, kg	Stambus užpildas, kg	Smulkus užpildas, kg	Fibros, kg	Superplastiklis, l	Šlakas, kg
Be šlako	300	0,55	165	1050	900	30	3	-
Su šlaku	240	0,55	165	1050	900	30	3	60

2.3. Betoninių ir gelžbetoninių bandinių bandymų metodikos

2.3.1. Betono fizikinių ir mechaninių savybių nustatymo metodikos

Pirmieji fizikinių ir mechaninių savybių tyrimai atliekami po paros kietėjimo, išėmus bandinius iš formų. Iš fizikinių savybių, nustatomos susitraukimo deformacijos, o iš mechaninių savybių – gniuždomasis stipris. Sekantys matavimai atliekami po 7-ių ir 28-ių parų. Bandiniai naudojami gniuždomojo stiprio nustatymui yra laikomi vandenyje, o susitraukimo deformacijų nustatymui – ore.

Susitraukimo deformacijos matuojamos Helios-Preisser indikatoriumi (18 paveikslas), prieš kiekvieną matavimą kalibruojant nulinę vertę. Matavimas laikomas teisingu, kai bandinį keletą kartų pasukus aplink ašį, rodmenys nepasikeičia daugiau nei $\pm 0,001$ mm.

Gniuždomojo stiprio matavimas atliekamas PILOT4 hidrauliniu presu (19 paveikslas), apkrovimo greitis 0,6 MPa/s ($N/mm^2/s$). Prieš atliekant gniuždymą, bandinių matmenys yra išmatuojami slankmačiu, kad nustatyti gniuždymo plotą. Fiksuojama kiekvieno bandinio ardančioji jėga, tada gniuždomasis stipris skaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

čia: f_c – gniuždymo stipris, MPa (N/mm^2);

F – didžiausia ardomoji jėga, N;

A_c – gniuždymo plotas (bandinio skerspjūvio plotas, kurį veikė gniuždymo jėga), mm^2 .



18 pav. Susitraukimo deformacijų indikatorius



19 pav. PILOT4 hidraulinis presas

2.3.2. Plyšių užsitaisymo efektyvumo vertinimo metodika visiškai perskėlus bandinius

Plyšių užsitaisymo efektyvumas vertinamas remiantis dvejomis metodikomis. Nagrinėtoje užsienio literatūroje bandymai atliekami naudojant kubelius, kuriuose po 28-ių parų kietėjimo mechanškai atveriami plyšiai skeliant bandinius pusiau gniuždymo presu (20 ir 21 paveikslai). Vėliau šie bandiniai suspaudžiami apkabomis taip, kad susidarytų paviršinis $\sim 0,3$ mm plyšys (22 paveikslas). Užsitaisymo efektyvumo vertinimas atliekamas išmatuojant prabėgusio vandens kiekį pro plyšį per 5 minutes. Tuo tikslu ant bandinių, virš plyšio, klijuojami $\varnothing 10 \times 75$ cm plastikiniai vamzdžiai, į kuriuos bus pilamas matavimui skirtas vanduo (23 paveikslas).

Plyšių užsitaismui bandiniai laikomi vonelėse su skirtingais tirpalais:

- įprastas vanduo;
- jūros vanduo;
- 3% chloridų koncentracijos tirpalas;
- 6% chloridų koncentracijos tirpalas;

Šie tirpalai pagaminti imituojant natūralioje aplinkoje esančius cheminius veiksnius. Naudojamas jūros vanduo paimtas iš Baltijos jūros, ties Karkle, Klaipėdos apskrityje. Chloridų tirpalų gamyboje panaudotas Lietuvos kelininkų mišinys, naudojamas kelių barstymui žiemą.

Vandens prabėgimo matavimai atliekami po 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 parų. Plyšio užsitaismo efektyvumas skaičiuojamas pagal formulę:

$$SE = \frac{V_{pradinis} - V_{užtaisyto(t)}}{V_{pradinis}} \cdot 100\% \quad (3)$$

čia: SE – plyšio užsitaismo efektyvumas, %;

$V_{pradinis}$ – bandinio pradinis prabėgusio vandens kiekis, g;

$V_{užgydyto(t)}$ – užsitaissiusio bandinio prabėgusio vandens kiekis po parų t, g.



20 pav. Bandinių skėlimas gniuždymo presu



21 pav. Bandiniai po skėlimo



22 pav. 0,3mm pločio plyšio suformavimas



23 pav. Vamzdžio ir bandinių sandarinimas

2.3.3. Plyšių užsitaisymo efektyvumo vertinimo metodika nepilnai perskėlus bandiniams

Dalyvaujant COST asociacijos projekte, buvo pristatyta kiek kitokia metodika. Užsitaisymo efektyvumui nustatyti naudojami $\text{Ø}100 \times 200 \text{ mm}$ cilindriniai bandiniai, kurie pilnai sukietėjus supjaustomi į $\text{Ø}100 \times 50 \text{ mm}$ dydžio bandinius (24 paveikslas). Prieš suformuojant plyšius, vienoje bandinio plokštumoje daroma įpjova, tam, kad plyšys susiformuotų būtent toje vietoje (25 paveikslas). Tačiau šiuo atveju, atveriant plyšius, bandiniai nėra visiškai skeliami pusiau. Plyšių atvėrimui sumažinamas apkrovimo greitis iki $0,002 \text{ MPa/s}$ ($\text{N mm}^2/\text{s}$) ir plyšio plotis yra kontroliuojamas visą gniuždymo laiką matuojant mikroskopu. Kai plyšio plotis pasiekia $\sim 0,5 \text{ mm}$, apkrovimas yra stabdomas, tada bandinyje lieka $0,2\text{-}0,3 \text{ mm}$ pločio plyšys (26 paveikslas). Verta paminėti, kad šiose betono sudėtyse yra naudojamos metalinės fibros, kurios taip pat padeda kontroliuoti plyšį, neleidžia bandiniui staigiai suirti.

Užsitaisymo efektyvumo nustatymo procesas yra analogiškas jau minėtam. Sudarius plyšius klijuojami vamzdžiai ir matuojamas pirminis prabėgusio vandens kiekis, tada bandiniai dedami į vandens vones ir laikomi 28 paras. Praėjus šiam laikui, vėl matuojamas prabėgusio vandens kiekis.



24 pav. Cilindrai supjaustyti į reikiamo dydžio bandinius



25 pav. Įpjovos bandiniuose



26 pav. Bandiniai su atvertais plyšiais

2.3.4. Savaime atsinaujinančio betono priedų įtaka armatūros korozijos procesams

Šiam tyrimui atlikti bus naudojamos gelžbetoninės prizmės, kurios armuotos 4xØ20 S500 klasės armatūros strypais (27 ir 28 paveikslai). Šis armavimo kiekis buvo įvertintas skaičiavimais, kad atsirastų natūralūs plyšiai, susidarę dėl betono traukumo kietėjant. Prizmės laikomos ore, 20±2 °C temperatūroje. Atsivėrus plyšiams prizmės dedamos į vonelę su vandeniu ir laikomos 28 paras, kad plyšiai užsitaisytų. Praėjus šiam laikui, prizmės dedamos į NaCl tirpalą korozijos procesams paspartinti ir išlaikomos savaitę. Išėmus iš NaCl tirpalo bandiniai yra išdžiovinami ir pjaunami išilgai. Viena bandinio dalis naudojama karbonizacijai nustatyti, kita – chloridų prisiskverbimui pro plyšį. Karbonizacija nustatoma fenolftaleinu, o chloridams nustatyti naudojamas sidabro nitratas. Užpurškiant fenolftaleino ant vidinės bandinio pusės spalva pakinta į violetinę, jei pH yra daugiau nei 9, tuo tarpu vykstanti karbonizacija mažina betono pH, todėl paveiktose vietose betono paviršiaus spalva nepakinta. Sidabro nitratas veikia panašiu principu, tik chloridų nepaveiktose vietose paviršiaus spalva tampa gelsva, o paveiktose – papilkėja.



