

# PROJEKTOVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA PREMA UPOTREBNOM VEKU: DEO 1 – OSNOVNI POJMOVI TRAJNOSTI I POUZDANOSTI

Ivan IGNJATOVIĆ  
Snežana MARINKOVIĆ

PREGLEDNI RAD  
UDK: 624.012.3/.4:69.03.001.18 = 861

## 1 UVOD

Sadašnji način projektovanja prema trajnosti betonskih konstrukcija je u velikoj meri iskustven. Aktuelnim domaćim propisom (BAB 87, [1]), definisane su veličine bazirane samo na kvalitativnim analizama trajnosti betona kao što su minimalna debljina zaštitnog sloja i maksimalna širina prslina, dok se u evropskom standardu za beton (EN1992: 2004, [4]) pored navedenih veličina, uzima u obzir još i maksimalni vodocementni faktor, minimalna količina cementa i minimalni sadržaj uvučenog vazduha. Sa ovakvim pristupom konstrukcija će imati prihvatljivo dug (najmanje 50 godina, prema EN 1992: 2004), ali ne i normirani životni vek. Pravila kojima se u oba pomenuta propisa definišu parametri trajnosti, zasnovana su na pojednostavljenoj klasifikaciji sredine u kojoj se konstrukcija nalazi. Neka pravila su neodgovarajuća u pojedinim agresivnim sredinama, dok su neka previše rigorozna u slabo agresivnom okruženju. U praksi, projektant bira vrednosti iz tabela bez znanja o tome šta je u osnovi tih brojeva. Dakle, tradicionalni koncept projektovanja vrši se bez kvantifikovanja stvarnih uslova izloženosti, bez normiranog upotrebnoг veka, bez znanja o tome koja granična stanja mogu da budu dostignuta i bez sigurne baze za iskustvene preporuke. Zahtevi koji se tiču trajnosti daju se implicitno i uopšte, trajnost se smatra za deo projekta od sekundarnog značaja.

Da bi se unapredilo stanje, postavljen je novi pristup projektovanju konstrukcija s obzirom na njihov upotrebni vek (engl. *service life design* – skraćeno SLD), pristup koji predstavlja osnovu za *fib*-ov novi Model propisa [7].

### Adresa autora:

Ivan Ignjatović, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija; e-mail: ivani@imk.grf.bg.ac.yu  
Snežana Marinković, vanredni profesor, dr, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija;  
e-mail: sneska@imk.grf.bg.ac.yu

Međunarodno udruženje za beton - *fib* i organizacije iz kojih je potekao, CEB i FIP, imaju dugu tradiciju u tretiranju aspekata trajnosti i projektovanju prema zahtevima za trajnost. 2002. godine ustanovljena je *fib*-ova radna grupa sa zadatkom da razvije Model propisa za probabilistički pristup projektovanju s obzirom na upotrebni vek konstrukcije. To će pružiti mogućnost da se projektovanje prema zahtevima trajnosti bazira na pouzdanosti i ponašanju konstrukcije, tj. da se vrši na sličan način kao i konvencionalni proračun nosivosti. Ovo ne znači da se predlaže radikalno nova metoda proračuna betonskih konstrukcija, već da se u pogledu trajnosti primenjuje ista pouzdanost kao u pogledu nosivosti.

Prvi korak u projektovanju je kvantifikovanje mehanizma deterioracije (oštećenja koje propagira kroz vreme), modelima koji opisuju taj proces fizički i/ili hemijski sa dovoljnom tačnošću. Deterioracioni modeli služe da opišu propagaciju određenog degradacionog procesa kroz vreme. Dovoljna tačnost znači da model treba biti verifikovan laboratorijskim eksperimentima i proverama u praksi, tako da su srednje vrednosti i odstupanje parametara otpornosti materijala poznate i mogu se uzeti u obzir u modelu. Slično, moraju postojati modeli koji opisuju dejstva spoljašnje sredine sa statistički definisanim parametrima (temperatura, relativna vlažnost, pojava pljuskova...).

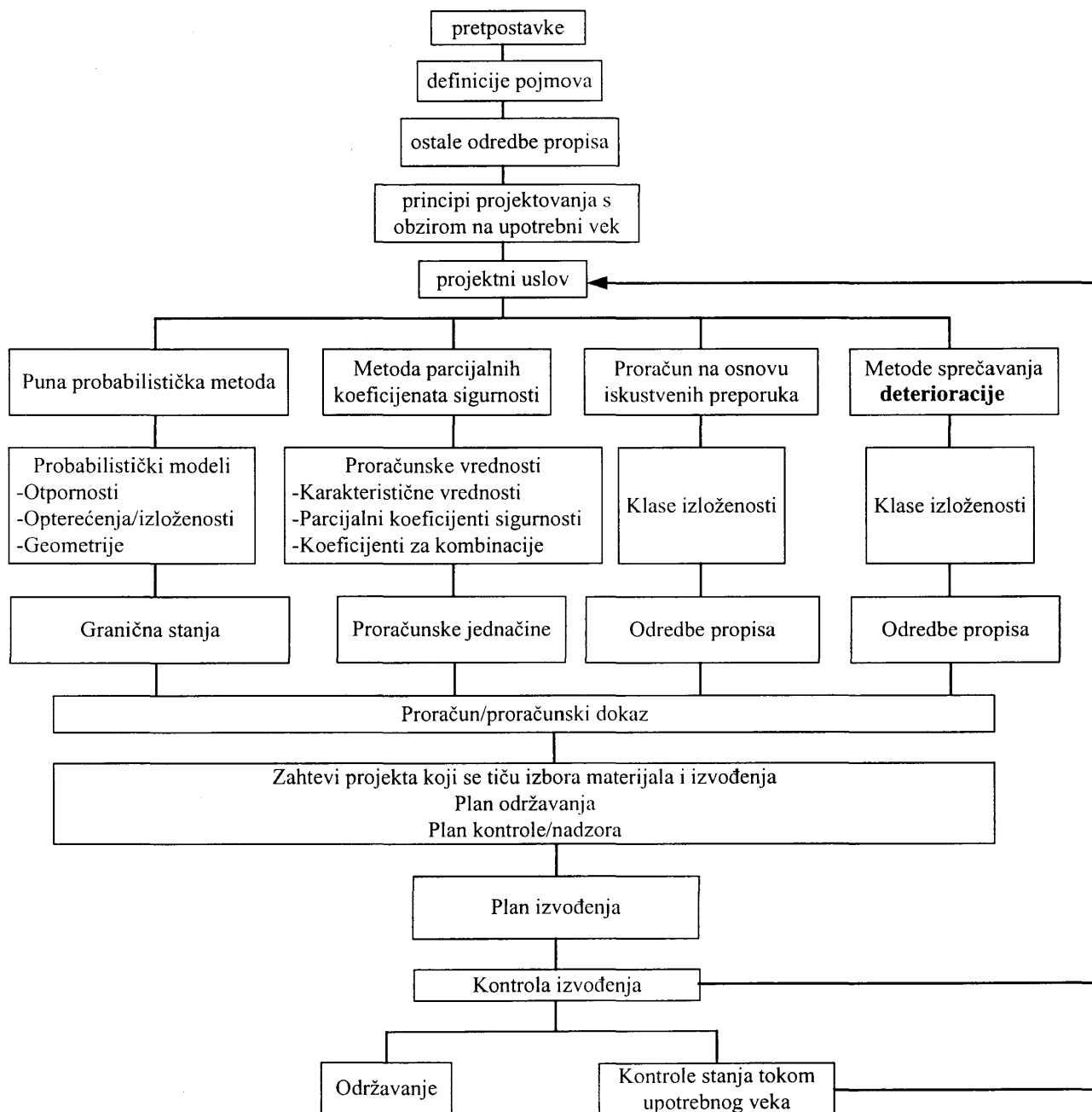
Drugi korak je definisanje graničnog stanja prema kome treba projektovati konstrukciju, a koje zavisi od razmatranog deterioracionog mehanizma. Moguća granična stanja su: depasivizacija armature usled karbonizacije, prsline usled korozije armature, odljuskavanje zaštitnog sloja betona usled korozije armature, lom betonskog preseka usled gubitka poprečnog preseka armature, odljuskavanje površine betona usled ciklusa smrzavanja i odmrzavanja itd.

Treći korak je definisanje kom tipu graničnog stanja pripada ono koje je izabrano u drugom koraku, tj. da li se radi o graničnom stanju upotrebljivosti (engl. *serviceability limit state* - skraćeno SLS) ili graničnom stanju nosivosti (engl. *ultimate limit state* – skraćeno ULS). Na primer,

depasivizacija armature će se klasifikovati kao SLS ukoliko nema posledica na sigurnost konstrukcije od loma, ako dođe do depasivizacije. Ako se prslina i oljuskavanje betona usled korozije armature javljaju u zonama ankerovanja-sidrenja armature, u kojima nema potrebne poprečne armature, to može dovesti do loma konstrukcije, pa se u ovom slučaju, pojava prslina smatra graničnim stanjem nosivosti (ULS). Ukoliko pojava prslina ne utiče na kapacitet nosivosti konstrukcije, može se definisati kao SLS. U skladu sa izabranim tipom graničnog stanja bira se indeks pouzdanosti (engl. *reliability index*)  $\beta$ , odnosno koeficijenti sigurnosti, na način koji je detaljno objašnjen u poglavlju 6.2.

