



UNIVERZITET U NIŠU
GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI
FAKULTET



NIKOLA D. STOJIĆ

DETEKCIJA OŠTEĆENJA BETONA NA BAZI
PROPAGACIJE ULTRAZVUČNIH TALASA ZA POTREBE
OCENE STANJA BETONSKIH ELEMENATA MOSTOVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

NIŠ, 2020.



UNIVERZITET U NIŠU
GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI
FAKULTET



NIKOLA D. STOJIĆ

DETECTION OF CONCRETE DAMAGE BASED ON
ULTRASONIC WAVE PROPAGATION FOR
ASSESSMENT OF CONCRETE BRIDGE ELEMENTS
CONDITION

DOCTORAL DISSERTATION

NIŠ, 2020.

Članovi komisije:

1. dr Zoran Grdić dipl.inž.građ. redovni profesor (mentor)
Građevinsko - arhitektonski fakultet u Nišu
2. dr Gordana Topličić–Ćurčić dipl.inž.građ. redovni profesor
Građevinsko - arhitektonski fakultet u Nišu
3. dr Vlastimir Radonjanin dipl.inž.građ. redovni profesor
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
4. dr Nenad Ristić dipl.inž.građ. docent
Građevinsko - arhitektonski fakultet u Nišu
5. dr Dimitrije Zakić dipl.inž.građ. vanredni profesor
Građevinski fakultet u Beogradu

Datum odbrane doktorske disertacije: _____

Mentor:

dr Zoran Grdić dipl.inž.građ. redovni profesor
Građevinsko - arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

Naslov:

DETEKCIJA OŠTEĆENJA BETONA NA BAZI PROPAGACIJE
ULTRAZVUČNIH TALASA ZA POTREBE OCENE STANJA BETONSKIH
ELEMENATA MOSTOVA

Rezime:

Tokom perioda eksploatacije svojstva armiranog betona u konstrukcijama konstantno opadaju usled čega dolazi do pojave oštećenja koja direktno utiču na upotrebljivost konstrukcije. Inicijacija i razvoj oštećenja su vremenski zavisne pojave praćene deteriorativnim procesima, koja se različito impliciraju u zavisnosti od okruženja. Uticaj okoline je bitan faktor koji određuje vrstu i način propagacije oštećenja, a stepen oštećenja zavisi od izloženosti elemenata agresivnom dejstvu. Usled direktne izloženosti velikom broju agresivnih dejstava, konstrukcije mostova su klasifikovane kao konstrukcije sa najvišim zahtevima u pogledu trajnosti.

Prisutan trend stalnog povećanja agresivnosti sredine i sve oštrijih uslova eksploatacije, pored nosivosti i sigurnosti, trajnost je definisala kao podjednako bitan parametar koji definiše konstrukciju. Obzirom na niz specifičnosti koji karakteriše svaku konstrukciju, trajnost nije lako kvantifikovati jer ne postoji procedura na osnovu koje bi se ocenjivalo ponašanje konstrukcije u pogledu trajnosti. Trajnost je definisana kroz pouzdanost konstrukcije kao sposobnost konstrukcije da održi odgovarajuću upotrebljivost uz predviđenu sigurnost i pretpostavljenu trajnost.

Pouzdanost je zasnovana na realnim modelima okruženja, gde se u skladu sa očekivanim negativnim posledicama i očekivanim graničnim stanjem bira indeks pouzdanosti, odnosno koeficijent sigurnosti. Poznavanjem mehanizama koji dovode do oštećenja i stepena postojećeg oštećenja armirano betonskog elementa mogu se uspostaviti tranzicioni procesi za otkrivanje budućeg stanja armirano betonskih elemenata, što je od velike važnosti za kvantifikaciju interakcije konstrukcije sa okolinom i određivanje preostalog upotrebnog veka za veliki broj konstrukcija u eksploataciji.

Predmet istraživanja je formiranje proračunskog modela konstrukcija u eksploataciji na osnovu stohastičkih modela na bazi slučajnih promenljivih za određivanje tehničkih svojstava materijala i dejstava i određivanje domena sigurnosti, odnosno domena preostale nosivosti konstrukcije.

Osnovna hipoteza istraživanja je zasnovana na numeričkom i laboratorijskom modelu oštećenja betonskog elementa, na osnovu kojih se putem propagacije ultrazvučnih talasa mogu detektovati oštećenja i uspostaviti zavisnost između brzine prostiranja ultrazvučnih talasa i veličine oštećenja. Na osnovu rezultata istraživanja dobijena je prikladna metoda za brzu i praktičnu terensku evaluaciju stanja konstrukcije.

Naučna
oblast:

Građevinarstvo

Naučna
disciplina:

Građevinski materijali i tehnologija betona

Ključne
reči:

beton, betonski mostovi, pouzdanost konstrukcija, detekcija oštećenja,
metoda ultrazvuka

UDK:

624.012.45 (043.3)
620.16 (043.3)
624.21.03 (043.3)

CERIF
klasifikacija:

T 220 Građevinarstvo, hidraulika, priobalna tehnologija, mehanika tla

Tipl licence
kreativne
zajednice:

CC BY-NC-ND

Doctoral
Supervisor:

Zoran Grdić PhD.Sc.C.E. Professor
Faculty of Civil Engineering and Architecture, University of Niš

Title:

DETECTION OF CONCRETE DAMAGE BASED ON ULTRASONIC
WAVE PROPAGATION FOR ASSESSMENT OF CONCRETE BRIDGE
ELEMENTS CONDITION

Abstract:

During the exploitation period, the properties of reinforced concrete in structures constantly decrease, resulting in damage that directly affects serviceability of the structures. Initiation and development of damage are time-dependent phenomena accompanied by deteriorating processes, which are differently implied depending on the environment. The influence of environment is an important factor that determines type of damage and mode of propagation, and damage level depends on the exposure of structure elements to aggressive actions. Due to direct exposure to a large number of aggressive actions, bridge structures are classified as structures with the highest durability requirements.

Constant increase of environment aggressive actions and increasingly harsh exploitation conditions defined durability as an equally important parameter as load-bearing capacity and safety that defines the structures. With number of specifics that characterize each structure, durability is not easy to quantify, and there is no procedure for assessing the behavior of a structure in terms of durability. Durability is defined through reliability of a structures as the ability of a structure to maintain adequate serviceability with predicted safety and hypotetic durability.

Reliability is based on realistic environment models that determine reliability index ie the safety factor in accordance with expected negative consequences and the expected limit state. Knowing the damage mechanisms and the degree of existing damage on reinforced concrete element transitional processes can be established for determination of future state of reinforced concrete elements, which is of great importance for quantifying interaction of the structure with environment and determining the remaining service life.

The subject of this research is formation computational model for structures in exploataion based on random variables that determine the technical properties of materials and actions, domain of safety, ie domain of remaining load-bearing capacity of structure.

The main hypothesis of this research is based on numerical and laboratory concrete model with known damage, detection of damage with propagation of ultrasonic waves, and establishmet a relationship between the output signals of ultrasonic waves and the level of damage. Based on the research results, it was obtained a suitable method for fast and practical field evaluation of structures condition.

Scientific
Field:

Civil Engineering

Scientific
Discipline:

Civil engineering materials and Concrete technology

Key Words:

concrete, concrete bridges, structural reliability, damage detection, ultrasonic method

UDK:

624.012.45 (043.3)
620.16 (043.3)
624.21.03 (043.3)

CERIF
Classification:

T 220, Civil engineering, hydraulic engineering, offshore technology, soil mechanics.

Creative
Commons
License
Type:

CC BY-NC-ND

Zahvalnost

Ova doktorska disertacija je nastala kao rezultat mog dugogodišnjeg istraživanja, upornog rada i velikih odricanja, ali i tima ljudi koji je stajao iza mene.

Želim da izrazim iskrenu zahvalnost svima koji su me iskreno podržavali i pomagali tokom izrade doktorata: profesorima na korisnim savetima i sugestijama, kolegama na nesebičnoj pomoći i prijateljima na uvažavanju onoga čime se bavim.

Posebnu zahvalnost dugujem supruzi na strpljenju i razumevanju, mojoj deci na inspiraciji i mojim roditeljima na podsticaju i beskrajnoj podršci bez koje ovaj poduhvat ne bi bio realizovan.

Nikola D. Stojić

Mojoj deci

„Neka budućnost kaže istinu i proceni svakoga u skladu sa njegovim radom i dostignućima. Sadašnjost je njihova, a budućnost za koju sam zaista radio, je moja“

Nikola Tesla

SADRŽAJ

I UVOD

1.1 OSNOVE PROBLEMA I MOTIVACIJA	1
1.2 IDENTIFIKACIJA PROBLEMA I PREDMET ISTRAŽIVANJA	3
1.3 CILJEVI NAUČNOG ISTRAŽIVANJA	5
1.4 ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA	6
1.5 NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA	7
1.6 STRUKTURA RADA	8

II OPŠTE O BETONU

2.1 RAZVOJ BETONA	10
2.2 SAVREMENI BETON	11
2.3 STRUKTURA BETONA	13
2.4 TRAJNOST BETONA	14
2.5 OŠTEĆENJA BETONA	17
2.5.1 DEFEKTI STRUKTURE	18
2.5.2 POJAVA PRSLINA KOD SVEŽEG BETONA	19
2.5.3 FIZIČKA OŠTEĆENJA OČVRSLOG BETONA	21
2.5.4 HEMIJSKA OŠTEĆENJA OČVRSLOG BETONA	23
2.5.5 KLASSE IZLOŽENOSTI BETONA	25
2.6 DETEKCIJA OŠTEĆENJA	28

III DETERIORACIONI MEHANIZMI KOD BETONA

3.1 DETERIORACIJA BETONA	30
3.2 FIZIČKA DEJSTVA	32
3.2.1 DEJSTVO MRAZA	32
3.2.1 DEJSTVO POŽARA	33
3.2.3 EROZIJA BETONA	34
3.3 MEHANIČKA DEJSTVA	35
3.3.1 SLEGANJE KONSTRUKCIJA	36
3.3.2 UDAR VOZILA	36
3.3.3 DEJSTVO EKSPLOZIJA	37
3.3.4 PREOPTEREĆENJE	38
3.3.5 CIKLIČNO OPTEREĆENJE I VIBRACIJE	39
3.3.6 DEJSTVA PRIRODNIH HAZARDA	40
3.4 HEMIJSKA DEJSTVA	42

3.3.1 DEJSTVO MEKIH VODA	43
3.3.2 SULFATNA KOROZIJA	43
3.3.3 DEJSTVO HLORIDA	44
3.3.4 KOROZIJA ARMATURE	45
3.3.5 ALKALNO-AGREGATNA REAKCIJA	47
3.5 BIOLOŠKA DEJSTVA	48
3.4.1 DEJSTVO VEGETACIJE	48
3.4.2 DEJSTVO ORGANIZAMA I MIKROORGANIZAMA	50
3.6 OŠTEĆENJA BETONA KOD MOSTOVA	52

IV POUZDANOST, SIGURNOST I PROCENA STANJA KONSTRUKCIJA U EKSPLOATACIJI

4.1 RAZVOJ STRUKTURNE ANALIZE	58
4.1.1 OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE	60
4.2 KONCEPTI PRORAČUNA KONSTRUKCIJA	62
4.2.1 SINTEZA MODELA ZA PRORAČUN KONSTRUKCIJA	64
4.3 MODELI NA BAZI POUZDANOSTI KONSTRUKCIJA	67
4.4 MODELI NA BAZI PROBABILISTIČKE ANALIZE RIZIKA	69
4.5 SIGURNOST KONSTRUKCIJA	71
4.5.1 STOHAISTIČKI MODELI ZA MATERIJALE I DEJSTVA	77
4.5.2 FUNKCIJE RASPODELE SLUČAJNIH PROMENLJIVIH I TIPOVI RASPODELE VEROVATNOĆE	78
4.5.3 MODELIRANJE FUNKCIJA SLUČAJNIH PROMENLJIVIH	81
4.5.4 MODELIRANJE DEJSTAVA, MEHANIČKE OTPORNOSTI MATERIJALA I GEOMETRIJE KONSTRUKCIJE	83
4.5.5 SLUČAJNE PROMENLJIVE U SEMI - PROBABILISTIČKOM KONCEPTU PRORAČUNA KONSTRUKCIJA	85
4.5.6 SLUČAJNE PROMENLJIVE KOD PROBABILISTIČKE PROCENE RIZIKA	91
4.6. FUNKCIJA VREMENSKI ZAVISNE SLUČAJNE PROMENLJIVE I FUNKCIJA POUZDANOSTI KOD POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA	94
4.6.1 FUNKCIJA POUZDANOSTI $R(t)$	94
4.6.2 KUMULATIVNA FUNKCIJA HAZARDA	95
4.6.3 FUNKCIJA HAZARDA	96
4.7 SIGURNOST POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA	98
4.7.1 APDEJTOVANJE PROBABILISTIČKIH MODELA NA BAZI PRIKUPLJANJA PODATAKA	98
4.7.2 VEROVATNOĆA NESIGURNOSTI KONSTRUKCIJE	99
4.7.3 VREMENSKI ZAVISTAN INDEKS POUZDANOSTI KOD POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA	102
4.7.4 SIGURNOST POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJE PREMA INDEKSU POUZDANOSTI, KLASAMA POUZDANOSTI I KLASAMA POSLEDICA	104

4.7.5 VREMENSKI ZAVISNI PARCIJALNI KOEFICIJENTI SIGURNOSTI ZA DEJSTVA I ZA NOSIVOST KONSTRUKCIJE	108
4.7.6 MODELI NA BAZI SMANJENJA INDEKSA POUZDANOSTI	111
4.7.7 ISTRAŽIVANJE DOMENA SIGURNOSTI POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA NA BAZI PRIKUPLJANJA PODATAKA	115
4.7.8 PRORAČUN POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA PREMA EVROKODU	120
4.7.9 PRORAČUN POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA PREMA OCENI STANJA - AASHTO	122
4.8 OŠTEĆENJA U MODELIMA DETERIORACIJE I OCENA STANJA KONSTRUKCIJA	124

V TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA: DETEKCIJA OŠTEĆENJA I EVALUACIJA STANJA BETONSKE GREDICE

5.1 IZBOR MODELA I PRIMENJENE METODE ISTRAŽIVANJA	140
5.1.1 FAKTORI OŠTEĆENJA I FAKTORI STANJA	142
5.1.2 TEORIJSKA RAZMARANJA PROPAGACIJE TALASA I ODREĐIVANJE INDEKSA STANJA	143
5.1.3 PRIMENA METODE ULTRAZVUKA	145
5.2 NUMERIČKI MODEL	147
5.2.1 MODELI SA RAZLIČITIM STEPENIMA OŠTEĆENJA	149
5.2.2 MODELI SA RAZLIČITIM DINAMIČKIM MODULIMA ELASTIČNOSTI	153
5.2.3 MODELI SA RAZLIČITIM POASONOVIM KOEFICIJENTIMA	154
5.2.4 VREMENSKI ZAVISNI FAKTORI OŠTEĆENJA I FAKTORI STANJA	155
5.2.5 EVALUACIJA I TRANZICIJA STANJA	160
5.2.6 VREMENSKI ZAVISNI INDEKSI OŠTEĆENJA I INDEKSI STANJA	163
5.2.7 GENERISANJE NOMOGRAMA EVALUACIJE STANJA I VREMENSKI ZAVISNIH PROMENLJIVIH	163
5.2.8 REFERENTNI NOMOGRAM EVALUACIJE STANJA I VREMENSKI PROPORCIONALNO ZAVISNIH PROMENLJIVIH	165
5.2.9 NOMOGRAM EVALUACIJE STANJA I VREMENSKI NELINEARNO ZAVISNIH PROMENLJIVIH	166
5.2.9.1 NOMOGRAM SPORIJE PROPAGACIJE DETERIORACIJE	166
5.2.9.2 NOMOGRAM BRŽE PROPAGACIJE DETERIORACIJE	167
5.2.10 NOMOGRAM EVALUACIJE STANJA I SLUČAJNIH VREMENSKI ZAVISNIH PROMENLJIVIH	168
5.2.10.1 NOMOGRAM STANJA PREMA BAZAMA PODATAKA VIZUELNE EVALUACIJE STANJA	168
5.2.10.2 NOMOGRAM STANJA PREMA BAZAMA PODATAKA MONITORINGA	169
5.3 PROVERA SIGURNOSTI POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA PREMA EVROKODOVIMA NA BAZI OCENE STANJA	172
5.4 LABORATORIJSKI MODEL	179

5.4.1 PROGRAM ISPITIVANJA	180
5.4.2 IZRADA UZORAKA	182
5.4.3 ODREĐIVANJE VLAŽNOSTI	183
5.4.4 ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE NA PRITISAK I ZAPREMINSKE MASE	184
5.4.5 MERENJE MODULA ELASTIČNOSTI	186
5.4.6 ODREĐIVANJE DINAMIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI	188
5.4.7 MERENJA ULTRAZVUKOM	192
5.4.7.1 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE I	193
5.4.7.2 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE II	195
5.4.7.3 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE III	197
5.4.7.4 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE IV	199
5.5. EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKO ISTRAŽIVANJE DETEKCIJE OŠTEĆENJA BETONSKE GREDICE	201
5.5.1. NUMERIČKA SIMULACIJA PROPAGACIJE TALASA I MERENJE VREMENA ULTAZVUČNIH TALASA	201
5.5.2 NOMOGRAM STANJA NA BAZI PROMENE BRZINE PROSTIRANJA IMPULSA ULTRAZVUČNIH TALASA	206
5.5.2.1 DETEKTOVANJE OŠTEĆENJA PRI KRTOM LOMU GREDICA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE KONCENTRISANOM SILOM	206
VI ZAKLJUČAK	210
VII LITERATURA	217
POPIS SLIKA	229
POPIS TABELA	233
PRILOZI	236
PRILOG 1 - Propagacija talasa na modelu sa jednim oštećenjem u sredini od $\Delta h=4$ cm u raličitim vremenskim intervalima	236
PRILOG 2 - Propagacija talasa na modelu sa jednim oštećenjem u sredini od $\Delta h=6$ cm u raličitim vremenskim intervalima	237
PRILOG 3 - Propagacija talasa na modelu sa jednim oštećenjem u sredini od $\Delta h=8$ cm u raličitim vremenskim intervalima	238
PRILOG 4 - Propagacija talasa na modelu sa jednim oštećenjem u sredini od $\Delta h=10$ cm u raličitim vremenskim intervalima	239
PRILOG 5 - Propagacija talasa na modelu sa dva oštećenja $\Delta h_1=6$ i $\Delta h_2=10$ cm u raličitim vremenskim intervalima	240
PRILOG 6 - Izlazni signali senzora S5 za neoštećeni model i model sa jednim oštećenjem $\Delta h=4$ cm	241
PRILOG 7 - određivanje statičkog i dinamički modula elastičnosti na osnovu merenih podataka	242
BIOGRAFIJA AUTORA	243
IZJAVA O AUTORSTVU	244
IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE	245
IZJAVA O KORIŠĆENJU	246

*„Lukavi ljudi preziru nauku,
priprosti joj se dive, a mudri se
njome koriste“*

Francis Bacon



POGLAVLJE

I UVOD

1.1 OSNOVE PROBLEMA I MOTIVACIJA

U ljudskom stvaralaštvu oduvek je prisutan motiv trajnosti. Poseban značaj je dobila u *tehnicima*¹ i graditeljstvu koje obuhvata njen najveći deo. U najstarija i najznačajnija graditeljska dela spadaju mostovi koji su ljudima obezbeđivali mogućnost kretanja, samim tim i egzistenciju. Usled velikog značaja za ljude, termin trajnost je postao sinonim za most. Prvi mostovi su građeni bez elementarnih znanja o nauci, empirijski po ugledu na strukture koje je stvorila priroda [1]. Za građenje su instinktivno korišćeni čvrsti materijali birani prema svojoj postojanosti.

Kao izrazito čvrst i postojan prirodni materijal za građenje je najčešće korišćen kamen koji je predstavljao simbol trajnosti [2]. Razvijena veština obrade i uklanjanje prirodnih imperfekcija obezbeđivala je kamenu visoku trajnost, a masivnost elemenata i preciznost izrade davala je građevinama monumentalni karakter. O trajnosti kamena svedoče mnoge građevine i mostovi koji, izgrađeni pre više stotina pa i hiljada godina, su do današnjih dana ostali sačuvani u celosti i služe svojoj nameni [1]. I pored izuzetne trajnosti usled određenih ograničenja, kamen nije mogao da ispuni sve veće zahteve koji su postavljeni za konstrukcije mostova.

Naučnim i tehnološkim napretkom² omogućena je upotreba čelika kao dominantnog materijala za izradu rasponskih konstrukcija mostova. Usled visoke zatezne čvrstoće, žilavosti i relativno malog udela sopstvene težine, čelik se pokazao kao idealan za izradu konstrukcija velikih raspona. Upotreba čelika je doprinela razvoju mnogih konstrukcijskih sistema i razvoju teorije konstrukcija, a mostove je definisala kao čisto inženjerske konstrukcije. Sa aspekta trajnosti čelik je pokazao određene nedostatke u vidu slabe korozione otpornosti i deformacije elemenata pri povišenim temperaturama.

Pronalaskom hidrauličnog kreča i portland cementa započinje era upotrebe betona [3]. Usled odličnih mehaničkih karakteristika i brojnih pogodnosti poput lake dostupnosti komponentalnih materijala, jednostavnosti izrade, lakog oblikovanja, mogućnosti proizvodnje na mestu ugradnje, beton je za kratko vreme ušao u masovnu upotrebu. Ojačan armaturom beton je postao dominantan materijal za izradu svih elemenata konstrukcija. Upotreba betona je omogućila masovnu izgradnju koja je obeležila XX vek. Masovna izgradnja praćena ekspanzijom saobraćajne infrastrukture dovela je do izgradnje velikog broja mostova i vijadukata, gde je prema proceni danas na svetu u funkciji oko dva miliona mostova od kojih su preko 80% od betona [4].

Prepoznatljiv po visokoj čvrstoći, beton je nazivan *veštačkim kamenom* [5]. Smatralo se da je prirast čvrstoće podrazumevan i da će beton, poput kamena, svoje karakteristike održati tokom vremena [6]. Označen je kao veoma trajan materijal i smatralo se da ima praktično neograničen vek upotrebe. Aspekti trajnosti betona nisu posebno razmatrani, čak su u potpunosti zanemarevani. Ne kritički stav u pogledu trajnosti i nedovoljno

¹ Tehnika (grč. τεχνικός - *technikós*) - oblast ljudske delatnosti zasnovana na primeni prirodnih nauka

²XVIII vek – I industrijska revolucija

poznavanje svojstava betona neretko su doveli do njegovog izuzetno brzog propadanja [7]. Tokom relativno kratkog perioda upotrebe uočena je pojava oštećenja velikog broja betonskih konstrukcija izazvanih različitim agresivnim uticajima. Najizraženije propadanje je uočeno kod konstrukcija mostova kao konstrukcija čiji su elementi direktno izloženi agresivnim dejstvima.

Na osnovu prikupljenih podataka na objektima tokom eksploatacije, utvrđeno je da je beton podložan pojavi oštećenja i promenama usled velikog broja dejstava iz okoline, koja dovode do stvaranja trajnih promena na betonu i utiču na njegovo ubrzano propadanje, samim tim i na trajnost. Iako se posledice agresivnog uticaja većine dejstava mogu predvideti, praksa je pokazala da usled mnoštva kombinacija različitih dejstava ne postoji betonska konstrukcija koja je univerzalno trajna [6].

Propadanje betona predstavlja neizbežan proces tokom kog beton prolazi kroz fazu inicijacije - pojave oštećenja koja se tokom vremena propagiraju odnosno prolaze kroz fazu *deterioracije*³ [8]. Deterioracija betona je vremenski zavisna pojava usled koje dolazi do gubitka fizičkih i mehaničkih svojstva betona a samim tim i drastičnog smanjenja upotrebnoog veka konstrukcija [9]. U poodmakloj fazi deterioracije dolazi do kompletnog razaranja strukture i gubitka nosivosti armirano betonskih elemenata, a u ekstremnim slučajevima i kolapsa konstrukcije.

Stvaranje velikih direktnih i indirektnih šteta kao i niza kolapsa konstrukcija izazvanih deterioracijom doveli su do preispitivanja dotadašnje prakse. Brojnim studijama započeto je intezivno proučavanje ponašanja betona u agresivnom okruženju sa ciljem održanja betonskih konstrukcija u funkcionalnom obliku. Razvoj ovih studija doveo je do koncepta *pouzdanosti konstrukcija* [10] prema kome je trajnost, pored nosivosti i sigurnosti, definisana kao podjednako važan parametar konstrukcije [11]. U pogledu trajnosti od konstrukcije se očekuje da za pretpostavljena dejstva u normalnim uslovima eksploatacije dostigne *optimalni upotrebni vek* [10]. Klasifikacijom objekata prema upotrebnoom veku, mostovi su rangirani u najvišu kategoriju, kao objekti sa najvišim zahtevima.

Pouzdanost je zasnovana na određivanju graničnih stanja prema očekivanim uticajima sredine odnosno klasifikacijom konstrukcija prema stepenu izloženosti u jednu od klasa pojednostavljene agresivne sredine [12]. U realnim uslovima na deterioraciju betona paralelno utiče više faktora koji stvaraju komplikovane mehanizme oštećenja usled čega postojeća klasifikacija nije sasvim adekvatna, a pitanja trajnosti nisu u potpunosti rešena. Za veliki broj konstrukcija u eksploataciji koje nisu projektovane prema konceptu pouzdanosti potrebno je, na osnovu postojećih oštećenja i agresivnih uticaja, izvršiti kvantifikaciju interakcije konstrukcija sa sredinom u kojoj se nalaze i izvršiti procenu preostalog upotrebnoog veka.

Pouzdanost ima veliku teorijsku podlogu ali joj nedostaju praktična saznanja o ponašanju betona u realnim uslovima na osnovu kojih bi se izvršila adekvatna procena stanja. Postoji mnogo otvorenih pitanja po osnovu realnog ponašanja betona u agresivnom okruženju, a za pojedine uslove sredine deterioracioni modeli nisu unificirani niti opšte prihvaćeni [11]. Pravilnu procenu uticaja dodatno otežava konstantan trend povećanja agresivnosti sredine [13] kao i stalno pooštravanje uslova eksploatacije koje je posebno

³ lat. *DETERIORATE* – pogoršavanje, upropaštavanje, kvarenje

izraženo kod mostova [14]. Formiranje realnih modela propadanja betona predmet je različitih eksperimentalnih istraživanja, a paralelno se vrši i prikupljanje podataka o nastalim promenama na betonu tokom vremena na konstrukcijama u eksploataciji [15]. Kod mostova, redovni pregledi i monitoring su propisani kao obaveza [16]. Za obradu prikupljenih podataka u upotrebi je mnogo algoritama i matematičkih modela [17] putem kojih se vrši poređenje prikupljenih podataka i kreiraju simulacije budućeg stanja elemenata odnosno preostalog upotrebnoeg veka.

Problemi deterioracije betona su aktuelni i predstavljaju široko polje za proučavanje i trenutno predstavljaju jedan od najvećih izazova u savremenom građevinarstvu.

Tokom dosadašnje profesionalne karijere autor se aktivno bavio problematikom konstrukcija mostova učestvujući u pregledima i monitoringu mostova, praćenju stanja, proceni uticaja koji su doveli do pojave oštećenja i proceni nastalih oštećenja koja se javljaju kod mostova tokom eksploatacije, davanju predloga mera sanacija i sanacijama mostova. Velika količina prikupljenih podataka o nastalim oštećenjima konstrukcija mostova u eksploataciji i susretanje sa mnogim specifičnostima usled kojih dolazi do pojave i propagacije oštećenja tokom vremena, dale su autoru motiv da u svom istraživačkom radu da svoj doprinos na tom polju. Motiv se ogleda u nastojanju da se postojeće metode detekcije oštećenja unaprede naročito detekcije skrivenih oštećenja i korekcije modela materijala kod oštećene konstrukcije za proračun preostale nosivosti i preostalog upotrebnoeg veka konstrukcije. Viđenje problema je utemeljeno na raspoloživom iskustvu i definisano u praksi pri rešavanju velikog broja problema.

1.2 IDENTIFIKACIJA PROBLEMA I PREDMET ISTRAŽIVANJA

Projektovanje konstrukcija prema važećoj tehničkoj regulativi u svetu i kod nas [18] se odnosi na novoprojektovane objekte, gde se posebno zahteva ispunjenje uslova kvaliteta materijala u pogledu čvrstoće i trajnosti od 50 do 100 godina i prema kojoj se pored odgovarajućih stepena sigurnosti za materijale i dejstva uzimaju i faktori nesigurnosti modela. Za konstrukcije u eksploataciji, kod kojih je usled starenja materijala i različitih dejstava iz sredine došlo do promene tehničkih svojstava materijala ili pojave oštećenja, primena ove regulative često može da dovede do pogrešnih rezultata usled strogih uslova trajnosti i procenjenih vrednosti faktora nesigurnosti kao i karaktera, vrste i inteziteta dejstva, što za posledicu može da ima nerealno velike troškove sanacije ili uklanjanje objekta. Sistem evrokodova kao i vodeći svetski standardi ne sadrže jedinstvene modele stanja konstrukcija u eksploataciji kod kojih je vremenom došlo do promene svojstva materijala, ali u pravilnicima i normama pojedinih zemalja postoje različite preporuke za rešavanje ovog problema. Postupci za rešavanje ovog problema su različiti i nisu međusobno usaglašeni, dok kod nas ne postoji tehnička regulativa iz ove oblasti.

Kod konstrukcija u eksploataciji moguće je evidentirati razlike između projektovanog i izvedenog stanja, sagledati stanje materijala i proveriti da li proračunska dejstva u svemu odgovaraju nameni objekta. Pregledom se mogu otkloniti mnogi faktori nesigurnosti čime se proračunski model predviđen za novoprojektovane konstrukcije znatno uprošćuje. S obzirom na stanje objekta i vreme eksploatacije preostali upotrebni vek konstrukcije može biti i znatno manji od 50 godina. Primenom naprednih probablističkih metoda zasnovanih

na podacima praćenja stanja može se preciznije odrediti stanje objekta u eksploataciji i time se osloboditi prevelikih koeficijenata sigurnosti. U prilog iznetim navodima ide i činjenica da mnoge konstrukcije izgrađene u prošlosti ne ispunjavaju zahteve evrokodova uprkos dobrom stanju i funkciji.

Predmet istraživanja u ovoj disertaciji je formiranje proračunskog modela konstrukcija u eksploataciji na osnovu stohastičkih modela na bazi slučajnih promenljivih za određivanje tehničkih svojstava materijala i dejstava i određivanje domena sigurnosti konstrukcije, odnosno domena preostale nosivosti konstrukcije. Dejstva i nosivost konstrukcije u eksploataciji su zavisne od klasa pouzdanosti i klasa posledica na bazi promenljive vrednosti indeksa pouzdanosti za određeni vremenski period. Za usvojenu klasu posledica određuje se indeks pouzdanosti i odgovarajuća nosivost konstrukcije. Suštinski problem proračuna konstrukcija u eksploataciji se svodi na ublažavanje proračunskih zahteva određivanjem vremenski zavisnog parcijalnog koeficijenta sigurnosti za materijale i dejstva ili određivanjem vremenski zavisnog indeksa pouzdanosti. Formiranje modela za proračunske vrednosti nosivosti na bazi tehničkih svojstva materijala i proračunske vrednosti uticaja od dejstava korišćenjem semi-probablističkog koncepta proračuna prema evrokodovima, daje nove mogućnosti za primenu u praksi.

Dalja istraživanja se odnose na detekciju oštećenja betona modeliranjem propagacije ultrazvučnih talasa. Na formiranim numeričkim i laboratorijskim modelima u određenim tačkama je praćena promena energije, odnosno brzina emitovanog signala ultrazvučnih talasa, koje ukazuju na promene nastale u materijalu odnosno na pojavu oštećenja između tih tačaka. Predmet istraživanja u ovom delu je određivanje postupka detekcije pogodnog za praktičnu upotrebu. Na bazi numeričkih i eksperimentalnih rezultata formirani su dijagrami i nomogrami stanja betona za detekciju oštećenja i indeksa stanja betona. Dijagrami stanja betonskog elementa formirani su u zavisnosti od veličine oštećenja i položaja senzora. Nomogrami su formirani na bazi definicije oštećenja betona preko procenta odnosno faktora oštećenja, u kojima za različite tranzicije stanja u određenom vremenu, odgovaraju različite ocene evaluacije stanja. Promena oštećenja je definisana na vremenskoj skali preko faktora vremena od 0 do 1, preko referentne linije faktora oštećenja, a promena preostalog preseka preko referentne linije faktora stanja.

Predmet istraživanja na modelima za detekciju oštećenja, evaluaciju i predviđanje stanja betonskih elemenata, ima sledeće elemente:

- opšta teorijska klasifikacija i analiza uticaja i parametara koji utiču na propagaciju oštećenja i deterioraciju betonskih elemenata u konstrukcijama,
- simulacija oštećenja i numeričko modeliranje nosača sa zadatim parametrima putem programskog paketa ABAQUS,
- određivanje indeksa oštećenja i indeksa stanja betonskog elementa na bazi promene energije izlaznih signala,
- formiranje dijagrama zavisnosti vrednosti indeksa stanja od položaja senzora, za modele sa oštećenjima numeričkim metodom propagacije ultrazvučnih talasa,
- simulacija i detekcija oštećenja merenjem promena brzine ultra zvuka, na laboratorijskom modelu,

- određivanje evaluacija stanja na bazi podataka oštećenja, odnosno preostalog preseka nosača i određivanje vremena tranzicije stanja i izrada nomograma oštećenja merenjem promena brzine ultrazvuka na modelima u laboratoriji,
- određivanje funkcije modela mehanizma oštećenja konstrukcije tokom vremena,
- studija metoda ocene stanja konstrukcija,
- određivanje karakteristika materijala, statičkog i dinamičkog modula elastičnosti na laboratorijskom modelu
- poređenje dobijenih rezultata numeričkih i laboratorijskih modela.

Osnovna hipoteza istraživanja je zasnovana na numeričkom i laboratorijskom modelu oštećenja betonskog elementa, na osnovu kojih se putem propagacije ultrazvučnih talasa mogu detektovati oštećenja. Numeričkim modeliranjem oštećenja mogu se detektovati promene u izlaznim signalima ultrazvučnih talasa (brzina i energija) na osnovu kojih se mogu lokalizovati oštećenja. Sa druge strane na osnovu poznatih oštećenja mogu se detektovati odgovarajući izlazni signali i time se izvršiti kalibracija parametara oštećenja. Formiranjem zavisnosti izlaznih signala ultrazvučnih talasa i oštećenja može se uspostaviti njihova zavisnost što obrnuto znači da pri čitanju izlaznih signala možemo odrediti veličinu oštećenja. Sa rezultatima istraživanja je moguće odrediti odgovarajuća oštećenja betona merenjem izlaznih signala ultrazvučnih talasa na realnoj konstrukciji, čime bi se dobila veoma prikladna metoda za brzu i praktičnu terensku evaluaciju stanja konstrukcije.

1.3 CILJEVI NAUČNOG ISTRAŽIVANJA

Na osnovu predmeta istraživanja definisani su glavni ciljevi istraživanja:

- utvrđivanje oštećenja i/ili promene svojstava u betonu, ocena stanja konstrukcije i formiranje proračunskog modela za mostovske konstrukcije u eksploataciji primenom savremenih eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih metoda,
- određivanje vrednosti indeksa oštećenja i vrednosti indeksa stanja betona koji odgovaraju realnom stanju betonskog elementa primenom numeričkih modela simulacije propagacije ultrazvučnih talasa kroz oštećeni element,
- formiranje dijagrama stanja betonskog elementa u zavisnosti od veličine oštećenja i položaja senzora na osnovu kojih će se očitavati različite vrednosti indeksa stanja koji definišu predmetno oštećenje primenom složenih numeričkih modela. Na ovaj način se relativno složen problem detekcije oštećenja svodi na korišćenje dijagrama za praktičnu evaluaciju stanja i određivanje proračunskog modela konstrukcije u eksploataciji,
- praktična primena rezultata na bazi detekcije oštećenja merenjem brzina na laboratorijskim elementima i predlaganje postupka za terensko određivanje indeksa stanja konstrukcija. Određivanje veličine oštećenja primenom nomograma na bazi vrednosti indeksa stanja dobijenih terenskim merenjem brzine ultrazvučnih talasa pre i posle oštećenja,
- formiranje proračunskih modela konstrukcija u eksploataciji preko stohastičkih modela na bazi slučajnih promenljivih i vremenski zavisnih parcijalnih koeficijenta sigurnosti ili vremenski zavisnih indeksa pouzdanosti i određivanje proračunskih vrednosti na bazi svojstva materijala i proračunskih vrednosti uticaja dejstva na

bazi semi-probablističkog koncepta. Zavisnost klasa posledica i indeksa pouzdanosti se može iskoristiti u praktičnom proračunu konstrukcije u eksploataciji, pri čemu se često indeksi pouzdanosti mogu smanjiti promenom klase posledica čime se povećava preostala nosivost elementa i ostvaruju značajne uštede pri sanaciji oštećenja.

- predlog modela za predviđanje budućeg stanja betonskih elemenata primenom prenosnih matrica.

Tokom istraživanja određeni su i posebni ciljevi:

- Utvrđivanje fizičko-mehaničkih svojstava materijala koji se koriste za izradu laboratorijskog modela
- Izrada laboratorijskog modela i merenja na modelu
- Formiranje numeričkih modela u programskom paketu ABAQUS i dobijanje parametara na osnovu simulacija
- Utvrđivanje modela detekcije oštećenja na osnovu dobijenih parametara ispitivanja na laboratorijskim i numeričkim modelima
- Implementacija istraživanja, studija slučaja

Najvažnija opservacija u istraživanju odnosi se na poređenje rezultata dobijenih računskim putem i rezultata dobijenih merenjem, kao i mogućnost njihove primene na konstrukcijama u eksploataciji.

1.4 ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA

Istraživanje detekcije oštećenja betona ima veliki značaj u evaluaciji stanja materijala. Poznavanjem trenutnog stanja materijala, prisutnih dejstava i geometrijskih podataka može se formirati mehanički model konstrukcije u eksploataciji na osnovu kog se može odrediti mehanička otpornost konstrukcije [17] i njeno ukupno stanje. Mehanička otpornost konstrukcije se određuje različito u zavisnosti da li je konstrukcija novoprojektovana, u fazi izvođenja ili u fazi eksploatacije. Kod novoprojektovane konstrukcije mehanička otpornost je nominalna (ili nazivna) vrednost u zavisnosti od studije dejstva sredine, planirane trajnosti, namene i značaja objekta. Kod konstrukcija u izvođenju mehanička otpornost je pored projektovane nominalne vrednosti određena podacima laboratorijskih ispitivanja u svim fazama izvođenja. Kod konstrukcija u eksploataciji mehanička otpornost određena je parametrima trenutnog stanja materijala i prisutnih dejstava na osnovu kojih se utvrđuju preostala nosivosti i stepen sigurnosti, a stanje materijala se utvrđuje terenskim i/ili laboratorijskim ispitivanjima. Kod konstrukcija u eksploataciji se stanje materijala utvrđuje terenskim i/ili laboratorijskim ispitivanjima. Ostali parametri kao što su veličine zapremine, vlažnost, temperatura i druga dejstava, mogu se uzeti preko korekcionih faktora.

Značaj istraživanja je u tome što se primenom proračunskog koncepta pouzdanosti [10] na konstrukcije u eksploataciji koriguje prvobitni proračunski model uvođenjem, realnih podataka dobijenih putem merenja na terenu: intenzitet i karakter dejstva, svojstva materijala i geometrija konstrukcije. Ovim putem se mogu isključiti neki faktori nesigurnosti modela što ide u prilog proširenju domena sigurnosti. Utvrđivanjem mikroklimatskih uslova i geometrije konstrukcije mogu se redukovati nominalne vrednosti

dejstava na konstrukciju. Prilikom promene namene konstrukcije ili usled promene faktora sigurnosti i pouzdanosti uz prihvatljive mere posledica i pored postojećih oštećenja konstrukcije u eksploataciji mogu odgovarati novim zahtevima. Detaljnom studijom ovog problema uz korišćenje standarda i rezultata istraživanja sprovedenih širom sveta, u ovom radu su predloženi originalni modeli za rešenje ovog problema.

Istraživanje neželjenih posledica izazvanih oštećenjima ima značaj kod praćenja stanja konstrukcije u eksploataciji radi obezbeđivanja preostalog upotrebnog veka i potrebnog nivoa sigurnosti oštećene konstrukcije.

Značaj rezultata dobijenih simulacijama propagacije ultrazvučnih talasa na bazi energije na numeričkim modelima sa oštećenjima je u formiranju originalnog nomograma za određivanje procenta oštećenja i ocene stanja oštećene konstrukcije.

Značaj rezultata dobijenih merenjima na laboratorijskim modelima sa oštećenjima je u formiranju nomograma oštećenja na bazi merenja brzina UZ talasa kojim je omogućena evaluacija stanja konstrukcije u zavisnosti od veličine oštećenja, faktora vremena i indeksa stanja betona. Indeks stanja je dobijen razlikom vrednosti brzina UZ talasa za oštećeni i neoštećeni uzorak betona.

Praktična primena istraživanja je u mogućnosti ocene stanja konstrukcije na bazi vrednosti indeksa stanja direktnim očitavanjem vrednosti sa nomograma. Primena nomograma je pogodna za detekciju skrivenih oštećenja tokom pregleda i procene stanja konstrukcije na terenu.

1.5 NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA

Istraživanja predviđena ovom doktorskom disertacijom pripadaju teorijskim i primenjenim tehničkim naukama u oblasti građevinarstva. U istraživanju su korišćene analitičke, numeričke i eksperimentalne metode.

Analitičkim metodama izvršena je analiza i klasifikacija merenih ulaznih podataka i komparacija dobijenih rezultata, sa ciljem donošenja odluke o optimalnom modelu istraživanja. Na osnovu teorijske analize parametara koji utiču na pojavu oštećenja i deterioraciju betona formirani su istraživački modeli kojim je simulacijama izvršena kalibracija parametara oštećenja.

Eksperimentalne metode obuhvataju formiranje i ispitivanja na realnim i numeričkim modelima. Za izradu realnih modela korišćene su standardizovane metode i postupci, kao i standardizovane metode za uzorkovanje i obradu uzoraka tokom formiranja modela. U skladu sa predmetom i ciljevima istraživanja izrađeni su betonski elementi sa i bez oštećenja na kojima su sprovedena merenja i ispitivanja. Za merenja i ispitivanja u laboratorijskim uslovima korišćena je standardizovana laboratorijska oprema. Na modelima sa različitim stepenom oštećenja izvršena su merenja brzine ultrazvučnih talasa. Na probnim telima uzetim tokom izrade betonskih elemenata sprovedena su ispitivanja i dobijeni okviri očekivanog mehaničkog ponašanja betona, odnosno ulazni podaci za analitičke postupke utvrđivanja graničnih stanja.

Na numeričkim modelima sprovedena je simulacija propagacije talasa primenom metoda konačnih elemenata (MKE) primenom softverskog paketa ABAQUS. Merenjima varijacija

parametara prilikom promene stepena oštećenja i promene modula elastičnosti dobijeni su rezultati i sprovedena numerička analiza.

Rezultati dobijeni eksperimentalnom analizom i numeričkom simulacijom modela su upoređeni, na osnovu čega su izvedeni odgovarajući zaključci. Ovim postupcima se potvrđuje mogućnost da se na osnovu podataka o trenutnom stanju betonskog elementa utvrdi buduće stanje i preostali upotrební vek.

Istraživanje je realizovano istovremenom primenom teorijskog pristupa baziranog na podacima iz literature i praktičnog pristupa baziranog na rezultatima dobijenih u okviru eksperimentalnog i numeričkog istraživanja.

Eksperimentalna istraživanja su skoro u potpunosti urađena u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu.

1.6 STRUKTURA RADA

Rad se sastoji od šest poglavlja gde se u okviru svakog od poglavlja uočavaju logičke celine na osnovu kojih je izvršena podela.

Prvo poglavlje obuhvata osnove problema nedovoljne trajnosti materijala prikazane kroz prizmu razvoja konstrukcija mostova i unapređenja materijala nosećih konstrukcija. Usled mnogo otvorenih pitanja u pogledu postojanosti i trajnosti betona u različitim agresivnim sredinama i savremenim uslovima eksploatacije, prikazan je motiv za sprovođenje istraživanja i davanja ličnog doprinosa u tom domenu. Izvršena je precizna identifikacija problema na osnovu koje je formiran okvir istraživanja iznošenjem osnovnih hipoteza i definisanjem predmeta istraživanja. Definisani su glavni i posebni ciljevi i prikazane naučne metode koje su primenjene u istraživanju. Posebno je istaknut značaj sprovedenih istraživanja kao i mogućnosti za praktičnu primenu dobijenih rezultata.

Drugo poglavlje obuhvata teorijske osnove o betonu sa osvrtom na dosadašnji razvoj, značaj u savremenom društvu i uloge u održivom razvoju. Analizirani su aspekti postojanosti i trajnosti betona prikazom relevantnih parametara koji utiču na pojavu oštećenja. Analizom je obuhvaćen uticaj strukture i prisustvo defekta u strukturi na trajnost betona, opisani fizički i hemijski uslovi sredine koji dovode do promena na betonu i prikazane su osnove deterioracionih mehanizama i korozije betona kao i analize uticaja ljudske greške. Za određene fizičke i hemijske uslove sredine prikazane su klase izloženosti u zavisnosti od uslova agresivne sredine i očekivani stepeni otpornosti prema kojima se definiše kvalitet betona. Na kraju poglavlja prikazane su savremene metode koje se bave detekcijom i utvrđivanjem stepena oštećenja kod betona

Treće poglavlje obuhvata opštu klasifikaciju dejstva iz sredine koja utiču na pojavu i razvoj oštećenja. Opšta klasifikacija se oslanja na uslove sredine koji su prepoznati i definisani u relevantnim dokumentima, sa izvesnim dopunama koje su lični pečat autora. Klasifikacija dopunjena očekivanim oštećenjima usled dejstva i prikazana je kao svojevrsni algoritam putem kog se može naći međusobna zavisnost između pojava koje dovode do složenih mehanizama oštećenja. Za svako opisano dejstvo prikazani su uslovi potrebni za pojavu datog dejstva, mehanizam agresivnog delovanja kao i očekivana oštećenja. Poseban osvrt je dat na karakterističnim oštećenjima koja se javljaju kod armirano betonskih mostova, načina prikupljanja i klasifikacije oštećenja i primenjenih

metoda za određivanje prioriteta popravki. Poseban kuriozitet u ovom poglavlju čini to što su prikazana zapažanja i celokupna prezentovana foto dokumentacija deo arhivske građe koju je autor prikupljao tokom godina pregleda mostova na terenu.

Četvrto poglavlje obuhvata teorijska razmatranja trajnosti betona koja su određena trajnošću konstrukcija kao dela šireg koncepta pouzdanosti konstrukcija. Dat je pregledni prikaz razvoja strukturne analize sa pregledom osnovnih pojmova i definicija modela koji se koriste za proračun konstrukcija. Date su teorijske osnove probablističkog pristupa i pouzdanosti konstrukcija u sklopu kojih su principi analize modela i promenljivih u pobabilističkoj analizi rizika, sigurnosti konstrukcija u konceptu graničnih stanja, a i definisana su dejstva i nosivost konstrukcije prema indeksu pouzdanosti i faktorima verovatnoće otkazivanja konstrukcija. Prikazani su teorijski probablistički i semi-probablistički modeli kao i modeli koji se primenjuju u praksi, istraživanja domena preostale nosivosti kao i razmatranja mogućnosti apdejtovanja (eng.*update*) modela i preostalog upotrebnog veka. Sva navedena razmatranja su data sa osvrtom na standarde i tehničku regulativu koja je propisana od strane relevantnih institucija koje se bave ovom problematikom.

Peto poglavlje obuhvata opšta razmatranja o značaju eksperimentalnog istraživanja, usvajanju modela za predmetno istraživanje i usvajanje programa istraživanja. U okviru studije slučaja teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima razmatrane su promene svojstava materijala u zavisnosti od stepena oštećenja. Eksperimentalna istraživanja su paralelno sprovedena u dva pravca: ispitivanjima i simulacijama na numeričkim i laboratorijskim modelima.

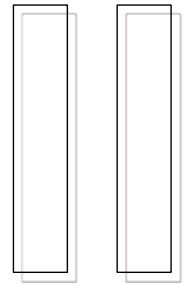
Numerički modeli sa i bez oštećenja formirani su primenom metoda konačnih elemenata (MKE). Primenom softverskog paketa ABAQUS izvršena je simulacija propagacije talasa i dobijanje parametara na osnovu promene energije u elementu. Putem merenja dobijene su varijacije parametara prilikom promene stepena oštećenja i promene modula elastičnosti medijuma, a dobijeni izlazni parametri i rezultati numeričke analize dati su grafičkim prikazima.

Kod laboratorijskih modela ispitivanja su izvršena u laboratorijskim uslovima prema zadatom programu ispitivanja i planom pratećih istraživanja. Hronološki je prikazan tok izrade laboratorijskih modela, postupci i tok sprovedenih ispitivanja sa kratkim opisom upotrebljavane aparature i opreme i prikazani dobijeni rezultati sprovedenih merenja i ispitivanja. Na osnovu dobijenih podataka izvršena je korekcija numeričkih parametara što je omogućilo da se simulacije na numeričkom modelu verodostojno prikažu. Numeričkim metodama i eksperimentalnim merenjima su određeni indeksi stanja oštećenog betonskog elemenata i izrađeni su nomogrami za detekciju i veličinu oštećenja.

Šesto poglavlje obuhvata finalnu analizu rezultata istraživanja na osnovu kojih su izvedeni zaključci. Analizom su obuhvaćeni doprinosi sprovedenog istraživanja i razmatrane mogućnosti praktične primene dobijenih rezultata i istaknuti su pravci daljeg istraživanja u domenu detekcije oštećenja.

*„Usus est optimus magister“
(Iskustvo je najbolji učitelj)*

Marcus Tullius Cicero



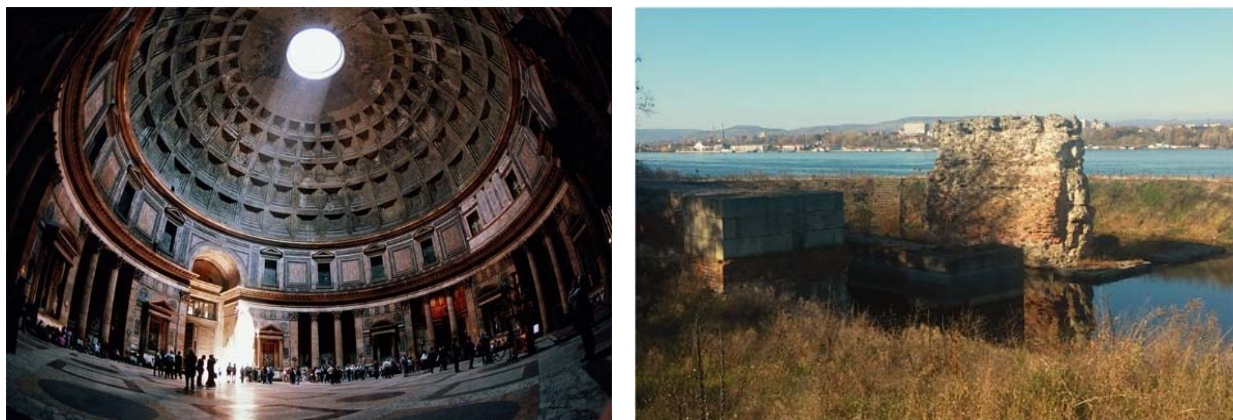
POGLAVLJE

II OPŠTE O BETONU

2.1 RAZVOJ BETONA

Iako se smatra da je beton relativno nov materijal, on je zapravo u upotrebi od davnina. Arheološkim istraživanjima utvrđeno je da je beton korišćen još u praistoriji. Na prostorima današnje Sirije i Jordana otkriveni su ostaci podzemnih cisterni za vodu koje datiraju iz perioda od oko 6500 godina p.n.e. za čiju izradu je korišćen prirodno nataloženi silikatni pesak koji je kombinovan sa krečom davao odličnu vodonepropusnost [3]. Na arheološkom lokalitetu Lepenski Vir u Srbiji pronađena je neka vrsta betona sastavljena od zdrobljenog crvenog krečnjaka kombinovana sa pepelom đubrivom životinjskog porekla koja datira od oko 5600 godina p.n.e. [19]. Oko 3000 godina p.n.e u starom Egiptu korišćeni su gipsani i krečni malteri. Ispitivanjem zemljišta u basenu Gize u Egiptu otkriveno je prisustvo mekog krečnjaka sa visokim procentom *kaolinita*⁴ koji je korišćen kao malter za ispune između kamenih blokova piramida u starom Egiptu. Na osnovu ovog otkrića postavljena je teorija prema kojoj kameni blokovi piramida nisu klesani, već su načinjeni od stabilizovanog krečnjaka u oplati na način nalik današnjem betonu [20]. U tom periodu beton je korišćen i u Kini. O proizvodnji i upotrebi betona poznati su samo određeni fragmenti bez kontinuiteta i precizne hronologije. Ono što je sigurno je to da je proizvodnja i upotreba betona bila ograničena nalazištem pogodnih sirovina [21].

Prvi zapisi o pravilima proizvodnje i primene kreča, cementa i betona, kao i najveći broj izgrađenih objekata od betona potiče iz perioda Rimskog Carstva [5]. Utvrđena pravila proizvodnje maltera su do XX veka pretrpele promene samo u pogledu upotrebene vrste cementa. *Opus caementicium* ili *Rimski beton* nastao je korišćenjem gašenog kreča, sitnog šljunka i pucolana - vulkanskog materijala iz okoline mesta Pucoli (ital.*Pozzuoli*).