27 pav. Armatūros karkasas



28 pav. Armatūros karkasas formose

2.3.5. Savaime atsinaujinančio betono priedų įtaka karbonizacijos gyliui

Šio tyrimo tiriamasis objektas yra betoninės prizmės, kurios buvo naudojamos susitraukimo deformacijoms matuoti. Atlikus pastarąjį tyrimą, dalis prizmių buvo merkiamos į vandenį ir laikomos 28 paras tam, kad suveiktų kristaliniai priedai. Praėjus šiam laikotarpiui, prizmės išdžiovinamos ir skeliamos per pusę. Karbonizacijos gylis nustatomas naudojant cheminį pH indikatorių – fenolftaleiną. Esant terpei, kurios pH ≥ 9 , fenolftaleinas keičia spalvą į violetinę. Karbonizacija, kurią sukelia atmosferoje esantis CO₂, mažina betono pH. Todėl karbonizacijos paveiktose vietose fenolftaleinas išlieka bespalvis.

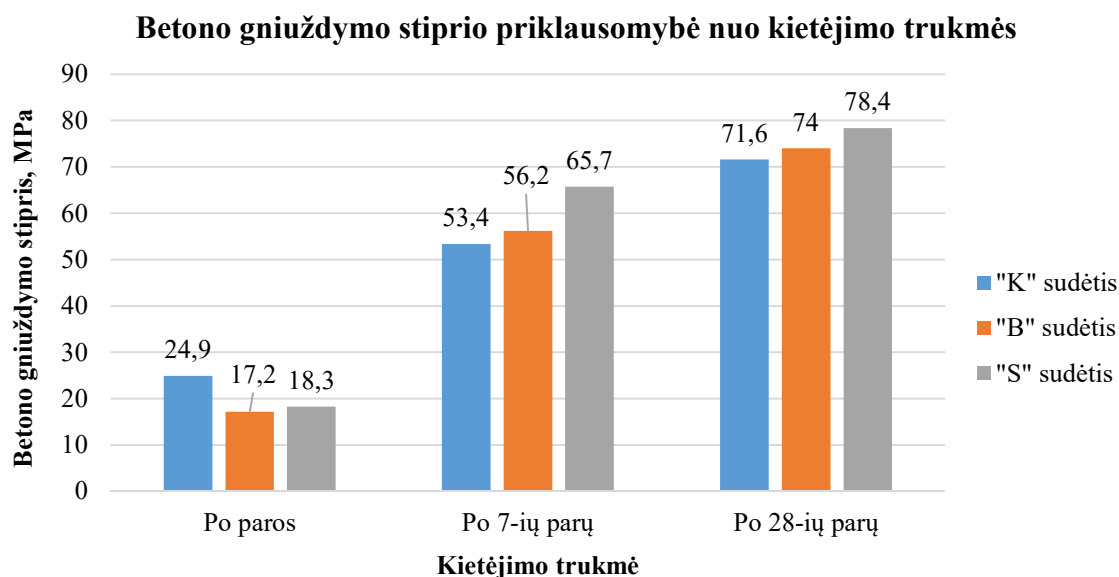
3. Eksperimentų rezultatai ir jų analizė

Šiame skyriuje pateikiami gauti rezultatai, kurie gauti atliekant eksperimentinius bandymus remiantis aprašytomis metodikomis. Šių tyrimų tikslas yra nustatyti savaime atsinaujinančio betono atsparumą cheminėms aplinkoms.

3.1. Savaime atsinaujinančio betono fizikinės ir mechaninės savybės

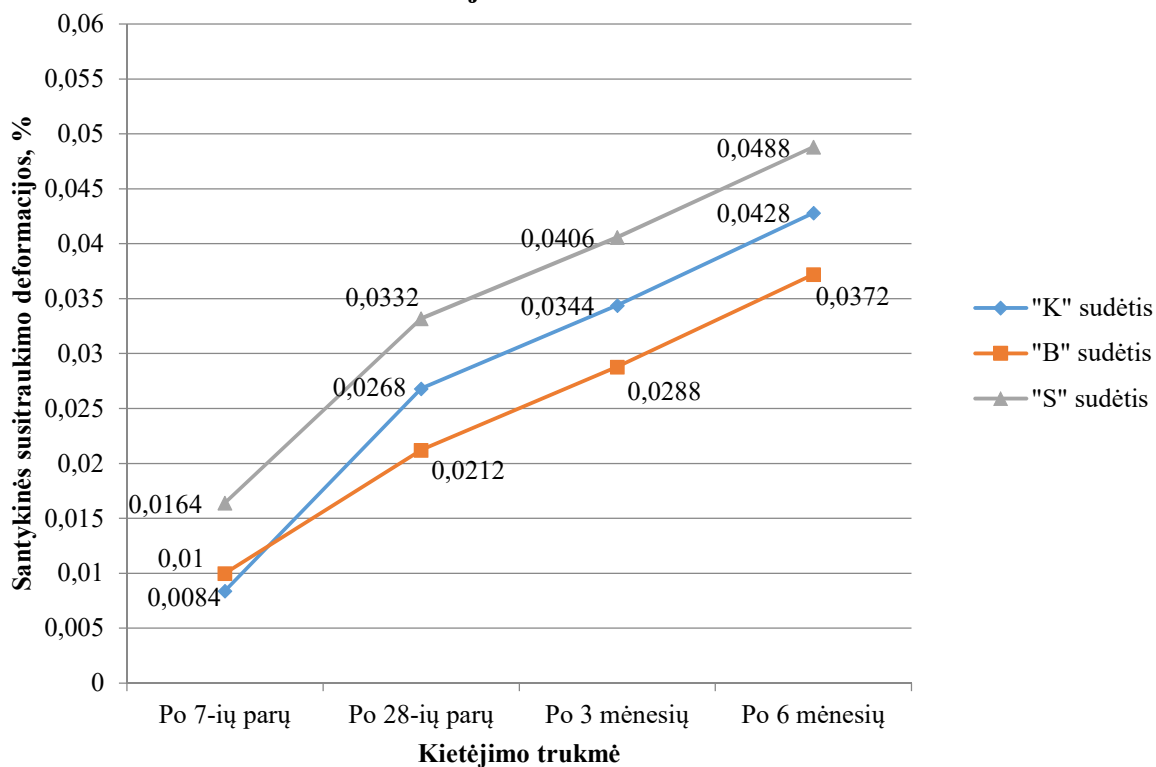
Atlikus tyrimus nustatyta kristalinių priedų įtaka betono gniuždymo stipriui ir susitraukimo deformacijoms. Iš 29 paveikslo matyti, kad po paros didžiausia gniuždymo stiprį pasiekia bandiniai su kontroline sudėtimi, kurio reikšmė yra 24,9 MPa. Po 7-ių parų didžiausią gniuždymo stiprį įgauna „S“ sudėties bandinys su kristaliniu priedu, kurio reikšmė yra 65,7 MPa. Po 28-ių parų didžiausią gniuždymo stiprį išlaiko „S“ sudėties betonas su kristaliniu priedu, kurio reikšmė yra 78,4 MPa. Antroje vietoje pagal gniuždymo stiprį yra „B“ sudėties bandinys su kristaliniu priedu, kurio reikšmė yra 74 MPa. Galima daryti išvadą, kad kristaliniai priedai padidina projekcinį stiprį.

