

Димитрије ЗАКИЋ, Бранко МИЛОСАВЉЕВИЋ, Александар РАДЕВИЋ

## ИСПИТИВАЊЕ КВАЛИТЕТА БЕТОНА УГРАЂЕНОГ У КОНСТРУКЦИЈУ

### *TESTING OF CONCRETE QUALITY IN-SITU*

др Димитрије ЗАКИЋ, дипл. грађ. инж.  
редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду

др Бранко МИЛОСАВЉЕВИЋ, дипл. грађ. инж.  
ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду

др Александар РАДЕВИЋ, мастер инж. грађ.  
доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду

#### *Резиме*

У раду је дат приказ методологије испитивања и оцене стања бетонских конструкција која се користи у савременој грађевинској пракси. Посебан акценат стављен је на поступке испитивања квалитета уграђеног бетона, у складу са важећом Европском техничком регулативом. Дат је приказ деструктивних и недеструктивних поступака испитивања који се најчешће користе у пракси, као и принципи добијања зависности између резултата индиректних испитивања и чврстоће бетона при притиску.

Кључне речи: испитивање квалитета бетона, бетон уграђен у конструкцију, деструктивне методе, недеструктивна испитивања, узорковање бетонских кернова, склерометар, ултразвучна испитивања

#### *Summary*

In this paper, the methodology of testing and quality assessment of concrete structures in contemporary civil engineering practice is presented. Special attention has been paid to the procedures of concrete quality testing in-situ, based on the provisions of the current European standards. The most applied destructive and non-destructive testing methods are described, as well as the principles of defining the relationships between the results of indirect testing and the compressive strength of concrete.

Keywords: concrete quality testing, in-situ concrete, destructive methods, non-destructive testing, concrete core sampling, rebound hammer, ultrasonic pulse velocity testing

## 1. УВОД

Неспорна је чињеница да бетон на глобалном плану представља водећи конструкциони материјал XX века. Такав тренд наставља се и у текућем - XXI веку, у коме годишња производња предметног грађевинског материјала достиже нестварне количине од преко 20 милијарди тона. При томе, реч је само о тзв. „цементним” бетонима, а ако би се у обзир узели и композити овог типа справљени на бази других неорганских (креч, гипс) или органских везива

(битумен, епоксиди и други полимери), наведене бројке биле би још импозантније. Ипак, у највећем броју случајева бетон који се уграђује у савремене објекте спада у групу обичних, или класичних бетона, у чији састав улазе три основне компоненте: цемент, агрегат и вода, уз евентуално присуство (у знатно мањој количини) и четврте компоненте – у виду различитих хемијских и/или минералних додатака.

Наравно, савремена технологија бетона не бави се само обичним бетонима, већ и њиховим

специфичним варијантама - које су најчешће повезане и са специјалним наменама ових композита. Тако можемо да говоримо о лаким и тешким бетонима (са сниженом, односно повишеном запреминском масом у односу на обичне), о микроармираним бетонима (у чију цементну матрицу су инкорпорирана влакна), о самозбијајућим бетонима (са таквом комбинацијом хемијских и минералних додатака која обезбеђује ефикасну уградњу без вибрирања), о бетонима високих перформанси (чији је састав такав да обезбеђују супериорне чврстоће и трајност), итд.

Конечно, када говоримо о савременим трендовима у области технологије бетона, никако се не сме изоставити чињеница да грађевинарство представља привредну грану која је у принципу штетна по човекову околину. Водећу улогу овде свакако има производња цемента (па самим тим, последично и бетона), која значајно утиче на нарушавање биосфере и глобалне климатске промене, као и на убрзано исцрпљивање природних ресурса. Зато се, као најзначајнија истраживања у области технологије бетона, последњих година апострофирају она која се односе на испитивање својстава и могућности примене рециклираних материјала у оквиру тзв. „зелених” бетона – као гаранта одрживог грађевинарства [1].

Поред еколошке компоненте, која је изузетно актуелна у савременој бетонској индустрији, све већа пажња се глобално посвећује и трајности грађевинских објеката. Наиме, познато је да је производња бетона започела свој процват током педесетих година прошлог века и да је за последњих седамдесет година била у константном порасту. С обзиром да се већина бетонских конструкција пројектује за животни век од педесет година, јасно је да је у међувремену огроман број објеката у области инфраструктуре (путеви, мостови, тунели, комунална мрежа), енергетике (брране, термоелектране, топлане, димњаци), као и у зградарству (стамбени/ пословни објекти, хале и индустријски погони), већ исцрпео свој предвиђени експлоатациони период. То све чешће доводи до бројних проблема, а неретко и до озбиљних хаварија, у напред наведеним секторима – па се све већа материјална средства и људски ресурси ангажују на планирању и извођењу санација, реконструкција, ојачања, али и рушења (када је то неминовно) дотрајалих објеката.

Имајући све напред наведене констатације у виду, намеће се закључак да испитивање квалитета бетона који је већ уграђен у конструкцију, представља изузетно значајну активност – посебно када је реч о старијим објектима, чија даља (или коначна) судбина у многоме зависи од обављених истражних радова, анализе резултата испитивања и процене постојећег стања предметног објекта. При томе, како је најчешће реч о армиранобетонским конструкцијама, посебна пажња мора се посветити и испитивањима челичне арматуре, у смислу њеног типа, количине, положаја, адекватности (у смислу усклађености са важећим прописима), степена корозије, итд. Исти став важи и за случај претходно напрегнутих бетонских конструкција, када се нарочита пажња мора посветити и испитивањима квалитета и оцени стања каблова (ужади) за преднапрезање.