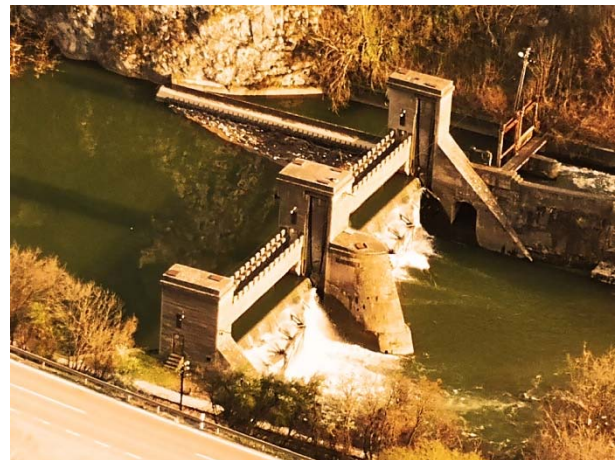
Slika 2.1 Hram Pantenon u Rimu (levo); ostaci Trajanovog mosta na Dunavu (desno)

Opus caementicium je zaslužan za izgradnju najvećeg dostignuća Rimske arhitekture – kupole hrama Pantenona koja sa prečnikom od 43,5 m gotovo dva milenijuma nakon izgradnje predstavlja najveću kupolu na svetu od nearmiranog betona (slika 2.1 levo). Upotreba Rimskog betona je bila ograničena malobrojnim nalazištima vulkanskog materijala, pa je češće korišćen *Opus signium* koji je nastao dodavanjem mlevene opeke

⁴ Kaolinit - Mineral gline iz grupe aluminosilikata

umesto vulkanskog materijala. Ova tehnika je najčešće korišćena pri gradnji mostova, među kojima i Trajanov most na Dunavu u blizini Kladova koji je sa svojih 1097 m gotovo 19. vekova predstavljao najduži izgrađeni most na svetu (*slika 2.1 desno*). Na ostacima stubova Trajanovog mosta tokom XX veka švajcarski istraživač Voellmy je izvršio ispitivanje betona pri čemu je dobio rezultate pritisne čvrstoće koji odgovaraju današnjoj MB30 [22]. Upotreba betona je prekinuta nestankom Rimskog carstva 476 godine n.e.

Otkrićem hidrauličnog kreča nastalog pečenjem krečnjaka koji sadrži određen procenat gline⁵ i portland cementa⁶ započinje era savremenog betona [3]. Interesovanje za ispitivanje i razvoj novog materijala pokazala je vojska Velike Britanije koja je većinu dobijenih rezultata čuvala kao vojnu tajnu i nisu bili dostupni civilnoj upotrebi [23]. Pronalaskom armiranog betona i dugotrajnim utvrđivanjem njegovih karakteristika, beton i armirani beton ulaze u masovnu upotrebu tek početkom XX veka.



Slika 2.2 Prvi armirano betonski most u Srbiji (levo); Brana na Nišavi kod Sićeve (desno)

U ovom kontekstu vredno je pomenuti pionirske poduhvate u primeni armiranog betona koji su vezani za naše prostore. Problemima tehnologije betona se bavio naš čuveni naučnik Milutin Milanković koji je 1912. godine projektovao i rukovodio izgradnjom prvog armirano-betonskog mosta u Srbiji. Most raspona 30 m izgrađen je na pruzi Niš-Knjaževac kod sela Niševac u okolini Svrljiga (*slika 2.2 levo*). Među najstarije objekte izgrađene od armiranog betona kod nas spadaju i konstrukcija brane na reci Nišavi u Sićevačkoj klisuri izgrađena 1922 godine (*slika 2.2 desno*), i armirano-betonska konstrukcija Fabrike duvana u Nišu izgrađena 1927 godine.

2.2 SAVREMENI BETON

U savremenom smislu termin „beton“ označava širok spektar veštačkih građevinskih materijala kompozitnog tipa koji se dobija *aglomeracijom*⁷ zrna agregata različite granulacije i veziva. Beton je moguće napraviti od nebrojano mnogo kombinacija komponentalnih materijala. U vidu agregata se upotrebljavaju različiti prirodni i veštački materijali poput: prirodnog šljunka, drobljenog kamena, različitih vrsta zgura, ekspandirane gline, itd., dok se kao veziva koriste: kreč, cement, bitumen, epoksidna smola, itd. Za izradu nosećih konstrukcija objekata najširu primenu imaju betoni kod kojih

⁵ Dzon Smiton (eng. John Smeaton) - inženjer i fizičar, pronalazač hidrauličnog kreča 1793. god

⁶ Džozef Espdin (eng. Joseph Aspdin) - graditelj, pronalazač Portland cementa 1824. god

⁷ Aglomeracija (lat. Agglomeratio) – skupljanje, gomilanje, nagomilavanje

se kao vezivo koristi cement. Ovaj beton bi formalno trebalo zvati cement-beton, ali je u praksi uobičajeno da se materijal ovog tipa naziva samo *beton* [24].

Prema svom sastavu, beton spada u kompozitne materijale sa izrazito nehomogenim sastavom. Osnovne komponente betona su cement, agregat i voda. Za postizanje određenih svojstava svežeg ili očvrslog betona koriste se različiti hemijski dodaci – *aditivi*, koji se zbog učestale primene smatraju četvrtom komponentom betona [6]. Svež beton predstavlja višekomponentni sistem unutar kojeg su prisutne komponente u sva tri agregatna stanja i kao takav poseduje određen skup svojstava koja se opisuju terminom “*workability*”⁸ [7]. Hemijskom aktivnošću na relaciji cement - voda dolazi do procesa *hidratacije*⁹ tokom kog se za relativno kratak vremenski period smanjuje fluidnost smeše i povećava viskoznost pri čemu beton poprima karakteristike čvrstih tela. Karakteristike očvrslog betona u velikoj meri zavise od svojstava svežeg betona [24].

Najvažnije svojstvo očvrslog betona jeste čvrstoća na pritisak. Ostala svojstva betona zavise od zahteva i specifičnosti njegove namene ili agresivnosti okoline u kojoj se nalazi. Beton može imati određeni stepen propustljivosti na vodu, određeni stepen otpornosti na dejstvo mraza i simultano dejstvo na mraz i soli, otpornost na habanje, itd. Usled male čvrstoće na zatezanje koja iznosi svega 10% čvrstoće na pritisak i male duktilnosti beton je izuzetno osetljiv na pojavu oštećenja i krtog loma [25]. Iz tog razloga beton se ojačava sa armaturnim čelikom pri čemu se dobija *armirani beton*. Sprezanjem betona i čelika dolazi do ostvarenja monolitne veze pri čemu su oba materijala uslovljena na zajednički rad i dolazi do punog iskorišćenja oba materijala - betona pri pritisku i čelika pri zatezanju. Pored klasične armature za armiranje se koriste čelična užad za prednaprezanje.

Usled stalnih potreba za višim performansama beton se permanentno usavršava i unapređuje kako po sastavu tako i po tehnologiji ugradnje [26]. Za dobijanje materijala sa višim tehničkim karakteristikama koriste se različiti punioci, nove vrste cementa i različiti organski i mineralni dodaci, a za postizanje višeg kvaliteta očvrslog betona često se koriste alternativni načini ugradnje poput mlaznog ili samougrađujućeg betona. Sve je češća i upotreba različite vrste vlakana za ojačanje betona. Betoni koji po svojim konačnim karakteristikama značajno odstupaju od klasičnih betona, nazivaju se *specijalni betoni*. Danas je dostupan širok spektar betona koje je moguće prilagoditi i najzahtevnijim eksploatacionim uslovima konstrukcija.

Zbog mnogobrojnih prednosti pre svega dobrih mehaničkih osobina, jednostavnosti ugradnje i lake dostupnosti komponentalnih materijala što ga čini ekonomičnim materijalom, beton je našao široko polje primene u građevinarstvu [13], gde prema procenama pokriva 70% ukupnih potreba u građevinarstvu. Na osnovu podataka o proizvodnji cementa procenjeno je da se proizvodi približno 1m³ po glavi stanovnika planete godišnje na osnovu čega se može zaključiti da beton drži primat u proizvodnji svih materijala ukupno na globalnom nivou. Oko 60% ukupne svetske proizvodnje cementa se odvija u Kini. Široka zastupljenost betona u savremenoj inženjerskoj praksi zahteva obavezno poznavanje svojstava i tehnologije betona.

⁸ eng. *Workability*. - podobnost ili podesnost za rad

⁹ *Hidratacija* - skup fizičko hemijskih procesa u kojima se voda jedini sa drugom supstancom bez ostatka

2.3 STRUKTURA BETONA

Konačne karakteristike betona u značajnoj meri zavise od načina formiranja njegove strukture odnosno svojstva svežeg betona. Najveći deo volumena svežeg betona zauzima čvrsta faza u vidu sitnog i krupnog agregata (70-80%), dok preostali deo ispunjava cementna pasta, koja sadrži 30-50% vode. U manjoj meri je prisutna i gasna faza u vidu uvučenog vazduha tokom mešanja betona (< 2%) ili dodatno uvučenog vazduha dodavanjem aeranata (> 2%). U svežem betonu voda je zastupljena u nekoliko oblika: na nivou molekula kao hemijski vezana, absorbovana odnosno fizičko-hemijski vezana i mehanički vezana zarobljavanjem vode u porama i kapilarima. Prisustvo vode daje betonu pogodnu fluidnost za ugradnju, pri čemu se beton opisuje i kao strukturalna tečnost [24]. Sveža betonska masa je *tiksotropna*¹⁰, odlikuje se relativno malom elastičnošću uz sposobnost plastičnog oblikovanja [7]. Sa stanovišta reologije, svež beton se opisuje kao elasto - plastično – viskozna tečnost, gde pored sastava, strukture i svojstava komponenata, ponašanje zavisi od vremena i intenziteta dejstava tokom procesa tehnološke obrade [24].

Mehaničkim delovanjem na svežu betonsku masu tokom ugradnje (vibriranjem) se nastoji da se u znatnoj meri homogenizuje (ujednači) raspored komponenti. Vibriranjem se masa dovodi u stanje viskozne tečnosti i na taj način se lakše rasprostire i ugrađuje. Usled postojanja unutrašnjih sila između vode i sitnih čestica čvrste faze (*Vandervalsove sile*), masa poseduje određenu strukturalnu čvrstoću (*kohezivnost*) što joj ne dozvoljava da se skroz razloži do tečne faze prilikom zbijanja. Prostorni raspored komponenti kod svežeg betona odgovara jednom od tipova prikazanih na slici 2.3.



Slika 2.3 Šematski prikaz tipova strukture svežeg betona [7]

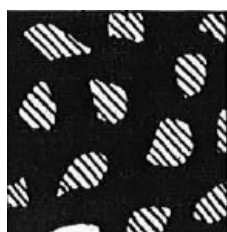
Po završetku ugradnje započinje proces vezivanja i formiranje očvrste strukture. Hidratacijom cementa za relativno kratko vreme dolazi do smanjenja fluidnosti i povećanja viskoznosti betona. Na prirast čvrstoće i formiranje strukture očvrstlog betona veliki uticaj ima temperatura i prisustvo vode [27]. Hidratacija se na višim temperaturama odvija brže, što može dovesti do neravnomerne distribucije vode u cementnom gelu i koncentracije produkta hidratacije usled čega je neophodna nega betona.

Slobodnim kretanjem vode usled procesa hidratacije dolazi do formiranja mreže kapilara i pora veličine do 0,0045 μm tzv. *gelske pore*. Izdvajanjem i kretanjem slobodne nevezane vode u betonskoj masi nastaju nešto veće pore do 0,2 μm . Najveće pore nastaju usled loše ostvarene veze između cementa i agregata i pri tom se formiraju pore 1-9 μm . Pojava pora većih od 9 μm se karakterišu kao defekti strukture. Određeni procenat pora povoljno

¹⁰ Tiksotropija – sposobnost materijala da iz stanja mirovanja pređe u polučvrsto (gel) stanje a kada se promeša ili stavi u kretanje opet se vrati u svoje prvobitno tečno stanje (sol).

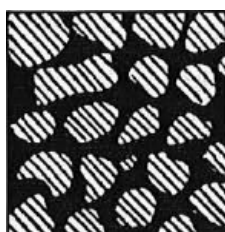
utiče na otpornost betona na mraz i soli dok prekomeran sadržaj šupljina dovodi do povećanja poroznosti betona i smanjenja otpornost na agresivne uticaje. Završetkom procesa vezivanja dolazi do prirasta čvrstoće i formiranja konačne strukture betona kojom su određene njegove mehaničke karakteristike.

Očvrsla struktura betona sastoji se iz dve faze: zrna agregata i cementnog kamena koji ga okružuje. Agregat predstavlja čvrst i slabo porozan materijal, dok cementni kamen predstavlja poroznu sredinu. Makrostruktura očvrsllog betona predstavlja odnos agregata i cementnog kamena, dok mikrostruktura predstavlja ostvarenu vezu između faza.



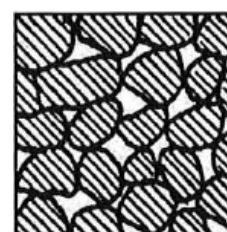
TIP I

preovladava cementni kamen



TIP II

idealna obavijenost zrna



TIP III

manjak cementnog kamena

Slika 2.4 Šematski prikaz tipova makro strukture očvrsllog betona

Na slici 2.4 predstavljena su tri osnovna tipa makro strukture očvrsllog betona [7]. Tokom očvršćavanja cementnog kamena dolazi do gomilanja produkta hidratacije (kalcijum hidroksida) oko agregata, formirajući sloj koji ima nešto veću poroznost od ostale mase cementnog kamena. Taj sloj se često naziva „*tranzitnom zonom*“ jer omogućava transport materija (gasova i tečnosti). Struktura ovog sloja definiše svojstva betona u pogledu čvrstoće, propusnost, hemijske otpornosti i sl.

2.4 TRAJNOST BETONA

Empirijski je utvrđeno da ne postoji univerzalno trajan beton [6]. Uz pravilnu procenu uticaja sredine i uz optimalne uslove tokom svih procesa do formiranja očvrslle strukture, beton se može okarakterisati kao trajan materijal. Činjenica da beton može da bude izuzetno trajan materijal potvrđena je primerom kupole Pantenona u Rimu (*poglavlje 2.1*).

Tabela 2.1 Funkcionalni zahtevi trajnosti [29]

FUNKCIONALNI ZAHTEVI	OSNOVNI PARAMETRI
MINIMALNI KAPACITET NOSIVOSTI	ČVRSTOĆA BETONA, POPREČNI PRESEK ELEMENTA, ZAŠTITNI SLOJ, KOROZIJA ARMATURE
MAKSIMALNA PRIHVATLJIVA DEFORMACIJA	MODUL ELSTIČNOSTI, SKUPLJANJE, TEČENJE, TEMPERATURNE PROMENE, SLEGANJE
MAKSIMALNA PROPUSLJIVOST NA GASOVE I TEČNOSTI	PROPUSLJIVOST, DIFUZIJA, VELIČINA I POLOŽAJ PRSLINA I PUKOTINA

Savremene konstrukcije predstavljaju složen sistem u kome učestvuju materijali, konstruktivni sistemi i dejstva, i kao takve predstavljaju celinu [28]. Trajnost betona određena je funkcionalnim zahtevima konstrukcije koji definišu kvalitet betona (*tabela 2.1*) i predstavlja sposobnost zadržavanja zadatih karakteristika odnosno usled smanjene postojanosti strukture tokom vremena [30]. Opadanjem kapaciteta materijala tj. smanjene

i nedovoljne trajnost betona dolazi do pogoršanje stanja cele konstrukcije, čime se trajnost betona dovodi u direktnu vezu sa trajnošću konstrukcija.

Kod savremenih konstrukcija je prisutan trend povećanja agresivnosti sredine kao i funkcionalnih zahteva tokom eksploatacije, pa parametre trajnosti nije lako kvantifikovati. Ne postoji jedinstvena procedura na osnovu koje bi se ocenjivalo ponašanje konstrukcije tokom vremena. Prema konceptu pouzdanosti trajnost konstrukcija (eng. *Durability*) je definisana kao sposobnost da u skladu sa očekivanim uticajima konstrukcija održi svoje karakteristike tokom upotrebne veka (eng. *Serviceability*) [10]. Trajnom konstrukcijom se smatra ona konstrukcija koja ispunjava *optimalni upotrebni vek* odnosno vremenski period tokom koga se očekuje da za pretpostavljena dejstva u normalnim uslovima eksploatacije konstrukcija ima upotrebljivost. Pored nosivosti i sigurnosti konstrukcije, prema konceptu pouzdanosti trajnost predstavlja podjednako važan parametar [11].

U skladu sa principima održivog razvoja (eng. *Sustainable Development*) [31], ostvarenje optimalnog veka konstrukcija obuhvata određivanje relevantnih parametara u tri područja:

- *Definisanje negativnih uticaja na konstrukciju*
- *Pravilno definisanje sastava i kontrola kvaliteta upotrebljenih materijala*
- *Analiza interakcije objekta sa okolinom LCA (eng. life-cycle analysis)*

Utvrđivanje navedenih parametara obuhvata uticaje u skladu sa osnovnim principima održivosti: ekologije, ekonomije i društva (slika 2.5)



Slika 2.5 Šematski prikaz osnovnih principa održivosti
(eng. triple bottom line sustainability)

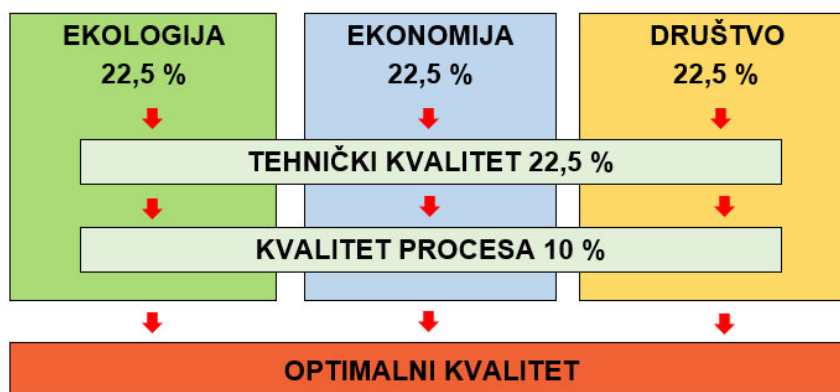
Sprovođenje koncepta održivosti u savremenom društvu je od esencijalnog značaja, a u oblasti građevinarstva je implementiran putem mnogih međunarodnih standarda. Standardom ISO 14040:2008 [32] utvrđeni su opšti okvir, principi i zahtevi za upravljanje životnom sredinom, a održivost u građevinarstvu je implementirana standardom SRPS EN 15643-1:2016 [33]. Koncept pouzdanosti konstrukcija kao širi deo koncepta održivog razvoja predmet je standarda poput:

- ISO 2394:2015: „General principles on reliability for structures“ [34]
- ISO 13822:2001: „Bases for design of structures - Assessment of existing structures“ [35]
- ISO 13823:2006: „General principles on the design of structures for durability“,
- ISO 16204:2012: „Durability. Service life design of concrete structure“,

Na konceptu pouzadnosti su bazirani EN standardi, standardi grupe BS 5760, *fib* Model Code [11], AASHTO¹¹ [36] i FHWA¹² [37] specifikacije za mostove.

Pored osnovnih principa u nemačkom standardu DIN 15643 [38] na kome je baziran EN standard [33] dodatno se zahteva princip funkcionalnog kvaliteta koji je definisan dopunskim zahtevima u vidu tehničkog kvaliteta i kvaliteta procesa tokom izgradnje. Standardom DIN 15643 kvantitativno je određeno učešće pojedinačnih zahteva za postizanje optimalnog kvaliteta što je prikazano u tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Procentualno učešće zahteva održivosti u ukupnom kvalitetu [39]



Na osnovu utvrđenih parametara i sprovedenih analiza za različite tipove konstrukcija prema evrokodu [10] je definisan tipični upotrebni vek prikazan u tabeli 2.3.

Tabela 2.3 Kategorizacija objekata obzirom na upotrebni vek [40]

KAT.	UPOTREBNI VEK [GOD]	PRIMERI
1	10	Privremeni i montažni objekti
2	10 do 25	Zamenjivi delovi konstrukcije
3	15 do 30	Poljoprivredni i slični objekti
4	50	Objekti visokogranje
5	100 i više	Monumentalni objekti, mostovi

Nedovoljna trajnost betona se može okarakterisati kao prisustvo greške u nekoj od faza: tokom *projektovanja* - usled loših polaznih pretpostavki i nedovoljne procene uticaja, tokom *izvođenja* – kao posledica grešaka u izvođenju, prisustva defekata ili nedovoljnog kvaliteta materijala i tokom *eksploatacije* – usled neadekvatne upotrebe, dejstava agresivne sredine ili promene parametara dejstva, nepredviđenih događaja ili kao posledica lošeg održavanja.



Slika 2.6 Lanac ljudskih grešaka [41]

¹¹ Association of State Highway and Transportation Officials

¹² Federal Highway Administration (US)

Na slici 2.6 prikazan je uzročno poslednični odnos ljudske greške na trajnost konstrukcija. Sprovedenjem brojnih studija i istraživanja utvrđeno je na pojavu grešaka koje utiču na nedovoljnu trajnost betona direktan uticaj ima ljudski faktor [41].

Pojam ljudske greške nema jasnu definiciju u literaturi i prisutno je više tumačenja [48]. Greške se mogu javiti kao *aleatrone*¹³ - slučajne, *epistemičke*¹⁴ - usled nedostatka podataka ili *ontološke*¹⁵ - kao posledica fenomena i nepredviđenih događaja. Većina rizika koji se javljaju usled grešaka obuhvaćeni su faktorima sigurnosti konstrukcija. Praksa pokazuje da su predustožnosti često nedovoljne i da se rizici izazvani neizvesnim i malo verovatnim događajima ipak javljaju.

Događaji koje je gotovo nemoguće zamisliti ili ih je tako teško sprečiti ili ublažiti nazivaju se "*crni labudovi*" [43]. Primer ovakvih događaja su teroristički napad u Njujorku na Svetski trgovinski centar ili cunamijem izazvano topljenje nuklearnog reaktora Fukušimi.

Uprkos svom opasnom potencijalu ljudske greške su oduvek imale određenu ulogu u inženjerskim poduhvatima i plodonosno su uticale na preispitivanje teorije i dotadašnje prakse [44].

2.5. OŠTEĆENJA BETONA

Trajnost betona predstavlja sposobnost zadržavanja postojanosti strukture tokom vremena [30]. Otpornost strukture betona zavisi od mehaničkih karakteristika koje su određene na osnovu očekivanih dejstava tokom eksploatacije i funkcionalnih zahteva konstrukcije. Narušavanjem strukture dolazi do smanjene otpornosti betona i smanjene trajnosti, a može se javiti kod svežeg i kod očvrslog betona.

Usled nepotpunog poštovanja tehnološkog procesa tokom izvođenja radova, dolazi do pojave određenih nepravilnosti u strukturi koje utiču na opadanje početnih – zadatih mehaničkih karakteristika betona, povećanja propustljivosti (eng. *Permeability of concrete*), a samim tim i smanjene otpornosti na agresivne uticaje. Ove nepravilnosti se kod svežeg betona manifestuju u vidu defekta strukture i pojave prslina.

Očvrsla struktura betona karakteristična je po izrazitoj nehomogenosti kao i po krstosti usled male čvrstoće na zatezanje i male duktilnosti. Usled dejstava, najslabija mesta u strukturi osetljiva su na pojavu oštećenja usled kojih dolazi do narušavanja strukture, stvaranja promena u betonu i pojave naponskih stanja. Oštećenja u betonu se mogu javiti na dva načina: kao fizička ili hemijska oštećenja. Fizička oštećenja predstavljaju narušavanje strukture betona usled kojih dolazi do pojave diskontinuiteta odnosno prekida u strukturi. Hemijska oštećenja predstavlja narušavanje strukture betona usled hemijskih reakcija usled kojih dolazi do povećanja poroznosti betona. Ova dva procesa su međusobno povezana i često se superponiraju [45]: nastankom fizičkih oštećenja omogućava se brži prodor vlage, vazduha i hemijski aktivnih jedinjenja koja razgrađuju cementni kamen; nastankom hemijskih oštećenja dolazi do taloženja produkata reakcija usled kojih se javljaju unutrašnja naprezanja u betonu koja stvaraju fizička oštećenja.

¹³ *Aleaoran* (lat. *Alea* – kocka, *Aleatorus* – kockar) – zavistan od slučaja, slučajan

¹⁴ *Epistemika* (grč. *ἐπιστήμη* - *epistémē*, – nauka, znanje) – nauka koja proučava znanje i razumevanje

¹⁵ *Ontologija* (grč. *τό ον- bíce u λόγος* - učenje, reč, zakon) – filozofski pravac koji proučava prirodu postojanja i opstanka (egzistencije)

2.5.1. DEFEKTI STRUKTURE

Tokom izrade betona u praksi često dolazi do pojave određenih nepravilnosti koje dovode do određenih nepravilnosti u strukturi koje predstavljaju *defekti strukture*.

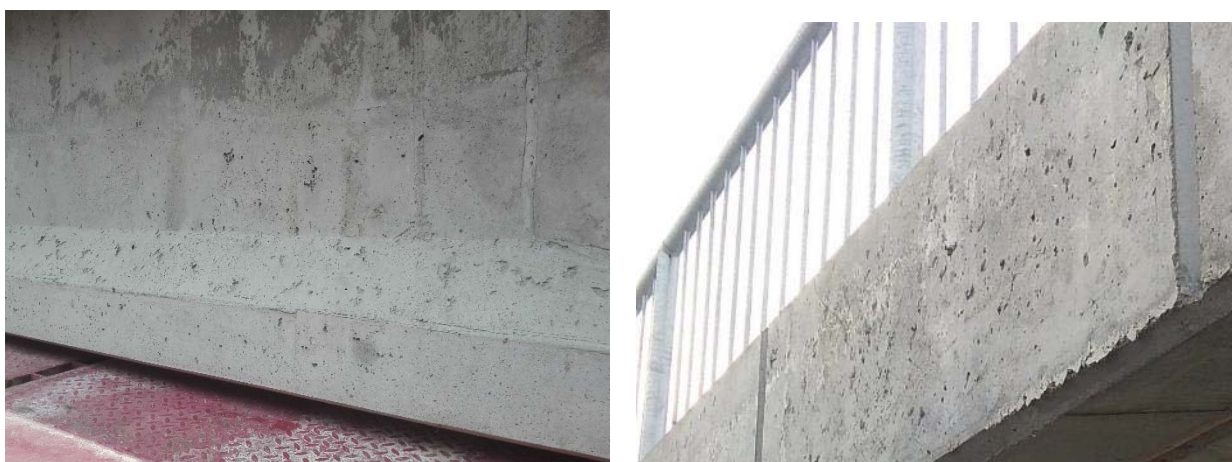
Usled nedovoljno ujednačene mase, grupisanja i izdvajanja komponenti iz betona dolazi do pojave *segregacije*. Segregacija predstavlja najčešći oblik defekta strukture i razlikuju se dva tipa.



Slika 2.7 Segregacija betona

Prvi tip segregacije predstavlja težnju krupnih zrna agregata da se izdvoje iz mešavine. Ova pojava je karakteristična za jako tečne mešavine sa prevelikim sadržajem vode ili jako suve mešavine kod kojih nije adekvatno ostvarena veza između agregata i veziva (*slika 2.7 levo*). Drugi tip segregacije se javlja kao posledica preteranog vibiranja used čega dolazi do propadanja krupnih zrna agregata u donje slojeve dok na površini dolazi do preteranog izdvajanja cementnog mleka (*slika 2.7 desno*). Ovaj tip segregacije se može javiti i kao posledica ugradnje betona sa velike visine.

Zarobljavanjem vode ili vazduha u betonu dolazi do formiranja praznina u strukturi u vidu „džepova“ ili „gnezda“. Gnezda se najčešće stvaraju kod betona sa velikim vodocementnim faktorom, gde mehurići vode ili vazduha nemogu da se probiju do površine već ostaju zarobljeni ispod krupnih zrna agregata, armature ili oplata (*slika 2.8*).



Slika 2.8 Zarobljeni mehurići vazduha ispod oplata

Zarobljavanje mehurića vode i formiranje „džepova“ često se javlja kod prefabrikovanih elemenata. Na slici 2.8 prikazane su zaostale šupljine na betonskim površinama

prefabrikovanih elemenata nastala zarobljavanjem mehurića vode između oplata i betona sa visokim vodocementnim faktorom. Na slici 2.8 levo prikazana su oštećenja na donjoj flanši nosača, a na slici 2.8 desno prikazana su oštećenja na montažnom ivičnom vencu. Zadržavanjem vode dolazi do formiranja praznina sfernog oblika dimenzija od nekoliko mikrona do 3-4 mm koje su prekrivene filmom očvrslog cementnog mleka. Zadržavanjem vazduha nastaju šupljine nepravilnog oblika, dimenzija od nekoliko mikrona do 1-15 mm. Kod betona spravljenih od drobljenih agregata odnosno sa agregatom nepravilnog oblika dolazi do kombinovanog zadržavanja vazduha i vode. U ovom slučaju veličina "gnezda" zavisi od granulometrijskog sastava agregata, oblika zrna, upotrebljenih aditiva i vodocementnog faktora.

2.5.2. POJAVA PRSLINA KOD SVEŽEG BETONA

Sveža betonska masa ima osobine elastično-plastične viskozne tečnosti sa određenom strukturalnom čvrstoćom [24]. Na strukturalnu čvrstoću svežeg betona utiče sadržaj vode koji se tokom procesa vezivanja postepeno smanjuje usled porasta temperature. Kretanjem vode u svežoj betonskoj masi dolazi do stvaranja mreže kapilara i pora koja utiče na smanjenje jačine veze između komponenata [6]. Promenom parametara temperature i vlažnosti dolazi do zapreminskih promena i pojave kontrakcija unutar sveže betonske mase koje dovode do pojave prslina na oslabljenim mestima u strukturi. Kao rezultat dugogodišnjih istraživanja napravljena je klasifikacija prslina koje se javljaju kod svežeg betona i prikazana u tabeli 2.4 [46].

Tabela 2.4 Klasifikacija fizičkih oštećenja kod svežeg betona prema CEB

VRSTA	RASPROSTIRANJE	ZONA NASTAJANJA	UZROK NASTAJANJA	RAZLOG NASTAJANJA	PREVENCIJA	VREME NASTAJANJA
PLASTIČNO SLEGANJE	zaštitni sloj Na vutama i kapitelima U zonama promenljive debljine elemenata	U debljim presecima Na vrhu stubova Ošupljene i kasetirane ploče	taloženje viška vode	Prerano sušenje svežeg betona	Regulacija uvučenog vazduha u betonu ili ponovno vibriranje betona	10 min – 3 h
PLASTIČNO SKUPLJANJE	Dijagonalno rasprostiranje	Nearmirane ploče	Niža stopa oticanja i rasprostiranja svežeg betona	Prerano sušenje svežeg betona	Poboljšati negu mladog betona	30 min – 6 h
	Nasumično rasprostiranje	Armirane ploče		Mala debljina zaštitnog sloja		
	Rasprostiranje u pravcu armature					
RANE TEMPERATURNE PROMENE	na površini elementa	Široki zidovi punog preseka	Prekomerno opuštanje T°	Ubrzano hlađenje betona	Kontrola temperature i/ili pokrivanje elementa	1 dan – 3 nedelje
	unutar elementa	Debele ploče punog preseka	Prekomerno prikupljanje T°			
DUGOTRAJNO SKUPLJANJE USLED SUŠENJA	/	Tanke ploče i zidovi	Loše izvedeni radni spojevi	Povećano skupljanje, nedovoljna nega betona	Redukovati sadržaj vode, poboljšati negu betona	Više nedelja – nekoliko meseci
NASUMIČNE/ SLUČAJNE	U zoni kontakta sa oplatom	Ravni zidovi	Nepropusnost oplata	Prebogata smeša betona	Poboljšati negu i završnu obradu betona	1-7 dana (U određenim slučajevima i mnogo kasnije)
	U zaštitnom sloju	Ploče	Preterano zaglađivanje	Loša nega betona		

Prsline se mogu javiti i kao posledica pokretanja sveže mase pre očvršćavanja betona. Ovakvi slučajevi se mogu javiti kao posledica mehaničkog delovanja, usled sleganja oplata pod opterećenjem ili kao posledica nanošenja opterećenja pre dostizanja pune čvrstoće betona.

Usled porasta temperature i smanjenja zapremine betona dolazi do pojave *skupljanja* ili *bubrenja betona* [47]. Skupljanje betona se može javiti u različitim fazama kao: *hidrataciono skupljanje* - izazvano procesom hidratacije, *plastično skupljanje* – izazvano gubitkom vode tokom procesa vezivanja i *hidrauličko skupljanje* koje nastaje gubitkom vode nakon procesa vezivanja cementa. Najveće i najizraženije je plastično skupljanje. Do plastičnog skupljanja dolazi pojavom kapilarnog pritiska u porama betona tokom isparavanja vode koji nije uniforman, nejednako se raspodeljuje kroz beton, izaziva napone zatezanja i pojavu prsina. Na pojavu prsina usled plastičnog skupljanja izuzetno su osetljivi svi elementi kod kojih je omigućeno brzo isparavanje vode poput tankih površinskih elemenata (ploča) ili na mestima veze između elemenata. Tipična pojava oštećenja usled plastičnog skupljanja je pojava paralelnih prsina pod uglom od 45° na nejednakom rastojanju. Ove prsline su uglavnom površinskog karaktera najčešće 2-3 mm ispod površine, dok se dubinska oštećenja retko javljaju. Usled naglog gubitka vode iz betona dolazi do pojave sleganja agregata odnosno do pojave koju nazivamo *plastično sleganje*. Naglim gubitkom vode dolazi do konsolidacije odnosno sleganja agregata pri čemu voda izbija na površinu betonskog elementa. Kao posledica plastičnog sleganja dolazi do pojave prsina koje se prostiru u pravcu pružanja armature. Prsline nastale usled plastičnog sleganja betona mahom su zastupljene u zaštitnom sloju betona.



Slika 2.9 Prsline usled plastičnog skupljanja (levo) i plastičnog sleganja (desno)

Na slici 2.9 levo su prikazane prsline nastale usled plastičnog skupljanja na kolovoznoj ploči mosta; na slici 2.9 desno prikazane su prsline nastale usled plastičnog sleganja betona. Usled osetljivosti procesa formiranja strukture betona i specifičnosti izvođenja betonskih radova tokom kog je veoma teško obezbediti idealne uslove, pojavu prsina kod betona je gotovo nemoguće izbeći, pa je određen procenat prsina u betonu dozvoljen [10].

U nacionalnom aneksu standarda EN 1992-1-1:2004 [48] u tabeli 7.1N za armirano-betonske i prednapregnute konstrukcije date su maksimalne vrednosti širine prsina, a za prednapregnute mostove u nacionalnom aneksu standarda EN 1992-2 [49] u tabeli 7.101N date su maksimalne vrednosti širine prsline.

Prsline veće od 0,4 mm klasifikuju se kao nedozvoljene prsline i predstavljaju fizička oštećenja betona. Pojavom prsline odnosno prekida u strukturi, dalji tok hidratacije i prirasta čvrstoće prestaje da ima uticaj na konačne mehaničke osobine betona usled čega dolazi do nepovratnog gubitka početnih mehaničkih osobina očvrslog betona [7].

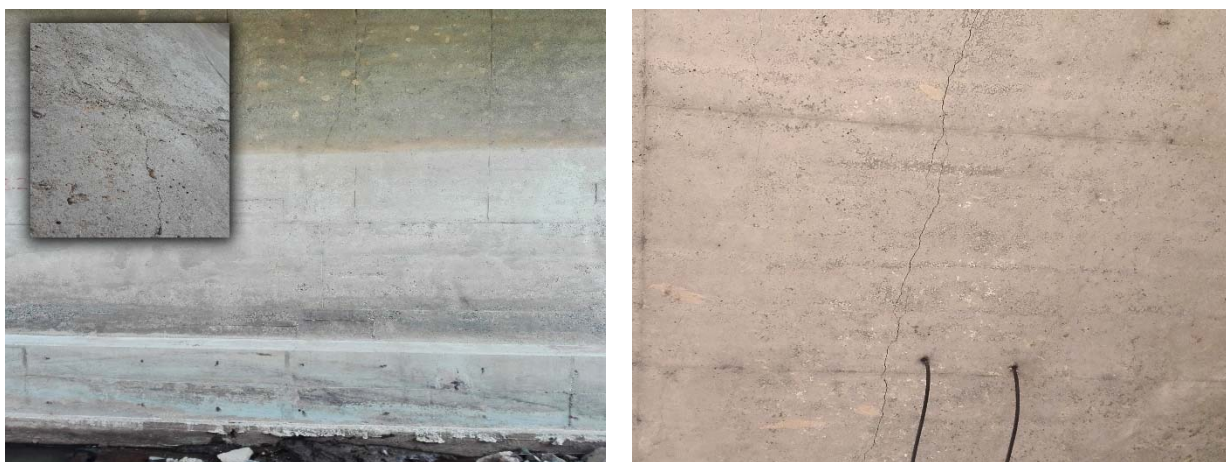
U određenim uslovima po očvršćavanju betona može doći do zatvaranja finih prsline usled reakcije mineralnih supstanci koje u procesu hidratacije nisu bile hidratane. Ovaj fenomen se naziva „*samozalečenje*“ (eng. *self-healing*), a njegov nastanak se uglavnom zapaža kod betona izloženih neprekidnom delovanju vlažne sredine [47].

2.5.3. FIZIČKA OŠTEĆENJA OČVRSLOG BETONA

Fizička oštećenja betona predstavljaju sva oštećenja usled kojih dolazi do narušavanja strukture očvrslog betona. Pojava i stepen fizičkog oštećenja betona zavise od kvaliteta betona i zastupljenosti defekata u strukturi, funkcionalnih zahteva konstrukcije kojima su definisana naprezanja, stepena izloženosti i agresivnosti okoline u kojoj se konstrukcija nalazi [29]. Pojava i stepen oštećenja u mnogome zavise od vrste i inteziteta dejstva i uslova kontakta sa betonom. U zavisnosti od navedenih parametara, fizička oštećenja u betonu manifestuju u vidu pojave prsline ili u vidu gubitka materijala.

Do pojave prsline dolazi usled spoljašnjih ili unutrašnjih naprezanja nastalih promenom fizičkih ili hemijskih parametara sredine ili kombinovanim dejstvom ova dva parametra [46]. Prsline se najčešće javljaju kao prekoračenje čvrstoće betona na zatezanje, a mogu se javiti i kao posledica prekoračenja čvrstoće na pritisak. Kod standardnih betona granica pojave prsline pri naprezanju je na oko 70% čvrstoće na pritisak, dok kod betona visokih kvaliteta oštećenja počinju da budu vidljiva na oko 90% čvrstoće na pritisak [50]. Prema CEB-u, prsline se mogu javiti kao [46]:

- Prsline usled savijanja (eng. *flexural or bedding cracks*)
- Prsline usled smicanja (eng. *shear cracks*)
- Prsline izazvane torzijom (eng. *torsion cracks*)
- Prsline usled smicanja pri probijanju (eng. *punching shear cracks*)
- Prsline usled otkaza sidrenja (eng. *cracks due to anchorage failure*)



Slika 2.10 Prsline sa donje strane kolovozne ploče mosta

Na slici 2.10 prikazane su prsline elementima mostova. Na slici levo prikazana je kosa pukotina na srednjem stubu mosta izazvana rotacijom oslonaca. Na slici desno prikazana

je poprečna pukotina ispod kolovozne ploče mosta izazvana smičućim silama usled rotacije i sleganja oslonaca.

U zavisnosti od vrste napreznja prsline mogu biti različite orijentacije, dužine, širine i dubine. Prsline koje se prostiru u pravcu pružanja glavne armature ukazuju na postojanje smičućih sila, smanjenje čvrstoće na pritisak betona i ugroženost armature na pojavu korozije. Prsline koje se prostiru u pravcu prostiranja uzengija, odnosno upravno na pravac nanetog opterećenja ukazuju na pojavu sila zatezanja ili savijanja. Dijagonalne prsline, odnosno pukotine koje se ne poklapaju sa pravcem pružanja armaturnih šipki ukazuju na pravac glavnih napona zatezanja i postojanje torzije.

Usled računskih opterećenja retko dolazi do pojave nedozvoljenih prsline. Ukoliko se prsline pojave u zdravom betonu pri normalnim uslovima eksploatacije izazvane računskim opterećenjima nemaju ozbiljnije štetne posledice, ali nam ukazuju na određene nedostatke u konstrukciji.

Kao kompozit sastavljen od više različitih materijala beton ima veoma složene reološke¹⁶ osobine [25]. U zavisnosti od kvaliteta betona, stepena napreznja i brzine nanošenja opterećenja na betonu može doći do pojave deformacija i izazvati lom u betonu. U trenutku nanošenja opterećenja dolazi do deformacija koje se nazivaju *trenutne deformacije*. Pri niskim vrednostima napona deformacije su izražene u elastičnoj zoni i ove deformacije nazivamo *viskozno tečenje*. Pri dejstvu visokih napona ili pri dugotrajnom opterećenju mogu se javiti nekoliko puta veće deformacije od početnih, pri čemu dolazi do pojave *plastičnog tečenja* ili samo *tečenja materijala* [24]. Tečenje betona karakteriše relativno kratko vreme pojave i javlja se pri naponima koju su daleko veći od radnog napona betona u području napona bliskih granici loma. Tečenje se definiše kao „povećanje deformacije tokom vremena pri konstantnom opterećenju izazvane tim opterećenjem“ [51]. Sam naziv „tečenje“ potiče iz analogije ovog fenomena sa tečnim supstancama. Na tečenje veliki uticaj ima sadržaj vlage u betonu gde usled preraspodele tečnosti dolazi do povećanje deformacija. Nakon relativno brze pojave deformacije dolazi do usporavanja pri čemu vrednosti teže konstanti, dolazi do stabilizacije deformacije ili *relaksacije napona* [24]. Pri dovoljno velikom opterećenju ne dolazi do relaksacije napona, deformacije se nastavljaju pri čemu dolazi do pojave loma.



Slika 2.11 Oštećenja betona usled deformacije

¹⁶ Reologija – naučna disciplina koja proučava pojavu i razvitak deformacija pod uticajem spoljnih sila

Na slici 2.11 prikazana su neka od oštećenja nastala usled deformacija. Na slici levo prikazano je oštećenje pendela mosta nastalo usled dejstva saobraćajnih oštećenja. Na slici 2.11 desno prikazana je deformacija glavnih nosača mosta u sredini polja nastala usled dugotrajnog opterećenja.

Prema Evrokodovima graničnim stanjem upotrebljivosti definisano je granično stanje prslina [48] i granično stanje deformacija [10] koja zavise od naprezanja i klasifikacije sredine u pogledu vlažnosti [12]. Prekoračenjem graničnog stanja prslina dolazi pojave nedozvoljenih prslina, dubinskih oštećenja u vidu pukotina pri čemu se stvaraju trajna naponska stanja u armiranom betonsku. Prekoračenjem graničnog stanja deformacija dolazi do loma armiranog betona. Do pojave loma betona može doći:

- Usled popuštanja betona – pojava neduktilnog loma odnosno loma bez naglašenih pukotina i pojave većih deformacija
- Usled popuštanja armature – gubitka preseka, naglog povećanja naprezanja u elementu, pojave nedozvoljenih prslina i plastifikacije armature
- Usled istovremenog popuštanja betona i armature - tzv. balansirani lom koji se javlja nakon pojave naglašenih deformacija i pukotina u elementu.

Pored pojave prslina, fizička oštećenja na betonu se mogu manifestovati u vidu ljuštenja, raslojavanja i habanja betona pri čemu dolazi do trošenja i gubitka materijala. Gubitkom odnosno trošenjem materijala dolazi do smanjenja poprečnog preseka elementa i smanjenja njegove nosivosti. Kod armirano betonskih elementa usled gubitka materijala dolazi do smanjenja zaštitnog sloja betona preko armature, pri čemu se povećava stepen izloženosti armature na agresivna dejstva.

2.5.4. HEMIJSKA OŠTEĆENJA OČVRSLOG BETONA

Beton ima značajnu hemijsku aktivnost, pa se trajnost betona često ocenjuje stepenom oštećenja koja beton pretrpi usled hemijskih reakcija [8]. Pojava i stepen hemijskih oštećenja zavise od sastava strukture betona odnosno njene poroznosti i sadržaja hemiski aktivnih materija u betonu, hemijskog sastava spoljne sredine kao i fizičkih parametara – temperature i vlažnosti koji definišu uslove kontakta. Za odvijanje hemijskih reakcija neophodan je transportni mehanizam koji u najvećoj meri zavisi sadržaja vlage i poroznosti strukture [24]. Određeni procenat vlage je stalno prisutan u betonu u vidu vezanih ili apsorbovanih molekula vode [9], ali je ta količina nedovoljna da se beton ovlaži. Promenom spoljne temperature i vazdušnog pritiska u porama betona dolazi do kondezacije i apsorbovanja vlage i zasićenja betona. Usled kapilarne strukture beton brže upija vodu iz okoline a sporije je otpušta, pa je uglavnom prosečna vlažnost betona veća od prosečne vlažnosti sredine. Pri dostizanju relativne vlažnosti od 40-45% dolazi do zasićenja kapilarne strukture betona vlagom pri čemu se stvara sredina koja poseduje svojstva tečnosti. Prema vlažnosti prepoznaju se tri stepena izloženosti [48]:

- "*slaba*" - za elemente koji nisu direktno izloženi vlazi, atmosferskim i korozivnim uticajima;
- "*srednja*" - za elemente koji su direktno izloženi vlazi, atmosferskim i korozivnim uticajima;
- "*jaka*" - za elemente koji su izloženi jakim korozivnim uticajima, tečnim ili gasovitim, uključujući neposredni uticaj morske vode i vazduha u blizini mora.

U vlažnoj sredini omogućen je transpotni mehanizam po principu difuzije pri čemu dolazi do formiranja vodenih rastvora sa jedinjenjima u gasovitom, tečnom i čvrstom stanju. Vлага zasićuje pore betona manje od 10^{-6} cm pa je difuzija gasova i formiranje vodenih rastvora moguće povišenjem temperature i delimičnim isparavanjem vode. Tečna jedinjenja formiraju vodene rastvore direktnim kvašenjem površine betona, uranjanjem ili filtracijom tečnosti kroz beton. Čvrsta jedinjenja u vidu sitnih lebdećih čestica soli, aerosoli i prašine kontamirana su u vazduhu industrijskih i urbanih sredina formiraju vodene rastvore u zavisnosti od njihove *disperzivnost*¹⁷ i *higroskopnosti*¹⁸ i *rastvorljivosti*. U tabeli 2.5 prikazan je uticaj zasićenja sredine vlagom na korozione procese kod betona [9].

Tabela 2.5 Intezitet korozije u zavisnosti od vlažnosti sredine

VAZDUŠNA SREDINA PREMA VLAŽNOSTI	KOROZIJA BETONA		KOROZIJA ARMATURE	
	karbonatizacija	hemijska agresija	karbonatizacija	Dejstvo hlorida
VEOMA SUVA <40%	neznatan	bez značaja	bez značaja	bez značaja
SUVA 40-60%	visok	bez značaja	neznatan	neznatan
NORMALNA 60-75%	srednji	bez značaja	visok	visok
VLAŽNA >75%	neznatan	neznatan	srednji	veoma visok
ZASIĆENA > 98%	bez značaja	visok	neznatan	neznatan

U zavisnosti od hemijskog porekla vodeni rastvori se dele na elektrolite i neelektrolite. Elektroliti obuhvataju vodene rastvore kiselina, baza i soli. Ovi rastvori su karakteristični po tome što sadrže slobodne jone i dobri su provodnici struje, a agresivnost im je određena pH-vrednošću sredine i tvrdoćom vode. Stepenn agresivnosti elektrolita zavisi od prisustva i aktivnosti negativno naelektrisanih vodonikovih jona, odnosno od pH-vrednosti rastvora [52].

Tabela 2.6 pH skala

SREDINA	PH-VREDNOST
ULTRA KISELA	0 - 3.5
EKSTREMNO KISELA	3.5 – 4.4
VEOMA JAKO KISELE	4.5 – 5.0
JAKO KISELE	5.1 – 5.5
UMERENO KISELE	5.6 – 6.0
SLABO KISELE	6.1 – 6.5
NEUTRALNE	6.6 – 7.3
SLABO ALKALNE	7.4 – 7.8
UMERENO ALKALNE	7.9 – 8.4
JAKO ALKALNE	8.5 – 9.0
VEOMA JAKO ALKALNE	9.0 – 14,0

¹⁷ Disperszivnost (lat. *Dispersio*)- Razlaganje, rasipanje, rasprašivanje

¹⁸ Higroskopan (fr. *hygroscopie*)- koji upija vlagu i bubri

pH-vrednost je bezdimenzionalna veličina određena logaritamskim rasporedom sadržaja negativno naelektrisanih jona vodonika (*tabela 2.6*). pH-vrednost određena je odnosom kalcijuma (Ca) i magnezijuma (Mg) i sadržajem ugljen-dioksida (CO₂), odnosno od *karbonatnom tvrdoćom vode* [53].

Tabela 2.7 Karbonatna tvrdoća vode

Tvrdoća °dH	KVALITET VODE
0 - 5	<i>Vrlo meka</i>
5 - 10	<i>meka</i>
10 - 15	<i>Umereno tvrda</i>
15 - 25	<i>tvrda</i>
>25	<i>Vrlo tvrda</i>

Teške vode imaju povećan sadržaj ugljen-dioksida i su slabo agresivne, dok usled malog sadržaja soli meke vode predstavljaju odlične rastvarače koje reaguju sa jedinjenjima cementne paste i razgrađuju cementni kamen.

Neelektroliti obuhvataju rastvore ulja, ugljovodonika i organskih rastvarača. Prema betonu rastvori uja i naftnih derivata spadaju u slabo agresevna jedinjenja dok su rastvarači praktično neagresivni; prema armaturi naftni derivati i rastvarači slabo agresivni, dok su ulja potpuno neagresivna.

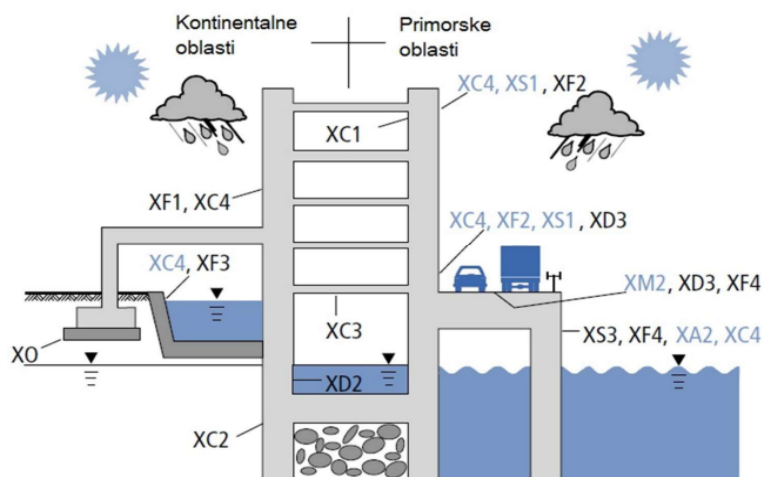
Filtracijom vodenih rastvora dolazi do hidrolize i rastvaranja soli iz cementnog kamena odnosno do procesa koji nazivamo *izluživanje* betona. Tipične soli koje se izlužuju su sulfati i karbonati natrijuma, kalijuma i kalcijuma. Kontaktom produkata izluživanja sa jedinjenjima iz vazduha dolazi do stvaranja naslaga odnosno do procesa koji nazivamo *iscvetavanja* betona. Pojava iscvetavanja ukazuje na to da se proces izluživanja dešava unutar betona. Procesi izluživanja i iscvetavanja su međusobno povezani i često se u literaturi sreću pod zajedničkim nazivom *eflorescencija* [7]. Dugotrajnim izluživanjem znatno se povećava se propustljivost betona čime dolazi do značajnog opadanja čvrstoće na pritisak i omogućava se prodor drugih agresivnih jedinjenja.

Pri kontaktu betona sa vodenim rastvorima koji sadrže značajne količine soli, dolazi do njihovog delimičnog zadržavanja u kapilarnim porama. Nakon isparavanja vode dolazi do taloženja i *kristalizacije soli*, pri čemu nataložena jedinjenja uvećavaju svoju zapreminu. Cikličnim ponavljanjem procesa kvašenja i sušenja dolazi do povećavanja koncentracije nataloženih soli do te mere da mogu izazvati unutrašnja naprezanja u betonu i pojavu prslina. Ovaj problem je posebno izražen na mestima gde osciluje nivo vodostaja morske, podzemne ili drugih voda bogatih solima.

Hemijska oštećenja se manifestuju razgrađivanjem cementnog kamena, slabljenja veza između komponenata i povećanjem poroznosti strukture betona usled čega dolazi do opadanja mehaničkih karakteristika betona i njegove postojanosti.

2.5.5. KLASE IZLOŽENOSTI BETONA


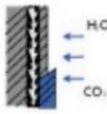

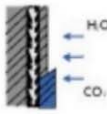











Za određene hemijske i fizičke uslove sredine definisane su klase izloženosti prema kojima se određuju minimalni uslovi kvaliteta betona [12]. Parametri sredine su definisani prema pojednostavljenoj klasifikaciji sredine u kojoj se konstrukcija nalazi.



Slika 2.12 Pojednostavljena klasifikacija sredine prema SRPS EN 206


Klasifikacijom sredine prema SRPS EN 206:2017 [12] i SRPS EN 1992-1-1:2015 [48] definisane su klase izloženosti prema vlažnosti sredine (tabela 2.8).