Pagal 30 paveikslą matyti, kad po 7-ių parų kietėjimo labiausiai traukiasi bandiniai su kristaliniais priedais. Tačiau po 28-ių parų įprasto betono susitraukimas padidėja nuo 0,0084 % iki 0,0268 %, tuo tarpu bandiniuose su kristaliniais priedais susitraukimas kinta nuo 0,010 % iki 0,0212 % su „B“ kristaliniu priedu ir nuo 0,0164 % iki 0,0332 % su „S“ kristaliniu priedu. Tai parodo, kad kristaliniai priedai stabilizuoja pirminį betono traukumą. Verta paminėti, kad visame kietėjimo laikotarpyje bandiniai su „S“ kristaliniu priedu išlaiko 13 % - 65 % didesnes susitraukimo deformacijas lyginant su įprastu betonu. Galima teigti, jog vieni kristaliniai priedai neleidžia betonui taip intensyviai trauktis, o kiti atvirkščiai – padidina betono traukumą.



29 pav. Betono gniuždymo stiprio priklausomybė nuo kietėjimo trukmės

Santykiųjų betono susitraukimo deformacijų priklausomybė nuo kietėjimo trukmės



30 pav. Santykiųjų betono susitraukimo deformacijų priklausomybė nuo kietėjimo trukmės

3.2. Savaimė atsinaujinančio betono plyšių užsitaismo efektyvumas

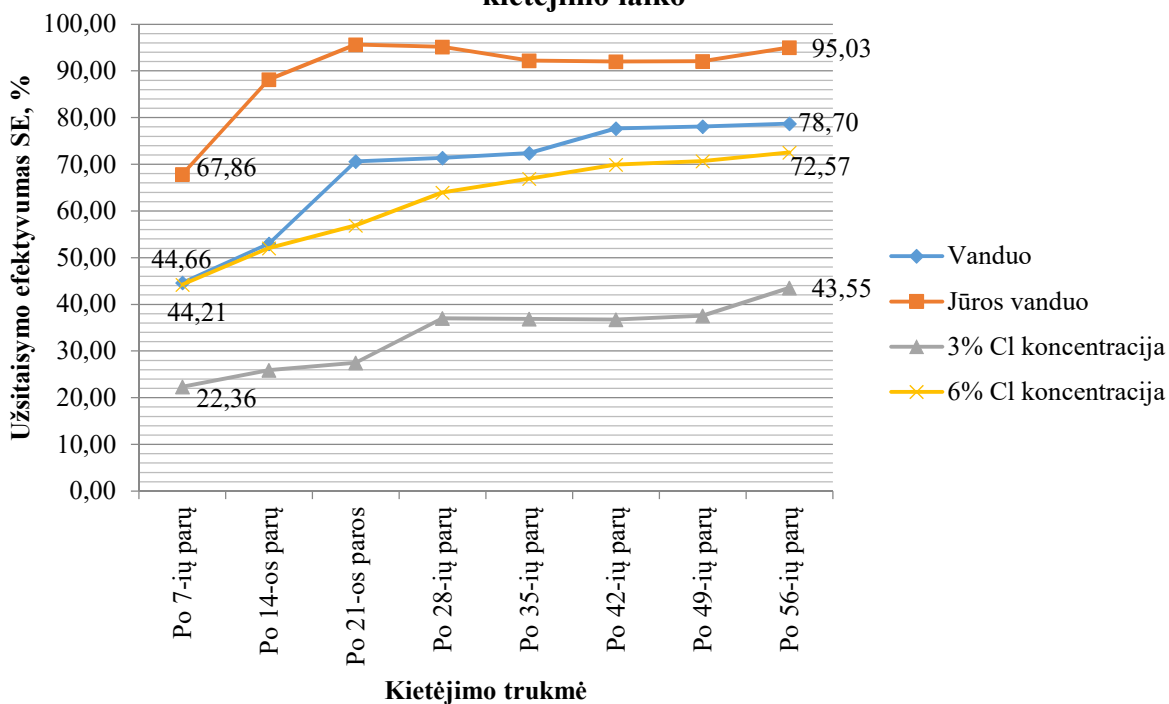
Pagal 2.3.2 skyrelyje aprašytą metodiką atliktas savaimė atsinaujinančio betono plyšių užsitaismo efektyvumo tyrimas. Šiame tyrime naudoti dviejų rūšių kristaliniai priedai. Kristalinių priedų veikimas buvo tiriamas skirtinguose cheminiuose tirpaluose (vanduo, jūros vanduo, 3% ir 6% koncentracijos chloridų tirpalai). Matavimai atliekami po 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 parų kietėjimo išlaikant bandinius minėtuose tirpaluose.

31 paveiksle pavaizduota kontrolinės sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo trukmės minėtuose tirpaluose. Laikant bandinius vandenyje užsitaismo efektyvumas kinta nuo 44,7 % iki 78,7 %, jūros vandenyje - nuo 67,9 % iki 95 %, 3 % chloridų tirpale - nuo 22,4 % iki 43,6 %, 6 % chloridų tirpale – nuo 44,2 % iki 72,6 %. Įprastinis betonas turi galimybę dalinai užtaisyti atsiradusius plyšius, kadangi jame yra nesureagavusių cemento dalelių, kurios kontaktuojant su vandeniu hidratuojasi ir užpildo atsiradusius plyšius.

32 paveiksle matomos „B“ kristalinio priedo sudėties užsitaismo efektyvumo vertės. Vandenyje laikytų bandinių užsitaismo efektyvumas didėja nuo 50 % iki 65,6 %, jūros vandenyje – nuo 52,9 % iki 96 %, 3 % chloridų tirpale – nuo 24 % iki 49,4 %, 6 % chloridų tirpale – nuo 33,7 % iki 45,6 %.

