

О МОДЕЛИРАЊУ И ПРОЈЕКТОВАЊУ БЕТОНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРЕМА ТРАЈНОСТИ

Слободан Грковић¹,
Радомир Фолић²

УДК: 624.012.4 : 620.1

DOI: 10.14415/zbornikGFS28.06

Резиме: У техничким прописима (кодови) за пројектовање бетонских конструкција (БК) који су примењивани скоро до краја XX века, трајност је третирана имплицитно и није био дефинисан њихов експлоатациони век (ЕВ). Овај приступ се током времена показао недовољним, нарочито у условима интензивног раста загађености окружења. У актуелним кодовима за пројектовање БК (нпр. EN, тј. Еврокод-ЕС), трајност се третира имплицитно и већина не садрже квантифициране смернице за пројектовање БК са ЕВ дужином од 50-так година. При томе је и ЕВ имплицитно дефинисан, без јасног значења, шта је крај ЕВ? Сматрало се да ће примена одредби ових кодова резултирати трајном БК у експлоатацији, и да ће оне достићи захтевани ЕВ, што често није случај. Искуства указују да овај приступ не задовољава услове трајности, нарочито кад је захтевани ЕВ значајно дужи од 50-так година (100 или више). Савремени приступ пројектовању поузданих БК заснива се на перформансама и понашању, током ЕВ. Пробабилитички приступ (заснован на вероватноћи и поузданости) пројектовању омогућује тачнију прогнозу понашања БК током ЕВ, али је сложен и могућност његове шире практичне примене је у фази развоја. У овом раду су, на основу прегледа литературе и савремених кодова, анализирани неки модели и приступи пројектовању БК, према трајности. Нагласак је на пројектовању према перформансама, засновано на индикаторима трајности бетона, уз актуелне предлоге за ревизију EN 1992 и EN 206, засновану на стеченим искуствима и новијим истраживањима, у овој области.

Кључне речи: Бетонске конструкције, Трајност, Експлоатациони век, Модели, Поузданост, Пројектовање, Детериорациони процеси, Перформансе, Индикатори трајности бетона

1. УВОД

Савременији приступ пројектовању БК обухвата сигурност, употребљивост, трајност, и погодност одржавања, чиме се тежи пуној интеграцији свих компоненти

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

² Професор Емеритус, Др. Инг. Радомир Фолић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Департаман за Грађевинарство и Геодезију, тел: 021/485-2644, е-маил: folic@uns.ac.rs

поузданости конструкције. Зависно од врсте БК и њене функције, постављају се захтеви и критеријуми поузданости које понашање конструкција треба да задовољи, током експлоатационг века (ЕВ), уз увођење интеракције конструкције и окружења, и могућег утицаја на животну средину.

У раније коришћеним техничким прописима (кодовима) за пројектовање БК, није био дефинисан ЕВ и трајност је третирана имплицитно [11,15] и [30]. Овај приступ се показао недовољним, нарочито у условима раста загађености окружења, које је убрзало деградацију БК, смањило ЕВ и увећало трошкове њиховог одржавања [11, 14] и [15]. На слици 1, приказани су примери последица детериорационих процеса (ДП) на неким објектима, [14] и [18].



а) АБ греда (носач) крана [14]

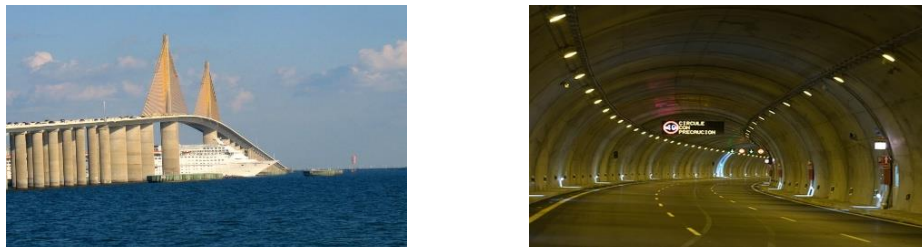


б) АБ греда моста [18]

Слика 1. Последице детериорационих процеса

У актуелним кодовима за пројектовање БК, већина њих не садрже квантифициране смернице за пројектовање БК са ЕВ, дужим од 50-так година [14] и [30]. Према ЕС, ЕВ је имплицитно дефинисан и без прецизног значења, шта је крај ЕВ [25]. Пројектовање трајности, према ЕС експлицитно не обухвата објекте (нпр. мостови) којима је захтевани ЕВ дужи од 50 година, није обухваћен утицај различитих врста цемената и минералних додатака, нове врсте материјала (цемената, арматуре од других материјала итд.), нове врсте БК или њених елемената, и недовољно истражене и/или нове врсте агресивног окружења. Предвиђена испитивања перформанси бетона не садрже, за трајност важну, контролу квалитета заштитног слоја бетона, и у том погледу могуће недостатке изведене БК и др. Додатно, везано за националне стандарде, постоје одређене неусаглашености (нпр. у реално, сличним локалним условима окружења (нпр. UK, DEN, NL и NO) за исте подкласе изложености (XC3, XC4, XS2) усвојени су различити захтеви за максимални водоцементни фактор (w/c) и минимални заштитни слој бетона, што се објашњава различитим разумевањем националних нормираних тела, шта је тачно крај ЕВ [20]. Усвојени ниво поузданости, односно индекс поузданости- β , усвојен у неким националним нормираним телима, варира од 1,8 (NL) до 0 (ES), односно P_f варира од 4% - 50%, за случај депасивизације арматуре [21]. За исту класу изложености (XC) и исти захтевани ЕВ, препоруке у два национална стандарда (BS EN 8500 и BS 6349-1-4) међусобно се разликују, мада се заснивају на истом математичком моделу (ММ) прорачуна миграције јона хлорида [6], и др. Данас се, за важније објекте (Слика 2.) захтева ЕВ од 100 или чак 200 година, уз услов да буду без великих трошкова одржавања [30]. Због тога је при пројектовању БК било потребно увести прорачун захтеваног ЕВ, односно трајности засновано на понашању, током коришћења, тј. на перформансама [1,2,3,10,12,15,19,26] и [30]. То је нужно код

објекта поред мора, значајних индустријских и објекта инфраструктуре, пројектованих са дужим ЕВ, на којима ДП често проузрокују оштећења БК [12,16,20] и [30]. То условљава њихов посебан третман у пројектовању које се заснива на перформансама, односно њиховом понашању током ЕВ, и укључује погодност за одржавања [12] и [14]. Праћењем понашања конструкције верификују се захтеви и критеријуми понашања, помоћу индикатора понашања, при чему се захтеви везани за трајност бетона верификују путем индикатора или индекса трајности (енгл. *Durability indicators or indexes (DIs)*) [1,2,3,15,26] и [28].