Tabela 2.8 Klase izloženosti u zavisnosti od uslova sredine prema EN 206

KLASE	OPIS SREDINE	PRIMERI USLOVA ZA DATU SREDINU
XO	Bez opasnosti od agresivnih dejstva	
/	 Bez uticaja	Nearmirani beton Armirani beton u veoma suvim uslovima
XC	Korozija izazvana karbonacijom	
XC1	 Suva ili stalno mokra	Unutrašnjost zgrada/ beton koji je stalno pod vodom
XC2	 Mokra, retko suva	Betoni u dugotrajnom kontaktu sa vodom
XC3	 Umereno vlažna	Betoni izloženi umerenom ili visokom vlažnošću
XC4	Ciklično mokra i suva	Svi betoni koji nisu obuhvaćeni klasom XC2
XD	Korozija izazvana hloridima	
XD1	 Umereno vlažna	Površine betone izložene hloridima iz vazduha
XD2	 Konstantno mokra	Bazeni, elementi izloženi vodam koji sadrže hloride
XD3	Ciklično mokra i suva	Betoni izloženi naizmeničnom kvašenju i sušenju
XS	Korozija izazvana hloridima iz morske vode	
XS1	 Umereno vlažna	Konstrukcije u blizini ili na obali mora
XS2	 Konstantno mokra	Delovi konstrukcije u morskoj vodi
XS3	Ciklično mokra i suva	Delovi konstrukcije u moru koja su pod dejstvom plime i oseke, zapljuskivanja i raspršivanja
XF	Korozija izazvana temperaturnim promenama (zamrzavanje/topljenje)	
XF1	 Umereno zasićena vodom	Vertikalne površine betona izložene kiši i zamrzavanju
XF2	 Umereno zasićena vodom sa solima za odleđivanje	Vertikalne površine kod objekata na putevima izložene zamrzavanju i solima za odmrzavanje
XF3	 Jako zasićena vodom bez soli za odleđivanje	Horizontalne površine betona izložene kiši i zamrzavanju
XF4	 Jako zasićena vodom sa solima za odleđivanje	površine izložene dejstvu soli za odleđivanje; konstrukcije u moru izložene zamrzavanju
XA	Hemijska agresija	
XA1	 Malo agresivna hemijska sredina	Rezebazeni u postrojenjima za tretiranje otpadnih voda, bazeni za organska jedinjenja
XA2	 Umereno agresivna hemijska sredina	Betonski elementi u dodiru sa jedinjenjima morske vode; elementi u agresivnom tlu
XA3	 Jako agresivna hemijska sredina	Rezervoari za otpadne vode; bazeni za silažu; rashladni tornjevi na dimnjacima

Granične vrednosti za određivanje klasa izloženosti za hemijsku agresiju kod prirodnog tla i podzemnih voda su standardom [12] date u posebnim tabelama. Standardom SRPS EN 1992-2:2014 [48] su dodatno definisana pravila za određivanje klase izloženosti na mostovima sa napomenom da se dodatno moraju razmotriti uticaji hemijskih dejstva sredine u pogledu prisustva soli, kiselina, sulfata ili hlorida kao i fizička dejstva sredine u pogledu temperature, abrazije i prisustva vode. U domaćem standardu SRPS U.M1.206:2013. i Nemačkoj verziji propisa *DIN-EN 206* [55] se dodatno prepoznaje klasa oštećenja XM koja se odnosi na površinsko habanje i abraziju (*tabela 2.9*).

Tabela 2.9 Klase XM prema

KLASE	OPIS SREDINE		PRIMERI USLOVA ZA DATU SREDINU
XM	Fizička agresija – beton izložen habanju i abraziji		
XM1		Slabo habanje	površine i elementi izloženi dejstvu vozila sa gumenim pneumaticima površine izložene umerenim sedimentnim transportom i umerenim brzinama protoka vode
XM2		Umereno habanje	površine i elementi izloženi dejstvu vozila sa gumenim ili tvrdim pneumaticima (npr. viljuškari) mimi slivovi opterećeni umerenim sedimentnim transportom i protokom velike brzine
XM3		Jako habanje	površine i elementi izloženi dejstvu vozila sa tvrdim npr. kranke staze) ili čeličnim gusenicama; Površine izložene velikim sedimentnim transportom i protokom vode velike brzine; vrtložno kretanje vode

Veliki broj uslova sredine nije definisan, dok oko određenih uslova sredine ne postoji opšti konsenzus i nije opšte prihvaćen. Klasifikacijom nije obuhvaćen zamor usled dinamičkog opterećenja kao i simultano dejstvo dinamičkog opterećenja i korozije. Opšte prihvaćeni modeli ne postoje ni za alkalno-agregatnu reakciju i dejstvo sulfata.

Prema klasama izloženosti prikazanih u tabelama 2.8 i 2.9 standardom su date preporučene granične vrednosti sastava i svojstva betona kao i preporučene debljine zaštitnih slojeva betona preko armature [12] (*tabela 2.10*).

Tabela 2.10 Minimalni zaštitni sloj betona preko armature prema evrokodu (u mm)

Klasa konstrukcije	KLASA IZLOŽENOSTI						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Određivnje debljine zaštitnog sloja prethodi određivanje klase konstrukcije koja je određena nacionalnim aneksom E standarda [55]. Klasa konstrukcije se određuje prema eksploatacionom veku, gde je maksimalna klasa konstrukcija je S4, a minimalna S1. Prema kalsifikaciji preporučena klasa konstrukcija za proračunski eksploatacioni vek od 50 godina je S4 za indikativne čvrstoće betona.

Preporučene modifikacije klase konstrukcije date su u tabeli 2.11.

Tabela 2.11 Preporučena klasa konstrukcije

KRITERIJUM	KLASE IZLOŽENOSTI						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/ XS2/ XS3
Proračunski eksploatacioni vek od 100 god.	<i>povećati klasu za 2</i>	<i>povećati klasu za 2</i>	<i>povećati klasu za 2</i>	<i>povećati klasu za 2</i>	<i>povećati klasu za 2</i>	<i>povećati klasu za 2</i>	<i>povećati klasu za 2</i>
Klasa čvrstoće	$\geq C30/37$ <i>smanjiti klasu za 1</i>	$\geq C30/37$ <i>smanjiti klasu za 1</i>	$\geq C35/45$ <i>smanjiti klasu za 1</i>	$\geq C40/50$ <i>smanjiti klasu za 1</i>	$\geq C40/50$ <i>smanjiti klasu za 1</i>	$\geq C40/50$ <i>smanjiti klasu za 1</i>	$\geq C45/55$ <i>smanjiti klasu za 1</i>
Elementi kod kojih postupak građenja nema uticaja na položaj armature	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>
Obezbeđena posebna kontrola kvaliteta proizvodnje betona	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>	<i>smanjiti klasu za 1</i>

2.6. DETEKCIJA OŠTEĆENJA

Optimalnu trajnost konstrukcija moguće je ostvariti putem sistema kontrole kvaliteta koji obuhvata tri glavne faze: ispitivanja stanja i kvaliteta materijala, ispitivanja odgovora konstrukcije na opterećenja kojima je izložena i analitičko poređenje dobijenih rezultata. Prema EC0 [10] sprovođenje ispitivanja je obavezno radi:

- određivanja specifičnih svojstva materijala
- smanjenja parametara nesigurnosti za nosivost konstrukcije
- tačnijeg određivanja dejstava na konstrukcije
- smanjenja parametara nesigurnosti za dejstva na konstrukcije
- direktnog određivanja granične nosivosti ili upotrebljivosti konstrukcije,
- ispitivanje u toku izvođenja, i nakon izvođenja radi provere ponašanja gotove konstrukcije

Osnovni cilj ispitivanja konstrukcija u eksploataciji je dobijanje praktičnih saznanja o stvarnoj nosivosti, stabilnosti, nastajanju i veličinama deformacija i prslina, kao i ostalim parametrima ponašanja noseće konstrukcije, ili njenih delova [56]. Ispitivanjem je moguće utvrditi kvalitet betona i prisustvo defekta koji su nastali tokom izgradnje, za praćenje stanja armirano betonakih konstrukcija putem monitoringa ili za utvrđivanje uzroka degradacije materijala i stepena nastalih oštećenja armiranog betona [57].

Pojava oštećenja u betonu nije vremenski određena i može se javiti u bilo kojoj fazi tokom upotrebe konstrukcije. Poznavanje realnih karakteristika betona i stepena oštećenja od esencijalnog je značaja za utvrđivanje preostalog upotrebnog veka konstrukcije. Otkrivanje oštećenja u ranoj fazi praćenje razvoja oštećenja tokom vremena je od velikog značaja za trajnost i održanje parametara pouzdanosti konstrukcije tokom upotrebnog veka. Usled sve većih zahteva i strožih uslova eksploatacije u cilju ispunjenja optimalnog upotrebnog veka betonske konstrukcije zahtevaju konstantno praćenje i monitoring.

Monitoring predstavlja proceduru prikupljanja i klasifikacije podataka o nastanku i uzrocima pojave oštećenja, veličinama nastalih deformacija i prslina i praćenje razvoja oštećenja tokom vremena sa ciljem dobijanja praktičnih saznanja o realnom stanju objekta i kvalitetu ugrađenih materijala. Monitoring se sprovodi prema definisanom planu u određenim vremenskim intervalima sa ciljem dobijanja ujednačenih rezultata koji su relevantni za međusobno poređenje. Kod konstrukcija u eksploataciji pri utvrđivanju realnih karakteristika betona prethodi vizuelna metoda ocene betonske površine.

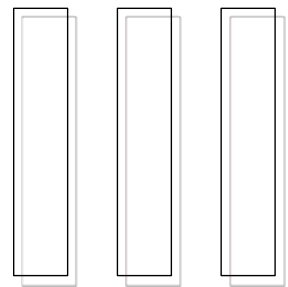
Prema DIN 1076 i smernici RI-EBW-Pruf 88 [16] data je kategorizacija oštećenja površine betona od 0 za površinu bez oštećenja do 4 za velika oštećenja. Na osnovu vizuelnog pregleda određuju se mesta na konstrukciji gde će se sprovoditi detaljna ispitivanja i vrsta ispitivanja. Za ispitivanje betona razvijen je veliki broj metoda koje se u zavisnosti od pristupa ispitivanju dele u dve grupe: *destruktivne* odnosno razorne metode i *nedestruktivne* odnosno metode bez razaranja betonskog elementa. Nakon vizuelnog pregleda i kategorizacije oštećenja prikazanih u tabeli, prema pravilu za manja oštećenja kategorije 0,1 i 2 se primenjuju metode ispitivanja bez razaranja, dok se za kateorije 3 i 4 primenjuju razorne metode ispitivanja.

Destruktivne metode se zasnivaju na ispitivanju mehaničkih karakteristika betona putem uzoraka uzetih direktno iz betonskog elementa konstrukcije koji se ispituje. Ispitivanjima sprovedenim na ovaj način se direktno i najpreciznije dobijaju vrednosti željenih karakteristika. Obzirom na činjenicu da je beton izrazito nehomogeni materijal, direktnim uzrokovanjem se ne dobijaju podaci o ukupnim svojstvima materijala u konstrukciji, već samo podaci o elementu konstrukcije koji se ispituje. Nedostatak ovih metoda predstavlja i to što se pri uzimanju uzoraka razara i oslabljuje betonski element koji se ispituje. Ove metode se najčešće koriste za naknadno utvrđivanje kvaliteta ugrađenih materijala. Određivanje mesta uzorkovanja se određuje na osnovu vizuelnog pregleda betonske površine koja se ispitiye, a broj uzoraka zavisi od uloge elementa u konstrukciji. Zbog nehomogenosti betona potrebno je uzimati više uzoraka kako bi se statističkom raspodelo odredile karakteristike betona.

Nedestruktivne metode bazirane su na utvrđivanju karakteristika betona na osnovu pojedinih fizičkih osobina betona. Putem ovih metoda merenja se vrše direktno na betonu bez stvaranja oštećenja i narušavanja elementa. Prednosti primene nerazornih metoda ogleda se u tome što se merenja nesmetano mogu vršiti na objektu tokom eksploatacije. Na istom mernom mestu se mogu vršiti merenja sa više metoda ili ponoviti više merenja istom metodom. Merenja se odvijaju relativno brzo, ne zahtevaju posebnu pripremu mernih mesta, a aparatura je lako mobilna. Nedostatak ovih metoda ogleda se u činjenici da usled varijacija određenih parametrima sredine poput temperature i vlažnosti može doći do velikih oscilacija u dobijenim rezultatima, pa je često za dobijanje rezultata potrebno kombinovati više različitih metoda kako bi se izvršilo poređenje rezultata. Parametri materijala se ne dobijaju se direktno već preračunavanjem na osnovu merenih svojstava. Rezultati mogu oscilovati i usled nestručnosti osoblja koja vrše merenja, pa se u cilju dobijanja pouzdanih rezultata za rukovanje aparaturom zahteva posebno stručno osposobljen kadar. Prema načinu ispitivanja, nedestruktivne metode se dele na: optičke, akustične, magnetne i električne metode. Jedna od najbolje teoretski obrazloženih i praktično potvrđenih metoda ispitivanja je metoda ispitivanja ultrazvukom [57].

*„Najbitnija stvar koju možete
načiniti je greška! Ne možete
ništa naučiti iz savršenstva“*

ADAM OSBORNE



POGLAVLJE

III DETERIORACIONI MEHANIZMI KOD BETONA

3.1 DETERIORACIJA BETONA

Korozija¹ je jedan od permanentnih procesa u prirodi kome u manjoj ili većoj meri podležu svi prirodni i veštački materijali. Termin korozija se uglavnom odnosi na hemijsko propadanje materijala, ali zbog mnogih specifičnosti tokom procesa propadanja termin se odnosi i na fizičko propadanje materijala. Složen proces fizičko-hemijskog propadanja materijala naziva se *deterioracija*². Deterioracija predstavlja vremenski zavisnu pojavu razaranja strukture materijala usled koje dolazi do opadanja i gubitka fizičkih i mehaničkih svojstva materijala, a samim tim i upotrebljivosti materijala [9]. Proces deterioracije predstavlja osnovni mehanizam starenja materijala. Brzina i stepen deterioracije zavise od sastava strukture materijala, vrste i inteziteta dejstva, parametara sredine stepena izloženosti dejstvu kojima su definisani uslovi kontakta. Deterioracija se retko javlja kao posledica samo jednog faktora već najčešće usled niza povezanih faktora koji dovode do pojave komplikovanih mehanizama oštećenja.

Deterioracija betona predstavlja vremenski zavisnu pojavu koja se javlja kao rezultat smanjene ili nedovoljne otpornosti betona na agresivne uslove sredine u kojoj se nalazi [8]. Kao kompozita sastavljenog od dva različita materijala kod armiranog betona razlikuju se dva osnovna deterioraciona mehanizma: *korozija betona* i *korozija armature* [11].

Korozija betona predstavlja složen mehanizam fizičko-hemijskog propadanja strukture betona usled dejstava kojima je izložen. Usled dejstva spoljnih sila ili unutrašnjih naprezanja na betonu dolazi do pojave fizičkih oštećenja i stvaranja trajnih promena u strukturi. Oštećenja se manifestuju u vidu pojava prekida u strukturi, povećanja poroznosti strukture ili gubitka materijala pri čemu opadaju početne mehaničke karakteristike betona (*poglavlje 2.5*). Propagacijom oštećenja tokom vremena dolazi do kompletnog gubitka svojstva betona i pojave nekog od graničnih stanja [10].

Korozija armature predstavlja složen mehanizam fizičko-hemijskog propadanja armaturnog čelika u betonu. Pojava korozije armature nastaje kao rezultat hemijskog procesa oksidacije kontaktom čelika sa kiseonikom i vlagom ili kao rezultat elektrohemijskih procesa usled kontakta armature sa hemijski aktivnim jedinjenjima. Usled korozije armature dolazi do bubrenja čvrste faze i povećanja zapremine čelika što dovodi do pojave unutrašnjih naprezanja u betonu i pojave oštećenja. Propagacijom oštećenja dolazi do depasivizacije armature i otpadanja zaštitnog sloja betona pri čemu istovremeno dolazi do gubitka poprečnog preseka armature i gubitka preseka celog elementa.

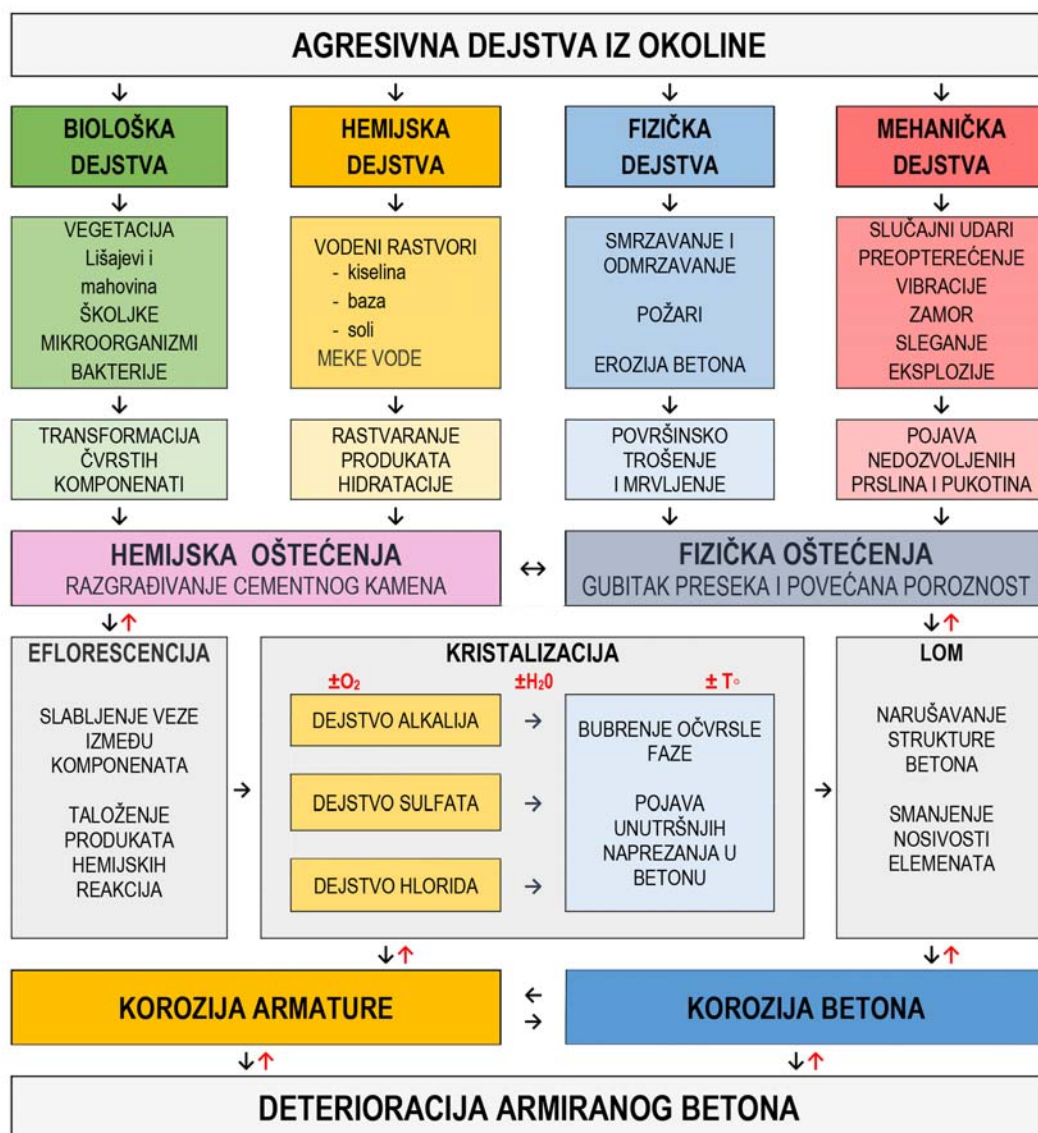
Brzina i stepen deterioracije armiranog betona zavise od parametara poput: zadatog kvaliteta betona, sastava i poroznosti strukture, prisutnosti defekata i oštećenja, vrste i inteziteta agresivnog dejstva i fizičkih parametara sredine u pogledu temperature i

¹ lat. Corrosio- razgrizanje, nagrizenje, najedanje

² lat. Deteriorare – pogoršavanje, upropaštavanje, kvarenje

vlažnosti sredine [9], kao i stepena izloženosti dejstvu [10]. Deterioracioni mehanizmi su međusobno povezani i često se javljaju kombinovano.

Utvrđen je veliki broj dejstava koji agresivno utiču na armirani beton. Najčešća klasifikacija dejstava iz sredine koja se sreće u literaturi je klasifikacija prema prirodi pojave [58]. Prema toj klasifikaciji dejstva iz okoline se dele na: *fizička*, *mehanička*, *hemijska* i *biološka dejstva*. Ovakva klasifikacija je podržana od relevantnih međunarodnih institucija i zastupljena u *fib*-u, CEB-u i Evrokodu.



Slika 3.1 Klasifikacija dejstava

Na slici 3.1 šematski je prikazana klasifikacija dejstava iz okoline koja utiču na pojavu oštećenja kod armiranog betona. Šematski prikaz je dat u vidu algoritma gde su pored klasifikacije dejstva prirodi pojave za svako od navedenih dejstava prikazani najčešći uzroci koje dovode do oštećenja kao i karakteristična oštećenja koja se javljaju na armiranom betonu usled dejstva. Prema prirodi nastalih oštećenja odnosno promena koje nastaju u armiranom betonu izvršena je podela na fizička i hemijska oštećenja. U nastavku algoritma je prikazana međusobna povezanost procesa usled promene parametara sredine u pogledu temperature, vlažnosti i prisustva kiseonika koji dovodi do pojave deterioracionih mehanizama – korozijske armature i korozijske betona. Posmatranjem

algoritma u obrnutom smeru prikazana je podela deterioracionih mehanizama sa prikazom mehanizama oštećenja kao i promena koje se stvaraju u betonu. Algoritam je nastao preklapanjem klasifikacije dejstava i očekivanih posledica usled dejstva [58] i nedostataka betona prikazanih evropskim normama [59].

Obzirom da utiču na nosivost, trajnost i sigurnost armirano betonskih elemenata, ova dejstva se mogu shvatiti kao opterećenja iz sredine. Usled niza specifičnosti ova dejstva je teško odrediti jer zavise od niza specifičnosti lokacije gde se konstrukcija nalazi kao i načina eksploatacije. Neka dejstva poput hazarda nije moguće uopšte odrediti.

3.2 FIZIČKA DEJSTVA

Fizička dejstva obuhvataju sva dejstva izazvana fizičkim promenama parametara sredine u pogledu temperature i vlažnosti usled kojih dolazi do pojave unutrašnjih naprezanja, pojave oštećenja i trajnog narušavanja strukture. Oštećenja se mogu javiti kod svežeg i kod očvrslog betona. U kontekstu sa klasifikacijom prikazanoj u šemi na slici 3.1 razmatraćemo oštećenja koja nastaju kod očvrslog betona. Pri promeni temperature veličina slobodnih deformacija kod očvrslog betona karakteriše koeficijent linearnog širenja koji zavisi od sastava betona, vrste punilaca i vlažnosti sredine. Prekoračenjem ovih vrednosti dolazi do oštećenja pojavom prekida u strukturi u vidu prslina, pukotina i loma, ili gubitka materijala u vidu trošenja, raslojavanja i ljuštenja. Fizička dejstva utiču na pojavu oštećenja kod betona, dok na oštećenja armature utiču indirektno povećanjem stepena izloženosti armature drugim agresivnim dejstvima.

3.2.1 DEJSTVO MRAZA

Voda je element koji je u manjoj ili većoj meri stalno prisutna u betonu. Pored uticaja koji ima na beton u svežem stanju, voda utiče i na beton u očvrslom stanju. Voda se usled dejstva temperature kreće kroz strukturu betona i zadržava u porama i kapilarima. Pri višim temperaturama veći deo vode isparava, dok pri nižim temperaturama dolazi do njenog zgušnjavanja i kristalizacije vode i formiranja leda na $T=0^{\circ}\text{C}$ koja predstavlja tačku mržnjenja. Kristalna struktura vode je karakteristična po uvećanju zapremine koja na $T^{\circ}=-22^{\circ}\text{C}$ dostiže svoje najveće uvećanje koje je 9% veće od početne zapremine [46]. Kod betona zasićenih vodom usled uvećanja zapremine dolazi do pojave jakih naprezanja u zidovima pora betona koja mogu da iznose do 22 Mpa. Usled unutrašnjih naprezanja javlja se pritisak koji deluje ka spoljašnjim - tanjim delovima betonskog elementa, pa se oštećenja manifestuju u vidu prslina paralelnih spoljnoj površini betona.

Dostizanjem tačke mržnjenja led se formira kod čiste vode bez primesa. Ukoliko su u vodi prisutne alkalije, tačka mržnjenja se snižava za dodatnih 1°C ; ukoliko su prisutni rastvori soli, tačka zamrzavanja se pomera za dodatnih 7°C [60]. Tačka mržnjenja vode zavisi i od prečnika pora. Kod pora prečnika do 10 μm voda prelazi u led na -5°C , dok se u porama prečnika to 3,5 μm voda prelazi u led tek na -20°C . Utvrđeno je da u finim i tankim porama voda mrzne na značajno nižim temperaturama nego što je uobičajeno, u granicama do čak -70°C . [9]. Led se prvo formira na spoljašnjoj površini betona i sporo prodire ka unutrašnjosti pora. U betonu se led prvo širi u smeru pružanja pora, a potom se širi na zidove pora, stvarajući na taj način unutrašnja naprezanja u betonu koja uzrokuju pojavu prslina koje omogućavaju dublje prodiranje vode u beton. Ponavljanjem

ciklusa smrzavanja i odmrzavanja dolazi do pojave dubinskih oštećenja. Da bi razaranje betona bilo primetno potreban je veliki broj ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja [61]. Na stepen oštećenja usled kristalizacije vode veliki uticaj ima poroznost strukture i stepen popunjenosti pora vodom [62]. Kod betona sa velikim sadržajem pora omogućeno je slobodno širenje zapremine vode i samim tim omogućen veliki broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Opasnost od pojave oštećenja usled dejstva mraza postoji kod betona koji su zasićeni vodom 80-95%. Kod betona koji su u potpunosti uronjeni u vodu ne postoji opasnost od zamrzavanja jer nema slobodnog prostora za širenje leda. Izuzetno velika oštećenja kod betona se javljaju jednovremenim dejstvom mraza i soli za odmrzavanje [63]. Ovakav problem je naročito izražen kod mostova i drugi konstrukcija koji se nalaze neposredno uz putnu infrastrukturu. Do pojave oštećenja dolazi kod betonskih površina koje su direktno izložene kvašenju i površinama koje se sole. Ovakav slučaj je zastupljen kod objekata koji se nalaze neposredno uz more i kod objekata putne infrastrukture tokom zimske sezone [60].



Slika 3.2 Oštećenja betona usled dejstva mraza

Na slici 3.2 prikazana su karakteristična oštećenja koja se javljaju na betonskim površinama mostova. Na slici levo prikazano je ljuštenje betona na revizionim stazama mosta usled simutanog dejstva mraza i soli. Na slici desno prikazana su oštećenja usled dejstva mraza na bočnim elementima koji su izloženi kvašenju i sušenju. Betonski elementi mostova koji se nalaze neposredno uz kolovoz prema klasama izloženosti [12] i dopunskim uslovima za mostove [49] definisani su visokim dopunskim zahtevima u pogledu otpornosti betona na uticaj mraza sa stepenom ljuštenja (M“0“), simutano dejstvo mraza i soli (M200) i stepenom vodootpornosti (V8).

3.2.2 DEJSTVO POŽARA

Beton poseduje dobru otpornost na požar, ima visok toplotni koeficijent i kao takav predstavlja negorivi materijal. Zagrevanjem betona dolazi do složenih fizičkih promena koje utiču na njegove mehaničke karakteristike [9]. Zagrevanjem do 100 C° beton gubi slobodnu vodu i ne dolazi gotovo do nikakvih promena; na temperaturi od 150 C° gubi absorbovanu vodu pri čemu čvrstoća na pritisak opada za 10%. Pri zagrevanju do T° 400 C° dolazi do gubitka vode iz alkalnih jedinjenja cementa i značajnijeg pada čvrstoće, a na temperaturi od 500 C° čvrstoća na pritisak opada na 50-75% od početne vrednosti. Na temperaturi od 850-900 C° gubi 70-80% čvrstoće na pritisak i postaje trošan. Pri zagrevanju opadanje modula elastičnosti ima istu progresiju kao i gubitak čvrstoće na

pritisak [64]. Dodatnu opasnost po nosivost armirano-betonskih elementa predstavlja zagrevanje armaturnog čelika. Iako temperatura topljenja čelika iznosi 1450 C°, na temperaturi od 550 C° dolazi do opadanja nosivosti armature na 55% što odgovara proračunskim vrednostima maksimalnog iskorišćenja armature u betonu i samim tim predstavlja temperaturnu granicu do koje armirani beton ima nosivost. Ukoliko je prisutno manje opterećenje od proračunskog, konstrukcija može ostati stabilna i na višim temperaturama. Brzina procesa zavisi od stepena izloženosti čelika zagrevanju, odnosno debljine zaštitnog sloja betona. Kod betona sa povećanim sadržajem vlage usled brzog širenja toplote dolazi do pojave fenomena *eksplozivnog odlamanja* betona [6]. Usled ovog fenomena može doći do odvajanja slojeva betona do dubine od 25-100 mm, pri čemu se smanjuje ili potpuno gubi zaštitni sloj betona i armatura direktno izlaže toplotnom dejstvu. Prilikom gašenja požara usled reakcije sa vodom dolazi do formiranja kalcijum oksida koji sa vodom deluje ekspanzivno i na taj način stvara dodatna oštećenja [9].

Kod mostova se veoma retko dešavaju oštećenja betona usled požara. Ukoliko se požari i dogode na mostu, teško je razviti temperature koje bi dovele do pojave oštećenja betona. Požari na mostu se najčešće javljaju usled havarijskog oštećenja vozila ili zapaljenjem instalacija na mostu. U okolini mostova je uvek prisutan rizik od pojave požara jer se prostori ispod mostova često koriste za deponovanje lako zapaljivog otpada.

3.2.3 EROZIJA BETONA

U zavisnosti od stepena izloženosti, beton je osetljiv na pojavu oštećenja usled različitih erozivnih procesa. Pri direktnom kontaktu kao posledica struganja, trljanja, kotrljanja, klizanja i abrazivnog dejstva dolazi do površinskog trošenja betona, prilikom čega dolazi do gubitka mase elementa i smanjenja poprečnog preseka betonskog elementa. Erozivnim dejstvom na površinu najpre dolazi do pojave finih prslina koje se formiraju na cementnom kamenu koje se potom prenose na agregat pri čemu dolazi do njegovog izdvajanja iz betona. Smanjenjem zaštitnog sloja betona dolazi do smanjenja poprečnog preseka elementa i povećane izloženosti armature na druga agresivna dejstva.

Stepen oštećenja kod armirano betonskih elemenata zavisi od kvaliteta betona, debljine zaštitnog sloja i od vrste i inteziteta agresivnog delovanja. Prema prirodi nastanka razlikuju se tri vrste erozivnih procesa: *habanje*, *abrazija* i *kavitacija*.

Habanje ili suvo habanje predstavlja površinsko trošenje materijala koje nastaje u vazdušnoj sredini usled trenja između betona i nekog materijala koji na njega deluje. Najčešće se javlja usled saobraćajnog opterećenja na betonskim kolovozima, betonskim stazama i trotoarima, podovima industrijskih hala, itd.

Abrazija se odnosi na habanje betona izazvano dejstvom sitnih čestica koje pokrenute poput abraziva se odbijaju od betonsku površinu i na taj način je oštećuju [45]. Najzastupljeniji oblik abrazije se javlja usled hidro abrazije, odnosno pokretanja sitnih čestica dejstvom tekuće vode. Najšešće se javlja kod hidrotehničkih objekata i konstrukcija koje su u kontaktu sa tekućom vodom kao posledica nošenja sitnog rečnog materijala tokom strujanja vode.

Kavitacija je fizički proces razaranja betona dejstvom vodom koja se kreće preko vodene površine većim brzinama, uz povremeno odvajanje mlaza vode od površine. Vakuum koji

se tom prilikom javlja ima jako sišuće dejstvo, pa dolazi do čupanja čestica sa površine betona.[15]. Nastaje usled nagle promene smera i brzine vodenog toka kod betonskih elemenata koji su u kontaktu sa tekućom vodom. Kavitaciju treba očekivati pri brzinama vode preko 10 m/sec. kod relativno kompaktnih betona, a kod betona slabijih mehaničkih karakteristika i pri nižim vrednostima. Usled kavitacije betonska površina postaje nagrižena i vrlo gruba, pri čemu povećanjem hrapavosti površine dolazi do pojave dodatne kavitacije.



Slika 3.3 Oštećenja betona usled erozije betona

Na slici 3.3 su prikazani neki od primera erozije betona koji se javljaju kod mostova. Na slici levo prikazana su oštećenja betonske kolovozne ploče mosta bez asfaltnog zastora usled suvog habanja, a na slici desno prikazana su oštećenja betona na rečnim stubovima mosta usled abrazije, koja je izražena u zonama strujanja reke oko stubova.

3.3 MEHANIČKA DEJSTVA

Tokom eksploatacije elementi u armirano-betonskim konstrukcijama su direktno ili indirektno izloženi različitim mehaničkim dejstvima. Prema prirodi pojave mehanička dejstva se mogu javiti kao pritiska, udarna i deformacijska opterećenja. Mehanička dejstva obuhvataju: saobraćajno opterećenje [65], opterećenje od vetra [66], seizmička dejstva [67], incidentna dejstva [68], odnosno dejstva koja spadaju u računski dejstva. Pojava oštećenja usled mehaničkih dejstva najčešće se javljaju usled ekstremnih vrednosti koja su rezultat nepredviđenih, neuobičajenih ili retkih pojava koje nisu vremenski ni kvantitativno određene pa im je teško odrediti pravac, smer i intezitet. U najvećem broju slučajeva oštećenja se javljaju usled kratkotrajnih dejstva visokog inteziteta, mada se mogu javiti i usled znatno slabijih uticaja i manifestovati se tokom vremena (ciklično opterećenje, zamor, vibracije...). Pojava ekstremnih vrednosti dejstava je bazirana na zakonima verovatnoće. Ona predstavljaju rizične, potencijalno opasne događaje koji za posledicu imaju prekoračenja graničnih stanja i narušavanje parametara pouzdanosti konstrukcije [69].

Oštećenja nastala usled mehaničkih dejstava manifestuju se kao fizička oštećenja betona, a na pojavu oštećenja posebno su ugroženi vitki elementi [70]. Stepen oštećenja zavisi od karakteristika materijala, parametara dejstva i parametara konstrukcije [10]. Otpornost konstrukcije na mehanička dejstva se naziva *robustnost konstrukcije* [68].

3.3.1 SLEGANJE KONSTRUKCIJA

U zavisnosti od vrste konstrukcije i veličine korisnih opterećenja, sopstvena težina konstrukcije može iznositi 50-80% svih statičkih uticaja. Sleganje predstavlja proces gubitka nosivosti tla usled kog dolazi do nedozvoljenih pomeranja i napona u konstrukciji i pojavi oštećenja. Najčešće se javlja usled konsolidacije tla zbog velike sopstvene težine konstrukcije ili nedovoljne nosivosti tla u zoni oslanjanja. Može se javiti i kao posledica loših pretpostavki o nosivosti tla tokom projektovanja ili kao posledica slabijeg kvaliteta izvedenih radova. Sleganje se može javiti i tokom eksploatacije smanjenjem nosivosti tla usled podlokavanja-ispiranja tla ispod temelja dejstvom tekuće vode ili usled *likvefakcije* - natapanja tla vodom pri čemu tlo dobija osobine tečnosti i gubi nosivost.

Sleganje može biti ravnomerno i neravnomerno. Do ravnomernog sleganja dolazi pojavom horizontalnih pomeranja usled bočnih pritisakata tla na ukopane delove konstrukcije ili vertikalnih pomeranja prilikom konsolidacije tla od težine konstrukcije. Neravnomernim sleganjem javljaju se rotacije i pomeranja koja uslovljavaju prekoračenje dozvoljenih pomeranja i dovode do preraspodele opterećenja. U zavisnosti od veličine sleganja na betonu dolazi do pojave prslina, pukotina i loma elementa.



Slika 3.4 Oštećenja potpornih elemenata mostova usled sleganja

Na slici 3.4 prikazana su neka oštećenja potpornih elemenata armirano betonskih mostova nastala usled sleganja tla u zoni oslanjanja. Na slici levo prikazano je oštećenje obalnog stuba i krilnog zida usled sleganja tla. Na slici desno prikazano je oštećenje srednjeg stuba izazvano sleganjem tla ispod temelja koje je dovelo do preraspodele oštećenja i loma betona.

3.3.2 UDAR VOZILA

Udarne opterećenja predstavljaju dinamička opterećenja koja su karakteristična po brznoj pojavi i kratkom vremenu dejstva. Ova opterećenja se najčešće javljaju kao posledica ljudske greške ili namera, mada se mogu javiti i usled prirodnih faktora [36]. Najčešće udarno opterećenje koje se javlja u praksi jeste udar vozila. Prema Evrokodu udar vozila se svrstava u incidentna opterećenja gde se prepoznaju četiri različite grupe: udari drumskih vozila, udari železničkih vozila, udari plovnih objekata i udari letelica [68]. Riziku od pojave ovog opterećenja izloženi su objekti infrastrukture ili objekti koji se nalaze neposredno uz objekte infrastrukture kao i visoki objekti.

Udar vozila u konstrukciju predstavlja kompleksno opterećenje kome je teško odrediti vreme pojave, pravac, smer i intezitet. Veličina opterećenja zavisi od brzine kretanja, težine i veličine vozila, pravca udara i sposobnosti vozila da apsorbuje silu udara. Prilikom udara vozila u betonsku konstrukciju dolazi do kompenzacije sile između vozila i betonskog elementa. Do jačine udara koja je proporcionalna čvrstoći na pritisak, na betonskom elementu se ne javljaju oštećenja ili se javljaju veoma mala površinska oštećenja. Pored čvrstoće na pritisak, granica pojave oštećenja zavisi i od starosti betona i njegovog modula elastičnosti. Silom udara preko te granice dolazi do pojave elastičnih i plastičnih deformacija betonu. Udaram vozila u betonu dolazi do pojave pukotina i odvajanja zaštitnih slojeva betona. U zavisnosti od mase i dimenzija elementa može doći do deformacije elemenata, oštećenja armature ili kablova za prednaprezanje ili do smanjenja preseka elementa. Udaru vozila posebno su izloženi mostovi kod kojih su ugroženi srednji stubovi i kolovozne ploče natputnjaka, rečni stubovi kod plovnih reka i ivični elementi koji se nalaze neposredno uz kolovoz.



Slika 3.5 Oštećenja nastala udarom vozila

Na slici 3.5 prikazana su oštećenja betona nastala od udara vozila u betonske elemente mostova. Prikazana su dva različita oštećenja na donjim flanšama prednapregnutih nosača konstrukcije mosta nastala udarom vangabaritnog vozila tokom prolaska ispod mosta. Stepenn oštećenja je toliki da je došlo do ogoljavanja kablovnica i delimičnog oštećenja kablova.

3.3.3 DEJSTVO EKSPLOZIJA

Eksplozija predstavlja vanredni događaj karakterističan po brzini nastajanja i nepredvidivosti pojave. Može nastati ljudskim delovanjem (ratovi, teroristički napadi i sl.) ili usled havarije sistema ili hazardnog delovanja [69]. Eksplozija se može definisati kao izuzetno brza hemijska reakcija praćena detonacijama uz oslobađanje toplotne energije i zapaljivih gasova. Prilikom detonacije dolazi do naglog uvećanja zapremine eksplozivne mase praćeno oslobađanjem izuzetno jakih pritisaka koji deluju na okolna tela. Oslobađanje zapaljivih gasova često je praćeno požarom koji stvara dodatna oštećenja.

Usled eksplozije dolazi do stvaranja vibracija preraspodele opterećenja i pobude lokalnih opterećenja koja se na konstrukciju manifestuju u zavisnosti od čvrstoće, kontinuiteta i deformacione energije konstrukcije Eksplozija predstavlja kompleksan događaj i u

zavisnosti od inteziteta i zahvaćene zone, na konstrukciji može izazvati oštećenja od površinskih do loma čitavog betonskog elementa i loma konstrukcije [71].



Slika 3.6 Oštećenja armirano betonskih mostova usled eksplozija

Na slici 3.6 prikazana su oštećenja betona na mostovima usled eksplozije nastala tokom NATO bombardovanja SR Jugoslavije. Na slici levo prikazana su direktna oštećenja kolovozne ploče i ivičnih elementa mosta od eksplozije projektila. Na slici desno prikazana su oštećenja na stubovima mosta koji su indirektno oštećeni usled detonacija i preraspodele opterećenja u mostovskoj konstrukciji.

3.3.4 PREOPTEREĆENJE

Kao posledica opadanja karakteristika konstrukcija usled starenja materijala, agresivnog dejstva sredine i stalnim zahtevima za oštrijim uslovima eksploatacije, dolazi do pojave preopterećenja. Preopterećenje podrazumeva prekoračenje zadatih veličina opterećenja usled čega dolazi do iscrpljenja nosivosti elementa, pojave težih oštećenja i prekoračenja graničnih stanja. Usled preopterećenja dolazi do preraspodele opterećenja u konstrukciji, pojave nedozvoljenih prslina i deformacija, a u ekstremnim slučajevima i loma nosećih elemenata, gubitka ravnoteže i rušenja konstrukcije. Kod elemenata koji su oslabljeni i imaju neku vrstu oštećenja, do preopterećenja može doći i usled znatno manjeg opterećenja od graničnog.



Slika 3.7 Oštećenja mostova usled preopterećenja

Na slici 3.7 prikazana su oštećenja betona nastale usled preopterećenja. Na slici levo prikazana su oštećenja oslonačkih zona mosta usled preopterećenja, a na slici desno

karakteristična oštećenja betona vitkih stubova usled preopterećenja. Usled stalnog povećanja zahteva u pogledu dozvoljnog osovinskih opterećenja, problem preopterećenja se najčešće se javlja kod mostova. Samo u prošlom veku osovinska opterećenja su se povećala skoro desetostruko (od 120 kN do 1000 kN), dok vangabaritni transporti dostižu i 7000 kN. [14], a značajna je i učestanost prelaska teških vozila preko mosta. Obzirom da je u upotrebi veliki broj starijih konstrukcija koje nisu računate za sadašnja opterećenja, možemo izneti paušalnu ocenu da na 90% mostova koji nisu ojačani postoji rizik od pojave preopterećenja.

3.3.5 CIKLIČNO OPTEREĆENJE I VIBRACIJE

Periodično ponavljanje nekog dinamičkog opterećenja u određenom vremenskom intervalu naziva se *ciklično opterećenje*. Učestanim dejstvom opterećenja koje je manje od graničnog dolazi do apsorpcije energije i pojave unutrašnjeg trenja u materijalu. Na mestu najvećeg naprezanja dolazi do stvaranja linije klizanja odnosno pojave lokalnih plastičnih deformacija. Ponavljanjem dejstva u datom preseku se iniciraju mikro pukotine koje tokom vremena dovode do zamora materijala i pojave krtog loma. Osetljivost betona na zamor raste sa zateznom čvrstoćom materijala odnosno što je materijal čvršći zamor je veći. Pojava početnih oštećenja usled cikličnog opterećenja se teško uočava i uglavnom nije vidljiva sve do nastanka loma. Pojava cikličnog opterećenja karakteristična je za prenos vibracija mašina koje su u kontaktu sa konstrukcijama.

Pobudom izazvanom dinamičkim silama dolazi do prisilnog oscilovanja krutih tela i pojave *vibracija*. U zavisnosti od pravca, smera i inteziteta dolazi do ubrzanja mase elementa konstrukcije pri čemu se javljaju periodične (pravilne) ili nasumične (nepravilne) oscilacije. Stepenn oscilovanja tj rezonancija zavisi od geometrijskih karakteristika elementa odnosno mogućnosti da element absorbuje i priguši energiju sile pobude i smanji amplitude unutrašnjim trenjem u materijalu [72]. Ukoliko konstruktivni sistem nema mogućnosti prigušenja vibracija, on se dovodi stanje bekonačnih amplituda pri čemu može doći do dosezanja graničnog stanja i kolapsa konstrukcije. Na pojavu vibracija su naročito ugroženi vitki elementi u konstrukcijama, kod kojih je nesrazmeran odnos poprečnog preseka i dužine, određeni konstruktivni sistemi poput lančanica i visokih objekata. Kod mostova vibracije se javljaju usled saobraćajnog opterećenja, dejstva vetra, seizmičkih dejstva i sl. Jedan od najpoznatijih primera rušenja konstrukcije usled dejstva vibracija je most Tacoma Narrows u SAD [73].

Vibracije se mogu javiti i usled dejstva opterećenja koje je manje od graničnog poput opterećenja usled ljudske navale [74]. Uobičajena frekvencija ljudskog koraka je oko 2Hz (u taktu od 1.65 Hz do 2.35 Hz, tj. koraka u sekundi), dok kretanje u trku iznosi do 3,5 Hz. Ukoliko se frekvencija kretanja ljudi poklopi sa frekvencijom oscilovanja elementa dolazi do pojave nepoželjne rezonantne frekvencije. Nivo vibracija koje čovek može da oseti je istraživan od strane brojnih autora. U domenu frekvencija od 1 do 10 Hz nivo osetljivosti zavisi od ostvarenog ubrzanja konstrukcije, dok je u domenu od 10 do 100 Hz osećaj neugodnosti povezan sa brzinom oscilovanja same konstrukcije. Pri ovakvim vibracijama opasnost od kolapsa konstrukcije je jako mala. Obzirom da ljudski organizam može da oseti amplitude pomeranja do nivoa od 0.001 mm, to znači da se mogu osetiti vertikalne harmonijske vibracije što stvara neugodan osećaj. Najpoznatiji slučaj nedozvoljenih vibracija na mostovima se javio kod pešačkog mosta *Milenium bridge* u Londonu [75].

3.3.6 DEJSTVA PRIRODNIH HAZARDA

Tokom proračuna konstrukcija u obzir se uzimaju određena opterećenja koja predstavljaju ekvivalent očekivanih prirodnih dejstva na konstrukciju poput dejstva vetra, seizmičkih dejstva, itd. Vrednosti maksimalnih očekivanih uticaja se usvajaju na osnovu prikupljenih podataka i unapred sračunatih koeficijenata sa povratnim periodima pojava. Usled globalnih klimatskih promena sve je češća pojava ekstremnih prirodnih događaja sa kraćim povratnim periodom. Vreme pojave i intezitet ekstremnih prirodnih dejstava nije moguće kvantitativno odrediti, pa nije moguće tačno odrediti očekivano granično stanje kao ni stepen oštećenja koji mogu naneti. Ekstremnim prirodnim pojavama znatno se prekoračuju računski dejstva usled kojih gotovo po pravilu dolazi do težeg oštećenja i kolapsa konstrukcija.

Interakcija ekstremnog prirodnog dejstva sa konstrukcijom se naziva *hazard* [69]. Hazard predstavlja opasno stanje ili opasan događaj koji nosi veliki rizik od pojave posebno nepovoljnih uticaja pri čemu je ugrožena konstrukcija u celini.



Slika 3.8 Prirodni hazardi u periodu 1998-2017 [76]

Na slici 3.8 prikazano je procentualno učešće pojave prirodnih hazarda na celom svetu u periodu 1998-2017 [76]. Naveći broj prirodnih hazarda se javlja usled poplava, zemljotresa i tropskih ciklona, prema EM-DAT statistički podaci pokazuju isti trend pojave prirodnih hazarda za poslednjih 100 godina. Za najzastupljenije prirodne hazarde prikazaćemo mehanizme koji dovode do pojave pojave oštećenja.

Poplava predstavlja neobičajeno visok nivo površinskih voda koji se javlja kao posledica dugih kiša, topljenja snega ili akumulacijom vode usled sprečavanja normalnog oticanja. Plavljenjem zemljišta koje u normalnim uslovima nije pod vodom može doći do pojave *likvefakcije*, klizanja ili erozije tla odnosno destabilizacije terena i gubitka nosivosti tla. Najčešća oštećenja nastaju usled sleganja oslonaca, a može doći i do gubitka ravnoteže konstrukcije. Po stabilnost konstrukcija je izuzetno opasna pojava *bujičnih poplava*. Bujične poplave karakteriše brzo nadolaženje vode usled jakih kiša ili naglog topljenja snega. Bujice imaju izuzetno razorni karakter. Za sobom nose veliku količinu transportovanog materijala koji može uvećati zapreminsku masu vode do 1700 kg/m³. U ekstremnim slučajevima čvrsta frakcija različitih granulacija zauzimaju i do 60% ukupne zapremine vodene mase pa se može govoriti o pojavi bujične lave [77].



Slika 3.9 Oštećenja mostova usled poplava

Na slici 3.9 prikazana su oštećenja konstrukcija mostova nastala usled bujičnih poplava. Pojavom bujica najčešće dolazi do potpunog spiranja rečnog materijala i podlokavanja temelja konstrukcije. Na nosećim elementima dolazi do naglog povećanja hidrostatičkog i hidrodinamičkog pritiska što dovodi do rušenja konstrukcije. U zavisnosti od siline bujice lokalno na betonu dolazi do pojave oštećenja usled abrazije.

Zemljotres je po svojoj prirodi stohastička pojava i teško je predvidiv, kako sa aspekta vremena nastajanja tako i u pogledu njegovog intenziteta i frekventnog sastava. Manifestuje se kao oscilovanje tla usled poremećaja u litosferi pri čemu dolazi do oslobađanja velike kinetičke energije koja izaziva vibracije tla. Pojava zemljotresa zavisi od niza geofizičkih i drugih parametara globalnog ili lokalnog karaktera. Dejstvo zemljotresa na objekte mora se posmatrati u vezi sa tri grupe parametara, koji se odnose na: vibracije tla, vibracije same konstrukcije i na uslove njihovog skupnog vibriranja [74]. Predviđanje ponašanja konstrukcije pri zemljotresu je otežano zbog stohastičke promene zemljotresnih pokreta tla na kojoj se objekat temelji, kao i stohastičke prirode materijala i same konstrukcije. Stavranjem poremećaja u tlu može doći smanjenje nosivosti tla i na taj način destabilizuje konstrukcija. U rastresitom tlu dolazi do smanjenja brzine seizmičkih talasa i pojačanja amplitude. Kod nestabilnih terena može doći do izazivanja klizišta, kod tla zasićenim vodom naročito kod peskovitog tla, može doći do pojave likvefakcije tla dok kod čvrstog stenskog materijala može doći do njegovog odlamanja i stvaranja odrona i kamenih lavina. Zbog raznolikosti seizmičkih dejstava nije moguće do kraja predvideti ponašanje mosta i posledice koje se mogu javiti u ekstremnim slučajevima, što zavisi od konstruktivnog rešenja čitavog sistema sklopa i detalja njegovog oslanjanja [78]. Osnovni mehanizam oštećenja usled zemljotresa je direktni penos mehaničkih vibracija na konstrukciju, a stepen oštećenja zavisi od svojstva oporavka konstrukcije pri čemu su ugroženi elementi u zategnutim zonama na pojavu prslina i pukotina. Vrednosti seizmičkih dejstava su određena statističkim prikupljanjem i obradom većeg broja podataka ranijih događaja na osnovu kojih su kreirane seizmološke karte koje su sastavni deo smernica za projektovanje.

Vetar nastaje usled mešanja toplih i hladnih vazdušnih masa. Prema Boforovoj skali, svaki vetar brzine preko 22,6 m/s je okarakterisan kao olujni, odnosno vetar pri kome počinju da se javljaju manja oštećenja na objektima. Značajnija oštećenja mogu nastati usled dejstva ciklona. Cikloni nastaju usled poremećaja u atmosferi na polju vetra, pritiska i temperature. Označeni su kao vetrovi koji imaju brzinu preko 34,8 m/s i gradiraju se po

posebnoj skali. Cikloni predstavljaju brzo rotirajući olujni sisem karakterističan po velikom prečniku o izuzetno razornom dejstvu. Pojava ciklona je geografski ograničena na tropski pojas oko ekvatora pa se često nazivaju *tropski cikloni*. U zavisnosti od govornog područja i jačine nazivaju se: *orkani* (fr.*ouragan*), *uragani* (šp.*huraca*), *tajfuni* (gr.*τυφών*). Najvišu kategoriju predstavljaju ciklona sa brzinom preko 60,0 m/s, mada su lokalno zabeleženi i cikloni brzine do 80 m/s. Dejstvom ciklona može doći do nedozvoljenih vibracija kod objekata i pojave deformacije pojedinih elemenata. Kružnim kretanjem u vidu levka, mogu da podižu i brzo pokreću lakše predmete pa na taj način stvaraju značajna udarna opterećenja na betonske elemente. U posebno ugrožene objekte na desjtvo ciklona spadajau vitke konstrukcije i visoki objekti.

3.4. HEMIJSKA DEJSTVA

Hemijska aktivnost betona zavisi od prisustva hemijski aktivnih jedinjenja u okruženju i vlažnosti sredine (*poglavlje 2.5.4*), a agresivnost vodenih rastvora određena je pH vrednošću i tvrdoćom vode. Smanjenjem pH-vrednosti raste stepen agresivnog dejstva na beton [57]. Intezivna oštećenja betona po pravilu nastaju pri nižim pH vrednostima odnosno dejstvom kiselih vodenih rastvora mada se mogu javiti i usled dejstva alkalija. Sa armiranim betonom reaguju neorganske i organske kiseline. Najagresivnije neorganske kiseline prema armiranom betonu su: hlorovodonična (HCl), sumporna (H₂SO₄) i azotna kiselina (HNO₃), gde jednocentni rastvori navedenih kiselina mogu razoriti beton u toku nekoliko meseci. Agresivnost organskih kiselina se povećava povećanjem njihove molarne mase. U organske kiseline sa malom molarnom masom spadaju: oksalna, sirćetna, jabučna i mlečna kiselina, dok u kiseline sa velikom molarnom masom spadaju oleinska, palmitinska i stearinska kiselina. Kiseli uslovi sredine najčešće su zastupljeni u močvarnim i podzemnim vodama usled prisustva produkata biohemijskih procesa i produkata raspadanja organskih jedinjenja. Jako kiseli uslovi sredine zastupljeni su na mestima odlaganja poljoprivrednog ili industrijskog otpada.

Usled visoke kontaminacije vazduha ugljen dioksidom (CO₂) u urbanim i industrijskim sredinama najrasprostranjeniji su slabo kiseli uslovi (*tabela 3.1*) usled rasprostranjenosti ugljen dioksida i njegove lako reakcije sa vodom gradeći ugljenu kiselinu (H₂CO₃).