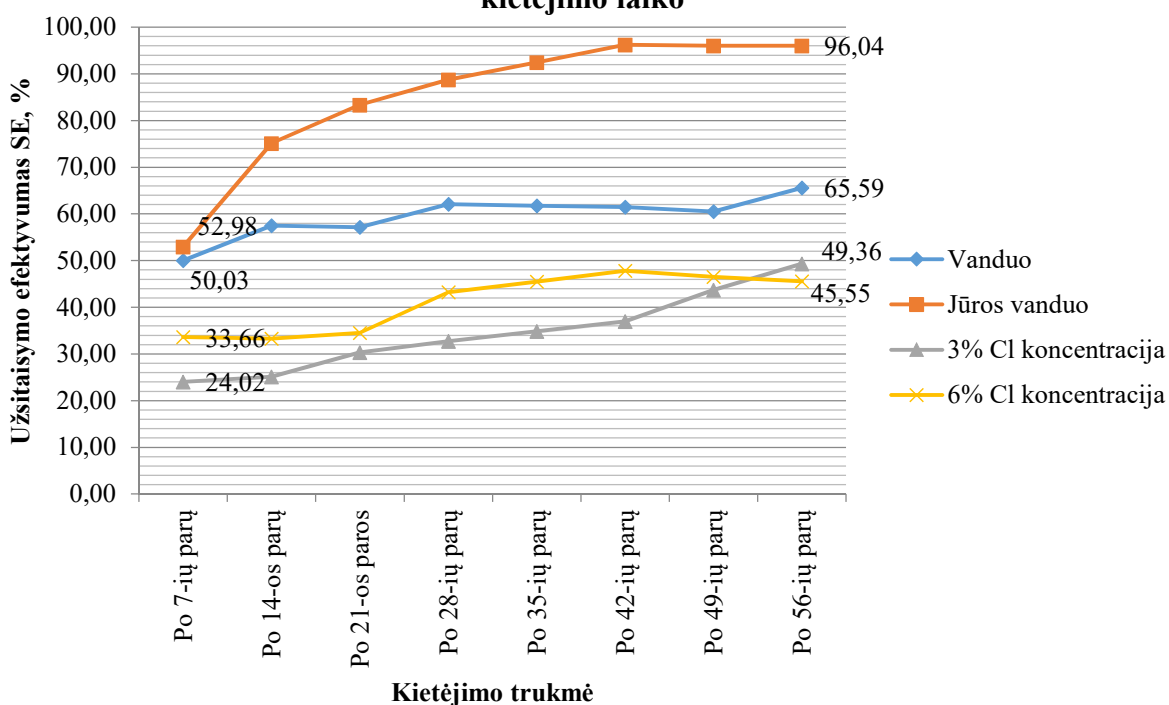
33 paveiksle parodyta „S“ priedo plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo laiko. Bandiniai, kurie buvo laikyti vandenyje, užsitaismo efektyvumą padidino nuo 5,7 % iki 27,8 %, jūros vandenyje – nuo 12,3 % iki 91,7 %, 3 % chloridų tirpale – nuo 22,7 % iki 51 %, 6 % chloridų tirpale – nuo 56,3 % iki 93,2 %.

„K“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo laiko



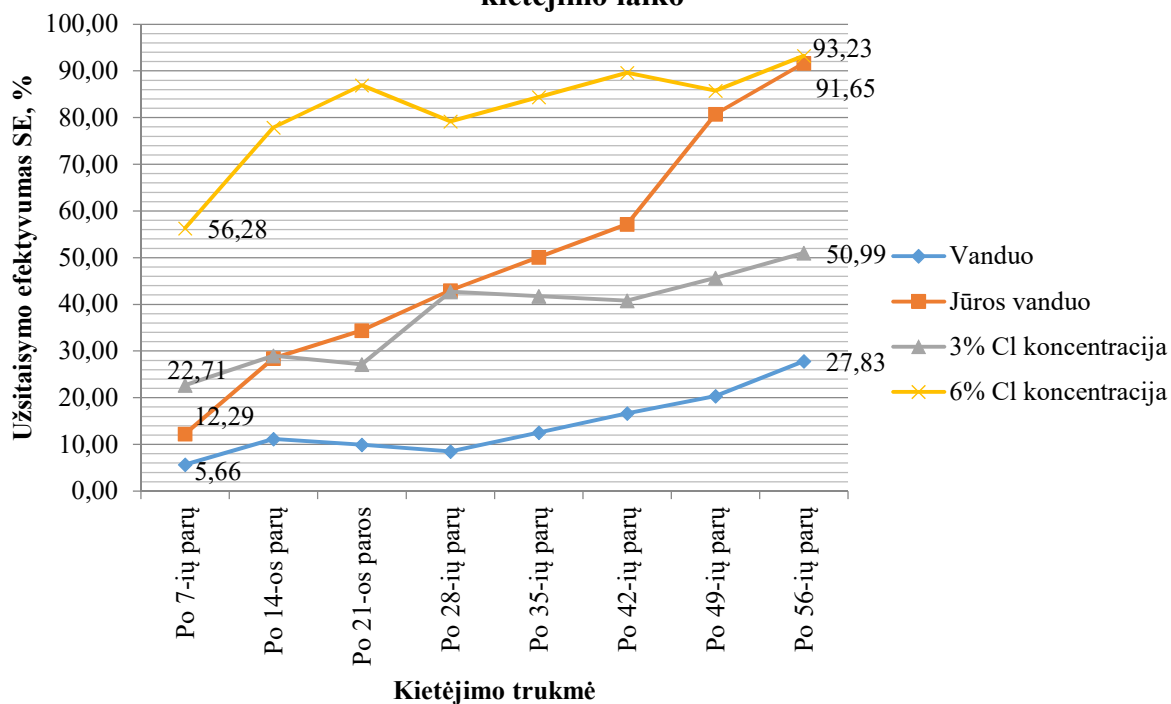
31 pav. „K“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo trukmės

„B“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo laiko



32 pav. „B“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo trukmės

„S“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo laiko



33 pav. „S“ sudėties betono plyšių užsitaismo efektyvumo priklausomybė nuo kietėjimo trukmės

Matoma, kad rezultatų išsidėstymas yra labai skirtingas. Pradiniai plyšių dydžiai yra nevienodi (10 lentelė), kadangi bandiniai buvo skeliami pusiau. Dėl to atsiranda užpildų, cementinio akmens ištrupėjimai, sunku įvertinti plyšio plotį bandinio viduje. Kuo mažesnis pradinis plyšio plotis, tuo geriau veikia kristaliniai priedai ir gali dar labiau sumažinti esamą plyšio plotį. Šiuo atveju galima palyginti užsitaismo pokytį pagal užsitaismo efektyvumą po 7 ir 56 parų (11-13 lentelės).

10 lentelė. Pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis

Band.Nr.	Pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis per 5 min., g	Band.Nr.	Pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis per 5 min., g
K1	2526	B4	3728
K2	644 (mažiausias pradinis plyšys)	B5	2784
K3	3040	B6	4923
K4	4969	S1	5581 (didžiausias pradinis plyšys)
K5	2071	S2	2854
K6	1528	S3	3866
B1	3008	S4	5430
B2	3574	S5	4003
B3	2318	S6	2674

11 lentelė. Kontrolinės sudėties betono plyšių užsitaisymo efektyvumo pokytis

Tirpalo pav.	Plyšių užsitaisymo efektyvumas po 7 parų, %	Plyšių užsitaisymo efektyvumas po 56 parų, %	Pokytis, %
Vanduo	44,66	78,7	34,04
Jūros vanduo	67,86	95,03	27,17
3% Cl koncentracija	22,36	43,55	21,19
6% Cl koncentracija	44,21	72,57	28,36