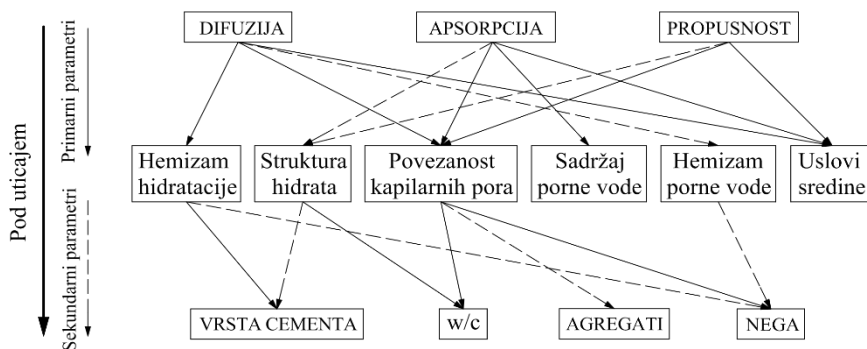


Слика 2. Моументални објекти (мостови, тунели)

У овом раду су нека од ових кључних питања, која битно утичу на трајност БК, разматрана са упућивањем на релевантну литературу.

2. ТРАЈНОСТ И ЕВ БЕТОНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА

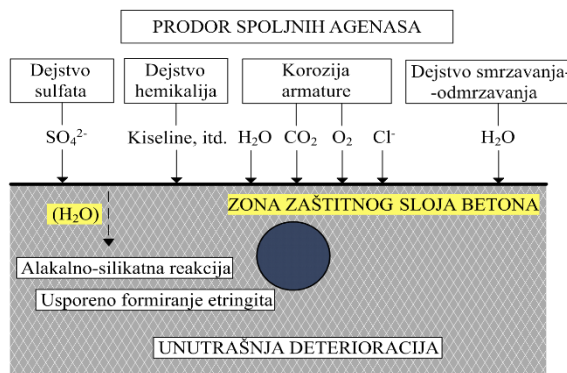
Код анализе трајности БК, најважнији фактор трајности је пропусност бетона (енгл. *Permeability of concrete*), тј. брзина пенетрације и транспорта материја кроз структуру бетона, која садржи поре разних врста и величина, одвојене и/или међусобно повезане, [1,2,3,4,5,11,12,...]. Кључни фактори који утичу на пропусност бетона и њихова међусобна повезаност се може приказати као на слици 3.



Слика 3. Кључни фактори који утичу на пропусност бетона

На већу пропусност бетона утичу и микропрелине у бетону, проузроковане деформацијама од термичког скупљања и/или услед скупљања од сушења, и

пераног и/или прекомерног оптерећења и др.. Тип и распоред пора, и њихова међусобна повезаност утиче на пенетрацију и транспортне механизме материјала из окружења у и кроз бетон, а тиме и механизме детериорације бетона, са неповољним утицајем на понашање БК (сигурност, употребљивост, изглед објекта и др.) током времена. ДП и механизми деградације БК се према последицама класификују на, оштећења бетона и оштећења арматура. Оштећења бетона се везују за физикална дејства, хемијска (интерна и екстерна) дејства и реакције која узрокују оштећења, и микробиолошки побуђена дејства. Оштећења челика (арматура и каблови за преднапрезање) у бетону најчешће настају услед корозије узроковане хлоридима и/или карбонизацијом заштитног слоја бетона. Корозија челика у бетону је најизраженији проблем трајности БК. Због тога је највише изучавана. Најопаснији вид деградације БК, нарочито мостова, је корозија челика иницирана хлоридима у бетону који најчешће доспевају из морске воде и/или од соли коришћених зими против смрзавања. Актуелна су и истраживања и других неповољних дејстава на бетон, нарочито утицај алкално силикатне реакције (ASR), затим истраживање дејства сулфата (нпр. таумасита, које је актуелно последњих двадесетак година), итд. Више о ДП и механизмима деградације БК може се наћи у бројној литератури.

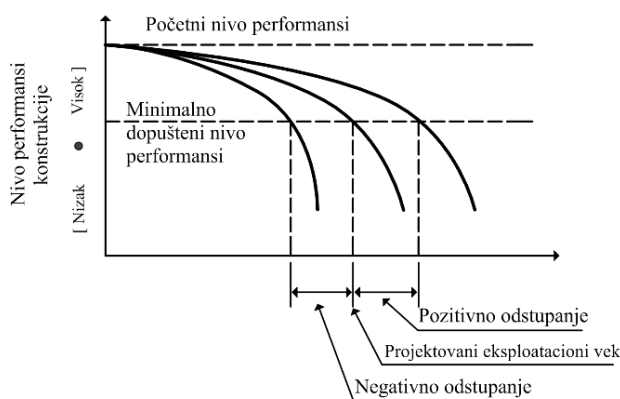


Слика 4. Неки ДП, механизми, и дејства из окружења који утичу на деградацију БК [11]

Трајност БК се тешко квантификује јер зависи од низа параметара који се уводе у пројектовању, од остварених перформанси током изградње, и од правремености одржавања. Концепт пројектовања БК према ЕВ, уведен је у Model Code СЕВ-FIP 90 [4]. Према EN 1990 [8], сматра се да конструкција има одговарајућу трајност у одређеном окружењу, у оној мери у којој је прихватљиво испуњење њене функције. Трајност и ЕВ су међусобно повезани, и дефинисани у ISO 13823 [23]. Трајност се може проценити коришћењем математичких модела (ММ) који реално описују ДП којима ће БК бити изложена, током коришћења [10]. ЕВ се може изразити квантитативно (године), при чему пројектовани ЕВ најчешће зависи од типа и функције БК. Према ISO 2394 [22] и EN 1990 [8], при анализи поузданости, препоручује се ЕВ (у годинама) за пет категорија објеката: за привремене објекте 10; заменљиви делови 10 до 25; за пољопривредне објекте 15 до 30; за зграде 50, и за монументалне објекте и мостове 100 и више. Према, FIB Model Code 2010 (MC 2010) [12] препоручује се ЕВ (у годинама), за: конструкције у близини мора да је 35,

оне пројектоване према Modelu СЕВ-FIP 90 и EN 1992 је 50, мостове и тунеле је 100 година, итд. У САД је пројектантски ЕВ за мостове 75 година, итд..

Према ISO 16204 [24], пројектовани ЕВ је: „Assumed period for which a structure or a part of it is to be used for its intended purpose with anticipated maintenance, but without major repair being necessary“. Пројектантски ЕВ, често се током коришћења БК коригује, због деградације и слабљења перформанси, до минимално прихватљивог нивоа, у неком тренутку времена. То одређује стварни ЕВ конструкције, који може бити дужи или краћи од пројектованог, зависно од брзине деградације БК. На слици 5. је приказана идеализована крива понашања БК услед детериорације. Како деградација БК напредује, њене перформансе слабе све до минимално прихватљивог нивоа, у неком тренутку времена.



