

SHRINKAGE OF CONCRETE - A GENERAL OVERVIEW

СКУПЉАЊЕ БЕТОНА - ОПШТИ ПРЕГЛЕД

Danica Goleš¹
Nemanja Bralović²
Darko Gajić³

UDK: 666.972:532.135
DOI: 10.14415/zbornikGFS34.01
CC-BY-SA 4.0 license

Summary: The volume change of concrete due to loss of water through the exchange with environment or the self-desiccation during the hydration, or due to chemical reactions of hydrated cement with carbon-dioxide from environment, is one of the most undesirable phenomena in concrete. It is both an early-age and a long-term process, but from the structural point of view the shrinkage of concrete from the moment of its exposure to the environment is of most interest. Types of shrinkage, their causes, main influencing factors and possible measures to mitigate the shrinkage and its consequences are presented, based on the review and analysis of the latest published research in this field.

Keywords: Concrete, shrinkage, causes of shrinkage, influencing factors, measures for reduction

1. INTRODUCTION

Concrete is a complex material whose properties change through time. The rate and magnitude of these changes depend on a wide range of internal and external factors, like composition and proportion of the mix, mixing time,

Резиме: Промена запремине бетона услед губитка воде кроз размену са окружењем или самоисушивање током хидратације, или услед хемијских реакција хидратисаног цемента са угљен-диоксидом из околине, једна је од најнепожељнијих појава у бетону. Ово је дуготрајан процес који почиње одмах након справљања бетонске мешавине, али је са конструктивне тачке гледишта најзначајније скупљање бетона након његовог излагања окружењу. На основу прегледа и анализе најновијих објављених истраживања у овој области, у раду су приказане врсте скупљања, њихови узроци, главни утицајни фактори и могуће мере за смањење скупљања и његових последица.

Кључне речи: Бетон, скупљање, узроци скупљања, утицајни фактори, мере за смањење

1. УВОД

Бетон је сложен материјал чија се својства мењају током времена. Брзина и интензитет ових промена зависе од великог броја унутрашњих и спољних фактора, као што су састав мешавине, време мешања, транс-

1 Danica Goleš, PhD, Associate Professor, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: dgoles@gf.uns.ac.rs

2 Nemanja Bralović, PhD student, Assistant, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: nemanjabralovic@hotmail.com

3 Darko Gajić, PhD student, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: darko.gajic24@gmail.com

handling, placing and compacting, method and duration of curing, shape and dimensions of a member, presence, type and configuration of reinforcement, loading conditions, environmental conditions, presence of aggressive media, etc. Some of these changes, like strength gain, are welcome, while others, e.g. volume change, formation of cracks in concrete around the embedded reinforcement etc. are undesirable, so measures are taken to avoid them or at least to reduce them to an acceptable level.

The changes of concrete properties also affect the resistance, serviceability, durability and appearance of the finished structure and structural members.

One of the most undesirable time-dependent phenomena is the volume change of concrete due to shrinkage. Cracks caused by irreversible restrained shrinkage deformations can affect the appearance of the structure, as well as its tightness for liquids or gases. These cracks may not be threatening to the durability of the structure by themselves, but in conjunction with unfavorable environmental conditions can facilitate the penetration of aggressive substances to the reinforcement and accelerate its corrosion, which shortens the service life of the structure. Additionally, strains due to shrinkage lead to reduction of the prestress force. Shrinkage of concrete is the isothermal decrease of volume due to changes of internal relative humidity or due to chemical reactions, in the absence of external load [1, 2]. Commonly it is divided into the four components: plastic shrinkage, autogenous or basic [3] shrinkage, drying shrinkage and carbonation shrinkage [1, 2] (Figure 1). Typical "final" values of concrete shrinkage strains are between 200 and 800×10^{-6} , while the cement paste may experience shrinkage strains in a range of 2000 to 6000×10^{-6} [1].

порт, уградња и компактирање, метод и трајање неге, облик и димензије елемента, постојање, врста и распоред арматуре, услови оптерећивања, услови средине, присуство агресивних агенаса, итд. Неке од ових промена, као што је прираст чврстоће, су добродошле, док су друге, нпр. промена запремине, појава прслина на контакту бетона и арматуре и др. непожељне, па се предузимају мере за њихово спречавање или бар свођење на прихватљиви ниво.

Промене својстава бетона утичу и на носивост, употребљивост, трајност и изглед готове конструкције и конструктивних елемената.

Једна од најнепожељнијих временски зависних појава је промена запремине бетона услед скупљања. Прслине изазване неповратним спреченим деформацијама услед скупљања могу утицати на изглед конструкције, као и на њену непропусност за течности или гасове. Ове прслине не морају саме по себи да угрозе трајност конструкције, али у спрези са неповољним условима средине могу олакшати продор агресивних супстанци до арматуре и убрзати њену корозију, чиме се скраћује експлоатациони век конструкције. Поред тога, дилатације услед скупљања доприносе смањењу силе преднапрезања.

Скупљање бетона је смањење запремине неоптерећеног узорка при константној температури услед промене унутрашње релативне влажности или услед хемијских реакција [1, 2]. Оно се најчешће дели на четири компоненте: пластично скупљање, аутогено или сопствено [3] скупљање, скупљање услед сушења и карбонизационо скупљање [1, 2] (слика 1). Типичне "коначне" величине дилатација скупљања бетона су између 200 и 800×10^{-6} , док цементна паста може имати дилатације скупљања од 2000 до 6000×10^{-6} [1].