С обзиром да је у овом раду акценат стављен на испитивање квалитета бетона уграђеног у конструкцију („in situ”), у даљем ћемо се бавити само овим аспектом испитивања бетонских конструкција.

## 2. БЕТОН УГРАЂЕН У КОНСТРУКЦИЈУ

У савременој грађевинској пракси се релативно често указује потреба за утврђивањем стања постојећих грађевинских објеката и, у оквиру те активности, квалитета бетона уграђеног у поједине елементе конструкције. Најчешће се притом ради о утврђивању чврстоће бетона при притиску (марке или класе чврстоће бетона), али исто тако и о утврђивању других својстава очврслог бетона, као што су: водонепропустљивост, отпорност на дејство мрза, отпорност на хемијске агенсе, отпорност на хабање, модул еластичности, чврстоћа при затезању чупањем (“Pull-off” метода), итд.

Када говоримо о испитивању и оцени стања неког објекта, овај поступак се састоји од више фаза – које најчешће подразумевају следеће кораке:

- преглед постојеће техничке и друге релевантне документације везане за предметни објекат;
- детаљан визуелно-макроскопски преглед објекта, са снимањем (мапирањем) и класификацијом оштећења;

- сагледавање специфичности везаних за период изградње објекта (уобичајено коришћени материјали, примењене технологије грађења, важећи технички прописи у време изградње објекта, итд.);

- анализа прикупљених података, усвајање метода и техника које ће бити коришћене током истражних радова и прављење плана испитивања квалитета уграђених материјала;

- испитивање квалитета уграђених материјала (у конкретном случају бетона, али се сличан поступак примењује и на челик, дрво, елементе за зидање, итд.); ова испитивања могу да се раде на самом објекту (in situ) или на узетим узорцима које даље третирамо у лабораторији – при чему саме методе испитивања могу да имају деструктиван или недеструктиван карактер;

- оцена постојећег стања објекта, на бази утврђеног квалитета уграђених материјала, али и са становишта носивости, стабилности, функционалности и трајности појединих елемената конструкције и читавог објекта;

- предлог евентуалних мера санације, ојачања и/или реконструкције објекта, у циљу његовог довођења у пројектом дефинисано стање, односно у циљу његовог усклађивања са важећом техничком регулативом.

Наравно, сваки објекат је прича за себе, па у реалним условима неке од претходно наведених фаза могу да изостану. Тако на пример, у пракси је релативно чест случај да (готово) никаква пројектна документација која се односи на дати објекат не постоји или није доступна. У оваквим случајевима, логично је да немамо ни поуздане информације у вези са периодом изградње објекта, као ни о његовом „животном циклусу” током експлоатације (одржавању, евентуалним санацијама, реконструкцијама, надоградњи, пренамени и томе слично).

У наредном тексту, биће више речи о појединим фазама у поступку (пр)оцене стања постојећих бетонских конструкција.

### 2.1. Визуелно-макроскопски преглед

Приликом оцене стања неког објекта који је израђен делимично или у потпуности од бетона, један од најважнијих корака представља визуелно-макроскопски преглед његових конструктивних елемената, који у општем случају могу бити сачињени од неармираног или од армираног бетона (код „новијих” објеката може бити евентуално речи и о претходно

напрегнутом или о микроармираном бетону). Када год је то могуће, као припрему за овакав експертски преглед треба користити сву постојећу (доступну) техничку документацију – формирану приликом пројектовања, извођења, одржавања и евентуално раније изведених санационих интервенција. У том смислу, посебно су корисне графичке подлоге (цртежи основа, карактеристичних пресека, планова оплате, планова арматуре, као и изведених детаља у оквиру предметног објекта), које можемо користити и као подлоге приликом извођења истражних радова, али и у циљу упоредне анализе пројектованог и изведеног (постојећег) стања испитиване конструкције.

Визуелно-макроскопски преглед, како сам назив говори, односи се на оцену стања приступачних и видљивих бетонских површина. Том приликом, искусан и пажљив испитивач може, само на основу изгледа бетона, да стекне основне утиске о стању конструкције и да направи план за њено даље испитивање. Поред визуелног прегледа „голим” оком, испитивач се често користи и различитим помоћним средствима (лупом, лампом, нонијусом, фото апаратом, итд.), који му помажу да прецизније обликује своје опсервације. Традиционално, визуелни преглед је често праћен и аудиторним прегледом, који подразумева лагано ударање површине бетона металним чекићем – које се обавља на карактеристичним позицијама на конструкцији. На овај начин могу се открити унутрашњи дефекти, као што су гнезда, каверне, неадекватно изведени прекиди бетонирања и слично, који се касније могу отворити механичким путем („штемовањем”) и прецизније снимити.

Детаљним визуелно-макроскопским прегледом уочавају се и мапирају сва присутна оштећења на бетонским површинама као што су: прелине (ширине до 0,3 mm), пукотине (ширине преко 0,3 mm), места на којима је бетон лоше уграђен, локације са плитко постављеном арматуром и/или са оштећеним заштитним слојем бетона до арматуре, итд. Код делова објеката који су били директно изложени атмосферским утицајима, овим прегледом могу се уочити оштећења настала услед дејства мрза (са или без деловања соли за одмрзавање), дејства кишнице и других текућих вода (на пример, у виду депонованих слојева  $\text{CaCO}_3$  насталих испирањем  $\text{Ca(OH)}_2$  из унутрашњости бетона, а затим његовом реакцијом са  $\text{CO}_2$  из ваздуха и кристализацијом на површини), као и услед присуства кородираних арматуре (светло до тамно смеђе

флеке на површини армирано-бетонских елемената). Тамне мрље на површини бетона у влажном простору могу бити и знак присуства микроорганизама, гљивица, алги, итд.