12 lentelė. „B“ sudėties betono plyšių užsitaisymo efektyvumo pokytis

Tirpalo pav.	Plyšių užsitaisymo efektyvumas po 7 parų, %	Plyšių užsitaisymo efektyvumas po 56 parų, %	Pokytis, %
Vanduo	50,03	65,59	15,56
Jūros vanduo	52,98	96,04	43,06
3% Cl koncentracija	24,02	49,36	25,34
6% Cl koncentracija	33,06	45,55	12,49

13 lentelė. „S“ sudėties betono plyšių užsitaisymo efektyvumo pokytis

Tirpalo pav.	Plyšių užsitaisymo efektyvumas po 7 parų, %	Plyšių užsitaisymo efektyvumas po 56 parų, %	Pokytis, %
Vanduo	5,66	27,83	22,17
Jūros vanduo	12,29	91,65	79,36
3% Cl koncentracija	22,71	50,99	28,28
6% Cl koncentracija	56,28	93,23	36,95

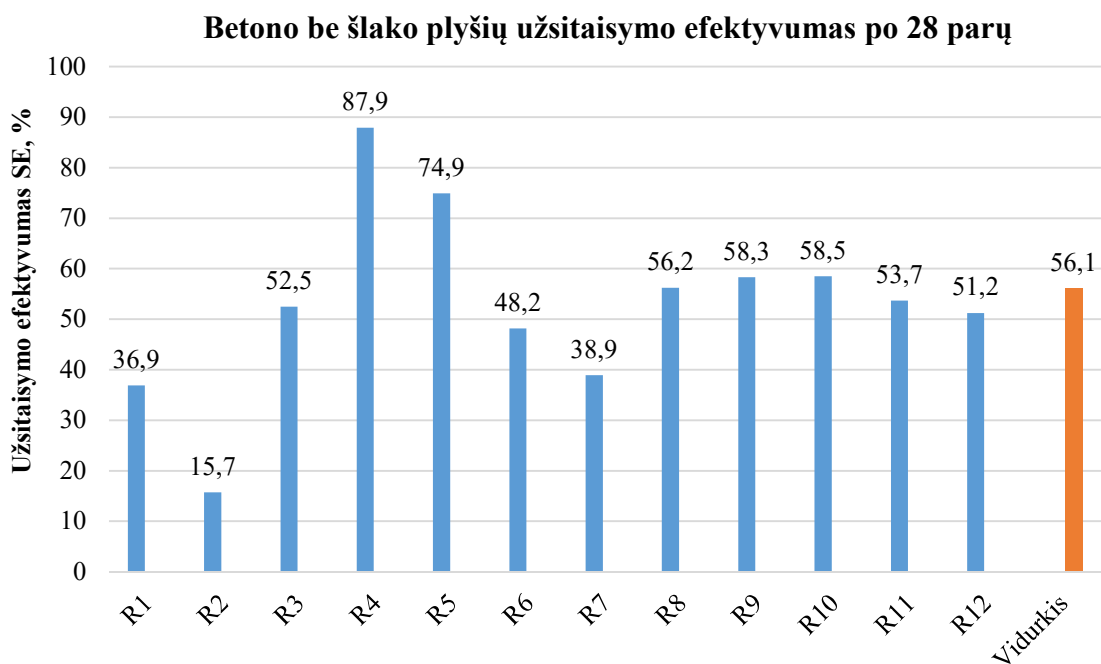
Pagal gautus rezultatus matome, kad kontrolinės sudėties bandinių plyšių užsitaisymo efektyvumo pokytis svyruoja nuo 21,2 % iki 34 %. Galima teigti, kad jo užsitaisymo efektyvumas labai priklauso nuo pradinio plyšio pločio – kuo jis mažesnis, tuo didesnė tikimybė, kad jis savaime užsitaisys.

Bandiniuose su „B“ sudėtimi plyšių užsitaisymo efektyvumo pokytis kinta nuo 12,5 % iki 43,1 %. Šio tipo bandiniai didžiausias plyšių užsitaisymo galimybes parodė jūros vandenyje, o mažiausias – 6 % chloridų tirpale.

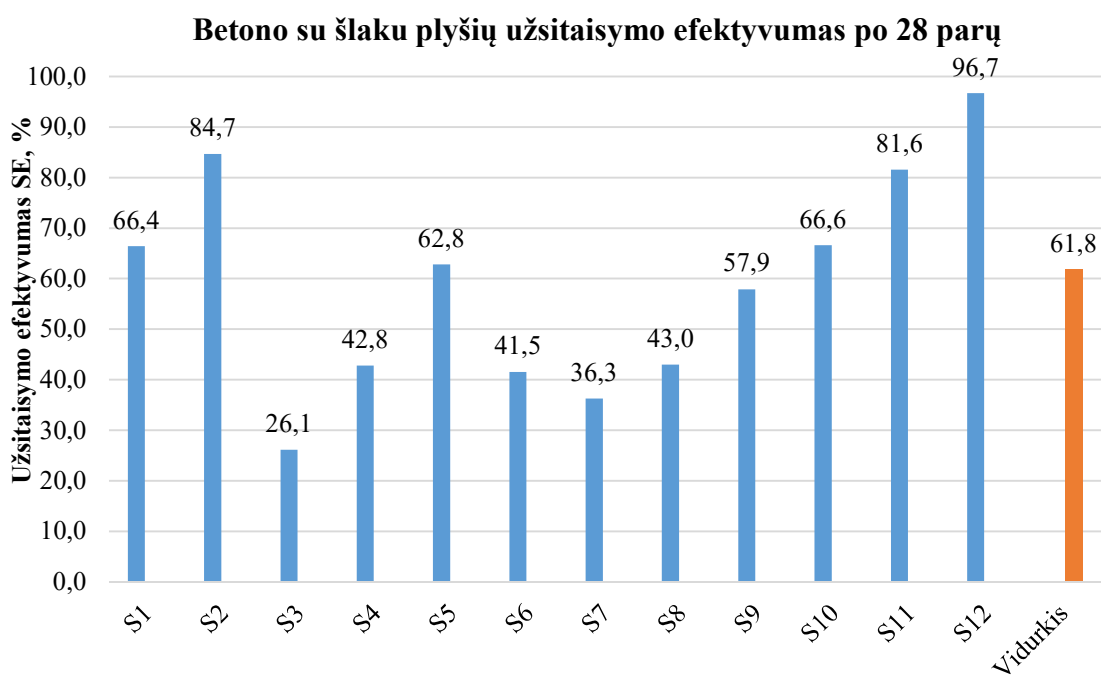
Bandiniuose su „S“ sudėtimi matomas didžiausias efektyvumo pokyčio intervalas. Jis kinta nuo 22,2 % iki 79,4 %. Ši sudėtis taipogi parodė didžiausias plyšių užsitaisymo galimybes jūros vandenyje, o mažiausias – 3 % chloridų tirpale.

