

PREDICTION MODELS FOR SHRINKAGE OF CONCRETE - OVERVIEW, CLASSIFICATION AND COMPARISON

МОДЕЛИ ЗА ПРЕДВИЂАЊЕ СКУПЉАЊА БЕТОНА - ПРЕГЛЕД, КЛАСИФИКАЦИЈА И ПОРЕЂЕЊЕ

Danica Goleš¹

UDK: 666.972:532.135
DOI: 10.14415/zbornikGFS34.02
CC-BY-SA 4.0 license

Summary: In assessment of the future behavior of a designed concrete structure, the data on the time development of strains due to shrinkage of concrete is of particular importance. The selection of an appropriate prediction method and model for concrete shrinkage will affect the accuracy of the estimation, but also the duration and cost of the design. In order to facilitate this selection, this paper presents the fields of application, factors that are considered, the classification and the basic equations for four frequently used prediction models for shrinkage of concrete: ACI 209, GL 2000, MC 2010 and B4. The results obtained by application of these models on a few examples from literature are compared and discussed.

Keywords: Concrete, shrinkage, models, classification, comparison

1. INTRODUCTION

The estimation of the magnitude and rate of shrinkage strains of concrete is carried out by application of empirically and theoretically based models, using known input parameters (defined by design or experimentally determined). Although having a similar basic form, the models differ from each other in the

Резиме: При процени будућег понашања пројектоване бетонске конструкције посебан значај имају подаци о временском развоју дилатација услед скупљања бетона. Избор одговарајуће методе и модела за предвиђање скупљања бетона утицаће на тачност процене, али и на трајање и цену пројектовања. Да би се олакшао овај избор, у раду су прегледно приказане области примене, параметри које узимају у обзир, класификација и основне једначине за четири често коришћена модела за предвиђање скупљања бетона: ACI 209, GL 2000, MC 2010 и B4. Упореджени су и коментарисани резултати добијени применом ових модела на неколико примера из литературе.

Кључне речи: Бетон, скупљање, модели, класификација, поређење

1. УВОД

Процена величине и брзине развоја дилатације скупљања бетона врши се применом емпиријски и теоријски заснованих модела, уз употребу познатих (пројектом дефинисаних или експериментално утврђених) улазних параметара. Иако имају сличну основну форму, ови модели се међусобно разликују по области

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: dgoleš@gf.uns.ac.rs

ranges of their applicability, type and number of input parameters and the shape of the function describing the time development of shrinkage strain. The estimated values of shrinkage strains, obtained by different models, usually differ significantly among themselves, but also compared to the measured values. Models for shrinkage and creep of concrete are developed, calibrated and compared with each other based on the known data from laboratory tests and measured deflections of existing structures, mostly bridges. For this purpose, databases of the experimentally obtained concrete shrinkage and creep data are created. Currently the most extensive, created by the enlargement of the RILEM-ACI 209 database from 1992, is a database developed at the Northwestern University (NU) in the United States between 2010 and 2013, which is still regularly updated with data from the latest experimental research [1]. Usability of this data directly depends on the test duration, which usually does not exceed 30 to 90 days. The shrinkage of concrete is the most intensive in the first three months to a year after pouring (when 40 to 85 % of the twelve-year shrinkage occurs [2]), but it continues to develop even at greater ages. This imposes the need for extrapolation of experimentally determined data over a longer period of time.

Although the causes, influencing factors, shrinkage mechanisms and measures to mitigate its consequences are relatively well-explored and known [3, 4], at the design stage only a limited number of parameters describing the properties of material and conditions during construction and exploitation of the structure are known. Therefore, some models for shrinkage and creep of concrete (e.g. EN 1992, fib Model Code 2010 (MC 2010) and Gardner and Lockman GL-2000 model) take into account only the influence of basic parameters, such as the type of cement, mean value of compressive strength,

примене, врсти и броју улазних параметара, те облику функције временског развоја дилатације скупљања. Процењене вредности дилатација скупљања, добијене различитим моделима, најчешће се значајно разликују међусобно, али и у односу на мерене вредности. Модели за скупљање и течење бетона се развијају, калибрирају и међусобно пореде на основу познатих резултата лабораторијских испитивања и мерених деформација готових конструкција, претежно мостова. У ту сврху се формирају базе експерименталних података о скупљању и течењу бетона. Тренутно најобимнија, настала проширењем RILEM-ACI 209 базе из 1992. године, је база развијена на Northwestern University (NU) у SAD између 2010. и 2013. године, која се и данас уредно ажурира подацима из најновијих експерименталних истраживања [1]. Употребљивост ових података директно зависи од дужине трајања испитивања, која најчешће не прелази 30 до 90 дана. Скупљање бетона је најинтензивније у прва три месеца до годину дана након уградње (када се развије 40 до 85 % двадесетогодишњег скупљања [2]), али се оно наставља и у већим старостима, што намеће потребу екстраполације експериментално утврђених вредности скупљања на дужи временски период. Иако су узроци, утицајни фактори, механизми скупљања и мере за ублажавање његових последица релативно добро испитани и познати [3, 4], у фази пројектовања је најчешће познат само ограничен број параметара који описују својства материјала и услове током извођења и употребе конструкције. Због тога неки модели за скупљање и течење бетона (нпр. EN 1992, fib Model Code 2010 (MC 2010) и модел Gardner-а и Lockman-а GL-2000) узимају у обзир само утицај основних параметара, као што су врста цемента, средња вредност

dimensions of a member, and estimated average ambient conditions in exploitation - relative humidity (RH) and temperature. On the other hand, more complex models such as ACI 209R-92, B3 (Bažant and Baweja 1995. and 2000.) and B4 (Bažant et al., 2013.) encompass the influence of a large number of parameters, describing the composition of the mixture, consistency, curing and drying conditions and others. However, accuracy of the values of time-dependent strains estimated this way is not necessarily proportional to the complexity of the model and the number of input parameters.

The aim of this paper is to present a general approach to the problem of the estimation of concrete shrinkage strains, the basic requirements that the predicting models have to fulfill, give a brief presentation of some of the most well-known models, their classification and the fields of application and briefly illustrate and discuss the differences in size, rate and graphical presentation of concrete shrinkage strain obtained by their application.

2. GENERAL REQUIREMENTS

Most of the proposed models for predicting the shrinkage and creep of concrete [5-11] make a compromise between accuracy and simplicity (cost) of application. The ACI Committee 209 [12] considers that the main issues in the development and evaluation of a model are as follows: what is the acceptable level of complexity of the model and which input parameters should be required, what data should be used in evaluating the model, how accurately the model should describe the physical phenomena and which statistical methods are suitable for evaluating the model.