Специфична оштећења бетона јавиће се и на површинама које су биле изложене дејствима агресивне средине (киселине, базе, соли, минерална ђубрива, биомаса, итд.), као и утицајима високих температура (ложшта, котлови, димњаци, делови објеката након излагања пожарном оптерећењу, дејству врелих гасова, кључале воде, и томе слично).

## 2.2. Период изградње објекта

Приликом утврђивања стања конструкције и квалитета уграђеног бетона, веома важан аспект је познавање материјала, технологија и техничке регулативе коришћених у време изградње предметног објекта. Наиме, кроз време су се мењали и на снази били различити технички услови у вези са, на пример, квалитетом бетона (марка бетона, односно класа чврстоће) или са декларисаним квалитетом арматуре (граница развлачења, чврстоћа при затезању). Што се тиче квалитета бетона, који се обично исказује преко његовог најважнијег механичког својства – чврстоће при притиску ( $f_p$ ), на нашим просторима се пре 1971. године баратало са само две врсте бетона, и то са тзв. обичним бетоном и са бетоном високе отпорности [2]. У табели 1 су дати тада важећи технички услови, који се односе на минималне количине цемента и одговарајуће марке бетона - као основне показатеље квалитета (изражене у  $\text{kg/cm}^2$ ), за ове две врсте бетона.

Табела 1. Технички услови за бетон из 1966. године према [2]

Количина цемента за $1\text{m}^3$ бетона (kg)	Обичан бетон – марка бетона ( $\text{kg/cm}^2$ )	Бетон високе отпорности – марка бетона ( $\text{kg/cm}^2$ )
150	70	–
200	110	–
250	160	220
300	220	300
350	300	380

У овом периоду, марка бетона се одређивала испитивањем на коцкама ивице 20 cm, а на бази средње вредности остварене чврстоће при притиску. Нешто касније, доношењем првог Правилника за бетон и армирани бетон (1971.

године), а 16 година касније и другог – познатог по скраћеном називу БАБ-87, појам марке бетона и начин њеног доказивања су детаљније дефинисани и везани за статистичке параметре (карактеристична чврстоћа при притиску на бази фрактила од 10%). У овом периоду, испитивање чврстоће се и даље врши на стандардним пробним телима облика коцке (ивице 20 cm), при старости бетона од 28 дана, а марка је изражена у МПа (уместо дотадашњих  $\text{kg/cm}^2$  или  $\text{kp/cm}^2$ ). Пројектанти су на располагању, за тзв. бетоне нормалних (обичних) чврстоћа, имали следеће марке: MB10, MB15, MB20, MB25, MB30, MB35, MB40, MB45, MB50, MB55 и MB60. Крајем XX и почетком XXI века, европска техничка регулатива, која је данас важећа и у нашој земљи, дефинише тзв. класе чврстоће бетона, које представљају карактеристичне чврстоће при притиску добијене испитивањем цилиндричних узорака ( $\varnothing 15/\text{H}30$  cm) или (опционо) узорака облика коцке (ивице 15 cm), при старости бетона од 28 дана. Према новој регулативи се, код обраде резултата испитивања, примењује фрактил од 5% (највише 5% испитиваних узорака може да „подбаци“). Класе чврстоће код нормалних бетона се, према важећој номенклатури, крећу почев од C8/10 до C100/115 – при чему се први број у оквиру ове ознаке односи на случај испитивања цилиндричних узорака, док се други број (веће вредности карактеристичне чврстоће) односи на узорке облика коцке ивице 15 cm [1].

Када је реч о челичној арматури која се примењује у оквиру армиранобетонских конструкција, у периоду важења напред поменутих правилника мање-више равноправно су се користиле и глатка (ознаке GA 240/360) и ребраста арматура (ознаке RA 400/500) – при чему се бројеви у наведеним ознакама односе на карактеристичне вредности границе течења и чврстоће при затезању (изражене у МПа), а које су засноване на фрактилу од 5%. Савремени европски прописи, са обавезном применом и у нашој земљи, познају само ребрасту арматуру квалитета B500 (додатне ознаке А, В или С) – при чему се предметна бројна ознака односи на карактеристичну вредност границе течења (такође на бази фрактила од 5%).

Наравно, не треба никакo сметнути са ума и да су се током последњих 70-80 година, тј. у периоду масовне примене бетона на нашим просторима, у великој мери мењали и услови квалитета, као и ознаке (типови) коришћених врста цемента. Такође, у овом периоду све

чешће се користе различити минерални, хемијски и влакнасти додаци, који у значајној мери модификују својства свежег и/или очврслог бетона.

### 2.3. Испитивање бетона "in situ"

Неки од најчешћих случајева, при којима се приступа утврђивању квалитета бетона који је већ уграђен у конструкцију, су следећи [1]:

- ако током изградње објекта нису узети узорци од свежег бетона или је њихов број недовољан за предметно испитивање,
- ако резултати испитивања узорака узетих из свеже бетонске масе (пробних тела) не задовољавају пројектом прописане услове („подбачај“ квалитета),
- ако се из било којих разлога посумња у веродостојност резултата испитивања пробних тела,
- у случајевима санација, проширења, ојачања, надоградње постојећих конструкција, и сл.,
- у случајевима одређених спорова на релацији инвеститор – извођач, извођач – надзор, итд.,
- у случајевима одређених мањих или већих оштећења, хаварија или рушења готових елемената, односно конструкција, итд.