Četvrti korak je proračunski dokaz odgovarajućeg graničnog stanja koji se, prema novom konceptu projektovanja s obzirom na upotrebnog vek konstrukcije, može izvesti na dva različita načina. Prvi način podrazumeva proračun konstrukcije u kome razmatrani mehanizam deterioracije predstavlja spoljašnje dejstvo na konstrukciju (slično opterećenju u proračunu nosivosti), pri čemu se za izvođenje dokaza mogu koristiti tri metode proračuna:

- potpuna probablistička metoda,
- metod parcijalnih koeficijenata sigurnosti i
- metoda bazirana na iskustvenim preporukama.



Slika 1. Shema toka projektovanja prema upotrebnom veku betonske konstrukcije, prema [5]

Ukoliko se koristi potpuna probabilistička metoda treba dokazati da je verovatnoća dostizanja odgovarajućeg graničnog stanja manja od izabrane, ciljne verovatnoće definisane indeksom pouzdanosti  $\beta$ . Ako se koristi metod parcijalnih koeficijenata sigurnosti, treba dokazati da je proračunska vrednost otpornosti konstrukcije ili njenog dela veća od proračunske vrednosti dejstva. Treća metoda je najbližnja trenutnom načinu dokazivanja trajnosti konstrukcije sadržanom u zahtevima propisa. Ona se zasniva na iskustvenim principima i većina pravila ne potiču iz jasnih fizičkih i hemijskih modela, već se izvode na osnovu praktičnog iskustva i rezultata merenja koji su se potvrdili u praksi. Ovakvi zahtevi ubuduće se moraju kalibrirati i prilagoditi nekom od pristupa zasnovanih na verovatnoći.

Drugi način je sprečavanje formiranja deterioracionog procesa, što se može postići izolovanjem konstrukcije od dejstva spoljašnje sredine, korišćenjem nereaktivnih materijala (nerđajućeg čelika ili agregata koji ne reaguje sa alkalijama), kontrolisanjem vlažnosti u blizini konstrukcije (održavanje ispod kritičnog nivoa) itd. Ovo se smatra četvrtom metodom izvođenja proračunskih dokaza.

Kompletan tok projektovanja prema upotrebnom veku konstrukcije, koji je prethodno sažeto naveden u četiri koraka, prikazan je shematski na slici 1.

## 2 UPOTREBNI VEK I TRAJNOST KONSTRUKCIJE

### 2.1 Upotrebnii vek

Projektovanje s obzirom na upotrebnii vek konstrukcije koje je opisano u ovom radu može se primeniti kod projektovanja novih objekata, za ažuriranje upotrebnog veka postojeće konstrukcije čije su stvarne karakteristike materijala poznate i interakcija konstrukcije i okoline se može kvantifikovati, kao i za proračun preostalog upotrebnog veka konstrukcije. Proračunski upotrebnii vek je usvojeni vremenski period tokom koga se konstrukcija ili njen deo koristi za osnovnu namenu sa prihvatljivim održavanjem, bez potrebe za velikim popravkama. Proračunski upotrebnii vek se određuje:

- definisanjem relevantnog graničnog stanja,
- vremenskim periodom izraženim u godinama i
- stepenom pouzdanosti da se neće dostići granično stanje tokom tog perioda.

U literaturi se mogu naći još neki pojmovi vezani za upotrebnii vek, pa će oni ovde biti navedeni i ukratko objašnjeni:

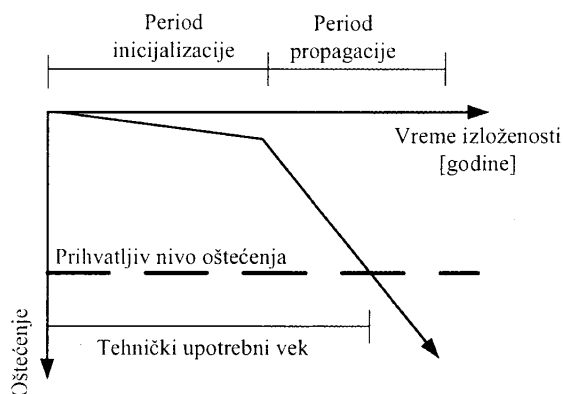
- tehnički upotrebnii vek (engl. *technical service life*) – vreme tokom koga je konstrukcija u upotrebi dok se ne dostigne određeni tip graničnog stanja,
- funkcionalni upotrebnii vek (engl. *functional service life*) – vreme tokom koga je konstrukcija u upotrebi dok ne postane funkcionalno zastarela usled promena u zahtevima (promena namene prostora, potreba za drugačijim prilazima...) i
- ekonomski upotrebnii vek (engl. *economic service life*) – vreme tokom koga je konstrukcija u upotrebi dok njena zamena ne postane ekonomski isplativija od troškova održavanja.

U daljem tekstu će se koristiti samo termin upotrebnii vek, pri čemu se podrazumeva da se radi o tehničkom upotrebnom veku.

Definicija prihvatljivog upotrebnog veka zavisi od tipa konstrukcije koji se razmatra. U većini zemalja se smatra recimo, da je za mostove 100 godina prihvatljivo trajanje upotrebnog veka, dok je taj period za konstrukcije u blizini mora 40 godina. Standard ISO 2394 (*General principals on reliability for structures*) na koji se standard EN 1990 [3] poziva kada govori o pouzdanosti, daje vrednosti proračunskog upotrebnog veka za pet tipova konstrukcija (tabela 1).

Tipični upotrebnii vek, za različite konstrukcije, prema preporuci *fib*-a [6] je:

- konstrukcije u blizini mora - 35 godina,
- konstrukcije koje se projektuju prema Modelu propisa 90 i Evrokodu 2 – 50 godina,
- mostovi, tuneli, luke – 100 godina i
- nasipi protiv olujnih talasa – 200 godina.



Slika 2. Upotrebnii vek betonske konstrukcije – dvofazno modeliranje deterioracionog procesa [5]

Tabela 1. Kategorizacija objekata s obzirom na upotrebnii vek konstrukcije prema EN 1990: 2002 [3]

Kategorija	Proračunski upotrebnii vek [god]	Primeri
1	10	Privremeni objekti
2	10 do 25	Zamenjivi delovi konstrukcije, nosači, ležišta
3	15 do 30	Poljoprivredni i drugi slični objekti
4	50	Zgrade i slične konstrukcije
5	100 i više	Monumentalne zgrade ili objekti, mostovi

Kao kraj upotrebnog veka za noseće elemente konstrukcije obično se definiše kraj perioda inicijalizacije (vidi poglavlje 4), tj. identifikovanje kritičnog mehanizma deterioracije, recimo početak korozije armature. Izuzetak mogu biti robusni delovi luka ili pristaništa gde upotrebnog veka obuhvata i deo perioda propagacije, slika 2 [5]. U ovom slučaju se dozvoljava korozija u izvesnoj meri, s pretpostavkom da sigurnost i funkcionalnost nisu ugroženi zbog početne faze korozije, prslina ili oljuskavanja u manjoj meri. Još jedna od situacija kada deo perioda propagacije pripada upotrebnom veku je definisan stav vlasnika objekta o prihvatljivom nivou oštećenja.

Da bi se dostigao upotrebnog veka prema kome je projektovana konstrukcija, svi koji učestvuju u životnom ciklusu konstrukcije moraju da daju izvestan doprinos. Vlasnik (investitor) treba da definiše svoje želje i zahteve. Tu se pre svega misli na ulogu pri usaglašavanju kriterijuma upotrebljivosti kao i realnu procenu upotrebnog veka konstrukcije u odnosu na planirani nivo investicija (slika 1). Jasno je da duži upotrebnog veka rezultira višim nivoom finansijskih ulaganja. Ukoliko je vlasnik istovremeno i korisnik, njegova je i obaveza održavanja objekta i pregleda u fiksnim intervalima, sve u cilju da se upotrebnog veka dostigne bez nepredviđenih velikih troškova. Naravno, vlasnik ima pravo i obavezu da kontroliše kvalitet izvedenog objekta. Projektant priprema projekat na osnovu zahteva investitora i zakonskih propisa, dok izvođač treba da materijalizuje zamisao vlasnika imajući u vidu zahteve projektanta.