According to RILEM Committee TC 107 and ACI Committee 209 the basic requirements to be met by the concrete shrinkage prediction models are:

чврстоће при притиску, димензије елемента, те процењени просечни амбијентални услови у експлоатацији - релативна влажност (RH) и температура. С друге стране, комплекснији модели попут ACI 209R-92, B3 (Bažant и Baweja 1995. и 2000.) и B4 (Bažant и остали, 2013.) обухватају утицај великог броја параметара којима су детаљно описани састав мешавине, конзистенција, услови неге и сушења и др. Међутим, тачност овако процењених вредности временски зависних дилатација није нужно пропорционална сложености модела и броју улазних података.

Циљ овог рада је да прикаже општи приступ проблему прорачуна дилатација скупљања бетона, основне захтеве које треба да испуне модели за прорачун, да кратак приказ неких од најпознатијих модела, њихову класификацију и области примене и у кратким цртама прикаже и продискутује разлике у величини, брзини развоја и начину приказа дилатације скупљања бетона добијене њиховом применом.

2. ОПШТИ ЗАХТЕВИ

Већина предложених модела за предвиђање скупљања и течења бетона [5-11] прави компромис између тачности и једноставности (цене) примене. ACI Committee 209 [12] сматра да су главна питања при развоју и оцени модела следећа: који је прихватљиви ниво сложености модела и који улазни параметри треба да буду захтевани, који подаци треба да се користе при евалуацији модела, колико прецизно модел треба да описује физичке појаве и које статистичке методе су прикладне за евалуацију модела.

RILEM Committee TC 107 и ACI Committee 209 као основне захтеве које треба да испуне модели за скупљање бетона наводе:

- Drying shrinkage should have an upper limit;
- Shrinkage equations should enable extrapolation in time and size;
- Models can be evaluated through comparison with the experimental data obtained only on samples within the field of applicability of each model;
- Expressions should be easy to use and should not be highly sensitive to small changes in input parameters;
- The shape of individual shrinkage curves over a wide time range should fit the test results;
- Equations should be able to adapt to concretes containing mineral additives and chemical admixtures;
- The models should include the effect of specimen size;
- The models must take into account the changes in relative humidity.

According to ACI Committee 209 [12], each prediction model for shrinkage of concrete should include at least the following information: description of the concrete through the mixture proportions or through its mechanical properties (strength or modulus of elasticity), ambient relative humidity, duration of drying and specimen size.

3. FIELDS OF APPLICATION, INFLUENCING FACTORS AND CLASSIFICATION OF MODELS

The majority of models developed up to the late 1990s are adapted to the normal strength concretes (NSC), which are characterized by a water-to-cement ratio (w/c) above 0.40 and the corresponding quantities of ordinary Portland cement (OPC), most often without mineral additives. More recent models extend the field of application to high-strength (HSC) and high-performance concretes (HPC), with low and very low w/c ratios, high cement contents, mineral additives, alternative aggregate types, wide spectra and combinations of chemical admixtures, etc. One of the important characteristics of the models applicable

- Скупљање услед сушења треба да има горњу границу;
 - Изрази за скупљање треба да омогуће екстраполацију у времену и по величини;
 - Оцена модела може се вршити кроз поређење са експерименталним подацима добијеним само на узорцима који се налазе унутар области примене датог модела;
 - Изрази треба да буду јед-ноставни за употребу и не смеју бити јако осетљиви на мале промене улазних параметара;
 - Облик појединачних кривих скупљања кроз широк временски распон треба да буде у сагласности са резултатима испитивања;
 - Изрази треба да буду у стању да се прилагоде бетонима који садрже минералне и хемијске додатке;
 - Модели треба да обухвате ефекат величине узорка;
 - Модели морају узети у обзир промене релативне влажности.
- Према ACI Committee 209 [12] сваки модел за скупљање треба да укључи минимално следеће информације: опис бетона кроз састав мешавине или преко његових механичких својстава (чврстоћа или модул еластичности), релативну влажност средине, трајање сушења и величину узорка.

3. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ, УТИЦАЈНИ ФАКТОРИ И КЛАСИФИКАЦИЈА МОДЕЛА

Већина модела развијених до краја деведесетих година прошлог века је прилагођена бетонима нормалне чврстоће (БНЧ), које карактеришу вредности водоцементног фактора (w/c) изнад 0.40 и одговарајуће количине обичног портланд цемента (ОПЦ), најчешће без минералних додатака. Новији модели проширују област примене и на бетоне високих чврстоћа (БВЧ) и перформанси (БВП), са ниским и веома ниским w/c

to HPC is the subdivision of total shrinkage (TS) strain into the components of autogenous (AS) and drying shrinkage (DS). More details about AS and DS and their contributions to the total shrinkage of NSC and HPC are given in [4].

The ranges of applicability of the most well-known models for prediction of concrete shrinkage are presented in Table 1.

фактором, високим садржајем цемента, минералним додацима, алтернативним типовима агрегата, широким спектром и комбинацијама хемијских додатака и сл. Једна од битних карактеристика модела применљивих на БВП је раздвајање укупне дилатације скупљања (УС) на аутогену (АС) и компоненту услед сушења (СУС). Више детаља о АС и СУС и њиховом доприносу укупном скупљању БНЧ и БВП дато је у [4]. У табели 1 су приказане области примене најпознатијих модела за предвиђање скупљања бетона.

Table 1 - Parameter ranges for applicability of models

Input variables	Notations [units]	ACI 209R-92	CEB-FIP MC 1990/99	B3	GL-2000	fib MC 2010	B4
Concrete mean compressive cylinder strength	f_{cm28} [MPa]	-	20 to 88	17 to 70	16 to 82	20 to 130	15 to 70
Aggregate-cement ratio by weight	a/c	-	-	2.5 to 13.5	-	-	1.0 to 13.2
Cement content	c [kg/m ³]	279 to 446	-	160 to 720	-	-	200 to 1500
Water-cement ratio by weight	w/c	-	-	0.35 to 0.85	0.4 to 0.6	-	0.22 to 0.87
Relative humidity	RH [%]	40 to 100	40 to 100	40 to 100	20 to 100	40 to 100	-
Type of cement European (U.S.)	-	N or R (I or III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)
Duration of moist curing	t_c	≥1 day	<14 days	≥1 day	≥1 day	≤14 days	-
Duration of steam curing	t_c	1 to 3 days	-	-	-	-	-
Temperature of the environment during curing	T_{cur} [°C]	-	-	-	-	-	20 to 30°C
Temperature of the environment	T [°C]	-	5 to 30°C	-	-	5 to 30°C (With some corrections: 0 to 80°C)	-25 to 75°C
Volume-surface ratio	V/S [mm]	-	-	-	-	-	12 to 120

Table 2 presents the factors which are taken into account in the models considered here.