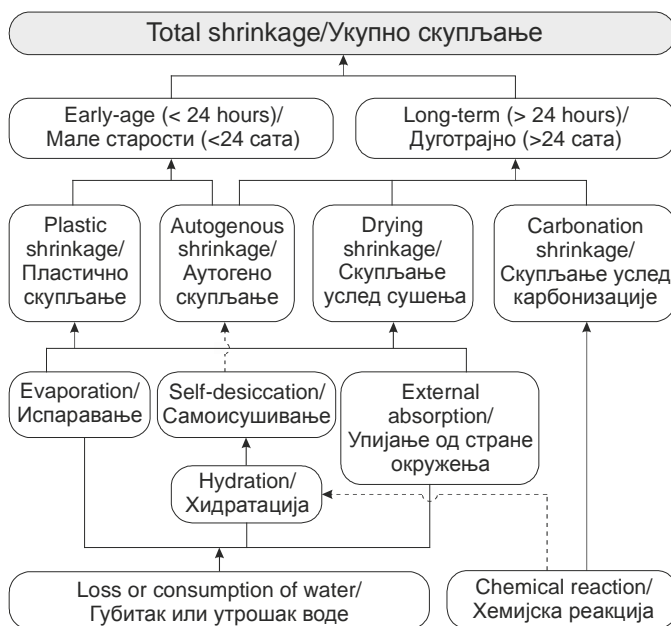


Figure 1 – Types and governing mechanisms of shrinkage
Слика 1 – Врсте скупљања и процеси који га узрокују

2. PLASTIC SHRINKAGE

Plastic shrinkage (PS) is the early-age shrinkage which develops in the first 24 hours after mixing. It is a volumetric contraction of the cement paste while concrete is in the plastic state and has very low tensile strength, which may cause the occurrence of plastic cracking at the surface of the element. PS is caused by the loss of water due to evaporation from the surface or due to suction by the sub-base or formwork. Cracks caused by plastic shrinkage initiate at the concrete surface and develop inward [4]. PS can be easily reduced by proper concreting procedures and by preventing the high rate of evaporation from the concrete surfaces by wet curing, use of windbreaks and sunshades (Table 1). Reduction of PS and PS cracking in concrete is tackled by the use of shrinkage-reducing admixtures (SRA), superabsorbent polymers (SAP) or by

2. ПЛАСТИЧНО СКУПЉАЊЕ

Пластично скупљање (ПС) је смањење запремине цементне пасте које се одвија у прва 24 сата након мешања, док је бетон у пластичном стању и поседује врло ниску чврстоћу на затезање, због чега се на површини елемента могу појавити прслине које касније напредују ка унутрашњости [4]. ПС је последица губитка воде услед испаравања са површине или упијања од стране подлоге или оплате. ПС се лако може смањити одговарајућим пос-тупцима бетонирања и спречавањем наглог испаравања воде са површине бетона кроз негу вла-жењем, те примену ветробрана и сунцобрана (табела 1). Редукција ПС и њиме изазваних прслина постиже се и употребом додатака за смањење скупљања (ДСС), супер-сорбентних полимера (САП) или додатком влакана бетону [4, 5, 6].

the incorporation of fibers in concrete [4, 5, 6]. *Swelling* - the expansion of the concrete - may occur if there is a continuous supply of water during hydration, but to a much lesser extent than shrinkage (10 to 20 times).

3. AUTOGENOUS SHRINKAGE

Autogenous shrinkage (AS), also called basic shrinkage, is the inelastic macroscopic dimensional reduction of a stress-free element at constant temperature and under sealed conditions, i.e. without any moisture exchange with the surrounding medium [1, 5, 7]. It is caused by the self-desiccation, which is induced by the consumption of water during chemical reactions of hydration of cement matrix. AS is both an early-age and a long-term process. While the PS takes place from mixing until the final setting, AS mainly starts after the initial setting of concrete, within the first 24 hours after mixing [4]. Cracks induced by AS usually propagate uniformly through the concrete member. In normal strength concrete (NSC) autogenous shrinkage strain is very small, usually not greater than 50 to 100×10^{-6} [8], but in high performance (HPC) and ultra-high performance concrete (UHPC), with very low water-to-cement ratio (w/c), AS is a significant part of the total shrinkage [1, 8] (Figure 2). Tazawa and Miyazawa [9] have reported that for a w/c ratio of 0.17, the autogenous shrinkage strains of the cement paste at 1 day and 14 days were 2500×10^{-6} and 4000×10^{-6} , respectively. It was also reported that in concrete specimens with w/c ratio of 0.17 an AS of 700×10^{-6} may occur [10]. Main factors affecting the rate and final magnitude of AS, as well as measures to reduce the AS cracking are shown in Table 1. One of the main causes of increase in AS is reduction of water-to-binder (w/b) ratio (Fig. 3).

Бубрење - повећање запремине бетона - може се појавити ако током хидратације постоји непрекидно снабдевање водом, али је оно далеко мање величине него скупљање (10 до 20 пута).

3. АУТОГЕНО СКУПЉАЊЕ

Аутогено скупљање (АС), такође звано основно или сопствено, је нееластично макроскопско смањење димензија неоптерећеног елемента на константној температури и у запечаћеним условима, тј. без размене влаге са околином [1, 5, 7]. АС је последица самоисушивања узрокованог потрошњом воде током хемијских реакција хидратације цемента. Док се ПС одвија од мешања до почетка очвршћавања, АС је дуготрајан процес који почиње након почетка везивања бетона [4], а најинтензивнији је првих дана након уградње. Прслине изазване АС најчешће пропадају равномерно кроз бетонски елемент. У бетонима нормалне чврстоће (БНЧ) дилатације услед АС су најчешће врло мале, не веће од 50 до 100×10^{-6} [8], док у бетонима високих (БВП) и бетонима ултра-високих перформанси (БУВП), са врло ниским водоцементним фактором (w/c), АС представља значајан део укупног скупљања [1, 8] (слика 2). Tazawa и Miyazawa [9] су на цементним пастама са w/c фактором 0.17 при старостима од 1 и 14 дана измерили дилатације аутогеног скупљања од 2500×10^{-6} и 4000×10^{-6} , респективно. На узорцима бетона са w/c фактором 0.17 забележено је АС величине 700×10^{-6} [10]. Главни фактори који утичу на брзину и крајњу величину АС и мере којима се могу ублажити прслине изазване АС приказани су у табели 1. Један од главних узрока повећања АС је смањење односа воде и везива (слика 3).