## 2.2 Trajnost konstrukcije

Smatra se da konstrukcija ima odgovarajuću trajnost u svom okruženju u onoj meri u kojoj je prihvatljivo ispunjenje njenih funkcija [5]. Mogućnost da se kvantifikuje ispunjavanje relevantnih funkcija konstrukcije je osnova metodologije projektovanja prema trajnosti zasnovane na ponašanju konstrukcije (eng. *performance based durability design methodology*). Dakle, koncept trajnosti je povezan sa funkcionalnim zahtevima koji se izražavaju kao minimalna ili maksimalna vrednost

određene karakteristike konstrukcije i grupe odgovarajućih osnovnih parametara. Nekoliko primera prikazano je u tabeli 2.

Svi osnovni parametri su vremenski zavisne veličine. To dovodi do zaključka da je upotrebnog veka konstrukcije vreme tokom koga konstrukcija ispunjava sve funkcionalne zahteve. Dakle, projektovanje s obzirom na upotrebnog veka podrazumeva da projektant bira osnovne parametre da bi ispunio funkcionalne zahteve za unapred definisani vremenski period. Time će biti obezbeđena odgovarajuća otpornost konstrukcije na štetna dejstva sredine.

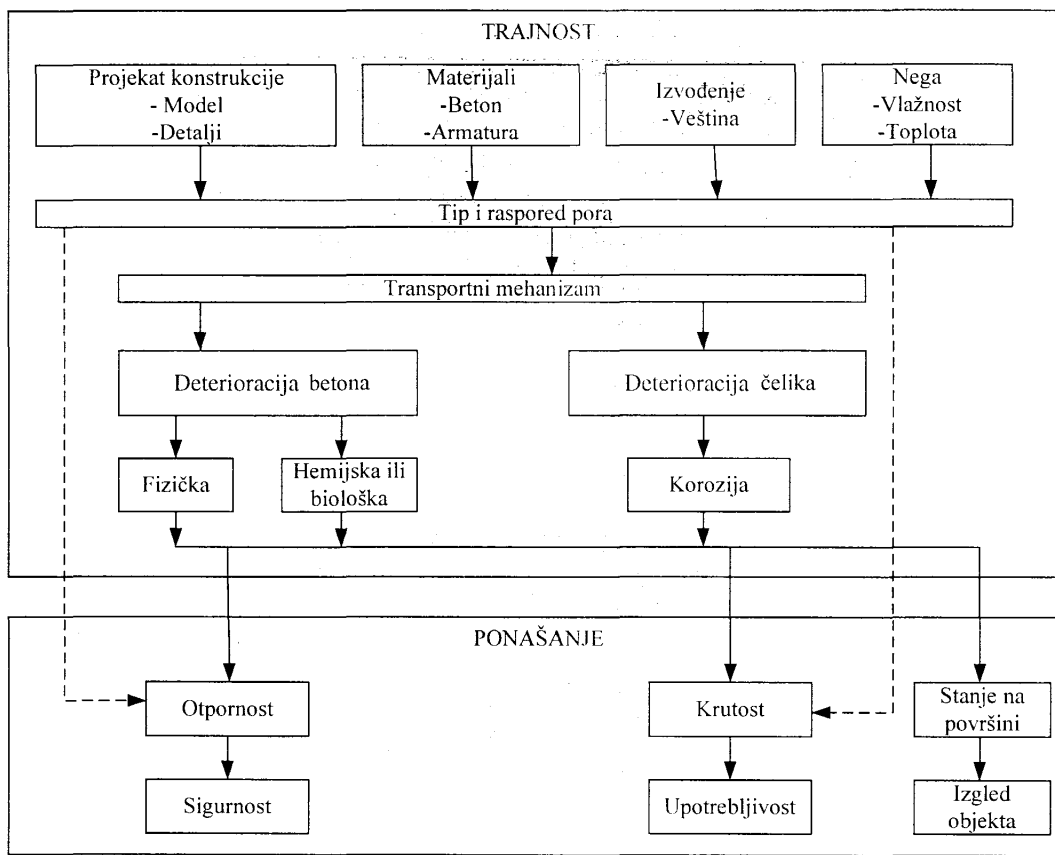
Trajnost nije lako kvantifikovati i zato se ne koristi u praksi kao operativni termin. Ona zavisi kako od pomenutih parametara koji zavise od izbora projektanta, tako i od kvaliteta izvršenja preostalih operacija na putu ka izgradnji objekta, kao što su izbor materijala, izvođenje i nega betona. Kvalitet betona kao materijala, u smislu trajnosti, odnosi se prvenstveno na tip i raspored pora, jer se na taj način određuje mogući mehanizam provođenja kroz beton i omogućuje interakcija sredine i betona. Takva interakcija određuje potencijalne mehanizme deterioracije. Ukoliko se oni razvijaju, utiču na otpornost pa samim tim i na sigurnost konstrukcije, na upotrebljivost, stanje na površini betona, kao i na globalni izgled objekta, koji takođe može biti jedan od funkcionalnih zahteva. Povezanost trajnosti i ponašanja konstrukcije šematski je prikazana na slici 3.

Trajnost konstrukcije u njenom okruženju treba da bude takva da je njena upotreba moguća tokom proračunskog upotrebnog veka. To se može postići na jedan od sledećih načina ili kombinacijom nekih od njih:

- projektovanjem zaštitnih sistema,
- korišćenjem materijala koji, ako se dobro održavaju, neće gubiti na kvalitetu tokom vremena,
- davanjem takvih dimenzija da je trošenje materijala tokom projektnog upotrebnog veka kompenzovano (npr. usvajanje veće količine armature kako bi i nakon što deo poprečnog preseka korodira, ostalo dovoljno za obezbeđivanje nosivosti elementa) i
- biranjem kraćeg životnog veka elemenata konstrukcije koji se mogu zameniti jednom ili više puta tokom projektnog upotrebnog veka.

Tabela 2. Trajnost izražena kao funkcionalni zahtev i njemu odgovarajući parametri [5]

Funkcionalni zahtev	Odgovarajući osnovni parametri
minimalni kapacitet nosivosti	čvrstoća betona i čelika, dubina korozije, dubina oljuskavog dela zaštitnog sloja
maksimalna prihvatljiva deformacija	modul elastičnosti, skupljanje, tečenje, temperaturna promena, sleganja
maksimalna propustljivost za gasove i tečne supstance	propustljivost betona, kapilarnost, difuzija, vlažina i položaj prslina



Slika 3. Veza trajnosti i ponašanja betonskih konstrukcija [1]

### 3 MEHANIZMI DETERIORACIJE

Metodologija projektovanja s obzirom na upotrebnog vek konstrukcije zasnovana je na dovoljno realističnim modelima okruženja i materijala, modelima kojima se simuliraju buduća ponašanja betonske konstrukcije. Za formiranje pouzdanih modela najvažniji korak je poznavanje deterioracionih procesa i razumevanje mehanizama provođenja tečnih supstanci i gasova kroz beton. Podjednako važno je i razumeti kako se oštećenje razvija (propagira kroz vreme) i u kojoj meri. Trajnost betona često se ocenjuje stepenom oštećenja koje je beton pretrpeo usled hemijskih reakcija. Da bi do reakcije došlo neophodan je transport jona ili molekula agresivne materije iz spoljašnje sredine do reaktivne supstance u betonu. Agresivna supstanca se može nalaziti i u samom betonu, ali je opet neophodan njen transport do reaktivne supstance kako bi došlo do reakcije. Ukoliko nema transporta, nema ni reakcije.

Deterioracioni mehanizmi se, generalno, mogu klasifikovati u dve grupe :

1) Korozija armature i korozija kablova za prethodno naprezanje – rezultat ovog procesa su prsline u betonu i smanjivanje kapaciteta nosivosti usled redukcije poprečnog preseka armature ili kablova za prethodno naprezanje; glavni uzrok korozije je smanjen kvalitet betona u zaštitnom sloju usled:

- karbonizacije zaštitnog sloja,
- dejstva hlorida i

- kombinacije oba procesa.

2) Oštećenja usled deterioracije betona – razlozi potiču ili od sastava betonske mešavine ili od dejstva sredine; iako su mehanizmi oštećenja mnogobrojni i ne do kraja razumljivi, u većini zemalja se tretiraju sledeći:

- ciklusi smrzavanja i odmrzavanja,
- alkalno- agregatna reakcija (AAR),
- reakcija sulfata sa aluminatima u betonu,
- odloženo formiranje etringita i
- mikro- biološko dejstvo.

Predlogom Modela propisa [7] tretirani su sledeći deterioracioni mehanizmi:

- korozija armature usled karbonizacije,
- korozija armature usled penetracije hlorida,
- oštećenja betona usled dejstva mraza i
- oštećenja betona usled simultanog dejstva mraza i soli protiv formiranja leda.