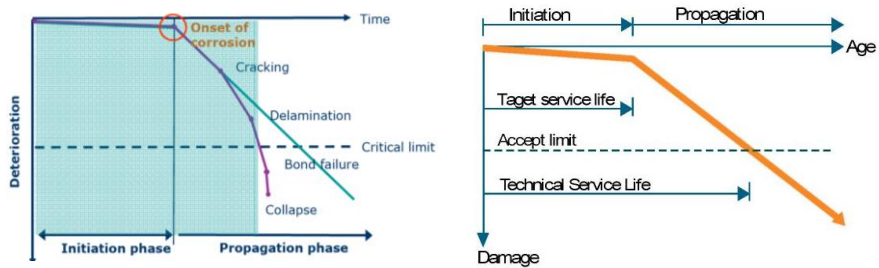
Слика 5. Идеализована крива деградације БК, током времена

Ова ситуација одређује стварни ЕВ конструкције, који може бити дужи или краћи од пројектованог, зависно од стварне брзине деградације БК (Слика 5). ISO 13823 [23] дефинише стварни ЕВ: “The actual period of time during which a structure or any of its components satisfy the design performance requirements without unforeseen major maintenance and repair“. У актуелним кодовима (нпр. ЕС) за пројектовање БК, прорачун деградације конструкције током ЕВ није обухваћен, и сматра се да ће се пројектоване перформансе одржати током ЕВ, путем активности управљања и одржавање, што није увек случај. Планирање и процена стварног ЕВ веома је сложено, јер се тачно не знају почетне и трајне перформансе материјала, а тешко је предвидети и све услове коришћења објекта. Груба процена ЕВ, заснована на факторима прилагођавања је дата у ISO 15686 [14].

3. ПРОЈЕКТОВАЊЕ БЕТОНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРЕМА ЕВ

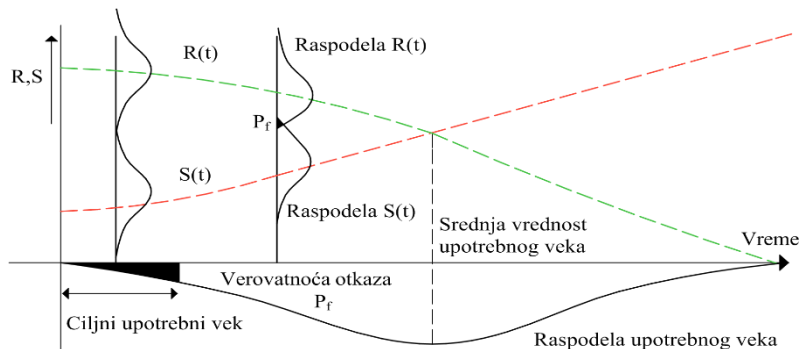
Опсежна истраживања са почетка осамдесетих година прошлог века, у Европи (нарочито у Холандији) и САД, усмерена на дефинисање прорачуна трајности БК, била су основ за развој пројектовања БК према ЕВ [14] и [30]. При томе се ЕВ разматра са техничког, функционалног и економског аспекта [14] и [29]. Технички ЕВ (Сл. 6) је време експлоатације у којем настаје неприхватљиво стање

детериорације и њено моделирање у времену се дели на фазу иницијације и фазу пропације (процес деградације БК се убрзава) [14] и [29]. Трајније су БК са дужом, иницијалном фазом и споријом фазом пропације. Идеалан случај је када трајање иницијалне фазе одговара дефинисаном ЕВ [14].



Слика 6. Фазе развоја детериорације (корозија арматуре) [11], и Технички ЕВ [29].

У даљем развоју пројектовања трајности БК водећу улогу су имали СЕВ [4] и RILEM [5], особито Извештај TC 130-CSL [5], који је отворио пут прорачуну трајности БК, на истој основи као и прорачун носивости и употребљивости. Овим се мења приступ пројектовању трајности БК, од детерминистичког ка пробабилистичком (Сл.7), дефинисањем математичких модела (ММ) за одређене ДП и одређивању експлицитног ЕВ, и њене поузданости [5,10] и [22]. Вероватноћа отказа- $P_f(t)$, током времена расте и може се изразити преко индекса поузданости (β), при чему су, отпорност $R(t)$ и дејства $S(t)$ функције великог броја временски зависних стохастичких варијабила [10].



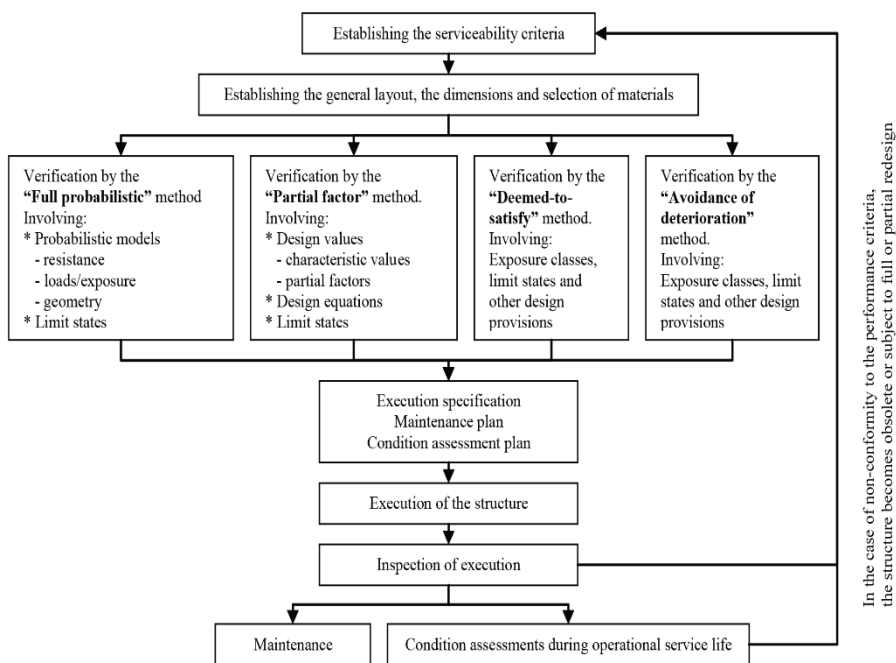
Слика 7. Шематски приказ пробабилистичког приступа пројектовању БК према ЕВ (енгл. Service Life Design-SLD (Duracrete)) [10] и [30]

Постоје различите класе поузданости (енгл. Reliability Class (RC)) конструкција, и класе последица (енгл. Consequence Class (CC)) отказа. Избор класе зависи од начина достизања граничног стања (енгл. limit states (LS)), гранично стање носивости (енгл. Ultimate Limit State (ULS)) или гранично стање употребљивост (енгл. Serviceability Limit State (SLS)), и могућих последица, према ISO 2394 [10] и [22].

Формулација математичких модела (ММ) за одређене ДП и дефинисање параметара ММ су истраживани у низу пројеката (нпр. *DuraCrete*, *Darts*, и др.) [10].

