

УТИЦАЈ АЛКАЛНО АГРЕГАТНЕ РЕАКЦИЈЕ НА БЕТОНСКЕ КОНСТРУКЦИЈЕ МОСТОВА

Слободан Грковић¹,
Данијел Кукарас²,
Смиља Живковић³

УДК: 624.21 : 666.12

DOI: 10.14415/zbornikGFS29.04

Резиме: У овом раду се приказује актуелна проблематика неповољног утицаја алкално агрегатне реакције (ААР) у бетону, на бетонске конструкције (БК) мостова. Иако је неповољан утицај ААР на БК још 1930-тих година идентификован, знатно касније је признат као један од израженијих детериорационих процеса у бетону, који узрокује оштећења бетона. Основна два облика ААР су, алкално силикатна реакција (АСР) и алкално карбонатна реакција (АЦР). АСР је знатно израженија у односу на АЦР, нарочито у неким географским подручјима света. Оштећења бетона узрокована АСР неповољно се одражавају, примарно на употребљивост и трајност БК мостова, затим на смањење носивости компоненти и поузданост конструкције, затим скраћење експлоатационог века (ЕВ), и скупе санације. За БК мостова, посебно су неповољне симултане комбинације АСР и других детериорационих процеса у бетону, нарочито оних узрокованих присуством влаге, воде, варијацијом температуре и корозије соли за одмрзавање леда, током зиме. На основу прегледа литературе, нагласак у овом раду је на механизму и факторима механизма АСР, актуелним истраживањима и смерницама за пројектовање поузданијих БК мостова са аспекта превенције иницирања и развоја АСР, и са упућивањем на релевантну литературу.

Кључне речи: Бетонске конструкције, мостови, алкално агрегатна реакција, алкално силикатна реакција, механизам, фактори, бетон, агрегат, цемент

1. УВОД

Значајна оштећења бетона могу изазивати реакције између агрегата и алкалија, тзв. ААР [1,4,5,7,8,12,16,] и [19]. Поједине врсте агрегата садрже силицијум, силикату и карбонату који у одређеним минералним облицима реагују са алкалним хидроксидима у порној води насталим од натријумових и калијумових оксида из цемента, минералних додатака или из окружења ако продру у бетон. Само у

¹ мр Слободан Грковић, дипл. инж. грађ., Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, тел: 024/554-300, е-маил: most@gf.uns.ac.rs

² Проф. др Данијел Кукарас, дипл. инж. грађ., Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, тел: 024/554-300, е-маил: danijel.kukaras@gmail.com

³ Смиља Живковић, дипл.мастер, инж.грађ., Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, тел: 024/554-300, е-маил: smiljazivkovic@gmail.com

одређеним условима алкалије ступају у хемијску реакцију са агрегатом при чему настаје гел који бубри и узрокује појаву прелина и пукотина у бетону које разарају структуру бетона. ААР се разликују по хемизму, производима хемијских реакција и физичко-механичком дејству на бетон [1,2,4,5,16,18] и [19]. Оштећења БК услед ААР у неким подручјима у свету су честа, па се у енглеском говорном подручју се назива "*cancer concrete*" [17]. У државама са топлом и влажном климом ААР се појављује на БК старим неколико година, [17]. У европским државама се оштећења услед ААР појављују на БК старим од 20 до 30-так година, [17]. ААР је важан узрок деградације бетонских мостова (БМ), (Слика 1/а., и Слика 1/б.).



/а. Услед АСР на БМ у САД, [7]



/б. Услед АСР на БМ у Канади [8]

Слика 1. Прелине на БК мостова узроковане ААР

Низ међународних конференција посвећених ААР (ICAAAR) је почео 1974.г., у Данској са 15 радова, 23 учесника из 5 земаља (Данска, Немачка, Исланд, В.Британија, САД) и сваке четврте године, укупно 14. На последњој ICAAR, у САД 2012.г., објављен је 131 рад уз присуство учесника из 27 држава, [8].

2. АЛКАЛНО СИЛИКАТНА РЕАКЦИЈА (АСР)

Прву референцу о АСР написао је *Poulsen*, из Института данских инжењера, јануара 1914.г., [16]. Око 1920.г., прва озбиљнија оштећења БК узрокована АСР, примећена су САД, где је 1930-тих почело истраживања ААР [8]. Прву студију о утицају АСР на БК објавио је *Thomas Stanton* 1940.г, у САД [8], где је указао да експанзија и прскање бетона услед АСР зависи од садржаја алкалија из цемента, врсте и количине реактивног SiO_2 у агрегату, влаге у бетону и од температуре окружења [8]. *Stanton* је у студији указао и на малу експанзију бетона ако је садржај алкалија у цементу мањи 0,6% Na_2Oe и да се експанзија редукује коришћењем пуцолана, чиме је поставио основе за заштиту БК од АСР [8].



Слика 2. *T.Stanton* код АБ паранетног зида моста оштећеног услед АСР, Калифорнија (*State Division of Highways*), [8]