Za ove mehanizme postoje modeli koji su prihvaćeni širom sveta. Ostali mehanizmi deterioracije, na primer, alkalno agregatna reakcija i penetracija sulfata, nisu obuhvaćeni ovim predlogom propisa jer ne postoje široko prihvaćeni modeli koji opisuju mehanizme ovih dejstava. Takođe, predlogom Modela propisa nije obuhvaćen ni zamor usled dinamičkog opterećenja kao i simultano dejstvo dinamičkog opterećenja i korozije koje dovodi do vremenske degradacije materijala – deterioracije.

Za svaki proces treba utvrditi najznačajnije parametre, a onda ih kvantifikovati. Ovo je ponekad veoma

težak zadatak s obzirom da se kvantifikacija zasniva na laboratorijskim ispitivanjima i posmatranjima na licu mesta. Činjenica je da se malo zna o pozadini posmatranja, naročito o posmatranjima *in situ*, što dovodi do velikog rasipanja rezultata prilikom kvantifikacije parametara u modelu deterioracionog procesa.

Svako od pobrojanih deterioracionih mehanizama izaziva određeno granično stanje, a svako granično stanje, u zavisnosti od primenjene metode, može imati jedan od četiri proračunska dokaza (poglavlje 1). U drugom delu rada će za izabrani deterioracioni mehanizam (prvo koroziju usled karbonizacije, a potom i koroziju usled prodiranja hlorida), biti prikazan proračunski dokaz za izabrano granično stanje-depasivizacija armature.

### 3.1 Korozija armature

Kao posledica korozije armature može nastupiti više graničnih stanja u zavisnosti od trajanja perioda izloženosti betona deterioracionom procesu - depasivizacija armature, prsline usled korozije armature, oljuskavanje zaštitnog sloja usled korozije armature i lom usled gubitka poprečnog preseka armature.

Mehanizam depasivizacije armature usko je povezan sa karbonizacijom betona i praktično predstavlja rezultat potpune karbonizacije zaštitnog sloja betona. Armatura smeštena u betonskom preseku zaštićena je od korozije elektro-hemijskom pasivizacijom koja se spontano razvija tokom ugradnje čelika u beton. Čelične šipke su obavijene tankim filmom oksida gvožđa koji čuva armaturu pasivnom u odnosu na koroziju, dok je okolni beton visoko alkalni, sa PH faktorom od 12 do 13. Usled reakcije kalcijum hidroksida sa ugljen dioksidom iz vazduha nastaje kalcijum karbonat ( $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ) čime se značajno smanjuje PH faktor betona (ispod 9), a pomenuti proces propagira kroz zaštitni sloj tokom vremena. Kada karbonizacija zahvati sloj filma koji obavija armaturu, kaže se da je armatura depasivizovana, odnosno, stvoreni su preduslovi za njenu koroziju [8].

Hloridni joni, koji potiču od morske vode ili od soli protiv smrzavanja, mogu da kroz pore prodru u unutrašnjost betonskog elementa. Ovaj proces se odvija ili putem difuzije kroz pore koje su delimično ili potpuno ispunjene vodom ili putem kapilarne sukcije vode koja sadrži hloride. Cement ima izvestan hemijski i fizički kapacitet za vezivanje hloridnih jona, ali se ne mogu svi vezati. Uvek mora postojati ravnoteža između vezanih i slobodnih hloridnih jona u vodi koja ispunjava pore betona. Za koroziju armature značajni su samo slobodni joni. Važno je znati da se nakon karbonizacije betona vezani hloridni joni ponovo oslobađaju, tako da se povećava koncentracija hlorida u vodi pora, a samim tim raste i rizik od korozije armature. Kritična koncentracija hlorida pri kojoj se dešava korozija armature zavisi od mnogih parametara i ne može se usvojiti kao konstantna veličina u opštem slučaju. Još jedan od izvora hloridnih jona može biti i hloridima kontaminiran agregat ili voda za pravljenje betonske smeše. Interesantno je da se i pored potencijalne opasnosti od korozije, često kao akceleratori procesa očvršćavanja betona koriste smeše na bazi kalcijum hlorida.

Korozija armature se razvija kada je razoren pasivizacioni sloj na delu armaturene šipke u prisustvu dovoljne količine vlage i kiseonika, što je slučaj sa konstrukcijama na otvorenom prostoru. Formiranjem rđe i produkata rđe koji su izrazito ekspanzivni (povećavaju zapreminu), mogu se razviti izuzetni pritisci u betonu koji razaraju zaštitni sloj. Dalji razvoj korozije omogućen je elektrolitičkim procesom između anode (depasivizovane zone) i katode (pasivizovane deo armature). Beton koji obavija armaturu mora biti dovoljne vlažnosti kako bi joni mogli da se kreću između katode i anode, odnosno, električna otpornost betona mora biti dovoljno mala.

Kada se rđa razvija u prisustvu male količine kiseonika, proces je spor i može se desiti da produkti rđe postepeno ispunjavaju pore betona ne uzrokujući unutrašnje pritiske koji bi doveli do pojave prsline i oljuskavanja betona. U takvim, specijalnim slučajevima, korozija armature se razvija bez vidljivih manifestacija pa se nakon smanjivanja poprečnog preseka armature ispod kritične vrednosti dešava iznenadni lom elementa konstrukcija.

Imajući prethodno u vidu, može se zaključiti da se korozija neće desiti niti u suvom betonu (gde je elektrolitički proces ometen ili je električna otpornost suviše velika), niti u vodom zasićenom betonu (gde ne može doći do penetracije kiseonika), čak iako je razoren sloj feroksida koji pasivizuje armaturu. Najveći stepen korozije se dešava u površinskim slojevima betona koji su izloženi čestim promenama vlažnosti (sušenju i vlaženju).

### 3.2 Oštećenja usled deterioracije betona

Transformacija vode u led praćena je povećanjem zapremine za približno 9%. U slučaju potpuno vodom ispunjenih pora ovo će dovesti do pucanja betona. Da bi se sprečilo oštećenje usled smrzavanja potrebno je da postoje pore bez vode koje bi kompenzovale povećanje zapremine. Kako je difuzioni proces tokom smrzavanja vode delimično nepovratan, sa povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećava se i ispunjenost pora vodom. Dakle, ukoliko između ciklusa ne postoji mogućnost sušenja betona, samo je pitanje broja ciklusa neophodnih za izazivanje oštećenja betona usled ispunjenosti pora vodom. Granična vrednost sadržaja vode koja uzrokuje oštećenje definiše se kritičnim stepenom zasićenja (engl. *critical degree of saturation*).

Primena sredstava protiv smrzavanja na površinu betona pokrivenu ledom izaziva trenutni pad temperature (temperaturni šok) na površini betona tokom topljenja leda. Temperaturna razlika na površini i u unutrašnjosti betona dovodi stanje unutrašnjih naprezanja do nivoa koji može da izazove prsline u zaštitnom sloju betona. Agregat koji nije otporan na mraz apsorbira vodu koja pri prelasku u led ekspandira i razara cementnu pastu. Tipični indikatori takvih procesa su lokalna oljuskavanja oko krupnijih zrna agregata.

#### 4 FAZE DEGRADACIJE BETONA I GRANIČNA STANJA NA PRIMERU MEHANIZMA KOROZIJE ARMATURE

Degradacija betona se obično modelira kao proces koji se sastoji iz dva dela- faza inicijalizacije (engl. *initiation stage*) i faze propagacije (engl. *proragation stage*) (slika 4). Period inicijalizacije je period tokom koga se dešava interakcija između betona i okoline i završava se kada armatura postane depasivizovana (tačka 1, slika 4). To se može desiti usled karbonizacije betona najmanje do dubine na kojoj se nalazi šipka armature ili ako beton na mestu armature sadrži kritičnu vrednost koncentracije hlorida. To je kraj inicijalnog perioda i korozija je (pod određenim uslovima) moguća.

Tokom perioda propagacije depasivizovana armatura je direktno pogođena korozijom, redukuje se poprečni presek šipki armature, a usled ekspandirajućeg dejstva produkata korozije pojavljuju se prsline u betonu (tačka 2, slika 4). Širina prsline zavisi od stepena korozije, odnosa debljine zaštitnog sloja i prečnika šipke armature, kvaliteta betona (čvrstoće na zatezanje) i pozicije šipke [2]. Korozija koja se nastavlja nakon pojave prsline vodi do oljuskavanja zaštitnog sloja betona (tačka 3, slika 4). Obično ovaj proces počinje kada širina prsline dostigne vrednost od 1 mm. Oljuskavanje se može manifestovati u vidu lokalnih trougaonih delova betona duž svake korodirale šipke ili dolazi do interakcije sila cepanja iz nekoliko šipki, pri čemu dolazi do otpadanja betona sa veće površine. Otpadanje betona iz zaštitnog sloja obično se smatra neprihvatljivim stanjem konstrukcije, iako dostizanje ovog graničnog stanja ne znači nužno i kolaps konstrukcije. U tom smislu, smatra se za granično stanje upotrebljivosti. Ipak, s obzirom da oljuskavanje betona može da ugrozi ljudske živote (na primer, betonske grede iznad bazena), ponekad se smatra i graničnim stanjem nosivosti. Dalje, gubitak poprečnog preseka armature dovodi do redukcije kapaciteta nosivosti i konačno kolapsa konstrukcije (tačka 4, slika 4). Granično stanje nosivosti (ULS) se definiše relevantnim oblikom loma preseka i može biti dostignuto u odnosu na prsline

i/ili oljuskavanje u zonama sidrenja armature (engl. *bond failure*) ili nedopustivo velikim gubitkom poprečnog preseka.