Tabela 3.1 Sadržaj materija kontamiranih u vazduhu [9]

GAS	IZVORI ZAGAĐENJA	UČEŠĆE
CO ₂	Korišćenje energije, seča šuma, proizvodnja cementa	65 %
CH ₄	Otpad sa deponija, sagorevanje biomase, kanalizacija iz domaćinstava	20 %
Halogena jedinjenja F, Cl, Br, I, At	Rashladna tehnika, industrija, rastvarači	10 %
N ₂ O	Fosilna goriva, raščišćavanje zemljišta, industrijski procesi	5 %

Hemijska dejstva dovode do razgrađivanja cementnog kamena, slabljenja veza između komponenata i povećanjem poroznosti strukture, a mogu se manifestovati u vidu fizičkih oštećenja pri čemu dolazi do pojave prslina i gubitka materijala.

3.4.1 DEJSTVO MEKIH VODA

Sa niskim sadržajem soli i malom tvrdoćom, meke vode predstavljaju odlične rastvarače. Pri kontaktu mekih voda sa kalcijumovim jedinjenjima iz cementa obrazuju se lako rastvorne soli kalcijuma [9] koje se izlužuju iz betona. Kontaktom produkata izluživanja sa ugljen-dioksidom (CO_2) koja raguje sa vodom gradeći ugljenu kiselinu (H_2CO_3), dolazi do smanjenja pH sredine i stvaranja kiselog okruženja. Isparavanjem vode pri povišenoj temperaturi dolazi do kristalizacije jedinjenja i stvaranja kalcijum-karbonata u vidu belih naslaga i stalaktita. Ovaj proces se naziva *karbonatizacija*.

Stepen oštećenja usled i zavisi od tvrdoće vode i brzine filtracije. U ograničenom kontaktu sa betonom meke vode se mogu smatrati neagresivnim, dok do razaranja dolazi pri potpunom kvašenju betona, a naročito pri filtraciji vode kroz beton. Pri maloj brzini filtracije obrazuje se zasićeniji rastvor kreča, dok povećanjem brzine filtracije, čak i kod vode koja deluje pod pritiskom, dolazi do postepenog smanjenja filtracije odnosno spontanog zagušnjavanja betona. Do pojave ovog fenomena dolazi usled taloženja čestica i *kolmatacije pora* tj. opadanja rastvorljivosti kreča pri povišenju spoljne temperature. Stepem zgušnjavanja određen tvrdoćom vode, gde veći sadržaj karbonata obezbeđuje veće zgušnjavanje.

Smanjenje kalcijum hidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iz cementnog kamena dolazi do povećanja propustljivosti betona i smanjenja čvrstoće na pritisak koje može da bude i do 50% manja. Taloženje karbonata na betonskoj površini predstavlja problem više estetske prirode usled slabe reaktivnosti karbonata. U izuzetnim slučajevima može doći do promene fizicko-mehaničkih karakteristika zaštitnog sloja i pojave skupljanja betona po površini. Ozbiljnija oštećenja nastaju u kontaktu sa armaturnim čelikom pri čemu dolazi do korozije.



Slika 3.10 Karbonatizacija na betonskim elementima mosta

Na slici 3.10 prikazana su karakteristična oštećenja usled karbonatizacije kod mostova. Usled dobre aktivnosti sa vodom, ugljen dioksida lako postaje sastavni deo atmosferskih voda, daje im kiselost veću od prirodne (*kisele kiše*) i brzo se rasprostire.

3.4.2 SULFATNA KOROZIJA

Sulfati koji agresivno deluju na beton su zastupljeni u vidu vodenih rastvora u tlu, podzemnim, stajacim i industrijskim vodama, a značajna koncentracija rastvorenih sulfata

se nalazi i u morskoj vodi. Sulfati su zastupljeni u vazduhu kao sastavni deo izduvnih gasova u vidu jedinjenja sumpor dioksid (SO_2). Sulfatne soli u čvrstom agregatnom stanju nisu agresivne po beton, već to postaju rastvaranjem u vodi [9]. U slabo mineralizovanim vodama sulfati su zastupljeni u obliku gipsa, dok u jako mineralizovanim vodama se nalaze kao jedinjenja soli magnezijuma, natrijuma i kalijuma. Pri normalnim temperaturnim uslovima rastvorljivost jona sulfata zavisi od rastvorljivosti ostalih komponenata soli.

Sulfatna korozija betona predstavlja kompleksan proces pri kome dolazi do hemijske reakcije sulfata sa kalcijumovim jedinjenjima u betonu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i CaCO_3 i aluminatnim komponentam portland cementa – minerala celita (C_3A).



Slika 3.11 Oštećenje betona usled dejstva sulfata

Na slici 3.11 prikazana je oštećenja betona usled dejstva sulfata. Pojava oštećenja najizraženija je kod mostova preko pruga i betonskih obloga železničkih tunela kojim se kreću dizel lokomotive [9]. Pored taloženja sumpor dioksida iz izduvnih gasova dizel lokomotiva na vlažnim betonskim površinama, izduvni gasovi su usmereni direktno na betonske površina i daju toplotu za početak reakcije.

Rastvaranjem sulfata dolazi do ekspanzivne reakcije praćene naglim uvećanjem zapremine čvrste mase, pri čemu se u betonu dolazi do pojave prslina. Kao produkt reakcije javlja se suviog ostatak u vidu gipsa, pa se reakcija često opisuje kao *gipsana korozija* [7]. Sulfatna korozija nije uvek praćena ekspanzionom reakcijom. U određenim slučajevima dolazi do omekšavanja cementnog kamena i gubitka čvrstoće. Delovanje sulfata nije uvek razorno. Pri malim koncentracijama dolazi do nagomilavanja kalcijum-sulfata, hidratisanog magnezijum-oksida i sulfo-aluminatnih jedinjenja u porama, pri čemu se smanje propustljivost cementnog kamena.

Pored sumpor dioksida dko korozije dolazi i usled reakcije magnezijum-sulfata MgSO_4 se naziva *magnezitna korozija* zbog magnezijumovih jona koji izazvaju dodatnu koroziju betona.

3.4.3 DEJSTVO HLORIDA

Najagresivniju materiju prema armiranom betonu predstavljaju joni hlora. Joni hlora utiču na koroziju betona i koroziju armature ali prema različitim mehanizmima. U prirodi je hlor zastupljen u obliku jona Cl^- . Najčešće je zastupljen u rastvorenom stanju ali se nalazi i u

suvim predelima i podzemnim ležištima. Najveća koncentracija hlora se nalazi u morskoj vodi u obliku natrijum-hlorida (NaCl), gde čini 1,9% ukupne mase vode. Pored morske vode, velika koncentracija natrijum-hlorida se nalazi u soli za puteve koja se koristi tokom zimskog perioda, sa zastupljenošću u upotrebi u preko 90% slučajeva. Natrijum hlorid koji se koristi za puteve sadrži so za puteve sadrži 39,34% čistog natrijuma (Na) i 60,66% hlora (Cl) [60]. Usled velike potrošnje soli za puteve dolazi do povećanja saliniteta zemljišta, površinskih i podzemnih voda. Određen procenat hlora dospeva u atmosferske vode i postaje sastavni deo kišnice, gde u zavisnosti od podneblja zastupljenost hlora u zemljištu može da iznosi do 40-45 kg po hektaru godišnje.

Rastvor zasićen jonima hlora koji prodire u beton, hemijski ne reguluje sa betonom. Pri povišenju temperature i isparavanjem vode dolazi do taloženja bezvodnog natrijum-hlorida u vidu kristala. Taloženjem kristala pri koncentraciji od 43.5% ukupne zapremine pora dolazi do pojave naprezanja u betonu. Ukoliko se bezvodni natrijum-hlorid okvasi pri niskim temperaturama obrazuje se kristalo-hidrat $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ čija je zapremina 2.3 puta veća od zapremine bezvodne soli.

U morskim sredinama cikličnim procesom sušenja i kvašenja dolazi do reakcije hlora sa sulfatnim jedinjenjima. Na taj način se stvara bezvodni natrijum-sulfat koji na temperaturi od + 32,3 °C, ima povećanje zapremine od 4,1 puta. Oštećenja izazvana dejstvom soli iz morske vode najveća su u zoni koja je izložena dejstvu plime i oseke, odnosno zone koja je izložena naizmeničnom sušenju i kvašenju. Nešto slabija koncentracija soli se javlja u vazduhu u priobalskom području.



Slika 3.12 Oštećenja betona izazvana hloridima

Na slici 3.12 prikazana su oštećenja betona izazvana hloridima, Na slici levo prikazano je dejstvo morske vode na objektu koji je neposredno u kontaktu sa slanom vodom. Na slici desno prikazano je karakteristično oštećenje izazvano hloridima iz soli za puteve

3.4.4. KOROZIJA ARMATURE

Kod armirano betonskih elemenata armatura je slojem betona zaštićena od štetnih agensa poput kiseonika, vlage i agresivnih jona soli [48]. Postojanjem defekta strukture ili pojavom oštećenja u zaštitnom sloju betona, dolazi do prodora agresivnih jedinjenja i povišenog stepena izloženosti armature spoljnim uticajima, pri čemu se stiču uslovi za otpočinjanje procesa korozije armature. Intezitet procesa korozije zavisi od prisustva kiseonika i hemijskog sastava rastvora. Kiseonik deluje kao agens, ali i inhibitor korozije.

Korozija armature je ograničena na kontaktnu zonu sa kiseonikom, čime se znatno smanjuje broj centara korozije [9]. U prisustvu kiseonika u alkalnim sredinama se na površini armature formira opna oksida Fe_2O_3 koji dalje štiti čelik od korozije tj. pasivizuje ga. U slabo kiselim i neutralnim rastvorima ta opna je nepostojana i javlja se korozija slabijeg inteziteta. U kiselim sredinama opna se uopšte ne formira, armatura se depasivizuje i čelik intezivno korodira.

Najagresivniju materiju po korozionu otpornost čelika predstavljaju joni hlora koji potiču iz natrijum-hlorida. Joni hlora u vlažnim uslovima formiraju vodeni rastvor koji se difuzijom rasprostire kroz strukturalne pore i kapilare u betonu. Formirani rastvor hemijski ne reaguje sa betonom, ali u prisustvu kiseonika postaje hemijski aktivan u kontaktu sa armaturom. Prodorom kiseonika, na kontaktnoj površini sa armaturom dolazi do procesa oksidacije. Usled oksidacije dolazi do gubitaka elektrona i pozitivnog naelektrisanja zahvaćene površine pri čemu se formira anoda. Na ostatku armature se zadržava električni potencijal i ima ulogu katode, a rastvor zasićen jonima hlora predstavlja elektrolit. U ovakvom okruženju se obrazuju galvanski spregovi, dolazi do kretanja jona suprotnog naelektrisanja i prenosa struje. Pojavom razlike u električnom potencijaliu između katode i anode započinje proces korozije. Prema prirodi pojave opisni mehanizam korozije armature se svrstava u elektrohemijske procese.



Slika 3.13 Oštećenja usled korozije armature

Na slici 3.13 prikazana su oštećenja armirano betonskih elemenata mostova usled korozije armature. Vodeni rastvor zasićen jonima hlora koji se nalaze u soli za puteve predstavlja odličan elektrolit za započinjanje elektrohemijskih procesa. Na slici levo prikazano je oštećenje zaštitnog sloja betona usled korozije i bubrenja armature, a na slici desno je prikazana korodirala armatura nakon otpadanja zaštitnog sloja betona.

Prisustvom oksida jedinjenja na bazi Ca, Zn, Ni, Mg u elektrolitu, na površini armature dolazi do formiranja nerastvornih jedinjenja koja smanjuju katodnu površinu i na taj način eliminišu mogućnost pojave korozije. Svojstva ovih jedinjenja se često koriste u svrhu katodne zaštite armature [7].

Korozija armature se može javiti i usled procesa karbonatizacije. Taloženjem produkta reakcije dolazi do oštećenja zaštitnog sloja betona i smanjenja pH vrednosti sredine. Pri kontaktu produkta reakcije sa armaturom dolazi do formiranja tankog sloja pri čemu započinje depasivizacija armature. Korozija armature usled karbonatizacije je daleko sporiji proces od korozije izazvane dejstvom jona hlora.

Pojavom korozije na armaturi dolazi do promene njenih početnih fizičkih i hemijskih karakteristika. Usled korozije dolazi do povećanja zapremine čelika pri čemu se u betonu javljaju unutrašnja naprezanja praćena pojavom prslina, ljuštenjem i otpadanjem zaštitnog sloja betona pri čemu dolazi do gubitka poprečnog preseka elementa.

Korozija armature je relativno spor proces i može se na vreme otkriti i sprečiti. Rizik od pojave korozije armature se u značajnoj meri može smanjiti sprečavanjem difuzije kiseonika. Ovo se može postići upotrebom betona velike zapreminske mase ili upotrebom polimer ili polimerima modifikovanih betona, a mogu se koristiti i različiti premazi koji fizički štite beton od prodora kiseonika

3.4.5 ALKALNO-AGREGATNA REAKCIJA

Reakcijom između alkalija iz cementa i jedinjenja u agregatu u prisustvu vlage dolazi do reakcije koju zajedničkim imenom nazivamo *alkalno-agregatna reakcija* (AAR). Prema reaktivnim komponentama može se javiti kao *alkalno-silikatna reakcija* (ASR) usled reakcije silicijumovih jedinjenja (SiO_2) ili kao *alkalno-karbonatna reakcija* (ACR) reakcije jedinjenja iz dolomitnih krečnjaka ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) sa izvesnom količinom gline.

U vlažnoj sredini dolazi do reakcije između alkalija iz cementa (Na_2O i K_2O) i kalcijum hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$ koji nastaje hidratacijom cementa. Reaktivna jedinjenja iz agregata u prisustvu vlage izložena su depolimerizaciji, rastvaranju i bubrenju [6]. Produkti reakcije putem osmoze apsorbuju vodu, povećavaju zapreminu i dovode do pojave lokalnih napona u porama betona i nastanka prslina [7]. Oštećenja betona mogu nastati već u toj fazi, mada su mnogo značajnija oštećenja koja nastaju kasnijom ekspanzijom produkta reakcije. Cikličnim ponavljanjem procesa produkti reakcije popunjavaju prsline u betonu, šire se i pod pritiskom se izlužuju na površinu betona. Kao posledica ove reakcije javljaju se prsline po celokupnoj površini betona (*slika 3.14*)



Slika 3.14 Oštećenja betona usled alkalno-agregatne reakcije [79]

Intezitet reakcije zavisi od porekla, koncentracije i veličine čestica reaktivnih jedinjenja) i količine alkalija i sadržaja vlage u betonu. AAR je izuzetno spora i može se manifestovati 10-15 godina posle izgradnje objekta [79]. Mere u cilju sprečavanja AAR se svode na kontrolu mineraloškog sastava agregata, kontrole sadržaja alkalija u cementu (max. 1500 mg/l) i kontrolu sadržaja vlage u betonu i pH vrednosti rastvora u porama. Reakcija se može se ublažiti i upotrebom mineralnih dodataka mešavini poput elektrofilterskog pepela ili silikatne prašine. Najefikasnijom metodom se smatra izbegavanje upotrebe

sumnjivog agregata. AAR se retko javlja i nije unificirana u zemljama koje koriste EN i BS standarde. Niz standarda koji se bave ovom problematikom potiču iz američke regulative:

- ASTM C 289:2007 Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)
- ASTM C 227:2010 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method) ASTM International, 2014.
- ASTM C 1260:2014 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) ASTM International, 2014.
- ASTM C 1293:2020 Standard Test Method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction

3.5 BIOLOŠKA DEJSTVA

Biološka dejstva predstavljaju skup organskih procesa koji u interakciji sa betonom stvaraju hemijska, fizičko-hemijska i fizicka oštećenja [9]. U biološka dejstva se ubrajaju agresivni uticaju vegetacije, organizama i mikroorganizama. U organskoj sredini oštećenja se javljaju u kombinovanim uslovima i najčešće su fizičko-hemijske prirode.

Biološka dejstva na beton predstavljaju nedovoljno istraženo područje [80]. Uzrok tome je velika raznovrsnost biljnog i životinjskog sveta kao i broj mogućih kombinacija nepovoljnog delovanja u zavisnosti od okruženja koja dovode do oštećenja betona. Dejstvo organskih materija na beton predstavljaju više problem u domenu hemije i biologije nego u domenu građevinarstva. U daljem tekstu su opisane najkarakterističnije pojave koje dovode do oštećenja betona.

3.5.1 DEJSTVO VEGETACIJE

Mehaničke čestice nošene vazduhom talože se na betonskoj površini i uz prisustvo vlage stvaraju uslove za razvoj biljnih zajednica. U zavisnosti od klimatskih, ekoloških i bioloških odlika sredine na betonskim površinama se mogu nastaniti mahom prosti organizmi poput mahovina, algi i lišajeva. Biljke koriste fizičke imperfekcije betona, najčešće pukotine u betonu za razvoj korena.



Slika 3.15 Oštećenje betona usled dejstva vegetacije

Na slici 3.15 prikazana su oštećenja betona usled prisustva vegetacije. Na slici levo prikazan je deo mosta zahvaćen vegetacijom koja se razvija iz prslina u betonu

zapunjenih zemljom. Na slici levo prikazan je lom nearmiranog betona na oblozi kegle mosta izazvan razvijanjem korena drveta ispod obloge.

Sa jedne strane prisustvo vegetacije može pozitivno uticati na betonsku površinu jer ima sposobnost apsorpcije različitih hemijskih agenasa poput jedinjenja azota, sulfida i fluora kao i zaštitu od velikih temperaturnih promena. Sa druge strane prisustvo vegetacije povećava vlažnost sredine čime se podstiče različite vrste hemijskih reakcija koje negativno utiču na beton. Visok procenat vlage utiče na stvaranje mini ekosistema koji su pogodni za nastanjanje bakterija i sitnih organizama koji takođe imaju štetan uticaj na beton. Određene biljne vrste mogu razviti i značajnije korene koji svojim razvojem fizički mogu oštetiti beton.

Mahovine predstavljaju su najčešći oblik vegetacije koji se javlja na površini betona. Rastu u vidu busenja stvarajući zeleni pokrivač. Za razvoj im pogoduje vlažnija sredina, najčešće severna strana koja je vlažna. Postoje određene vrste mahovina koje se mogu javiti i u izrazito suvim sredinama – suve mahovine. Mahovina u svom sastavu poseduje posebne vrste ćelija – *hijalinske ćelije*, koje slično sunđeru upijaju vodu i održavaju visok sadržaj vode neophodan za opstanak. Mahovine se, međutim, ne mogu naći u hloridnim i sulfatnim slatinama i pustinjama, na pokretnim ili erodiranim zemljištima, i u morima.



Slika 3.16 Mahovina na betonskim elementima mosta

Na slici 3.16 prikazana je mahovina koja se razvija u vlažnim uslovima na betonskoj površini (slika levo) kao i površinska oštećenja betona koja nastaju usled ovog dejstva (slika desno).

Lišajevi su biljni organizmi koji se javljaju kod betona i stena. U zavisnosti od grupe kojoj pripadaju za opstanak im je pogoduju sredine sa prisustvom krečnjaka ili silikata. Predstavljaju složene organizme izgrađene od dva člana: *algi* i *gljiva*. Lišajevi vodu apsorbuju u obliku vodene pare iz atmosfere i zadržavaju je u spoljnom delu tela pri čemu ona pri dejstvu temperature lako isparava. Kada izgubi puno vode on prelazi u stanje anabioze, odnosno, prividne obamrlosti. Oni poseduju regenerativne osobine čime uz minimum prisutne vlage ponovo oživljavaju. Karakteristika lišajeva je izrazito spor rast i jako dug životni vek. U sebi sadrže visok procenat kiselina i soli gvožđa. Lišajevi mogu biti: *korasti* – čvrsto priljubljeni za podlogu (80% vrsta), *listasti* – pričvršćeni za podlogu jednim delom i *žbunasti*.

Alge predstavljaju organizme koji najčešće žive u vodi ili vlažnim staništima iznad vode. Žive samostalno ili u zajednici sa drugim biljkama kao paraziti. Za razvoj algi potrebna je

vlaga, sunčeva svetlost i ugljen dioksid. Za razvoj im je potreban i azot koji mahom apsorbuju iz neorganskih jedinjenja kao i mogućnost da vezuju azot iz atmosfere. Ostale elemente koji su im neophodni za rast (O,P,H,S,Ca,F,K,Mg,...) alge obezbeđuju i iz drugih organskih jedinjenja.

Gljive su po broju vrsta najrasprostranjeniji organizmi na zemlji. Poznato je oko 100.000 vrsta a pretpostavlja se da ih ima do 15 puta više. Gljive spadaju u organizme koje obuhvataju kvasci, pečurke i plesni. U početnim stadijumima su neupadljive zbog male veličine strukture i skrivenog načina života. Mogu se razviti u zemlji, u simbiozi sa drugim živim organizmima ili na mrtvoj materiji kao što su građevinski materijali. Gljive imaju esencijalnu ulogu u razgradnji organske materije, a u zavisnosti od sastava mogu razložiti pojedine građevinske materijale i čitave konstrukcije.

3.4.2 DEJSTVO ORGANIZAMA I MIKROORGANIZAMA

Oštećenja na betonu se mogu javiti dejstvom životinja, organizama i mikroorganizama.

Životinje retko direktnim delovanjem stvaraju oštećenja na betonu. Oštećenja se javljaju indirektnim putem izbacivanjem organskih jedinjenja ili produkta metabolizma koji na betonu stvaraju hemijske reakcije.



Slika 3.17 Organska jedinjenja životinjskog porekla na betonskim elementima mosta

Na slici 3.17 prikazano je prisustvo organskih jedinjenja - produkata metabolizma životinja na betonskom elementu mosta (slika levo) i oslonačkim zonama mosta (slika desno)

Prisustvo vegetacije oko betonskih površina daje mogućnost formiranja čitavih mini ekosistema na betonskoj površini u kojima se nastanjuju sitni organizmi (biocenoza). Posredstvom domaćina i okruženja formiranog ekosistema, sitni organi iniciraju određene hemijske reakcije u betonu koje prouzrokuju dalja fizička oštećenja. Organizmi nastanjeni na betonskim površinama apsorbuju iz cementnog kamena ugljenu kiselinu i slobodni kalcijum oksid. Primer takvog delovanja je cvetanje vode u jezerima i rekama kada se intezivno razvijaju biljni i životinjski organizmi koji se nastanjuju na betonske konstrukcije koje su u direktnom kontaktu sa njima.

Svojevrsan fenomen predstavljaju školjke. Školjke se naseljavaju direktno na površinu podvodnih objekata. One se "lepe" na betonsku površinu i urastaju, pri čemu visokofrekventnim vibracijama dube put ka unutrašnjosti betona, uništavajući pri tom zaštitni sloj betona. Na betonskoj površini se može nastaniti do 40 kg/m² školjki. Za svoj

metabolizam koriste različite materije iz betona, a sposobne su da izdvoje do 12,2 cm³ CO₂ na sat po kilogramu školjki [9].

Mikroorganizmi obuhvataju veliku grupu sitnih i ljudskom oku nevidljivih organizama. Predstavljaju proste jednoćelijske organizme u koje spadaju bakterije, alge, praživotinje i neke gljive. Mikroorganizmi spajaju fizičke i hemijske uslove sredine - temperaturu, pH sredinu, svetlost i određene hemijske elemente. Na taj način mikroorganizmi su u potpunosti prilagodivi svim uslovima staništa pri čemu imaju sposobnost stvaranja novih podvrsta što ih čini izuzetno otpornim na uticaj okruženja [80].

Mikroorganizmi se mogu razmnožavati u živoj (biotskoj) i neživoj (abiotskoj) sredini, u aerobnim i anaerobnim uslovima. Hrane se elementima koje zahtevaju i viši organizmi (Ca, Mg, Fe, O, H, P, S, N, K, C), a sposobni su da se hrane i materijama koje izgledaju neupotrebljive, kao što su npr. jedinjenja sumpora ili karbolna kiselina (fenol). Čelije mikroorganizama sadrže do 90% vode bez koje oni ne mogu da se hrane, rastu i razmnožavaju. Pogodna temperatura im omogućava pokretljivost a određena količina kiseonika im je potrebna za metabolizam. Većina mikroorganizama u procesu biosinteze proizvodi energiju pri oksidaciji mineralnih materija, kada se odigravaju termofizički procesi u betonu koji su uzrok njegovog razaranja. Prisustvo mikroorganizama uzrokuje stvaranje gasnog stanja unutar betona i pojavu unutrašnjih naprezanja.

Najbrojniji organizmi iz ove grupe su bakterije Svojom mikrobiološkom aktivnošću one razjedaju cementi kamen i izazivaju opadanje mehaničkih svojstava betona. U zavisnosti od okruženja najčešće dolazi do pojave sulfobakterijske i ferobakterijske korozije betona.

Ferobakterijska korozija se javlja kod armaturnog čelika koji predstavlja jedan od osnovnih elemenata ishrane grupe mikroorganizama koji se nazivaju *gvozdeve bakterije* (lat. *Ferribacteriales*). Ove bakterije dobijaju hemijsku energiju za sintezu organske materije iz oksidacije jedinjenja tipa fero u jedinjenja tipa feri. Ovaj process ima oksido-redukциони karakter jer obavlja oksidaciju stvaranjem ferihidroksida koji se ispoljava pojavom crvenih mrlja na betonskoj površini što dalje uzrokuje ljuškanje betona uz redukciju organskih materija i nastajanje CO₂.

Sulfobakterijska korozija predstavlja najintezivnije biološko delovanje i javlja se kod betonskih konstrukcija koje su izložene otpadnim vodama (kanalizacione cevi, crpne stanice i sl....). Otpadne vode sadrže veće količine otopljenih sulfata koje neke vrste bakterija koriste kao izvor kiseonika u anaerobnim uslovima za asimilaciju organske materije pri čemu stvaraju sumpornu kiselinu koja razgrađuje čvrstu materiju betona [81]. Ove bakterije se često nazivaju sumporne bakterije (lat. *Thiobacteriales*).

Bakterija *Desulfovibro desulfuricans* se taloži i oslobađa sumporvodoni koji se dodatno oslobađa turbulentnim kretanjem iz dela anaerobne kanalizacije u aerobni deo. U kontaktu sa vazduhom H₂S oksidira i uz pomoć bakterije *Thiobacillus triooxidans* stvara sumpornu kiselinu H₂SO₄.

Razvoju mikroorganizama ne pogoduju alkalne i bazne sredine. Brzi razvoj mikroorganizama je onemogućen ukoliko je pH sredine veća od 9. Naravno, to ne isključuje mogućnost postojanja mikroorganizama u tim uslovima, ali je njihovo delovanje znatno usporenije.

3.6 OŠTEĆENJA BETONA KOD MOSTOVA

»Potreba za mostom se javlja na onom delu trase gde se gornji stroj saobraćajnice odvaja od neposrednog dodira sa prirodnim terenom. Most je prema tome diskontinualni deo donjeg stroja saobraćajnice.« [82]

M. Trojanović

Mostovi predstavljaju kompoziciju morfološko-geološko-hidroloških osobina prostora [4]. Mostovi su složen sistem u kome učestvuju materijali, statički sistemi, saobraćajna opterećenja, kvalitet projektovanja i izvođenja. Koncept i geometrija konstrukcije mosta zavise od prirodnih uslova prepreke, geološke građe terena, mikroklimatskih uslova sredine, saobraćajnog opterećenja, vrste materijala, i niza drugih relevantnih parametara. Mostove odlikuje jednostavnost, elegancija i čistoća linija strukture sa jasno definisanim prenosom opterećenja koja predstavlja celinu sa ambijentom ostvarujući pri tome inženjerske zahteve u pogledu racionalnosti, ekonomičnosti i estetike kao ličnog izraza projektanta. Kao takvi predstavljaju celovit zadatak inženjera.

Funkcionalni zahtev svakog mosta je da obezbedi svoj pun kapacitet eksploatacije tokom upotrebnoeg veka odnosno ostvari minimalne uslove pouzdanosti konstrukcija što zahteva adekvatnu procenu uticaja koji se javljaju tokom eksploatacije. Tokom upotrebnoeg veka kod mostova prisutan je konstantan trend pooštavanja uslova eksploatacije, što mostove svrstava u red najugroženijih građevinskih konstrukcija u pogledu trajnosti [10]. Deterioracija armirano betonskih i prednapregnutih elemenata ne retko dovodi i do kompletnog gubitka nosivosti elemenata i kolapsa konstrukcije. Jedan od poslednjih primera u nizu je rušenje mosta Ponte Morandi u Đenovi izazvano korozijom kablova za prednaprezanje i zamorom materijala [83].

Elementi mostova su direktno izloženi spoljnim uticajima pa su zastupljeni svi poznati mehanizmi koji dovode do pojave oštećenja, a oni koji se najčešće javljaju decidirano su istaknuti u prethodnim poglavljima. Najagresivnija materija prema armiranom betonu su joni hlora koji su zastupljeni u soli koja se koristi za puteve [60]. Ubrzanom propadanju mostova doprinose određene greške koje se javljaju u svim karakterističnim fazama tokom životnog ciklusa mosta: tokom projektovanja, izvođenja i eksploatacije [41].

Greške koje se javljaju u fazi projektovanja odnose se na odabir konstrukcijskog sistema i izradu detalja. Zbog mnogih prednosti pre svega brzine izgradnje, tehnologija izgradnje mostova od gotovih montažnih nosača našla široku primenu u građenju, gde prema proceni oko 80% svih mostova čine armirano-betonski mostovi grednog sistema [84]. Ovaka vid izgradnje uslovljava prisustvo većeg broja opreme – ležišta i dilatacija koja imaju znatno manji upotrebni vek nego elementi mosta.

Usled ugibanja i temperaturnih promena na nosačima dolazi do zamora nepokretnih oslonca, dok na pokretnom delu dolazi preteranog izduživanja nosača koje uslovljavaju oštećenje dilatacija. Oštećenje dilatacija se manifestuje na dva načina: dolazi do pojačanja dinamičkih udara i do prodora vode zasićene solima do osloničkih zona i stubova mosta odnosno do povećanja stepena izloženosti ovih elemenata. Sličan problem se javlja prilikom primene podužnih dilatacija koje su korišćene prilikom

proširenja mostova. Usled različite koncepcije, nejednakog opterećenja i razlika u temperaturnim promenama elemenata dolazi do oštećenja podužnih dilatacija i prodora vode kroz njih. Prodorom vode dolazi do oštećenja zaštitnih slojeva betona preko armature i korozije armature armature.



Slika 3.18 Oštećenja betona u zoni ispod dilatacija

Na slici 3.18 prikazana su karakteristična oštećenja betona i armature koja se javljaju prilikom oštećenja dilatacija. Na slici levo prikazana su oštećenja nosećih elemenata od armiranog betona usled prodora vode kroz podužnu dilataciju. Na slici desno prikazano je oštećenje armiranog betona u oslonačkim zonama mosta usled prodora vode sa kolovoza kroz poprečnu dilataciju. Oštećenja usled slivanja vode kroz dilatacije prikazana su i na slici 3.13.

Na trajnost armiranog betona često utiču i greške u projektantskim detaljima koji se odnose na sistem odvodnjavanja. Najčešći slučaj koji se javlja u praksi je detalj hidroizolacije koja je sa svih strana na krajevima mosta kao i u zoni slivnika vertikalno uzdignuta pri čemu voda koju upije asfalt nema kud da otekne otekne već se zadržava. Usled temperaturnih promena dolazi do pucanja asfalta i pojave rupa, oštećenja hidroizolacije, prodora vode do kolovozne ploče i pojave oštećenja (*slika 3.19*).



Slika 3.19 Oštećenje beton kolovozne ploče ispod hidroizolacije

Kod velikog broja postojećih mostova prisutan je detalj slobodnog odvodnjavanja kolovoza bez slivnika. Slana voda se slobodnim padom sliva preko ivičnih elemenata mosta pri čemu dolazi do njihovog propadanja i slivanja vode na elemente substrukture.



Slika 3.20 Oštećenja mostova usled slivanja vode

Na slici 3.20 prikazana su oštećenja ivičnih delova mosta i osloničkih zona usled slivanja vode i vodenih rastvora direktno sa kolovoza. Karakteristična oštećenja koja se javljaju su ona usled dejstva mraza, dejstva hlorida i korozije armature. Karakteristična oštećenja se mogu videti i na slikama 3.12 i 3.13. Ovaj slučaj je široko raširen na mostovima koji se nalaze u sklopu starog dela autoputa kroz Srbiju.

Greške koje se javljaju u fazi izvođenja odnose se na propuste koji se dešavaju tokom tehnološkog procesa izrade betona. Dinamika izvođenja radova je često uslovljena tesnim rokovima pri čemu se obično u potpunosti ne poštuje tehnološki proces. Na mestu ugradnje je često prisutan minimum uslova za optimalan kvalitet betona, a na žalost i sve češće prisutne nedovoljno obučene radne snage za izvođenje ove vrste radova [85]. Najčešća oštećenja koja se javljaju u betonu su oštećenja usled plastičnog skupljanja. Ovaj problem je mahom prisutan kod izvođenja elemenata mostova „*in situ*“, dok je kod izrade prefabrikovanih montažnih elemenata koji se izvode u kontrolisanim uslovima u pogonu ovaj problem manje zastupljen. Na pojavu plastičnog skupljanja najosetljiviji su tanki elementi, pre svega su kolovozne ploče [46]. Kod prefabrikovanih elemenata kao i potpornih i krilnih zidova česta je pojava segregacije (slika 2.8).



Slika 3.21 Greške u izvođenju

Na slici 3.21 levo prikazan je nedovoljni zaštitni sloj betona preko armature nosećeg betonskog elementa. Na slici 3.21 prikazano je „*gneздо*“ u betonu ispod donje flanše prednapregnutog „I“ nosača nastalo zarobljavanjem vazduha između armature i oplata kalupa i nedovoljnog vibriranja betona..

Greške koje se javljaju u fazi eksploatacije pripisuju se uslovima koji prevazilaze procenjene uslove i postavljene funkcionalne zahteve tokom projektovanja i načinu održavanja. Tokom perioda eksploatacije mostovi predstavljaju „živi organizam“ koji je sklon stalnim promenama. Kod mostova je prisutan trend stalnog povećanja agresivnosti sredine kao i sve oštriji uslovi eksploatacije u pogledu prelaska teških vozila. Zahtevi u pogledu povećanja osovinskog opterećenja na mostovima doveli su do toga da se ono u poslednjih 100 godina deset puta uvećalo [9]. Mostovi postaju elastični mehanizmi koje intenzivni saobraćaj teških vozila i kontaminirano okruženje napadaju, troše i zamaraju [86]. Na osnovu ovih podataka može se zaključiti da je većina mostova neadekvatna za nove uslove eksploatacije. oštećenja nastala greškama tokom eksploatacije prikazana su u poglavlju 3.3 mehanička dejstva.

U ekstremnim slučajevima greške mogu dovesti do kolapsa konstrukcija. Mostovi su posebno ugroženi od prirodnih hazarda. Mnogobrojne studije, statistički, ali i istorijski podaci pokazuju da je jedan od najčešćih uzroka koji dovodi do rušenja mostovskih konstrukcija je dejstvo poplava [76].



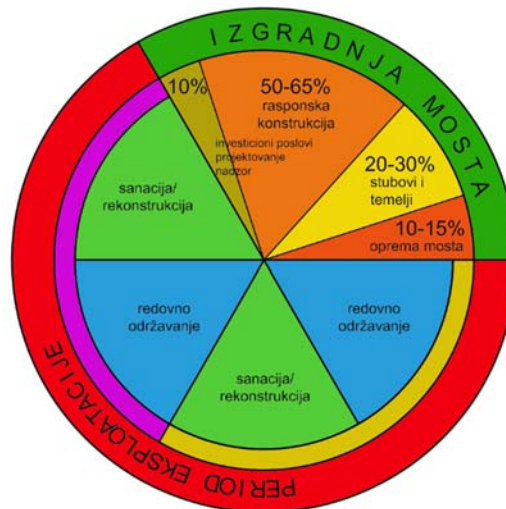
Slika 3.22 Oštećenja mostova usled hazardnog dejstva poplava

Na slici 3.22 prikazana su oštećenja mostova usled poplava. Na slici levo prikazano je lom nosećih elemenata a na slici desno kompletna dekompozicija konstrukcije izazvana sleganjem oslonaca usled poplava. Kolaps mostova usled poplava najčešće je posledica nedovoljnog hidrauličkog profila, previše rečnih stubova ili usled plitkog fundiranja. Nabujala voda za sobom nosi razne predmete poput drveća, granja i otpada koji se gomilaju oko rečnih stubova mosta, stvaraju zagušenje u proticajnom profilu pri čemu dolazi do stvaranja "efekata brane" i popuštanja najslabijih elemenata [87]. Za utvrđivanje rizika od poplava ne postoji određena, opšte prihvaćena i jedinstvena metodologija. Rizik od poplava se ne može u potpunosti eliminisati, a analize rizika se uglavnom rade od slučaja do slučaja, prema iskustvenim normama ili za određene potrebe.

Pažnja struke je usmerena uglavnom na građenje a veoma malo na održavanje i trajnost što ima velike posledice na objekte poput mostova [4]. Mostovi su najvažniji, najosetljiviji i najskuplji deo infrastrukture. Da bi se obezbedili osnovni zahtevi funkcionalnosti tokom upotrebne veka i projektovana trajnost, neophodno je izabrati adekvatnu strategiju upravljanja i održavanja. Upravljanje mostovima je složen i dinamičan proces koji omogućava analizu uspešnosti pojedinih primenjenih konstruktivnih rešenja i ukazuje na probleme koji se javljaju tokom servisiranja i zamene opreme dajući povratne informacije

koje se koriste tokom projektovanja novih objekata.

Na osnovu analiza stvarnih potreba mostova koji se javljaju tokom eksploatacije utvrđeno je da izgradnja predstavlja samo jednu trećinu troškova dok dve trećine predstavljaju troškovi koji nastaju tokom eksploatacije mosta (slika 3.23).



Slika 3.23 Životni krug mostova [4]

Dvostruko ulaganje u mostove tokom upotrebnog veka može se nadoknaditi izdvajanjem 2% vrednosti mosta godišnje tokom perioda upotrebe od 100 godina [4]. Praksa pokazuje da dugogodišnjim ulaganjem u mostove i održavanjem određenog nivoa pouzdanosti ovi troškovi tokom vremena mogu pasti na 1 % investicione vrednosti mosta.

U Srbiji je u upotrebi sistem upravljanja mostovima izrađen od strane Instituta za puteve [15]. Sistem je zamišljen kao originalno rešenje koji u veoma maloj meri implementira strana iskustva. Osnovni princip na kojim se sistem bazira je da najveći značaj ima nosivost tj. sposobnost mosta da prihvati i prenese na tlo sopstvenu težinu i saobraćajno opterećenje, a potom sigurnost i komfor korisnika. Most se posmatra kroz 26 parametra konstrukcijskih elemenata koji se prate i vrednuju (tabela 3.2).

Tabela 3.2 Kategorizacija parametara oštećenja [15]

GRUPA	PARAMETRI	NAZIV	Σ
I	parametri konstrukcije	Temelji, srednji i krajnji stubovi, glavni nosači, poprečni nosači, spregovi, ploča, ležišta	Σ 8
II	dopunski parametri konstrukcije	Pojava korozije armature ili korozije čeličnih konstrukcija	Σ 1
III	parametri od uticaja na konstrukciju	Hidroizolacija, dilatacije, kolovoz, profil ispod mosta, položaj mosta u mreži, istorijski podaci i opšti utisak	Σ 6
IV	parametri saobraćajnog profila	Klinovi, prelazne ploče, kegle, ograde, ivičnjaci, pešačke staze, geometrija mosta, odvodnjavanje	Σ 8
V	Parametri saobraćaja	Saobraćajno opterećenje	Σ 1
VI	Stanje instalacija	Instalacije i signalizacija na mostu	Σ 2
UKUPNO:			Σ26

Svi parametri ne utiču podjednako na ukupno stanje mosta, već su svrstani u šest grupa prema faktoru značaja za konstrukciju. Najveći značaj je dat stanju konstrukcijskih elemenata zbog njihove uloge u nosivosti sposobnost da prihvate i prenesu na tlo sopstvenu težinu i saobraćajno opterećenje, dok je manji značaj dat parametrima koji određuju nivo usluge.

Na nosivost mosta se direktno odnose parametri iz I i II grupe. U grupama III, IV i V obuhvaćeni su parametri koji se ne tiču direktno nosivosti ali u zavisnosti od njihovog stanja mogu značajno uticati na stanje konstrukcije a samim tim i na nosivost. U najvećem broju slučajeva elementi iz ove grupe određuju prioritete radova na mostovima. Elementi VI grupe nemaju uticaja na nosivost i stabilnost mosta. Za ocenu stanja upotrebljivih elemenata pojedinačno koristi se pet gradacija: *dobro* → *prihvatljivo* → *nepovoljno* → *loše* → *nezadovoljava*, Za stepen oštećenja elemenata koji ugrožava stabilnost konstrukcije koristi se i gradacija *opasno*. Svakom elementu se dodeljuje ocena prema faktoru značaja na osnovu lega se izračunava rejting stanja, vrše dodatni pregledi oštećenih elemenata i određuju prioritete za sanacije i popravke. Detaljni pregledi i po potrebi ispitivanja i merenja na oštećenim armirano betonskim elementima rade se za potrebe izrade projekta sanacije.

Iako građenje mostova kod nas i u svetu ima dugu tradiciju, upravljanje mostovima je još u konstituisanju. Kreiranje i sprovođenje politike u toj oblasti podložno mnogobrojnim uticajima – političkim, tehničkim, prirodnim, ekonomskim i istorijskim prilikama, pa su sistemi upravljanja delimično uspešni. Zanemarivanje jasnih tehničkih i ekonomskih pokazatelja kao i neadekvatno sprovođenje politike u domenu upravljanja i održavanja, dovelo je do velikog broja oštećenih objekata koji zahtevaju hitne sanacije što stvara velike direktne troškove. Većina mostova na evropskim putevima i železnicama izgrađena je pre 30-40 godina, koji prema stepenu oštećenja i rangu objekata zahtevaju hitnu sanaciju. Pored svoje funkcionalne uloge, mostovi u savremenom društvu imaju veliki značaj u sociološkom, ekonomskom i strateškom pogledu, pa privremeni ili potpuni prekid saobraćaja usled oštećenja mostova može da stvori i velike indirektno troškove i izazove poremećaje sa ozbiljnim posledicama za normalno funkcionisanje privrednih i drugih tokova [87].

Na osnovu ovakvog opšteg stanja teško je primeniti postojeće strategije upravljanja i održavanja i zadržati neohodan nivo pouzdanosti. Kao jedan od primenljivih modela se nameće procena rizika mostova prema ugroženosti. Ovaj pristup zahteva detaljan pregled i ocenu stanja kako pojedinih elemenata, tako i celokupne konstrukcije uz stalno praćenje promene uslova eksploatacije.

*„Praksa uvek mora biti građena
na dobroj teoriji“*

LEONARDO DA VINCI

IN

POGLAVLJE

IV. POUZDANOST, SIGURNOST I PROCENA STANJA KONSTRUKCIJA U EKSPLOATACIJI

4.1. RAZVOJ STRUKTURNE ANALIZE

Tokom XX veka je prilikom proračuna konstrukcija u celom svetu dominirao deterministički koncept proračuna konstrukcija – koncept dopuštenih napona. U svojoj disertaciji iz 1926. godine Max Mayer istražuje koncept graničnih stanja i probabilističke sigurnosti konstrukcija. Ovaj koncept nalazi primenu u praksi i tehničkoj regulativi Rusije (SSSR) 1940.godine. Koncept graničnih stanja sa parcijalnim koeficijentima sigurnosti usvojen je 1963. od strane CEB-a (fr.*Comité Européen du Béton*) za proračun betonskih konstrukcija. Komitet za sigurnost konstrukcija JCSS (eng.*Joint Committee on Structural Safety*) je inicirao opšti koncept pouzdanosti primenjiv i za druge građevinske materijale. Ovaj koncept je bio osnova za razvoj evrokodova EC (eng.*Eurocodes*) kao dela Evropskih standarda (eng.*European Standards*) i međunarodnih standarda ISO (eng.*International Organisation for Standardisation*). Komitet JCSS je podržan od mnogih međunarodnih profesionalnih udruženja kao što su CIB (fr.*Conseil International du Bâtiment*), ECCS (eng.*European Convention for Constructional Steelwork*), fib (fr.*Fédération Internationale de Béton*), IABSE (eng.*International Association for Bridge and Structural Engineering*), RILEM (fr.*Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*) i IASS (eng.*International Association for Shell and Spatial Structures*).

Standard ISO 2394 [34] sadrži osnovnu ideju pouzdanosti, kao probabilističkog pristupa u studiji ponašanja konstrukcija uvođenjem dimenzije vremena odnosno promene svojstava materijala, nosivosti konstrukcija ili dejstava tokom upotrebnog veka konstrukcije. Primena ovog koncepta na postojeće konstrukcije sadržana je u standardu ISO 13822:2010 [35], a statističke metode za upravljanje kvalitetom građevinskih materijala i komponenata sadržane su u standard ISO 12491:1997 [88] odnosno SRPS ISO 12491:2002. Prvi oblik koncept graničnih stanja u Americi i Evropi se uvodi kao koncept graničnih stanja sa globalnim koeficijentom sigurnosti LFD (eng.*Load Factor Design*) i bio je sadržani u dokumentima NaBau [89], ISO i JCSS. Alternativni koncept proračuna se pojavio u Americi pod nazivom PBD (eng.*Performance Based Design*) i sadržao je alternativne metode i materijale koji nisu bili sadržani u osnovnim standardima, a koristio se prvenstveno za proračun seizmike.

Evropski komitet za standardizaciju CEN (fr.*Comité Européen de Normalisation*), na osnovu odgovarajućih mandata Komisije evropske unije CEC (eng.*Commission of the European Communities*) je izradio evropske standarde radi unapređenja transvera roba i usluga otklanjanjem prepreka izazvanih tehničkom regulativom. Gradeći ovaj zajednički koncept za stvaranje jedinstvenog evropskog građevinskog tržišta, CEN je u okviru tehničkog komiteta TC 250 izradio sistem standarda za proračun konstrukcija u građevinarstvu pod nazivom Evrokodovi za konstrukcije (eng.*Structural Eurocode*) kao i prateće standarde EN za građevinske materijale, industrijsku proizvodnju određenih građevinskih materijala i ispitivanje svojstava materijala. Evrokodovi se pojavljuju kao

semi-probabilistički koncept proračuna konstrukcija, gde se probabilistički metodi koriste kod određivanja parcijalnih koeficijenata sigurnosti i kao kalibracija modela proračuna. Osnovni zahtevi standarda EN 1990:2002 [10] koji važi za sve evrokodove je da konstrukcija tokom izvođenja i tokom svog upotrebnoog veka bude pouzdana i ekonomična, odnosno da ima traženu nosivost, upotrebljivost, trajnost i robusnost. Ti zahtevi se ostvaruju kroz ispunjenje graničnih stanja konstrukcija. Osim osnovnih zahteva konstrukcija treba da ispuni određene zahteve pri oštećenjima u slučaju dejstva požara, kao i moguća oštećenja usled udara, eksplozije i ljudske greške, i da se preventivnim merama izbegnu potencijalna oštećenja. Semi-probabilistički koncept graničnih stanja je kalibrisan na osnovu analiza pouzdanosti i rizika konstrukcije. Kod konstrukcija sa oštećenjima usled slučajnih dejstava, graničnim stanjima se određuje tolerancija oštećenja sistema. U aneksu B standarda EN 1990:2002 [10] date su osnove proračuna po metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti i analiza pouzdanosti.

Za konstrukcije izložene ekstremnim dejstvima agresivne sredine u posebnim okruženjima poput naftnih platformi, koriste se posebni standardi. Norveška direkcija za naftu NPD (nor. *Norwegian Petroleum Directorate*) uvela je probabilistički koncept graničnih stanja za konstrukcije koje se nalaze na moru (eng. *offshore structures*) koje su obrađene DNV standardima (nor. *Det Norske Veritas*): DNV-CN 30.6:1992 [90], DNV-RP-A203:2017 [91], DNV OS-C101:2015 [92]. DNV standardi imaju veliki značaj u primeni i razvoju pouzdanosti konstrukcija. Granična stanja konstrukcija definisana su slično evrokodovima, ali sa preciznijim i potpunijim opisom značenja stanja i to:

- **Granično stanje nosivosti GSN** (eng. *Ultimate Limit States - ULS*) je gubitak otpornosti konstrukcije (tečenje i izvijanje), otkaz konstrukcije (krti lom), gubitak statičke ravnoteže konstrukcije ili njenih delova, posmatranih kao kruta tela – obrtanje ili preturanje, otkaz kritičnih elemenata konstrukcije usled prekoračenja granične nosivosti (u nekim slučajevima redukcije kod ponavljanja opterećenja) ili graničnih deformacija elemenata i transformacija konstrukcije u mehanizam (pojava velikih deformacija ili kolapsa),
- **Granično stanje upotrebljivosti GSU** (eng. *Serviceability Limit States - SLS*) nastaje usled: pomeranja koje mogu da promene efekat delovanja sile, deformacije koje mogu da promene distribuciju opterećenja između oslanjanja krutog objekta i oslonca konstrukcije, prevelikih vibracija koje proizvode nelagodnost ili deluju na ne noseće elemente, kretanje koje prelazi limite opreme, temperatura indukovana deformacijom.

U DNV data su posebna granična stanja koja mogu da nastanu pre ispune upotrebnoog veka usled oštećenja konstrukcija od zamora ili u slučaju incidentnih situacija:

- **Granično stanje zamora** (eng. *Fatigue Limit States - FLS*) je kumulativno oštećenje usled ponavljanja opterećenja,
- **Granično stanje usled incidentnih situacija** (eng. *Accidental Limit States - ALS*) može nastati kao konstrukcijsko oštećenje izazvano slučajnim opterećenjem pri kom se dostižu otpornosti oštećene konstrukcije ili narušava integritet konstrukcije.

Američki standard AASHTO (eng. *American Association of State Highway and Transportation Officials*) je baziran na probabilističkom konceptu faktora opterećenja i

čvrstoće materijala LRFD (eng. *Load and Resistance Factor Design*). Prema AASHTO konstrukcija treba da zadovolji:

- granično stanje nosivosti (eng. *Strength limit state*),
- granično stanje upotrebljivosti (eng. *Service limit state*),
- granično stanje zamora i loma (eng. *Fatigue and fracture limit state*),
- granično stanje ekstremnih pojava (eng. *Extreme event limit state*)

Američki institute za naftu API (eng. *American Petroleum Institute*) razvio je koncept LRFD za potrebe konstrukcija koje se nalaze na moru, iz kojeg su proistekli standardi: ISO 13819-1 [93], odnosno standard ISO:19902 [94].

Razvoj standarda za proračun konstrukcija baziran je na ideji potpunog probabilističkog proračuna konstrukcija, ali u praksi problem često predstavlja nedostatak statističke baze podataka. Značajan doprinos teoriji je početom 2000 god dao *fib* sa svojim Model kodom (eng. *Model Code*) sa konceptom direktne inženjerske primene pouzdanosti kod proračuna konstrukcija.

4.1.1 OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE

U stohastičkim modelima za proračun konstrukcija prema različitim konceptima za dejstva i svojstva materijala koriste se srednje ili fraktilne vrednosti. Raspodelu verovatnoće definišu srednja vrednost kao centar i standardna devijacija kao širina rasipanja rezultata. Karakteristična stalna dejstva se definišu na osnovu vrednosti inteziteta za fraktil 50% .

Karakteristična vrednost klimatskih dejstava se zasniva na verovatnoći od 2% da će njen vremenski promenljiv deo biti prekoračen u toku referentnog perioda od jedne godine. To je ekvivalentno srednjem povratnom periodu od 50 godina za vremenski promenljiv deo. Međutim, u izvesnim slučajevima, karakter dejstva i/ili odabrana proračunska situacija zahtevaju se drugi, pogodniji fraktil i/ili povratni period.

E i R su najčešće slučajne kumulativne promenljive i to E kao uticaj od dejstava izražen kao sila, moment sile ili napon, a R nosivost kao čvrstoća materijala izražena u jedinicama napona, momenta ili sile. Krutost na savijanje EI i aksijalna krutost EA se mogu smatrati slučajnim kumulativnim promenljivim.

Mehanički model konstrukcije dobijen je na osnovu pretpostavki teorije konstrukcija, a čine ga noseći sistem konstrukcije, geometrija i opterećenje. U probabilističkoj analizi slučajne promenljive mogu biti :

a) osnovne slučajne promenljive:

- geometrijske veličine: geomerija sistema a_1, a_2, \dots, a_i , geomerija poprečnih preseka štapova, površina A , moment inercije I , otporni moment W .
- osnovne karakteristike materijala: čvrstoća f , moduli (E, G) ,
- dejstva na konstrukcije: sile P, q , pomeranja u, v, w , temperatura t .

b) kumulativne slučajne promenljive:

- uticaji od dejstava: funkcija $S=S(E, a_i, A, I,)$
- krutost EI, EA, GA
- nosivost konstrukcije $R=R(f, a_i, A, I)$

Istraživački mehanički model konstrukcije se formira tako da što bliže odražava mehaničko ponašanje realne konstrukcije izložene dejstvima. Model se formira na osnovu više definisanih tehničkih zahteva održivog razvoja kao što su sigurnost, pouzdanost, trajnost i upotrebljivost konstrukcija, a često je uslovljen i drugim zahtevima kao što je ekonomičnost, funkcionalnost, ekologija i estetika. Osnovne karakteristike mehaničkog modela čine, sa jedne strane geometrijakoj je uslovljena formom i funkcijom objekta, karakteristike primenjenih materijala u pogledu nosivosti, deformabilnosti, trajnosti i postojanosti, a sa druge strane dejstva na konstrukciju. Izbor nosećeg sistema, zavisi i od projektovanog upotrebnog veka konstrukcije, od klimatskih, geomehaničkih, hidrauličkih i seizmičkih uslova, tako da se mehanički model može formirati i kao model koji je promenljiv tokom vremena njegove upotrebe, sa vremenski zavisnim slučajnim promenljivim, u cilju procene rizika, ocene i prognoze stanja tokom eksploatacije. Model može da uključi i preventivne i represivne mere u pogledu održivosti usled propadanja materijala dejstava agresivne sredine, sve do ispunjenja preostalog životnog veka. Konačni mehanički model konstrukcije može biti rezultat studije, pouzdanosti i rizika konstrukcije i javne koristi tokom upotrebe objekta, primenom metode odlučivanja u problemima konstrukcijskog inženjerstva SEDP (eng. *Structural Engineering Decision Problem*). Sa ekološkog aspekta može se formirati "zeleni model" koji ispunjava parametre u pogledu zagađenja životne sredine, potrošnje prirodnih resursa, emisije štetnih materija i odlaganja otpada nakon rušenja [32]. Izboru konačnog mehaničkog modela prethodi više parametarskih studija, i varijantnih rešenja.