Table 1 - Types, causes and influencing factors of shrinkage and measures to reduce it

Type of shrinkage	Plastic shrinkage	Autogenous shrinkage	Drying shrinkage	Carbonation shrinkage
Starting time	Immediately after mixing	After the initial setting	At environmental exposure	At environmental exposure
Main causes	Loss of water by evaporation from the surface or suction by the sub-base or formwork	Self-desiccation induced by the consumption of water during chemical reactions of hydration of cement matrix	Loss of water by exchange with the environment	Chemical reactions between hydrated cement and carbon dioxide from the atmosphere
Main influencing factors	<ul style="list-style-type: none"> - air temperature - relative humidity (RH) of the air - wind speed - w/c ratio - size and shape of a member - type of cement - cement content - fines content 	<ul style="list-style-type: none"> - w/c ratio - fineness of cement - cement composition - SCMs - amount and type of aggregate - admixtures - curing method 	<ul style="list-style-type: none"> - w/c ratio - cement type and content - ambient RH and temperature - aggregate type and content - admixtures - size and shape of a member 	<ul style="list-style-type: none"> - ambient RH and temperature - curing conditions - size and shape of the specimen - CO₂ concentration and partial pressure - cyclic CO₂ exposure - cement composition
Measures to avoid or reduce the shrinkage and the shrinkage induced cracking	<ul style="list-style-type: none"> - dampening the sub-base and forms - windbreaks and sunshades - covering - fog sprays - SRA - addition of fibers - concreting at lower ambient temperatures - curing starting immediately after finishing - revibrating - addition of SAP 	<ul style="list-style-type: none"> - decreasing fineness and specific surface area of cement - addition of fly ash, RHA, zeolite or metakaoline - higher a/c ratio - aggregate with larger modulus of elasticity - internal curing by LWA or SAP - addition of fibers 	<ul style="list-style-type: none"> - Type I or II (N or S) cement - SRA combined with EA - aggregate with higher modulus of elasticity - higher aggregate content - lowest practical sand and water content - fibers - adequate curing method and duration 	<ul style="list-style-type: none"> - low porosity - addition of alkalis - low internal relative humidity
References	[4, 5, 6, 16, 17]	[1, 4, 5, 7 - 19]	[1, 20 - 26]	[1, 27 - 30]

Табела 1 – Врсте, узроци и утицајни фактори скупљања и мере за његово смањење

Врсте скупљања	Пластично скупљање	Аутогено скупљање	Скупљање услед сушења	Скупљање услед карбонизације
Време почетка	Одмах након мешања	Почетак везивања	Излагање окружењу	Излагање окружењу
Главни узроци	Губитак воде испаравањем са површине или упијањем од стране подлоге или оплате	Самоисушивање узроковано потрошњом воде током хемијских реакција хидратације цемента	Губитак воде кроз размену са околином	Хемијске реакције између хидратисаног цемента и угљен-диоксида из атмосфере
Главни утицајни фактори	<ul style="list-style-type: none"> - температура и релативна влажност ваздуха (RH) - брзина ветра - водоцементни фактор (w/c) - величина и облик елемента - врста цемента - количина цемента - садржај ситних фракција 	<ul style="list-style-type: none"> - w/c фактор - финоћа млива цемента - састав цемента - минерални додаци - количина и врста агрегата - адитиви - метода неге 	<ul style="list-style-type: none"> - w/c фактор - врста и количина цемента - температура и RH околине - количина и врста агрегата - адитиви - величина и облик елемента 	<ul style="list-style-type: none"> - температура и RH околине - услови неге - величина и облик елемента - концентрација и парцијални притисак CO₂ - циклично излагање дејству CO₂ - састав цемента
Мере за смањење скупљања и прслина изазваних скупљањем	<ul style="list-style-type: none"> - квашење подлоге и оплате - ветробрани и сунцобрани - покривање - распршивање магле - ДСС - додаток влакана - бетонирање при нижим температурама - почетак неге одмах након уградње - ревибрирање 	<ul style="list-style-type: none"> - смањење финоће млива и специфичне површине цемента - додаток летећег пепела (ЛП), пепела пиринчане љуске (ППЉ), зеолита или метакаолина - виши а/с фактор - агрегат са већим модулом еластичности - унутрашња неге са ЛА или САП - додаток влакана 	<ul style="list-style-type: none"> - Цемент типа I или II (N или S) - ДСС комбиновани са ЕА - агрегат са већим модулом еластичности - виши садржај агрегата - најмањи практичан садржај песка и воде - влакна 	<ul style="list-style-type: none"> - ниска порозност - додаток алкалија - ниска унутрашња релативна влажност

	- додатак САП		- погодна метода и трајање неге
Референце	[4, 5, 6, 16, 17]	[1, 4, 5, 7 - 19]	[1, 20 - 26] [1, 27 - 30]

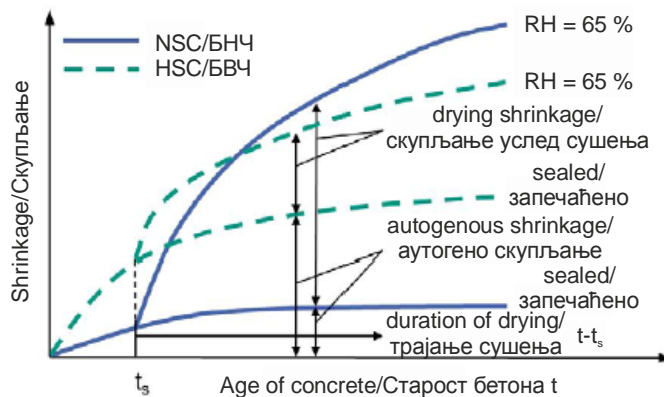


Figure 2 – Autogenous and drying shrinkage in NSC and high-strength concrete (HSC) [8]

Слика 2 – Аутогено скупљање и скупљање услед сушења код БНЧ и бетона високе чврстоће (БВЧ) [8]