Za ocenjivanje konstrukcije prema određenom događaju (graničnom stanju), izvestan period vremena propagacije može biti dodat periodu inicijalizacije (poglavlje 2.1) i izvršiti upoređenje sa vremenskim periodom koji nas interesuje, a obično je to upotrebnog vek konstrukcije.

$$t_{SL} = t_{ini} + t_{prop,i}$$

gde su:

$t_{SL}$  – proračunski upotrebnog vek [godine]

$t_{ini}$  – vremenski period inicijalizacije [godine]

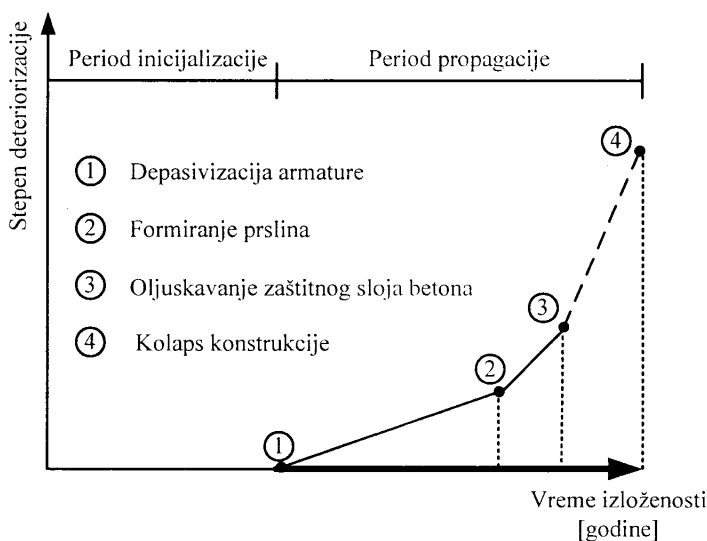
$t_{prop,i}$  – vremenski period propagacije dok se štetna pojava dešava (prsline, oljuskavanje, lom) [godine]

#### 5 UTICAJ PRSLINA NA DETERIORACIONI PROCES I UPOTREBNI VEK KONSTRUKCIJE

Prsline su neizbežne u armiranobetonskim konstrukcijama koje su izložene savijanju, smicanju, torziji ili zatezanju. Sama pojava prsline ne znači istovremeno da je ugrožena trajnost ili upotrebljivost konstrukcije. Proračun prsline (širina i međusobno rastojanje), odnosno kontrola graničnog stanja prsline, treba obavljati kao nezavistan od proračuna prema trajnosti. Sve prsline mogu se klasifikovati u tri grupe:

- prsline od opterećenja,
- termičke i prsline od plastičnog skupljanja betona i
- mikro prsline, tj. prsline koje se pojavljuju u cementnoj pasti tokom hidratacije i postupnog očvršćavanja betona.

Prema važećem evropskom standardu EN1992:2004 [4], prsline se ograničavaju na veličinu koja neće nepovoljno uticati na ispravno funkcionisanje, izgled ili trajnost konstrukcije. U zavisnosti od klase izloženosti preporučene su vrednosti za maksimalne širine prsline (tabela 7.1N, [4]), iz čega se može zaključiti da veličina



Slika 4. Korozija armature kao deterioracioni proces i relevantna granična stanja

prslina utiče na deterioracione procese (povećava ih ili ubrzava). Postupajući striktno po zahtevima standarda, projektant najčešće bira minimalne debljine zaštitnih slojeva i koristi tanje šipke armature na manjem rastojanju. Paradoksalno zvuči, ali usvajanje većih zaštitnih slojeva betona dobrog kvaliteta i debljih šipki armature na većem rastojanju iako dovodi do povećanja širine prslina na površini betona, znači istovremeno i veću otpornost konstrukcije na delovanje deterioracionih procesa [7]. Doprinos trajnosti na ovaj način projektovanog zaštitnog sloja je veći od ispunjenja tradicionalnog zahteva koji se tiče širine prslina.

Prema novom predlogu Modela propisa [7], pouzdanost isprskalog armiranobetonskog elementa mora biti najmanje jednaka pouzdanosti odgovarajućeg neisprskalog elementa, odnosno moraju imati isti upotrební vek pod istim uslovima sredine. Ukoliko se posmatra korozija armature usled karbonizacije isprskalog betonskog elementa, postupak proračuna je isti kao za neisprskao element ukoliko su zadovoljeni uslovi standarda (EN 1992: 2004, [4]) koji se tiču širine prslina i kvaliteta ugrađenog betona u zaštitni sloj. Ispunjenje pomenutih zahteva praktično obezbeđuje upotrební vek od najmanje 50 godina bez primene dodatnih mera zaštite betona.

Stepen korozije u zoni prslina izuzetno zavisi od mikro klimatskih uslova na površini betona, kao i od orijentacije te površine. U slučaju, recimo, ravne (horizontalne) površine betona koja ima prsline i koja je izložena dejstvu hlorida, neophodno je sprovesti zaštitne mere kako bi se obezbedio upotrební vek duži od deset godina. Takav je slučaj sa podovima garaža ili sličnih prostora u kojima se koristi so za odmrzavanje leda. Kao mere zaštite koriste se obloge i premazi koji premošćavaju prsline. Za vertikalne površine i horizontalne površine koje su izložene dejstvu hlorida sa donje strane, pri čemu nema pojave da hloridima zagađena voda prodire kroz prsline, visok kvalitet betona u zaštitnom sloju, odgovarajuća debljina zaštitnog sloja i uobičajeno ograničenje širine prslina, treba da obezbede dovoljno dug upotrební vek konstrukcije (duži od 50 god), bez dodatnih mera zaštite [7]. Visok kvalitet betona podrazumeva nisku propustljivost, vodocementni faktor  $w/c \leq 0,5$ , dok uobičajeno ograničenje prslina znači pre svega ispunjenje zahteva standarda, što se obično svodi na  $w_{k,cal} \leq 0,3$  mm. Prema eksperimentalnim istraživanjima Takewaka-a [10], prsline čija je širina manja od 0,05 mm vrlo malo utiču na difuzioni proces hlorida sa površine betona, dok prsline sa širinama većim od 0,1 mm značajno utiču na difuziju hloridnih jona.

Iz prethodnog se može zaključiti da uticaj prslina na trajnost betona izuzetno varira i da nije isti za različite deterioracione procese. Podatak da konstrukcija u hloridno agresivnoj sredini ne može, uz dovoljni stepen pouzdanosti, da ima upotrební vek duži od (samo) deset godina bez dodatnih zaštitnih mera, od izuzetne je važnosti kako za projektanta tako i za investitora (vlasnika) koji bi trebao na osnovu ekonomske analize da odluči o nivou inicijalnih ulaganja. Za svaki od procesa treba analizirati efekte pojave prslina na površini koja je izložena dejstvu sredine, što nas ponovo navodi na prethodno iznet stav da je za novi koncept proračuna s obzirom na trajnost, od izuzetne važnosti razumevanje degradacionih procesa i njihovo modeliranje.

## 6 POUZDANOST KONSTRUKCIJE PRI PROJEKTOVANJU S OBZIROM NA UPOTREBNI VEK

### 6.1 Pouzdanost konstrukcije

Često se koncept pouzdanosti posmatra na jednostran način, crno-belo – konstrukcija jeste ili nije pouzdana. U skladu sa pristupom, pozitivna ocena o stanju konstrukcije bi bila – lom se neće nikada desiti, što je previše pojednostavljeno tumačenje. Svaka konstrukcija može doživeti lom (samo je pitanje sa kolikom verovatnoćom), pa se termin apsolutne pouzdanosti ne može primeniti u oblasti konstrukcija. Postoji veliki broj definicija pouzdanosti, a ovde će biti navedena ona iz standarda ISO 2394: Opšti principi pouzdanosti za zgrade [9]. Dakle, pouzdanost je sposobnost konstrukcije da zadovolji postavljene zahteve pod specifičnim uslovima tokom upotrebnog veka, prema kome je projektovana. U kvantitativnom smislu, pouzdanost se može definisati kao dopuna verovatnoći loma. Slična definicija nalazi se i u EN 1990: 2002 [3], uz dodatak da se pouzdanost odnosi na kapacitet nosivosti, upotrebljivost i trajnost konstrukcije. U opštem slučaju, mogu se definisati različiti stepeni pouzdanosti za nosivost, upotrebljivost i trajnost konstrukcije ili njenih delova.