FIB је 2002.г. формирао *Task Group 5.6*, за развој *Model Code for Service Life Design (MC-SLD)*, заснован на пробабилитичкој основи, LS и поузданости према ISO 2394, и пројектима *DuraCrete* и *Darts* [10]. MC-SLD је публикован 2006.г., и инкорпориран у MC 2010 и ISO 16204 [24]. ISO 16204 се заснова на обједињеним начелима, датим у ISO 2394, ISO 13823, MC-SLD и MC 2010 [24].

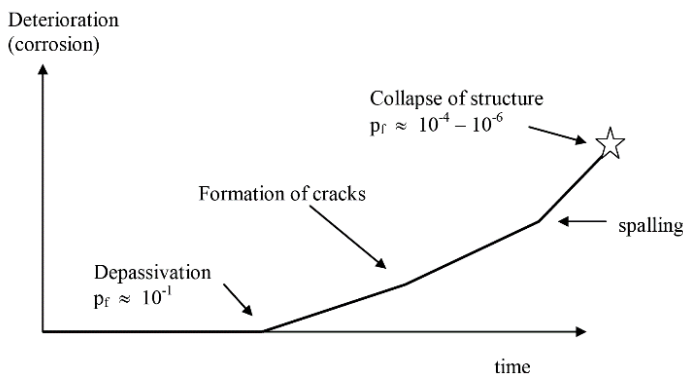
У MC-SLD су третирани ДП за које постоје опште прихваћени ММ [10]: корозија арматуре услед карбонизације, корозија арматуре услед пенетрације хлорида, оштећења бетона услед дејства мраза, и оштећења бетона услед симултаног дејства мраза и соли коришћених зими против смрзавања. Фазе пројектовања су: дефинисање ММ за ДП, квантификација параметара у ММ, дефинисање LS према коме се пројектује, дефинисање граничних стања LS (SLS или ULS) и прорачунски доказ, на четири могућа начина (Сл. 8) [10,12] и [24]. За корозију арматуре, за SLS се сматра: депасивизација арматуре (SLS1); формирање прелина (SLS2) и одљускавање бетона (SLS3) (уколико нема ризика од отпадања делова БК, у супротном се сматра ULS1), а за ULS су: љускање заштитног слоја, уколико постоји ризик од отпадања комада (ULS1); губитак везе између бетона и арматуре (ULS2); и лом конструктивног елемента (ULS3), при чему су последња два, класична ULS [10].



Слика 8. Ток пројектовања - Service life design (SLD), [10] и [24]

Према ISO 2394, MC-SLD, MC 2010 и ISO 16204, код корозије арматуре за P_f се усвајају величине приказане на слици 9 [20]. У складу са изабраним типом LS бира се β , или коефицијенти сигурност (γ).

Прорачунски ЕВ се одређује дефинисањем ЕВ (године) са нивоом поузданости да се током ЕВ не достигне LS. За крај ЕВ се најчешће усваја крај периода иницијализације, коме се у случају неких БК (масивније БК) додаје део периода пропагације.



Слика 9. Различити LS и одговарајући ниво поузданости за случај корозије арматуре [20]

4. ПРИСТУПИ КОД ПРОЈЕКТОВАЊА ТРАЈНОСТИ БК

Пројектовање трајности је примарно условљено агресивношћу окружења, коју треба пажљиво идентификовати и класификовати, особито јер степен агресивности окружења може варирати на макро (нпр. регион, насеље, итд.) и микро нивоу (између различитих и/или истих делова БК, нпр. они који су изложени атмосферским падавинама од оних који су заштићени или заклоњени, и др.). У интеракцији окружења и бетона, ниво агресивности окружења и перформансе очврслог бетона предодређују могућу пенетрацију и транспортне механизме агресивних материја у бетон, и потенцијалне ДП које треба идентификовати. Актуелни приступи пројектовању трајности могу се сврстати у две основне, различите стратегије (А и Б), које су 1994.г. предложили *S.Roostam* и *P.Schiessel* [29].

Стратегија А („Avoidance of deterioration”) се заснива на избегавању детериорације, на принципима потпуне заштите БК и може се поделити на три могућа приступа:

- A1 Промена микро окружења (нпр. облоге, мембране, изолације, итд.),
- A2 Избор материјала који не реагују на потенцијална дејства (нерђајући челици, итд.)
- A3 Спречавање реакција (нпр. катодна заштита челика од корозије, итд.)

Стратегија Б минимизира детериорацију оптималним пројектовањем и избором материјала, и може се поделити на четири могућа приступа:

- B1 Сматра се да задовољава одредбе кодова (“*Deemed-to-satisfy*”);
- B2 Једна или више фаза (баријера) заштите.
 - B2.1 Отпорност помоћу једне фазе (нивоа) заштите.
 - B2.2 Отпорност помоћу више фазе (нивоа) заштите.

Б3 Факторска метода (Прилагођено ISO 15686).

Б4 Методологија заснована на вероватноћи и поузданости („*Performance based design*“):

Б4.1 Пробабалистички приступ (“*Full probabilistic*” format).

Б4.2 Метод парцијалних коефицијената (“*Partial factor*” format).

Приступ Б1 подразумева задовољење захтева из одредби кодова (нпр. *ЕС*) и њихова примена у пракси, за већину услова експлоатације треба резултирати трајном БК, али нису адекватни за конструкције у агресивнијим окружњу и за ЕВ, дужи од 50 година. Факторска метода се сматра унапређењем приступа Б1, уз коришћење фактора прилагођавања, и као „веза“ између једноставности (Б1) и сложености (Б4). Приступ стратегије Б1-Б3 се заснивају на емпиријском (имплицитном) начину, тј. на основу претходних искустава и разумевања перформанси које примарно произилазе из познавања материјала. У примени наведених стратегија могуће су комбинације и/или „преклапања“, између различитих приступа, у оквиру једне стратегије и/или појединих приступа, из обе стратегије (нпр. приступ Б2, се потенцијално преклапа са Б1, Б3 и Б4, и класификација од Б1 до Б4, нису међусобно искључиве алтернативе, [11] и [29]. Пример је објекат *Gret Belt Fixed Link* (Данска) [29], у врло агресивном окружења мора, који се састоји од тунела (7,9км) и 2 велика моста (6,6км и 6,8км) на коме су приликом изградње комбиновани приступи из стратегије Б (Б1, Б2 и Б4) и код неких делова објекта приступ А3 из стратегије А [11] и [29].