Matematički model predstavlja kvantifikaciju proračunske strategije konstrukcije i sadrži potrebne slučajne promenljive usvojenih dejstava, nosivosti konstrukcije i geometrije nosećih sistema konstrukcije. Matematičkim modelom se analitički ili numerički dolazi do proračuna reakcija oslonaca, sila u presecima, pomeranja, naponskih stanja, deformacija i stabilnosti konstrukcija. Proračunske vrednosti inteziteta dejstava, kao i čvrstoće materijala, zavise od koncepta proračuna i one se razlikuju u zavisnosti od primenjenog koncepta proračuna, zbog primene različitih parcijalnih ili globalnih koeficijenata sigurnosti.

Usvajanje nosećeg sistema, naročito kod mostova je složeni zadatak koji zahteva visok nivo znanja, iskustvo, kreativnost i veštinu projektanta. Projektom usvojeni materijali konstrukcija osim nosivosti i deformabilnosti treba da zadovolje još i uslove trajnosti i postojanosti materijala na agresivna dejstva okoline ili dejstva izazvana na drugi način. Koncepti mehaničkih modela ne sadrže uticaje agresivnih dejstava sredine na ponašanje materijala već se ovi uticaji uzimaju preko posebnih modela. Za konstrukcije koje su direktno izložene agresivnim dejstava sredine, veoma je važan izbor materijala sa aspekta trajnosti i postojanosti, kao i precizna analiza vrste i inteziteta agresivnih dejstava. Dobra konstrukcijska i funkcionalna rešenja mogu u značajnoj meri da doprinesu smanjenju dejstva agresivnih uticaja i produženju veka konstrukcije.

4.2 KONCEPTI PRORAČUNA KONSTRUKCIJA

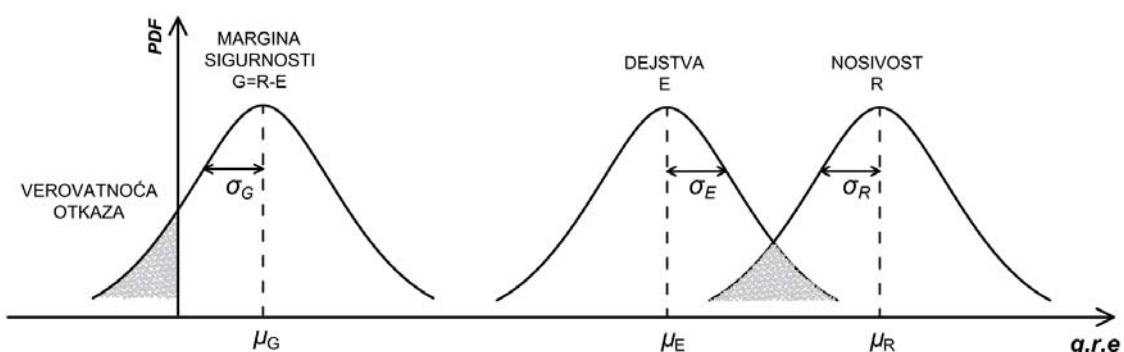
Transformacijom matematičkog modela mogu se definisati tri koncepta proračuna konstrukcija i to: *deterministički koncept*, *semi-probabilistički koncept* i *probabilistički koncept* proračuna.

Deterministički koncept sigurnosti predstavlja koncept dopuštenih napona. U mehanički i matematički model se unose realna opterećenja ili druga dejstva, a od modela se traži ispunjenje zahteva iskorišćenja dopuštenih napona i/ili deformacija konstrukcija. Dopušteni naponi odgovaraju karakteristikama čvrstoće, odnosno nosivosti materijala konstrukcije, kao konstante materijala i njihove vrednosti se dobijaju na osnovu srednje vrednosti čvrstoće materijala, redukovane globalnim koeficijentom sigurnosti. Na osnovu uslova iskorišćenja napona i/ili deformacija, određuje se nosivost konstrukcije ili dimenzije preseka nosećih elemenata konstrukcije.

Semi-probabilistički koncept proračuna konstrukcija je baziran na sigurnosti dobijenoj na osnovu odabira reprezentativnih vrednosti različitih slučajnih promeljivih za dejstva i svojstva materijala, primenom skupa kalibrisanih parcijalnih faktora sigurnosti do određivanja margina sigurnosti kod stohastičkog problema za dejstva, odnosno uticaja od dejstava, svojstva materijala i nosivosti konstrukcije. Mehanički i matematički modeli sadrže redukovana dejstva parcijalnim faktorima sigurnosti za dejstva i redukovane vrednosti karakteristike nosivosti parcijalnim koeficijentom sigurnosti za materijale sa ciljem ispunjenja zahteva graničnih stanja konstrukcije. Ove vrednosti su dobijene na osnovu indeksa pouzdanosti konstrukcije dobijenih za trajanje od 50 godina u zavisnosti od odnosa funkcija slučajnih promenljivih E za dejstva i R za otpornost.

Probabilistički koncept proračuna konstrukcija obuhvata verovatnoću otkaza konstrukcija i marginu sigurnosti. Zasniva se na probabilističkom modelu slučajnih promenljivih to za dejstva i nosivost konstrukcije, a svodi se na rešenje dva problema:

- probabilističku evaluaciju margine sigurnosti konstrukcije $P_r = P(R > E)$
- verovatnoću otkaza konstrukcije $P_f = P(R < E)$.



Slika 4.1 Verovatnoća otkaza i margina sigurnosti preko funkcija PDF –za vrednosti g, r, e

Slučajne promenljive E za dejstva i R za mehaničku otpornost konstrukcije kao i margina sigurnosti, prikazane su na slici 4.1. Promenljive su date preko funkcija PDF (eng. *Probability Density Function*) za vrednosti r -nosivost, e -uticaji od dejstava, g -margina sigurnosti, srednje vrednosti μ_G, μ_E i μ_R , standardne devijacije σ_G, σ_E i σ_R , za

funkcije G, E i R . Granično stanje funkcije koja definiše marginu sigurnosti odnosno verovatnoću otkaza konstrukcije dobija se iz uslova jednakosti:

$$P_f = P_r = P(R=E) \quad (4.1)$$

Komplement $(1 - P_f)$ je pouzdanost, odnosno:

$$P_r = 1 - P_f \quad (4.2)$$

Verovatnoća otkaza P_f se dobija iz integrala:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_E(x) \phi_R(x) dx \quad (4.3)$$

gde je:

- $\Phi_R(x)$ - kumulativna distribuciona funkcija mehaničke otpornosti konstrukcije R , gde je $\Phi_R(x) = P(R < x)$
- $f_E(x)$ - funkcija verovatnoće uticaja dejstava E

Margina sigurnosti $G = g(R, E)$ se dobija iz odnosa funkcije slučajnih promenljivih R i E kao slučajne promenljive X [95]:

$$G = g(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4.4)$$

gde je N – broj slučajnih promenljivih. Za $R > E$ margina sigurnosti konstrukcije je:

$$G = g(R, E) = R - E \geq 0 \quad (4.5)$$

što znači da je konstrukcija u domenu pouzdanosti. Ako se posmatraju promenljive X_1, X_2, \dots, X_N , onda važi za domen pouzdanosti da je:

$$g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_N) \geq 0 \quad (4.6)$$

ili

$$G = g(R, E) = R/E \geq 1 \quad (4.7)$$

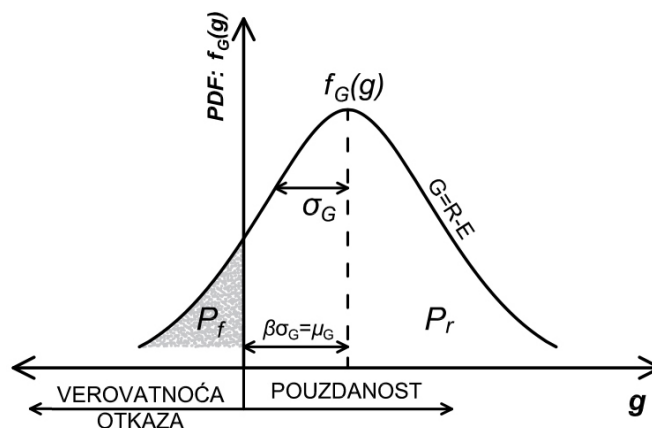
ako je $R < E$, onda se može definisati verovatnoća otkaza konstrukcije iz izraza:

$$P_f = P(G = g(R, E) < 0) = P(R - E < 0) \quad (4.8)$$

ili

$$P_f = P(G = g(R, E) < 1) = P(R/E < 1) \quad (4.9)$$

Model verovatnoće otkaza i pouzdanosti konstrukcije je prikazana na slici 4.2. Šrafirana površina predstavlja verovatnoću otkaza, a nešrafirana površina unutar krive predstavlja marginu sigurnosti.



Slika 4.2 Margina sigurnosti

Iz uslova jednakosti uticaja dejstava i nosivosti konstrukcije $R=E$ dobija se funkcija graničnog stanja, poznata kao funkcija performansi (eng. *Performance function*):

$$G = g(R, E) = R - E = 0 \quad (4.10)$$

ili
$$G = g(R, E) = R/E = 1 \quad (4.11)$$

Iz uslova jednakosti $R=E$ se može dobiti uslov iskorišćenja nosivosti konstrukcije. Verovatnoća otkaza P_f se dobija iz integrala u granicama $(-\infty, 0)$, a margina sigurnosti P_r se dobija iz integrala u granicama $(0, +\infty)$, odnosno:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg \quad (4.12)$$

$$P_r = \int_0^{\infty} f_G(g) dg \quad (4.13)$$

za:
$$(g(R, E) < 0) \quad (4.14)$$

Uslov pouzdanosti je:
$$P_f < P_r \quad (4.15)$$

Indeks pouzdanosti¹⁹ se dobija na osnovu srednje vrednosti μ_G funkcije G i standardne devijacije σ_G . Iz slike 4.2 sledi da je:

$$\beta \cdot \sigma_G = \mu_G \quad (4.16)$$

odnosno
$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (4.17)$$

4.2.1 SINTEZA MODELA ZA PRORAČUN KONSTRUKCIJA

Proračunski model konstrukcije bazira na složenom fizičkom modelu koji u sebi sadrži niz drgugih međusobno povezanih modela (*slika 4.3*). Osnovni i međusobno zavisni činioci modela konstrukcije su geometrija, material i dejstva. Svi navedeni činioci se u fizičkom modelu konstrukcija mogu posmatrati kao stohastički modeli sa međusobno zavisnim ili nezavisnim slučajnim promenljivim veličinama. Stohastički model je prestavljen funkcijom PDF i nezavisnim slučajnim promenljivim. Nominalna vrednost slučajne promenljive je definisana ili kao srednja vrednost μ_S (50%) ili fraktilna vrednost. Fraktilne vrednosti za dejstva su μ_{SK} (98%) odnosno za materijale μ_{RK} (5%) na statističkoj krivi raspodele.

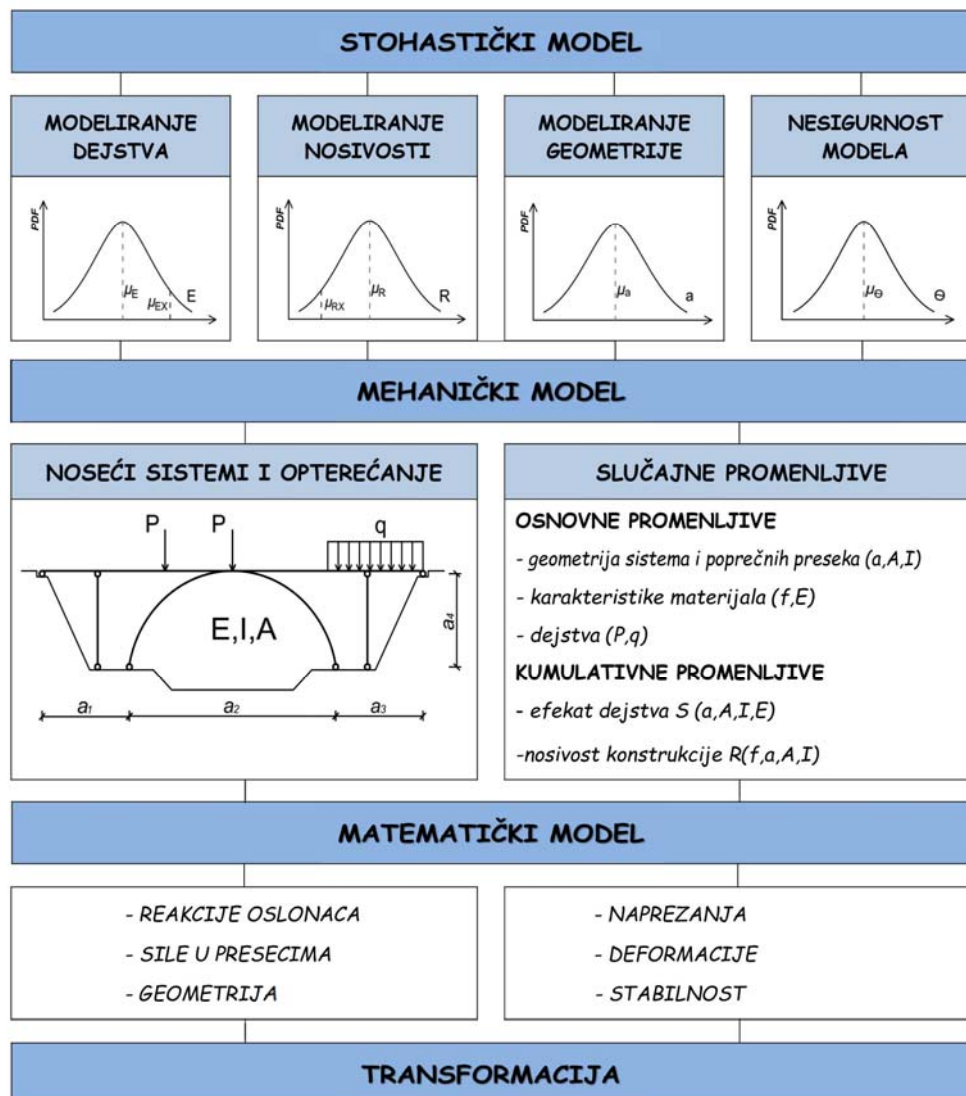
Prvi korak u formiranju modela je geometrija i materijalizacija konstrukcije koja proizilazi iz zahteva namene, funkcionalnosti, estetike, sigurnosti, trajnosti i činioca održive izgradnje (poglavlje 2.5). Noseći sistem konstrukcije se formira na osnovu geomehaničkih, seizmičkih i hidroloških zahteva, određivanjem raspona i visina konstrukcije, rasporeda nosećih elemenata njihovih poprečnih preseka i njihovih veza. Geometrijski podaci sistema i podaci poprečnih preseka kao što je površina, otporni moment i moment inercije su osnovne slučajne promenljive i izražavaju se u jedinicama m^1 , m^2 , m^3 , m^4 . Dejstva su proizvod klimatskih, geografskih, hidrauličkih, saobraćajnih prilika i okruženja u kojima se nalazi konstrukcija. Osnovne slučajne promenljive za dejstva mogu biti linijska, površinska i zapreminska opterećenja, sile, temperature i sl. Analiza dejstava u formiranju maheničkog modela povezana je i sa materijalizacijom i

¹⁹ Cornell-ov indeks pouzdanosti

geometrijom sistema. Dejstva se određuju na osnovu stohastičkim modela. Materijalizacija sistema se dobija na osnovu ishoda, odnosno podataka matematičkog očekivanja stohastičkog modela karakteristika materijala. Osnovne slučajne promenljive za materijale su: čvrstoća, modul elastičnosti i modul smicanja (N/m^2 , MPa).

Mehanički model konstrukcije se formira na osnovu međusobnog odnosa modela dejstava i materijala koji se u osnovi transformiše u zavisnosti od koncepta proračuna. Slučajne kumulativne promenljive konstrukcije mogu biti efekti dejstava, odnosno sile u presecima, odnosno odgovarajuća naponska stanja, moment nosivosti preseka i krutost konstrukcije (EI -krutost na savijanje, EA - aksijalna krutost).

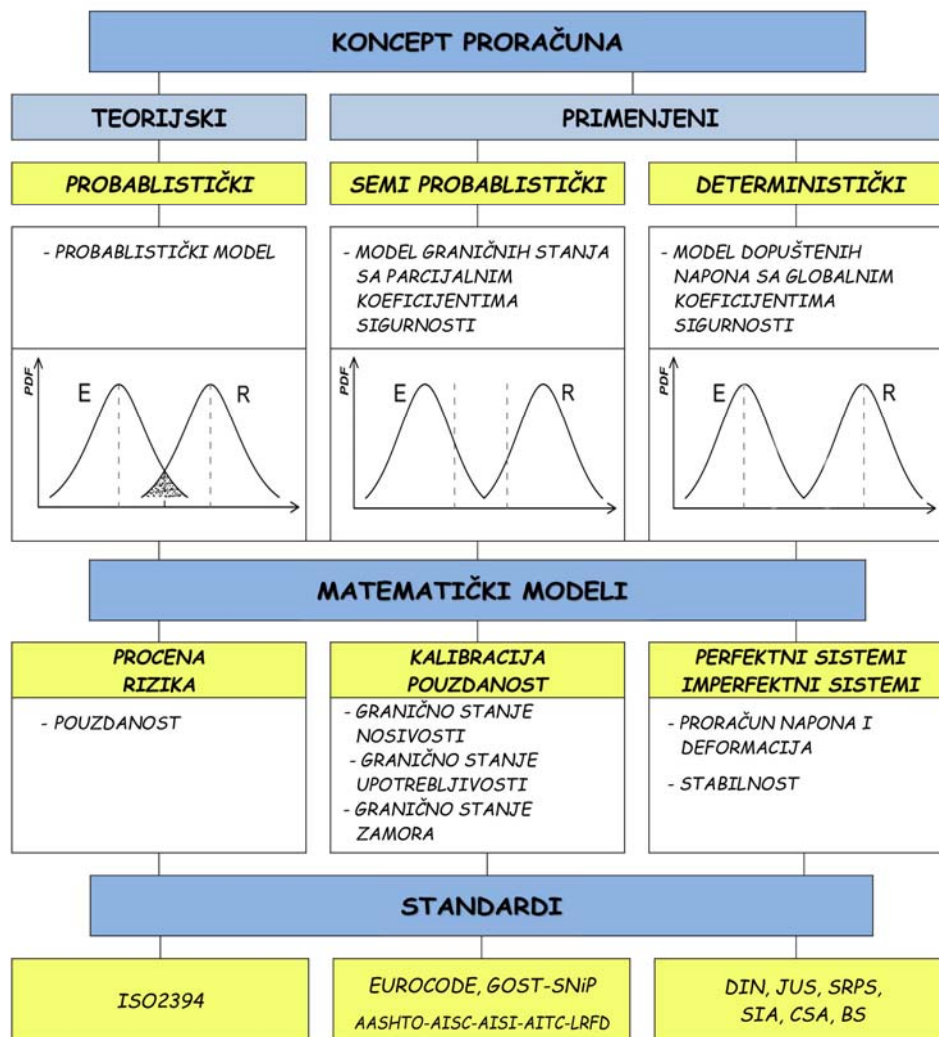
Kod probabilističkog i semi-probabilističkog koncepta geometrijski modeli i modeli nesigurnosti takođe učestvuju u konačnom matematičkom modelu proračuna konstrukcije. Matematičkim modelom se definišu postupci sračunavanja reakcija oslonaca, sile u vezama, sile u presecima, naponi i deformacije.



Slika 4.3 Formiranje modela i materijalizacija konstrukcije

Na slici 4.3 dat je šematski prikaz niza postupaka tokom formiranja modela i materijalizacije konstrukcije. Probabilističkom analizom se može odrediti domen verovatnoće otkaza konstrukcija, gde se kao granična vrednost pojavljuje margina

sigurnosti. Teorijski proračun domena sigurnosti se može odrediti bez stepena sigurnosti. U inženjerskim proračunima koncept dopuštenih napona sadrži odgovarajući stepen sigurnosti u globalnom koeficijentu sigurnosti, dok koncept graničnih stanja sadrži odgovarajući stepen sigurnosti u parcijalnim koeficijentima sigurnosti za dejstva i materijale. Koeficijentima sigurnosti se povećava sigurnost konstrukcije i pokrivaju nepredviđena dejstva, hazardi, oštećenja konstrukcije, greške usled netačnosti modela kao i ljudske greške.



Slika 4.4 Koncepti proračuna konstrukcija

Na slici 4.4 su šematski prikazani različiti koncepti proračuna: *deterministički*, *semi-probabilistički* i *probabilistički*.

U deterministički koncept spada koncept dopuštenih napona, gde se u matematički model uvode realna opterećenja, a čvrstoće se redukuju globalnim koeficijentom sigurnosti. U konceptu graničnih stanja sa globalnim koeficijentom sigurnosti, gde se opterećenja uvećavaju sa faktorom sigurnosti sve do dostizanja graničnih vrednosti čvrstoće materijala. Deterministički koncept se svodi na kontrolu napona i deformacija, a nosivost preseka konstrukcije se određuje iz uslova iskorišćenja napona ili deformacija. Ovakav koncept proračuna bio je veoma zastupljen u prošlom veku kao sastavni deo standarda i normi poput jugoslovenskih standarda JUS, nemačkih DIN standarda, američkih standarda SIA, kanadskih standarda CSA, Briranskih standarda BS i drugih.

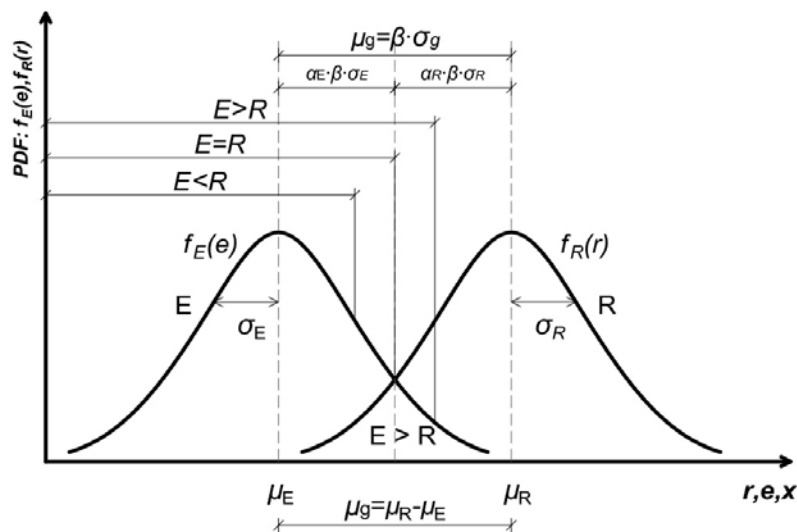
Semi-probabilistički koncept je nastao početkom XXI veka i deo je tehničke regulative i standarda širom sveta: u Evropi (EN 1990 - EN1999), u Americi (AASHTO-AISC-AISI-AITC-LRFD), u Rusiji ($GOST^{20}-SNiP^{21}$), itd. Koncept bazira na parcijalnim koeficijentima sigurnosti za dejstva i za materijale. Ovaj koncept koristi probabilističke modele za određivanje dejstava i karakteristika materijala, a probabilistički koncept pouzdanosti se koristi za kalibraciju vrednosti parcijalnih faktora sigurnosti.

Probabilistički koncept proračuna svodi se na određivanje granice domena verovatnoće konstrukcijskog kolapsa i primene probabilističkih metoda s jedne strane za procenu rizika i sa druge strane za određivanje domena konstrukcijske pouzdanosti

4.3 MODELI NA BAZI POUZDANOSTI KONSTRUKCIJA

Inženjerski pristup probabilističkom konceptu proračuna konstrukcija podrazumeva kombinacije dve slučajne promenljive E i R koje mogu biti linearne ili nelinearne kombinacije uticaja usled dejstava, materijalne i geometrijske karakteristike koje mogu biti statistički nezavisne ili zavisne slučajne promenljive X_i kao sistem X_i u n -dimenzionalnom prostoru. Ako se posmatra stohastički model na slici 4.5, za $R > E$, gde su srednje vrednosti raspodele verovatnoće $\mu_R > \mu_E$ onda važi:

$$\mu_G = \mu_R - \mu_E = \beta \cdot \delta_G \quad (4.18)$$



Slika 4.5 Model pouzdanosti

Na osnovu slike 4.5 sledi da je:

$$E = \mu_E + \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E \quad (4.19)$$

$$R = \mu_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R \quad (4.20)$$

gde su α_R i α_E koeficijenti osjetljivosti za nosivost i za uticaje od dejstva. Ovi koeficijenti pokazuju udaljenost srednje vrednosti μ_R i μ_E od presečne tačke krive R i E dobijaju se za granično stanje "design point":

$$\mu_E + \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E = \mu_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R \quad (4.21)$$

odakle sledi:

²⁰ Государственный стандарт, Россия

²¹ Строительные нормы и правила

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\alpha_E \cdot \sigma_E + \alpha_R \cdot \sigma_R} \quad (4.22)$$

Indeks pouzdanosti [96] je definisan izrazom:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} \quad (4.23)$$

gde na osnovu geometrije sledi da je:

$$\alpha_E = \frac{\sigma_E}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} \quad (4.24)$$

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} \quad (4.25)$$

Verovatnoća otkaza konstrukcije $P_f < P$ ($g(R, E) < 0$) je:

$$P_f = \Phi \left[\frac{0 - (\mu_R - \mu_E)}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} \right] \quad (4.26)$$

odakle se dobija da je:

$$P_f = 1 - \Phi \left[\frac{(\mu_R - \mu_E)}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} \right] \quad (4.27)$$

a verovatnoća pouzdanosti konstrukcije na osnovu izraza 4.2 i 4.13:

$$P_r = \int_0^{\infty} f_G(g) dg = 1 - \Phi \left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G} \right) = 1 - \Phi(-\beta) = 1 - P_f \quad (4.28)$$

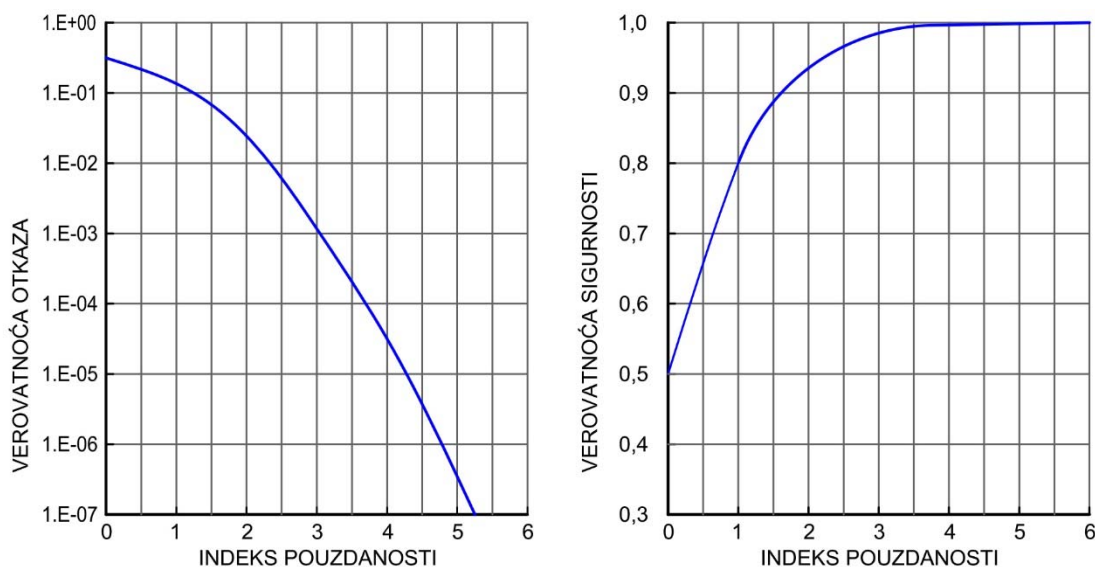
odnosno

$$P_r = \Phi(-\beta) = 1 + P_f \quad (4.28a)$$

Verovatnoća otkaza u zavisnosti od indeksa pouzdanosti [97] računa se prema izrazima:

$$P_f = \varphi(-\beta) \approx 10^{\left[-0,198(-\beta - 0,605)^2 - 0,297 \right]} \quad (4.29)$$

$$\beta = \varphi^{-1}(P_f) \approx -0,605 + \left[-\log(P_f) / 0,198 - 1,5 \right]^{0,5} \quad (4.30)$$



Slika 4.6 Zavisnost verovatnoće otkaza konstrukcije i indeksa pouzdanosti (levo); Zavisnost verovatnoće sigurnosti i indeksa pouzdanosti konstrukcije (desno)

Zavisnost verovatnoće otkaza konstrukcije i indeksa pouzdanosti i zavisnost verovatnoće sigurnosti konstrukcije i indeksa pouzdanosti prikazana je grafikonom na slici 4.5.

Na osnovu prethodnih izraza sračunate su vrednosti indeksa pouzdanosti β , verovatnoće sigurnosti P_r i verovatnoće otkaza konstrukcije P_f (tabela 4.1).

Tabela 4.1 Vrednosti indeksa pouzdanosti, verovatnoće sigurnosti i verovatnoće otkaza

β	0	0.67	1.00	1.28	1.65	2.33	3.09	3.72	4.26	4.75	5.2	6	7	8
P_f	0.50	0.25	0.16	0.10	0.05	0.01	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	0.987×10^{-9}	0.128×10^{-11}	0.611×10^{-15}
$1 - P_f$	0.50	0.75	0.84	0.90	0.95	0.99	0.999	0.9999	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1

Metode proračuna indeksa pouzdanosti su:

- metode pouzdanosti I reda: *First Order Reliability Method (FORM)* [10], *First-Order-Second Moment (FOSM)* [96]
- metode pouzdanosti II reda : *Second Order Reliability Method (SORM)*,

4.4 MODELI NA BAZI PROBABILISTIČKE ANALIZA RIZIKA

Probabilistička analiza rizika konstrukcija je deo opšte analize rizika. Za procenu rizika konstrukcija, mogu se delom koristiti isti stohastički modeli i iste probabilističke metode kao i u pouzdanosti konstrukcija. Bez obzira na mogućnost korišćenja istih modela za analizu, pouzdanost i rizik su sasvim različiti pojmovi, sa veoma bitnim razlikama u osnovama oba pristupa

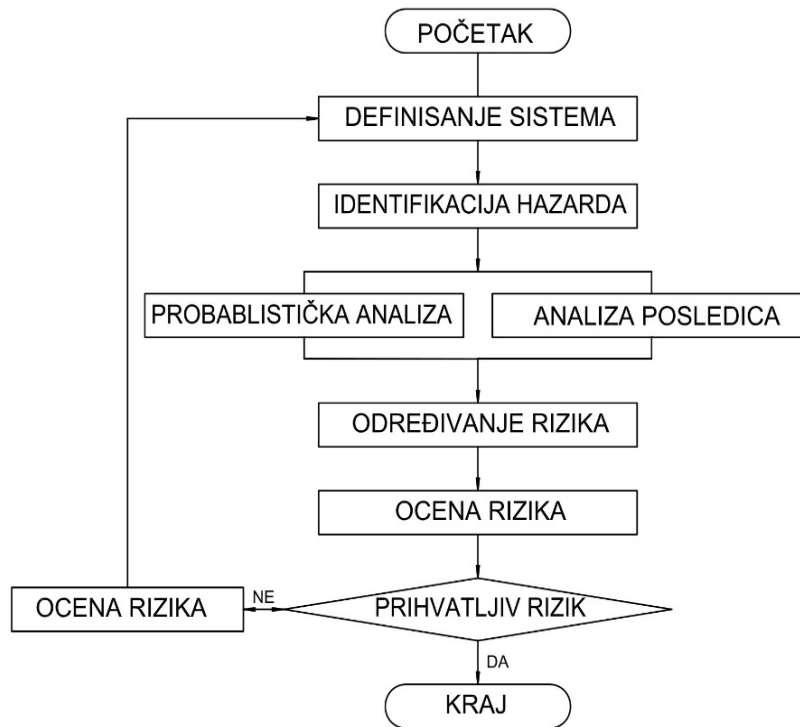
Pouzdanost konstrukcija bazira na analizi slučajnih promenljivih u domenu margine sigurnosti sve do granice otkaza konstrukcije. Granica između pouzdanosti i otkaza konstrukcije može biti jednovremeno osnova za proračun i sigurnosti konstrukcije i rizika.

Za određivanje granice pouzdanosti i verovatnoće otkaza konstrukcije usled dejstava mogu da se koriste isti matematički modeli, s tim što se kod sigurnost konstrukcije određuje vrednost dostizanja te granice i razmatraju se vrednosti u domenu unutar tih granica, dok se kod rizika polazi od toga da je dostignuta ta granica i analizira se verovatnoća pojave neželjenog događaja i mogućih posledica. Ocenom rizika se dolazi do granice prihvatljivosti rizika.

Analiza rizika često obuhvata širi domen uzroka i posledica štetnih ishoda, gde se osim tehničkih, obuhvataju i aspekti poput eko-socio-ekonomskih ili aspekti učešća ljudske greške. Kod mostova neželjeni događaji su obuhvaćeni grupom incidentnih opterećenja – udar vozila, poplave, eksplozije i zemljotresi.

Ekstremni oblici dejstva su *hazardi* kao trenutne pojave velikog inteziteta i relativno kratkog vremena trajanja. Neželjeni događaji se mogu javiti i kao posledica znatno sporijih procesa usled deterioracije i opadanja karakteristika konstrukcije.

Algoritam sistemske procedure procene rizika prema standardu ISO 2394 [34] prikazan je na slici 4.7.



Slika 4.7 Algoritam iterativne procedure proračuna rizika prema ISO 2394 [34]

Rizici se mogu iskazati kvalitativno (eng. *Quantitative Risk Assessment-QRA*) formiranjem matrice rizika na osnovu frekvencije opasnosti ili neželjenog događaja i očekivanih posledica. Za kvantitativnu ocenu postoji više računskih pristupa [98]. U probablističkoj analizi, rizik konstrukcija se kao mera opasnosti može kvantifikovati tripletom [99]:

$$R = \{ \{ S_i, P_i, X_i \} \} \quad (4.31)$$

gde je:

- S_i - specifičan neželjeni događaj koji dovodi do oštećenja
- P_i -verovatnoća otkaza konstrukcije (verovatnoća pojavljivanja događaja)- izražava se preko frekvencije događaja u jedinici vremena i ima vrednost od 1 do 0.
- X_i -obim nastalih posledica (prosečno očekivanje nekog oštećenja)

Verovatnoća otkaza konstrukcije može biti predmet procene rizika usled nekog hazarda. Postupak proračuna rizika svodi se na odabiru objekata koji su podležni riziku i grube procene rizika za grupu odabranih objekata visokog rizika i na detaljnu analizu rizika. Verovatnoća otkaza u analizi rizika svodi se na probablistični model dejstava i nosivosti konstrukcije u zavisnosti od posledica. Rizik se može analizirati kao zbir rizika od pojedinačnih dejstava ili kao zbir relevantnih dejstava i njihovih kombinacija ili kao rizik merodavnih dejstava i njihovih kombinacija [98]. Napredne metode rizika su:

- *Preliminary Hazard Analysis (PHA)*
- *Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA)*
- *Hazard and Operability Study (HAZOP)*
- *Hazard-Identification/Risk Screening Sessions (HAZID)*

4.5 SIGURNOST KONSTRUKCIJA

Proračun verovatnoće otkaza, koji može biti deo kvantifikacije rizika ili pouzdanosti kod problema proračuna konstrukcija, zasniva se na analizi osnovnog stohastičkog modela dve slučajne promenljive u opštem slučaju sa nominalnim vrednostima i to dejstva na konstrukciju E_N i nosivost konstrukcije R_N , uzimajući u proračun i uticaj nesigurnosti usvojenih modela.

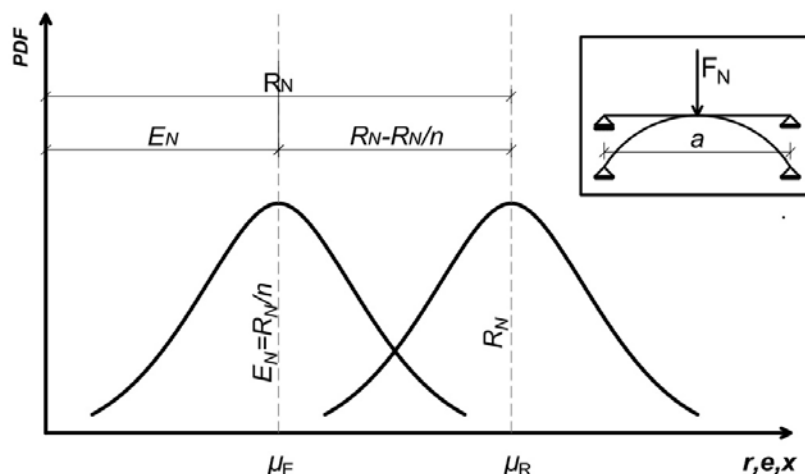
Pored osnovnih stohastičkih modela i modela nesigurnosti, u cilju povećanja sigurnosti uključuju se nepredviđene situacije pri određivanju dejstava i pri usvajanju karateristika materijala, odnosno nosivosti konstrukcije. Meru sigurnosti konstrukcije određuje koeficijent sigurnosti. Vrednost globalnog koeficijenta sigurnosti se definiše kao odnos nominalnih vrednosti R_N i E_N :

$$n_N = R_N / E_N \quad (4.32)$$

pri čemu je $R_N > E_N$, $n > 1$. Vrednost centralnog koeficijenta sigurnosti se definiše kao odnos srednjih vrednosti μ_R i μ_E :

$$n_c = \mu_R / \mu_E \quad (4.33)$$

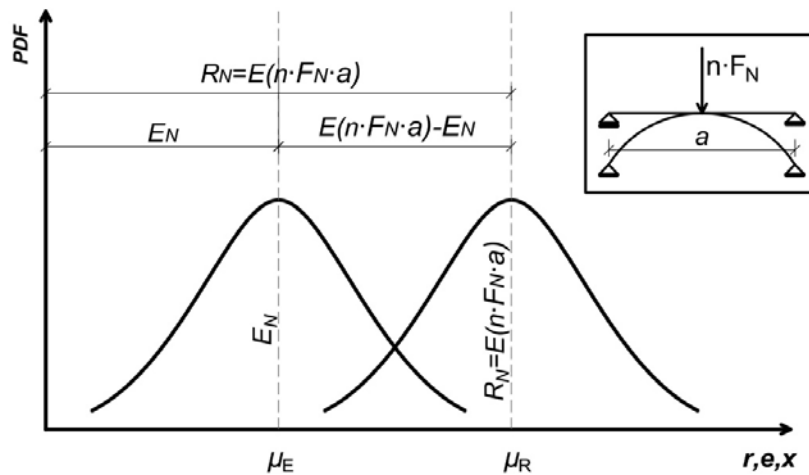
U tradicionalnom konceptu proračuna konstrukcija prema dopuštenim naponima koeficijent sigurnosti je definisan na osnovu pretpostavke elastičnog ponašanja konstrukcije i predstavlja odnos nominalne čvrstoće materijala dobijene ispitivanjem kao srednja vrednost ili određen kao iskustveni podatak ili na osnovu ekonomskih zahteva. Ako je poznata srednja vrednost čvrstoće materijala u proračunskom modelu konstrukcije u kome su definisani noseći sistem, realna opterećenja i geometrijski podaci, onda je globalni koeficijent sigurnosti ili samo "koeficijent sigurnosti" definisan iz odnosa $E_N = R_N / n_N$. Vrednost $R_N - R_N / n_N$ predstavlja preostalu nosivost konstrukcije. Domen projektovanja konstrukcija je određen za sve vrednosti $E_N \leq R_N / n_N$.



Slika 4.8 Globalni koeficijent sigurnosti u konceptu dopuštenih napona

Na slici 4.8 na osnovu definicije koeficijenta sigurnosti se može odrediti granica iskorišćenja nosivosti konstrukcije, a to je pri vrednosti $n_N = R_N / E_N$.

Koncept graničnih stanja sa globalnim koeficijetom sigurnosti bazira na teoriji loma gde se samo nominalno opterećenje F_N multiplikuje koeficijentom sigurnosti n , odnosno $F_N n$ sve do dostizanja granice kolapsa konstrukcije.



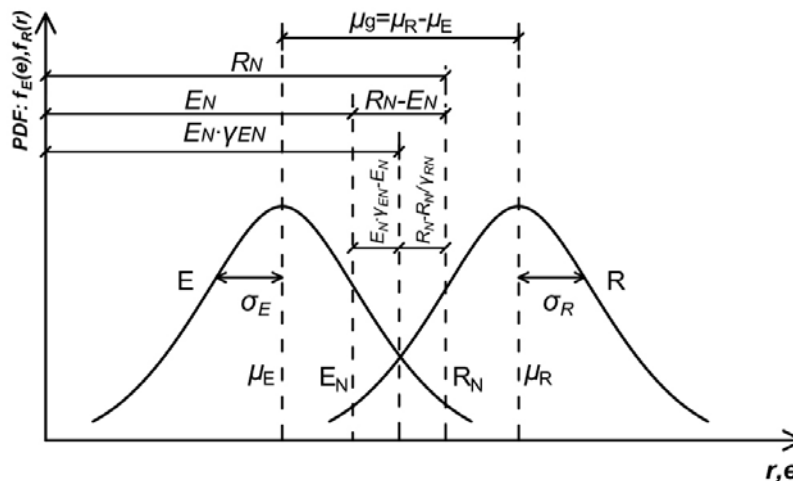
Slika 4.9 Globalni koeficijent sigurnosti u konceptu graničnog stanja

Uticaj usled zadatog opterećenja F_N za određeni noseći sistem sa geometrijskim podacima a , je:

$$E(nF_N, a) \tag{4.34}$$

Granica loma je dostignuta pri uslovu $E(nF_N, a) = R_N$, a končni koeficijent sigurnosti je $n_{gr} = R_N / E_N$. Vrednost $E(nF_N, a) - E_N$, određuje preostalu nosivost konstrukcije (slika 4.9). Parcijalni koeficijenti sigurnosti za dejstva i nosivost konstrukcije određuju se na osnovu stohastičkog modela i kritične tačke preklapanja krivih R i E .

Parcijalni koeficijenti sigurnosti nosivosti konstrukcije R i uticaja od dejstava E se mogu definisati na osnovu nominalnih vrednosti R_N i E_N (slika 4.10).



Slika 4.10 Nominalne vrednosti za dejstva i materijale

U odnosu na presečnu tačku krivih R i E , rezerva sigurnosti za dejstva je:

$$E_N \cdot \gamma_{E,N} - E_N = E_N (\gamma_{E,N} - 1) \tag{4.35}$$

A rezerva sigurnosti za nosivost konstrukcije je:

$$R_N - \frac{R_N}{\gamma_{R,N}} = R_N \left(1 - \frac{1}{\gamma_{R,N}} \right) \tag{4.36}$$

Iz uslova jednakosti u odnosu na presečnu tačku krivih R i E , sledi:

$$E_N \cdot \gamma_{E,N} = \frac{R_N}{\gamma_{R,N}} \quad (4.37)$$

Srednje vrednosti za materijale μ_R i za dejstva μ_E na osnovu izraza (4.17) je:

$$\mu_G = \mu_R - \mu_E = \beta \cdot \sigma_G \quad (4.38)$$

Uopšteno vrednost nominalnog faktora sigurnosti se određuje u zavisnosti od koncepta proračuna konstrukcija, tako da predstavlja redukciju samo dejstava u konceptu graničnih stanja sa globalnim koeficijentom sidurnosti ili samo nosivosti materijala u konceptu dopuštenih napona ili i redukciju dejstava i nosivosti, kao što je kod Evrokodova ili LRDF koncepta.

Površina preklapanja između dve krive (eng. *Area of Overlap*) prikazana na slici 4.9, omogućuje određivanje verovatnoće otkaza konstrukcije. Veća udaljenost srednjih vrednosti krivih smanjuje verovatnoću otkaza i obrnuto. Smanjenjem standardne devijacije odnosno sužavanjem krivih takođe se smanjuje verovatnoća otkaza i obrnuto. Probabilističke funkcije gustine (*PDF*) koje formiraju oblike krivih takođe igraju ulogu u preklapanju krivih. Obezbeđenje veće sigurnosti u proračunu postiže se odabirom slučajnih promenljivih sa najmanjom površinom preklapanja. Za pomeranje položaja nominalnih vrednosti se koriste faktori sigurnosti.

Proračun zasnovan na riziku je racionalniji pristup, jer minimizira područje preklapanja uzimajući u obzir sve slučajne promenljive kako bi se postigao prihvatljiv nivo rizika.

Proračun konstrukcija prema evrokodovima baziran je na konceptu parcijalnih koeficijenata sigurnosti, koji se uzima za svako dejstvo i posebno za materijale. Pouzdanost konstrukcija se koristi za kalibraciju parcijalnih koeficijenata sigurnosti prema teoriji verovatnoće kod proračuna prema graničnim stanjima. Primenje metode verovatnoće su metode pouzdanosti prvog reda (*FORM*) i metode matematičke verovatnoće. Evrokod-0 definiše ciljnu vrednost indeksa pouzdanosti i to za različite proračunske situacije i za referentni period od 1 godine β_1 i za N=50 godina β_{50} [EN]. Ako je β_n indeks pouzdanosti za n godina, onda se na osnovu vrednosti β_1 može sračunati:

$$\phi(\beta_N) = [\phi(\beta_1)]^n \quad (4.39)$$

U evrokodovima u konceptu parcijalnih koeficijenata sigurnosti, proračunske vrednosti slučajnih osnovnih promenljivih za dejstva F_d i za nosivost X_d se obično ne uvode direktno u proračun, već preko njihovih reprezentativnih vrednosti F_{rep} i X_{rep} koje se dobijaju ili kao karakteristične ili kao nominalne vrednosti. Proračunske vrednosti se dobijaju redukcijom reprezentativnih vrednosti parcijalnim koeficijentima sigurnosti. Karakteristične vrednosti za dejstva E_k je vrednost fraktila 50% za stalna opterećenja ili fraktil 98% (95%), i za nosivost R_k vrednost fraktila 5% (slika 4.11). Parcijalni koeficijent sigurnosti za uticaje od dejstava, za posmatrano dejstvo, može se odrediti preko proračunske vrednosti dejstva:

$$E_d = \mu_E + \alpha_E \cdot \beta_d \cdot \sigma_E \quad (4.40)$$

i proračunske vrednosti indeksa pouzdanosti iz izraza β_d :

$$E_d = \gamma_E E_k \quad (4.41)$$

$$\gamma_E = \frac{\mu_E + \alpha_E \cdot \beta_d \cdot \sigma_E}{E_k} > 1 \quad (4.42)$$

ili

$$\gamma_E = \frac{\mu_E}{E_k} \left(1 + \frac{\alpha_E \cdot \beta_d \cdot \sigma_E}{\mu_E}\right) > 1 \quad (4.42a)$$

preko koeficijenta varijacije za dejstva:

$$COV_E = \frac{\sigma_E}{\mu_E} \quad (4.43)$$

dobija se da je:

$$\gamma_E = \frac{\mu_E}{E_k} (1 + \alpha_E \cdot \beta_d \cdot COV_E) > 1 \quad (4.44)$$

i za nosivost:

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \cdot \beta_d \cdot \sigma_R \quad (4.45)$$

$$R_d = R_k / \gamma_R \quad (4.46)$$

$$\gamma_R = \frac{R_k}{R_d} = \frac{R_k}{\mu_R - \alpha_R \cdot \beta_d \cdot \sigma_R} > 1 \quad (4.47)$$

$$\frac{1}{\gamma_R} = \frac{R_d}{R_k} = \frac{\mu_R - \alpha_R \cdot \beta_d \cdot \sigma_R}{R_k} < 1 \quad (4.48)$$

preko koeficijenta varijacije za nosivost:

$$COV_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \quad (4.49)$$

$$\gamma_R = \frac{R_k}{\mu_R} \frac{1}{(1 - \alpha_R \cdot \beta_d \cdot COV_R)} > 1 \quad (4.50)$$

Prema Evrokodu 0, za proračunske vrednosti uticaja od dejstava E_d i nosivosti R_d , a imajući u vidu izraze (4.19) i (4.20), važi:

$$P(E > E_d) = \phi(+\alpha_E \cdot \beta_d) \quad (4.51)$$

$$P(R \leq R_d) = \phi(-\alpha_R \cdot \beta_d) \quad (4.52)$$

Prema metodi *FORM* vrednosti za koeficijente osetljivosti su: $\alpha_E = -0,7$ i $\alpha_R = +0,8$ pa onda važi:

$$P(E > E_d) = \phi(-0,7 \cdot \beta_d) \quad (4.53)$$

$$P(R \leq R_d) = \phi(-0,8 \cdot \beta_d) \quad (4.54)$$

s'tim što je odnos standarne devijacije za uticaje od dejstava i nosivosti u granicama:

$$0,16 < \frac{\sigma_E}{\sigma_R} < 7,6 \quad (4.55)$$

Prema normama DIN 1055-100:2001 [100] definisan je indeks pouzdanosti za referentni period od n godina, tako da za 50 godina iznosi $\beta_{50} = 3,8$, a za jednu godinu iznosi $\beta_{50} = 4,7$. Osnovni zahteva EN1990 je da indeks pouzdanosti β bude veći ili jednak od ciljnog indeksa pouzdanosti β_d , koji je određen ovim standardom, odnosno:

$$\beta \geq \beta_d \quad (4.56)$$

odnosno da je verovatnoća otkaza konstrukcije bude manja od svoje ciljne vrednosti ($P_f \leq P_{fd}$). Uvođenjem ciljnog indeksa koji se dobija iz graničnog stanja:

$$\beta = \beta_d \quad (4.57)$$

iz izraza (4.18) sledi da je:

$$\mu_G = \mu_R - \mu_E = \beta_d \cdot \sigma_G \quad (4.58)$$

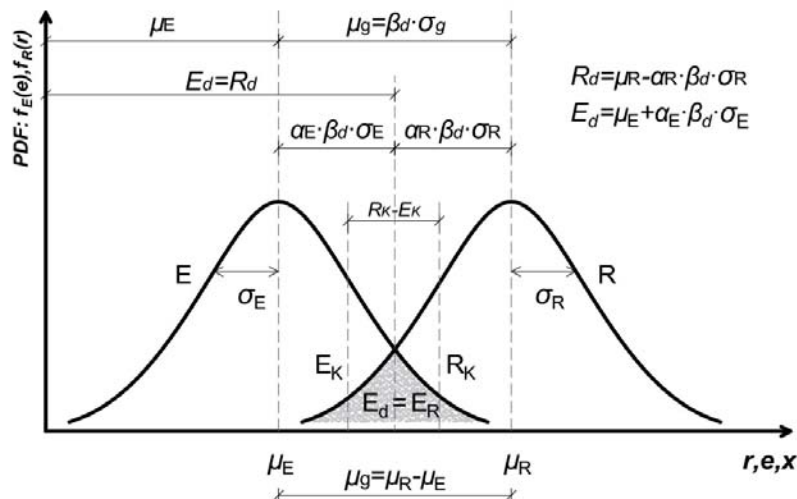
i iz izraza 4.19 i 4.20 sledi da je:

$$E_d = \mu_E + \alpha_E \cdot \beta_d \cdot \sigma_E \quad (4.59)$$

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \cdot \beta_d \cdot \sigma_R \quad (4.60)$$

Za presečnu tačku krivih E i R , slika 4.11, iz uslova jednakosti $R_d = E_d$ dobija se:

$$\mu_E + \alpha_E \beta_d \sigma_E = \mu_R - \alpha_R \beta_d \sigma_R \quad (4.61)$$



Slika 4.11 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za $E_d = R_d$

Na osnovu izloženog može se zaključiti da sigurnost konstrukcija zavisi od koeficijenta sigurnosti konstrukcija i/ili od nivoa pouzdanosti konstrukcija. Nivo pouzdanosti konstrukcija se određuje probabilističkim - inženjerskim metodama, određivanjem indeksa pouzdanosti ili kvantitativnim određivanjem verovatnoće pouzdanosti teorijskim (numeričkim) metodama. U determinističkom konceptu sigurnosti konstrukcija—mera sigurnosti je globalni koeficijent sigurnosti. U semi-probabilističkom konceptu, sigurnost konstrukcija je određena parcijalnim koeficijentima sigurnosti za svako svojstvo materijala i za svako dejstvo koji su dobijeni kalibracijom na osnovu teorije pouzdanosti. U semi-probabilističkom konceptu sigurnosti konstrukcija indeks pouzdanosti utiče na sigurnost, ali zbog boljeg razumevanja u inženjerskoj praksi sigurnost u ovom konceptu se izražava preko parcijalnih koeficijenata sigurnosti. Sigurnost konstrukcije zavisi od indeksa pouzdanosti i probabilističkih parametara, koji pokazuju udaljenost srenjih vrednosti krive uticaja od dejstava E i nosivosti R i unutar toga kalibracijom određeni parcijalni koeficijenti sigurnosti koji pokazuju udaljenost karakterističnih vrednosti E_k i R_k od presečne tačke krivih E i R . Prema predlogu Komiteta za sigurnost konstrukcija JCSS [101], na osnovu

koga je izrađen evrokod EN1990 [10] i standard ISO2394 [34] definisao je ciljnu vrednost indeksa pouzdanosti ili ciljnu pouzdanost konstrukcije (eng. *Target Reliabilities*). Ciljna vrednost indeksa pouzdanosti se brojčano određuje u zavisnosti od mogućih posledica otkaza konstrukcija (tri klase posledica) koje su definisane na osnovu razmatranja posledica loma ili lošeg funkcionisanja konstrukcijskog sistema.