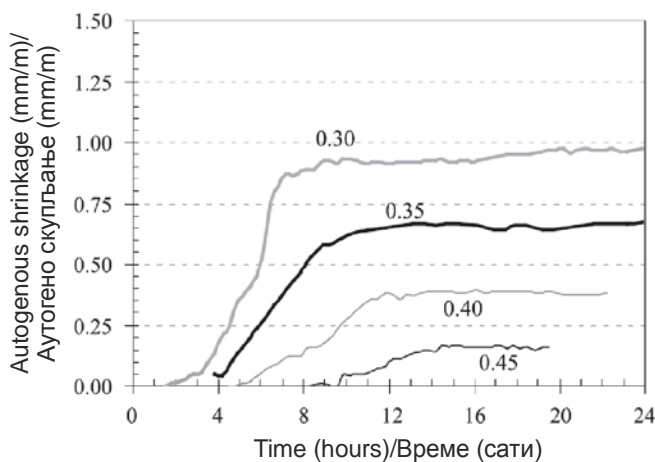


Figure 3 – Influence of w/c ratio on early-age autogenous shrinkage [11]
Слика 3 – Утицај w/c фактора на аутогено скупљање прва 24 сата [11]

The influence of supplementary cementitious materials (SCM) on AS of HPC is still under consideration and some contradictory results are obtained. It is well established that the addition of

Утицај минералних додатака цементу на АС БВП-а је и даље предмет истраживања, а добијени су неки контрадикторни резултати. Поуздано је утврђено да додаток одговарајуће

a proper amount of fly ash, rice husk ash (RHA), metakaoline or zeolite reduce the AS [12], while the addition of silica fume (SF) increases it [13], but regarding the influence of blast-furnace slag (BFS) there are conflicting observations. According to some authors, addition of BFS increases AS, but others reported no influence or even reduction of AS with addition of BFS [12]. AS is also influenced by the cement composition, where the content of C_3A is one of the most dominant factors. According to Tazawa and Miyazawa [9] and Holt [11] in high-early-strength cements with higher contents of C_3S and C_3A more AS is observed than in low heat generating cements with higher contents of C_2S , which is in contrast with Jensen [14], who found that a high C_3A or gypsum content causes a marked reduction of autogenous deformation of the cement paste. Reduction of AS may be accomplished by decreasing fineness and specific surface area of cement or by simultaneous reduction in amount of cementitious materials and increase in volume of aggregate with larger modulus of elasticity [11]. Addition of appropriate amount of steel fibers may also significantly suppress the AS. Caution is needed when chemical admixtures are used. Addition of superplasticizer may cause the increase in AS by almost 50% [11]. One of the most developed and popular methods for reduction of AS is internal curing (IC) of concrete achieved by adding absorbent materials in concrete which will introduce the extra water when the internal relative humidity drops due to hydration. Commonly used IC materials are pre-wetted lightweight aggregates (LWA) and, recently, superabsorbent polymers (SAP). According to the State-of-the-Art Report of RILEM TC 196-ICC [15] the effectiveness of IC by LWA mostly depends on three variables: the degree of LWA saturation, the level of replacement of normal weight aggregate by LWA and the size of LWA particles. Excellent results in the reduction of AS

количине летећег пепела (ЛП), пепела пиринчаних љуски (ППЉ), метакатолина или зеолита снижава АС [12], док га додаток силикатне прашине (СП) повећава [13], али у погледу утицаја згуре високих пећи (ЗВП) постоје супротстављена запажања. Према неким ауторима, додаток ЗВП повећава АС, док други пријављују да он нема утицаја или чак смањује АС [12]. На АС утиче и састав цемента, при чему је садржај C_3A један од доминантних фактора. Према Tazawa и Miyazawa [9] и Holt-у [11] веће АС је примећено у цементима високе ране чврстоће, са вишим садржајем C_3S и C_3A него у цементима ниске топлоте хидратације са вишим садржајем C_2S , што је у супротности са налазима Jensen-а [14], према којима висок садржај C_3A или гипса доводи до значајне *редукције* аутогених деформација цементне пасте.

Смањење АС може се постићи смањењем финоће млива и специфичне површине цемента, или истовременом редукцијом количине везива и повећањем запремине агрегата са већим модулом еластичности [11]. Додатак челичних влакана у правој количини такође може значајно умањити АС.

Опрез је неопходан при употреби хемијских адитива. Тако нпр. додаток суперпластификатора може довести до увећања АС за скоро 50% [11].

Једна од најразвијенијих и најпопуларнијих метода за смањење АС је унутрашња нега (УН) бетона. Током мешања се бетону додају апсорбујући материјали, који ће отпустити додатну воду када се унутрашња релативна влажност спусти услед хидратације. Најчешће коришћени УН материјали су водом засићени лаки агрегати (ЛА) и, у последње време, суперапсорбентни полимери (САП). Према актуелном Извештају RILEM TC 196-ICC [15] успешност УН помоћу ЛА највише зависи од три променљиве: степена засићења ЛА,

of HPC and UHPC, with the simultaneous reduction of PS, recently are achieved by the addition of dry SAP during mixing of concrete, usually in the amount of 0.1 to 0.6% by mass of cement [16]. The addition of SAP may cause both positive and negative consequences on the properties of fresh and hardened concrete. One of the positive effects is improved frost resistance of concrete [16]. The side-effects of application of SAP with or without addition of extra water for IC, such as reduced workability of fresh concrete, increased DS (in some cases accompanied by an increase in total shrinkage), or reduction of mechanical properties, especially early-age compressive strength [17, 18], may be reduced and even avoided by the selection of the right type and quantity of SAP, the amount of internal curing water and the way of its addition, the type and quantity of additives (primarily superplasticizers), and the methods of mixing, casting and curing [17]. This issue is dealt with by RILEM Technical Committee TC 260-RSC, which recommended in [19] a procedure for designing mix compositions of concrete with SAP.

4. DRYING SHRINKAGE

Drying shrinkage (DS) can be defined as the time-dependent strain at constant temperature of an unloaded specimen that is allowed to dry [1, 20], or simply as the reduction in volume caused by the loss of water due to a moisture exchange with the surrounding medium. DS starts immediately after the end of curing.

The most important factors affecting the drying shrinkage are ambient relative humidity (RH), w/c ratio, aggregate type and content, cement type and content, and size and shape of the element [1, 20] (Tables 1 and 2).