### 6.2 Verovatnoća loma i indeks pouzdanosti

Verovatnoća loma  $P_f$  (engl. *probability of failure*) je najznačajniji pojam koji se koristi u oblasti pouzdanosti konstrukcija. Da bi se objasnio ovaj pojam neophodno je postaviti izvesne hipoteze. Recimo da se ponašanje konstrukcije može opisati grupom promenljivih  $X = [X_1, \dots, X_n]$  koje predstavljaju dejstva, mehaničke karakteristike materijala, geometrijske podatke i nesigurnosti modela. Usvojeno je da se granično stanje konstrukcije definiše pomoću funkcije graničnog stanja,  $Z(X)$ . Ova funkcija se definiše tako, da je za željeno (bezbedno) stanje konstrukcije  $Z(X) \geq 0$ , dok je za neželjeno stanje (lom)  $Z(X) < 0$ . Za granična stanja nosivosti i upotrebljivosti konstrukcije, verovatnoća loma se izražava kao:

$$P_f = P\{Z(X) < 0\} \quad (1)$$

Ukoliko su osnovne promenljive ( $X_1, \dots, X_n$ ) vremenski nezavisne veličine, opisane odgovarajućim probablističkim modelima, verovatnoća loma  $P_f$  se može sračunati pomoću izraza:

$$P_f = \int_{Z(X) < 0} \phi_X(x) dx \quad (2)$$

gde je  $\phi(x)$  funkcija gustine verovatnoće (engl. *probability density function*).

Verovatnoća loma se može izraziti i preko indeksa pouzdanosti  $\beta$  definisanog izrazom:

$$\beta = -\Phi_U^{-1}(P_f) \quad (3)$$

gde je  $\Phi_U^{-1}$  inverzna standardizovana funkcija normalne raspodele. Dakle, verovatnoća loma i indeks pouzdanosti služe da se kvantifikuje ista stvar – pouzdanost konstrukcije, a međusobna povezanost je definisana prethodnim izrazom, odnosno tabelom 3.



EN1990: 2002 definiše tri klase konstrukcija prema pouzdanosti - RC1, RC2, RC3, kojima odgovaraju preporučeni minimalni indeksi pouzdanosti, za referentne periode od 1 i 50 godina (tabela 4, [3]).

Dati indeksi pouzdanosti se odnose samo na granična stanja nosivosti. Vrednosti ciljnih indeksa pouzdanosti za granično stanje upotrebljivosti i za iste referentne periode, u standardu EN 1990: 2002 dati su samo za klasu pouzdanosti RC2, (tabela 5). Ove vrednosti su važne s obzirom da u jednom od prvih članova EN 1992: 2004 stoji da se može smatrati da proračun sa parcijalnim koeficijentima sigurnosti datim u EN 1992: 2004 i parcijalnim koeficijentima sigurnosti datim u aneksima EN1990: 2002, obezbeđuje konstrukciju čija je klasa pouzdanosti RC2. Dakle, parcijalni koeficijenti sigurnosti definisani pomenutim standardima kalibrisani su prema indeksima pouzdanosti datim u tabeli 4.

Treba naglasiti da parovi vrednosti indeksa  $\beta$ , definisanih za različite referentne periode, odgovaraju istom stepenu pouzdanosti. Referentni period je vremenski period na koji se odnose podaci o promenljivim  $X_1, \dots, X_n$  iz modela deterioracije, što je značajno prilikom izvođenja proračunskog dokaza. Na

primer, ukoliko su srednje ili karakteristične vrednosti nekog dejstva određene statističkom obradom podataka sakupljenih u toku jedne godine (referentni period 1 godina), ciljni indeksi pouzdanosti moraju biti veći nego u slučaju kada se podaci odnose na period od 50 godina. Dakle, različiti referentni periodi, različiti od proračunskog upotrebnog veka, mogu se koristiti radi postizanja istog nivoa pouzdanosti. Što je kraći referentni period, treba obezbediti viši indeks pouzdanosti  $\beta$ , radi postizanja iste klase pouzdanosti.

### 6.3 Klasifikacija s obzirom na pouzdanost konstrukcije

Postoje različiti nivoi pouzdanosti, a izbor odgovarajućeg nivoa za posmatranu konstrukciju dominantno zavisi od načina dostizanja graničnog stanja (nosivosti ili upotrebljivosti) i moguće posledice loma u pogledu rizika života i povreda ljudi. U saglasnosti sa zahtevima EN 1990: 2002 [3] i Predloga modela propisa [7] uvedene su klase konstrukcija koje se baziraju na prihvatljivim posledicama loma i izloženosti hazardu radova na izvođenju objekta (tabela 6).

Tabela 3. Zavisnost verovatnoće loma  $P_f$  i indeksa pouzdanosti  $\beta$

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	1.28	2.32	3.09	3.72	4.27	4.75	5.20

Tabela 4. Ciljni indeksi pouzdanosti za različite klase pouzdanosti, za granično stanje nosivosti [3]

Klasa prema pouzdanosti	Minimalne vrednosti za $\beta$	
	ref. period 1 god.	ref. period 50 god.
RC1	5.2	4.3
RC2	4.7	3.8
RC3	5.2	3.3

Tabela 5. Ciljni indeksi pouzdanosti prema EN 1990 [3]

Granično stanje	Ciljni indeks pouzdanosti, $\beta$	
	ref. period 1 god.	ref. period 50 god.
Nosivost	4.7	3.8
Upotrebljivost	2.9	1.5

Tabela 6. Definicija klase prema posledicama [3]

Klase posledica	Opis	Primeri zgrada ili građevinskih radova
CC3	Teške posledice usled gubitka ljudskih života ili velike ekonomske i socijalne i posledice po okolinu	Velika stajališta javne zgrade gde bi posledice loma bile teške (koncertne dvorane)
CC2	Prihvatljive posledice usled gubitka ljudskih života, ekonomske i posledice po okolinu	Poslovne i stambene zgrade, javne zgrade gde su posledice loma srednje
CC1	Blage posledice usled gubitka ljudskih života i male ekonomske i socijalne i posledice po okolinu	Poljoprivredni objekti gde ljudi obično ne ulaze (skladišta)

U zavisnosti od tipa konstrukcije i odluka donošenih tokom projektovanja, pojedini elementi konstrukcije mogu se projektovati u istoj, višoj ili nižoj klasi posledica u odnosu na globalnu konstrukciju.

Klasifikacija pouzdanosti se može izvršiti i preko indeksa pouzdanosti  $\beta$  koji uzima u obzir prihvaćene ili usvojene statističke varijacije u efektima dejstava ili otpornosti i nesigurnosti modela, poglavlje 6.2. Tri klase pouzdanosti (RC1, RC2, RC3) povezane su sa tri klase prema posledicama (CC1, CC2, CC3), tako da višoj klasi prema posledicama odgovara viša klasa pouzdanosti (CC1 → RC1, CC2 → RC2, CC3 → RC3).

U tabeli 7 su za različite mehanizme korozije armature, klase izloženosti prema EN 1992: 2004 i klase pouzdanosti preporučeni minimalni indeksi pouzdanosti [7]. Uočljivo je da granično stanje depasivizacije armature (SLS) ima isti, relativno nizak indeks pouzdanosti za sve klase pouzdanosti (čak i niži od preporuka EN 1990: 2002, tabela 5). To može dovesti do niže pouzdanosti za granično stanje nosivosti (lom usled gubitka prijanjanja zbog oljuskavanja betona, lom usled gubitka poprečnog preseka armature itd.) nego što se obično zahteva standardom EN 1990: 2002. Zašto?

Ako se dostigne SLS, za šta postoji visoka verovatnoća ako se projektuje za nizak nivo pouzda-

nosti, tada je veća verovatnoća za dostizanje ULS-a, tj. pouzdanost konstrukcije za granična stanja nosivosti je niža. Kao posledica dostizanja graničnog stanja upotrebljivosti (SLS) – depasivizacija armature, javlja se potreba za posebnim merama zaštite, održavanjem ili popravkom konstrukcije, kako bi bio zadržan isti stepen pouzdanosti za ULS. Ukoliko se ovakvo stanje ne može izbeći (npr. pojava korozije), a predložene mere se ne mogu sprovesti na posmatranom elementu ili celoj konstrukciji, potrebno je predvideti dodatnu količinu armature ("žrtvovati" poprečni presek) i/ili specijalno obrađene detalje kako bi se sprečio lom usled gubitka prijanjanja između čelika i betona. Procentualni gubitak poprečnog preseka armature usled korozije zavisi od naprezanja kome je armatura izložena i Predlog Modela propisa definiše različite klase robusnosti (engl. *robustness class*) za tri karakteristična slučaja (tabela 8).