У општем случају, за утврђивање квалитета бетона у оквиру готових конструкција могу се применити следеће две групе метода (појединачно или у комбинацији):

- методе са разарањем (деструктивне методе),
- методе без разарања (недеструктивне методе).

Под појмом методе са разарањем, најчешће подразумевамо вађење (исецање) цилиндричних узорака бетона (кернова) из карактеристичних елемената конструкције и њихово испитивање у лабораторији. Знатно ређи случај деструктивног испитивања у пракси, о коме овом приликом неће бити више речи, представља испитивање појединих елемената или конструкцијских система на лицу места - обично оптерећењем до лома.

#### 2.3.1. Испитивање бетона са разарањем

Деструктивна испитивања бетона који је већ уграђен у конструкцију, као и поступак оцењивања остварене чврстоће при притиску

таквог бетона, дефинисани су сетом европских стандарда који су прихваћени за примену у Републици Србији [11, 12, 16].

Узимање узорака бетона из конструкције и њихово испитивање при притиску врши се у складу са одредбама стандарда SRPS EN 12504-1. У складу са предметним стандардом, узорци (бетонска тела) за испитивање имају, по правилу, облик цилиндра чија висина треба да буде једнака двострукој вредности пречника или, изузетно, једнака пречнику цилиндра. Однос између најкрупнијег зрна агрегата и пречника цилиндра има велики утицај на чврстоћу при притиску и мора бити мањи или једнак 1:3 [12].

Такође, узорак за испитивање (керн) по правилу не сме да садржи делове арматуре нити појединачна, изузетно крупна зрна агрегата. Нарочито непоуздани резултати могу се добити уколико шипка арматуре лежи паралелно, или приближно паралелно, оси цилиндра или када је крупно зрно агрегата исечено, тако да је само једним својим делом у маси цилиндра. Уколико је присутна арматура у трансверзалном правцу, потребно је забележити њен пречник, дужину и позицију.

Приликом узорковања бетона треба тежити узорцима који ће имати однос страница  $L/d = 2$  или  $L/d = 1$ , како би њихове чврстоће могле да се упореде са чврстоћама стандардних пробних тела - цилиндра ( $\Phi/H = 15/30 \text{ cm}$ ) или коцке ( $a = 15 \text{ cm}$ ). Најчешће се узимају узорци пречника  $100 \text{ mm}$  или  $150 \text{ mm}$ , мада у случајевима када су армиранобетонски елементи густо армирани и када најкрупније зрно агрегата то дозвољава, пречник може бити и  $d < 100 \text{ mm}$ , али не мањи од  $50 \text{ mm}$ .

За вађење кернова могу се применити различите врсте бушилица на електрични и пнеуматски погон, као и бушилице које покреће мотор са унутрашњим сагоревањем. Бургије ових бушилица обично су снабдевене круницама са техничким дијамантима. На слици 1 приказана је једна бушећа гарнитура са електричним погоном.

Током вађења керна, неопходно је да се оствари непомерљивост бушилице у односу на елемент из кога се вади узорак. Ово се постиже на различите начине, у зависности од врсте конструкције, димензија испитиваног елемента, положаја бушилице у односу на елемент, приступачности радне површине, итд. Ипак, најчешћи случај представља анкерирање

постоља бушилице за бетонски елемент који се испитује.



Слика 1. Машина за вађење кернова

Само бушење (сечење) бетона, мора се вршити уз сталан доток воде, која хлади бургију и испира бетонски прах. Дубина бушења треба да буде бар 1-2 cm већа од неопходне висине узорка за испитивање. Овај „вишак“ уклања се у лабораторији, сечењем помоћу тестере са круницама од техничких дијаманата - и то тако што се цилиндар „скраћује“ са обе стране, управно на његову подужну осу. Након сечења, врши се глачање основица цилиндра или nanoшење специјалног слоја за изравнање, уколико належуће површине узорка нису одговарајуће равности и паралелности. Слој за изравнање мора бити од таквог материјала који ће у време испитивања имати чврстоћу најмање једнаку чврстоћи бетонског цилиндра. Дебљина овог слоја може да износи највише 2% од пречника цилиндра.

На слици 2 приказани су цилиндрични узорци бетона – кернови, након вађења, а на слици 3 исти узорци снимљени после њихове обраде у лабораторији.

Само испитивање чврстоће овако добијених узорка, обавља се на исти начин као код пробних тела израђених од свежег бетона.



Слика 2. Необрађени кернови



Слика 3. Обрађени кернови

Приликом испитивања бетонских цилиндара узоркованих из конструкције, треба водити рачуна о следећим факторима који утичу на чврстоћу при притиску [1]:

- садржај воде (узорци засићени водом могу имати 10-15% нижу чврстоћу при притиску, у поређењу са сувим узорцима),
- садржај ваздуха (повећање количине увученог ваздуха доводи до пада чврстоће; приближно 1% већи садржај ваздуха ће довести до пада чврстоће од 5-8%),
- правац узорковања у односу на правац уградње бетона (узорци који су узети из конструкције у вертикалном положају, у правцу уградње, могу имати и до 8% већу чврстоћу у односу на узорке који се узимају хоризонтално из истог елемента конструкције),
- са смањењем пречника керна расте варијабилност резултата (уколико се за испитивање користе кернови пречника 50 mm, њихов број треба да буде 3 пута већи у поређењу са потребним бројем кернова пречника 100 mm),

- добијена вредност чврстоће опада код кернова са димензијама  $L/d > 1$  и расте код кернова са  $L/d < 1$ .