На Исланду, где се за бетон користио агрегат од врло реактивних вулканских стена и високо алкалних цемената, АСР је идентификована 1960-тих година, [16]. У В.Британији је 1971.г. први пут идентификована АСР на брани у Церсију, затим 1976.г., на три бране и касније, на око 200 БК (најчешће на југозападу Енглеске), [16]. У северној Немачкој, 1960.г. је идентификована АСР на једном БМ и касније, током 1970-тих година, на још неким БМ,[16]. У Француској су 1970-их година на бранама идентификована оштећења од АСР, [4],[16]. Истраживања стања 140 БМ, на северну Француске, открила су оштећења од АСР на око 30% ових мостова, [4]. Прва идентификација АСР у Јужној Африци забележена је 1976.г., и касније су многи случајеви откривени у западном делу државе, [16]. Током 1980-тих година истраживања око 400 БК (броне и мостови) на југу Норвешке, су код тридесетак БК идентификовала АСР, [4,16,18]. У исто време, неки случајеви оштећења БМ, откривени су у Белгији, [2] и [4]. Током 1989.г., истраживања преко 400 БМ у Новом Зеланду су иницирала сумњу на АСР, на око 100 мостова, [4] и [16]. Детаљна истраживања су потврдила АСР код трећине ових мостова, због чега је 5 санирано, а један замењен, [16]. У исто време, АСР је откривена код БК и тротоара у Италији, углавном на Јадранској обали, [16], затиму у Јапану, итд.. У Француској, од открића, током времена АСР је регистрована на око 400 објеката (највише БМ), у В.Британији око 300 нових случајева, итд., [9]. Први случај АСР у Холандији откривен је 1991.г., на БМ-вијадукту, [2] и [4]. Даља истраживања, у 1992.години, идентификовала су нове случајеве (20-так БМ-вијадукти, на националном аутопута бр. 59, изграђених 1960-их и 1970-их година), [2] и [4]. Код нас се примери неких оштећења на БМ могу повезати за ААР. У нашој земљи овим проблемима бавио се мањи број аутора, урађен је извештај број научно истраживачких пројеката који су потврдили да неки агрегати коришћени код нас су потенцијално реактивни, што је доказано на пробним узорцима, у лабораторији, [3]. Хронологија идентификације указује да се АСР појавила у неким државама, на одређеном географском подручју (Слика 3.) са одређеном праксом код пројектовања и грађења БК, чему је допринело и коришћење новијих врста агрегата (нпр.из мора), соли за одмрзавање леда, зими, итд..



Слика 3. Познати случајеви ААР широм света [4]

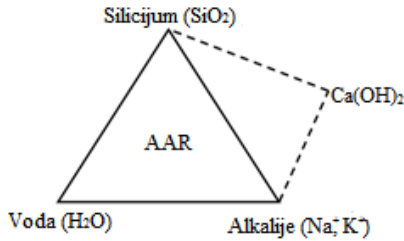
Широм света, у САД, Канади, Аустралији, Н. Зеланду, Јужној Африци, Јапану, В.Британији, Норвешкој, Немачкој, Холандији, итд., АСР је коначно призната као

озбиљан вид деградације БК, посебно мостова и брана [1,2,4,8,9,..]. То је иницирало истраживања механизма АСР, објављен је већи број радова и докумената о механизму и процени утицаја АСР на БК. Већи део истраживања је усмераван ка превенцији АСР код нових БК и квантификовању ризика у погледу примене компоненти бетона у одређеним условима окружења. Ова истраживања су се односила и на постојеће БК, где се први корак у дијагностици АСР усмеравао на истраживања врста агрегата који се користио за бетон, и његове подложности на АСР, [10]. Истраживања АСР, у периоду између 1980. и 1990.г., постала су основа за израду првих смерница за пројектовање БК мањег ризика од АСР, а које су током времена ажуриране, [4,8,9,16,17] и [19]. Посебно су значајна и обимна истраживања у САД, Канади, Холандији и Норвешкој, [1,2,4,6,8,9,16,18] и [19]. Холандски институт CUR је 1994.г. објавио прве препоруке за конкретне бетонске мешавине и начине заштите БК од штетног дејства АСР [2,4]. Холандско Министарство саобраћаја, јавних радова и водопривреде (*Rijkswaterstaat*), заједно са партнерима из индустрије цемента, истраживачких института и Универзитета у Делфту су заједно радили на проблему АСР, што се показало врло ефикасним у пракси [4]. Током 1988.г. започета су опсежна истраживања ААР у Норвешкој [18]. Национални истраживачки пројекти у периоду од 1990 до 1996.г. су дефинисали основна сазнања о ААР, што је била основа за норвешке смернице за производњу нереактивних агрегата, које су први пут објављене 1996. године [18]. Национални истраживачки пројекти, у периоду од 1999. до 2003.г. и обимна испитивања на 160 БК, довеле су до развоја нових смерница код пројектовања БК отпорних на АСР, у 2004.г.[18] и [19]. Слична истраживања су реализована у САД, Канади, Данској, Кини, итд., затим у оквиру RILEM-а (нпр. Комисија TC 106-AAR,1988.г.) и која су допринела развоју и формулисању, данас савременијих смерница код пројектовања БК, отпорних на АСР (TR30 (1999), BRE IP1/02 (2002), BRE Digest 330 (2004) итд.).

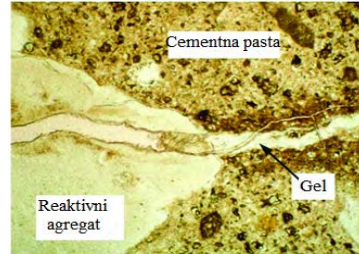
3. МЕХАНИЗАМ АСР

Механизам АСР је детаљно описан у литератури од стране разних аутора (нпр. *Diamond, 1976.; Dent Glasser u Kataoka, 1981.; Chatterji u cap.(1986., 1987., 1989.); Hobbs 1988.; Diamond 1989.*; обиман преглед литературе дао је *Jensen, 1993.; Wigum, 1995.g.*); [18], *Chatterji u Thaulow 2000.; Richardson 2002.*; [16], *Illston 2006.* [12], и *Dyer, 2014.g.*); [5]. За иницирање АСР потребно је истовремено присуство алкалија и агрегата који садржи SiO_2 у аморфном облику, (Слика 5/а). У реактивном облику, силицијум се појављује као минерал опал, калцедон, вулканско стакло, итд., и могу бити присутни у неким врстама кречњака, черта, итд. Релативно мала количина реактивног материјала у агрегату (мањи од 0,5 %), у одређеним условима може иницирати АСР, [1,2,4,5,12,16] и [19]. Натријум и калијум оксиди (Na_2O и K_2O) се у малим количинама налазе у нехидратизованом цементу, у форми раствора сулфата (Na_2SO_4 и K_2SO_4) или као мешавина соли (Na , K) $_2\text{SO}_4$. Извор алкалија могу бити и минерални додаци, нпр. згура (ggbs) и летећи пепео (PFA), и/или загађен агрегат, соли за одмрзавање леда, итд. Поред њих, постоји мала количина слободног CaO који касније прелази у $\text{Ca}(\text{OH})_2$, настао хидратацијом минерала C_3S и C_2S . За време процеса хидратације, сулфати реагују са алуминатима и настаје еtringит са јонима Na^+ , K^+ и OH^- у раствору, [1,12]. Реакцијом између силицијума и алкалија настаје

акалано силикатни гел који се прво појављује на вези агрегата и цементне пасте. Гел је сложене структуре, мекан је, и осмозом апсорбује воду и затим експандира, јер настала једињења имају већу запремину у односу на основне компоненте хемијске реакције (Слика 5/б), [8].