Iako se radi o grubim procenama, vrednost za klasu ROC 3 od 25% gubitka ukazuje na neophodnost da se poveća nivo pouzdanosti za granično stanje depasivizacije armature, kako se ne bi dovelo u pitanje zadovoljenje indeksa pouzdanosti za granično stanje nosivosti. Što je veća pouzdanost u odnosu na depasivizaciju armature, manja je potreba za dodatnom armaturom.

Tabela 7. Preporučene minimalne vrednosti indeksa pouzdanosti za proračun prema upotrebnom veku konstrukcije [7]

Klase izloženosti- EC2	Opis	Klasa pouzdanosti	SLS	ULS
			Depasivizacija	Lom
XC3	Korozija izazvana karbonizacijom	RC1	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	3.7 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
		RC2	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	4.2 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
		RC3	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	4.4 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
XD3	Korozija izazvana hloridima iz vazduha, soli protiv smrzavanja	RC1	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	3.7 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
		RC2	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	4.2 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
		RC3	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	4.4 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
XS3	Korozija izazvana hloridima iz morske vode	RC1	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	3.7 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
		RC2	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	4.2 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )
		RC3	1.3 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )	4.4 ( $p_f \approx 10^{-1}$ )

Tabela 8. Klase robusnosti prema [7]

Klase robusnosti	Karakteristike	Karakteristična vrednost gubitka poprečnog preseka (gruba procena) $\Delta A_s$ [%]
ROC 3	zategnuta armatura van zona sidrenja i preklapanja	25
ROC 2	smičuća armatura, zone oslanjanja i sidrenja sa poprečnom armaturom za utezanje preseka	15
ROC 1	zone oslanjanja i sidrenja bez poprečne armature za utezanje	5

## 7 PRORAČUNSKI DOKAZI

Prilikom izvođenja proračunskih dokaza mogu se koristiti četiri različite metode, pri čemu se kao četvrta metoda smatraju postupci za sprečavanje deterioracije (poglavlje 1):

- probabilistički pristup,
- poluprobabilistički pristup (proračun pomoću parcijalnih koeficijenata sigurnosti),
- iskustvene preporuke (engl. *deemed-to-satisfy rules*) i
- postupci za sprečavanje deterioracije.

Preduslov za primenu potpune probabilističke metode je postojanje korektnog modela koji opisuje deterioracioni proces, kao i definisanje svih parametara modela. Svaki parametar koji predstavlja stohastičku veličinu, treba da bude predstavljen pomoću odgovarajuće funkcije raspodele. Naredni korak metode je definisanje jednačine graničnog stanja u kojoj su grupisane vrednosti uticaja od dejstava  $E$  i nosivosti  $R$ . Suština probabilističke metode sadržana je u uslovu jednačine, da verovatnoća događaja  $R < E$  bude manja od neke ciljne vrednosti  $p_0$ .

$$p = p_{dec} = p\{R - E < 0\} < p_0 \quad (4)$$

Ciljna vrednost verovatnoće pomenutog događaja  $p_0$ , može biti izražena i preko indeksa pouzdanosti  $\beta$  (poglavlje 6.2). Određivanje vrednosti uticaja od dejstava i/ili nosivosti primenom potpune probabilističke metode vrlo često predstavlja zametan posao, a proces se uslošnjava sa povećanjem broja parametara (stohastičkih veličina) koji određuju razmatrani uticaj. To je osnovni razlog što se ova metoda koristi samo kod izuzetno značajnih objekata, a probabilistička priroda problema u većini slučajeva tretira kroz primenu parcijalnih koeficijenata sigurnosti.

Metoda parcijalnih koeficijenata sigurnosti, definisana u EN 1990:2002 [3] kao jedna od metoda za dokazivanje graničnih stanja nosivosti i upotrebljivosti, može se koristiti i za proračunske dokaze graničnih stanja pri projektovanju konstrukcija prema upotrebnom veku. Kada se primenjuje ova metoda, mora da bude proračunski dokazano da, za sve relevantne proračunske situacije, ni jedno relevantno granično stanje nije prekoračeno. U metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti primenjuju se isti modeli (fizički, hemijski...) kao u probabilističkoj metodi, ali se koriste proračunske vrednosti dejstava, uticaja od dejstava i nosivosti, koje sadrže parcijalne koeficijente sigurnosti. Metoda parcijalnih koeficijenata sigurnosti uključuje pojednostavljenja na strani sigurnosti, u odnosu na potpunu probabilističku metodu. Iako primena potpune probabilističke metode može dovesti do ekonomičnijih rešenja, ona iziskuje značajno veće troškove za kvantifikaciju ulaznih parametara i obradu podataka.

Parcijalni koeficijenti sigurnosti uzimaju u obzir:

- mogućnosti neželjenih odstupanja vrednosti dejstava od reprezentativnih vrednosti,
  - mogućnosti neželjenih odstupanja vrednosti karakteristika materijala i proizvoda od reprezentativnih vrednosti i
  - nepouzdanosti modela i dimenzionalne varijacije.
- Proračunske vrednosti dejstava date su kao:

$$F_{dl} = \gamma_f \cdot F_{rep} \quad (5)$$

gde je:

- $F_{rep}$  - reprezentativna vrednost dejstva i
- $\gamma_f$  - parcijalni koeficijent sigurnosti za dejstva.

Proračunske vrednosti svojstava materijala ili proizvoda se izražavaju kao:

$$R_{dl} = R_k / \gamma_m \quad (6)$$

ili, ako se uzmu u obzir nepouzdanosti proračunskog modela:

$$R_{dl} = R_k / \gamma_M = R_k / (\gamma_m \cdot \gamma_{Rdl}) \quad (7)$$

gde je:

- $R_k$  - karakteristična vrednost nosivosti,
- $\gamma_m$  - parcijalni koeficijent sigurnosti za materijal,
- $\gamma_{Rdl}$  - parcijalni koeficijent sigurnosti kojim se obuhvataju nepouzdanosti u modelu nosivosti i geometrijska odstupanja, ukoliko nisu eksplicitno modelirana i
- $\gamma_M$  - parcijalni koeficijent sigurnosti za materijal, kojim se obuhvataju i nepouzdanosti modela i geometrijska odstupanja.

Karakteristične vrednosti dejstava za projektovanje s obzirom na upotrebnii vek konstrukcije mogu biti zasnovane na podacima obezbeđenim za određeni projekat, na osnovu iskustva ili iz relevantne literature. Karakteristike materijala treba da budu određene iz ispitivanja izvedenih pod specifičnim uslovima. Kada je neophodno, primenjuju se faktori konverzije koji prevode rezultate ispitivanja u laboratoriji u vrednosti koje se mogu usvojiti kao karakteristike materijala ili proizvoda u realnoj konstrukciji.

Proračunske vrednosti geometrijskih podataka, kao što su dimenzije elemenata koje se koriste za određivanje uticaja od dejstava i/ili nosivosti, mogu da budu predstavljene preko nominalnih vrednosti. Kada su uticaji odstupanja geometrijskih podataka (na primer, netačnost u apliciranju opterećenja ili položaju oslonaca), značajni za pouzdanost konstrukcije (na primer, kod uticaja drugog reda), proračunske vrednosti geometrijskih podataka moraju biti definisane sa:

$$a_{dl} = a_{nom} \pm \Delta a \quad (8)$$

gde je  $\Delta a$  veličina kojom se uzima u obzir:

- mogućnost nepovoljnih odstupanja od karakterističnih ili nominalnih vrednosti i
- kumulativni uticaj istovremene pojave nekoliko geometrijskih odstupanja.

Evropski standard ENV13670-1 ("Execution of concrete structures") definiše dozvoljena geometrijska odstupanja [7]. Ukoliko su projektom predviđene stroge tolerancije, pretpostavke iz projekta treba da se potvrde merenjima na izvedenoj konstrukciji ili elementu.

U **fib**-ovom predlogu Modela propisa predlaže se novi koncept proračuna konstrukcija s obzirom na trajnost i upotrebnii vek konstrukcije, ali ne isključuje prethodni konvencionalni pristup baziran uglavnom na iskustvima iz dugogodišnje prakse ili na statističkoj obradi eksperimentalnih podataka. Empirijske metode su niz pravila za dimenzionisanje, izbor materijala i proizvoda, procedure izvođenja, koje obezbeđuju da tražena pouzdanost da se neće dostići relevantno

granično stanje tokom proračunskog upotrebno­g veka nije prekoračena, kada se betonska konstrukcija ili element izloži proračunskim dejstvima.

Kao četvrta metoda za izvođenje proračunskog dokaza smatraju se postupci za sprečavanje deterioracije čija je suština ne u proračunu i kvantifikaciji parametara koji utiču na degradacioni proces (karbonizaciju, koroziju), već u merama zaštite betonskog elementa i stvaranju uslova u kojima beton neće biti izložen agresivnom dejstvu sredine. Mere zaštite podrazumevaju upotrebu fasada, membrana, korišćenja nereaktivnih materijala (nerđajući čelik) ili primenu elektrohemijske metode za sprečavanje korozije armature.