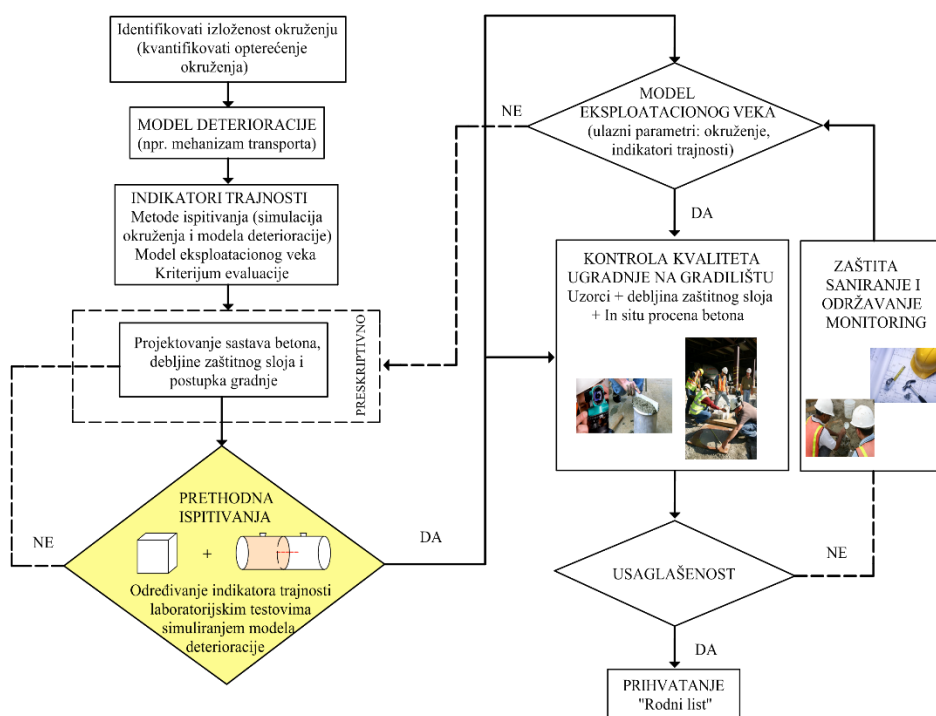


Слика 11. *Gret Belt Fixed Link Bridge*

Стратегија Б4 подразумева прорачун трајности уз коришћење ММ за ДП. Међутим, његова шира практична примена је сложена, нарочито у случају дејства више различитих ДП, када треба симулирати њихово синергијско деловање. Приступ Б4.1 би требао омогућити најтачнију прогнозу за временски зависно понашања БК, што је тешко, пошто су перформансе материјала и услова експлоатације случајне варијабиле, тешко се могу прецизно симулирати, а расположиви подаци који симулирају реалне статистичке варијабиле $R(t)$ и $S(t)$ су оскудни [10] и [12]. Овај приступ се примењује само код пројектовања изузетно важних објеката, односно њихових БК.

5. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАЈНОСТИ БК ПРЕМА ПЕРФОРМАНСАМА

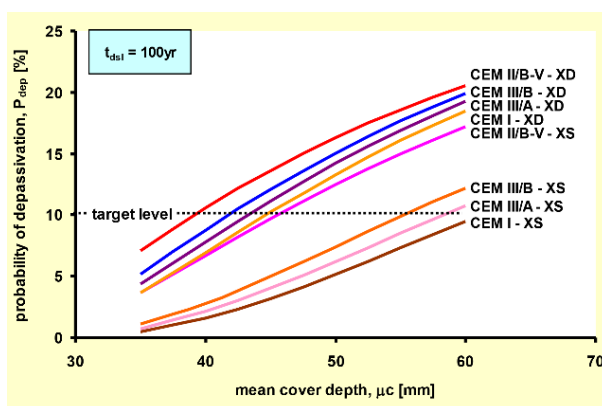
Пројектовање трајности према перформансама (*енгл. Performance Based Durability Design-PBDD*) путем DIs се заснива на моделу ЕВ и третира пројектовање перформанси материјала и геометријских карактеристика попречног пресека компоненти конструкције, који су део улазних параметара за модел ЕВ и обезбеђивање захтеваног квалитета (Сл. 12) [2],[3], и [27]. За захтевани ЕВ, PBDD се у суштини заснива на функционалним захтевима за очврели бетон и критеријумима прихватљивости. Индикатори пропусности бетона (дифузија јона хлорида, водопропусност, пропусност на гасове, капиларна апсорпција, и порозност) најчешће се усвајају за DIs [1,2,3], и [28].



Слика 12. Процедуре код пројектовања трајности према перформансама [2,3] и [27]

Код пројектовања трајности за захтевани ЕВ, сходно врсти и функцији конструкције, и агресивности окружења, пројектант условљава (специфицира) величине DIs које очврели бетон треба да задовољи. DIs се испитују путем нормираних метода и/или оних које се дуго примењују, уз верификовану тачност [1,2,3] и [4]. При томе, део испитивања се врши пре извођења радова, а део за прихватање на градилишту. Утврђивање испуњености функционалних захтева за квалитет бетона врши се након изградње, накнадим испитивањем величина DIs, које се ажурирају у „Rodni list“ (*енгл. „Birth certificate“*) конструкције [12] и [27]. За практичну примену PBDD, претходно је потребно нормирати граничне вредности,

методе испитивања перформанси очврслог бетона, и установити везу између перформанси бетона захтеваних одређеном класом изложености и захтеваног ЕВ. Грубу процену величина неких DIs путем израза за коефицијенте (K_{water}, K_{gas} , итд.) у корелацији са просечном чврстоћом бетона на притисак (f_{cm}), даје се у МС 2010 [12]. У Холандији су развијене Смернице за *Service life design* [19] и [30], засноване на модификованој методологији *DuraCrete*, за случај корозије челика у бетону инициран хлоридима, класама изложености XD и XS и на вероватноћи депасивизације арматуре (10% за арматуру и 5% за челик за преднапрезање). Срачунате су величине коефицијента миграције јона хлорида ($D_{RCM,28}$), за различите подкласе изложености, врсте цемената и димензије заштитног слоја бетона, и за ЕВ од 80, 100 и 200 година (Сл. 13, Табела 1). Модел прорачуна је верификован на објектима инфраструктуре и у окружењу мора.



Слика 13. Минимална дебљина заштитног слоја бетона у функцији врсте везива за случај 10% вероватноће депасивизације арматуре, [19]

Табела 1. Максималне величине $D_{RCM,28}$ [$10^{-12}m^2/s$] у функцији различитих подкласа изложености и минималних дебљина заштитног слоја бетона за пројектовани ЕВ од 100 година [19] и [30]

Заштитини слој бетона [mm]		Максимална величина коефицијента $D_{RCM,28}$ [$10^{-12}m^2/s$]							
Арматура	Челик за преднапрезање	CEM I		CEM I + III 25-50% S		CEM III 50-80% S		CEM II/ B-V CEM I + 20-30% V	
		XD1	XS2	XD1	XS2	XD1	XS2	XD1	XS2
		XD2	XS3	XD2	XS3	XD2	XS3	XD2	XS3
35	45	3,0	1,5	2,0	1,0	2,0	1,0	6,5	5,5
40	50	5,5	2,0	4,0	1,5	4,0	1,5	12	10
45	55	8,5	3,5	6,0	2,5	6,0	2,5	18	15
50	60	12	5,0	9,0	3,5	8,5	3,5	26	22
55	65	17	7,0	12	5,0	12	5,0	36	30
60	70	22	9,0	16	6,5	15	6,5	47	39

У Француској је АФГЦ 2007.г., публиковао “Guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability indicators” [1].