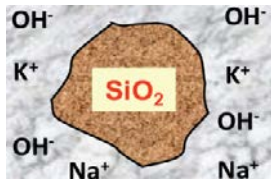


Слика 5/а Компоненте АСР [8]

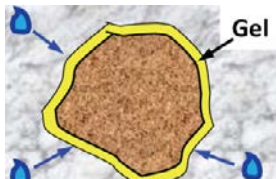


Слика 5/б Микроскопски приказ АСР [8]

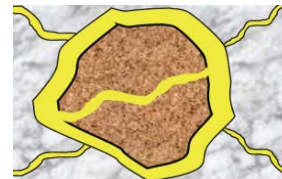
Настао хидраулички притисак узрокује прскања хидратизоване цементне пасте и/или агрегата, зоне њихових веза, стварање мреже прслина и одламање површинског дела бетона. Процес је спор и могу проћи године док се прслине не развију и идентификују, као и мрље од гела који цури кроз њих, на површини БК.



Реакција између алкалних хидроксида из цемента и нестабилног силицијума (SiO_2) у агрегату



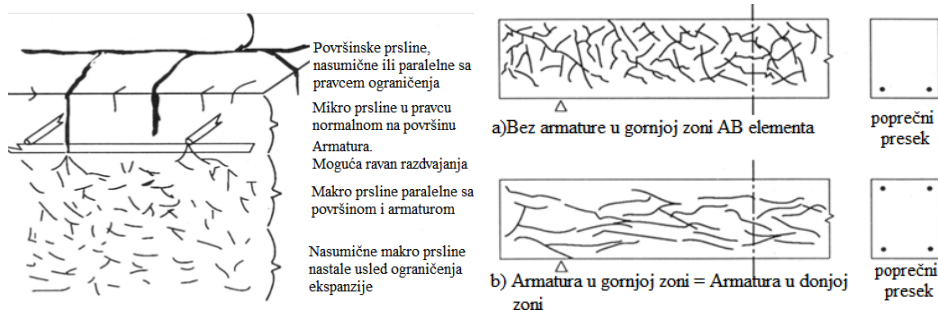
...Реакцијом настаје алкално силикатни гел који упија воду из окружења ...



...и експандира... унутрашња напрезања узрокују прскање бетона....

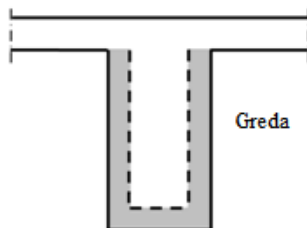
Слика 6. Илустрација тока АСР, [7]и[8]

Развој прслина у елементу БК приказан је на слици 7, при чему арматура може утицати на развој и облик прслина (Слика 7.), [4].



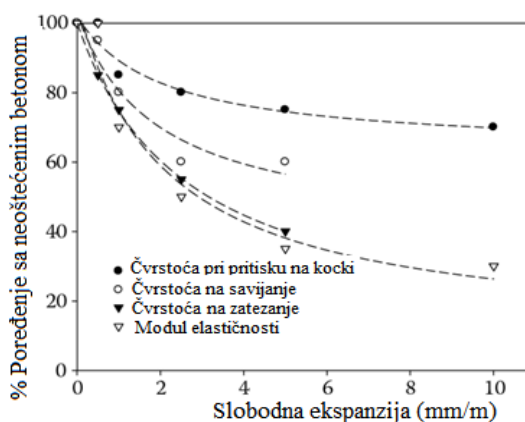
Слика 7. Развој прслина узрокован експанзијом гела у бетону, [4]

Најосетљивији делови БК моста су они изложени високој влази из окружења (нпр. греда (Слика 8)). Осенчење на слици 8 приказује део где садржај влаге највише варира, и где се очекује да ће АСР имати најтеже последице по БК моста.



Слика 8. Попречни пресек греде БМ

У условима виших температура АСР се убрзава и повећава експанзија гела, и даље слабење перформанси бетона, и пре појаве нових прелина (Giannini Zhu, 2012), [8]. Генерално, АСР током времена слаби перформансе бетона (чврстоће бетона, модул еластичности,...), односно БК, [1,4,5,7,8,12,16,] и [19]. Слабење чврстоће на притисак се неповољно одражава на притиснуте елементе, стубове. Код греда, где је чврстоћа на савијање и смицања важна, смањење ових чврстоћа зависи од обима захваћених површина АСР и најчешће је релативно мала. Нека истраживања су показала да је пад чврстоћа бетона (притисак, затезање и савијање) услед АСР између 10% и 30%, [16]. Већина истраживања постојећих БК изложених АСР су показала да упркос великој експанзији и прскању бетона, капацитет носивости БК најчешће није био драстично редукован (Hobbs 1988.; Chana u Korobokis 1992.; Bah, Torson u Nilsen 1992.; Monet 1997.; Boenig 2000.; Deschenes 2009.; Larson 2010.г.),[4,5,8,12,16,] и [19]. Опширнији преглед ових истраживања су анализирали Deschenes (2009) u Kreitman (2011), [8].



Слика 9. Слабење перформанси бетона услед АСР, [5]

Иако је у неким случајевима непосредни утицај АСР на носивост елемената БК релативно мали, формирање и развој прелина у бетону може током времена

узроковати негативне последице на перформансе БК. Прслине у бетону заштитног слоја, због повећања продора хлорида из окружења, могу убрзати корозију челичне арматуре, иницирану хлоридима. Слично је и са могућом пенетрацијом сулфата. АСР може бити и основни узрок деламинација заштитног слоја бетона (АБ плоча моста на слици 10/а, [19]). У овим случајевима корозија арматуре се брзо иницира и прогресивно развија. Нека истраживања у Јапану (*Mikata и сар., 2012.g.*) доказала су могућност лома арматуре код БМ, оштећених АСР (слика 10/б), [8]. Пошто је Јапан у активној сеизмичкој зони, ова ситуација је иницирала подизање нивоа превентивних мера заштите БМ од АСР.