Tabela 4.2 Definicija klase prema posledicama [10]

KLASA	OPIS	PRIMERI OBJEKATA
CC1	Velike posledice po gubitak ljudskih života, ili vrlo velike ekološke, ekonomske i socijalne posledice	Tribine, javne zgrade, koncertne dvorane; objekti kod kojih su posledice loma velike
CC2	Srednje posledice po gubitak ljudskih života, značajne ekološke, ekonomske i socijalne posledice	Stambene i administrativne zgrade, javne zgrade; objekti kod kojih su posledice loma srednje
CC3	Male posledice za gubitak ljudskih života; zanemarljive ekološke, ekonomske i socijalne posledice	Poljoprivredne zgrade, zgrade za skladištenje, staklene bašte; objekti u kojima se slabo boravi

U tabeli 4.2 prikazane su klase posledica usled otkaza konstrukcija na osnovu kojih se određuju troškovi za povećanje sigurnosti konstrukcije (u tri nivoa troškova). Za svaku od klasa prema posledicama za granično stanje nosivosti su određene tri klase pouzdanosti (eng. *reliability classes*) koje se određuju preko vrednosti indeksa pouzdanosti β , za referentni period do 50 godina (tabela 4.3)

Tabela 4.3 Ciljni indeksi pouzdanosti za granično stanje nosivosti [10]

Klasa pouzdanosti	Minimalne vrednosti za β	
	ref. period 1 god.	ref. period 50 god.
RC3	$\beta = 5,2$	$\beta = 4,3$
RC2	$\beta = 4,7 (p_f = 1,3 \times 10^{-6})$	$\beta = 3,8 (p_f = 7,2 \times 10^{-5})$
RC1	$\beta = 4,2$	$\beta = 3,3$

U tabeli 4.3 prikazani su ciljni indeksi pouzdanosti za granično stanje nosivosti. Za klasu RC2 u zagradi su prikazane vrednosti verovatnoće otkaza konstrukcija. Za granično stanje nosivosti centralna vrednost ciljnog indeksa pouzdanosti prema [34], koja odgovara umerenim posledicama sa normalnim troškovima, je $\beta=4,2$ sa verovatnoćom otkaza $P_f=10^{-5}$. Ciljni indeks pouzdanosti raste sa povećanjem verovatnoća otkaza konstrukcije (*neznatni, srednji, veliki*) i sa smanjenjem troškova za povećanje sigurnosti konstrukcije (*mali, normalni, veliki*) i obrnuto. Ciljni indeks pouzdanosti za granično stanje upotrebljivosti je definisan za tri nivoa troškova za povećanje sigurnosti konstrukcije nezavisno od klase pouzdanosti. Za granično stanje upotrebljivosti centralna vrednost ciljnog indeksa pouzdanosti, koja odgovara normalnim troškovima, je $\beta=1,7$ sa verovatnoćom otkaza $P_f=10^{-2}$. Probabilističke inženjerske metode za određivanje sigurnosti konstrukcija prilagođene su inženjerskim potrebama u praksi projektovanja i procene stanja konstrukcija. Pojmovi verovatnoće sigurnosti konstrukcije $P_{r,i}$ i nesigurnosti konstrukcije P_f izraženi su preko indeksa pouzdanosti β , kao bezdimenzionalne veličine,

iz izraza (4.17), (4.22), (4.23) i (4.29). Dokaz sigurnosti konstrukcije primenom potpunih probabilističkih metoda, zasniva se na proceni verovatnoće sigurnosti odnosno nesigurnosti konstrukcije. U konceptu sigurnosti konstrukcija najčešće su u primeni metode numeričke integracije koje zahtevaju poznavanje empirijske funkcije probabilističke raspodele. Ove metode su univerzalne i koriste se u različitim tehnološkim, tehničkim i teorijskim problemima. Najnoviji koncept sigurnosti konstrukcija podrazumeva optimizaciju u kombinaciji sa ekonomskim zahtevima, pri čemu se dobija kao rezultat vrednost "Potrebnog indeksa pouzdanosti" ili "Dovoljne verovatnoće nesigurnosti".

Za obezbeđenje pouzdanosti za svaku od klasa prema evrokodovima definisana su tri nivoa revizija proračuna DSL (eng. *design level management*), i tri nivoa kontrole nadzora IL (eng. *inspection level*) [10]. Za izvođenje radova definisano je četiri klase izvođenja EXC (eng. *execution classes*) koje se definišu u zavisnosti od klase posledica odnosno zahtevanog nivoa pouzdanosti i namene objekta.

4.5.1 STOHAŠTIČKI MODELI ZA MATERIJALE I DEJSTVA

Stohastički model se formira na osnovu statističkih podataka o svojstvima materijala ili proizvoda R , dobijenim najčešće eksperimentalnim ispitivanjima, kao i podataka o dejstvima E dobijenim merenjem i obrazovanjem odgovarajućih statističkih kriva raspodela. Slučajne promenljive R i E mogu biti slučajne osnovne promenljive, kao funkcije pojedinačnih promenljivih ili slučajne kumulativne promenljive, kao funkcije više promenljivih. Sučajna promenljiva je funkcija X koja svakom slučajnom događaju $\omega \in \Omega$, dodeljuje realni broj $X(\omega)$, pri čemu je ω slučajan elementarni događaj, a Ω skup slučajnih elementarnih događaja. Drugim rečima slučajna promenljiva je preslikavanje skupa Ω u skup realnih brojeva.

Funkcija raspodele je statistička karakteristika slučajne promenljive koja omogućava da se izračuna verovatnoća, da slučajna promenljiva uzme vrednost na nekom intervalu na x osi [102]. Verovatnoća funkcije $F(x)$ u tački x jednaka je verovatnoći P za slučaj da slučajna promenljiva X pretpostavlja vrednost manju od x . Verovatnoća događaja $X < x$ je funkcija od x i naziva se funkcijom raspodele verovatnoća ili funkcijom raspodele

$$F_X = F(x) = P(X \leq x) = \int f(x)dx \quad (4.62)$$

Kako je funkcija raspodele slučajne veličine neprekidna i neopadajuća funkcija onda postoji funkcija f , takva da je:

$$f(x) = F'(x) \quad (4.63)$$

i naziva se *funkcijom gustine*. Preko funkcije gustine se opisuju vrednosti slučajnih promenljivih, na osnovu čega se dolazi do matematičkog očekivanja slučajne promenljive, odnosno do podataka o srednjoj vrednosti, fraktila i do standardne devijacije. Slučajna promenljiva može biti diskretna čiji je skup vrednosti konačan ili prebrojiv i neprekidna čiji je skup vrednosti neprekidan. Svojstvo materijala kao diskretna slučajna promenljiva X pri verovatnoći da ta promenljiva uzima neku vrednost ili skup konačnih vrednosti X_1, X_2, X_3, \dots , sa odgovarajućom verovatnoćom. Slučajna promenljiva je neprekidna ukoliko joj odgovara neprekidna funkcija raspodele; može biti i diskretna ukoliko joj odgovara diskretna funkcija raspodele.

U razmatranju stohastičkih modela dejstava i stohastičkih modela materijala, slučajne osnovne promenljive su dejstava F - kao zapreminska, linijska i koncentrisana opterećenja, koja prema promenljivosti u toku vremena mogu biti stalna, promenljiva ili incidentna opterećenja i X -svojstva materijala, kao što su čvrstoća materijala, moduli elastičnosti, a -geometrijski podaci, karakteristike preseka, i θ - nesigurnost modela.

Dejstva se predstavljaju stohastičkim modelima a intezitet dejstva preko jednog skalara koji može da ima više reprezentativnih vrednosti. Dejstva se u stohastičkom modelu pojavljuju najčešće kao diskretna raspodela verovatnoće, kad se podaci inteziteta dobijaju merenjima u određenim vremenskim intervalima. Stalna dejstva se najčešće predstavljaju pomoću normalne ili gausove raspodele, a promenljiva dejstva pomoću gumbelove raspodele sa dvostrukom eksponencijalnom raspodelom. U stohastičkom modelu numeričko opisivanje osnovnih podataka najčešće je: centralna tendencija (srednja vrednost), varijacija (varijansa, standardna devijacija i koeficijent varijacije), kvantili i asimetrija. Srednja vrednost skupa osnovnih podataka od N elemenata je:

$$\mu_x = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{\sum x}{N} \quad (4.64)$$

Varijacije daju informaciju o rasipanju ili varijabilnosti podataka i izražava prosečno kvadratno odstupanje vrednosti od srednje vrednosti:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad (4.65)$$

Najčešće korišćena mera varijacije je standardna devijacija koja pokazuje varijaciju oko srednje vrednosti, dobija se iz izraza:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_N - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (4.66)$$

Standardna devijacija se izražava u istim jedinicama kao i osnovni podaci (sila, dužina, moment, napon...). Koeficijent varijacije je mera relativne varijacije (u odnosu na srednju vrednost), izražava se u % i predstavlja odnos standardne devijacije i aritmetičke srednje vrednosti:

$$COV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (4.67)$$

4.5.2 FUNKCIJE RASPODELE SLUČAJNIH PROMENLJIVIH I TIPOVI RASPODELE VEROVATNOĆE

Funkcija gustine $f_x(x)$ normalne raspodele verovatnoće čija je srednja vrednost skupa osnovnih podataka od N elemenata μ_x i standardna devijacija σ_x , definiše se izrazom:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2} \quad (4.68)$$

Funkcija normalne raspodele je:

$$F_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2} dx \quad (4.69)$$

Da bi se izbeglo rešavanje integrala, moguće je slučajnu proizvoljnu promenljivu standardizovati preko izraza:

$$Z = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \quad (4.70)$$

Funkcija gustine normalne raspodele i funkcija normalne raspodele imaju standardnu raspodelu čija je srednja vrednost za skup od N elemenata, μ_x a standardna devijacija $\sigma_x=1$. Funkcija gustine standardne raspodele je:

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (4.71)$$

Funkcija standardne raspodele:

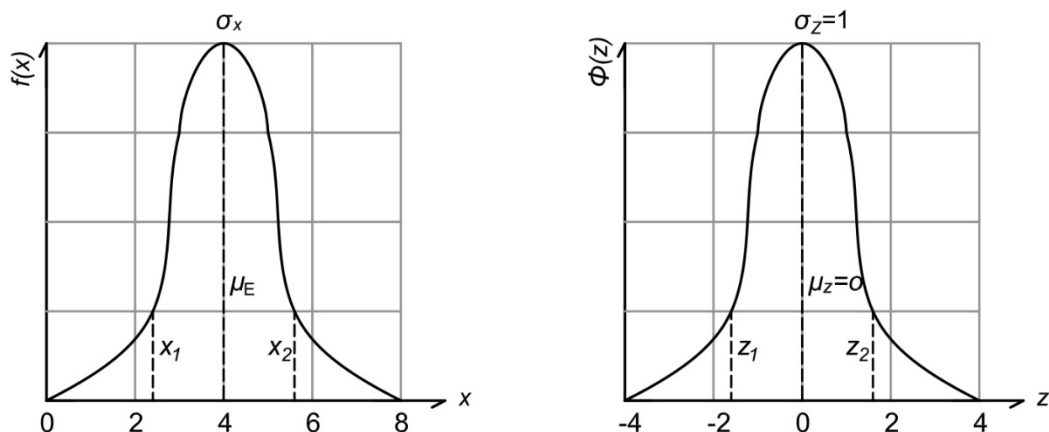
$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (4.72)$$

Kod normalne funkcije raspodele kriva je simetrična, odnosno za svaku vrednost X_1 odgovara simetrična vrednost X_2 , onda važe izrazi:

$$Z_1 = \frac{X_1 - \mu_x}{\sigma_x} \quad (4.73)$$

$$Z_2 = \frac{X_2 - \mu_x}{\sigma_x} \quad (4.73a)$$

što je predstavljeno na slici 4.12.

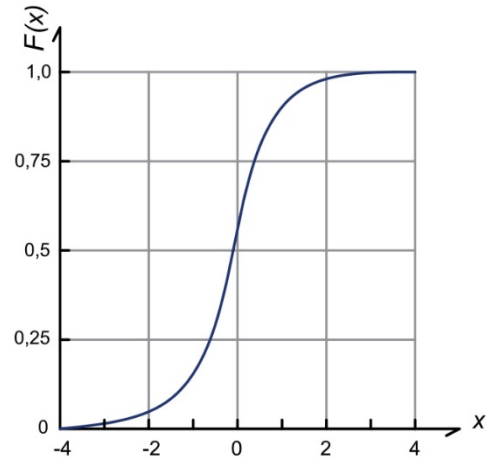
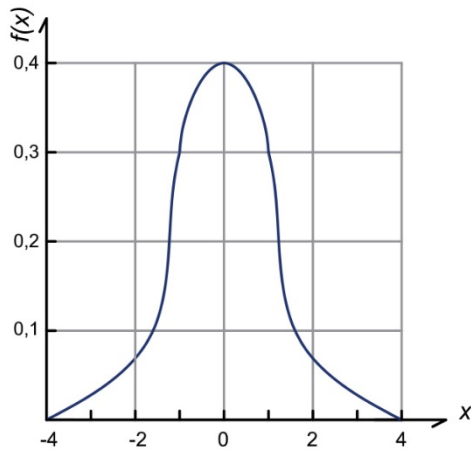


Slika 4.12 Normalna raspodela

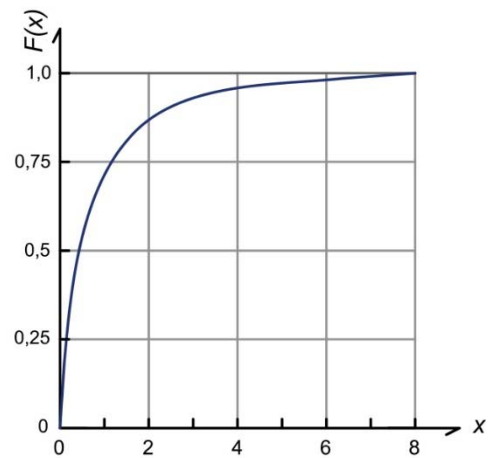
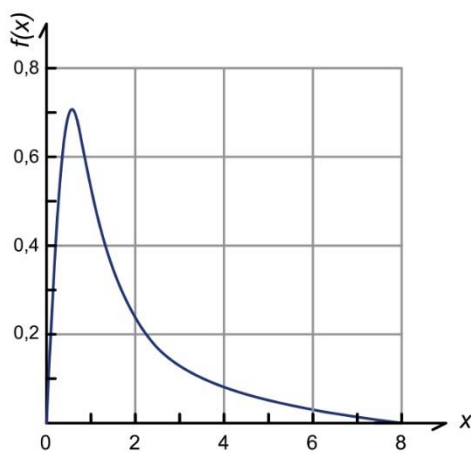
Na slici 4.13 prikazane su Standardna raspodela (SR), Lognormalna raspodela (LN) i Gumbelova raspodela (GR).

$f_x(x)$ - PDF probabilistička funkcija gustine

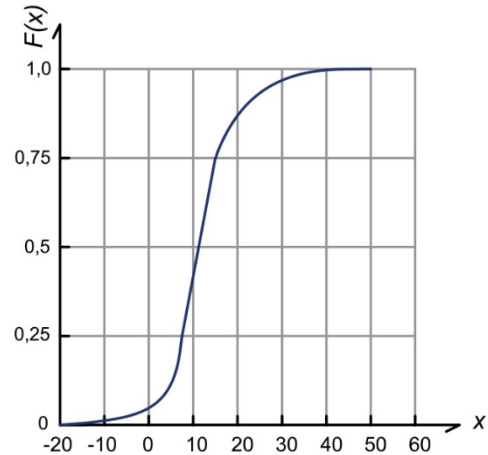
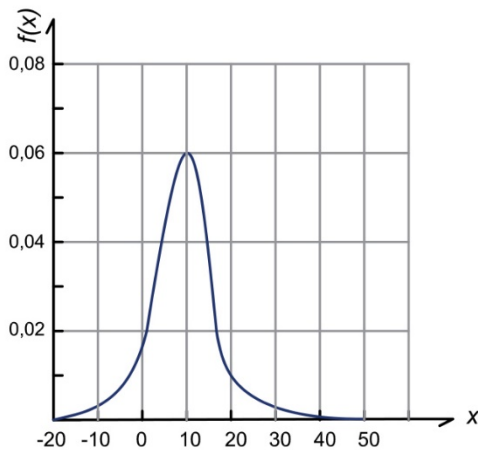
$F_x(x)$ - funkcija kumulativne raspodele



Standardna raspodela SR



Lognormalna raspodela LN



Gumbelova raspodela GU

Slika 4.13 Standardna, Lognormalna i Gumbelova raspodela funkcije

Funkcija gustine gumbelove raspodele verovatnoće, za ekstremne vrednosti slučajne promenljive:

- za maksimum:
$$f_X(x) = \alpha \cdot e^{-\alpha(x-u)} \cdot e^{-\alpha(x-u)} \tag{4.74}$$

odnosno,
$$f_X(x) = \alpha \cdot \exp[-\alpha(x-u) - \exp(-\alpha(x-u))] \tag{4.74a}$$

$$- \text{ za minimum-} \quad f_X(x) = \alpha \cdot e^{\alpha(x-u) - e^{-\alpha(x-u)}} \quad (4.75)$$

$$\text{odnosno,} \quad f_X(x) = \alpha \cdot \exp[\alpha(x-u) - \exp(-\alpha(x-u))] \quad (4.75a)$$

gde je:

$$- -\infty \leq x \leq +\infty$$

- u - p arametar lokacije

- $\alpha > 0$ - parameter razmere

Funkcija gumbelova raspodele verovatnoće, za ekstremne vrednosti slučajne promenljive:

$$- \text{ za maksimum:} \quad F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (4.76)$$

$$\text{odnosno,} \quad F(x) = \exp[-\exp(-\alpha(x-u))] \quad (4.76a)$$

$$- \text{ za minimum:} \quad F(x) = 1 - \exp(-\exp(-\alpha(x-u))) \quad (4.77)$$

Srednja vrednost gumbelove raspodele slučajne promenljive X , za određivanje estreme vrednosti:

$$\bullet \text{ maksimuma} \quad \mu_X = u + \frac{\gamma}{\alpha} \quad (4.78)$$

$$\bullet \text{ minimuma} \quad \mu_X = u - \frac{\gamma}{\alpha} \quad (4.79)$$

gde je $\gamma = 0,5772$ ojlerova konstanta

Standardna devijacija σ_x slučajne promenljive X , je

$$\sigma_X = \frac{\pi}{\sqrt{6\alpha}} \quad (4.80)$$

4.5.3 MODELIRANJE FUNKCIJA SLUČAJNIH PROMENLJIVIH

Model graničnog stanja konstrukcije treba formirati sa relevantnim slučajnim promenljivim i treba izbegavati veliki broj promenljivih. Osnovne slučajne promenljive su funkcije, koje nisu unapred poznate i kojim se opisuje slučajan fizički događaj. Slučajne varijable u pojedinačnim razmatranjima predstavljaju skalare. U slučaju razmatranja više promenljivih X_i , odnosno ako je broj varijabli $n(X_1, X_2, \dots, X_n)$, onda se one mogu posmatrati kao n - dimenzionalni slučajni vektori X .

Funkcija raspodele F_x slučajnog vektora X može se predstaviti kao zajednička kriva raspodele varijabli u obliku [103]:

$$F_X(x) = F_X(x_1, x_2, \dots, x_n) = P[(X_1 \leq x_1) \cap (X_2 \leq x_2) \cap \dots \cap (X_n \leq x_n)] \quad (4.81)$$

$$\text{ili skraćeno} \quad F(x) = P(X \leq x) \quad (4.81a)$$

vrednosti (x_1, x_2, \dots, x_n) veličine koje pokazuju na kom mestu je vrednost promenljivih $(X_1, X_2, X_n, \dots, X_n)$ jednake ili manje od:

$$X \leq x, \quad (4.82)$$

odnosno $(X_1 \leq x_1) \cap (X_2 \leq x_2) \cap \dots \cap (X_n \leq x_n) \quad (4.83)$

Funkcija gustine zajedničke raspodele se dobija iz izraza:

$$f_X = f_{X_1, X_2, \dots, X_n} = \frac{\partial^n F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n} \quad (4.84)$$

Osnovne slučajne promenljive se mogu predstaviti sa vektorom slučajnih promenljivih $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ i $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ [104].

Granično stanje promenljivih:

$$g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (4.85)$$

Oblast nesigurnosti konstrukcije se dobija iz uslova:

$$g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0 \quad (4.86)$$

Oblast sigurnosti se dobija iz uslova:

$$g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0 \quad (4.87)$$

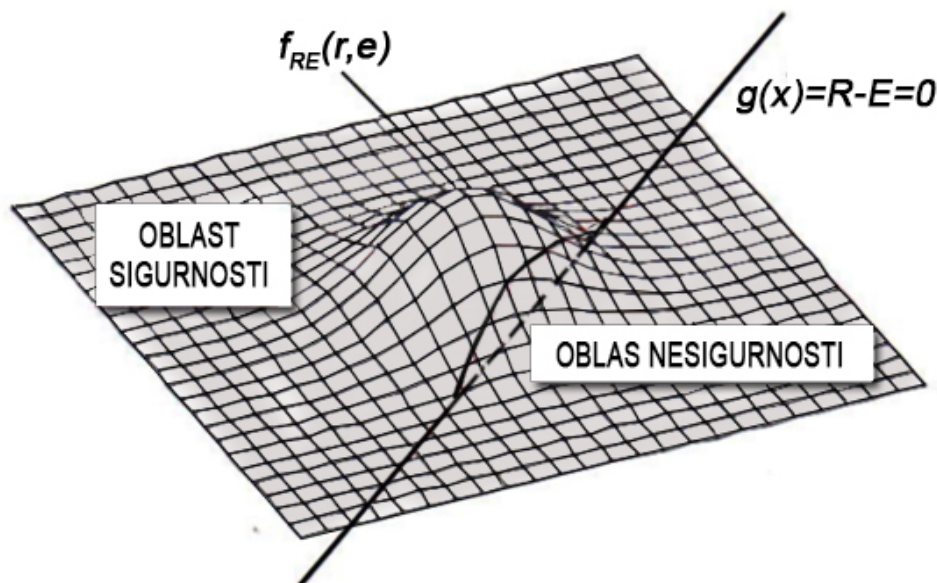
Funkcija graničnog stanja $g(x)=0$, u prostoru predstavljenom funkcijama gustina osnovnih varijabli $f_{RE}(r, e)$, deli prostor na dva dela: deo sigurnosti S i deo nesigurnosti V . Prostor sigurnosti se može označiti preko slučajnih varijabli x sa značenjem $g(x)$, izrazom:

$$S = [x \mid g(x) > 0] \quad (4.88)$$

i prostor nesigurnosti

$$V = [x \mid g(x) < 0] \quad (4.89)$$

Oblast sigurnosti i oblast nesigurnosti konstrukcije prikazane su na slici 4.14.



Slika 4.14 Oblast sigurnosti i oblast nesigurnosti konstrukcije

4.5.4 MODELIRANJE DEJSTAVA, MEHANIČKE OTPORNOSTI MATERIJALA I GEOMETRIJE KONSTRUKCIJE

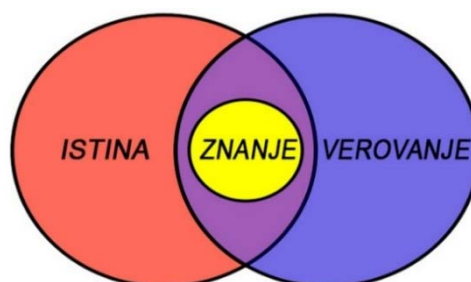
Granično stanje konstrukcije je stanje kada konstrukcija prestaje da ispunjava postavljene zahteve koncepta proračuna. Mehanički modeli u armirano betonskim konstrukcijama se intenzivno razvijaju poslednjih decenija [11] i nalaze primenu u standardima [105]. Granična stanja nosivosti *GSN* (eng. *ULS*) i granična stanja upotrebljivosti - *GSU* (eng. *SLS*) proširena su na fenomene zamora i procese starenja materijala.

Proračun konstrukcija proizilazi iz usvojenog fizičkog stohastičkog modela kojim se opisuje ponašanje konstrukcije usled dejstava i uticaja iz sredine, sve do dostizanja graničnih stanja. U ovom modelu sadržani su mehanički model konstrukcije sa modelom dejstava [106], modelom otpornosti konstrukcije [107] i modelom geometrijskih podataka. Model za određeno dejstvo sadrži poreklo i karakter dejstva, intezitet, pravac i smer dejstva kao i njegovo trajanje. Geometrijskim modelom se opisuje konstrukcija kao linijska, površinska ili zapreminska, sa nominalnim geometrijskim vrednostima. Postojeća konstrukcija sadrži geometrijske imperfekcije koje odstupaju od nominalnih vrednosti, i kod problema proračuna konstrukcije po teoriji drugog reda moraju se uzeti u obzir. Model otpornosti konstrukcija sadrži podatke svojstva materijala konstrukcije, odnosno podatke o nosivosti i o modulima elastičnosti. Mehaničkim modelom se definiše noseći sistem, materijali konstrukcije i dejstva na konstrukciju. Mehanički model može biti statički, dinamički i model zamora konstrukcije. U konceptu graničnih stanja stohastičkim modelima se određuju koeficijenti sigurnosti na osnovu probabilističkog proračuna pouzdanosti. Pored modela kojim se opisuje ponašanje konstrukcije i dejstva na konstrukciju, veoma je važna i procena sigurnosti tih modela na bazi svih izvora nesigurnosti koji mogu uticati na otkaz sistema. To znači da osnovne slučajne promenljive koje ulaze u proračun treba analizirati sa aspekta sigurnosti modela, kao posledicu idealizacije modela ili nedostataka podataka ili znanja (*tabela 4.5*).

MODELI	OPIS
<i>kategorija 1</i>	<i>aleatorne (slučajne) ili inherentne²² (udružene) nesigurnosti odnosno modeli funkcije fizičke nesigurnosti ili slučajnosti</i>
<i>kategorije 2</i>	<i>one koje su funkcija razumevanja (spoznaje) odnosno epistemičkih nesigurnosti znanja</i>

Tabela 4.5 Relevantni modeli u pouzdanosti konstrukcija

Prema Platonu znanje je presek onog što je istinito i onog u šta verujemo (*slika 4.15*).



Slika 4.15 Platonov model znanja

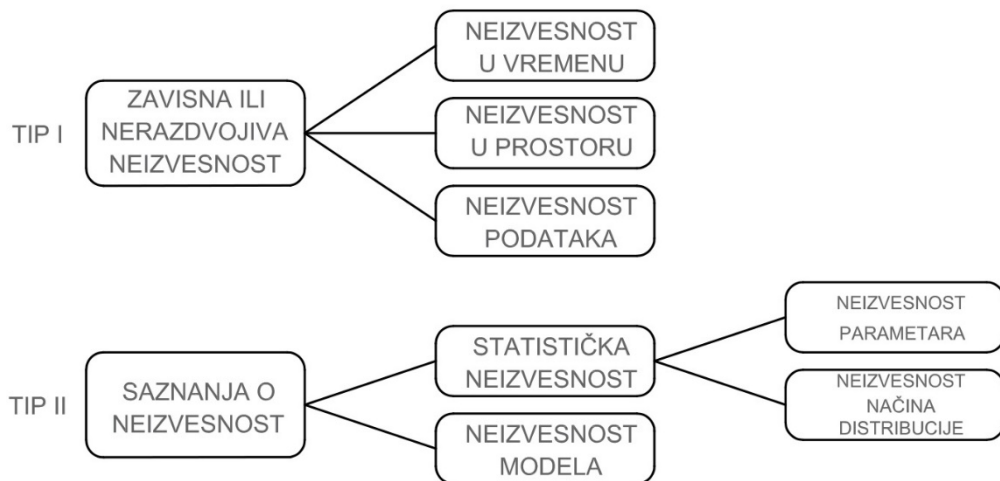
²² *Inherentan* – (lat *inhaerens*) - Prirodno i nerazdvojno spojen ili udružen sa, nerazdvojan

Modeli aleatorne nesigurnosti su modeli nepredvidive - slučajne nesigurnosti u vremenu i prostoru ili u merenju.

Priroda slučajnih događaja je najčešće nepredvidiva, tako da se slučajna nesigurnost uvek može javiti u modelima i ne može se smanjiti niti ukloniti [108], ali se ponekad preventivno može uticati na uzroke pojave tog događaja koji se očekuje. Tokom upotrebnoog veka konstrukcije slučajni događaj može ili da se desi ili da se ne desi, što treba uzeti u obzir kod usvajanja modela slučajne nesigurnosti. Epistemički modeli nesigurnosti su:

- Model statističke nesigurnosti (nesigurnost parametara, nesigurnost krive raspodele)
- Model nesigurnosti idealizovanog sistema

Epistemičku nesigurnost je moguće smanjiti dodatnim podacima dobijenim merenjima i ispitivanjima. Šema kategorija modela nesigurnosti [109], kojima se obuhvataju slučajne promenljive koje se koriste u proračunu konstrukcija prema semi-probabilističkom konceptu (Evrokod) data je na slici 4.16.



Slika 4.16 Kategorije modela nesigurnosti

Modeli kategorija I i II, sadržani su u istraživanjima JCSS i standardima EN preko faktoria sigurnosti za opterećenja, nosivosti, krutosti i geometrije.

Prethodnim modelima nisu obuhvaćene nesigurnosti izazvene ljudskom faktorom, odnosno ljudskim greškama koje mogu imati nesagledive posledice po sigurnost konstrukcije. Model kojim se definiše nesigurnost kao posledica ljudske greške naziva se *ontološki* model nesigurnosti [110]. Ovaj model uključuje ljudske greške kao posledicu neznanja, nemara, nedostatka veštine pri radu, loših namera. Zbog svoje nepredvidivosti i neizbežnosti ovakve greške zahtevaju drugačiji pristup kontroli [111] nego što je to dato u tehničkoj regulativi [112].

Sa aspekta pouzdanosti konstrukcija [41] i ljudske greške se definišu kao greške koncepta konstrukcije, greške pri izvršenju radova i namerne greške. Prema drugim autorima [113] prethodnim greškama treba dodati i greške u održavanju konstrukcije. Prema analizi [114] najčešće greške se dešavaju kod koncepcije i proračuna konstrukcije oko 50%, zatim kod izvođenja radova oko 25% i održavanje i ostalo oko 25%.

4.5.5 SLUČAJNE PROMENLJIVE U SEMI - PROBABILISTIČKOM KONCEPTU PRORAČUNA KONSTRUKCIJA

U savremenoj evropskoj (EN) i međunarodnoj (ISO) regulativi proračun konstrukcija bazira na konceptu graničnih stanja sa parcijalnim koeficijentima sigurnosti. Za dostizanje traženog nivoa sigurnosti i trajnosti konstrukcija, koncept graničnih stanja podrazumeva rešenje dva osnovna problema i to:

- proračun dejstava na konstrukcije, odnosno određivanje odgovarajućih uticaja
- proračun karakteristika materijala, odnosno odgovor konstrukcije na zadata dejstva.

Proračunske situacije dejstava u Evrokodovima mogu biti: stalne, privremene i incidentne. Proračunska vrednost nekog dejstva F_d generalno se može predstaviti izrazom:

$$F_d = \gamma_F \cdot F_k \quad (4.90)$$

gde je:

- F - opšta oznaka za dejstva (tabela 4.6). U konkretnom slučaju F se zamenjuje sa oznakom za :
 - za stalna dejstva $F=G$
 - za promenljiva dejstva $F=Q$
 - za incidentna dejstva $F=A$
- F_k - opšta oznaka za karakteristične vrednosti dejstava; određuje se iz stohastičkog modela u zavisnosti od vrste dejstava. U konkretnom slučaju F_k se zamenjuje se:
 - G_k -karakteristična vrednost stalnog dejstva, za $F=G$,
 - Q_k -karakteristična vrednost promenljivog dejstva, za $F=Q$ i
 - A_k -karakteristična vrednost incidentnog dejstva, za $F=A$.

Za parcijalne koeficijente sigurnosti uvodi se oznaka za parcijalne koeficijente sigurnosti za opšta dejstva γ_F – i to za: stalno (γ_G), promenljivo (γ_Q), incidentno (γ_A).

Tabela 4.6 Oznake za dejstva i parcijalne keficijente sigurnosti

DEJSTVA			
OPŠTE	STALNO	PROMENLJIVO	INCIDENTNO
F	G	Q	A
F_k	G_k	Q_k	A_k
γ_F	γ_G	γ_Q	γ_A

Nosivost noseće konstrukcije R u opštem slučaju je funkcija slučajnih promenljivih [115]:

$$R = \eta \theta_R a X \quad (4.91)$$

gde je:

- X vrednost svojstva (mehanička otpornost materijala ili proizvoda)
- a -geometrijski podatak
- θ_R -nesigurnost modela svojstva materijala ili proizvoda (Faktor modela)
- η -koeficijent osetljivosti uticaja razlike karakteristika materijala na gradilištu i u laboratoriji

Nesigurnost odnosno faktor modela θ_R se određuje kao:

$$\theta_R = R_{exp} / R_{num} \quad (4.92)$$

gde je:

- R_{exp} odgovor sistema usled eksperimenta
- R_{num} numerički odgovor modela sistema

Proračunska vrednost karakteristika materijala ili proizvoda je [10]:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (4.93)$$

gde je:

- X_k -karakteristična vrednost svojstva materijala
- γ_m -parcijalni koeficijent sigurnosti za to svojstvo materijala
- η - srednja vrednost koeficijenta konverzije, kojim se uzimaju u obzir:

Uticaji zapremine i razmere, uticaji vlage i temperature, kao i bilo koji drugi relevantni parametri. Proračunska vrednost geometrijskih karakteristika

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad (4.94)$$

i proračunska nosivost konstrukcije se može dobiti iz izraza:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (4.95)$$

gde je:

- R_k - karakteristična vrednost nosivosti
- γ_M -parcijalni koeficijent sigurnosti nosivosti, koji sadrži nesigurnost modela nosivosti i geomerijska odstupanja, uzet zajedno sa indeksom konverzije η .

Prema standardu ISO 2394 uslov graničnih stanja je ispunjen ako je funkcija:

$$(F_d, X_d, a_d, \theta_d, C, \gamma_n) \geq 0 \quad (4.96)$$

gde je :

- θ_d -proračunska vrednost nesigurnosti modela
- C - vektor ograničenja upotrebljivosti
- γ_n -koeficijent značaja objekta

Kada se razmatra granično stanje loma ili stanje prevelikih deformacije preseka štapa elementa ili veze konstrukcije (STR i/ili GEO), prema EN1990, mora da se dokaže da je

$$E_d \leq R_d \quad (4.97)$$

$$E(\gamma_F \cdot F_k) \leq \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (4.98)$$

$$E(\gamma_G \cdot G_k, \gamma_Q \cdot Q_k, \gamma_A \cdot A_k, a_{nom}, \Delta a) \cdot \gamma_{Ed} \leq R(X_k / \gamma_m, a_{nom}, \Delta a) / \gamma_{Rd} \quad (4.99)$$

ili

$$E_d \leq C_d \quad (4.100)$$

$$E(\gamma_F \cdot F_k) \leq \frac{C_k}{\gamma_F} \quad (4.101)$$

U opštem slučaju proračunske vrednosti E_d i R_d se mogu predstaviti kao funkcije:

$$E_d = E[F_{d1}, F_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}] \quad (4.102)$$

$$R_d = R[X_{d1}, X_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}] \quad (4.103)$$

gde je:

- E - uticaji od dejstava;
- R - nosivost konstrukcije;
- F - dejstvo;
- X - svojstvo materijala;
- a - geometrijski podatak;
- θ - nesigurnost modela.
- E_d - proračunska vrednost uticaja od dejstava, kao što su unutrašnja sila, moment-
napon ili vektor koji predstavlja nekoliko unutrašnjih sila ili momenata;
- R_d - proračunska vrednost odgovarajuće nosivosti.
- C_d - nominalna proračunska vrednost karakteristika materijala ili proizvoda.

Indeks doznava proračunsku vrednosti. Vrednosti E i R su najčešće slučajne kumulativne promenljive koje, kod upoređivanja, međusobno moraju biti izražene u istim jedinicama. Vrednosti E_d i R_d su proračunske vrednosti kumulativnih promenljivih. Proračunske vrednosti se mogu predstaviti i u obliku:

$$E_d = E(F_d, a_{nom} \pm \Delta a) \cdot \gamma_{Ed} = E(\gamma_F F_k, a_{nom} \pm \Delta a) \cdot \gamma_{Ed} \quad (4.104)$$

$$R_d = R(X_d, a_{nom} \pm \Delta a) / \gamma_{Rd} = R(X_k / \gamma_m, a_{nom} \pm \Delta a) / \gamma_{Rd} \quad (4.105)$$

Proračunska vrednost R_d se konačno dobija iz izraza:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (4.106)$$

Pri čemu je:

$$\gamma_F = \gamma_f \cdot \gamma_{Ed} (1 + \Delta a / a_{nom}) \quad (4.107)$$

$$\gamma_M = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd} (1 - \Delta a / a_{nom}) \quad (4.108)$$

gde je:

- γ_{Ed} - parcijalni koeficijent sigurnosti nesavršenosti modela opterećenja
- γ_{Rd} - parcijalni koeficijent sigurnosti nesavršenosti modela karakteristika materijala
- Δa - efekat odstupanje od nominovanih geometrijskih podataka
- γ_F - parcijalni koeficijent sigurnosti za uticaje od dejstava
- γ_M - parcijalni koeficijent sigurnosti za nosivost konstrukcija

Računska vrednost R_d je u zavisnosti od proračunskih vrednosti karakteristika materijala ili proizvoda X_d i geometrijskih podataka a_d . Vrednosti za dejstva F_d i vrednost za materijale ili proizvode X_d se dobijaju na osnovu reprezentativnih vrednosti F_{rep} , X_{rep} dobijenim na osnovu odgovarajućih karakterističnih vrednosti F_k , X_k , odnosno nominalnih (nazivnih) vrednosti shodno odgovarajućim EN standardima. Ove vrednosti su određene u stohastičkom modelu kao fraktile usvojene statističke raspodele pojedinih svojstava materijala ili proizvoda, odnosno dejstava. Uticaj od dejstva na konstrukciju (E) mora biti uvek veći od odgovarajuće proračunskog dejstva (E_d), a nosivost konstrukcije ili proizvoda (R) mora biti uvek manja od odgovarajuće proračunske vrednosti, odnosno:

$$E \geq E_d \quad (4.109)$$

$$R \leq R_d \quad (4.110)$$

Vrednosti F , X , a i θ mogu se tretirati kao slučajne osnovne promenljive, a vrednosti F_d , X_d , a_d i θ_d kao proračunske vrednosti osnovnih promenljivih. Karakteristične vrednosti dejstava i svojstva materijala, određuju se na osnovu stohastičkog modela. Podaci za određena dejstva dobijeni su merenjem inteziteta i prikupljanjem podataka za određeni vremenski period. Matematičko očekivanje je srednja vrednost μ_S za učestanost od 50%. Karakteristične vrednosti dejstava μ_{Sk} dobijaju se u zavisnosti od vrste dejstava, određuju se na osnovu statističke krive podataka sa određenim koeficijentom varijacije. Za stalna dejstva uzima se fraktil od 50% na statističkoj krivoj normalne raspodele, sa koeficijentom varijacije COV (4%-10%) a za promenljiva dejstva fraktil od 98% na statističkoj krivoj gumbelove raspodele sa koeficijentom varijacije COV 40%. Podaci za određene materijale dobijaju se kao nominalne proračunske vrednosti karakteristika tih materijala ili proizvoda, ili se određuju ispitivanjem. Matematičko očekivanje je srednja vrednost μ_R (50%). Karakteristične vrednosti svojstva materijala μ_{Rk} dobijaju se u zavisnosti od vrste materijala, a određuju se na osnovu statističke krive podataka sa određenim varijacionim koeficijentom. Za karakteristične čvrstoće određenih materijala uzimaju se vrednosti za fraktil od 5% na statističkoj krivoj lognormalne raspodele, sa koeficijentom varijacije COV (5%-15%). Podaci za nesavršenost modela dobijaju se za fraktil od 50% na statističkoj krivoj lognormalne raspodele, sa koeficijentom varijacije COV (5%-15%) u zavisnosti od vrste materijala ili proizvoda.

Tabela 4.7 Stohastički modeli osnovnih promenljivih (F_k, X_k, θ_k)

SLUČAJNE PROMENLJIVE	COV	KRIVA	FRAKIL
STALNA DEJSTVA $F_k = G_k$			
stalna dejstva - opterećenja	10%	<i>N</i>	50%
sopstvena težina betona	6%	<i>N</i>	50%
sopstvena težina čelika	4%	<i>N</i>	50%
sopstvena težina drveta	6%	<i>N</i>	50%
PROMENLJIVA DEJSTVA $F_k = Q_k$			
korisna opterećenja	40%	<i>GUMBEL</i>	98%
dejstva sredine (sneg, vetar..)	40%	<i>GUMBEL</i>	98%
ČVRSTOĆA X_k			
čvrstoća betona na pritisak	15%	<i>LN</i>	5%
čelik	5%	<i>LN</i>	5%
lepljeno lamelirano drvo	15%	<i>LN</i>	5%
NESAVRŠENOST MODELA θ_k			
beton	5%	<i>LN</i>	50%
čalik	3%	<i>LN</i>	50%
drvo	5%	<i>LN</i>	50%
temelji	15%	<i>LN</i>	50%

U tabeli 4.7 prikazani su stohastički modeli koji su detaljnije obrađeni u literaturi [116], [117] i [118]. Stohastičim modelom definisane su slučajne promenljive Modul elastičnosti E , Moment inercije I , Nesavršenost modela dejstava θ_E , Nesavršenost modela nosivosti θ_R i geometrijski podaci a_n (mm).

Tabela 4.8 Stohastički modeli osnovnih promenljivih ($E, I, \theta_E, \theta_R, a_n$)

SLUČAJNE PROMENLJIVE	COV	KRIVA	FRAKTIL
Modul elastičnosti E	4%	N	5%, 50%
Moment inercije I	3%	N	50%
Nesavršenost modela dejstava θ_E	10%	LN	50% $\theta_E=1$
Nesavršenost modela nosivosti θ_R	5%	LN	50% $\theta_R=1$
Geometrijski podaci a_n (mm)	-	N	50%

U tabeli 4.8 prikazani su stohastički modeli osnovnih promenljivih ($E, I, \theta_E, \theta_R, a_n$) [119]. Za geometrijske podatke za beton COV iznosi 5% [120]. Srednje vrednosti geometrijskih veličina a_i neoštećenih nosećih elemenata konstrukcije su obično veoma bliski nominalnim vrednostima. Kod poprečnih preseka obično se odstupanja od nominalnih dimenzija javljaju kod deformacija oplata prilikom betoniranja. Rasipanje geometrijskih vrednosti se računa po krivoj normalne raspodele.

Tabela 4.9 Geometrijski podaci

GEOMETRISKI PODACI a_n (mm)	SREDNJA VREDNOST x_m (mm)	STANDARDNA DEVIJACIJA σ_a (mm)
$a_n \leq 1000$ mm	$x_m = 0,006 a_n$	$\sigma_a = 4 + 0,006 a_n$
$a_n > 1000$ mm	$x_m = 3$ mm	$\sigma_a = 10$ mm

U tabeli 4.9 prikazana su odstupanja dimenzija poprečnog preseka od nominalne vrednosti za in situ betonske konstrukcije [121] gde je:

- x_m - srednja vrednost geometrijskih podataka.
- σ_a - standardna devijacija dimenzija poprečnog preseka

Tolerancija dimenzija statičke visine poprečnog preseka d [11] :

- $d \leq 2000$ mm, tolerancija iznosi ± 10 mm
- 1000 mm $< d \leq 2000$ mm, tolerancija iznosi $\pm 0,01d$
- $d > 2000$ mm, tolerancija iznosi ± 20 mm

Kada se razmatra granično stanje statičke ravnoteže konstrukcije EQU, prema EN1990 mora da se dokaže da je:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab} \quad (4.111)$$

gde je:

- $E_{d,dst}$ - proračunska rednost uticaja od destabilizujućih dejstava;
- $E_{d,stab}$ - proračunska vrednost uticaja od stabilizujućih dejstava.

Kod graničnih stanja upotrebljivosti [10], mora da se proračunski dokaže da je:

$$E_d \leq C_d \quad (4.112)$$

gde je:

- C_d - granična proračunska vrednost relevantnog kriterijuma upotrebljivosti,
- E_d - proračunska vrednost uticaja od dejstava, koja je utvrđena u kriterijumu upotrebljivosti, a određena na osnovu relevantne kombinacije.

Ako se posmatra ugib w savijene grede dužine a , momenta inercije I , modula elastičnosti E , za proizvoljno opterećenje čiji je moment savijanja M i vrednost limita tog ugiba w_{limit} kome odgovaraju nominalne vrednosti a_n , I_n , E_n , M_n , onda se funkcija graničnih stanja $g(X)$ može predstaviti kao funkcija krutosti na savijanje, momenta savijanja dejstava i geometrijskih karakteristika. Za opšti slučaj graničnog stanja važi:

$$g(X) = R - E \quad (4.113)$$

$$g(X) = 1 - \frac{E}{R} \quad (4.114)$$

Za kontrolu ugiba grede kod graničnog stanja upotrebljivosti važi:

$$g(X) = 1 - \frac{w}{w_{limit}} = 1 - \left(\frac{M}{M_n}\right) \cdot \left(\frac{E_n}{E}\right) \cdot \left(\frac{I_n}{I}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_n}\right)^2, \quad (4.115)$$

Ako se uzmu u obzir slučajne promenljive nesavršenosti modela za dejstva i za nosivost konstrukcije, onda je funkcija graničnih stanja može predstaviti u obliku :

$$g(X) = \theta_R \cdot R - \theta_E \cdot E \quad (4.116a)$$

$$g(X) = 1 - \frac{\theta_E}{\theta_R} \cdot \frac{E}{R} \quad (4.116b)$$

Za kontrolu ugiba grede usled podeljenog opterećenja (kN/m) kod graničnog stanja upotrebljivosti važi:

$$g(X) = 1 - \frac{\theta_E}{\theta_R} \cdot \frac{w}{w_{limit}} = 1 - \left(\frac{\theta_E}{\theta_R}\right) \cdot \left(\frac{M}{M_n}\right) \cdot \left(\frac{E_n}{E}\right) \cdot \left(\frac{I_n}{I}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_n}\right)^2 \quad (4.117)$$

Za gredu koja je opterećena poprečnom koncentrisanom silom P , važi:

$$g(X) = 1 - \frac{\theta_E}{\theta_R} \cdot \frac{w}{w_{limit}} = 1 - \left(\frac{\theta_E}{\theta_R}\right) \cdot \left(\frac{P}{P_n}\right) \cdot \left(\frac{E_n}{E}\right) \cdot \left(\frac{I_n}{I}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_n}\right)^3 \quad (4.118)$$

Za gredu koja je opterećena jednakopodeljenim opterećenjem q , važi:

$$g(X) = 1 - \frac{\theta_E}{\theta_R} \cdot \frac{w}{w_{limit}} = 1 - \left(\frac{\theta_E}{\theta_R}\right) \cdot \left(\frac{q}{q_n}\right) \cdot \left(\frac{E_n}{E}\right) \cdot \left(\frac{I_n}{I}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_n}\right)^4 \quad (4.119)$$

Gde je $g(X)$ pozitivno za sve vrednosti $w < w_{limit}$.

Za granično stanje nosivosti betonske grede opterećenje na savijanje [122], za slučaj kombinacije stalnog i promenljivog dejstva, onda važi da je:

$$g(X) = d_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} - \alpha_G \cdot G \cdot \gamma_G - \alpha_Q \cdot Q \cdot \gamma_Q = 0 \quad (4.120a)$$

$$g(X) = d_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_G \cdot G \cdot \gamma_G - \alpha_Q \cdot Q \cdot \gamma_Q = 0 \quad (4.120b)$$

$$\alpha_Q = 1 - \alpha_G \quad (4.120c)$$

gde je:

- f_{ck} f_{sk} karakteristična vrednost pritiskne čvrstoće betona; (ck) označava cilindar, (sk) označava armaturu
- d_c , d_s –proračunska vrednost pritisnutog preseka(c)- armature (s)-
- α_G i α_Q –koeficijenti raspodele za stalno (G) i promenljivo (Q) dejstvo
- γ_c , γ_s , γ_G , γ_Q - parcijalni koeficijenti sigurnosti za beton(c), armature(s) i dejstva- stalno(G), promenljivo (Q)

4.5.6 SLUČAJNE PROMENLJIVE KOD PROBABILISTIČKE PROCENE RIZIKA

Savremeni probabilistički model [123] rizika obuhvata i nesavršenost modela θ_i i za $P_i(\theta_i)$, verovatnoće - učestanosti i za $X_i(\theta_i)$ - obim nastalih posledica, kao i nedostatka podataka i znanja o sistemu i problemu K :

$$R = \{ (S_i, P_i(\theta_i), X_i(\theta_i)), K \} \quad (4.121)$$

Na osnovu rizika definiše se *ranjivost* i *robustnost* sistema, kao ukupna osetljivost sistema na veličinu oštećenja za određeno svojstvo.

Ranjivost je nedostatak i slabost sistema kod projektovanja, izvođenja i upravljanja sistemom i njegovim elementima jer ga usled dejstava opasnosti čini podložnim oštećenjima i onesposobljavanju i smanjenju kapaciteta s obzirom na stabilne uslove.

Rizik kao verovatnoća pojave sa negativnim posledicama ili očekivanim gubicima (žrtve, povrede, uništavanje materijalnih dobara i sl.) je rezultat interakcije prirodnog hazarda i ranjivosti. Može se definisati kao funkcija hazarda i ranjivosti, a robustnost se može posmatrati kao suprotnost ranjivosti:

RIZIK = PRIRODNI HAZARD x RANJIVOST

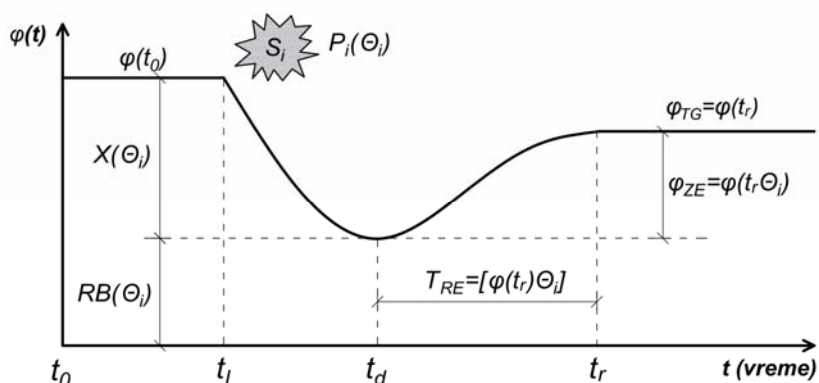
ROBUSNOST = ANTONIM RANJIVOSTI

Robustnost je sposobnost sistema da izdrži određeni nivo naprezanja u pogledu gubitka funkcionalnosti sistema [10]. Rapidnost sistema predstavlja oporavak sistema od neželjenih događaja (dejstava) u smislu brzine oporavka. Robusna konstrukcija je konstrukcija kod koje su posledice otkaza konstrukcije proporcionalne dejstvu koje je izazvalo otkazivanje [10], odnosno konstrukcija ne sme da pretrpi oštećenja do opsega koji je srazmeran početnoj svrsi. Robustnost je svojstvo konstrukcijskog sistema da podnese nepredviđena i nepoznata dejstva u neobičnim okolnostima, očekivane pojave, ali neočekivanog inteziteta. Robustnost podrazumeva sposobnost konstrukcije da pri lokalnim oštećenjima ili otkazivanju jednog ili više nosećeg elementa, ne dođe do rušenja konstrukcije, već da postoje alternativni putevi sila, za paralelan prenos sila. Integritet konstrukcije [124] obuhvata analizu stanja i dijagnostiku ponašanja, procenu preostale čvrstoće i radnog veka i revitalizaciju konstrukcije. Procena integriteta konstrukcije se definiše trenutnim stanjem konstrukcije.

Kriva funkcionalnosti $\varphi(t)$ sigurnosno-kritičnog sistema (eng. *functionality curve of a safety-critical system*), izražena u određenom metričkom sistemu za određeni očekivani događaj, opisuje karakteristike rizika, ranjivosti i robusnosti sistema tokom vremena. Najčešće se prate posledice dejstava hazarda S_i kao scenario rizika koji se događa u trenutku t_i (poremećajni događaji kao što su zemljotresi, udarna opterećenja, eksplozije, poplave i druga incidentna dejstva) kao i stanje sistema nakon prestanka tih dejstava. Ako se sa P_i označava verovatnoća (učestalost) tog scenarija, a sa X_i posledica (gubitak funkcionalnosti) i sa θ_i netačnost modela za $P_i(\theta_i)$, $X_i(\theta_i)$.