## 8 ZAKLJUČAK

Iako je trajnost betonskih konstrukcija bila predmet istraživanja nekoliko decenija, tačni fizički mehanizmi za svaki deterioracioni proces i moguće interakcije između njih, još uvek nisu objašnjeni na zadovoljavajući način. Da bi se procenila trajnost armiranobetonskih konstrukcija izloženih različitim agresivnim sredinama, značajna in-situ posmatranja i laboratorijski eksperimenti su sprovedeni širom sveta, ali ipak nedostaju odgovarajuće kvantitativne analize i procedure za numeričke simulacije. Pod takvim uslovima, konvencionalni statički proračun usredsređuje se na zadovoljavanje kriterijuma nosivosti sa koeficijentima sigurnosti koji garantuju upotrebljivost i zahteve sigurnosti. Što se tiče zahteva za trajnošću, predlažu se samo konceptualne i iskustvene veličine bazirane na kvalitativnim analizama trajnosti betona kao što su kontrolisanje sastava mešavine, debljina zaštitnog sloja, čvrstoća na pritisak i sl., kako bi sprečile potencijalnu deterioraciju. Sa isticanjem značaja minimizacije koštanja celokupnog životnog ciklusa betonskih konstrukcija, građevinski inženjeri čine napore da reformišu konvencionalni pristup projektovanju i usvoje projektovanje prema upotrebno­m veku kao pristup u kome se spoljašnja sredina uzima u obzir i trajnosti se pristupa kvantitativno.

Do sada, jedinstvena definicija trajnosti nije usaglašena. Bez izlaganja deterioracionoj sredini, betonska konstrukcija bi bila večno trajna. Ipak, dva neizbežna faktora ozbiljno utiču na trajnost armiranobetonskih konstrukcija. Prvi, brojne inicijalne greške koje postoje u betonu, uključujući razne mikropore i mikroprslina koje čine beton osetljivim na razne deterioracione procese. Drugo, kapacitet otpornosti betonske konstrukcije se smanjuje tokom vremena, konstrukcija propada postepeno dok je izložena okolnoj agresivnoj sredini. Dakle, trajnost betona je kontrolisana istovremeno unutrašnjom

## 9 LITERATURA

- [1] BAB 87, Knjiga 2 Prilozi, Građevinska Knjiga, 1991, str.3-111.
- [2] Edvardsen C., Mohr L.: DuraCrete – A guideline for durability-based design of concrete structures, Brite-EuRam Programme (Report No. BE95-1347, 2000), str. 10
- [3] EN 1990: 2002, Evrokod 0: *Osnove proračuna konstrukcija*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2002, str. 87

mikrostrukturom i izloženošću agresivnoj sredini. Upotrebni vek betonske konstrukcije je dostignut kada je kapacitet otpornosti pod datim uslovima opao do te mere da se projektni zahtevi ne mogu ispuniti.

Deterioracioni procesi se mogu klasifikovati u tri glavne grupe: fizički, hemijski i mehanički procesi. Fizički procesi deteriorizacije su temperaturne varijacije sa termičkim skupljanjima i širenjima, varijacije relativne vlažnosti, skupljanje usled sušenja i širenje usled vlaženja, ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, habanje i abrazija. Hemijski deterioracioni procesi su korozija armature unutar betonskog preseka, penetracija hlorida, karbonizacija, nagrizanje kiseline, sulfata, reakcija alkali­ja i agregata itd. Mehanički deterioracioni procesi se sastoje od spoljašnjih uticaja i opterećenja, zamora, različitih sleganja fundamenata, seizmičke aktivnosti, itd. Svi ovi procesi mogu menjati poroznost i propustljivost betona, prouzrokovati ili pogoršavati različite greške u materijalu, smanjujući integritet i robusnost betonske konstrukcije kao i kapacitet nosivosti.

Znanja o trajnosti betonskih konstrukcija potiču uglavnom iz posmatranja izgrađenih objekata. Teško je eksperimentalno simulirati uticaj nekoliko povezanih deterioracionih procesa u laboratoriji. Fizički i hemijski deterioracioni procesi su usko povezani i međusobno pojačavaju dejstvo, tako da izdvajanje jednog procesa iz globalnog dejstva postaje nemoguće. Gore pomenuta klasifikacija deterioracionih procesa ima smisla samo da bi razjasnila posebno svaki deterioracioni mehanizam.

Bez ikakvih deterioracionih procesa, običan beton ima visoku poroznost i nisku propustljivost. Treba naglasiti da celokupna povezanost mreže mikropora kontroliše karakteristike betona koje se odnose na prenosni mehanizam, a ne poroznost betona. Drugim rečima, samo međusobno povezane mikropore i mikroprslina u betonu mogu učestvovati u propustljivosti betona i njegovoj osetljivosti na deterioraciju. Sa padom trajnosti, sve više raste broj mikropora koje se povezuju i konačno prave mrežu pora i prslina. Kao rezultat, propustljivost betona je povećana, a procesi deterioracije se ubrzavaju.

Predstoji dug put ka definitivnom uspostavljanju probabilističkog pristupa projektovanju prema upotrebno­m veku betonskih konstrukcija. Prvi korak biće donošenje novog Modela propisa, ali se istovremeno mora raditi na definisanju proračunskih modela za preostale, do sada nedovoljno obrađene deterioracione procese. Naročito veliki posao je kvantifikacija parametara za pomenute modele i njihova statistička obrada, čime bi se formirala baza podataka i otvorila mogućnost široke primene metoda zasnovanih na verovatnoći i pouzdanosti.

- [4] EN 1992: 2004, Evrokod 2: *Proračun betonskih konstrukcija*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2006, str. 237
- [5] **fib** bulletin 3: *Structural Concrete, Volume 3*, International Federation for Structural Concrete **fib**, Lausanne, Switzerland, 1999, str.269.
- [6] **fib** bulletin 17: *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*, International Federation for Structural Concrete **fib**, Lausanne, Switzerland, 2002, str. 174.

- [7] *fib* Task Group 5.6: *Model Code for Service Life Design*, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland, 2006, str. 116
- [8] Folić R., Lađinović Đ., Some aspects of durability analysis of concrete structures, Proceedings, 11<sup>th</sup> International Symposium of MASE, Ohrid, Makedonija, 2005, str.205-217.
- [9] Implementation of Eurocodes- Handbook 2: Reliability backgrounds, Leonardo da Vinci Pilot Project, 2005, str. 254
- [10] Koji T., Yamaguchi T., Maeda S.: Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures due to chloride Attack, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 1, No. 2, July 2003, str. 139-146
- [11] Marinković S., Ignjatović I.: Savremeni koncept projektovanja i građenja betonskih konstrukcija, Građevinski kalendar 2008, Vol.40, Beograd, 2007, str. 181-233
- [12] NordTest Build 492: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordisk Innovations Center, 1999, str. 8
- [13] Schiessl P., Gehlen C., Kapteina G.: Assessment and service life updating of existing tunnels, First International Symposium: "Safe & Reliable Tunnels? Innovative European Achievements", Prague 2004, str.189-198.

## REZIME

### PROJEKTOVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA PREMA UPOTREBNOM VEKU: DEO 1 – OSNOVNI POJMOVI TRAJNOSTI I POUZDANOSTI

Ivan IGNJATOVIĆ  
Snežana MARINKOVIĆ

U radu je prikazan nov način tretiranja aspekata trajnosti betonskih konstrukcija i projektovanja s obzirom na trajnost, tj. koncept projektovanja betonskih konstrukcija s obzirom na njihov upotrebni vek. Ovaj koncept se bazira na pouzdanosti, slično kao i konvencionalni način projektovanja konstrukcija prema nosivosti. Osnovni preduslov je poznavanje deterioracionih mehanizama kako bi mogli da se formiraju fizički i hemijski modeli za simuliranje mehanizama oštećenja. Promenljive u modelima treba da budu kvantifikovane i statistički opisane kako bi bilo moguće da se nekim od probablističkih pristupa izvedu proračunski dokazi razmatranih graničnih stanja.

**Ključne reči:** betonske konstrukcije, trajnost, upotrebni vek, pouzdanost, deterioracioni mehanizam, probablistički pristup

## SUMMARY

### SERVICE LIFE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES: PART 1 – DURABILITY AND RELIABILITY CONCEPT

Ivan IGNJATOVIĆ  
Snežana MARINKOVIĆ

The paper deals with service life design of concrete structures, as a design approach based on reliability methods comparable to load design as we are used to have it in design codes. To do that, it is necessary to quantify the deterioration mechanism with realistic models describing the process physically and chemically with sufficient accuracy. This means that all the parameters on the load side (the environmental actions) and on the resistance side (the resistance of the concrete against the considered environmental actions) must be statistically described and quantified, to enable verification of considered limit states with probabilistic methods.

**Key words:** concrete structures, durability, service life, reliability, deterioration mechanism, probabilistic method.