Оцена чврстоће при притиску бетона у конструкцији може се извршити или према приступу А (када се располаже са резултатима испитивања најмање 15 кернова), или према приступу Б (када се располаже са резултатима испитивања од 3 до 14 кернова) [16]:

#### Приступ А

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k_2 \cdot s \quad (1)$$

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4 \quad (2)$$

#### Приступ Б

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k \quad (3)$$

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4 \quad (4)$$

Ознаке у претходним формулама се односе на:

$f_{ck, is}$	- карактеристичну чврстоћу при притиску бетона у конструкцији,
$f_{m(n), is}$	- просечну вредност чврстоће при притиску $n$ резултата испитивања,
$f_{is, lowest}$	- најмању појединачну вредност чврстоће $n$ резултата испитивања,
$k_2$	- коефицијент 1,48 или неку другу вредност прописану националним одредбама,
$s$	- стандардну девијацију резултата испитивања или 2 МПа (усвојити већу вредност),
$k$	- коефицијент који зависи од $n$ и узима вредности између 5 и 7

Приликом процене остварене класе чврстоће бетона у конструкцији, треба имати на уму да је према одредбама стандарда [16], дефинисан следећи однос карактеристичних вредности чврстоће бетона у конструкцији ( $f_{ck, is}$ ) и чврстоће добијене испитивањем стандардних бетонских пробних тела ( $f_{ck}$ ):

$$f_{ck, is} / f_{ck} = 0,85.$$

### 2.3.2. Испитивање бетона без разарања

Код недеструктивних метода испитивања, чврстоћа при притиску бетона се не испитује директно, већ се поступак своди на мерење неке друге физичке величине - која је у функционалној вези са предметном чврстоћом.

Логично, у практичној примени овакав посредан начин дефинисања карактеристика материјала подразумева и познавање функционалних зависности између физичких величина које се мере и жељеног својства бетона. Ове функционалне зависности, дакле, треба претходно успоставити, а то значи да их треба формулисати на бази паралелних лабораторијских испитивања бетона одабраном недеструктивном методом и испитивања која подразумевају примену класичног деструктивног поступка одређивања чврстоће при притиску.

Успостављање оптималне функционалне зависности између чврстоће при притиску бетона и појединих физичких величина које се могу измерити недеструктивним потупцима, подразумева да се прво на одређеном броју позиција на карактеристичним елементима конструкције испитају предметне физичке величине, а затим да се на истим локацијама узму (изваде) узорци - кернови за лабораторијска испитивања чврстоће (видети тачку 2.3.1). Након експерименталног утврђивања напред наведених параметара, даљи поступак се своди на графичко или аналитичко дефинисање потребне зависности - на бази познатих ставова теорије вероватноће и математичке статистике (регресиона анализа, метода најмањих квадрата и друго). Предметни поступак у суштини представља комбинацију недеструктивних и деструктивних испитивања. Треба напоменути да је овакво комбиновање метода у техничком и економском смислу веома повољно, пошто се на тај начин скуп узорака који се узима из конструкције своди на сразмерно мали број, док је број извођења недеструктивних испитивања практично неограничен.

С обзиром да се у савременом грађевинарству користи релативно велики број различитих недеструктивних метода испитивања бетона и бетонских конструкција, у даљем ћемо се ограничити само на разматрање оних метода које се најчешће примењују у пракси. То су, свакако, метода Шмитовог чекића (склерометра) [13] и метода ултразвука [15], док се метода "Pull-out" [14] (која спада у тзв. поступке локалне деструкције) знатно ређе користи - па се њоме нећемо детаљније бавити.

#### Метода Шмитовог чекића (склерометра)

Метода Шмитовог чекића (склерометра) омогућава процену чврстоће бетона при



притиску на бази мерења површинске тврдоће, што се постиже успостављањем зависности између еластичног одскока ударне масе (која је део апаратуре) и чврстоће бетона.

Шмитов чекић функционише тако што се поставља управно на површину елемента који се испитује, након чега се на апаратуру делује притиском руке на страни супротној од ударног ваљка (видети слику 4). На овај начин, ваљак се „утискује” у апаратуру, при чему његово увлачење иде „до краја”. Када ваљак потпуно уђе у унутрашњост апаратуре (кућиште), ослобађа се ударна маса која под дејством ударне опруге удара у ваљак и одскаче на супротну страну. Величина одскока  $h$  се меморише и представља физичку величину која се мери овом методом. У принципу, што је вредност одскока на некој локацији већа – већа је и тврдоћа бетона – а самим тим и његова чврстоћа при притиску.



Слика 4. Испитивање помоћу склерометра

При примени склерометра потребно је дефинисати функцију која повезује еластични одскок  $h$  и процењену чврстоћу бетона  $f_c$ , а која има следећи облик:

$$f_c = f_c(h) \quad (5)$$

Као што је већ речено, до предметне функције може се доћи само путем паралелних испитивања у оквиру којих ће се на истим позицијама на конструкцији прво вршити мерење одскока  $h$ , а затим извршити вађење узорак бетона (кернова) и њихово испитивање на притисак применом стандардног поступка.

Резултати испитивања (тј. процењене вредности чврстоће) који се добијају применом Шмитовог чекића зависе и од положаја уређаја приликом испитивања, односно од угла који посматрана бетонска површина заклапа са хоризонталом. На тај начин, узимајући у обзир смер деловања силе гравитације, лако се може закључити да ће се у

случају истог квалитета бетона, највећи одскок добити у случају када се Шмитовим чекићем на бетонску површину делује вертикално на горе, а најмања вредност када се Шмитовим чекићем делује вертикално на доле.