У табели 2 су приказани фактори које узимају у обзир овде разматрани модели.

Табела 1 – Опсег вредности параметара за поједине моделе

Улазна променљива	Ознака [јединице]	ACI 209R-92	CEB-FIP MC 1990/99	B3	GL-2000	fib MC 2010	B4
Средња вредност чврстоће бетонског цилиндра при притиску	f_{cm28} [MPa]	-	20 до 88	17 до 70	16 до 82	20 до 130	15 до 70
Однос тежина агрегата и цемента	a/c	-	-	2.5 до 13.5	-	-	1.0 до 13.2
Садржај цемента	c [kg/m ³]	279 до 446	-	160 до 720	-	-	200 до 1500
Водоцементни фактор, по маси	w/c	-	-	0.35 до 0.85	0.4 до 0.6	-	0.22 до 0.87
Релативна влажност	RH [%]	40 до 100	40 до 100	40 до 100	20 до 100	40 до 100	-
Врста цемента европски (САД)	-	N или R (I или III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)	S, N, R (I, II, III)
Трајање неге у влази	t_c	≥1 дан	<14 дана	≥1 дан	≥1 дан	≤14 дана	-
Трајање неге запаривањем	t_c	1 до 3 дана	-	-	-	-	-
Температура средине током неге	T_{cur} [°C]	-	-	-	-	-	20 до 30° C
Температура средине	T_{cur} [°C]	-	5 до 30° C	-	-	5 до 30° C (посредно 0 до 80° C)	-25 до 75° C
Однос запремине и површине	V/S [mm]	-	-	-	-	-	12 до 120

Figure 1 presents the classification of models for predicting the shrinkage of concrete by several criteria. It should be noted that the boundaries of the fields of application are not strictly defined. For example, the ACI 209R-92 model is not based solely on the mechanical properties of hardened concrete, nor does it have a limited w/c ratio, which leaves open a possibility for it to be applied to HSC, even though it was developed and calibrated based on data obtained for NSC. If the lower limit of the compressive strength of HSC is adopted according to Eurocode 2 [13] as $f_{cm}=63$

На слици 1 дата је класификација модела за предвиђање скуп-љања бетона по неколико основа. Треба имати на уму да границе области примене нису строго дефинисане. На пример, модел ACI 209R-92 се не заснива искључиво на механичким својствима очврслог бетона, нити му је ограничен опсег w/c фактора, чиме се не искључује могућност његове примене на БВЧ, иако је настао и калибрисан на основу података добијених за БНЧ. Ако се доња граница притисне чврстоће БВЧ усвоји према Еврокоду 2 [13] као

MPa, it can be concluded that the GL-2000 and B4 models are applicable not only to NSC, but also to the lower classes of HSC. In addition, the ability of the B4 model to separate AS and DS, and to take into

$f_{cm}=63$ MPa, може се закључити да су модели GL-2000 и B4 применљиви не само на БНЧ, већ и на ниже класе БВЧ. Поред тога, могућност модела B4 да раздвоји АС и СУС, као и да узме у обзир утицај великог броја

Table 2 - Factors which are taken into account in the presented models
Табела 2 – Фактори које приказани модели узимају у обзир

Factors/Фактори		ACI 209R-92	GL-2000	fib MC 2010		B4	
				AS/AC	DS/CYC	AS/AC	DS/CYC
Mixture/ Бетонска мешавина	cement/цемент		+	+	+	+	+
	type/врста						
	content/количина	+					+
	aggregate/агрегат						+
	type/врста						
	fine-total aggregate ratio/ однос количине ситног и укупног агрегата	+					
	admixtures/адитиви					+	+
	type/врста						
	content/количина					+	+
	air content/количина увученог ваздуха	+					
w/c					+	+	
a/c					+	+	
mass density of concrete/ запреминска маса бетона [kg/m ³]						+	
slump/слегање	+						
Design and construction/ Пројектовање и извођење	type/метод	+					
	curing/нега	+				+	+
	duration/трајање						
	temperature/температура			<i>i</i>	<i>i</i>	+	+
shape of the specimen/облик узорка	+					+	
V/S	+	+		+		+	
Hardened concrete/ Очврсли бетон	mean compressive cylinder strength/ средња чврстоћа цилиндра при притиску		+	+	+		
	effect of aging on elastic stiffness/ утицај старења на еластичну крутост						+
	activation energies of hydration and moisture diffusion/енергије активације хидратације и дифузије влаге					+	+
Environment/ Околина	temperature/температура			+	+	+	+
	relative humidity/релативна влажност	+	+		+		+
	duration of drying/трајање сушења	+	+		+		+

AS/AC - autogenous (basic) shrinkage/аутогено (основно) скупљање; DS/CYC - drying shrinkage/скупљање услед сушења; *i* - indirectly, by temperature-adjusted concrete age/индиректно, кроз корекцију старости бетона

account the influence of a large number of factors, including the influence of additives typical for HPC, makes it suitable for predicting the shrinkage of HPC. For this reason, in Figure 1, dashed lines indicate the relative affiliation of models ACI 209R-92, GL-2000 and B4 to the group that can be applied to HPC.

фактора, укључујући утицај додатака типичних за БВП, чини га прикладним и за предвиђање скупљања БВП. Због овога је на слици 1 испрекиданим линијама означена релативна припадност модела АСИ 209R-92, GL-2000 и В4 групи која се може применити и на БВП.