Слика 10/а. Деламинација заштитног слоја бетона коловозне плоче БМ, [19]



Слика 10/б. Лом арматуре на стубу БМ у Јапану, 2008.г., [8]

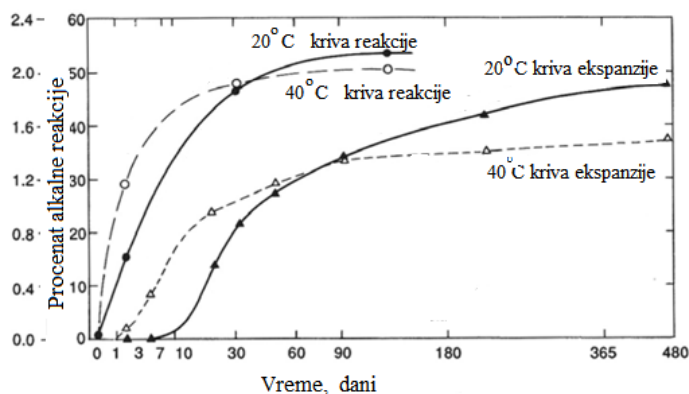
Шири преглед проблема лома арматуре услед АСР, нарочито у Јапану и САД, објавио је *Veb, 2011.g.*, [8]. Осим у Јапану, до сада нема публикованих података о конкретним случајевима лома арматуре услед АСР, [8]. Последице АСР се неповољније одражавају на трајност и употребљивост, у односу на носивост БК мостова. Посебно је неповољан изглед видљивих делова БМ, где је АСР интензивирала и гел кроз прслине процурио на спољне површине греда и стубова.

4. ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА МЕХАНИЗАМ АСР

За иницирање и развој хемијског процеса, и експанзију бетона истовремено су потребне три примарне компоненте: реактивни силицијум (обично из агрегата), алкалије (примарно из цемента и додатно из окружења), и присуство воде и/или воде из окружења. Међутим, на иницирање и развој АСР поред примарних, утиче и низ других фактора који су међусобно повезани и симултани. Прецизнија класификација свих фактора је сложена и једна од могућих је: окружење (температура, вода и/или влага, алкалије, итд.), агрегат (врста, облик, структура, итд.), цемент и вода (садржај и врста цемента, w/c фактор, итд.), употреба адитива и/или додатака, поре (садржај, величина, распоред, међусобна повезаност), и конструкција (облик и димензије, величина и смер деловања оптерећења, итд.). Ова класификација указује на комплексност утицајних фактора на АСР. При томе неки од њих могу имати повољан или неповољан утицај на АСР и могу варирати у оквиру саме БК, током експлоатационог века (ЕВ).

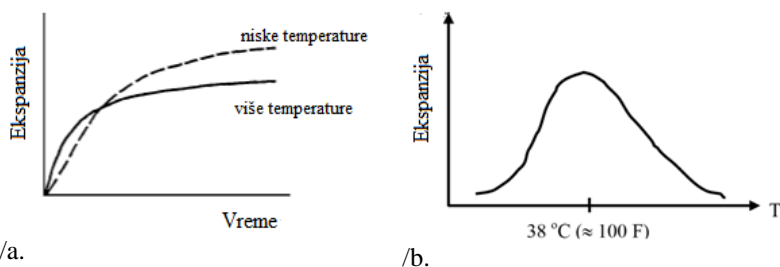
4.1. Окружење-Средина

Температура директно утиче на хемијску реакцију и на експанзију бетона. Ако је температура виша, хемијски процес и експанзија бетона ће пре започети, у односу на ниже температуре. Међутим, при нижим температурама експанзија бетона траје дуже и може надмашити ону остварену на вишим температурама. Ови ефекти су приказани на слици 11, где се виде резултати лабораторијског тестирања узорака на температурама, $+20^{\circ}\text{C}$ и $+40^{\circ}\text{C}$, [4,5]. Дијаграми показују да узорци тестирани на $+40^{\circ}\text{C}$ реагују и експандирају брже, али су кумулативни резултати на крају нижи од коначних вредности, код узорака изложених температури од $+20^{\circ}\text{C}$.



Слика 11. Реакција и брзина експанзије на $+20^{\circ}\text{C}$ и $+40^{\circ}\text{C}$ (Poole, 1992), [4,5]

Бројна истраживања и испитивања бетона са истим садржајем алкалија показала су оптималну температуру око $+38^{\circ}\text{C}$, при којој је експанзија бетона највећа (Locher, 1973.), [5,16]. Испитивања су показала да се укупна експанзија бетона за поједине врсте агрегата спорије развија, са даљим повећањем температуре (слика 12/a).

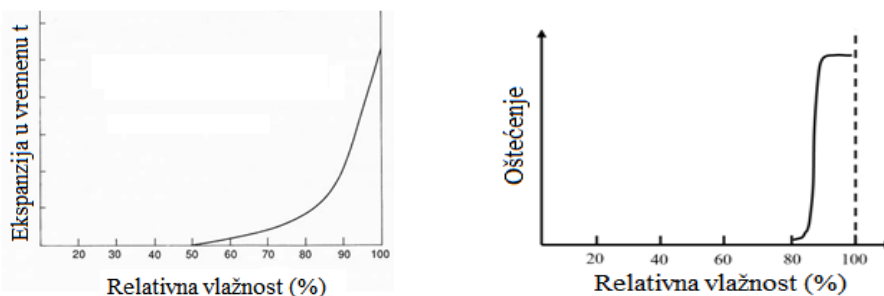


Слика 12./a. Криве експанзије бетона при нижим и вишим температурама, 12/б. Оптимална температура при којој је експанзија највећа, [4,5,12,16] и [19]