Испитивања путем Шмитовог чекића спроводе се у складу са стандардом SRPS EN 12504-2 [13]. Испитивања се врше на бетонским елементима дебљине која износи најмање 100 mm. Код оваквих испитивања, најчешће се, на сваком мерном месту, користи ортогонална мрежа тачака на међусобном растојању од 25-50 mm у оба правца, тако да се мерења тврдоће на једној позицији спроводе на површини од 300×300 mm. У складу са тим, на једној позицији се мерење врши у најмање 9 тачака, тј. региструје се најмање 9 одскока склерометра. Величина одскока  $h$  која одговара једном мерном месту, рачуна се као медијана свих одскока измерених на тој позицији. Овако добијена величина еластичног одскока назива се индексом склерометра. Уколико се више од 20% свих резултата мерења на једној позицији разликује за више од 6 јединица у односу на медијану, резултати мерења на тој позицији се одбацују.

Поред овога, стандард SRPS EN 13791 [16] утврђује и процедуру одређивања зависности између индиректних метода (методе Шмитовог чекића, Pull-out методе и брзине ултразвука) и чврстоће бетона у конструкцији (in situ).

Предметна процедура се састоји у следећем:

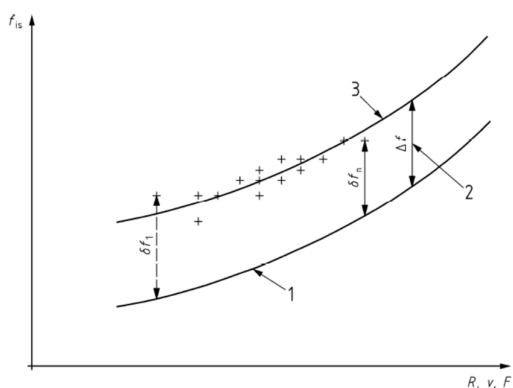
- на конструкцији је потребно изабрати најмање 9 мерних места, на којима ће прво бити извршена испитивања индиректним (недеструктивним) методама, а потом и узорковање бетонских цилиндара (кернова) који ће накнадно бити испитани у циљу одређивања чврстоће при притиску бетона уграђеног у конструкцију,
- пратећи принципе илустроване на слици 5, на дијаграму (слика 6) треба нацртати парове вредности чврстоће при притиску ( $y$ -osa) и одговарајућих вредности мерених индиректним методама ( $x$ -osa),
- за свако мерно место, потребно је одредити разлику чврстоће добијене директно (испитивањем керна) и вредности коју даје основна крива,  $\delta f = f_{is} - f_R$ ,
- треба срачунати средњу вредност  $\delta f_m = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{is,i} - f_{R,i})}{n}$  и стандардну девијацију  $s = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta f_m - \delta f_{m,i})^2}{n-1}$ ,



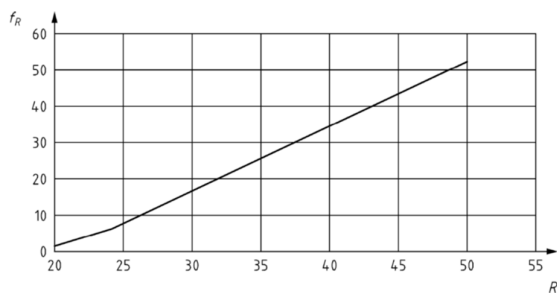
- треба срачунати вредност  $\Delta f = \delta f_m - k_1 \cdot s$ , за коју је потребно транслирати основну криву, где се коефицијент  $k_1$  усваја из следеће табеле 2,
- треба транслирати основну криву за  $\Delta f$  да би се добио однос између методе индиректног испитивања и чврстоће при притиску одређене директно (in situ) за конкретни бетон који се испитује,
- коначно, даљим индиректним испитивањима и коришћењем успостављене функционалне зависности, могу се проценити чврстоће при притиску бетона на великом (практично неограниченом) броју мерних места, а затим и израчунати карактеристична чврстоће бетона уграђеног у предметну конструкцију.

Табела 2. Вредности коефицијента  $k_1$

Број парова вредности	Коефицијент
$n$	$k_1$
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
$\geq 15$	1,48



Слика 5. Принцип добијања зависности између резултата индиректних испитивања и чврстоће бетона in situ



Слика 6. Основна крива за методу Шмитовог чекића

### Метода ултразвука

Метода ултразвука подразумева коришћење нарочитих апаратура које емитују ултразвучне импулсе (фреквенције 50-150 kHz) и путем којих се може регистровати време кретања ултразвучних таласа дуж одређене путање - базе мерења. У највећем броју случајева, ове апаратуре су конципиране на принципу преноса подужних (лонгитудиналних) ултразвучних таласа, пошто се путем њих обезбеђује највећа могућа тачност мерења.

Апаратура која ради на принципу емитовања лонгитудиналних ултразвучних таласа састоји се од електричног генератора импулса и предајника којим се ултразвук "уводи" у материјал који се испитује, затим од пријемника ултразвука где се механички импулси претварају у електричне, појачивача и индикатора времена који омогућава регистровање времена пролаза ултразвучног таласа кроз посматрани елемент (видети слику 7).