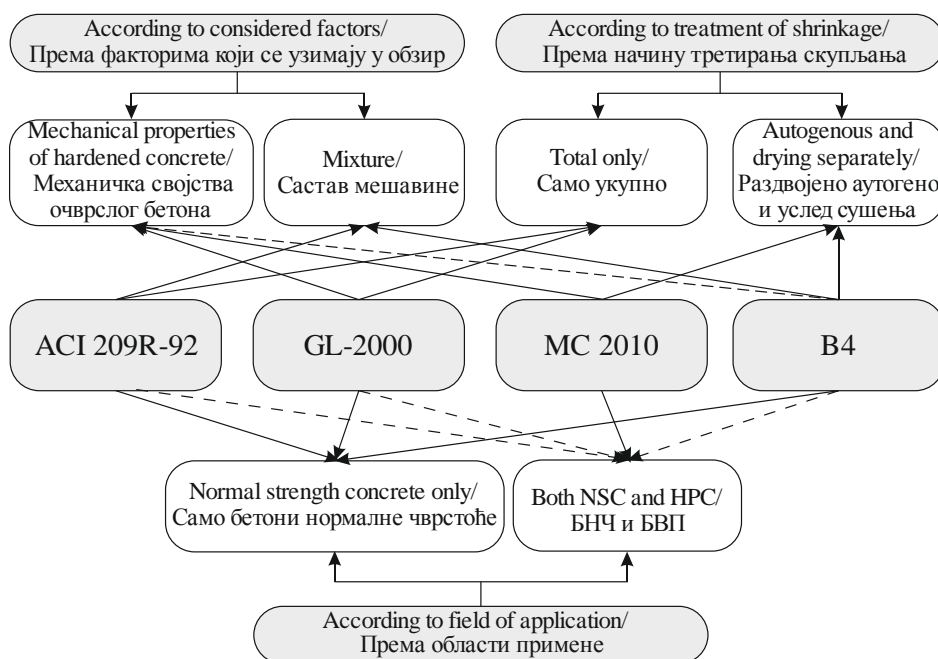


Figure 1 – Classification of models for predicting the shrinkage of concrete
Слика 1 – Класификација модела за предвиђање скупљања бетона

4. A BRIEF OVERVIEW OF MODELS

The general form of the expression for concrete shrinkage strain can be given by the following equation:

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{shu} \cdot k(h) \cdot f(t) \quad (1)$$

$\varepsilon_{sh}(t)$ is the shrinkage strain of concrete at age t , ε_{shu} is the final (ultimate) value of shrinkage strain, $f(t)$ the function

4. КРАТАК ПРИКАЗ МОДЕЛА

Општи облик израза за дилатацију скупљања бетона може се приказати следећом једначином:

$\varepsilon_{sh}(t)$ је дилатација скупљања бетона старости t , ε_{shu} крајња (ултимативна) вредност дилатације скупљања, $f(t)$

(usually hyperbolic) describing the time development of shrinkage strain (Table 3), and the factor $k(h)$ introduces the effect of relative humidity. Most of the factors that influence the magnitude of shrinkage are introduced through the ultimate strain ε_{shu} .

The two recent models (MC 2010 and B4) separate the AS and DS strain, while the total shrinkage strain is determined by the superposition of these two components.

функција (најчешће хиперболичка) која описује развој дилатације скупљања у току времена (табела 3), док фактор $k(h)$ уводи утицај RH. Већина фактора који утичу на величину скупљања уводи се кроз ултимативну дилатацију ε_{shu} .

Два новија модела (MC 2010 и B4) раздвајају дилатацију услед AC и дилатацију СУС, при чему се укупна дилатација скупљања одређује суперпозицијом ове две компоненте.

Table 3 - Function $f(t)$ in analyzed prediction models for shrinkage of concrete
Табела 3 - Функција $f(t)$ у разматраним моделима за скупљање бетона

Model/Модел	$f(t)$	
ACI 209R-92	$\frac{(t-t_c)^\alpha}{f + (t-t_c)^\alpha}$, where/ca $\alpha = 1$	
GL-2000	$\left(\frac{t-t_c}{t-t_c + 0.12 \cdot (V/S)^2} \right)^{0.5}$	
MC 2010	for autogenous shrinkage/ за аутогено скупљање $\square_{bs}(t)$	$1 - \exp(-0.2 \cdot \sqrt{t})$
	for drying shrinkage/ за скупљање услед сушења $\square_{ds}(t-t_s)$	$\left(\frac{t-t_s}{0.035 \cdot h^2 + (t-t_s)} \right)^{0.5}$
B4	for autogenous shrinkage/ за аутогено скупљање	$\left[1 + \left(\frac{\tau_{au}}{t + \tilde{t}_0} \right)^\alpha \right]^{-\tilde{t}}$
	for drying shrinkage/ за скупљање услед сушења	$\tanh \sqrt{\frac{\tilde{t}}{\tau_{sh}}}$

where/где је:

t - age of concrete, in days/старост бетона, у данима

t_c, t_s - age at the start of environmental exposure, in days/старост бетона на почетку излагања окружењу, у данима

f - constant dependent on the type of curing/константа зависна од начина неге:

$f=35$ for 7 days of moist curing/за негу влажењем у трајању 7 дана и

$f=55$ for 1 to 3 days of steem curing/за 1 до 3 дана неге запаривањем

V/S - volume-surface ratio/однос запремине узорка и површине изложене сушењу, (mm)

$h=2A_o/u$ - the notional size of the member/номинална величина елемента, (mm)

- A_c - cross-section/површина попречног пресека, (mm²)
 u - the perimeter of the member in contact with the atmosphere/обим елемента који је у контакту са атмосфером, (mm)
 $\varepsilon_{sh}, \varepsilon_{au}$ - drying and autogenous shrinkage halftime, respectively/време полускупљања услед сушења и аутогеног полускупљања, респективно
 \tilde{t} - temperature corrected exposure duration, in days/трајање изложености сушењу кориговано за утицај температуре, у данима
 \tilde{t}_0 - temperature corrected age at exposure, in days/старост на почетку сушења коригована за утицај температуре, у данима

4.1. ACI 209R-92

Model ACI 209R-92 [5] is empirically derived and easy to use, at least in its original form for "standard conditions". The shrinkage strain of concrete at the age of t days, measured from the beginning of drying t_c (in days) can be calculated from the expression:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = f(t, t_c) \cdot \varepsilon_{shu} \quad (2)$$

The function $f(t, t_c)$ is given in Table 3, while ε_{shu} represents the ultimate shrinkage strain, which has a value of $\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6}$ mm/mm for standard conditions (relative humidity 40 % and $k(h)=1$). This strain can be modified through seven correction factors which introduce the non-standard conditions of duration of curing ($\varepsilon_{sh,tc}$), ambient relative humidity ($\gamma_{sh,RH}$), size of the member ($\gamma_{sh,vs}$), the slump of fresh concrete ($\gamma_{sh,s}$), the content of fine aggregate ($\gamma_{sh,\psi}$), cement content ($\gamma_{sh,c}$) and air content ($\gamma_{sh,a}$), according to the following expression:

$$\varepsilon_{shu} = 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6} \text{ mm/mm}, \quad \gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,a} \quad (3)$$