У табели 2. (модификована табела) су дате граничне вредности D_{is} за неке класе изложености, захтевани ЕВ (50-100.г.) и врсте објеката (конструкција).

Табела 2. Граничне вредности DIs за одређене класе изложености [1,3].

Класе изложености	Захтевани ЕВ / Категорија (врста) конструкције							
	Захтевани ЕВ од 50 -100 година/ Зграде и Инжењерске конструкције				Захтевани ЕВ од 50 -100 година / Велике (Монументале) конструкције			
	P_{water}	K_{gas}	K_{liq}	$D_{app,mig}$	P_{water}	K_{gas}	K_{liq}	$D_{app,mig}$
	%	10^{-18} (m^2)	10^{-18} (m^2)	10^{-12} (m^2/s)	%	10^{-18} (m^2)	10^{-18} (m^2)	10^{-12} (m^2/s)
X0 i XC1	< 14	-	-	-	< 12	< 100	-	-
XC2	< 14	-	-	-	< 12	< 100	-	-
XC3	< 12	< 100	-	-	< 9	< 10	-	-
XC4	< 12	-	< 0,1		< 9	< 10	< 0,01	-
XS1	< 11	-	< 0,1	< 2	< 9	< 10	< 0,01	< 1
XS2	< 13	-	-	< 7	< 12	-	-	< 5
XS3	< 11	-	< 0,1	< 3	< 10	< 100	< 0,05	< 2

Где је:
 P_{water} -порозност бетона, према EN 12390-7:2001
 K_{liq} -водопропусност бетона у лабораторијским условима,према EN 12390-8:2001,
 K_{gas} -пропуснаост бетона за гасове, према EN 993-4:1995,
 $D_{app,mig}$ -дифузија хлорида (chloride migration test), према NT BUILD 492:1999

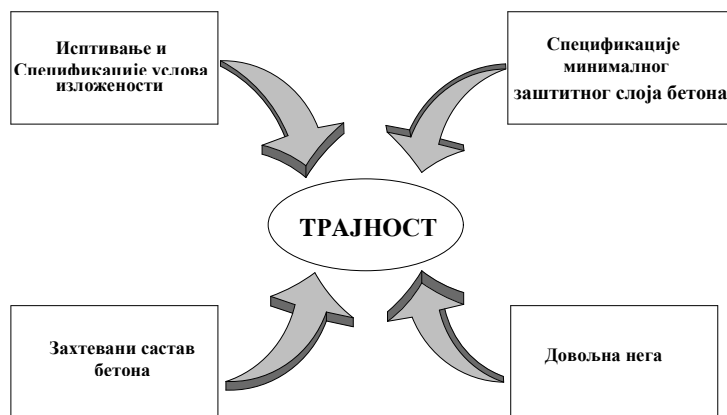
Више о истраживањима, смерницама и/или препорукама, методама и поступцима испитивања граничних величина DIs , дато је у литератури (нпр. [1,2,3,17, 26] и [28]).

6. БУДУЋЕ СМЕРНИЦЕ ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАЈНОСТИ ПРЕМА ЕУРОКОДУ (ЕС)

Према ЕС, приликом пројектовања БК поступци прорачуна се заснивају на провери ULS и SLS. Да би се обезбедила довољно трајна конструкција треба узети у обзир следеће: предвидљива употреба конструкције, очекивани услови окружења, састав, својства и понашање материјала и производа и тла, захтевани прорачунски критеријуми, избор конструкцијског система, облик елемената и обликовање детаља, квалитет израде и ниво контроле и посебне мере заштите, предвиђено одржавање током прорачунског СЛ.

Поред тога, захтева се да буду предузете одговарајуће мере управљања квалитетом, тј. дефинисање захтева поузданости, контроле у фазама прорачуна, извођења, експлоатације и одржавања.

Пројектовање трајности БК се заснива на EN 206, EN 1992, и EN 13670. Основни концепт пројектовања трајности је приказан на слици 14. Класе изложености, према EN 206 [7], приказане су у Табели 3.



Слика 14. Основне компоненте код пројектовања трајности БК, према EN 206

Табела 3. Класе и подкласе изложености, према EN 206 [7]

Класе	Опис услова (агресивности) окружења	Подкласе (i)
X0	Нема ризика од корозије или агресије	-
XC	Корозија проузкована карбонизацијом	XCi(i=1,2,3,4)
XD	Корозија проузкована хлоридима који не потичу из морске воде	XDi(i=1,2,3)
XS	Корозија проузкована хлоридима морске воде	XSi (i=1,2,3)
XF	Замрзавање/Одмрзавање (са или без агенаса за одмрзавање)	XF _i (i=1,2,3,4)
XA	Хемијска изложеност	XAi (i=1,2,3)

Захтеви за сваку подкласу изложености одређују се дозвољеном врстом и класом материјала (макс. w/c, мин. садржај цемента, мин. чврстоћа бетона на притисак и ако је потребно мин. садржај ваздуха у бетону), геометријским карактеристикама (мин. дебљина заштитног слоја бетона), и критеријумима одступања од пројектоване димензије.

Овај приступ пројектовању трајности нових БК је традиционалан и заснива се на правилу: „*Сматра се да задовољава*“ (енгл. „*Deemed-to-satisfy*“).

Истраживања остварена у области пројектовања трајности БК (*DuraCrete*, MC-SLD, MC 2010, и ISO 16204) нису укључена у актуелним правилима за пројектовање трајности БК, према *EC*.

Због тога, CEN TC104/SC1 и CEN TC250/SC2 су 2010.г., формирале заједничку радну групу (JWG) за ревизију и унапређење пројектовања трајности према EN 1992

и EN 206, засновану на развоју технологија и новијих знања, које треба финално завршити и усвојити 2020.г. [25].

Основни параметри будућих EN 206 и EN 1992 су: ревизија класе изложености; увођење класа отпорности бетона на излагање-*R* (за референтни ЕВ од 50 година) уз прихватљиве вредности индекса поузданости- β (који одговарају EN 1990-Анекс С, за SLS); правила која се односе на *R*; захтеви за минималном дебелином заштитног слоја бетона према класама изложености; интеракција ЕВ и *R*; захтеви за понашање у условима појаве прелина, дејства ААР, итд [25].

За класе изложености, захтевана правила ће се калибрирати помоћу најбољих, у пракси прихваћених, технологија и методологије развијене у *DuraCrete*, MC-SLD и ISO16204, у комбинацији са искуством и осматрањима постојећих БК, и која су примењива за више врста цемента, уз релевантне допуне. У EN 1990:2002, крај ЕВ је имплицитно дефинисан и није оперативна дефиниција за будуће пројектовање БК [20] и [25]. Захтеви за минимални заштитни слој бетона, у будућем EN 1992, ће се односити на почетак корозије, појаву прелина, итд., и користиће се у „*Механичком дизајну конструкција*“ [20]. Из статистичке дистрибуције дебелине заштитног слоја бетона, стопе карбонизације или коефицијента дифузије хлорида, и агресивности окружења, овај критеријум не искључује одређени ниво корозије на ограниченој количини (или %) арматуре. Промена критеријума или циљне поузданости ће бити прихватљива у условима изложености, где је период пропагације дуг (нпр. за класе Х0 и ХС1). Прелиминане класе *R*, дају се у Табели 4, према прелиминарним критеријумима из Табела 5. и 6 [25].