Since concrete shrinkage is primarily caused by shrinkage of the cement

количине агрегата нормалне тежине који се замењује са ЛА и величине зрна ЛА. Одлични резултати у редукцији аутогеног скупљања БВП и БУВП, уз истовремено смањење ПС, у новије време се постижу додатком сувих САП током мешања бетона, најчешће у количини од 0.1 до 0.6% у односу на масу цемента [16]. Додатак САП може изазвати позитивне и негативне последице на својства свежег и очврслог бетона. Једна од позитивних последица је повећана отпорност бетона на мраз [16]. Негативни ефекти примене САП са или без додатка воде за УН, као што су смањена обрадљивост свежег бетона, повећање скупљања услед сушења (у неким случајевима и повећање укупног скупљања), или пад механичких својстава, нарочито ране чврстоће на притисак [17, 18] могу се смањити, па чак и избећи правилним избором врсте и количине САП, количине додатне воде потребне за УН и начина њеног дозирања, врсте и количине адитива (пре свега суперпластификатора), те начина мешања, уградње и неге бетона [17].

Овом проблематиком се бави РИЛЕМ-ов технички одбор ТЦ 260-РСЦ који је у [19] препоручио поступак за пројектовање састава мешавина бетона са додатком САП.

4. СКУПЉАЊЕ УСЛЕД СУШЕЊА

Скупљање услед сушења (СУС) се може дефинисати као временски зависна дилатација неоптерећеног узорка изложеног сушењу на константној температури [1, 20], или једноставно као смањење запремине изазвано губитком воде због размене влаге са окружењем. СУС почиње одмах по престанку неге.

Најзначајнији фактори који утичу на СУС су релативна влажност средине (RH), w/c фактор, врста и количина агрегата, врста и количина цемента,

paste, the total shrinkage of concrete may be reduced by increasing the relative aggregate content (a/c), especially if a high-quality aggregate with high elastic modulus is used (e.g. quartz, limestone, dolomite, feldspar or granite) [20]. An increase in maximum aggregate size decreases the paste content and, consequently, decreases DS [1]. Increasing the slump of concrete by increasing the total water content, w/c ratio or total paste content at the same time increases drying shrinkage. The same effect on DS has the increase of the cement content.

те димензије и облик елемента [1, 20] (табеле 1 и 2).

Како је скупљање бетона највише узроковано скупљањем цементне пасте, редуција укупног скупљања бетона се може постићи повећањем релативног садржаја агрегата (a/c), нарочито ако се користи агрегат високог квалитета са високим модулом еластичности (нпр. кварц, кречњак, доломит, фелдспар или гранит) [20]. Повећањем максималне величине зрна агрегата смањује се количина цемента а самим тим и СУС [1]. Повећање слегања бетона повећањем садржаја укупне воде, w/c фактора или укупне количине пасте истовремено повећава СУС. Исти ефекат на СУС има и повећање количине цемента.

Table 2 - Factors affecting drying shrinkage
Табела 2 - Фактори који утичу на скупљање услед сушења

Mixture/ Мешавина	aggregate/агрегат	quantity/количина
		size and grading/ величина и гранулометрија
		elastic properties/ еластична својства
	cement/цемент	specific weight/ специфична тежина
		clay content/садржај глине
		water content/садржај воде
admixtures/ додаци	slump/слегање	
	quantity/количина	
	chemical composition/ хемијски састав	
Environment/ Околина	RH	chemical/хемијски
		SCM/минерални
	constant (average)/ константна (просечно) суclis/циклична	
Design and construction/ Пројектовање и извођење	curing/нега	temperature/температура
		wind/ветар
		type/врста
		duration/трајање
		temperature/температура
		member size and shape/величина и облик елемента

LWA in principle increase the DS of concrete [1]. In early age, the water

Употребом лаког агрегата се у принципу повећава СУС бетона [1].

absorbed in LWA, used for IC of HPC, may compensate the reduced internal relative humidity and consequently decrease the DS of concrete, but as the hardening of concrete progresses, the low elastic modulus of lightweight aggregates results in greater DS compared to that of normal-weight concrete [21].

Cements with low quantities of sulfate may have increased DS, while a high alumina content results in more rapid occurrence of DS [1]. Greater DS is found in concrete with finely ground cements than in concrete with coarser ground cements. It is considered that the total air content of the concrete less than 8% have no effect on the magnitude of DS of ordinary Portland cement (OPC) concrete [1], but the study of Piasta and Sikora [22] on OPC and blended cements (BPC) has shown that shrinkage strains increase significantly alongside with an increase in the content of entrained air, regardless of cement type.

The environment has a significant influence on the DS. With the decrease in ambient relative humidity (RH) the rate and the magnitude of DS increase. Greater DS is observed in concrete specimens stored at a constant RH than in those exposed to cyclic relative humidity with the same average RH value. The effect of elevated ambient temperature on DS is less pronounced than the effect of RH [1].

DS is also influenced by the design and construction of concrete members, above all the type and duration of curing and the shape and size of the concrete member. It is generally accepted that the optimal period of moist-curing is 7 days [20]. Some experimental work even showed that moist curing longer than 4 to 8 days may increase DS, while heat and steam curing can significantly reduce it [1]. Maximum values of DS were found for curing times between 24 and 48 hours. The rate of DS is inversely proportional to the size of the concrete member, expressed through the

Вода апсорбована у ЛА може компензовати смањену унутрашњу релативну влажност младог бетона и тиме смањити СУС, али са развојем процеса очвршћавања долази до изражаја ниски модул еластичности ЛА, због којег се јавља увећано СУС у односу на бетоне са агрегатом нормалне тежине [21].

Цементи са малим количинама сулфата могу имати повећано СУС, док висок садржај алуминијумских оксида води ка бржој појави СУС [1]. Бетони са цементом велике финоће млива имају веће СУС него они са грубље млевеним цементом. Иако се сматра да садржај ваздуха испод 8% не утиче на величину СУС бетона са обичним Портланд цементом (ОПЦ) [1], истраживање које су спровели Piasta и Sikora [22] показује да се дилатације скупљања значајно повећавају са повећањем садржаја увученог ваздуха, како код бетона са ОПЦ тако и код бетона од цемента са минералним додацима.