4.2. GL-2000

The main advantage of this model is that it requires only those input parameters that are already available at design. Shrinkage strain is calculated from the expression (4) [8]

4.1. ACI 209R-92

Модел ACI 209R-92 [5] је емпиријски заснован и једноставан за примену, барем у свом изворном облику за "стандардне услове". Дилатација скупљања бетона старости t дана, мерена од почетка сушења t_c (у данима) може се одредити из израза:

Функција $f(t, t_c)$ је дата у табели 3, док ε_{shu} представља ултимативну дилатацију скупљања, која за стандардне услове (влажност ваздуха 40 % и $k(h)=1$) има вредност $\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6}$ mm/mm. Ова дилатација се може модификовати преко седам корекционих фактора, којима се обухватају нестандардни услови трајања неге ($\varepsilon_{sh,tc}$), влажности ваздуха ($\gamma_{sh,RH}$), димензија елемента ($\gamma_{sh,vs}$), слегања свежег бетона ($\gamma_{sh,s}$), садржаја ситних фракција агрегата ($\gamma_{sh,\psi}$), садржаја цемента ($\gamma_{sh,c}$) и садржаја увученог ваздуха ($\gamma_{sh,a}$), према следећем изразу:

4.2. GL-2000

Основна предност овог модела је што захтева само оне улазне податке који су познати већ приликом пројектовања. Дилатација скупљања се прорачунава из израза (4) [8]

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{shu} \cdot \beta(h) f(t, t_c), \quad (4)$$

where $f(t, t_c)$ is shown in Table 3. The ultimate shrinkage strain is given as a function of the mean compressive strength of a concrete cylinder at the age of 28 days $f_{cm,28}$ (in MPa) and the cement type expressed through the constant k , as follows:

$$\varepsilon_{shu} = 900k \left(\frac{30}{f_{cm28}} \right)^{1/2} \times 10^{-6}. \quad (5)$$

The accuracy of the expression above can be increased if the prescribed values of concrete cylinder strength are replaced by the values measured at certain time intervals.

The influence of the ambient relative humidity is introduced through the factor $\beta(h)$ (h is the dimensionless ambient relative humidity):

$$\beta(h) = (1 - 1.18h^4). \quad (6)$$

According to this model swelling of the specimen occurs for ambient relative humidity $h > 0,96$.

4.3. MC 2010

The MC 2010 model [10] subdivides the total shrinkage strain into two components: the drying shrinkage strain $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ and the autogenous shrinkage strain $\varepsilon_{cbs}(t, t_s)$:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cds}(t, t_s) + \varepsilon_{cbs}(t). \quad (7)$$

The drying shrinkage strain is determined by the following expression:

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s). \quad (8)$$

$\varepsilon_{cds,0}(f_{cm})$ is the nominal drying shrinkage coefficient expressed as a function of the mean value of concrete cylinder compressive strength f_{cm} and the cement type (through the coefficients α_{ds1} and α_{ds2}). $\beta_{RH}(RH)$ is the coefficient

где је $f(t, t_c)$ приказано у табели 3. Ултимативна дилатација скупљања је дата у функцији средње вредности чврстоће при притиску бетонског цилиндра старости 28 дана $f_{cm,28}$ (у МПа) и врсте цемента изражене кроз константу k , према:

Тачност процењених вредности скупљања може се повећати ако се у горњи израз унесу мерене вредности чврстоће, установљене у одређеним временским интервалима.

Утицај влажности средине уводи се кроз фактор $\beta(h)$ (h је релативна влажност средине изражена бездимензионално):

Према овом моделу за релативну влажност средине $h > 0,96$ долази до бубрења узорка.

4.3. MC 2010

Модел MC 2010 [10] раздваја укупну дилатацију скупљања на дилатацију скупљања услед сушења $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ и дилатацију аутогеног скупљања $\varepsilon_{cbs}(t, t_s)$:

Дилатација скупљања услед сушења се одређује из следећег израза:

$\varepsilon_{cds,0}(f_{cm})$ је номинални коефицијент скупљања услед сушења који се изражава у функцији средње чврстоће бетонског цилиндра при притиску f_{cm} и врсте цемента (преко коефицијената α_{ds1} и α_{ds2}). $\beta_{RH}(RH)$ је

which introduces the influence of ambient relative humidity, while $\beta_{ds}(t-t_s)$ is given in Table 3.

коэффициент којим се уводи утицај релативне влажности ваздуха, док је $\beta_{ds}(t-t_s)$ дато у табели 3.

$$\varepsilon_{c_{ds0}}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

The expression for autogenous shrinkage also follows the general form:

Израз за дилатацију аутогеног скупљања такође прати општи облик:

$$\varepsilon_{cbs}(t) = \varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t), \quad (10)$$

where $\beta_{bs}(t)$ is a function of time (Table 3), while $\varepsilon_{cbs,0}(t)$ is the basic nominal coefficient of shrinkage:

где је $\beta_{bs}(t)$ временска функција (табела 3), док је $\varepsilon_{cbs,0}(t)$ основни номинални коефицијент скупљања:

$$\varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) = -\alpha_{bs} \left(\frac{0.1 \cdot f_{cm}}{6 + 0.1 \cdot f_{cm}} \right)^{2.5} \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

α_{bs} is a coefficient dependent on the cement type, and is given in [10].

α_{bs} је коефицијент зависан од врсте цемента, дат у [10].

4.4. B4

4.4. B4

B4 is the most recent model, created by improving the previous B3 model, which aspires to take into account a large number of influencing factors and their interactions in assessment of the magnitude and time development of shrinkage strain. This makes the model extremely complex, with a large number of correction coefficients. The B4 model has the potential to be improved and adapted to new materials and combinations thereof, but its calibration and verification calls for the existence of a large database built on conscientious experimental research carried out in accordance with the standard procedures [14], with coherent, precise results presented in detail. The procedure for calculating the shrinkage strain by the B4 model [11] and the meaning of the applied factors are shown in Table 4.

B4 је најмлађи модел, настао унапређењем претходног B3 модела, који тежи да при процени величине дилатације скупљања и њеног временског развоја узме у обзир велики број утицајних фактора и њихових интеракција. Ово модел чини изузетно сложеним, са великим бројем корекционих коефицијената. Модел B4 има потенцијал да се усавршава и прилагођава новим материјалима и њиховим комбинацијама, али је за његову калибрацију и проверу неопходно постојање велике базе података, изграђене на експериментима који су изведени савесно, по стандардним процедурама [14], са јасно, прецизно и конзистентно приказаним резултатима. Ток прорачуна дилатације скупљања према моделу B4 [11] и значење примењених фактора приказани су у табели 4.