Бетони који садрже умерено реактивне агрегате и изложени су хладнијем окружењу показују симптоме АСР након 15-так година [7]. Бетони који садрже високо реактивне агрегате и изложени су топлој и влажној клими могу испрскати за мање од 2 године, [7]. Истраживања у Данској су на примеру гредног БМ показала ефекат

зависности АСР од температуре, [16]. Штетни утицај АСР је уочен у АБ греди са јужне стране, док прскање није уочено са северне стране, због тога што се током дана површина АБ греда на јужној страни загрева од сунца, док је северна страна у сенци. Надаље, спољашњи делови попречних пресека се загревају више од унутрашњих делова, што убрзава АСР у спољашњим деловима, ако је садржај воде довољно висок. Међутим, имајући у виду резултате приказане на слици 11 и 12/а, експанзија и прскање бетона се временом могу очекивати и на хладнијем делу БК, и развити се више него на топлијем делу конструкције.

Вода има примарну улогу у формирању гела и важан је фактор у развоју последица АСР на БК мостова (слика 13). Истраживања и стечена искуства показују да гел не експандира ако је влажност бетона мања од 80%. На слици 13 приказан је однос између садржаја воде и експанзије бетона, [4,5,12,16] .

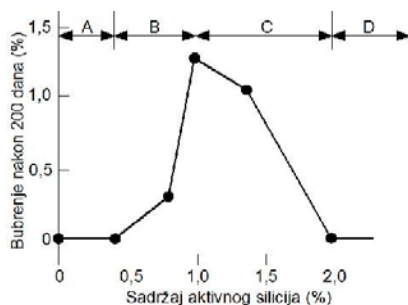


Слика 13. Утицај воде на експанзију, [4,5,12,16] и ниво оштећења бетона,[16]

Ниске температуре, вода, соли за одмрзавање леда. Код БМ неповољност су циклуси влажења и сушења бетона што може утицати на локалну концентрацију компоненти АСР. Оштећења бетона услед АСР у комбинацији са циклусима сушења и влажења, смрзавања и одмрзавања, и соли за одмрзавање леда се тешко разликују са аспекта примарног типа детериорације бетона јер се међусобно симултано стимулишу, при чему је тешко разликовати узроке и последице. На пример, код оштећења бетона од смрзавања или АСР, бетон испрска што иницира развој оба механизма. При томе се погоршава стања бетонских површина од дејства мрза, кроз прелине у бетон продиру хлориди из соли за одмрзавање који иницирају корозију челичне арматуре. Додатно, количина алкалија се може повећати продором соли за одмрзавање леда, чиме се повећава ризик од АСР уколико оне доспеју до реактивних зона, односно агрегата у бетону. При томе, пропусност бетона је један од главних фактора који утиче на могућност продора алкалија у бетон. Ипак, утицај алкалија које продиру у бетон споља има улогу само када се АСР већ одвија унутар бетона, [5]. У тим случајевима додатне алкалије могу имати одложено дејство, [1,4,5,12] и [16]. Количина алкалија које продиру споља је знатно мања од оних из цемента, и нису довољне за иницирање и развој АСР, [1,5,16] и [19]. У случају циклуса смрзавања и одмрзавања + соли за одмрзавање + АСР, оштећења бетона се не манифестују истовремено јер се она од АСР спорије развијају у односу на она од смрзавања и одмрзавања, која могу настати у врло кратком, хладном периоду.

4.2. Агрегат

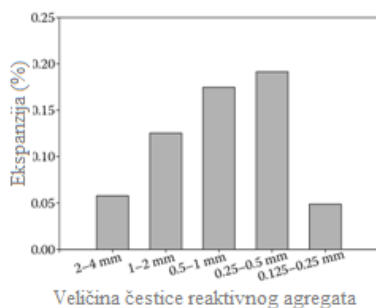
Агрегат је примарна компонента (силицијум) АСР и због тога је познавање перформанси агрегата важно са аспекта АСР. Најчешће се могу издојити четири битне перформансе агрегата: врста и реактивност, облик зрна, гранулометријски састав, и коришење додатака. Велики број агрегата може да садржи реактивни облик силицијума у различитим количинама. У принципу и мала количина реактивног силицијума може да иницира АСР. Најважнији фактор код реактивности агрегата је реактивност расположивог силицијума који зависи од структуре SiO_2 (кристални или аморфни), односно од могућих недостатака у молекуларној структури, [1,2,4,5,12] и [16]. Ако структура има више недостатака реактивност агрегата и ризик од АСР је већи, јер поремећена структура има на располагању већу површину за потенцијалну реакцију. Кристална структура зависи од начина формирања и геолошке историје агрегата. Угрожене силицијумске структуре укључују аморфну, стаклену, крипто-кристалну и микрокристалну, [5]. Ненапрегнути кварц има највише SiO_2 , али је стабилан и мала је вероватноћа да је реактиван, [4]. Користан преглед природе реактивних облика агрегата објавио је *Diamond*, још 1976.г., [5,12] и [16]. Повећање садржаја реактивног силицијума повећава се експанзија бетона до одређеног нивоа, након чега се она смањује. Највећа је експанзија када има реактивног силицијума толико, колико је потребно да реагује са расположивим алкалијама. Однос реактивног силицијума и расположивих алкалија најчешће је у интервалу од 3,5 до 5,5. На слици 14, [1,5,12,16], приказана су четири (А, В, С и D) карактеристична интервала међусобне зависности експанзије цементног камена и количине силицијума:



Слика 14. Утицај садржаја активног силицијума на експанзију [1,12]

- **А:** Мали садржај реактивног силицијума и експанзија гела након очврђавања бетона је мала да узрокује прелине у бетону,
- **В:** Присутно је више алкалија и реакција се наставља све до исцрпљења реактивног силицијума и реакција може узроковати прелине у бетону,
- **С:** Присутно је више силицијума у односу на расположиве алкалије, реакција се наставља све док се не исцрпе расположиве алкалије или док њихова концентрација опадне испод одређеног нивоа. При томе упијање воде опада са смањивањем односа алкалија и реактивног силицијума.
- **Д:** Количина реактивног силицијума је велика, реакција је брза, гел се развија споро и када бетон очврсне он не узрокује појаву прелина.