Табела 4. Дефинисање класа отпорности на изложеност [25]

Корозија арматуре						Детерирација бетона			
Carbonation Resistance Class (RC)			Chloride Resistance Class (RSD)			Freeze/thaw Resistance Class		Chemical Aggressiveness Class (for later)	
RC (Low)	RC (Medium)	RC (High)	RSD (Low)	RSD (Medium)	RSD (High)	RF (Medium)	RF (High)	RCA (Medium)	RCA (High)
Definition of class is 50-years of exposure to XC3 (Rh 65%) with 10%-probability of carbonation front exceeding (mm)			Definition of class is 50-years of exposure to XS2, with 10%-probability of chloride concentration exceeding 0,5% at depth (mm)			Definition of class is 50-years of exposure to XF4, with 10%-probability of scaling loss exceeding (kg/m ²)		Definition of class is 50-years of exposure to XA3, ground water with SO ² 4 6000mg/l and 10%-probability of loss exceeding (g/m ²)[??]	
40	30	20	75	60	45	10	2	?	?

Табела 5. Критеријум за класе отпорности на карбонизацију [25]

Стопа карбонизације (мм/године ^{0,5})	Класа отпорности на карбонизацију
≤ 2,83	RC20
2,83 ≤ 4,24	RC30
4,24 ≤ 5,66	RC40

Табела 6. Критеријуми за класе отпорности на хлориде (RSD) у зависности од иницијалног садржаја хлорида у складу са EN 206: 20xx, и EB од 50 година, (Daap (50)) [25]

$\frac{10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}}$, 3а, Cl ⁻ (0,40)	$\frac{10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}}$, 3а, Cl ⁻ (0,20)	$\frac{10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}}$, 3а, Cl ⁻ (0,10)	RSD
$D_{app}(50) \leq 0.13$	$D_{app}(50) \leq 0.19$	$D_{app}(50) \leq 0.22$	RSD45
$0.13 < D_{app}(50) \leq 0.22$	$0.19 < D_{app}(50) \leq 0.35$	$0.22 < D_{app}(50) \leq 0.39$	RSD60
$0.22 < D_{app}(50) \leq 0.35$	$0.35 < D_{app}(50) \leq 0.55$	$0.39 < D_{app}(50) \leq 0.61$	RSD75

Прелиминарни однос класа изложености, класа отпорности и захтева за мин. дебљину заштитног слоја бетона, **будуће генерације EN 1992 и EN 206, за EB од 50, 100 и 200 година**, приказан је табели 7 [25].

Табела 7. Минимална дебљина заштитног слоја бетона (препоручене вредности) за различите комбинације класа изложености, класе отпорности излагању и пројектовани EB [25]

Прелиминарне вредности		Минимална дебљина заштитног слоја бетона за EB од 50, 100 и 200 година. Препоручени вредности (прелиминарно)						
Класе изложености		RC20 (RCH) ² RSD45 (RSDH)			RC30 (RCM) ² RSD60 (RSDM)		RC40 (RCL) ² RSD75 (RSDL)	
	(S4) ³	50	100	200	50	100	50	100
X0 ¹	(10)	<i>C_{min,b}</i>	<i>C_{min,b}</i>	<i>C_{min,b}</i>	<i>C_{min,b}</i>	<i>C_{min,b}</i>	<i>C_{min,b}</i>	<i>C_{min,b}</i>
XC1	(15)	10	15	20	10	20	10	20
XC2	(25)	15	20	30	20	30	25	35
XC3	(25)	15	20	30	20	30	25	35
XC4	(30)	15	20	30	20	30	25	35
XD1	(35)	15	20	30	20	30	25	35
XS1	(35)	15	20	30	20	30	25	35
XD2	(40)	45	55	65	55	70	70	NA
XS3	(40)	45	55	65	55	70	70	NA
XD3	(45)	55	65	75	70	NA	80	NA
XS3	(45)	55	65	75	70	NA	80	NA

¹-За класу изложености X0 и за класу отпорности на карбонизацију RC X0 може се користити минимална дебљина заштитног слоја бетона, *C_{min,b}*
²-За затегнуту страну код греда заштитни слој се повећава за 5мм за класу отпорности RC20 и за 10 мм за класе отпорности RC20, RC30 и RC40 и за класе изложености XC2, XC3, XC4, XS1 и XD1.
³-Вредности за минимални заштитни слој бетона у EN1992-1-1:2004, су дати као "основни случај", за илустрацију (упоређење)

7. ЗАКЉУЧНЕ НАПОМЕНЕ

Актуелно пројектовање трајности БК према *ЕС* је традиционално, прорачун деградације конструкције током ЕВ није обухваћен и сматра се да ће се пројектоване перформансе одржати током ЕВ, путем активности управљања и одржавања, што није увек случај.

Овај приступ пројектовању трајности БК не обухвата објекте којима је захтевани ЕВ дужи од 50 година, затим утицај различитих врста цемената и минералних додатака, нове врсте материјала и БК и/или њених елемената и недовољно истражене и/или нове врсте агресивног окружења и др.

Овај приступ, није заснован на новијим истраживања код пројектовања трајности БК и показао се недовољним, нарочито у условима раста загађености окружења, које је убрзало деградацију БК, смањило ЕВ и увећало трошкове њиховог одржавања.

Данас се, за важније објекте (мостови, тунели, итд.) захтева ЕВ од 100, или више година, уз умерене трошкове одржавања, што подразумева приступ пројектовању БК ових објеката, који се заснива на перформансама и понашању, током ЕВ.

Пробабилитички модел пројектовању омогућује тачнију прогнозу понашања БК са дужим ЕВ, у фази је развоја кроз дефинисање ММ за преостале и недовољно обрађене ДП, и квантификацију параметара ММ и њихове статистичке обраде, што ће тек отворити могућност његове шире практичне примене.

У раду су размотрени неки актуелни модели, приступи и аспекти пројектовања БК према трајности, са акцентом на модел пројектовања према перформансама, засновано на DIs бетона. Приказане су неке Смерница за пројектовање БК према ЕВ које се примењују у неким државама у Европи.

Актуелна ревизија EN 1992 и EN 206 се заснива на новијим искуствима, технологијама, знањима и истраживањима (особито оним садржаним у DuraCrete, MC-SLD и ISO 16204). Очекује се да ће нова генерација EN 1992 и EN 206 унапредити пројектовање поузданијих БК са аспекта трајности и за захтевани ЕВ значајно дужи од 50-так година.