Table 4 - Calculation of shrinkage strain using model B4
Табела 4 - Прорачун дилатације скупљања према моделу B4

Total shrinkage strain/Укупна дилатација скупљања	$\varepsilon_{sh,total}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) + \varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$	
	drying shrinkage/скупљање услед сушења	autogenous shrinkage/аутогено скупљање
General form/Општи облик	$\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) k_h S(\tilde{t})$	$\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{au\infty} f(\tilde{t})$
Time curve/Временски ток	$S(\tilde{t}) = \tanh \sqrt{\frac{\tilde{t}}{\tau_{sh}}}$	$f(\tilde{t}) = \left[1 + \left(\frac{\tau_{au}}{\tilde{t} + \tilde{t}_0} \right)^\alpha \right]^{r_t}$ $\alpha = r_\alpha \left(\frac{w/c}{0.38} \right)$
Shrinkage halftime/Време полускупљ.	$\tau_{sh} = \tau_0 k_{\tau a} \left(k_s \frac{D}{1\text{mm}} \right)^2$ $\tau_0 = \tau_{cem} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{p_{ea}} \left(\frac{w/c}{0.38} \right)^{p_{ew}} \left(\frac{6.5c}{\rho} \right)^{p_{ec}}$	$\tau_{au} = \tau_{au,cem} \left(\frac{w/c}{0.38} \right)^{r_{tw}}$
Final shrinkage/Крајња дилатација скупљања	$\varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) = -\varepsilon_0 k_{\varepsilon a} \frac{E(7\beta_{Th} + 600\beta_{Ts})}{E(\tilde{t}_0 + \tau_{sh}\beta_{Ts})}$ $\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{p_{ea}} \left(\frac{w/c}{0.38} \right)^{p_{ew}} \left(\frac{6.5c}{\rho} \right)^{p_{ec}}$ $\rho = 2.350 \text{ kg/m}^3$	$\varepsilon_{au\infty} = -\varepsilon_{au,cem} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{r_{ea}} \left(\frac{w/c}{0.38} \right)^{r_{ew}}$

$D=V/S$ - effective thickness of the member/ефективна дебљина елемента, (mm)

$k_{\varepsilon a}, k_{\tau a}$ - the aggregate type dependent correction factors/фактори којима се уводи утицај врсте агрегата

k_s - shape parameter/фактор облика узорка

$E(\tilde{t})$ - temperature corrected elastic modulus at age \tilde{t} /модул еластичности бетона старости \tilde{t} , кориговане за утицај температуре

β_{Th}, β_{Ts} - factors that introduce the influence of temperature on the age of concrete/фактори којима се уводи утицај температуре на старост бетона [11]

$\varepsilon_{cem}, p_{ea}, p_{ew}, p_{ec}, \tau_{cem}, p_{\tau a}, p_{\tau w}, p_{\tau c}, r_t, r_\alpha, \varepsilon_{au,cem}, r_{ea}, r_{ew}, \tau_{au,cem}, r_{tw}$ - parameters depending on cement type/параметри зависни од врсте цемента [11]

In addition to representing the total shrinkage strain $\varepsilon_{sh,total}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ as a

Осим што укупну дилатацију скупљања $\varepsilon_{sh,total}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ представља

superposition of the DS strain $\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ and AS strain $\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$, this model provides the opportunity to take into account, when determining the shrinkage strain, the effect of aggregate-cement ratio a/c by weight, water-to-cement ratio w/c , cement type and content c [kg in 1m^3], mass density of concrete ρ [kg/m^3], aggregate type, size and shape of the concrete specimen/member, the temperature during curing and drying, ambient humidity, changes in the modulus of elasticity during the aging of concrete, and even the types, quantities and combinations of concrete additives. The coefficient k_h is determined as a function of the ambient relative humidity h :

$$k_h = \begin{cases} 1-h^3 & h \leq 0.98 \\ 12.94(1-h) - 0.2 & 0.98 \leq h \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

In the conditions of relative humidity at 100 % ($h=1$) factor k_h has a value of -0.2, which enables the model to predict the amount of swelling.

The influence of the type, quantity and combination of mineral and chemical additives on concrete shrinkage is introduced through scaling factors, which adjust the value of the parameters

τ_{cem} , $\varepsilon_{au,cem}$, Γ_{sw} and Γ_{α} .

All of the values of the parameters which are not presented here are given in [11].

5. COMPARISON OF RESULTS OF THE MODELS' APPLICATIONS

Figures 2, 3 and 4 represent the total shrinkage strains of concrete at various ages with OPC or with addition of silica fume (SF), and $w/c=0.26, 0.35$ or 0.5 , which are estimated by the application of the above presented models and compared with the measured values. In Figures 5 and 6 the autogenous shrinkage curves according to the MC 2010 and B4 models are compared with

као суперпозицију дилатације СУС $\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ и дилатације АС $\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$, овај модел пружа могућност да се при одређивању дилатације скупљања узме у обзир утицај односа маса агрегата и цемента a/c , водо-цементног фактора w/c , врсте и количине цемента c [kg у 1m^3], запреминске масе бетонске мешавине ρ [kg/m^3], врсте агрегата, димензија и облика бетонског узорка/елемента, температуре средине током неге и сушења, влажности средине, промене модула еластичности са старењем бетона, па чак и врсте, количине и комбинације додатака бетону. Коефицијент k_h одређује се у функцији релативне влажности ваздуха h :

У условима релативне влажности 100 % ($h=1$) фактор k_h добија вредност -0.2, што моделу омогућава да предвиди величину бубрења. Утицај врсте, количине и комбинације минералних и хемијских додатака на скупљање бетона уводи се кроз бездимензионалне мултипликаторе којима се коригују величине параметара τ_{cem} , $\varepsilon_{au,cem}$, Γ_{sw} и Γ_{α} .

Величине свих споменутих параметара које овде нису приказане, дате су у [11].

5. УПОРЕДНИ ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРИМЕНЕ МОДЕЛА

Слике 2, 3 и 4 приказују укупне дилатације скупљања бетона у различитим старостима са ОПЦ или са додатком силикатне прашине (СП), и $w/c=0.26, 0.35$ или 0.5 , процењене применом горе приказаних модела и упоређене са мереним вредностима. На сликама 5 и 6 упоређен је

values measured on concrete specimens with $w/c=0.26$ and 0.35 , with and without the addition of SF.