Услови средине имају значајан утицај на СУС. Брзина и величина СУС расту са снижавањем релативне влажности средине (RH). Веће СУС је примећено код бетонских узорака изложених константној RH него код оних чуваних на променљивој RH исте просечне вредности. Утицај повишених температура на СУС је мање изражен него утицај RH [1].

На СУС такође утичу пројектовање и извођење бетонских елемената, пре свега начин и трајање неге и облик и димензије бетонског елемента. Опште је прихваћено да оптимално трајање неге влажењем износи 7 дана [20]. Испитивања су показала да нега влажењем дужа од 4 до 8 дана може чак и да повећа СУС, док га запаривање значајно смањује [1]. Максималне вредности СУС су забележене при нези у трајању између 24 и 48 сати. Интензитет СУС је обрнуто пропорционалан величини бетонског елемента, која се изражава као однос запремине и површине

volume-to-drying surface area ratio (V/S) and it is more pronounced in thin concrete members (slabs and shells).

General recommendations to minimize drying shrinkage include [20, 23, 24]:

- Use of cement Types I, II (European N, S) or V (expansive hydraulic cement) and avoidance or careful use of Type III (R) because of its high rate of heat generation;
- Use of shrinkage-compensating concrete. The expansion of this concrete during curing compensates the shrinkage that occurs once it is exposed to drying, so that the net shrinkage is negligible;
- Incorporation of shrinkage reducing admixtures (SRA). Some of the reported side-effects are reductions in the degree of hydration of the cement and reduction in the strength development of concrete, reductions in early age mechanical strength and delays in setting times [24, 25]. On the other hand, introduction of expansive agents (EA) leads to a mechanical strength increase. Recent studies of the simultaneous use of SRA and EA have shown that, even though a significant strength reduction at 28 days was observed, partial strength recovery was achieved due to the presence of the EA [25];
- Use of well graded, well shaped aggregates with minimum amounts of dirt. Preference should be given to aggregate types with a higher modulus of elasticity, as well as concrete mixtures with a higher aggregate content;
- Minimal paste content in the concrete mixture, which can be accomplished by utilizing of the largest practical maximum size of aggregate and the lowest practical sand and water content;
- Addition of steel or polymer fibers to the concrete mixture in order to control DS cracking [26];
- Adequate curing method and curing duration - e.g. water curing (wet mat curing, water spray, ponding, or

изложене сушењу (V/S), и већи је код танких бетонских елемената (плоча и љуски).

Опште препоруке за смањење скупљања услед сушења укључују [20, 23, 24]:

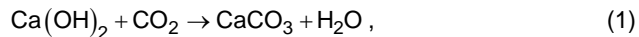
- Употребу цемента типа I, II (европски N, S) или V (експанзивни хидраулички цемент) и избегавање или опрезну употребу типа III (R) због великог развоја топлоте;
- Примену бетона који компензује скупљање. Експанзија овог бетона током неге компензује скупљање које се јавља након излагања сушењу;
- Коришћење додатака за смањење скупљања (ДСС), при чему се могу јавити и нежељени ефекти, као што су смањење степена хидратације цемента и развоја чврстоће бетона, редуција раних механичких чврстоћа и одложено везивање и очвршћавање [24, 25]. Увођење експанзивних агенаса (ЕА), с друге стране, доприноси повећању механичке чврстоће бетона. Недавна истраживања симултане примене ДСС и ЕА показују да, иако је при старости од 28 дана примећен значајан пад чврстоће, захваљујући присуству ЕА може се постићи њен делимичан опоравак [25];
- Употребу добро гранулисаног и обликованог агрегата са минималним садржајем нечистоће. Предност треба дати агрегату са вишим модулом еластичности, као и бетонским мешавинама са већим садржајем агрегата;
- Минималан садржај пасте у мешавини бетона, који се постиже коришћењем највеће практичне максималне величине зрна агрегата и најмање практичне количине песка и воде;
- Додавање челичних или полимерних влакана у бетонску мешавину ради контроле прслина услед СУС [26];

membrane curing) or form curing, for at least 7 days.

5. CARBONATION SHRINKAGE

Carbonation shrinkage (CS) is the irreversible volume change of hardened concrete due to chemical reactions between hydrated cement and carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere, in the presence of moisture [1, 27]. Carbonation of the cement matrix can be subdivided into [27]:

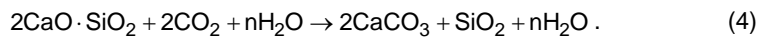
– Portlandite (CH) carbonation - the reaction of carbon dioxide with dissolved calcium hydroxide, which leads to the formation of calcium carbonate:



– Calcium-silicate-hydrate (C-S-H) carbonation - the reaction that results in the formation of calcium carbonate and amorphous silica gel [27, 28]:



– Carbonation of the unhydrated cement constituents - reactions of tricalcium silicate (C₃S) and dicalcium silicate (C₂S) with CO₂:



These two constituents have a small influence on total carbonation in comparison to CH and C-S-H carbonation, especially at the late stage of hydration [29]. Therefore this component of carbonation is usually neglected.

– Адекватан метод и трајање неге - нпр. влажењем (покривање мокрим покривачима, прскање, потапање, или примена мембрана) или негом преко оплате, у трајању од најмање 7 дана.

5. КАРБЕНИЗАЦИОНО СКУПЉАЊЕ

Карбенизационо скупљање (КС) је неповратна промена запремине очврслог бетона услед хемијских реакција између хидратисаног цемента и угљен – диоксида (CO₂) из атмосфере, у присуству влаге [1, 27]. Карбенизација цементног матрикса се може поделити на [27]:

– Карбенизацију портландита (CH) - реакција CO₂ са раствореним калцијум-хидроксидам, која доводи до стварања калцијум-карбоната:

– Карбенизацију калцијум-силикат-хидрата (C-S-H) - реакција при којој се формирају калцијум-карбонат и аморфни силикатни гел [27, 28]:

– Карбенизацију нехидратисаних састојака цемента - реакције трикалцијум-силиката (C₃S) и дикалцијум-силиката (C₂S) са CO₂:

Последње две реакције имају мали утицај на укупну карбенизацију у поређењу са CH и C-S-H карбенизацијом, нарочито у касној фази хидратације [29], због чега се ова компонента карбенизације најчешће занемарује.