COST asociacijos tyrime apie savaime atsinaujinančio betono priedų panaudojimą, naudota veikioji medžiaga yra aukštakrosnių šlakas. Išmatuojamas pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis, po to bandiniai buvo 28 paras laikomi vandenyje, kad savaime užsitaisytų plyšiai. Tada kartojamas vandens prabėgimo bandymas. Pagal 34 ir 35 paveiksluose parodytą plyšių užsitaisymo efektyvumą matome,

kad betono be šlako plyšių užsitaismo efektyvumo vidurkis yra 56,1 %, o bandinių su šlaku – 61,8 %. Tai parodo, kad šlako panaudojimas pirminiam plyšių užsitaismui didelio pranašumo neturi, lyginant su įprastu betonu. Tačiau reiktų įvertinti plyšių užsitaismo efektyvumą po ilgesnio kietėjimo laikotarpio. Be to, betono su šlaku sudetyje buvo naudojamas mažesnis cemento kiekis, todėl šlakas galėtų sumažinti naudojamo cemento kiekį. Vis dėl to, tokioms cemento alternatyvoms įvertinti reikia atlikti detalesnius bandymus ir nustatyti šlako panaudojimo įtaką kitoms betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms.

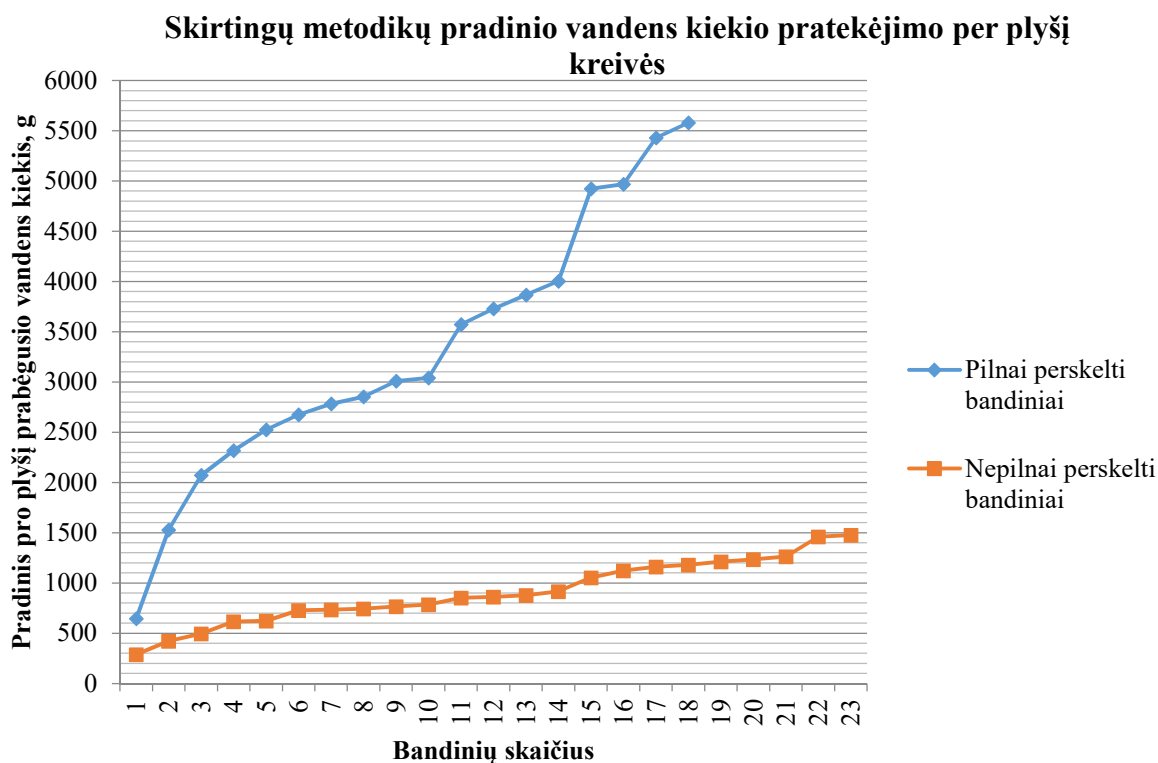


34 pav. Betono be šlako plyšių užsitaismo efektyvumas po 28 parų



35 pav. Betono su šlaku plyšių užsitaismo efektyvumas po 28 parų

Naudotų plyšių užsitaismo efektyvumo įvertinimo metodikų palyginimui pateiktos pradinio vandens kiekio pratekėjimo per plyšį kreivės 36 paveiksle. Šiame grafike vaizduojamas pilnai ir nepilnai perskeltų bandinių pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis didėjimo tvarka. Šios kreivės parodo, kad tiriant pilnai perskeltus bandinius, pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis kinta beveik 9 kartus, lyginant mažiausią ir didžiausią reikšmes. Tuo tarpu nepilnai perskeltuose bandiniuose šios reikšmės kinta tik 5 kartus. Tai yra beveik dvigubas skirtumas, todėl atliekant plyšių užsitaismo efektyvumo įvertinimą pagal COST pateiktą metodiką, gaunami rezultatai yra žymiai tikslesni.



36 pav. Plyšių užsitaismo efektyvumo įvertinimo metodikų palyginimas

3.3. Savaime atsinaujinančio betono atsparumo korozijos procesams tyrimai

Kadangi per 6 mėnesių kietėjimo laikotarpį plyšiai dėl betono traukumo savaime neatsirado, plyšius teko atverti mechaniškai, lenkiant prizmes (37 pav.). Dėl esamo išilginio armavimo, lenkiant prizmes neatsivėrė normaliniai plyšiai. Tačiau prizmės buvo be skersinės armatūros, todėl atsivėrė įstrižieji plyšiai ties atramomis (38 pav.). Kad suformuoti vienodus plyšius, lenkimo metu plyšių plotis buvo stebimas mikroskopu ir bandymas stabdomas plyšio pločiui pasiekus 0,5mm. Nukrovus bandinį, plyšių plotis liko apie 0,1-0,3mm.



37 pav. Prizmių lenkimas



38 pav. Įstrižieji plyšiai prizmėse

Ant vienos bandinių pusės užpurškus sidabro nitrato, nebuvo pastebėta ryškių spalvos pasikeitimų (39 pav.). Tai parodo, kad bandinio vidus nebuvo paveiktas chloridų. Taip galėjo įvykti dėl dviejų priežasčių:

- chloridai negalėjo prasiskverbti dėl per mažo plyšio pločio;
- pjauant bandinį pjūklų buvo naudojamas vanduo, tai galėjo iškraipyti tyrimo rezultatus;

Ant kitos bandinių dalies užpurškus fenolftaleino, visas paviršius pasidengė violetinė spalva (40 pav.). Tai rodo, kad bandiniai nebuvo paveikti karbonizacijos. Kadangi kietinimas ore truko net 6 mėnesius, karbonizacijos poveikio nebūvimas yra mažai tikėtinas. Todėl bandymų rezultatus galėjo sugadinti jau minėtas pjovimo procesas.



39 pav. Bandinio paviršius užpurškus sidabro nitrato



40 pav. Bandinio paviršius užpurškus fenolftaleino

Bandymas kartojamas prizmes skeliant, kad tiriamasis skerspjūvis būtų sausas. Prizmių galuose daromos įpjovos (41 paveikslas), tada prizmės yra skeliamos hidraulinio presu (42 paveikslas) ir paviršiai vėl užpurškiami sidabro nitratu ir fenolftaleinu.