Ranjivost sistema $V(\theta_i)$ se definiše na osnovu posledica koje nastaju kada je sistem izložen opastima događajima određenog tipa i veličine, tada se može prikazati varijablom nezvesnosti:

$$V(\theta_i) = \{X_i(\theta_i)\}. \quad (4.122)$$



Slika 4.17 Funkcija oporavka sistema $\varphi(t)$

Funkcija koja definiše početno stanje sistema je $\varphi(t_0)$ koje traje do trenutka t_i kad nastaje poremećaj izazvan scenarijom S_i određenim dejstvom i koji traje do trenutka t_d , kad sistem dobija minimalnu funkcionalnost (slika 4.17). Funkcija se može izraziti kvantitativno u procentima, za početno stanje sistema $\varphi(t_0)=100$ [125]. Za vrednost u interval t do t_d funkcija oporavka sistema će biti $0 < \varphi(t) < 100$. Zaostala funkcionalnost sistema (eng. *Residual functionality of system*) je stanje kad sistem dostiže granicu robusnosti sistema $RB(\theta_i)$ u trenutku t_d kad sistem ostaje nepromenjen i izražava se kao druga varijabla nezvesnosti:

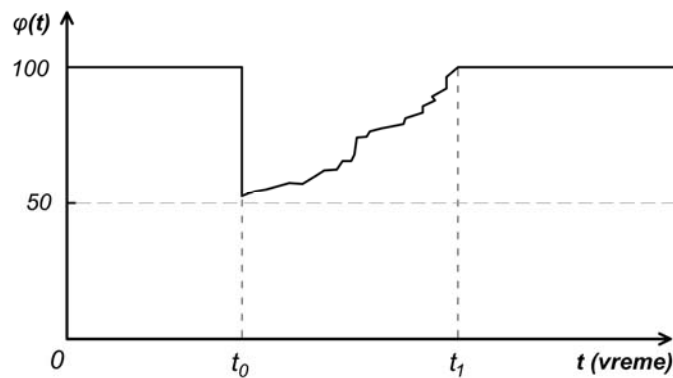
$$RB(\theta_i) = \{ \varphi(t_0) - X_i(\theta_i) \} \quad (4.123)$$

Nakon poremećaja u vremenskom periodu od trenutka t_d do trenutka t_r nastaje oporavak sistema nakon čega bi sistem ponovo bio stabilan i imao nivo ciljne funkcionalnosti $\varphi_{TG} = \varphi(t_r)$. Funkcija $\varphi_{RE}(t_r, \theta_i)$ predstavlja veličinu systemske funkcionalnosti koja je zapravo obnovljena u vremenu t_r i naziva se oporavak funkcionalnosti. Sposobnost sistema da se vrati u svoje prvobitno stanje nakon poremećaja naziva se *rezilijentnost*²³ (odskok) sistema (eng. *resilience of system*) i definiše se funkcijom:

$$RE(\theta_i) = \{ T_{RE}[\varphi(t_r), \theta_i], \varphi_{RE}(t_r, \theta_i) \} \quad (4.123a)$$

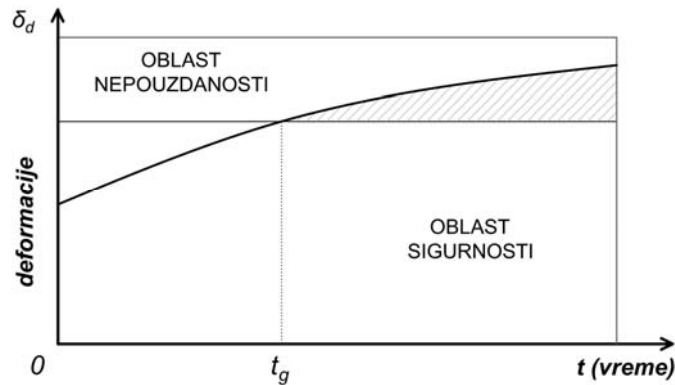
Pojava reverzibilnog graničnog stanja moguće je usled reverzibilnog dejstva npr. usled dejstva seizmičkih sila.

²³ Resilire (lat.) - odskok



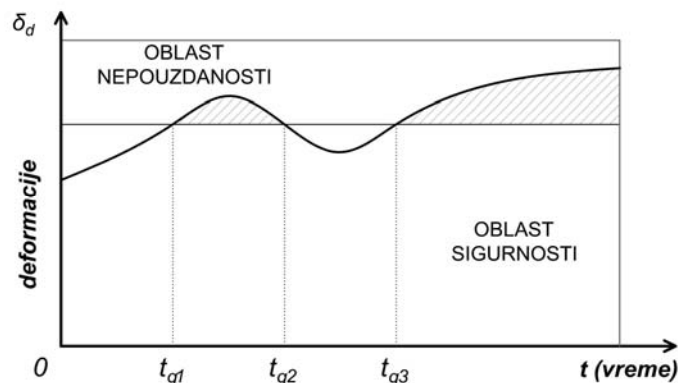
Slika 4.18 Funkcija oporavka sistema u slučaju seizmičkog dejstva

Na slici 4.18 prikazana je kriva funkcije oporavka sistema u slučaju seizmičkih dejstva $R=f(100-\varphi(t))dt$. Metode i šeme pouzdanosti date su u nacionalnom standardu ruske federacije GOST [126]. Ako usled reverzibilnog dejstva sile u određenom trenutku $t=t_g$ deformacija konstrukcije dostigne graničnu deformaciju $\delta=\delta_g$ onda je to reverzibilno granično stanje. Ako sa daljim tokom vremena $t>t_g$ deformacija dalje raste onda je to ireverzibilno granično stanje (slika 4.19).



Slika 4.19 Ireverzibilno granično stanje

Ako se određenim trenucima $t=t_{g1}$, $t=t_{g2}$ usled reverzibilne sile deformacija konstrukcije dostigne graničnu deformaciju $\delta=\delta_g$, onda u vremenskim intervalima $t=t_{g1}$, $t=t_{g2}$ konstrukcija prelazi oblast nesigurnosti i ako ima rezerve ona se vraća u oblast sigurnosti. Nakon vremena $t=t_{g3}$ ponovo ulazi u stanje nesigurnosti koje traje za vrednosti $t>t_{g3}$ kad konstrukcija prelazi u oblast nesigurnosti i ponovo dostiže granično stanje (slika 4.20).



Slika 4.20 Reverzibilno granično stanje

4.6. FUNKCIJA VREMENSKI ZAVISNE SLUČAJNE PROMENLJIVE I FUNKCIJA POUZDANOSTI KOD POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

4.6.1 FUNKCIJA POUZDANOSTI $R(t)$

Pouzdanost kao vremenski zavisna funkcija predstavlja verovatnoću da se tokom vremena upotrebe objekta, (u određenom vremenskom intervalu) konstrukcija ponaša u svemu prema postavljenim zahtevima sigurnosti i funkcionalnosti.

Funkcija pouzdanosti (eng. reliability function) ili funkcija opstanka (eng. survivor function) u određenom vremenskom intervalu prati se preko vremenski zavisne slučajne promenljive T koja čini skup vremenskih podataka od $(0, +\infty)$. Funkcija pouzdanosti se određuje na osnovu teorije verovatnoće preko funkcije raspodele otkaza (kumulativna funkcija raspodele).

Funkcija raspodele otkaza $F(t)$, pokazuje verovatnoću otkaza konstrukcije u vremenu t , gde je $t \geq 0$. Otkaz sistema nastaje u vremenskom trenutku $T \geq 0$, gde je T slučajna promenljiva veličina sa kumulativnom CDF funkcijom raspodele verovatnoće $F(t)$. Ako je verovatnoća otkaza funkcija vremena $P(T \leq t)$, onda važi:

$$P(T \leq t) = F(t) \quad (4.124)$$

gde za $t < 0$ sledi da je : $F(t) = 0$ (4.125)

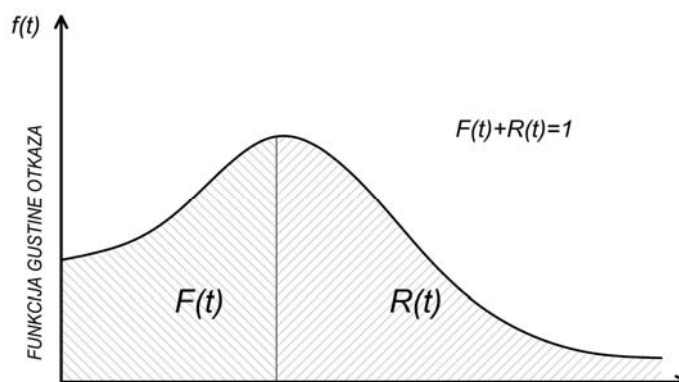
odnosno:

$$F(t) = \begin{cases} P(T \leq t), & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases} \quad (4.126)$$

Funkcija gustine otkaza data je izrazom:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4.127)$$

i predstavljena je na slici 4.21.



Slika 4.21 Funkcija gustine otkaza

Površina ograničena krivom $f(t)$ i intervalima vremena od 0 do t odgovara verovatnoći otkaza $F(t)$, a površina ograničena krivom $f(t)$ i intervalom vremena od t do ∞ odgovara verovatnoći pouzdanosti $R(t)$. Zbir tih površina jednak je jedinici, odnosno $F(t)+R(t) = 1$. Verovatnoća pouzdanosti sistema $P(T>t)$ se definiše vremenski zavisnom

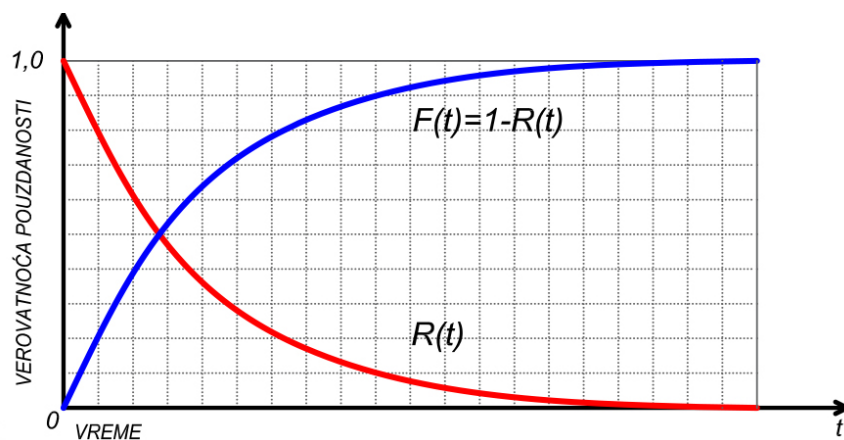
Funkcijom pouzdanosti $R(t)$ u vremenskom intervalu t (slika 4.22), pri čemu je:

$$R(t) = \begin{cases} P(T \geq t), t > 0 \\ 1, t = 0 \end{cases} \quad (4.128)$$

i sledi da je:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (4.129)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (4.130)$$



Slika 4.22 Funkcija pouzdanost i funkcija raspodele otkaza u funkciji vremena [127]

Diferenciranjem funkcije $F(t)$ dobija se:

$$\frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = f(t) \quad (4.131)$$

odnosno,

$$F'(t) = -R'(t) \quad (4.132)$$

Funkcija gustine otkaza:

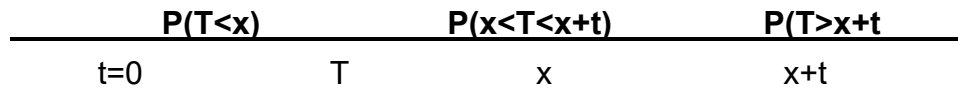
$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (4.133)$$

4.6.2 KUMULATIVNA FUNKCIJA HAZARDA

Ako je početak upotrebe objekta (konstrukcije) u vremenu $t=0$, tekuće vreme do pojave otkaza je u trenutku $t=x$, vreme otkaza T , može se očekivati sledeće verovatnoće:

- $P(T < x)$ - verovatnoća pouzdanosti sistema
- $P(x < T < x+t)$ - verovatnoća otkaza
- $P(T > x+t)$ - verovatnoća nakon otkaza

Vremenski podaci su šematski prikazani:



Raspodela uslovne verovatnoće kumulativne funkcije hazarda za tekuće vreme t nakon vremena otkaza x :

$$H(t|x) = P(T \leq x + t | T > x) \quad (4.134)$$

za $t, x \geq 0$, funkcija je data izrazom:

$$H(t|x) = \frac{F(x+t) - F(x)}{1 - F(x)} \quad (4.135)$$

Kumulativna funkcija hazarda predstavlja integrisanu funkciju hazarda.

4.6.3 FUNKCIJA HAZARDA

Ako se otkaz dogodi vremenu $t + \Delta t$, nakon vremena t , onda se na osnovu funkcije gustine otkaza i kumulativne funkcije hazarda $H(t|x)$ može definisati funkcija hazarda:

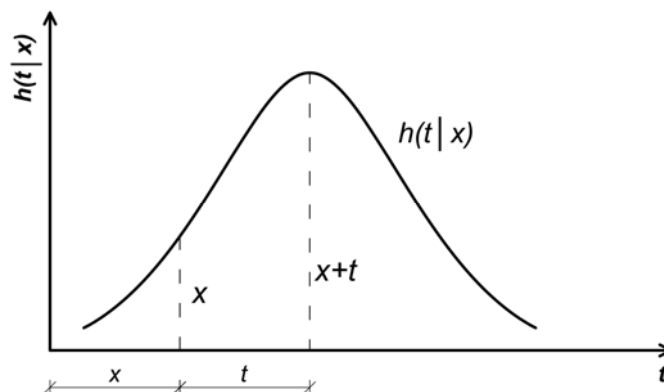
$$h(t|x) = \frac{f(x+t)}{1 - F(x)} \quad (4.136)$$

Hazardna funkcija u vremenu t je granična vrednost verovatnoće otkaza definisane funkcijom raspodele otkaza $F(t)$ u kratkom vremenskom interval Δt :

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T \leq t + \Delta t | T > t] \quad (4.137)$$

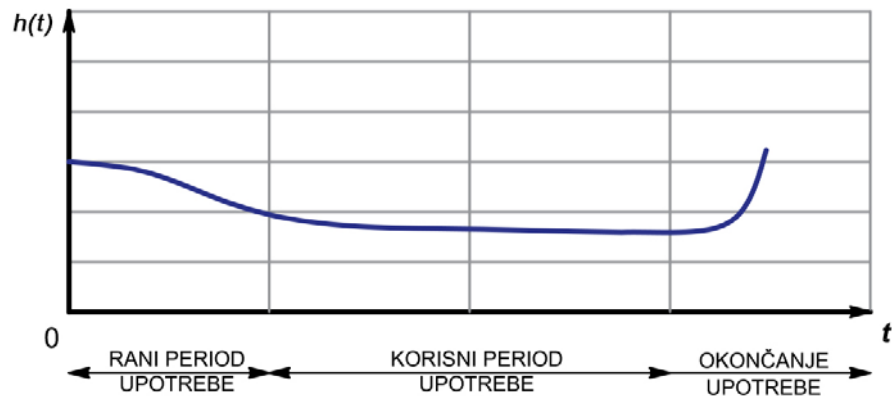
$$h(t) = \frac{1}{R(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} F(t) \quad (4.138)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(x)} \quad \text{ili} \quad h(t) = \frac{f(t)}{R(x)} \quad (4.139)$$



Slika 4.23 Funkcija hazarda

Funkcija $h(t|x)$ opisuje stopu otkaza pa se naziva funkcijom inteziteta otkaza. Funkcija u početku može da bude velikog inteziteta u malom vremenskom periodu kao rani otkaz sistema, zatim dolazi vreme eksploatacije u dužem vremenskom periodu i na kraju vreme otkaza (slika 4.24) [128].



Slika 4.24 Funkcija inteziteta otkaza

Funkcija inteziteta otkaza je ošte poznata u tehnici i može se koristiti za praćenje stanja konstrukcija tokom vremena. Zavisnosti funkcije pouzdanosti i drugih vremenskih probablističkih funkcija date su u tabeli 4.10.

Tabela 4.10 Korelacija vremenski zavisnih funkcija i pouzdanosti [129]

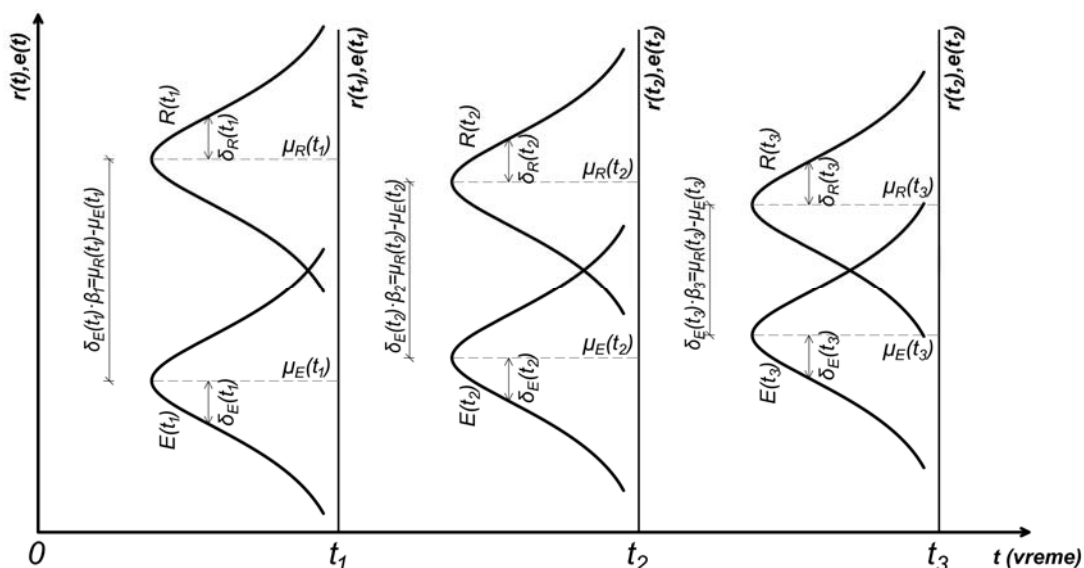
	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$H(t)$
$f(t)$	/	$F'(t)$	$-R'(t)$	$h(t)\exp\left\{-\int_0^t h(x)dx\right\}$	$-\frac{d\{\exp[-H(t)]\}}{dt}$
$F(t)$	$\int_0^t f(x)dx$	/	$1-R(t)$	$1-\exp\left\{-\int_0^t h(x)dx\right\}$	$1-\exp\{-H(t)\}$
$R(t)$	$1-\int_0^t f(x)dx$	$1-F(t)$	/	$\exp\left\{-\int_0^t h(x)dx\right\}$	$\exp\{-H(t)\}$
$h(t)$	$\frac{f(t)}{1-\int_0^t f(x)dx}$	$\frac{F'(t)}{1-F(t)}$	$\frac{R'(t)}{R(t)}$	/	$H'(t)$
$H(t)$	$-\ln \int_0^\infty f(x)dx$	$\ln \left\{ \frac{1}{1-F(x)} \right\}$	$-\ln \{R(x)\}$	$\int_0^t h(x)dx$	/

4.7 SIGURNOST POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

Novi mostovi i zgrade se projektuju da traju dugi niz godina, gde je očekivano vreme trajanja 50 do 100 godina [10]. Kod mostova se tokom vremena povećava saobraćajno opterećenje naročito frekvencija prelaza teških vozila, kao i agresivni uticaji sredine koji smanjuju njihov vek trajanja. Opterećenja i nosivost konstrukcije su veličine promenljive tokom vremena u odnosu na projektantske nominalne vrednosti, realno je očekivati promenu inteziteta opterećenja i nosivosti. Ovo utiče na verovatnoću sigurnosti konstrukcije tokom vremena sve do iscrpljenja upotrebnog veka. Po pravilu opterećenja se vremenom povećavaju a nosivost se smanjuje. U praksi su često opterećenja precenjena, naročito kod mostova, pa se u takvim slučajevima, pri kontroli stanja mostova, pribegava merenju saobraćaja, naročito broja prelaza teških vozila u posmatranom vremenskom intervalu. Ovo omogućuje definisanje realnog opterećenja i realne nosivosti konstrukcije, kao i druga svojstva koja su merljiva tokom eksploatacije konstrukcije u posmatranom vremenskom trenutku. Takođe se mogu isključiti i rezervna sigurnost konstrukcije usled mogućih grešaka kod izvođenja objekta, a koja je predviđena u fazi projektovanja.

4.7.1. APDEJTOVANJE PROBABILISTIČKIH MODELA NA BAZI PRIKUPLJANJA PODATAKA

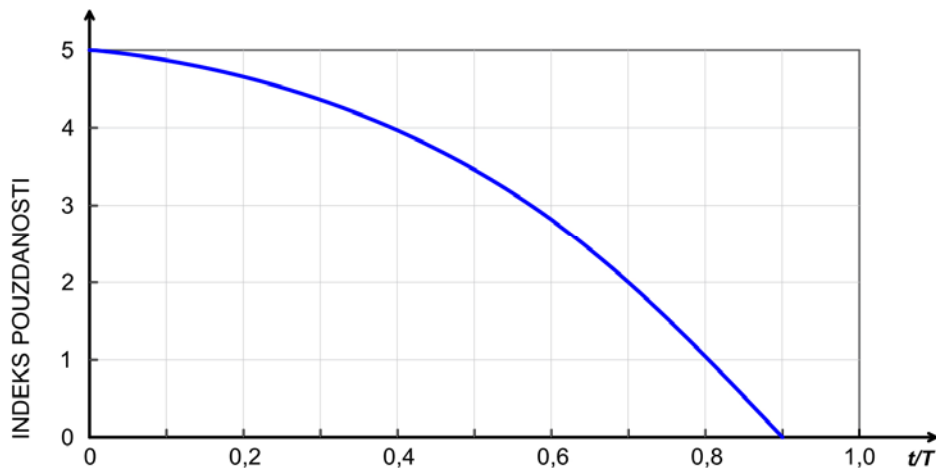
Indeks pouzdanosti u probabilističkoj analizi konstrukcija tokom vremena se može uzeti kao kriterijum sigurnosti konstrukcija. Sve varijable koje koristi pouzdanost, su slučajne vremenski zavisne slučajne promenljive $E(t)$ i $R(t)$.



Slika 4.25 Promena vremenski zavisnih slučajnih promenljivih tokom vremena

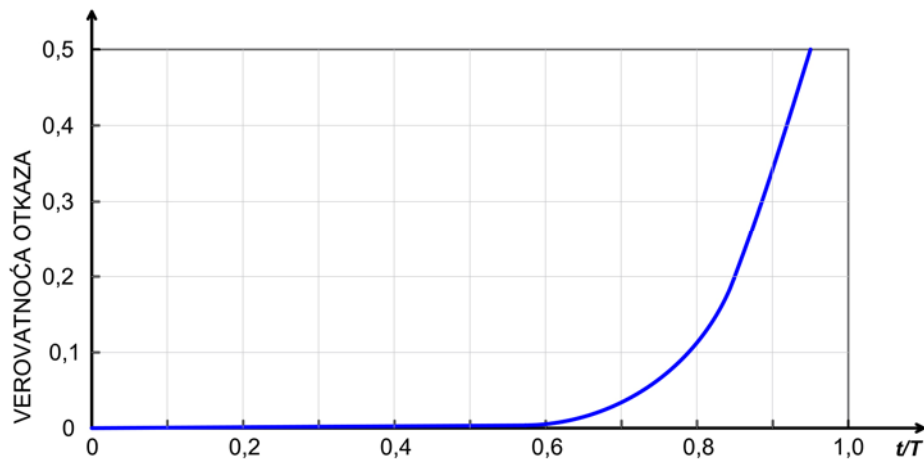
Ako se posmatra sistem i opterećenje u trenutku t_1 upotrebe konstrukcije, onda su u trenutku $t=t_1$ odgovarajuće varijable $E(t_1)$ i $R(t_1)$, a odgovarajući probabilistički parametri: srednje vrednosti $\mu_E(t_1)$, $\mu_R(t_1)$, standardna devijacija $\sigma_E(t_1)$, $\sigma_R(t_1)$ i indeks pouzdanosti $\beta_1=\beta(t_1)$. Simboli slučajnih promenljivih i probabilističkih parametara, u trenutku $t=t_2$ i $t=t_3$ dati su na slici 4.25. Indeks pouzdanost na osnovu istraživanja [130] definisan je u funkciji

(t/T) gde je za upotrebnii vek početak $t=0$, a za $t=T$ kraj upotrebnog veka. Indeks pouzdanosti je kvadratna jednačina oblika $\beta(t)=5-6t^2$ (slika 4.26)



Slika 4.26 Promena indeksa pouzdanosti tokom vremena

Odgovarajuća verovatnoća otkaza konstrukcije data je za $t=0$ i za $t=T(t/T=1)$ (slika 4.27)



Slika 4.27 Promena verovatnoće otkaza tokom vremena

4.7.2 VEROVATNOĆA NESIGURNOSTI KONSTRUKCIJE

Verovatnoća nesigurnosti konstrukcije P za poznato stanje konstrukcije $P(F|I)$ može se proveriti posle određenog vremenskog perioda upotrebe objekta. Presek dva događaja na objektu $F \cap I$ gde je stanje nesigurnosti F i stanje performansi konstrukcije I (informacija u vremenskom trenutku inspekcije) definiše verovatnoću nesigurnosti konstrukcije P za poznato stanje konstrukcije $P(F|I)$:

$$P(F|I) = \frac{P(F \cap I)}{P(I)} \quad (4.140)$$

Verovatnoća nesigurnosti konstrukcije je definisana izrazom:

$$P_f = P(G = g(R, E) < 0) = P(R - E < 0) = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg = \int_{g(x) < 0} f_X(x) dx \quad (4.141)$$

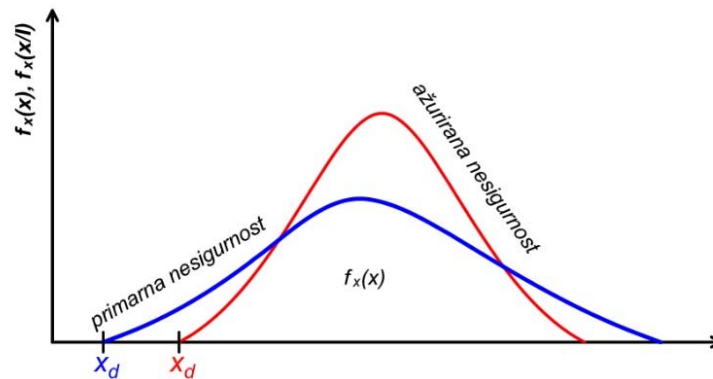
ili verovatnoća pouzdanosti:

$$P_r = 1 - P_f \quad (4.142)$$

$$P_r = P(G = g(R, E) > 0) = P(R - E > 0) = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg = \int_{g(x) > 0}^0 f_X(x) dx \quad (4.143)$$

Apdejtovana verovatnoća nesigurnosti konstrukcije (eng. *updated failure probability*) nakon inspekcije i utvrđivanja stanja konstrukcije

$$P(F|I) = \int_{g(x) < 0}^0 f_X(x|I) dx \quad (4.144)$$



Slika 4.28 Apdejtovanje modela nesigurnosti

Zbog niza specifičnosti realne parametre konstrukcija je po izgradnji ili nakon sanacije konstrukcije potrebno utvrditi inspekcijski pregledom. Zbog promene svojstva konstrukcija u pogledu nosivosti tokom vremena, pregledi se zahtevaju i tokom eksploatacije u unapred određenim vremenskim intervalima [DIN].

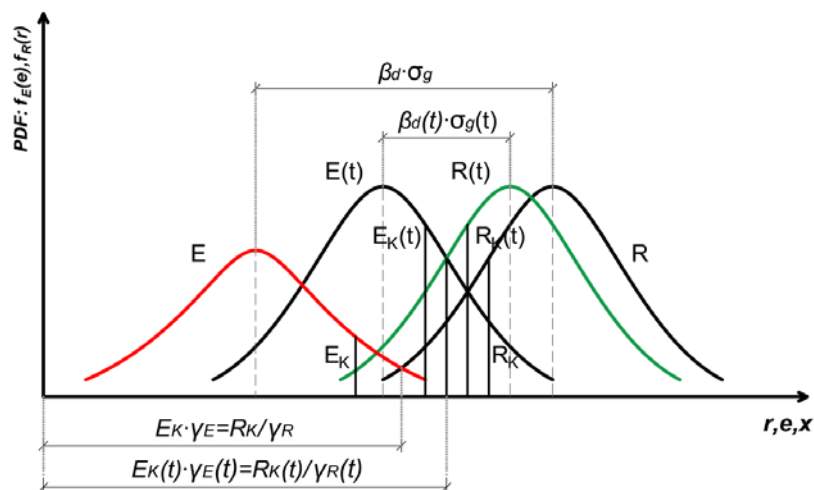
Metodologija prikupljanja podataka o svojstavima konstrukcije je bazirana na prikupljanju vrednosti relevantnih parametra, praćenju stanja i hronološkom posmatranju promene svojstava materijala tokom vremena. Prikupljanje podataka se temelji na iskustvu, vizuelnom opažanju promena, merenjima i ispitivanjima materijala i konstrukcija. *Apdejtovanjem*²⁴ podataka dobijaju se relevantne varijable koje opisuju stanje konstrukcije odnosno probablističkih parametara za određivanje karakterističnih i proračunskih vrednosti. Ovde spada provera nosivosti, krutosti, geometrije i mehaničkog modela noseće konstrukcije, kao i provera modela nesigurnosti.

Za stalna opterećenja potrebno je utvrditi da li su svi projektovani elementi izvedeni u odgovarajućem obliku i dimenzijama, u odgovarajućem nagibu, da li postoje obložni i zaštitini slojevi, položaj opreme i slično. Za pokretno opterećenje potrebno je utvrditi da li konstrukcija služi svojoj nameni i da li su projektovana opterećenja primerena funkciji objekta. Kod mostova potrebno je utvrditi da li je projektovano saobraćajno opterećenje odgovara rangu saobraćajnice. Na osnovu podataka o trenutnom stanju konstrukcije i podataka o opterećenju, moguće je proceniti preostalu nosivost konstrukcije i predvideti preostali upotrebnii vek konstrukcije. Prikupljene podatke je moguće upotrebiti za korekciju modela nosivosti, posebno kod modela nesigurnosti za nosivost. Za svojstva materijala i nosivost konstrukcije najčešće se koristi gausova ili log-normalna kriva raspodele. Za stalna dejstva se pregledom konstrukcije može utvrditi izvedeno stanje, a merenjem se mogu odrediti tačne dimenzije i tačan intezitet dejstva, kao i parcijalni koeficijent, pri čemu se uticaj netačnosti modela za dejstva može smanjiti ili potpuno

²⁴ Update (eng) – ažuriranje, korigovanje

eliminirati. Za promenljiva dejstva se koristi gausova ili gumbelova kriva raspodele. Opterećenja sredine koja su određena geografskom zonom objekta, mogu se tačnije odrediti merenjem na mikrolokaciji objekta, tokom perioda od najmanje godinu dana.

Kod mostova pokretno relevantno opterećenje je osovinsko opterećenje koje se računa na osnovu broja prelaza teških vozila preko mosta. Proverom vrednosti dejstava na konstrukciju mogu se redukovati parcijalni koeficijenti sigurnosti γ_F za dejstva koji važe za novoprojektovane konstrukcije, a koji se odnose na nesigurnost modela θ_F . Takođe se mogu proveriti i podaci u mehaničkom modelu konstrukcije, gde se na osnovu usvojenog nosećeg sistema, geometrije i podataka o krutostimogu proceniti odstupanja u geometriji, opterećenjima i unaprediti model nesigurnosti θ_{Ed} , postoji mogućnost redukcije parcijalnih koeficijenta sigurnosti γ_{Ed} . U praksi se može desiti da svojstva materijala budu takva da nosivost postojeće konstrukcije bude veća od projektovane, tako da se koeficijent nesigurnosti modela nosivosti može smanjiti ili odbaciti. Tendencija za stalnim povećanjem korisnih dejstva koja je najizraženija kod mostova može dovesti do prekoračenja nosivosti i pojave oštećenja iako je postojeća konstrukcija u sasvim dobrom stanju. U tom slučaju neophodno je apdejtovanje stohastičkog modela nosivost-dejstva što uslovljava promenu probabilističkih parametara (slika 4.29).



Slika 4.29 Apdejtovani stohastički modeli sigurnosti i dejstva $R(t)$ i $E(t)$

Parametri probabilističkih krivih $E(t)=E$ i $R(t)=R$ se određuju fazi projektovanja prema raspoloživim probabilističkim podacima, u trenutku $t=0$, za dejstva na bazi analize težina, dejstvava iz sredine prema geografskim, seizmičkim i geološkim podacima i inteziteta saobraćajnog opterećenja prema analizi za određeni putni pravac i kategoriju puta, za nosivost konstrukcije na osnovu usvojene vrste i kvaliteta materijala i geometrije. Tokom vremena upotrebe objekta dolazi i do promena dejstava i do promene svojstava materijala i nosivosti konstrukcije, pa i do promene geometrije poprečnih preseka i/ili geometrije sistema. Promena geometrije usled oštećenja konstrukcije zbog smanjene krutosti, može da izazove preraspodelu statičkih veličina i deformaciju sistema. Pojave imperfekcije konstrukcije i pojava deformacija tečenja tokom vremena takođe može da dovede do dodatnih uticaja. Na osnovu određenih probabilističkih parametara pregledima, osmatranjem i/ili ispitivanjem stiče se potpuni uvid u stanje objekta tokom eksploatacije. Početne projektovane karakteristične vrednosti R_k i E_k za dejstva i za materijale treba apdejtovati sa odgovarajućim vremenskim podacima za $R_k(t)$ i $E_k(t)$. Jedna od provera

sigurnosti postojećih konstrukcija je vremenski zavistan stepen ispunjenosti n (eng. *degree of compliance*) čija vrednost mora biti veća od 1.

$$n = R_d(t) / E_d(t) \geq 1 \quad (4.145)$$

Kod apdejtovanja stohastičkih modela sigurnosti i određivanja stanja konstrukcija veliki značaj ima detekcija oštećenja (*poglavlje V*)

4.7.3 VREMENSKI ZAVISTAN INDEKS POUZDANOSTI KOD POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

Proračun novoprojektovane konstrukcije prema EN1990 bazira na parcijalnim koeficientima sigurnosti za dejstva γ_E i za nosivost γ_R koji su u vezi sa odgovarajućim ciljnim ili proračunskim indeksom pouzdanosti β_d . Parcijalni koeficijenti sigurnosti γ_E i γ_R su dati u zavisnosti od karakterističnih vrednostih E_k i R_k i računskih vrednostih E_d i R_d za dejstava i za nosivost. Odnosom razlika srednjih vrednosti nosivost i dejstava $\mu_g = \mu_R - \mu_E$ i standardne devijacija σ_g , na osnovu izraza 4.17 određuje se indeks pouzdanosti β_d :

$$\beta_d = \mu_g / \sigma_g \quad (4.146)$$

Tokom vremena kod objekta u eksploataciji, zbog promene vrednosti dejstava i nosivosti, parcijalni koeficijenti sigurnosti za dejstva i za nosivost su promenljive veličine u funkciji vremena $\gamma_E(t)$ i $\gamma_R(t)$. Indeks pouzdanosti kao vremenski zavisna veličina je:

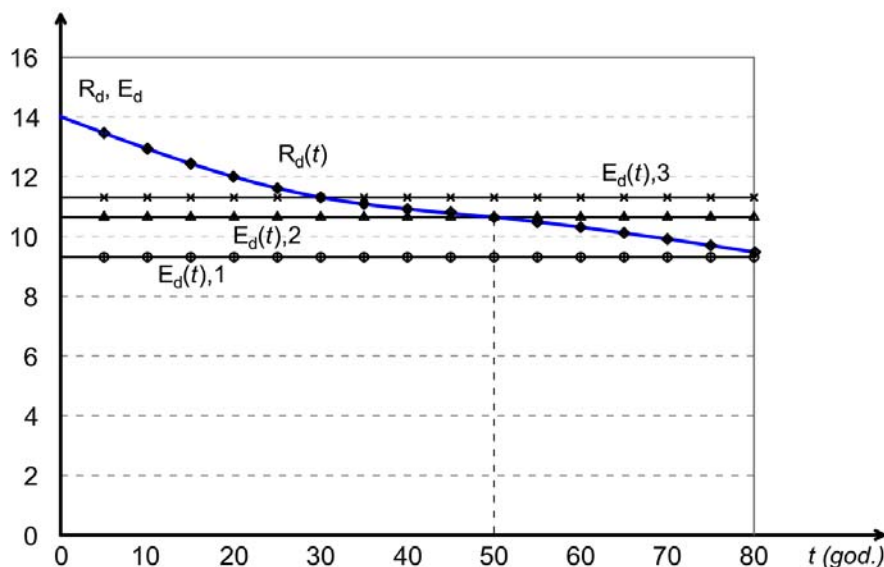
$$\beta_d(t) = \mu_g(t) / \sigma_g(t) \quad (4.147)$$

Parcijalni koeficijenti sigurnosti za dejstva i za nosivost u funkciji vremena su:

$$\gamma_E(t) = E_d(t) / E_k(t) \quad (4.148)$$

$$\gamma_R(t) = R_k(t) / R_d(t) \quad (4.149)$$

Parcijalni koeficijenti sigurnosti u probablističkoj analizi su veličine koje su zavisne od indeksa pouzdanosti i koeficijenta varijacije, tako da bilo koja promena indeksa pouzdanosti, izaziva promenu parcijalnih koeficienata sigurnosti i obrnuto. Apdejtovane vrednosti indeksa pouzdanosti i drugi probablističkih parametara dati sa na slici 4.30.



Slika 4.30 Promena dejstava i nosivosti tokom upotrebnog veka u zavisnosti od klasa posledica

Vrednost razlike indeksa pouzdanosti $\Delta\beta_d$ odnosno vrednosti $\Delta\beta_d \cdot \sigma_g(t)$ dobija iz razlike ciljne vrednosti indeksa pouzdanosti $\beta_d \cdot \sigma_g$ i apdejtovane vrednosti indeksa pouzdanosti $\beta_d(t) \cdot \sigma_g(t)$ iz izraza:

$$\beta_d \cdot \sigma_g - \beta_d(t) \cdot \sigma_g(t) = \Delta\beta_d \cdot \sigma_g(t) \quad (4.150)$$

$$(\beta_d(t) + \Delta\beta_d) \cdot \sigma_g(t) = \beta_d \cdot \sigma_g \quad (4.150a)$$

Kod normalne raspodele za uticaje i nosivost u vremenu t sledi da je:

$$E_d(t) = \mu_E(t)(1 + \alpha_E \cdot \beta_d(t) \cdot COV_E(t)) \quad (4.151)$$

$$R_d(t) = \mu_R(1 - \alpha_R \cdot \beta_d(t) \cdot COV_R(t)) \quad (4.152)$$

Kod log-normalne raspodele za uticaje i nosivost u vremenu t sledi:

$$E_d(t) = \mu_E(t) \cdot e^{(\alpha_E \cdot \beta_d(t) \cdot \delta_E - 0,5\delta_E^2)} \quad (4.153)$$

$$R_d(t) = \mu_R(t) \cdot e^{(\alpha_R \cdot \beta_d(t) \cdot \delta_R - 0,5\delta_R^2)} \quad (4.154)$$

gde su parametri log-normalne raspodele

$$\alpha_E^2 = \ln(COV_E^2(t) + 1) \quad (4.155)$$

$$\alpha_R^2 = \ln(COV_R^2(t) + 1) \quad (4.156)$$

Iz izraza (4.150) sledi:

$$\sigma_g(t) \approx \sigma_g \quad (4.157)$$

$$\beta_d(t) = \beta_d - \Delta\beta_d \quad (4.157a)$$

Sigurnost postojećih konstrukcija se može proveriti na osnovu razlike apdejtovanih modela nosivosti $R(t)$ i modela za uticaje od dejstava $E(t)$ gde se modeli za uticaje od dejstva $E(t)$ mogu analizirati za stalna i promenljiva dejstva:

$$E(t) = E_{stalno}(t) + E_{promenljivo}(t) \quad (4.158)$$

Ukoliko je $R(t) - E(t) \geq 0$, onda konstrukcija tokom vremena eksploatacije t , zadržava istu klasu pouzdanosti [10] za koju je projektovana. Ako je ta razlika manja od 0, onda se može sračunati deo uticaja od promenljivih dejstava koje može da primi konstrukcija:

$$E_{promenljivo}(t) = E(t) - E_{stalno}(t) \quad (4.159)$$

Ukoliko je $R(t) = E(t)$ onda važi:

$$E_{promenljivo}(t) = R(t) - E_{stalno}(t) \quad (4.160)$$

na osnovu čega se određuju ukupni uticaji od dejstava koje konstrukcija može da primi a prema kojima se određuje klasa pouzdanosti

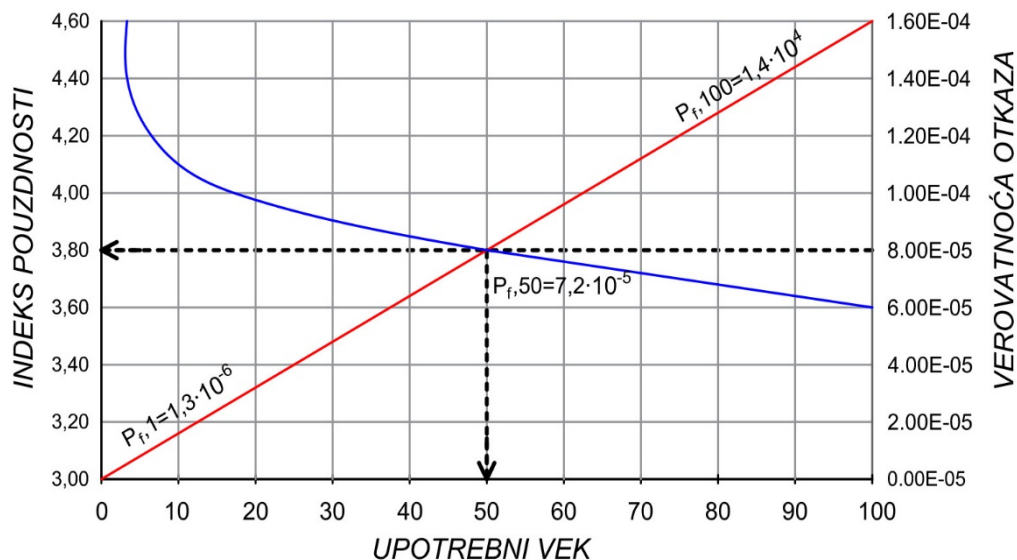
$$E(t) = E_{stalno}(t) + E_{promenljivo}(t) \quad (4.161)$$

Promenom dejstava i nosivosti tokom vremena u zavisnosti od klasa posledica CC1, CC2 i CC3 (tabela 4.2), odnosno klasa pouzdanosti RC1, RC2 i RC3 (tabela 4.3) može se

odrediti nivo mogućeg dejstva na konstrukciju odnosno uticaja od dejstva $Ed(t)$ za svaku klasu posledica: $Ed(t),1$, $Ed(t),2$ i $Ed(t),3$ [131]. Ove vrednosti su konstantne tokom vremena i odgovaraju indeksima pouzdanosti za određenu klasu pouzdanosti. Nosivost konstrukcije $R(t)$ opada tokom vremena od trenutka $t=0$, sve do iscrpljenja upotrebnoг veka. Presečne tačke krive $R(t)$ i $E_d(t),1$, $E_d(t),2$ i $E_d(t),3$, predstavljaju granično stanje sistema, odnosno vreme t pri kome je iscrpljena nosivost konstrukcije (slika 4.30). Drugim rečima na osnovu upotrebnoг veka može se odrediti potrebna nosivost konstrukcije i odgovarajući uticaj od dejstava. Kod konstrukcija u eksploataciji je moguće smanjenje nosivosti tokom vremena, kao i promena dejstava na konstrukciju, što znači da tokom vremena konstrukcija može da promeni klasu pouzdanosti, odnosno klasu posledica kako bi postigla zahtevanu sigurnost.

4.7.4 SIGURNOST POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJE PREMA INDEKSU POUZDANOSTI, KLASAMA POUZDANOSTI I KLASAMA POSLEDICA

U DIN standardima [132] pouzdanost konstrukcija se ne koristi operativno kao dokaz sigurnosti konstrukcije na bazi stvarne verovatnoće otkaza, već se koristi samo za kalibraciju parcijalnih koeficijenata sigurnosti preko indeksa pouzdanosti i odgovarajuće verovatnoće otkaza konstrukcije. Moguća verovatnoća otkaza se vezuje za slučajne promenljive i verovatnoću nesigurnosti u modelima, a ne uzima u obzir verovatnoću pojave ljudske greške. U DIN standardu [100] stoji napomena da se verovatnoća otkaza konstrukcije izazvana ljudskom greškom ne uzima u obzir kod određivanja parcijalnih koeficijenata sigurnosti, jer se proračunska verovatnoća ne može smatrati realnom.



Slika 4.31 Ciljni indeks pouzdanosti i pripadajuća verovatnoća otkaza tokom upotrebnoг veka za klasu pouzdanosti RC2

Na slici 4.31 je prikazan ciljni indeks pouzdanosti i pripadajuća verovatnoća otkaza tokom upotrebnoг veka za klasu pouzdanosti RC2. U preseku krivih, za indeks pouzdanosti i verovatnoću otkaza od 1 do 100 godina koja je linearno promenljiva veličina, odgovara vrednost $\beta=3,8$ (tabela 4.11) i referentni vremenski period od 50 godina [133]. Vrednost

indeksa pouzdanosti za nove objekte i objekte sa referentnim vremenskim periodom od 50 god. do ispunjenja upotrebnog veka $T=100$ god. je konstantna veličina [10]:

$$\beta = \beta_{50} = \beta_{100} = 3,8 = \text{const} \quad (4.162)$$

To znači da se postojeće konstrukcije računaju sa istim indeksom pouzdanosti, ali da se slučajne promenljive karakteristika materijala, dejstava i geometrije uzimaju kao vremenski zavisne veličine [48]. Slično važi i za ostale klase pouzdanosti gde za RC1, iznosi $\beta=3,3$ i za RC3, iznosi $\beta=4,3$ (tabela 4.3). Indeks pouzdanosti za referentni period od 1 godine iznosi $\beta_1=4,7$ sa verovatnoćom otkaza:

$$P_f = 1,3 \times 10^{-6} \quad (4.163)$$

U aneksu C Evrokoda 0 [10] definisana je korelacija indeksa pouzdanosti za referentne periode od 1 i od n godina. Za $n=50$ godina, sledi da je:

$$\beta_{50} = \Phi^{-1}[(\Phi(\beta_1))^{50}] = \Phi^{-1}[(\Phi(4,7))^{50}] = 3,83 \quad (4.164)$$

za vrednost $1-p_f = \Phi(4,7) = 1-1,3 \times 10^{-6} = 0,9999987$.

Tabela 4.11 Ciljni indeksi pouzdanosti za granična stanja GSU i GSN i zamor prema Evrokodu

KLASE POUZDANOSTI	GSN		ZAMOR		GSU	
	1god.	50.god	1god.	50.god	1god.	50.god
RC3	5,2	4,3	-	-	-	-
RC2	4,7	3,8	-	1,5 - 3,8	2,9	1,5
RC1	4,2	3,3	-	-	-	-

U tabeli 4.11 date su ciljne vrednosti indeksa pouzdanosti β za granično stanje upotrebljivosti GSU, granično stanje nosivosti GSN i zamora prema Evrokodu.

Tabela 4.12 Ciljni indeks pouzdanosti prema JCSS:2001

RELATIVNI TROŠKOVI INTERVENCIJA	POSLEDICE			
	MALE	IZVESNE	UMERENE	VELIKE
VELIKI	0	1.5	2.3	3.1
NORMALNI	1.3	2.3	3.1	3.8
MALI	2.3	3.1	3.8	4.3

U tabeli 4.12 prikazan je ciljni indeks pouzdanosti prema JCSS [101] koji se za referentni period od 1 godine menja u u zavisnosti od relativnih troškova sigurnosnih intervencija

Tabela 4.13 Ciljni indeks pouzdanosti za upotrebnii vek prema ISO 2394:1998

RELATIVNI TROŠKOVI SIGURNOSNIH INTERVENCIJA	POSLEDICE OTKAZA		
	MALE	UMERENE	VELIKE
VELIKI	$\beta = 3,1$ ($p_f = 10^{-3}$)	$\beta = 3,3$ ($p_f = 10^{-4}$)	$\beta = 3,7$ ($p_f = 10^{-4}$)
NORMALNI	$\beta = 3,7$ ($p_f = 10^{-4}$)	$\beta = 4,2$ ($p_f = 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($p_f = 5 \times 10^{-5}$)
MALI	$\beta = 4,2$ ($p_f = 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($p_f = 5 \times 10^{-5}$)	$\beta = 4,7$ ($p_f = 10^{-6}$)

U tabeli 4.13 prikazan je ciljni indeks pouzdanosti prema međunarodnom standardu ISO [34] prema kome se ciljni indeks pouzdanosti za upotrebnog veka konstrukcije odnosi na posledice kolapsa konstrukcije i na relativne troškove bezbednosnih mera. Prema ISO standardu [35] za procenu postojećih konstrukcija definisan je ciljni indeks pouzdanosti za različite posledice graničnih stanja konstrukcije u zavisnosti od relativnih troškova sigurnosnih intervencija, za referentni period od 50 godina.

Može se zaključiti da evrokod EN 1990 kao i preporuke JCSS:2001 ne daju ciljne indekse pouzdanosti koje mogu da se pojave tokom upotrebnog veka. Standard ISO 2394 i JCSS:2001 preko relativnih troškova sigurnosnih intervencija bliže određuju pouzdanost postojećih konstrukcija od evrokodova.

Nordijski komitet NKB (eng. *Nordic Committee on Building Regulations*) [134] u propisima za zgrade predlaže indekse pouzdanosti u zavisnosti od vrste loma. Ciljni indeksi pouzdanosti zavise od duktilnosti materijala i klasa pouzdanosti, odnosno klasa poledica. Ciljni indeksi prema NKB prikazani su u tabeli 4.14.

Tabela 4.14 Ciljni indeks pouzdanosti prema NKB

KLASE	VRSTE LOMA		
	DUKILNI LOM		KRTI LOM
	SA REZERVOM NOSIVOSTI	BEZ REZERVE NOSIVOSTI	
CC1/RC1	$\beta = 3,1 (p_f = 10^{-3})$	$\beta = 3,7 (p_f = 10^{-4})$	$\beta = 4,2 (p_f = 10^{-5})$
CC2/RC2	$\beta = 3,7 (p_f = 10^{-4})$	$\beta = 4,2 (p_f = 10^{-5})$	$\beta = 4,7 (p_f = 5 \times 10^{-6})$
CC3/RC3	$\beta = 4,2 (p_f = 10^{-5})$	$\beta = 4,7 (p_f = 5 \times 10^{-6})$	$\beta = 5,2 (p_f = 10^{-7})$

Švajcarske norme SIA-269 baziraju na određivanju nivoa efikasnosti intervencija koja se meri indeksom efikasnosti EF_M kao odnos troškova usled smanjenja rizika nakon intervencija u odnosu na troškove ispunjenja zahteva pouzdanosti. Posledice loma konstrukcije su izražene odnosom ρ direktnih troškova koštanja posledice loma i koštanja obnavljanja objekta (tabela 4.15). Ciljni indeks pouzdanosti se određuje u zavisnosti od vrednosti EF_M i ρ za referentni period od 1 godine. Norme SIA 269, kao i EN1990 koriste nepromenjene indekse pouzdanosti i za novoprojektovane i za postojeće konstrukcije prema klasama posledica koje su nepromenljive tokom vremena. Provera sigurnosti i postojećih i novih konstrukcija se sprovodi na isti način sa istim indeksom pouzdanosti, ali se dopušta smanjenje parcijalnih koeficijenata sigurnosti za postojeće konstrukcije.

Tabela 4.15 Ciljni indeks pouzdanosti prema SIA-269, 2011 [135]

EFIKASNOST INTERVENCIJA EF_M	POSLEDICE LOMA KONSTRUKCIJE		
	MALE $\rho < 2$	UMERENE $2 < \rho < 5$	OZBILJNE $5 < \rho < 10$
<i>Mala: $EF_M < 0,5$</i>	3,1	3,3	3,7
<i>Srednja: $0,5 \leq EF_M \leq 2,0$</i>	3,7	4,2	4,4
<i>Velika: $EF_M > 2,0$</i>	4,2	4,4	4,7

Normom SIA 269/1 [135] obuhvaćeni su modeli za proračun dejstava i nosivosti postojećih konstrukcija sa odgovarajućim vrednostima parcijalnih koeficijenata sigurnosti, dok norme SIA 269/2 do 269/6 obuhvataju materijale postojećih konstrukcija od betona, čelika, spregnutih, drvenih i zidanih konstrukcija.

Nemačke norme DIN EN za proračun postojećih konstrukcija koriste iste vrednost indeksa pouzdanosti i kod novoprojektovanih i kod postojećih konstrukcija, ali su dodatnoj regulativi [136] data uputstva da se iskoriste sve rezerve u materijalu i nosivosti elementa konstrukcije. Sam proračun se radi u četiri nivoa [137]:

- nivo 1: provera nosivosti prema evrokodovima (DIN EN)
- nivo 2: konkretniji proračun korišćenjem dopunske regulative nivoa 1.
- nivo 3: dokaz na osnovu podataka merenja na objektu
- nivo 4: dokaz na bazi naučnih metoda.

Prema normama NEN (eng. *The Royal Netherlands Standardization Institute*) dopušta se smanjenje indeksa pouzdanosti u vremenu dostizanja upotrebnog veka $t=T$, je:

$$\Delta\beta_d(T) = \beta_d - \beta_d(T) \quad (4.165)$$

Gde je $\max[\Delta\beta_d(T)]=1,5$ što predstavlja vrednost ispod koje se konstrukcija smatra neupotrebljivom [138]. Smatra se da mostovi koji su u dobrom stanju nakon upotrebe u vremenu $0 < t_1 < T$ mogu biti sigurni i sa manjim indeksom pouzdanosti:

$$\beta_d(t_1) < \beta_d \quad (4.166)$$

ali da razlika:

$$\beta_d - \beta_d(t_1) = \Delta\beta_d(t_1) \quad (4.167)$$

ne sme biti veća od 0,5, odnosno $\max[\Delta\beta_d(t_1)]=0,5$.

Za isto opterećenje u skladu dotrajavanja i oštećenja konstrukcije moguće je doći do prekoračenja kapaciteta nosivosti konstrukcija. Kod mostova na autoputu za klasu posledice CC3 indeks pouzdanosti iznosi: $\beta=4,0$ za nove mostove, $\beta=3,8$ za popravljene i $\beta=3,3$ za mostove van upotrebe. Na putevima nižeg reda za klasu posledice CC2 indeks pouzdanosti iznosi: $\beta=3,8$ za nove mostove, $\beta=3,3$ za popravljene i $\beta=2,5$ za mostove van upotrebe. Indeksi pouzdanosti za period od 1 godine i verovatnoća kolapsa prema klasama posledica prikazani su u tabeli 4.16 [138].

Tabela 4.16 Indeks pouzdanosti i verovatnoća kolapsa prema klasama posledica NEN 8700

KLASE POSLEDICA	Gubitak ljudskih života	Verovatnoća p_1	Verovatnoća kolapsa $p_{f,year}$	Indeks pouzdanosti β
CC1	<i>mali</i>	1×10^{-3}	1×10^{-2}	2,3
CC2	<i>znatan</i>	3×10^{-2}	3×10^{-4}	3,4
CC3	<i>veoma veliki</i>	3×10^{-1}	3×10^{-5}	4,0

Klase posledica definisane u EC0, se mogu prevesti na verovatnoće p_1 , koja pokazuje da li postoje smrtnost ljudi u slučaju konstrukcijskog kolapsa, onda se za svaku klasu posledica može odrediti maksimalno dopuštena godišnja verovatnoća kolapsa $p_{f,year}$.