The mechanisms of CS are still under debate. A detailed review of CS mechanism proposals is given in the literature [27].

Similar to DS, the magnitude of CS depends on the relative humidity, ambient temperature, curing conditions and member size, but also on CO₂ concentration and partial pressure. Carbonation reaches its highest rate at RH between 50 and 70%, and rapid carbonation is observed in more porous mixes at high RH. Cyclic CO₂ exposure (i.e. periodically stopping and resuming the CO₂ influx) results in a significantly higher degree of carbonation than in continuous carbonation conditions. CO₂ concentration influences both the magnitude and the mechanism of carbonation. Carbonation is more pronounced at a higher CO₂ concentration [27].

Although the carbonation of the cement matrix may cause shrinkage of the concrete and lowering of its alkalinity, which may lead to generalized corrosion of embedded reinforcement, it also may cause changes in porosity of the cement paste (a decrease at early age in case of OPC and an increase in case of BPC [30]) and an improvement of compressive and tensile strength of Portland cement and concrete.

6. CONCLUSION

The main cause of concrete shrinkage is the lowering of water content, which may be caused by evaporation from the surface of a member, suction by sub-base or formwork, or by hydration within the cement matrix. The carbonation shrinkage of hardened concrete, which is a consequence of the chemical reactions of hydrated cement with carbon dioxide from the atmosphere, is of minor importance in most cases and thus usually neglected, or treated together with drying shrinkage.

From the structural designer's point of view, plastic shrinkage can be easily

Дискусија о механизмима КС је и даље актуелна. Детаљан преглед предлога механизма КС дат је у литератури [27].

Слично СУС, величина КС зависи од релативне влажности и температуре околине, услова неге и величине елемента, али и од концентрације и парцијалног притиска CO₂. Карбонизација је најинтензивнија при RH између 50 и 70%, а брза карбонизација се примећује у порознијим мешавинама при високим RH. Циклично излагање дејству CO₂ (тј. периодичан прекид и наставак прилива CO₂) доводи до знатно вишег степена карбонизације него при континуалним условима прилива. Концентрација CO₂ утиче како на механизам тако и на величину карбонизације, која је израженија при већој концентрацији CO₂ [27].

Иако карбонизација цементне матрице може проузроковати скупљање бетона и пад његове алкалности, који може довести до генерализоване корозије арматуре, она такође може довести до промене порозности цементне пасте (смањење у малим старостима код ОПЦ и повећање у случају цемента са минералним додацима [30]) и повећања притисне и затезне чврстоће портланд цемента и бетона.

6. ЗАКЉУЧАК

Главни узрок скупљања бетона је снижавање садржаја воде, које може бити последица испаравања са површине елемента, упијања од стране подлоге или оплате, или хидратације унутар цементне матрице. Карбонизационо скупљање очврслог бетона, које је последица хемијских реакција хидратисаног цемента са угљен-диоксидом из атмосфере, је у већини случајева од мањег значаја, па се обично занемарује или третира заједно са скупљањем услед сушења. Са становишта пројектанта

dealt with and thus has minor significance on hardened concrete in a structure. On the other hand, strains due to autogenous and drying shrinkage of hardened concrete lead to a reduction of prestress force and also may cause the occurrence of cracks which may accelerate the corrosion of reinforcement and decrease the durability of a member. For these reasons, measures have to be taken to reduce the total shrinkage to an acceptable level.

The main parts of the total shrinkage of hardened concrete are the autogenous and drying shrinkage, but they are of different importance in NSC and HPC. In case of NSC, autogenous shrinkage is, in comparison to drying shrinkage, very small and almost negligible, but in HPC it may constitute the main part of total shrinkage.

While the main influencing factors and mechanisms of autogenous and drying shrinkage and separate measures for reducing the shrinkage strains and cracks are well known, one of the issues concerning the reduction of the consequences of shrinkage is that some influencing factors decrease one, but simultaneously increase another type of shrinkage, e.g. addition of alkalis may cause expansion due to carbonation, but also leads to an increase of drying shrinkage. Decrease of drying shrinkage may be accomplished by lowering the w/c ratio, and/or by the addition of superplasticizers, but simultaneously an increase in autogenous shrinkage will be induced.

To prevent excessive shrinkage of concrete, not only a choice of proper measures has to be made, but also the consequences of their simultaneous application have to be experimentally examined. In doing so, experimental research should be conscientious, profound and based on standardised procedures, and the results should be coherent, clear and shown in detail. Particular attention should be paid to the interpretation and processing of the

конструкције, пластично скупљање се може лако контролисати и зато има мали значај за очврсли бетон у конструкцији. Међутим, дилатације које су последица аутогеног скупљања или скупљања услед сушења очврслог бетона доводе до пада силе преднапрезања а такође могу изазвати појаву прслина, које могу убрзати корозију арматуре и смањити трајност елемента. Из ових разлога се морају предузети мере за свођење укупног скупљања на прихватљиву меру.

Главне компоненте укупног скупљања очврслог бетона су аутогено и скупљање услед сушења, али оне имају различит значај код БНЧ и БВП-а. Аутогено скупљање БНЧ је, у поређењу са скупљањем услед сушења, веома мало и готово занемарљиво, али код БВП-а оно може чинити већи део укупног скупљања.

Иако су добро познати главни утицајни фактори и механизми аутогеног скупљања и скупљања услед сушења, као и појединачне мере којима се редукују њихове последице (дилатације и прслине), потребно је пажљиво размотрити могућност да поједини утицајни фактори доприносе смањењу једне, али истовремено повећавају другу компоненту скупљања. Тако се нпр. Повећањем садржаја алкалија може постићи експанзија услед карбонизације, али се истовремено повећава и скупљање услед сушења.