Слика 7. Ултразвучна апаратура

Знајући дужину пута ( $s$ ) који је ултразвук прешао крећући се кроз посматрани елемент, као и измерено време трајања овог кретања ( $t$ ), може се израчунати брзина ултразвука:

$$v = \frac{s}{t} \tag{6}$$

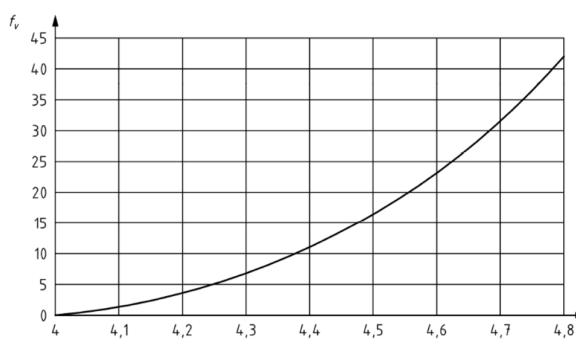
С обзиром да је брзина пролаза ултразвука кроз поједине материјале функција остварених запреминских маса (густина) тих материјала, у случају бетона ова брзина може да варира у врло

широким границама - од 2000 до 5000 m/s. Сматра се да је брзина од око 3500 m/s доња граница брзине за квалитетне (добро уграђене) бетоне. Како је чврстоћа бетона у општем случају функција његове запреминске масе, односно функција његове компактности, чврстоћа бетона ће по правилу бити већа при већој компактности предметног материјала. Међутим, ово правило важи само под условом да постоји задовољавајућа адхезија између зрна агрегата и цементног камена. Уколико овај услов није задовољен, брзина ултразвука неће представљати реалан показатељ чврстоће бетона. Наиме, слаба адхезија нема утицаја на компактност бетона, па се и у случајевима незадовољавајуће адхезије често добијају сразмерно велике брзине ултразвука које могу да наведу на погрешан закључак у погледу чврстоће. Исто тако, као недостатак ове методе може да се узме и чињеница да она, с обзиром да брзина ултразвука зависи од запреминске масе бетона, није у стању да на адекватан начин прикаже чврстоћу у случајевима када је чврстоћа резултат коришћења већих количина цемента и у случајевима када се чврстоћа остварује применом цемената високих класа.

На брзине ултразвука донекле утиче и влажност бетона. Влажан бетон има нешто већу брзину у односу на сув бетон, при чему ова разлика ретко кад прелази границу од 2%. Код бетона нижих квалитета, разлика је већа него код бетона виших квалитета.

С обзиром на изложено може се закључити да је, у општем случају, код примене ултразвучне методе увек потребно располагати таквом функцијом  $f_c = f_c(v)$  која ће у највећем могућем степену одговарати бетону који се испитује. Облик функције  $f_c = f_c(v)$  дефинише се на бази конкретних експерименталних података, при чему општи облици ове функције могу да буду: квадратна, степена, експоненцијна и сл.

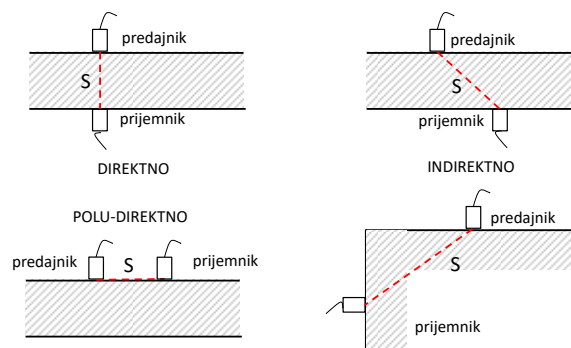
Такође, приликом одређивања предметне зависности може се користити и процедура у складу са стандардом SRPS EN 13791 [16], на идентичан начин као у случају методе Шмитовог чекића, само се уместо уместо вредности очитаних са основне криве за Шмитов чекић  $f_R$  користе вредности основне криве за брзину ултразвука  $f_v$  – како је то приказано на слици 8.



Слика 8. Основна крива за методу ултразвука

Приликом испитивања готових конструкција, на брзину пролаза ултразвука у великој мери може да утиче челична арматура присутна у маси бетона. Из тих разлога се увек тежи да мерна места за одређивање брзине  $v$  буду довољно удаљена од арматуре. Положај арматуре у оквиру посматране конструкције може се утврдити помоћу специјалних уређаја (тзв. пахометара, или профометара), па се на тај начин утицај присутне арматуре на измерену брзину ултразвука може у потпуности елиминисати. Уколико то није могуће (на пример у случају густо армираних пресека), постоје други начини да се утицај арматуре елиминише из самих резултата мерења.

Примена методе ултразвука утврђена је стандардом SRPS EN 12504-4 [15], који обрађује проблематику одређивања брзине  $v$ . Предметни стандард препознаје три случаја проласка ултразвука између предајника и пријемника ултразвучних таласа (тзв. прозвучавања) у оквиру неког бетонског елемента. То су: директно, полу-директно и индиректно прозвучавање, као што је приказано на слици 9.



Слика 9. Основне диспозиције прозвучавања бетонских елемената

Битно је напоменути, да је приликом прозвучавања бетона, на контакту између сонде и бетонске површине, обавезна употреба

различитих медијума, као што су: товатна маст, вазелин, течни сапун или каолин/глицерол паста. На тај начин обезбеђује се интимнији контакт сонди и бетона, чиме се смањује грешка приликом читавања резултата испитивања - која би се јавила као последица споријег проласка ултразвучног таласа кроз слој ваздуха на овом контакту ( $v_{vaz} = 340 \text{ m/s} \ll v_{beton}$ ).