временски ток аутогеног скупљања према моделима MC 2010 и B4 са вредностима измереним на узорцима бетона са $w/c=0.26$ и 0.35 , са и без додатка СП.

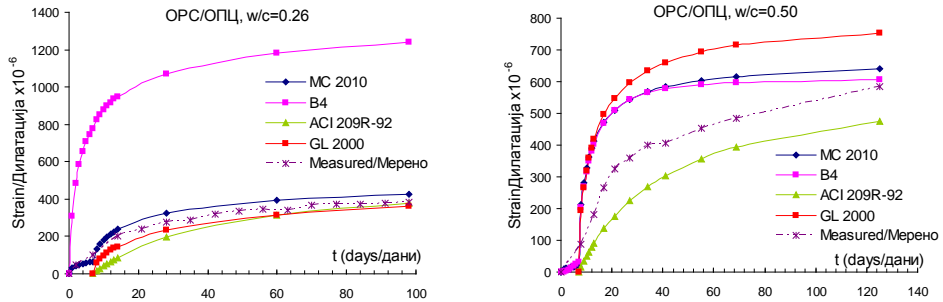


Figure 2 – Total shrinkage of concrete with OPC for $w/c=0.26$ (left) and $w/c=0.5$ (right)
Слика 2 – Укупно скупљање бетона са ОПЦ за $w/c=0.26$ (лево) и $w/c=0.5$ (десно)

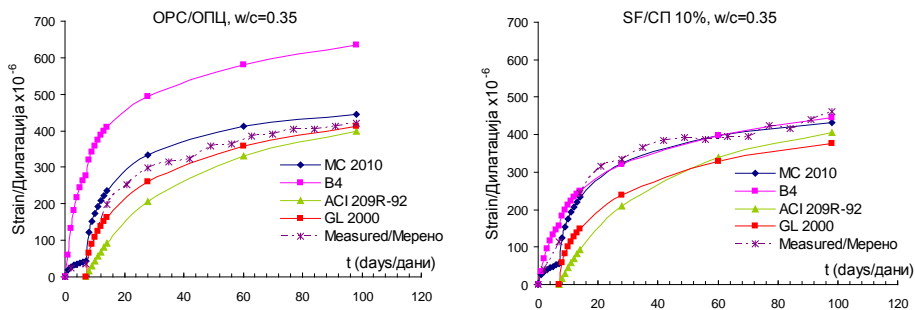


Figure 3 – Total shrinkage of concrete with OPC (left) and 10 % SF (right) for $w/c=0.35$
Слика 3 – Укупно скупљање бетона са ОПЦ (лево) и 10 % СП (десно) за $w/c=0.35$

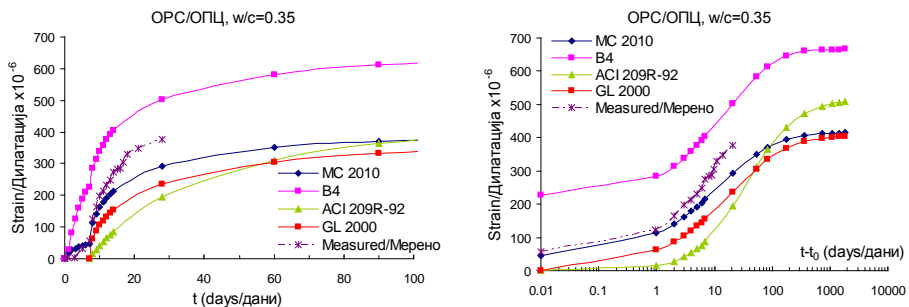


Figure 4 – Total shrinkage of concrete with OPC for $w/c=0.35$ in linear (left) and semi-logarithmic (right) scale
Слика 4 – Укупно скупљање бетона са ОПЦ за $w/c=0.35$ у линеарној (лево) и полулогаритамској (десно) размери

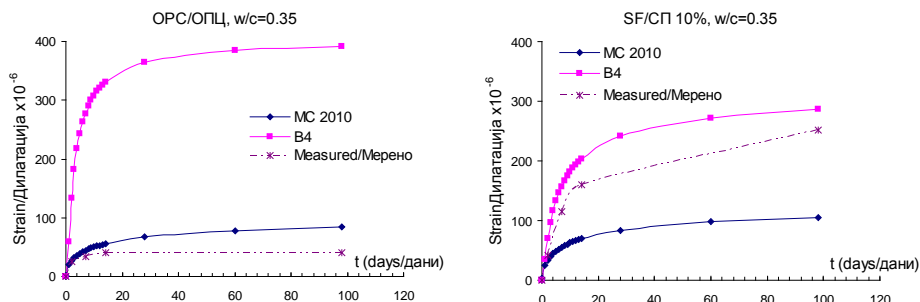


Figure 5 – Autogenous shrinkage of concrete with OPC (left) and 10 % SF (right); w/c=0.35

Слика 5 – Аутогено скупљање бетона са ОПЦ (лево) и 10 % ЛП (десно); w/c=0.35

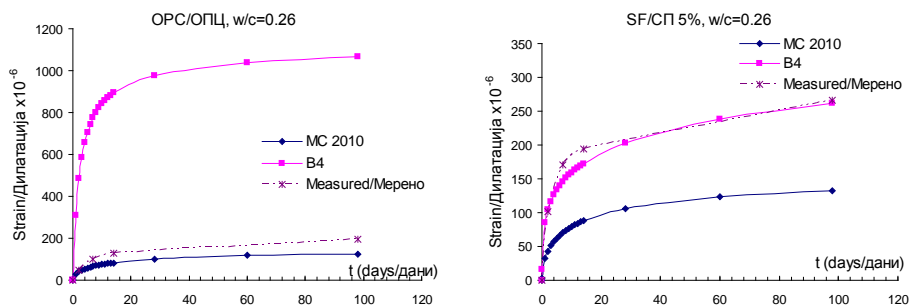


Figure 6 – Autogenous shrinkage of concrete with OPC (left) and 5 % SF (right); w/c=0.26