Истраживање утицаја облика и стања зрна агрегата на АСР није резултирало потпуно усаглашеним ставом, [4,5,8]. Облик зрна може утицати на потенцијалну реактивност агрегата јер диктира количину воде и алкалија које могу доспети у контакт са реактивним зонама на зрну. Поломљена зрна имају већу специфичну површину од неоштећених, и ако садрже реактивне компоненте оне ће бити доступне раствору алкалија. Међутим, ипак није потпуно тачна претпоставка да зрна са великом специфичном површином интензивирају АСР у односу на честице истог садржаја, али са мањом специфичном површином,[4]. Разлог је што зрна са великом специфичном површином током хидратације цемента брзо формирају добру везу са цементом, стварајући компактнији бетон. Без даљих истраживања, не може се извести коначан закључак нарочито јер специфична површина у неким случајевима показује чак и заштиту од АСР, због густине формираног бетона који спречава транспорт алкалија до реактивне зоне агрегата. Са аспекта гранулометријског састава агрегата главни фактор остаје реактивност силицијума, као и код утицаја облика агрегата. Одлучујући фактор у оба случаја је специфична површина честица чијим се повећањем реактивност повећава, при чему важе иста ограничења као за утицај облика агрегата. Мање честице могу продуковати гушће бетоне и заштита од АСР коју дају гушћи бетони може преовладати над већом реактивношћу честица, са аспекта АСР, [4] и [16]. Неки истраживачи сугеришу да мале честице могу бити врло реактивне с обзиром на АСР, али да се напрезања у бетону могу смањити у односу на напрезања која се јављају када се користе веће честице, [4]. Сматра се да ситне честице (20 до 30 μm) могу довести до експанзије за неколико седмица, а велика зрна тек након неколико година, [1,12].



Слика 15. Утицај величине честица агрегата на експанзију, ASTM C1252 [5]

4.3 Цемент

Алкалије, другу примарну компоненту потребну за АСР, садржи цемент. Садржај алкалија у бетону се одређује као сума свих расположивих алкалија у kg/m^3 бетона. Са повећањем количине алкалија се убрзава АСР, али тек код садржаја већег од 3,5-4 kg/m^3 бетона, односно приближно 0,6% по маси цемента, [1,5,12] и [16]. Мања количине алкалија не нарушава структуру због смањења рН порне воде, чак и код присуства реактивног агрегата. Количина алкалија у цементу се изражава као еквивалент укупне масе натријум оксида = $\text{Na}_2\text{O}+0,658\text{K}_2\text{O}$. Ова вредност, позната

као алкални садржај цемента, срачунава се кроз однос натријум оксида (Na_2O) и калијум оксида (K_2O), путем њихове релативне атомске масе, [16]:

$$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 61.979/94.203 = 0.65793 \approx 0,658$$
$$\% (\text{Na}_2\text{O})_{\text{eq}} = [\text{Тежина у } \% \text{ Na}_2\text{O}] + 0.658[\text{Тежина у } \% \text{ K}_2\text{O}]$$

Цементи са учешћем еквивалента Na_2O мањим од наведене вредности, називају се „ниско алкални” цементи, [1,4,5,12] и [16]. Алкални садржај портланд цемента (PC) који се производи у свету, најчешће је између 0,3% и 1,5%, мање него раније, чему је допринела и свест о феномену АСР. Нпр. у Р.Ирској, просечна вредност за PC је постепено смањивана са преко 1%, на око 0,7%), [16]. У многим државама се раније претпостављало да бетони справљани са „ниско алкалним” цементима неће узроковати АСР, пошто концентрација хидроксид јона у бетону може бити мала у односу на бетоне справљене са „високо алкалним” цементима. Међутим, код ових разматрања често се изостављао допринос алкалија из агрегата, или из окружења, [1,4,5,8] и [12]. Одређене варијације код цемената има утицаја на расположивост алкалија, а тиме и на АСР. Иако је већина смерница за смањење ризика од АСР усмерена на агрегат, други начин спречавања АСР је избор садржаја цемента, врсте цемената и w/c (w/b) фактор, пошто је цемент главни извор алкалија. Садржај цемента (kg) се користи по запремени бетон (m^3) што утиче на количину и баланс реактивних компоненти присутних у бетону. Као што је случај са многим другим факторима у случају садржаја цемента кључна је оптимална количина цемента, тиме и алкалија. Ако га има мање или више, то се неповољно одражава на општи квалитет бетона, тиме расте и ризик од АСР. Са аспекта врсте цемената, АСР се повезује са коришћењем PC. Као мера заштите од АСР актуелно је коришћење PC са додацима: PFA, ggbs, и силикатна прашина (SF), који смањењу ризик од АСР и валоризује се на следећи начин, [1,5,16]:

- PFA и ggbs садрже алкалије, али њихово учешће у укупном алкалитету је мало у комбинацији са PC, због чега се узима у обзир само део њиховог садржаја алкалија, чиме се садржај алкалија у везиву може смањити,
- смањују пропусност бетона, што успорава или прекида транспорт реактивних материја и брзину АСР,
- садрже реактивни силицијум, нарочито SF, што повећава његово учешће, чиме се прелази у интервал D, на дијаграму (слика 14), у коме је смањена експанзија бетона. При томе треба користити довољну количину минералног додатка за прелазак у овај интервал са мањом експанзијом,
- препорука за замену дела PC је: 30-40% PFA, 20% SF, или 50-65% ggbs,[1].