Смањење скупљања услед сушења постиже се снижавањем w/c фактора и додатком суперпластификатора, али по цену истовременог повећања аутогеног скупљања.

Да би се спречило прекомерно скупљање бетона није довољно само одабрати одговарајуће мере, него је потребно експериментално испитати последице њихове истовремене примене. При томе експериментална истраживања морају бити савесна, темељна и заснована на стандар-

measurement data, in particular the extrapolation of short-term measurement data over a longer period of time.

Dealing with concrete shrinkage and the reduction of its consequences is a complex issue which gains on complexity alongside the constant introduction of new constituent materials and additives, for which reliable data concerning their long-term effects on the properties and behavior of concrete are missing.

дизованим поступцима, а резултати кохерентно, јасно и детаљно приказани. Посебну пажњу треба посветити интерпретацији и обради мерених података, нарочито екстраполацији краткорочних мерења на дужи временски период.

Скупљање бетона и смањење његових последица је сложена тема која додатно добија на сложености сталним увођењем у састав бетона нових материјала и адитива, чији утицај на својства и понашање бетона у довољно дугом временском периоду није поуздано установљен.

REFERENCES

- [1] ACI 209.1R-05 Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, ACI Committee 209, American Concrete Institute, **2005**.
- [2] ACI 209R-92 (Reapproved 1997) Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Committee 209, American Concrete Institute, **1982**.
- [3] fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, **2013**.
- [4] Sayahi, F.: Plastic Shrinkage of Concrete, Academic thesis, Luleå University of Technology, Sweden, **2016**.
- [5] Report rep025: Early Age Cracking in Cementitious Systems - Report of RILEM Technical Committee 181-EAS - Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, RILEM, **2003**.
- [6] Mora-Ruacho, J., Gettu, R., Aguado, A.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete, *Cement and Concrete Research*, **2009**, 39, pp. 141-146.
- [7] Wyrzykowski, M., Igarashi, S. I., Lura, P., Mechtcherine, V.: Recommendation of RILEM TC 260-RSC: Using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage, *Materials and Structures*, **2018**, vol. 51, No. 5, Article 135.
- [8] Müller, H.S., Breiner, R., Kvitsel, V., Haist, M.: Creep and Shrinkage of Concrete - from Theoretical Background and Experimental Characteristics to Practical Prediction Models, *Concrete 2015, Proceedings of the 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM Week*, Melbourne, Australia, **2015**.
- [9] Tazawa, E., Miyazawa, S.: Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste, *Cement and Concrete Research*, **1995**, vol. 25, No. 2, pp. 281-287.
- [10] Tazawa, E., Miyazawa, S.: Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology, *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium "Creep and Shrinkage of Concrete"*, London, **1993**, pp. 159-168.
- [11] Holt, E.: Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages, *Cement and Concrete Research*, **2005**, 35, pp. 464-472.
- [12] Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials - Final draft report of RILEM Technical Committee 238-SCM, working group 4, Springer, **2018**.
- [13] Zhang, M. H., Tam, C. T., Leow, M. P.: Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Research*, **2003**, 33, pp. 1687-1694.
- [14] Jensen, O. M.: Influence of cement composition on autogenous deformation and change of the relative humidity, *Proc. PRO 17, Int. RILEM workshop, Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000*, Ed. Baroghel-Bouny et al., Paris, **2000**, pp. 143-153.
- [15] Report rep041: Internal Curing of Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 196-ICC, RILEM, **2007**.

- [16] Mechtcherine, V.: Use of superabsorbent polymers (SAP) as concrete additive, RILEM Technical Letters, 1, **2016**, pp. 81-87.
- [17] RILEM State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP: Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction, Springer Netherlands, **2012**.
- [18] Silva, E. F., Manzano, M. A. R., Lopes, A. N. M., Filho, R. D. T.: Effect of SAP on the autogenous shrinkage and compressive strength of high-strength fine-grained concrete, Proceedings PRO 95: International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction, **2014**.
- [19] Wyrzykowski, M., Igarashi, S. I., Lura, P., Mechtcherine, V.: Recommendation of RILEM TC 260-RSC: using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage, Materials and Structures, **2018**, 51.
- [20] ACI 224R-01 Control of cracking in Concrete structures, ACI Committee 224, American Concrete Institute, **2001**.
- [21] Choi, S.: Internal relative humidity and drying shrinkage of hardening concrete containing lightweight and normal-weight coarse aggregates: A comparative experimental study and modeling, Construction and Building Materials, **2017**, 148, pp. 288-296.
- [22] Piasta, W., Sikora, H.: Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes, Construction and Building Materials, **2015**, 99, pp. 298-307.
- [23] Folliard, K., Smith, C., Sellers, G., Brown, M., Breen, J. E.: Evaluation of Alternative Materials to Control Drying-Shrinkage Cracking in Concrete Bridge Decks, Research Report, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, **2003**.
- [24] Schäffel, P.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on shrinkage and mechanical as well as durability related properties of concrete, Proceedings PRO 95: International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction, **2014**.
- [25] Oliveira, M. J., Ribeiro, A. B., Branco, F. G.: Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete, Construction and Building Materials, **2014**, 52, pp. 267-275.
- [26] Yousefieh, N., Joshaghani, A., Hajibandeh, E., Shekarchi, M.: Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete, Construction and Building Materials, **2017**, 148, pp. 833-845.
- [27] Šavija, B., Luković, M.: Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, Construction and Building Materials, **2016**, 117, pp. 285-301.
- [28] Morandea, A., Thiéry, M., Dangla, P.: Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, Cement and Concrete Research, **2014**, 56, pp. 153-170.
- [29] Peter, M. A., Muntean, A., Meier, S. A., Böhm, M.: Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study, Cement and Concrete Research, **2008**, 38, pp. 1385-1393.
- [30] Ye, H., Radlińska, A., Neves, J.: Drying and carbonation shrinkage of cement paste containing alkalis, Materials and Structures, **2017**, Vol. 50, No. 2, Article 132.