Слика 6 – Аутогено скупљање бетона са ОПЦ (лево) и 5 % ЛП (десно); w/c=0.26

The analysis shown in Figure 2 right was done based on the Al-Saleh's test results [15], in Figure 4 according to the results of Tongaroonsri and Tangterm-sirikul [16], while other analyses used the results of the tests carried out by Zhang et al. [17]. In Figure 4 right the shrinkage is shown for a longer period of time, in a semi-logarithmic scale in accordance with the requirements of Bažant [7, 11], where $t-t_0$ is the age of the concrete measured from the beginning of the drying of the specimen. Presenting the data in this manner makes it easier to notice that the actual shrinkage strain for concrete of a greater age (several years) tends to the value predicted by the B4 model. All other diagrams present the shrinkage of concrete only up to the age to which the experimental tests were carried out (98, 125 and 28 days). The accuracy of the

Анализа приказана на слици 2 десно урађена је на основу резултата испитивања Al-Saleh-a [15], на слици 4 према резултатима Tongaroonsri-a и Tangterm-sirikul-a [16], док су у осталим анализама коришћени резултати испитивања које су спровели Zhang и остали [17]. На слици 4 десно је скупљање приказано за дужи временски период, у полулогаритамској размери у складу са захтевима Ваžанта [7, 11], при чему је $t-t_0$ старост бетона мерена од почетка сушења узорка. Оваквим приказом се јасније уочава да стварна дилатација скупљања за бетоне велике старости (више година) тежи величини коју предвиђа модел В4. Сви остали дијаграми приказују скупљање бетона само до старости до којих су вршена експериментална испитивања (98, 125 и 28 дана). Тачност модела АС1

ACI 209R-92 and GL-2000 models can be increased through correction of the age of concrete for the influence of the ambient temperature.

6. CONCLUSION

Although some international organizations favor the application of a particular model for the prediction of concrete shrinkage, consensus on how to assess their accuracy, both methodologically and numerically, has not yet been reached. From the analysis carried out by the author, based mainly on data from the database [18], for the age of the concrete up to which the tests were carried out (up to 130 days), some observations, confirmed by the literature [19], can be made:

- The accuracy of the prediction of TS according to the model MC 2010 has a very low dependence on the w/c ratio and the addition of SF. However, the estimated AS strain for concrete with SF is lower than the measured values by over 50 %;
- Estimated AS of concrete with w/c < 0.4 according to the B4 model greatly exceeds the measured values for the OPC, while DS is underestimated, which can lead to a relatively accurate estimation of total shrinkage. For concretes with 5 to 10 % SF, this model gives a more accurate assessment of AS;
- All models have greater deviations of the estimated TS from the measured values for young concrete than for concrete of a greater age;
- ACI 209R-92, GL 2000 and MC 2010 models provide predictions of similar accuracy, especially if the age of the concrete is corrected for the influence of the ambient temperature.

REFERENCES

- [1] Hubler, H.M., Wendner, R., Bažant, Z.P.: Comprehensive Database for Concrete Creep and Shrinkage; Analysis and Recommendations for Testing and Recording, ACI Materials Journal, 2015, Vol. 112, No. 4, pp. 547-558.

209R-92 и GL-2000 се може повећати корекцијом старости бетона за утицај температуре средине.

6. ЗАКЉУЧАК

Иако поједине међународне организације фаворизују примену одређеног модела за предвиђање скупљања бетона, сагласност око начина оцене њихове тачности, како методолошки тако и нумерички, још није постигнута. На основу анализа које је спровео сам аутор, заснованих претежно на подацима из базе [18], за старости бетона до којих су вршена испитивања (до 130 дана) могу се издвојити нека запажања које потврђује и литература [19]:

- Тачност предвиђања УС према моделу MC 2010 врло мало зависи од w/c фактора и додатака СП. Међутим, процењене величине дилатација АС бетона са СП мање су од мерених вредности и за више од 50 %;
- Процењено АС бетона са w/c < 0.4 према моделу B4 вишеструко премашује измерене вредности за ОПЦ, док је СУС потцењено, што може да доведе до релативно тачне процене величине укупног скупљања. На бетонима са 5 до 10 % СП овај модел даје доста тачнију процену АС;
- Сви модели дају већа одступања процењеног УС од мерених вредности за младе бетоне него за бетоне веће старости.
- Модели ACI 209R-92, GL 2000 и MC 2010 дају предвиђања сличне тачности, нарочито ако се изврши корекција старости бетона за утицај температуре средине.

- [2] Neville, A.M., Brooks, J.J.: Concrete Technology, Pearson Education Limited, England, Second edition, **2010**.
- [3] ACI 209.1R-05 Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, ACI Committee 209, American Concrete Institute, **2005**.
- [4] Goleš, D., Bralović, N., Gajić, D.: Shrinkage of concrete - a general overview, Journal of Faculty of Civil Engineering Subotica, **2018**.
- [5] ACI 209R-92 (Reapproved 1997) Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Committee 209, American Concrete Institute, **1982**.
- [6] CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, London, **1993**.
- [7] Bažant, Z.P., Baweja, S.: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: model B3, Adam Neville symposium: creep and shrinkage - structural design effects, ACI SP-194, Al-Manaseer A (ed), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, **2000**, pp. 1-83.
- [8] Gardner, N.J., Lockman, M.J.: Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concrete, ACI Materials Journal, **2001**, Vol. 98, No. 2, pp. 159-167.
- [9] Sakata, K., Tsubaki, T., Inoue, S., Ayano, T.: Prediction equations for creep and drying shrinkage in concrete of wide-ranging strength, Concrete library international, **2002**, 40, pp. 145-166.
- [10] fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, **2013**.
- [11] RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis. Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability, Materials and Structures, **2015**, 48, pp. 753-770.
- [12] ACI 209.2R-08 Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, ACI Committee 209, American Concrete Institute, **2008**.
- [13] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN European Committee for Standardization, **2004**.
- [14] RILEM TC 107-CSP: Creep and Shrinkage Prediction Models: Principles of Their Formation. Recommendation: Measurement of time-dependent strains of concrete, Materials and Structures, **1998**, 31, pp. 507-512.
- [15] Al-Saleh, S.A., Al-Zaid, R.Z.: Effects of drying conditions, admixtures and specimen size on shrinkage strains, Cement and Concrete Research, **2006**, 36, pp. 1985-1991.
- [16] Tongaroonsri, S., Tangtermsirikul, S.: Effect of mineral admixtures and curing periods on shrinkage and cracking age under restrained condition, Construction and Building Materials, **2009**, 23, pp. 1050-1056.
- [17] 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.
- [18] <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/>, download 04.04.2018.
- [19] Mokarem, D.W., Meyerson, R. M., Weyers, R.E.: Development of concrete shrinkage performance specifications, Final contract report, Virginia Transportation Research Council, Virginia, **2003**.