У Холандији је ограничен број случајева АСР из раније праксе справљања многих бетона од цемента са додатком ggbs, као економична алтернатива у односу на друге врсте цемента, [2] и [4]. Ово је била случајност, јер тада пројектанти нису били свесни повољног утицаја ggbs на заштиту од АСР, [4]. Без обзира што је везиво са додатком ggbs потенцијално реактивно, ggbs се сматра повољнијим у односу на PC јер ова везива имају гушћу структуру и нижи pH од PC, што редукује АСР, јер веће присуство хидроксида „разбија” структуру силицијума, током АСР, [4,5] и [16]. W/c фактор примарано утиче на перформансе бетона, подложен је осцилацијама код уградње у односу на пројектовану величину, што захтева велику пажњу. Бетони са

вишим w/c фактором су пропуснији, мање су им чврстоће и отпорност на АСР. Са аспекта АСР, пожељан је нижи w/c фактор, усаглашен са осталим аспектима пројектовања и уградње бетона, нарочито обрадљивости. Лоше уграђен и некомпактан бетон има зоне где се брже иницира и развија АСР.

4.4 Употреба додатака – Додаци

Материје које се додају цементу, води, агрегату и свежем бетону или када он очврсне, утичу на АСР. Примена аераната редукује експанзију гела, али то није заштита од АСР, [4]. Примена суперпластификатора повољно утиче на БК, са аспекта АСР, [4]. Међутим, резултати неких истраживања указују да истовремена примена агрегата опала и суперпластификатора узрокује већу експанзију гела, [1,4] и [5]. Оптималне количине SF, PFA и ggbs смањују експанзију бетона, уз ограничења која дефинишу смернице за пројектовање бетона, [1,3,5,7,8,16] и [19]. Исправно коришћење PFA је прихваћеније у односу на SF, што је спорније. Кад се користи у складу са прописима, примена PFA је мање спорна, иако није поуздана заштита од АСР, [5] и [16]. Na₂O-еквивалент у SF варира између 0,3-5,5% и он садржи 60-98% аморфног SiO₂, што су главни елементи за формирање гела, [5,12] и [16]. Када се исправно користи SF, реакција је брза, одвија се код очвршћавања, и оштећења бетона се неће појавити (D на сл.14). Иако се SF сматра повољним, постоје и случајеви у којима је имала неповољан утицај, што је описано у истраживању *Juenger и сар.* [13]. Одлучујући фактор у овим случајевима је висока концентрација и нехомоген распоред SF, у бетону. Због тога, у неким околностима, SF није потпуна заштита од АСР. Повољан утицај пуцолана није сасвим јасан, али се најчешће описују као: мања порозност; већа чврстоћа и крутост бетона; мања количина алкалија; и пуцолански материјал реагује са C-S-H и редукују Ca(OH)₂ и алкалије, [1,4,5,8, 19].

4.5 Остали фактори

Број, распоред и међусобна повезаност пора одређује пропусност бетона и примарни је фактор транспорта материја кроз бетон што утиче на АСР. Приликом реакције настаје гел који може до одређене мере испунити поре и смањити напрезања бетона. У тој ситуацији, тек када се поре испуне до краја гелом, може доћи до напрезања и појаве прелина. Ипак, велики број пора које се могу испунити гелом није гаранција заштите бетона од оштећења услед АСР. Са друге стране поре могу бити испуњене раствором алкалија и водом, што је повољно за развој АСР. Генерално, непропусни бетони су мање порозни и подложни АСР јер је транспорт реактивних компоненти успорен или немогућ. Међутим, у случају АСР мање порозни бетони не могу апсорбовати гел због мање пора што изазива напрезања и прскање бетона. На АСР могу утицати димензије и детаљи БК мостова. Конструктивне мере могу утицати на два начина. Први се односи на димензије елемената БК у условима окружења. Ако БК има већи однос П(површина)/В(запремина) она је изложенија условима окружења, тиме и осетљивија на АСР. Овај фактор је тешко проценити, јер се неколико параметара

мултиплицира и може утицати истовремено. Као и димензије, важни су детаљи БК јер се АСР чешће и брже развија на осетљивим зонама БК. Многи елементи БК су пројектовани тако да се оптерећење дистрибуира у одређеном смеру (греде, стубови и сл.) што може усмерити развој АСР и експанзију гела. У начелу, напрезања узрокована АСР траже пут мањег отпора. Уношење и ток сила, може утицати на АСР, јер смер оптерећења утиче на смер експанзије бетона, при чему армирања може спречити ширење у једном смеру. Величина и смер оптерећења у БК има мањи утицај на АСР, у односу на услове окружења и састав бетона.

5. АЛКАЛНО КАРБОНАТНА РЕАКЦИЈА-АЦР

АЦР је први открио *Svenson, 1957.g.*, у области Кингстон у Канади, у исто време када је први пут идентификована и АСР у Канади [8]. У САД, АЦР је откривена 1961.g. (*Hadlei 1961*, [15]), и касније у Енглеској, Аргентини, Бразилу, Шпанији, Бахреину, Ираку и Кини (*Ozil, 2006*, [15]). У Кини су током 1980-тих година идентификоване велике пукотине код друмских БМ, аеродрома и тротоара узроковане АЦР, [4]. У овим БК, агрегат је био доломитни кречњак или доломитске стене. За разлику од АСР, проблеми везани за АЦР још увек су ограничени на неколико изолованих локација широм света. Реакције и механизам АЦР је објаснио *Gillott, 1964.g.* [8]. АЦР се одвија између алкалија и дробљеног агрегата добијеног од доломита, кречњачких доломита и још неких карбонатних стена. Овом реакцијом се трансформише минерал доломита у минерале калцита и стварање минерала бруцита што узрокује пад затезне чврстоће бетона и појаву микропрелина, на површини бетона. Активне су само оне доломитне стене у којима је однос садржаја доломита и калцита у границама од 40:60 до 60:40 и уз присуство минерала глине од сса 10%. При томе, у односу на АСР, АЦР је релативно мало истраживана, и научни консензус на ову тему тек треба да буде постигнут. Иако се зна да алкално-карбонатно реактивни доломитски кречњаци имају карактеристичну текстуру, структуру и да хемијска реакција узрокује дедоломитизацију (доломит → бруцит + калцит), постоје неусаглашеност око тога, да ли је експанзија бетона код АЦР можда последица АСР. У том погледу преовладава став да без обзира на механизам експанзије, постоје карактеристична АЦР која се разликује од АСР. Основна особина АЦР је кратак период пре појаве оштећења, реакцију на веома ниском алкалном нивоу, неефикасност пуцолана и шљаке у контроли експанзије и немогућност одређених тестова да се идентификују реактивни агрегати. *Katayama* у својим истраживањима 1992, 2004, 2010.g. тврди да штетна експанзија доломитног агрегата је вероватно последица АЦР услед присуства крипстокристалног кварца, [14].

6. ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ

ААР може узрковати озбиљна оштећења бетона код БМ, што слаби перформансе бетона и примарно угрожава употребљивост и трајност БК мостова. У одређеним околностима, у комбинацији са другим детериорационим процесима и/или корозијом челичне армирање, ААР може угрозити и носивост БК мостова. Када се

иницира АСР, једини начин да се заустави је елиминисање воде, што у случају БМ најчешће није могуће. Важно је смањити ризик од појаве ААР веома пажљивим одабиром материјала и пројектовањем састава бетона. Треба избегавати реактивне агрегате - постоје препоруке за сврставање агрегата обзиром на састав у агрегате мале, средње и велике реактивности. Ограничити количину алкалија у цементу, употребом РС са малим садржајем алкалија и/или са минералним додацима. Ограничити количину укупних алкалија, на мање од 3 кг/м³ бетона, при чему је потребно узети у обзир различито порекло алкалија (цемент, минерални додаци уз фактор редукције, соли за одмрзавање и сл.). Компактан бетон, мале порозности, је добра заштита, са аспекта ААР. Приликом пројектовања и грађења БМ водити рачуна да бетон остане што дуже сув током ЕВ, што је тешко оствариво за већину БМ. У тим случајевима је погодно коришћење додатних система заштите (баријере), до одређене, могуће границе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bjegović,D., Štrimer,N.: *Teorija i tehnologija betona*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, str.1000, **2015**.
- [2] Borsje,H., Peelen,W.H.A., Postema,F.J., and Bakker,J.D.: *Rectificatie: Monitoren Alkali Silica Reactie in viaducten*, Cement (7), p. 88, **2002**.
- [3] Цмиљанић,С.: Оштећења бетонских мостова као последица алкалне реактивности агрегата у бетону, Југословенско саветовање “Стање и санације мостова на путевима у СР Југославији”, Нови Сад, 1997, Стр.355-361, **1997**.
- [4] Cruceq, P.: *Development of a method to measure the mechanical behavior of ASR gels, Part I: Literature Study, Alkali-silica reaction, causes, effects and prevention, Microlab Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, Netherlands*, p.47, November, **2005**.
- [5] Dyer,T.: *Concrete Durability*, by Taylor & Francis Group, LLC, London, p.398, **2014**.
- [6] *Durable Concrete structures, Design guide, CEB Bulltein DInformation*, № 183, Thomas Telford Ltd, p.106, May, **1992**.
- [7] *FHWA-HIF-12-022, Report, Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook*, Austin, USA, p.61, December, **2011**.
- [8] *FHWA-HIF-13-019, Report, Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book*, Austin, USA, p. 208, March, **2013**.
- [9] *fib Bulletin 53: Structural Concrete-Textbook on behaviour, design and performance*, Vol. 3, Lausanne, Switzerland, p.373. **2009**.
- [10] Fournier, B., et al.: *Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures*, FHWA Report, No FHWA-HIF-09-004, Washington, D.C., p.147, **2010**.
- [11] *Guide to the Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali-Aggregate Reaction, CSA A864-00*, Canadian Standards Association, Toronto, p.108, **2000**.
- [12] Illston, J. M.; Domone, P. L. J.: *Construction Materials, Their nature and Behavior*, Third Edition, Spon Press, p.554, **2006**.

- [13] Juenger, M.C.G., and Ostertag, C.P.: *Alkali-silica reactivity of large silica fume-derived particles*, Cement and concrete research, 34 (2004), p. 1389-1402, **2004**.
- [14] Katayama, T.: *The so-called alkali-carbonate reaction (ACR)-Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR*, Cement and Concrete Research, 40, pp. 643-675, **2010**.
- [15] Ozol, M.A.: *Alkali-carbonate rock reaction, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials* (Ed. J.F. Lamond and J.H. Pielert), ASTM STP 169D, Chapter 35, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 410-424, **2006**.
- [16] Richardson, M.: *Fundamentals durable of concrete structures*, First published 2002, by Spon Press 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE, p.260, **2002**.
- [17] Stark, D.: *Handbook for the Identification of Alkali-silica Reactivity in Highway structures*, SHRP-C/FR-91-101, p.47, **1991**.
- [18] Wigum, B.J.: *Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks*, NTH - University of Trondheim, Dr.Ing. Thesis, p.223, **1995**.
- [19] Wigum, B.J., Pederson, L.T., Lindgard, J.: *State-of-the-art-report: Key paramteres influencing the Alkali Aggregate Reactions*, Trondheim, Norway, p.48, **2006**.

THE EFFECT OF ALKALI-AGGREGATE REACTION ON CONCRETE BRIDGE STRUCTURES

Summary: *This paper shows contemporary issues related to unfavorable effects of concrete alkali-aggregate reaction (AAR) on concrete bridge structures (CBS). Although AAR unfavorable effects on CBS were identified in 1930s, it was much later that AAR was acknowledged as one of the most pronounced deterioration processes in concrete that results in damages to concrete structures. There are two basic forms of AAR: alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR). Compared to ACR, ASR is more prominent, especially in certain geographic parts of the world. Damages to concrete caused by the ASR have negative effect primarily on usability and durability of CBS, what is followed by the decrease in load bearing capacity of structural components and reliability of the whole structure, shortening of service life (SL) and costly repairs. For CBS, simultaneous occurrence of ASR and other degradation processes in concrete, such as those caused by the presence of moisture, water, temperature variations and use of deicing salt during winter, are especially damaging. Based on review of the most relevant literature, this paper is focused on mechanisms and mechanisms factors of the ASR, related contemporary research and reliability design guidelines for CBS that are based on prevention of the initiation and development of ASR.*

Key words: *Concrete structures, bridges, alkali-aggregate reaction, alkali-silica reaction, mechanism, factors, concrete, aggregate, cement*