41 pav. Įpjovos prizmėse



42 pav. Prizmių skėlimas

Abu tirpalai neparodė ryškių pokyčių, todėl buvo nuspręsta mechaniškai atskirti betoną nuo armatūros ir apžiūrėti korozijos požymius. Nustatyta, kad kontroliniame bandinyje armatūros korozijos židiniai ties buvusiais plyšiais buvo ryškiausi. Toliau seka bandinys su „B“ kristaliniu priedu, o bandinys su „S“ kristaliniu priedu praktiškai nepaveiktas korozijos procesų. 43 paveiksle matomi minėti korozijos židiniai. Verta paminėti, kad korozijos židiniai pastebimi tik tuose bandiniuose, kurių išmatuotas plyšio plotis buvo apie 0,3mm.



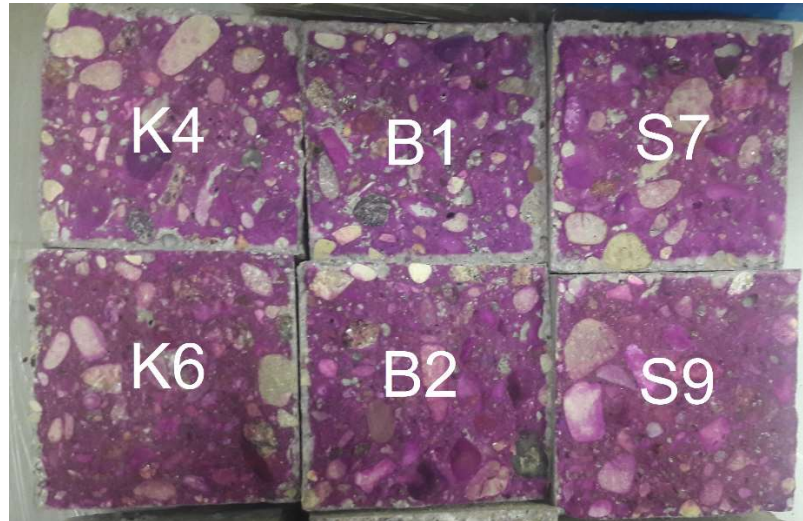
43 pav. Armatūros korozijos židiniai bandiniuose

3.4. Savaimė atsinaujinančio betono atsparumo karbonizacijai tyrimai

Karbonizacijos tyrimų rezultatai pateikti 14-oje lentelėje. Bandiniai buvo laikomi ore ir vandenyje, perskėlus per pusę purškiamas fenolftaleinas. Matuojamas karbonizacijos gylis, padaromos nuotraukos. Pagal gautus rezultatus matyti, kad bandinius, laikytus vandenyje, mažiau paveikia karbonizacijos procesai. Taip pat, bandiniuose su kristaliniiais priedais matomas mažesnis karbonizacijos gylis lyginant su įprasto betono bandiniais (44 paveikslas). Labiausiai karbonizacija paveikė kontrolinį K4 bandinį (45 paveikslas), kuris visą laiką buvo laikomas ore. Mažiausiai paveiktas buvo S9 bandinys su kristaliniu priedu (46 paveikslas), kuris buvo 28 paras laikomas vandenyje.

14 lentelė. Išmatuotas karbonizacijos gylis bandiniuose

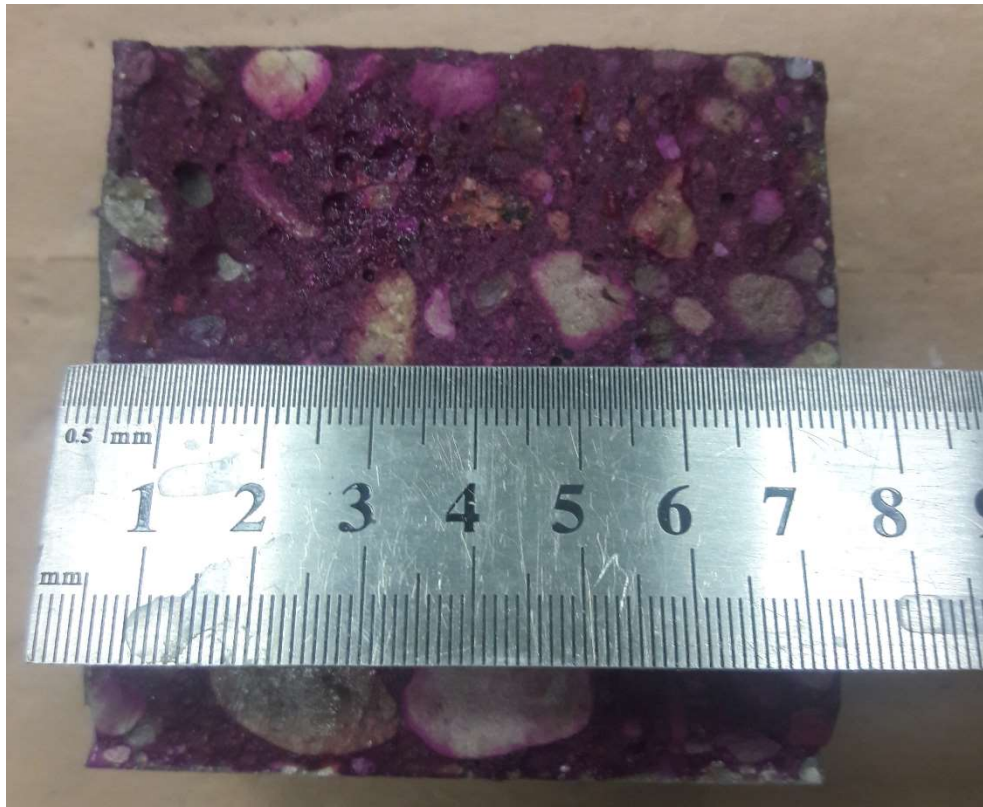
Bandiniai laikyti ore					
Bandinio Nr.	Karbonizacijos gylis skerspjūvio kraštinėse, mm				Vidurkis, mm
K4	4,0	4,0	1,0	1,0	2,50
B1	0	3,0	3,0	3,5	2,38
S7	1,0	3,5	3,5	0	2,00
Bandiniai laikyti vandenyje					
K6	2,0	2	1,5	0	1,38
B2	1,5	1,0	1,5	0	1,00
S9	0	1,0	0	0	0,25