Захвалност: Рад је проистекао као део истраживања на пројекту ТР 36017 који финансира Министарство за просвету, науку и технолошки развој Србије. За подршку захвалан (Р. Фолић).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Baroghel-Bouny, V. et al.: *Concrete design for a given structure service life*, Scientific and technical document, Guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability indicators, AFGC, **2007**.
- [2] Beushausen, H.: *Principles of the performance-based approach for concrete durability*, RILEM International workshop on Performance-based specification and control of concrete durability, Zagreb, pp.341-350, **2014**.
- [3] Bjegović D., Stipanović Oslaković I., Serdar M.: *From Prescriptive Towards Performance-based Durability Design of Concrete: Workshop-Cement and Concrete for Africa* Berlin: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, pp. 50-58, **2011**. В

- [4] CEB-FIP «Model Code 1990», Thomas Telford, **1993**.
- [5] *Durability Design of Concrete Structures*, RILEM TC 130-CSL, Ed. A.Sarja&E.Vesikari, E&FN Spon, London, pp.165, **1996**.
- [6] *Durability rules for the waves*, Concrete, decmeber 2014, pp.17-19, www.concrete.org.uk, Evolving Concrete, 6-7May, www.evolving-concrete.org
- [7] EN 206-1:2000-Concrete-Specification, Performance, Production and conform, CEN, Brussels, **2000**.
- [8] EN 1990-Eurocode 0-Basis of structural design, CEN, Brussels, **2002**.
- [9] EN 1992-Eurocode 2-Design of Concrete Structures, CEN, Brussels, **2004**.
- [10] fib Bulletin 34: *Model code for service life design of concrete structures*, p.116, **2006**.
- [11] fib Bulletin 53: *Structural Concrete-Textbook on behaviour, design and performance*, Vol. 3, Lausanne, Switzerland, p.373. **2009**.
- [12] fib Bulletin 65: *Model Code 2010*, Vol. 1, Final draft, p.310, **2013**.
- [13] Folić R., Zenunović D.: *Durability problem of RC structures in Tuzla Industrial Zone - Two case studies*, Engineering Structures, Vol. 32, pp.1346-1360, **2010**.
- [14] Фолић Р., Зенуновић Д.: *Пројектовање бетонских конструкција са аспекта трајности и продужења експлоатационог века*, Конференција Градитељство и одрживи развој, ДИМК Србије, Београд, pp.183-216. **2009**.
- [15] Folić, R.: *Durability design of concrete structures-Part 1: Analysis fundamentals*, Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering, Vol. 7, No 1, pp.1-18, **2009**.
- [16] Folić, R, Zenunović D.: *Durability design of concrete structures-Part 2: Modelling and structural assessemnet*, Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering, Vol. 8, No 1, pp.45-66, **2010**.
- [17] GDOT Research Project No. RP 12-08, *Final Report Viability of Concrete Performance-Based Specification for Georgia DOT Projects*, Georgia Institute of Technology. Cw Georgia DOT, In cooperation with U.S. DOT FHWA, p.94, **2013**.
- [18] Grković, S., Folić,R.: *Some aspects of designing concrete structures based on durability*, First Scientific - Appliedd Confernece with International participation reinforced concrete and masonry structures-Theory and practice, p.10, Abstarct N°40, p.53, Sofia, 22-23 october, **2015**.
- [19] Gulikers J.: *The Netherlands An owner's perspective on probabilistic approaches for durability design*, Seminar fib Commission 5, Durability of Concrete Structures, School of engineering, University of Minho Guimarães, pp.43-65, **2014**.
- [20] Heland S.: ISO 16204, *Durability – Service Life Design of Concrete Structures, Durability aspects of flay ash and slag in concrete*, Workshop Proceeding from a Nordic Mini-seminar, Oslo, pp.15-21, **2012**.
- [21] Helland S.: *Design for service life: implementation of fib Model Code 2010 rules in the operational code ISO 16204*, Structural Concrete 14 (**2013**), No1, pp.10-18.
- [22] ISO 2394:1998-General principles on reliability for structures“.
- [23] ISO 13823:2008-General principles on the design of structures for durability.
- [24] ISO 16204:2012-Durability-Service life design of concrete structures.
- [25] JWG (JWG 250/104-N25) *Durability Report 2014, Durability Exposure Resistance Classes, a new system to specify durability in EN 206 and EN 1992*, Leivestad, Steinar, p.27, **2014**.

- [26] Kessy JG, Alexander MG, Beushausen H.: *Concrete durability standards: International trends and the South African context*. J. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 57(1), pp.47-58., **2015**.
- [27] Mayer T.F., Schiessl P.: *Life cycle management of concrete structures Pat I: Birth certificate*, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II/Alexander, M.G. Beushausen, H.D.; Dehn, F.; Moyo, P. London, UK, Taylor & Francis Group, **2008**.
- [28] Muigai R., Moyo P., Alexander M.: *Durability design of reinforced CS: a comparison of the use of durability indexes in the deemed-to-satisfy approach and the full-probabilistic approach*, Materials and Structures 45, pp.1233-1244. **2012**.
- [29] Rostman S.: *Service life design of concrete structures-an experience-based discipline becoming scientific*, Papers in structural engineering and materials-A Centenary Celebration, Department of Structural Engineering and Materials, TU of Denmark, pp. 131-150, **2000**.
- [30] van der Wegen G., Polder R., van Breugel K.: *Guideline for service life design of structural concrete-A performance based approach with regard to chloride induced corrosion*, HERON, Vol. 57, No. 3, pp. 153-167, **2012**.

ABOUT MODELLING AND DESIGNING CONCRETE STRUCTURES ACCORDING TO DURABILITY

Summary: *Almost to the end of the twentieth century durability was treated implicitly and its service life (SL) was not defined in technical regulations (codes) for the design of concrete structures (CS) which have been applied. Over time this approach has proved to be insufficient, especially in intensive growth environment pollution. In the current codes for the design of CS (e.g. EN, i.e. Eurocode - EC), durability is treated implicitly and most do not contain quantified guidance for the design of CS SL longer than 50 years. The SL is implicitly defined with no clear meaning, what is the end SL? It was considered that application of the provisions of these codes result in permanent CS service, and that they will achieve the required SL, which is often not the case. Experiences show that this approach fails to meet the requirements of durability, especially when the requested SL is significantly longer than 50 years (100 or more). Modern approach to the design of reliable CS is based on performance and behaviour during SL. Probabilistic approach (based on probability and reliability) design enables a more accurate forecast of the behaviour of CS during SL, but it is complex and the possibility of its wider practical application is in the developmental stage. Based on a review of literature and contemporary codes, the paper analyzed some models and approaches to the design of CS, according to durability. The emphasis is on the design of the performance, based on the indicators of durability of concrete, with current proposals for a revision of EN 1992 and EN 206, based on the experience gained and the latest research in this field.*

Keywords: *Designing concrete structures, Durability indicators, Service Life, Models, Reliability, Design, Deterioration processes, Performance, Reliability, Performance, Durability indicators*