С обзиром да је брзина проласка ултразвучних таласа кроз ваздух приближно 10 пута мања у поређењу са бетоном, а брзина кроз челик нешто већа него кроз бетон ( $v_c \approx 5850 \text{ m/s}$ ), јасно је да се метода ултразвука, уз познавање основних једначина физике, може веома успешно користити и у области дефектоскопије – тј. за детекцију присуства прелина/пукотина/каверни, као и за лоцирање арматуриних шипки у бетону. При овоме треба нагласити, да ће ултразвучна апаратура увек регистровати само најбржи талас који стигне од предајника до пријемника, што узимајући у обзир претходно речено, значи да талас неће увек путовати геометријски најкраћом могућом путањом.

### 3. ЗАКЉУЧАК

Током процедуре утврђивања и оцене стања неког грађевинског објекта, један од најважнијих корака свакако представља испитивање квалитета материјала који су уграђени у предметну конструкцију. Када је реч о армиранобетонским конструктивним елементима, јасно је да је од кључног значаја испитивање квалитета уграђеног бетона, али такође и утврђивање степена оштећења и евентуално присуство корозије - како код самог бетона, тако и код постојеће челичне арматуре. Поступци о којима је реч, у највећој мери изводе се на самом објекту (in-situ), а могу бити деструктивног карактера (са разарањем материјала), или у виду недеструктивних испитивања (када уграђени материјали остају потпуно интактни, односно са мањим присутним оштећењима која су локалног карактера и не захтевају никакве санационе интервенције). При томе, од посебног значаја је дефинисање оптималних функционалних веза између физичких величина добијених недеструктивним испитивањима (висина одскока склерометра, брзина ултразвучних таласа) и својстава бетона утврђених применом метода са разарањем (чврстоћа при притиску). Комбиновањем деструктивних и недеструктивних метода, остварују се значајни

ефекти на плану брзине извођења истражних радова, као и значајног смањења трошкова испитивања. Важно је нагласити да су све описане и анализирани методе испитивања базиране на одредбама актуелне Европске техничке регулативе која је прихваћена и одобрена за примену у Републици Србији (важећа издања SRPS EN стандарда).

Након анализе резултата добијених експерименталним испитивањем на самом објекту (in-situ) и делимично у лабораторији, могуће је са знатно већим степеном сигурности оценити постојеће (тренутно) стање објекта, као и грађевинских материјала уграђених у његове карактеристичне конструктивне елементе. Ово је посебно важно у случајевима када је неопходно дефинисати мере санације (реhabилитације, реконструкције, ојачања) појединих делова или читаве конструкције објекта, у циљу његовог довођења у пројектом дефинисано стање, односно у циљу усклађивања његових перформанси са важећом техничком регулативом.

### 4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Muravlјov, D. Zakić, A. Radević. Tehnologija betona – teorija i praksa. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu i Akademska misao, Beograd, 2022.
- [2] V. Tufegdžić. Građevinski materijali – poznavanje i ispitivanje. Naučna knjiga, Beograd, 1966.
- [3] M. Muravlјov. Građevinski materijali, III izdanje. Građevinska knjiga, Beograd, 1998.
- [4] R. Springenschmid. Betontechnologie für die Praxis. 2. Auflage, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland, 2018.
- [5] Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton (BAB-87). Službeni list SFRJ broj 11, 1987.
- [6] V. Radonjanin, M. Malešev, Z. Grdić, D. Zakić, I. Ignjatović, D. Bojović, D. Milinković, I. Lukić, N. Ristić, A. Radević. Prikaz i tumačenje najvažnijih odredbi novog Pravilnika o tehničkim zahtevima za beton, Stručni skup "Građevinski materijali i konstrukcije sa aspekta nove tehničke regulative u Republici Srbiji", DIMK, Beograd, 2021, 35-50.
- [7] A.M. Neville, J.J. Brooks. Concrete Technology, 2<sup>nd</sup> edition. Person Education Limited, Harlow, England, 2010.
- [8] V.M. Malhotra, N.J. Carino. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press, USA, 2004.
- [9] M. Muravlјov, S. Živković, D. Zakić. Savremene metode i tehnike ispitivanja betona i betonskih

- konstrukcija. Materijali i konstrukcije 1-2/2000, 2000, 5-11.
- [10] A. Radević, D. Zakić, A. Savić, M. Aškračić, D. Jevtić. Primena in-situ metoda ispitivanja u cilju sanacije betonskih konstrukcija. XII Međunarodno naučno-stručno savetovanje "Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata", Vrnjačka Banja, 2022, 243-252.
- [11] SRPS EN 206: Beton – Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost. ISS, 2021.
- [12] SRPS EN 12504-1: Ispitivanje betona u konstrukcijama – Deo 1: Jezgrovani uzorci (kernovi) – Uzimanje, pregled i ispitivanje pri pritisku. ISS, 2019.
- [13] SRPS EN 12504-2: Ispitivanje betona u konstrukcijama – Deo 2: Ispitivanje bez razaranja – Određivanje veličine odskoka. ISS, 2021.
- [14] SRPS EN 12504-3: Ispitivanje betona u konstrukcijama – Deo 3: Ispitivanje bez razaranja – Određivanje sile čupanja. ISS, 2008.
- [15] SRPS EN 12504-4: Ispitivanje betona u konstrukcijama – Deo 4: Ispitivanje bez razaranja – Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa. ISS, 2021.
- [16] SRPS EN 13791: Ocenjivanje čvrstoće pri pritisku konstrukcija i prefabrikovanih betonskih elemenata na mestu ugradnje. ISS, 2019.