44 pav. Karbonizacijos gylio nustatymas



45 pav. Karbonizacijos gylis bandinyje K4



46 pav. Karbonizacijos gylis bandinyje S9

Išvados

1. Kontrolinės sudėties betono mišinio slankumo klasė gauta S2, o mišinių su kristaliniais priedais - su „S“ priedu – S3, o sudėties su „B“ priedu – S1;
2. Po paros didžiausią gniuždymo stiprį įgauna betonas su kontroline sudėtimi (24,9 MPa), tačiau po 28 parų kietėjimo bandiniai su kristaliniais priedais pasiekia didesnę stiprį (74 MPa ir 78,4 MPa atitinkamai su „B“ ir „S“ priedais).
3. Kristaliniai priedai padidina pradinį betono traukumą, tačiau vėliau traukumas didėja arba mažėja priklausomai nuo konkretaus kristalinio priedo. Po 6 mėnesių „B“ sudėties kristalinis priedas sumažino betono traukumą 14 % lyginant su įprastu betonu, o „S“ kristalinis priedas betono traukumą padidino 13 %.
4. Geriausias bandinių su kristaliniais priedais plyšių užsitaisymo efektyvumas pastebėtas išlaikant bandinius jūros vandenyje, kadangi jame esančios druskos kristalizuojasi ir tikėtina, kad padeda užpildyti plyšius. Jūros vandenyje „B“ sudėties užsitaisymo efektyvumo pokytis tarp 7 ir 56 parų yra 43,1 %, o „S“ kristalinio priedo – 79,4 %. Chloridų tirpaluose laikytų bandinių užsitaisymo efektyvumas yra kintantis.
5. Vietoje kristalinio priedo naudojant aukštakrosnių šlaką, po 28 parų užsitaisymo efektyvumas nuo įprastinio betono skiriasi tik 6 %, todėl jo negalima laikyti kaip alternatyvos kristaliniams priedams. Tačiau jis gali būti panaudojamas dalinai pakeisti cementą mišinyje.
6. Plyšių užsitaisymo efektyvumui vertinti tikslesnė yra COST pateikta metodika (nepilnai perskeliant bandinius), kadangi pagal šią metodiką visų betono bandinių (23 vnt.) pradinis pro plyšį prabėgusio vandens kiekis tarpusavyje skiriasi beveik 2 kartus mažiau, negu pagal metodiką pilnai perskeliant bandinius.
7. Nors kristalinių priedų įtakos chloridų migracijai gelžbetoniniuose bandiniuose nustatyti nepavyko (purškiant sidabro nitratu), tačiau pavyko tiesiogiai nustatyti armatūros korozijos židinius ties buvusiais plyšiais, mechaniškai atskyrus betoną nuo armatūros. Rezultatai parodė, kad „S“ kristalinis priedas turėjo geriausią prevenciją armatūros korozijai.
8. Karbonizacijos poveikiui atspariausi bandiniai buvo su „S“ kristaliniu priedu, kurie sumažino įsiskverbimo gylio vidurkį nuo 2,5mm iki 2mm laikant bandinius ore ir nuo 1,38mm iki 0,25mm laikant bandinius vandenyje.

Literatūros sąrašas

1. Breugel, Klaas van. "Self-healing Material Concepts as Solution for Aging Infrastructure." (2012).
2. De Belie N., Wang J., Soens H., Microcapsules and concrete containing the same, (2013)UK Patent application 1303690.0 & 1314220.3, US application AEC/PM334564US. Applicants: Devan Chemicals NV, Universiteit Gent.
3. De Belie N., Application of bacteria in concrete: a critical evaluation of the current status. (2016).
4. Elzbutas, H. (2009). Statybinių medžiagų ir konstrukcijų tyrimo metodų laboratoriniai darbai. Kaunas: Technologija.
5. Glanville W.H., The permeability of Portland cement concrete. Building Research, Technical paper 3, 1-61 (1931)
6. Jokūbaitis, V.; Šaučiuvėnas; G. 2012. Statinių konstrukcijų techninės būklės vertinimas: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 200 p.
7. Jonkers H.M. (2007) Self Healing Concrete: A Biological Approach. In: van der Zwaag S. (eds) Self Healing Materials. Springer Series in Materials Science, vol 100. Springer, Dordrecht.
8. Lee, Y.S. & Park, W. Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. Appl Microbiol Biotechnol (2018) 102: 3059.
9. Van Tittelboom K., De Belie N., De Muynck W., Verstraete W., Use of bacteria to repair cracks in concrete. CemConcrRes(2010),40:157-166.
10. Vektaris, B.; Vilkas, V. (2006). Betono tvarumas: Betono sulfatinė ir šarminė korozija, atsparumas šalčiui ir karbonizacijai. Tyrimai ir prevencinės priemonės : Monografija. Kaunas: Technologija.
11. Seifan M, Samani A, Berenjian A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. Applied Microbiology & Biotechnology. 2016;100(6):2591-2602.
12. Wang J., De Belie N., Verstraete W., Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. J Ind. Microbiol Biot (2012) 39: 567–577.
13. Wang J., Soens H., Verstraete W., De Belie N., Self-healing concrete by use of micro encapsulated bacterial spores. CemConcrRes(2014)56:139-152.
14. Wang J., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N., Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. Constr Build Mater (2014) 58: 110-119.
15. Wang J., Dewanckele J., Cnudde V., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N., X-ray computed tomography proof of bacterial based self-healing in concrete. Cem Concr Comp (2014) 53: 289-304.
16. Wang J., Mignon A., Snoeck D., Wiktor V., Boon N., De Belie N., Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. Front Microbiol (2015) 6: 1088.
17. Wiktor, V., Jonkers, H. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 33(7), 763–770.
18. Wiktor, V.; Jonkers, H. (2011). Determination of the crack self-healing capacity of bacterial concrete. Concr - Proceedings of Concrete Solutions, 4th International Conference on Concrete Repair.
19. Woudhuysen J., Abley I., Why is Construction so Backward? Wiley-Acad. 321 (2004)

20. P. Azarsa, R. Gupta, A. Biparva. (2019) Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement, *Cement and Concrete Composites*.
21. L. Ferrara, V. Krelani, M. Carsana. (2014) A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures *Constr. Build. Mater.*, 68, pp. 535-551
22. D. Gardner, R. Lark, T. Jefferson, R. Davies, A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials, *Case Stud. Constr. Mater.* 8 (2018) 238–247
23. Cuenca, E., Tejedor, A., & Ferrara, L. (2018). A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. *Construction and Building Materials*, 179, 619-632.
24. Mohan, A., & Poobal, S. (2018). Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 787-798.
25. Chen, Z., & Hutchinson, T. C. (2010). Image-based framework for concrete surface crack monitoring and quantification. *Advances in Civil Engineering*, 2010.
26. Singh, O. I., Sinam, T., James, O., & Singh, T. R. (2012). Local contrast and mean based thresholding technique in image binarization. *International Journal of Computer Applications*, 51(6), 5-10.
27. Singh, T. R., Roy, S., & Singh, K. M. (2012). Local adaptive automatic binarisation (laab). *International Journal of Computer Applications*, 40(16), 27-230.
28. Talab, A. M. A., Huang, Z., Xi, F., & HaiMing, L. (2016). Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127(3), 1030-1033.
29. Adhikari, R. S., Moselhi, O., & Bagchi, A. (2014). Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection. *Automation in construction*, 39, 180-194.
30. Lee, B. Y., Kim, Y. Y., Yi, S. T., & Kim, J. K. (2013). Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(6), 567-577.
31. Zhang, W., Zhang, Z., Qi, D., & Liu, Y. (2014). Automatic crack detection and classification method for subway tunnel safety monitoring. *Sensors*, 14(10), 19307-19328.
32. Jahanshahi, M. R., Masri, S. F., Padgett, C. W., & Sukhatme, G. S. (2013). An innovative methodology for detection and quantification of cracks through incorporation of depth perception. *Machine vision and applications*, 24(2), 227-241.
33. Fujita, Y., & Hamamoto, Y. (2011). A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces. *Machine Vision and Applications*, 22(2), 245-254.
34. Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E. N. B. S., Araújo, H., & Costa, H. (2013). Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing. *Measurement*, 46(1), 433-441.

Priedai

1 priedas. Bandinių su šlaku plyšiai prieš ir po užsitaisymo