Tabela 4.17 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za opterećenja u zavisnosti od klasa posledica

VREMENSKI PERIOD		CC2		CC3	
		γ_G	γ_Q	γ_G	γ_Q
Novo	100 god	1,30	1,35	1,40	1,50
Popravljeno	15 god	1,25	1,20	1,30	1,30
Nije za upotrebu	15 god	1,10	1,10	1,25	1,25

U tabeli 4.17 dati su parcijalni koeficijenti sigurnosti za stalna i promenljiva opterećenja u zavisnosti od klasa posledica za nove i postojeće mostove prema NEN 8700 [138].

Tabela 4.18 Parcijalni koeficijenti sigurnosti prema klasama posledica u normama NEN i EC

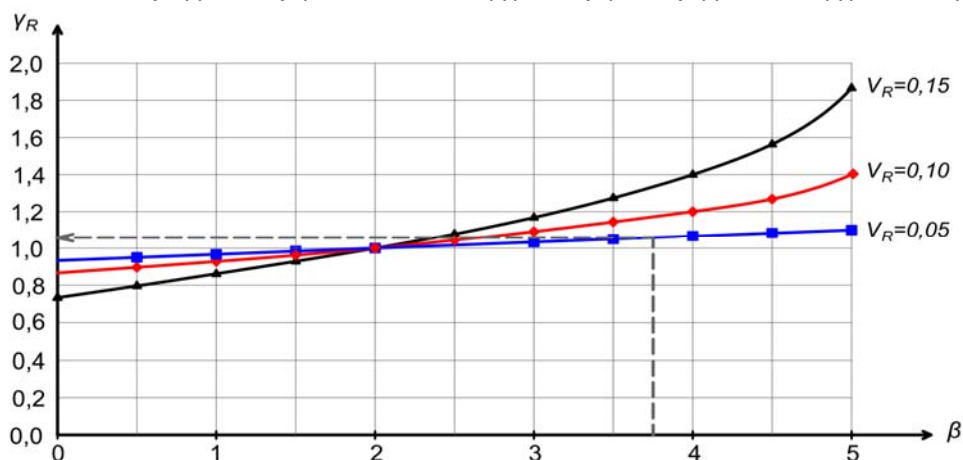
KLASA	NEN			EC		
	β	γ_Q	γ_G	β	γ_Q	γ_G
RC1	3,2	1,2	1,2	3,3	1,35	1,1
RC2	3,4	1,3	1,2	3,4	1,5	1,2
RC3	3,6	1,5	1,2	4,3	1,65	1,3

U tabeli 4.18 data je zavisnost indeksa pouzdanosti i parcijalnih koeficijenata sigurnosti prema klasama pouzdanosti prema normama NEN i EC.

4.7.5 VREMENSKI ZAVISNI PARCIJALNI KOEFICIJENTI SIGURNOSTI ZA DEJSTVA I ZA NOSIVOST KONSTRUKCIJE

Parcijalni koeficijenti sigurnosti za nosivost u funkciji vremena $\gamma_R(t)$, kod log-normalne statističke raspodele za nosivost, za fraktil od 5%, se mogu odrediti na osnovu istraživanja [139] u funkciji od $\beta(t)$ koeficijenta varijacije $COV_R(t)$, iz izraza:

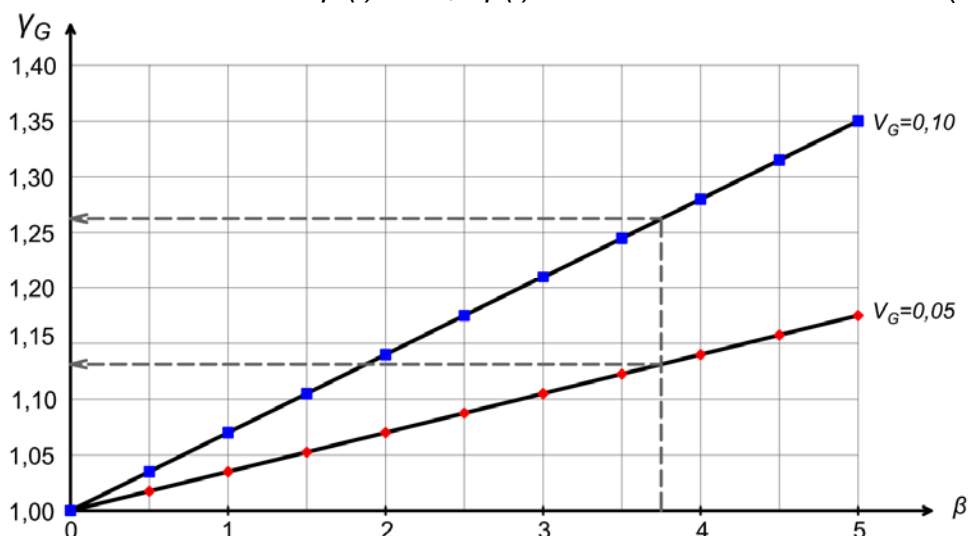
$$\gamma_R(t) = \exp(-1,645COV_R(t)) / \exp(-0,8 \beta(t) COV_R(t)) \quad (4.168)$$



Slika 4.32 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za nosivost u zavisnosti od indeksa pouzdanosti

Na slici 4.32 prikazane su vrednosti koeficijenta varijacije od 0,05 i 0,10 dati su krive $\gamma_R(t)$ u funkciji $\beta(t)$. Za stalna dejstva (sopstvena težina) karakteristična vrednost parcijalnih koeficijenata sigurnosti je jednaka srednjoj vrednosti težine:

$$\gamma_F(t) = 1 + 0,7 \beta(t) COV_F \quad (4.156)$$



Slika 4.33 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za stalna opterećenja u zavisnosti od indeksa pouzdanosti

Na slici 4.33 prikazane su vrednosti koeficijenta varijacije od 0,05 i 0,10 i krive γ_G u funkciji β . Parcijalni koeficijenti sigurnosti za nosivost betona γ_c i za nosivost armature γ_s su izvedeni iz modela nesigurnosti i degradacionih modela nosivosti konstrukcije. Vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti za stalna i pokretna dejstva i za nosivost, prema standardima koji se koriste u Evropi i Severnoj Americi dati su u tabeli 4.19.

Tabela 4.19 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za stalna i promenljiva opterećenja prema EC i AASHTO

PROMENLJIVE	EUROCODE	GSU	AASHTO	NOSIVOST 1
Stalno opterećenje	γ_G	1,35	γ_{DL}	1,25
Pokretno opterećenje	γ_Q	1,35 *	γ_{LL}	1,75
beton	γ_c	1,5	$1/\varphi_c$	$1/0,75=1,33$
armatura	γ_s	1,15	$1/\varphi_s$	$1/0,90=1,11$

*važi za model opterećenja LM1, prema EC

Vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti u zavisnosti od deterioracionog modela i ciljnog indeksa pouzdanosti iz istraživanja različitih autora prikazani su u tabeli 4.20.

Tabela 4.20 Vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti u zavisnosti od ciljnog indeksa pouzdanosti

DETERIORACIONI MODEL	β (100 god.)	γ_s	γ_c	γ_G	γ_Q
Bez deterioracije	3,8	1,34	1,75	1,11	1,38
Vu & Stewart	3,8	1,54	1,64	1,11	1,30
Enright & Frangopol	3,8	1,76	1,65	1,12	1,31
Vu & Stewart	3,3	1,46	1,61	1,10	1,25
Enright & Frangopol	3,3	1,67	1,59	1,11	1,26
Vu & Stewart	2,7	1,29	1,51	1,01	1,27

Vrednostima indeksa pouzdanosti odgovara verovatnoća loma konstrukcije za odgovarajući proračunski vek konstrukcije.

Tabela 4.21 Ciljni indeksi pouzdanosti i verovatnoća loma za proračunski vek konstrukcije

PREOPORUKE		INDEKS POUZDANOSTI	VEROVATNOĆA LOMA	PRORAČUNSKI VEK
EVROKOD		3,8	$7,200 \times 10^{-5}$	100
AASHTO		3,5	$3,105 \times 10^{-6}$	75
AASHTO (Moses)		2,5	$1,245 \times 10^{-3}$	5
Szerszen & Nowak	grede	3,5	$4,653 \times 10^{-6}$	50
	ploče	2,5	$1,246 \times 10^{-4}$	50
	stubovi	4,0	$6,337 \times 10^{-7}$	50
NEN 8700		3,3	-	15

U tabeli 4.21 su dati podaci za ciljne indekse pouzdanosti i odgovarajuće verovatnoće loma (za period 1 god) za proračunski vek konstrukcije prema različitim preporukama. IStructE (eng. *Institution of Structural Engineers*) [140] za potrebe proračuna postojećih konstrukcija dala je modifikovane vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti za materijale i dejstva, koristeći Britanski standard BS 8110 [141] koji je sadržan u britanskom nacionalnom aneksu Evrokoda 2 [48]. Nastojanja su da se smanje parcijalni koeficijenti sigurnosti prema realnom stanju konstrukcije.

Tabela 4.22 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za opterećenja konstrukcije

Parcijalni koeficijenti sigurnosti	Prvobitna vrednost	Sadašnja vrednost
γ_{f1}	1,15	1,05
γ_{f2}	1,0	1,0
γ_{f3}	1,2	1,15
γ_g^*	1,35	1,2

****ukupni faktor $\gamma_g = \gamma_{f1} \gamma_{f2} \gamma_{f3}$

U tabeli 4.22 date su vrednosti za parcijalne koeficijente sigurnosti za opterećenja za nove i postojeće konstrukcije i to:

- γ_{f1} - faktor varijacije opterećenja, sopstvena težina (tačno merenje)
- γ_{f2} - faktor kombinacije i osetljivosti opterećenja
- γ_{f3} - merenje tolerancije, imperfekcije i ekscentričnosti

Tabela 4.23 Parcijalni koeficijenti sigurnosti za materijale za nove i postojeće objekte prema BS 8110 [141]

Parcijalni koeficijenti sigurnosti	Prvobitna vrednost	Sadašnja vrednost
γ_c -faktor sigurnosti za beton	1,50	1,25
γ_s -faktor sigurnosti za čelik	1,15	1,05

U tabeli 4.23 date su vrednosti za parcijalne koeficijente sigurnosti za materijale za nove i postojeće konstrukcije i to:

- γ_c - faktor sigurnosti za beton određen ispitivanjem, kernovanjem ili čekićem
- γ_s - faktor sigurnosti za armaturu određen ispitivanjem duktilnosti i kvaliteta čelika

Prema američkim standardima ACI [142] i AASHTO-LRFD [36], parcijalni koeficijent sigurnosti za materijale postojećih armirano-betonskih konstrukcija može se modifikovati prema tabeli 4.24.

Tabela 4.24 *Parcijalni koeficijent sigurnosti za materijale postojećih AB konstrukcija*

Svojtvo materijala	Osnovne vrednosti γ_m	Modifikovane vrednosti $\gamma_{m,mod}$	$\gamma_m / \gamma_{m,mod}$
Čvrstoća betona (pritisak)	$1/0,65=1,54$	$1/0,8=1,25$	1,23
Čvrstoća armature (zatezanje)	$1/0,90=1,11$	$1/1,00=1,0$	1,11
Smicanje i/ili torzija	$1/0,75=1,33$	$1/0,8=0,125$	1,07

4.7.6 MODELI NA BAZI SMANJENJA INDEKSA POUZDANOSTI

Istraživanjem tokom inspekcije i nadgledanja mostova [143] predlaže se model smanjenja indeksa pouzdanosti β u funkciji ponašanja sistema konstrukcije, duktilnosti, robusnosti, monitoringa i tipa opterećenja za probabilistički proračun:

- **garnično stanje nosivosti GSN :**

$$\beta = 4,7 - (\Delta_M + \Delta_D + \Delta_S + \Delta_L) \geq 3,5 \quad (4.168)$$

gde je :

- Δ_M Monitoring $\Delta_M \geq 1,2 - (\Delta_D + \Delta_S + \Delta_L)$
- Δ_D Duktilnost $\Delta_D \geq 1,2 - (\Delta_M + \Delta_S + \Delta_L)$
- Δ_S Ponašanje sistema konstrukcije (robusnost) $\Delta_S \geq 1,2 - (\Delta_M + \Delta_D + \Delta_L)$
- Δ_L Dejstva na konstrukciju $\Delta_L \geq 1,2 - (\Delta_M + \Delta_D + \Delta_S)$

- **garnično stanje upotrebljivosti GSU :**

$$\beta = 3,0 - (\Delta_M + \Delta_D + \Delta_S + \Delta_L) \geq 1,7 \quad (4.169)$$

gde je :

- Δ_M Monitoring $\Delta_M \geq 1,3 - (\Delta_D + \Delta_S + \Delta_L)$
- Δ_D Duktilnost $\Delta_D \geq 1,3 - (\Delta_M + \Delta_S + \Delta_L)$
- Δ_S Ponašanje sistema konstrukcije (robusnost) $\Delta_S \geq 1,3 - (\Delta_M + \Delta_D + \Delta_L)$
- Δ_L Dejstva na konstrukciju $\Delta_L \geq 1,3 - (\Delta_M + \Delta_D + \Delta_S)$

Minimalni indeksi pouzdanosti za granično stanje nosivosti je $\beta=3,5$, a za garnično stanje upotrebljivosti je $\beta=1,7$. Smanjenja indeksa pouzdanosti dati su u tabeli 4.25.

tabela 4.25 Vrednosti samnjenja indeksa pouzdanosti

MONITORING	ΔM
Kontinuirana kontrola kritičnih elemenata	0,50
Godišnja kontrola kritičnih elemenata za koje se pojavljuje vidljivo oštećenje	0,25
Godišnja kontrola kritičnih elemenata za koje ne postoji vidljivo oštećenje	0,10
Provera svake 2 godine	0
DUKTILNOST	ΔD
Visoka duktilnost	0.5
Niska duktilnost	0
KARAKTERISTIKE SISTEMA – ROBUSNOST	ΔS
Velika robusnost, otkazivanje elemenata dovodi do promene sistema koji pokazuje redundantno ponašanje	0.5
Srednja robusnost, nekoliko elemenata mora otkazati da bi došlo do rušenja	0.25
Niska robusnost, otkaz jednog elementa odmah dovodi do rušenja	0
DEJSTVA	ΔL
Standardno opterećenje	0
Posebni transporti - retki događaji (npr. Jednom godišnje); maksimalno 20% iznad standardnog opterećenja	0.1
Retka i istovremena dejstva (posebni transporti + npr. Vetar ili sneg)	0,2

Kanadski standard CSA (eng. *Canadian standards*) predlaže model smanjenja indeksa pouzdanosti tokom vremena i uzima u obzir tip loma, ponašanje konstrukcijskog sistema (*redundancija*²⁵), pristupačnost pregleda i kategoriju rizika saobraćaja [144]

$$\beta(t) = 3,75 - (\Delta_C + \Delta_S + \Delta_I + \Delta_R) \geq 2,0 \quad (4.170)$$

odnosno:

$$\Delta_C + \Delta_S + \Delta_I + \Delta_R \leq 1,75 \quad (4.171)$$

U tabeli 4.26 dati su indeksi pouzdanosti za posotjeće konstrukcije prema CSA-S6-88.

²⁵Redundancija (lat. *redundant* –, višak funkcionalno istih elemenata u sistemu radi pojačanje sigurnosti

Tabela 4.26 Indeks pouzdanosti za postojeće konstrukcije prema CSA-S6-88

PONAŠANJE ELEMENATA Δ_c	0	<i>lom bez upozorenja</i>
	0,25	<i>lom sa slabim upozorenjem</i>
	0,50	<i>lom sa upozorenjem</i>
PONAŠANJE SISTEMA KONSTRUKCIJE Δ_s	0	<i>lom jednog elementa koji dovodi do rušenja</i>
	0,25	<i>lom jednog elementa ne dovodi do rušenja</i>
	0,50	<i>lokalni lom jednog elementa</i>
PRISTUPAČNOST PREGLEDA Δ_I	0,25	<i>element nije moguće pregledati</i>
	0,00	<i>redovno pregledavan element</i>
	0,25	<i>element dostupan vizuelnom pregledu</i>
KATEGORIJA RIZIKA Δ_R	0	<i>sve vrste tereta osim za prelaz teškog tereta</i>
	0,5	<i>za prelaz kontrolisanog teškog tereta</i>

Prema standardu CSA-S6-00 [145] sigurnost mostova se obezbeđuje različitim indeksima pouzdanosti koji su određeni na bazi tri kategorije podataka i to:

- ponašanja sistema S1 – S3,
- ponašanja elemenata konstrukcije E1 – E3 i
- nivoa inspekcije INSP1 – INSP3

U tabeli 4.27 prikazni su ciljni indeksi pouzdanosti prema CSA-S6-00.

Tabela 4.27 Ciljni indeks pouzdanosti β za evaluaciju postojećih mostova (za GSN za 1 god.)

Ponašanje sistema		Ponašanje elemenata	Nivo INSP1	Nivo INSP2	Nivo INSP3
S1	<i>rušenje sistema usled loma jednog elementa</i>	<i>E1</i>	4.00	3.75	3.75
		<i>E2</i>	3.75	3.50	3.25
		<i>E3</i>	3.50	3.25	3.00
S2	<i>lom jednog elementa koji ne dovodi do rušenja sistema</i>	<i>E1</i>	3.75	3.50	3.50
		<i>E2</i>	3.50	3.25	3.00
		<i>E3</i>	3.25	3.00	2.75
S3	<i>lom elementa dovodi do lokalnog loma sistema</i>	<i>E1</i>	3.50	3.25	3.25
		<i>E2</i>	3.25	3.00	2.75
		<i>E3</i>	3.00	2.75	2.50

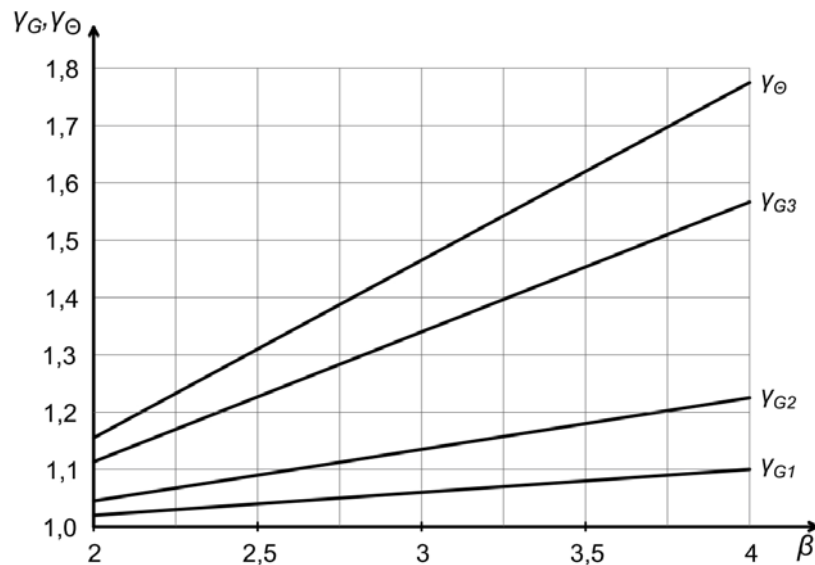
Ponašanje elementa konstrukcije ima tri gradacije:

- E1 - lom elementa sa malo ili bez upozorenja sa potpunim gubitkom nosivosti
- E2 - lom elementa sa malo ili bez upozorenja sa zadržavanjem nosivosti
- E3 - postepeni lom elementa sa upozorenjem o verovatnoći loma

Nivo pregleda odnosno inspekcije takođe ima tri gradacije:

- INPS1 - za nepristupačne elemente za pregled

- INPS2 - za pristupačne elemente za zadovoljavajući nivo pregleda
- INPS3 - za pristupačne elemente gde se za sve elemente dobija traženi podatak pregleda



Slika 4.34 Zavisnost parcijalnih koeficijenata sigurnosti za pokretno i stalno opterećenje i indeksa pouzdanosti

Na slici 4.34 data je zavisnost ciljne vrednosti indeksa pouzdanosti β i parcijalnih koeficijenata sigurnosti prema standardu CAN/CSA-S6-06 [146]. Vrednosti β su date od 2,5 do 4,0, sa linearnom zavisnosti promene:

- $Y_{G1} = 0,04 \beta + 0,95$: parcijalnih koeficijenata sigurnosti za sopstvenu težinu 1 (gredni nosači prefabrikovani ili liveni na licu mesta)
- $Y_{G2} = 0,08 \beta + 0,90$: parcijalnih koeficijenata sigurnosti za sopstvenu težinu 2 (pločasti nosači liveni na licu mesta)
- $Y_{G3} = 0,28 \beta + 0,65$: parcijalnih koeficijenata sigurnosti za težinu površinskih bitumenskih izolacija

Početna-ciljna vrednost indeksa pouzdanosti za novoprojektovane konstrukcije prema LRFD [36], za GSU iznosi $\beta=3,5$, za proračunski upotrební vek od 75 godina. Pouzdanost se odnosi na pojedinačne elemente a ne na noseći sistem kao i za prosečni dnevni saobraćaj kod mostova od 5000 teških kamiona ADTT (eng. *Average Daily Truck Traffic*). Prema studiji [147] najmanja vrednost indeksa pouzdanosti je $\beta=2,5$ što odgovara ranijim opterećenjima iz standarda AASHTO i odgovara konstrukciji u 5-oj godini upotrebe nakon čega je potrebno je izvršiti ponovno ocenjivanje stanja mosta.

4.7.7 ISTRAŽIVANJE DOMENA SIGURNOSTI POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA NA BAZI PRIKUPLJANJA PODATAKA

Fizički modeli karakterističnih i proračunskih vrednosti karakteristika materijala (čvrstoća-izotropnost-elastičnost-duktilnost) i dejstava na konstrukciju (stalna-povremena-incidentna dejstva) sadrže i druge fizičke parametre kao što su: masa, temperatura i vlažnost vazduha, geometrija i sl. Dejstva i stanje materijala u konstrukcijama se opisuju slučajnim promenljivim veličinama, koje su nosioci ulaznih i ciljnih informacija proračunskih stohastičkih modela. U zavisnosti od inženjerskih potreba kao što je procena i prognoza stanja konstrukcije u eksploataciji, fizičkim modelom karakterističnih i proračunskih vrednosti karakteristika materijala ili kratko "*model karakteristika materijala*" se može ispitivanjem odrediti potrebni podaci o vrsti, čvrstoći i zalihama trajnosti materijala [107]. Pri projektovanju se mogu usvojiti vrednosti karakteristika materijala na osnovu raspoloživih nominalnih podataka koji postoje za određene materijale. Kod postojećih konstrukcija se određuje stanje ugrađenih materijala i daje ocena stanja na osnovu prikupljenih podataka merenjem i ispitivanjem.

Osnova za definisanje osnovnog skupa podataka - populacije čini najčešće fizičko poreklo slučajnih promenljivih, kao što je priroda i poreklo slučajne veličine, prostorni i vremenski uslovi konstrukcije. Izbor populacije i odabir slučajnih promenljivih, odnosno izbor istraživačkih modela je u zavisnosti od očekivanih i izabranih ciljnih vrednost.

Modeli dejstava na konstrukcije mogu da se formiraju na osnovu statističkih podataka merenjem, pa prema potrebi koriste se odgovarajući stohastički parametri kao što su srednje i fraktilne vrednosti [106]. Formiranje modela često je vezano za određivanje inteziteta realnih dejstava na konstrukciju na određenom mestu i u određenom vremenskom periodu (min.1 godina), u zavisnosti od vrste dejstava, a u cilju kontrole ulaznih podataka o dejstvima. Ovo je veoma važno kod konstrukcija u eksploataciji kod procene stanja konstrukcija i određivanja preostalog upotrebnog veka konstrukcije. Praksa je pokazala da su usvojena projektantska dejstva često precenjena i da je merenjem moguće iskoristiti rezervu u dejstvima, kako bi se procenila realna sigurnost konstrukcije. Merenjem se često utvrđuju dejstva sredine kao što je vetar, sneg i saobraćajno opterećenje.

U projektovanju se model dejstava na konstrukciju određuje na osnovu geografskih, geoloških, seizmičkih i klimatskih karata ili na osnovu mikrolokacijskih ili drugih podataka. Uticaji nesigurnosti modela uzimaju se preko koeficijenata sigurnosti kod svakog proračunskog modela koji sadrži osnovnu slučajnu promenljivu za očekivanu nesigurnost modela. Nedovoljan broj statističkih podataka može da generiše nesigurnost modela, kao i nedovoljan broj relevantnih parametara kojim se opisuje problem. Najopštiji model kojim se opisivanje ponašanje konstrukcije je fizički model kao skup podataka slučajnih promenljivih sa konačnim brojem elemenata. Svaka slučajna promenljiva je definisana svojim modelom kao što su modeli dejstava, modeli materijala, mehanički i geometrijski modeli koji mogu biti potpuno nezavisni ili međusobno povezani i delom zavisni. To znači da mogu da se jave u skupu podataka fizičkog modela kao podskupovi, preseki ili unije skupova.

Sve slučajne promenljive kod konstrukcija objekata u eksploataciji se mogu posmatrati kao vremenski zavisne veličine $t > 0$ ili kod novoprojektovanih objekata, za $t = 0$, kao vremenski nezavisne veličine. Podaci o svojstvima materijala X se mogu analizirati i predstaviti kao skup slučajnih promenljivih ili samo u okviru fizičkog modela f , kao podskup, ili u okviru preseka sa skupom promenljivih modela geometrijskih podataka a_d , na osnovu kojih se određuje karakteristične vrednosti svojstva materijala X_k . Na osnovu modela nesigurnosti materijala θ_m može se formirati skup podataka nesigurnosti, koji se može predstaviti kao podskup podataka svojstva materijala, na osnovu kojih se određuje parcijalni koeficijent sigurnosti za dejstva γ_{mi} koeficijent η i formira podskup proračunskih podataka za svojstva materijala X_d .

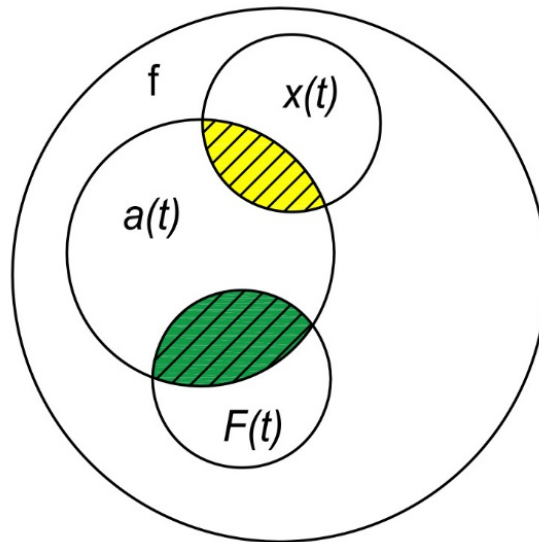
Vrednosti podataka nosivosti konstrukcije R dobijaju se u okviru preseka skupova mehaničkog modela i modela geometrijskih podataka. Model nesigurnosti geometrijskih podataka θ_{ad} , se uvodi preko proračunske vrednosti a_d , a model nesigurnosti za nosivost konstrukcije θ_{Rd} , preko proračunske vrednosti parcijalnog koeficijenta sigurnosti γ_{Rd} .

Proračunske vrednosti nosivosti konstrukcije R_d se dobijaju na osnovu vrednosti R i koeficijenata γ_m , η , γ_{Rd} i a_d . Baza podataka o dejstvima F se mogu analizirati i predstaviti kao skup slučajnih promenljivih ili samo u okviru fizičkog modela kao podskup f ili u preseku skupa podataka mehaničkog modela m (slika 4.36). Parametri podataka dejstava F su srednje i fraktilne vrednosti, na osnovu kojih se određuje karakteristična vrednost dejstva F_k značajna za dalji proračun konstrukcije. Sve nesavršenosti odnosno nesigurnosti u modelu dejstava sadržane su posebnom modelu nesigurnosti θ_F . Na osnovu ovog modela može se formirati skup podataka nesigurnosti, koji se može predstaviti kao podskup podataka dejstava. Ciljna vrednost modela nesigurnosti je parcijalni koeficijent sigurnosti za dejstva γ_F , na osnovu koga se određuje podskup proračunskih podataka za dejstva F_d .

Uticaji od dejstava E dobijaju se u okviru mehaničkog modela i proračunskih vrednosti dejstava na konstrukciju, uzimajući u obzir model nesigurnosti nosećeg sistema θ_{Ed} izražen preko parcijalnog koeficijenta sigurnosti γ_{Ed} i model nesigurnosti geometrijskih podataka θ_{ad} , preko proračunske vrednosti a_d . Proračunske vrednosti uticaja E_d usled dejstava se dobijaju na osnovu vrednosti E i parcijalnih koeficijenata γ_F , γ_{Ed} i a_d . Skup podataka uticaja E_d usled dejstava predstavljaju presek sa skupom podataka slučajnih promenljivih mehaničkog modela m i modela geometrijskih podataka a_d . Model kojim se treba dokazati sigurnost konstrukcije treba da sadrži preseke skupova slučajnih promenljivih i to proračunske vrednosti uticaja usled dejstava E_d i proračunske vrednosti nosivosti R_d , radi njihovog upoređenja i određivanja domena sigurnosti konstrukcija.

Slučajna promenljiva u modelu dejstava $F(t)$ opisuje osobine dejstava kao što je vresta dejstva, poreklo, pravac i smer delovanja, intezitet, trajanje i učestanost dejstva. Slučajna promenljiva u modelu svojstva materijala $X(t)$ opisuje osobine materijala u pogledu nosivosti ili krutosti kao i konstitutivne relacije napona i deformacija. Nosivost materijala se može definisati za svojstvo izotropnosti, elastičnosti i duktilnosti na osnovu iskorišćenja napona do dostizanja odgovarajuće čvrstoće materijala ili na osnovu iskorišćenja deformacija odnosno krutosti. Čvrstoće materijala i moduli elastičnosti su u stohastičkom modelu kumulativne slučajne promenljive.

Slučajna promenljiva u geometrijskom modelu $a(t)$, je neizbežna kao podatak u fizičkom modelu jer se opisuje geometrija u problemu određivanja i dejstava i svojstva materijala, i opisuje se konstrukcija kao linijska, površinska ili zapreminska sa nominalnim geometrijskim vrednostima. Stvarna konstrukcija sadrži geometrijske imperfekcije koje odstupaju od nominalnih vrednosti, i kod problema proračuna konstrukcije po teoriji drugog reda moraju se uzeti u obzir.



Slika 4.35 Domen podataka nosivosti osnovnih slučajnih promenljivih $X(t)$, $F(t)$ i $a(t)$

Na slici 4.35 prikazan je domen podataka nosivosti kao presek skupova osnovnih slučajnih promenljivih $X(t)$, $F(t)$ i modela $a(t)$ koji se definišu kao podskup podataka fizičkog modela f . U fizičkom modelu domen slučajnih promenljivih $F(t)$, $a(t)$ i $X(t)$ su određeni podacima u podskupovima

$$X(t) \subset f, a(t) \subset f, F(t) \subset f \quad (4.172)$$

odnosno u presecima podskupova:

$$(X(t) \cap a(t)) \subset f, (F(t) \cap a(t)) \subset f \quad (4.173)$$

pri čemu je presek $X(t) \cap F(t) = \emptyset$ prazan skup.

Slučajna promenljiva u mehaničkom modelu opisuje noseći sistem konstrukcije koji može biti statički sistem, dinamički sistem i sistem zamora konstrukcije. Mehanički model sadrži geometrijske veličine, dejstva i materijale. Mehanički modeli proračuna konstrukcije se najčešće formiraju u domenu elastičnosti ili u domenu neelastičnosti, odnosno domenu plastičnosti ili elasto-plastičnosti. Sam model zavisi od osobina dejstava i materijala, od njegove duktilnosti, odnosno od svojstva krtoq loma. Mehaničkim modelom se opisuje ponašanje konstrukcije preko analize naprezanja i deformacija. Mehanički model se definiše na osnovu usvojene dispozicije rešenja konstrukcije, koji sadrži relevantne geometrijske podatke konstrukcije i podatke o poprečnim presecima nosećih elemenata konstrukcije, kao primenjene materijale sa određenim svojstvima.

Mehaničkim modelom se može oderditi nosivost konstrukcije i bez analize dejstava na konstrukciju. Mehanički model nosivosti m se obrazuje naročito kod ispitivanja konstrukcija gde se koriste mereni geometrijski podaci konstrukcije i merene vrednosti

svojstvima materijala i na osnovu tih vrednosti je moguće odrediti nosivost elemenata ili nosivost cele konstrukcije za određenu vrstu, pravac i smer dejstva. Slučajne promenljive u mehaničkom modelu čine podskup fizičkog modela, odnosno:

$$m \subset f \quad (4.174)$$

Ako su preseči podataka slučajnih promenljivih $R(t)$, $a(t)$ i podatak modela m , podskupovi fizičkog modela f , onda se dobija domen podataka mehaničkog modela nosivosti što se može predstaviti izrazom:

$$m \cap (R(t) \cap a(t)), \quad (4.175)$$

odnosno:

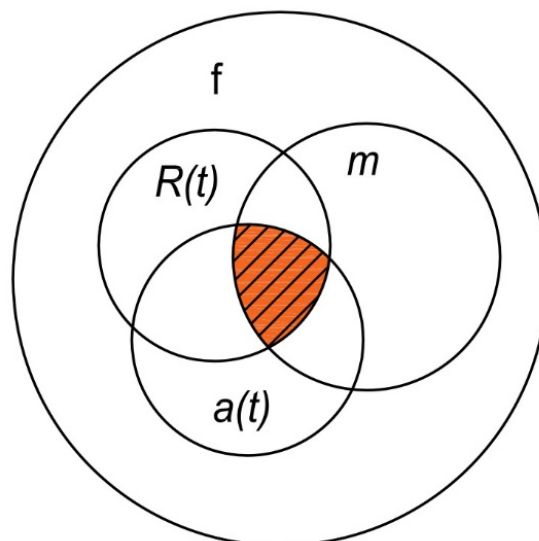
$$(m \cap (R(t) \cap a(t))) \subset f \quad (4.176)$$

Za svaki noseći element je potrebno odrediti tri podatka nosivosti (R_1, R_2 i R_3) s obzirom na iskorišćenje normalnih i smičućih napona odnosno dostizanje vrednosti granica čvrstoće materijala i deformacija. Eksplicitno izražena nosivost elementa R_e će biti:

$$R_e = \min \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (4.177)$$

Vrednostima minimalne nosivosti R_e odgovaraju maksimalne vrednosti dejstava ili uticaja usled dejstava, za određenu vrstu, pravac i smer dejstava, kao mera inteziteta dejstava koju može da primi konstrukcija.

Mehanički model nosivosti se koristi kod prostijih statičkih sistema za komparaciju nosivosti i proračunskih dejstava za brzu procenu nosivosti. Naročito je pogodan za konstrukcije sistema rešetkastih nosača i prostih greda, gde se merenjem podataka dimenzija preseka i svojstva materijala može brzo odrediti nosivost nosećeg elementa. Kod proračuna složenih sistema i kod primene teorije drugog reda, logički se nameće zaključak da je neophodan drugačiji prilaz ovom problemu, koji podrazumeva analizu i kontrolu uticaja usled dejstava i deformacija.



Slika 4.36 Domen podataka nosivosti konstrukcije osnovnih slučajnih promenljivih $R(t)$, $a(t)$ i m

Na slici 4.36 prikazan je domen podataka nosivosti kao presek skupova osnovnih slučajnih promenljivih $R(t)$, $a(t)$ i m koji se definišu kao podskup podataka fizičkog modela f .

U inženjerskoj praksi, za analizu nosivosti konstrukcije, najčešće se razmatra odnos dva osnovna modela i to: model dejstva $E(t)$ i model nosivost konstrukcije $R(t)$. Međusobni odnos osnovnih slučajnih promenljivih tih modela pokazuju granično stanje sistema, kao razgraničenje domena sigurnosti i domena nesigurnosti sistema. Ostale slučajne promenljive kao što su geometrijski podaci $a(t)$ i nesigurnost modela $\theta(t)$, delom su sadržani u presecima skupova podataka modela $E(t)$ i $R(t)$. Slučajna promenljiva u modelu nesigurnosti kao osnovna promenljiva nesigurnosti $\theta(t)$ prati sve probabilističke analize konstrukcija i treba je uzeti u konceptu proračuna konstrukcija. Idealizacijom modela konstrukcije moguća su ostupanja modela od ponašanja realne konstrukcije. Često se događa da usvojeni model konstrukcije, samo za neke vrednosti ili određen domen promenljivih, sasvim dobro opisuje ponašanje realne konstrukcije, dok van tih vrednosti ili tog domena promenljivih, model pokazuje pogrešne rezultate. Greške u rezultatima mogu biti izazvane i nedovoljnim brojem statističkih podataka, kod kojih su izvedeni zaključci na slučajnim rezultatima. Model nesigurnosti slučajnih promenljivih je pratilac svakog modela slučajne promenljive. Kada se podaci sa ograničenim brojem uzoraka, koji prate slučajne promenljive u fizičkom modelu, transformišu u statističke parametre kao što su srednja vrednost uzorka i funkcije raspodele, onda se uvodi statistička nesigurnost [102]. Prava prirodna promenljivost (fizička nesigurnost) je nepoznata i može biti procenjena statističkim metodama sa ograničenim brojem podataka odnosno uzoraka [95]. Veliki broj uzoraka može smanjiti statističku nesigurnost, ali je ne može eliminisati.

Granice skupova podataka osnovnih slučajnih promenljivih u različitim modelima se posmatraju u okviru domena podataka fizičkog modela. Domen podataka osnovnih slučajnih promenljivih mehaničkog modela se definiše kao podskup podataka fizičkog modela, odnosno $m \subset f$, a podaci ostalih modela $E(t)$, $R(t)$ i $a(t)$ u okviru njihovih preseka i preseka sa podacima mehaničkog modela definišu domen slučajnih promenljivih (slika 4.37), tako da važi :

$$m \cap (E(t) \cap (R(t) \cap a(t))) \quad (4.167)$$

odnosno

$$(m \cap (E(t) \cap R(t) \cap a(t))) \subset f \quad (4.178)$$

Model dejstava $E(t)$ i nosivosti konstrukcije $R(t)$, u praksi je neodvojiv od i pratećih geometrijskih podataka $a(t)$ i podataka modela nesigurnosti $\theta(t)$. Geometrijski model može biti deo fizičkog modela ili deo mehaničkog modela van preseka skupova podataka modela $E(t)$ i $R(t)$, i tada važi:

$$(m \cap a(t)) \subset f \quad (4.179)$$

Model nesigurnosti može biti razmatran u okviru fizičkog modela:

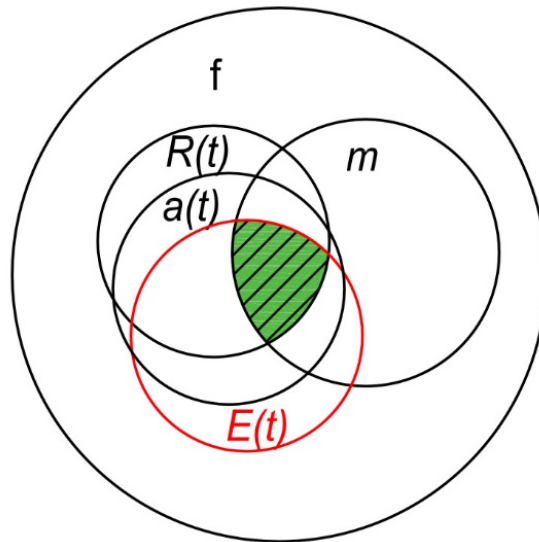
$$\theta(t) \subset f \quad (4.180)$$

i u okviru mehaničkog modela van podataka modela $E(t)$, $R(t)$, a kao:

$$m \cap \theta(t) \subset f \quad (4.181)$$

ili kao presek skupova podataka ostalih modela osnovnih promenljivih.

Na slici 4.37 domen sigurnosti prikazan je kao presek skupova osnovnih slučajnih promenljivih $F(t)$, $R(t)$, $a(t)$ i m koji se definišu kao podskup podataka fizičkog modela f .



Slika 4.37 Domen podataka sigurnosti konstrukcije osnovnih slučajnih promenljivih $F(t)$, $R(t)$, $a(t)$ i m

Ovaj domen sadrži podatke o stanju materijala, dejstava, geometrije i sistema konstrukcije, a podaci prikupljeni kroz vreme eksploatacije se mogu odrediti na osnovu propagacije oštećenja (poglavlje V).

4.7.8 PRORAČUN POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA PREMA EVROKODU

Sigurnost postojećih konstrukcija u određenom vremenskom trenutku eksploatacije se može odrediti semi-probabilističkim konceptom sigurnosti konstrukcija, na kome je zasnovan i sistem evrokodova, američka i ruska regulativa. Na bazi podataka koja se formira na osnovu periodične ocene stanja konstrukcije i merenjem na licu mesta, može se odrediti skup slučajnih promenljivih koje određuju domen nosivosti konstrukcije i međusobnu povezanost pojedinih stohastičkih modela. U odnosu na projektovano stanje, ovim se vrši korekcija (*apdejtovanje*) modela za dejstva, svojstva materijala, geometrije, modela nesigurnosti i korekcija parcijalnih koeficijenata sigurnosti.

Koncept sigurnosti postojećih konstrukcija je moguće dokazati prema evrokodovima na osnovu korigovanih stohastičkih modela za dejstva i nosivosti konstrukcije. Za određeni konstrukcijski sistem, na osnovu vrednosti merenih podataka za dejstva i svojstva materijala, određuju se uticaji od dejstava $E(t)$, kao i nosivost konstrukcije $R(t)$, kao funkcije vremena, gde se na osnovu odgovarajućih modela nesigurnosti i parcijalnih koeficijenata sigurnosti određuju proračunske vrednosti uticaja od dejstava $E_d(t)$, kao i proračunske vrednosti nosivosti konstrukcije $R_d(t)$. Parcijalni koeficijenti sigurnosti novoprojektovanih konstrukcija objekata prema evrokodovima su određeni

probabilističkim metodama na osnovu niza faktora nesigurnosti, koji u realnosti tokom eksploatacije konstrukcije mogu biti sasvim drugačiji.

Semi-probabilistički koncept sigurnosti konstrukcija, je namenjen projektovanju novih objekata, sa koeficijentima sigurnosti i dejstvima koji su po pravilu veći od onih koja su korišćeni u projektovanju u prošlosti. Ovo je posledica primene različitih koncepata proračuna i različitih proračunskih modela tokom vremena, kao i povećanje frekvencije saobraćaja i osovinskog saobraćajnog opterećenja kod mostova. Ako se želi da konstrukcija u eksploataciji, koja je projektovana u prošlosti, zadrži indeks pouzdanosti koji je sadržan u evrokodovima, potrebno je proučiti stvarne parcijalne koeficijente sigurnosti, kao i modele nesigurnosti merenjima na postojećoj realnoj konstrukciji.

U praksi se često događa da stvarni naponi odnosno uticaji od dejstava u realnim konstrukcijama za stvarna opterećenja, budu neiskorišćeni, što kod konstrukcija sa oštećenjima pruža dodatnu sigurnost, odnosno pruža mogućnost produženju proračunskog preostalog upotrebnog veka konstrukcije. Ako je stanje konstrukcije takvo da je nužna intervencija sa promenom nosećeg sistema konstrukcije u cilju pojačanja, onda se teži iscrpljenju nosivosti pojedinih nedovoljno opterećenih elemenata. Mere intervencije mogu biti u vidu kontinuiranja nosača, pojačanja elemenata konstrukcije, dodavanja novih elemenata kao što su stubovi, oslonci i sl.

Između proračunskih vrednosti uticaja usled dejstava novoprojektovane konstrukcije E_d , i računске vrednosti uticaja usled dejstava postojeće konstrukcije $E_d(t)$, mogu se javiti sledeće proračunske situacije:

- $E_d = E_d(t)$ *uticaji usled dejstva na postojeću konstrukciju su jednaki uticajima usled dejstva na projektovanu konstrukciju => u proteklom vremenu se nisu desile nikakve promene*
- $E_d < E_d(t)$ *uticaji usled dejstva na postojeću konstrukciju su veći od uticaja usled dejstva na projektovanu konstrukciju => potrebne su hitne mere provere sigurnosti konstrukcije*
- $E_d > E_d(t)$ *uticaji usled dejstva na postojeću konstrukciju su manji od uticaja usled dejstva na projektovanu konstrukciju => sigurnost postojeće konstrukcije, sa aspekta dejstava je veće od sigurnosti projektovane konstrukcije*

Stanje karakteristika materijala i stanje nosivosti konstrukcije postojećih objekata se mogu utvrditi inspekcijским pregledom, monitoringom i ispitivanjem. Vizuelnim pregledom može se utvrditi kvalitativno stanje konstrukcije na osnovu utisaka ocenjivača. Ispitivanjem materijala čekićem ili kernovanjem mogu se odrediti karakteristike materijala i kvantitativno izraziti.

Pokazatelji ispitivanja materijala mogu da utiču na korekciju (*apdejtovanje*) modela nesigurnosti za materijale u vremenskom trenutku t , $\theta_m(t)$, odnosno na redukciju koeficijenta sigurnosti $\gamma_m(t)$ i $\eta(t)$. Na nivou nosivosti konstrukcije, pravo stanje se može utvrditi ispitivanjem konstrukcije na osnovu kojih se koriguje računski parcijalni koeficijent sigurnosti $\gamma_m(t)$ i geometrijski proračunski parameter $a_d(t)$. Upoređenjem apdejtovane vrednosti za nosivost konstrukcije u vremenu $t > 0$ sa oznakom $R_d(t)$ sa proračunskom nosivošću i novoprojektovane konstrukcije $R_d(t)$, za $t=0$ moguće su sledeće situacije:

- $R_d = R_d(t) = R_d(0)$ *apdejtovana nosivost postojeće konstrukcije jednaka sa proračunskom nosivošću projektovane konstrukcije => nema potrebe za sanacijama i popravkama*
- $R_d > R_d(t)$ *apdejtovana nosivost postojeće konstrukcije je manja od proračunske nosivosti projektovane konstrukcije => potrebne su hitne mere popravke ili ojačanja konstrukcije*
- $R_d < R_d(t)$ *apdejtovana nosivost postojeće konstrukcije je veća od proračunske nosivosti projektovane konstrukcije => nema potrebe za sanacijama i popravkama*

Proračunske vrednosti za dejstva i nosivost konstrukcije se mogu predstaviti u funkciji vremena u zavisnosti od vremenski zavisnih slučajnih promenljivih:

$$E_d(t) = E[F_{d1}(t), F_{d2}(t), \dots, a_{d1}(t), a_{d2}(t) \dots \theta_{d1}(t), \theta_{d2}(t)] \quad (4.182)$$

$$R_d(t) = R[X_{d1}(t), X_{d2}(t), \dots, a_{d1}(t), a_{d2}(t) \dots \theta_{d1}(t), \theta_{d2}(t)] \quad (4.182a)$$

Uticaj od dejstva na konstrukciju $E(t)$ mora biti uvek veći od odgovarajućeg proračunskog dejstva E_d , a nosivost konstrukcije ili proizvoda R_d mora biti uvek manja od odgovarajuće proračunske vrednosti, odnosno:

$$E(t) \geq E_d(t) \quad (4.183)$$

$$R(t) \leq R_d(t) \quad (4.184)$$

4.7.9 PRORAČUN POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA PREMA OCENI STANJA - AASHTO

Prema američkim standardima AASHTO [148] predložena je korekcija za indeks pouzdanosti dobijen na osnovu istraživanja velikog broja mostova u Americi. Procena dejstava na konstrukciju se bazira na određivanju realnog opterećenja koje dejstvuje na konstrukciju tokom realne upotrebe. Ocenjivanjem se određuje saobraćajno opterećenje teškim vozilima i ponašanje mosta sa aspekta nosivosti u sadašnjem trenutku.

Da bi se došlo do podataka procene stanja mosta neophodni su inspekcijski pregledi. Cilj je stvaranje baze podataka mosta u koju se upisuju sve promene na mostu nakon pregleda ili intervencija, gde spadaju opisi oštećenja i opisi intervencija u smislu smanjenja ili povećanja sopstvene težine mosta, opis saobraćajnog opterećenja i promena kategorije saobraćajnice i promena standarda za opterećenje mosta.

Ocene stanja konstrukcije se određuje na osnovu rejtinga RF korišćenjem metode faktora opterećenja i otpornosti LRFR (eng. *Load and Resistance Factor Rating*) [147] prema izrazu:

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) + / - (\gamma_P)(P)}{(\gamma_L)LL(1+IM)} \quad (4.185)$$

gde je:

- C - nosivost konstrukcije data izrazom $C = \Phi_C \cdot \Phi_S \cdot \Phi \cdot R_n$. Određuje na osnovu proračunske vrednosti nosivosti konstrukcije R_n redukovane koeficijentima: Φ_C - koeficijent stanja konstrukcije, Φ_S - koeficijent sistema konstrukcije, Φ - koeficijent nosivosti konstrukcije.

- DC - uticaj od sopstvene težine konstrukcije
- DW - uticaj od stalne težine nošenih elemenata i opreme
- P - uticaj od ostalih stalnih dejstava (znak + je za povoljnodelovanje stalnog dejstva)
- LL - uticaj od pokretnog opterećenja
- IM- dinamički faktor
- γ - parcijalni koeficijenti sigurnosti za pripadajuće uticaje (indeksi nose oznaku uticaja)

Rejting RF pokazuje (kolika je rezerva u konstrukciji) stanje nosivosti konstrukcije kao odnos uticaja od stalnog tereta i realnog pokretnog opterećenja. U osnovi rejting RF se dobija iz uslova jednakosti:

$$RF \times \boxed{\text{uticaji od, proračunskog pokretnog opterećenja}} = \boxed{\text{proračunska nosivost konstrukcije}} - \boxed{\text{ukupni uticaji od sopstvene težine konstrukcije}}$$

Granično stanje konstrukcije je za $RF=1$. Ako je $RF>1$ to ukazuje na dobro stanje konstrukcije, a ako je $RF<1$ ukazuje na loše stanje konstrukcije.

Tabela 4.29 Model stanja konstrukcije (AASHTO-LRFR)

code	STANJE	F_c
N	NIJE PRIMENLJIVO (<i>Not Applicable</i>)	-
9	ODLIČNO (<i>Excellent</i>)	1
8	VRLO DOBRO (<i>Very Good</i>)	1
7	DOBRO (<i>Good</i>)	0,95
6	DOVOLJNO (<i>Satisfactory</i>)	0,85
5	PRIKLADNO (<i>Fair</i>)	0,75
4	LOŠE (<i>Poor</i>)	0,70
3	OZBILJNO (<i>Serious</i>)	0,70
2	KRITIČNO (<i>Critical</i>)	0,70
1	BLISKO RUŠENJU (<i>Imminent Failure</i>)	0,70
0	STANJE LOMA -most zatvoren (<i>Failed</i>)	0

U tabeli 4.29 prikazan je model stanja konstrukcija prema američkom standardu AASHTO [149]. Model stanja konstrukcije definiše se ocenama 0-9-N, gde je 9 najbolja ocen stanja, a 0 je stanje kolapsa pri kome objekat nije u funkciji. Ocena N se koristi samo za neke objekte, i nije uvek sadržana u ocenjivanju. Ocenama 5-9 označena su stanja objekta u kojima on obavlja funkciju kojoj je namenjen. Ocenama 0-4 označena su stanja u kojima objekat nije u funkciji ili zahteva hitnu intervenciju i ojačanje konstrukcije. Prikazani model omogućuje da se pregledom i ocenom konstrukcije ili ispitivanjem, može odrediti koeficijent stanja konstrukcije Φ_c , odnosno sračunati nosivost konstrukcije [150]. Faktori stanja konstrukcije Φ_c prikazani su u tabeli 4.30.

Tabela 4.30 Faktor stanja Φ_c (AASHTO-LRFR)

REJTING STANJA KONSTRUKCIJE		Φ_c
(1) VRLO DOBRO ILI ODLIČNO	≥ 8	1,0
(2) DOBRO	= 7	0,95
(3) DOVOLJNO	= 6	0,85
(4) PRIKLADNO	= 5	0,75
(5) LOŠE	≤ 4	0,70

Ako rejting mostova pokazuje rezervu konstrukcija pri normalnom eksploatacionom opterećenju onda je to *inventarski rejting*; ako rejting pokazuje koliko maksimalno pokretno opterećenje koje most može da primi, onda je to *operacioni rejting*.

4.8 OŠTEĆENJA U MODELIMA DETERIORACIJE I OCENA STANJA KONSTRUKCIJA

Oštećenja na konstrukcijama nastaju tokom tehničkog upotrebnoog veka. Veličina oštećenja utiče na stanje konstrukcije. Nivo oštećenja treba da bude takav da ne ugrožava sigurnost objekta, pre svega da ne ugrozi održivost u delu socio-kulture, a u vezi sa održanjem komfora korisnika, funkcionalnosti objekta, sigurnosti saobraćaja i sigurnosti konstrukcije, trajnosti i postojanosti materijala konstrukcija. Kontrolom i održavanjem objekata tokom vremena nastoji se da se ispune zahtevi održivosti [33]. Još u ranoj fazi projektovanja objekta, potrebno je doneti niz važnih odluka u cilju održivosti objekta tokom upotrebe objekta, a to su: određivanje proračunskog upotrebnoog veka objekta, izbor materijala sa aspekta trajnosti i postojanosti elemenata konstrukcije, primena uslova izvođenja i uklanjanja objekta nakon završetka upotrebnoog veka, način održavanja, primena preventivnih konstrukcijskih mera za sprečavanje negativnih posledica dejstava iz okoline.

Pojave oštećenja konstrukcija, sa ekonomskog aspekta, su veoma važan faktor u analizi ukupnih troškova objekta. Troškovi održavanja, popravke i sanacije nosećih elemenata, mogu tokom upotrebnoog veka, da premaše njihovu investicionu vrednost. Osim investicione vrednosti objekta, značajnu ulogu u ukupnim troškovima ima održavanje, rušenje sa odlaganjem otpada i reciklaža [33]. Tokom vremena objekat iako se redovno održava, propada usled nepovratnog procesa starenja materijala čime mu se smanjuju svojstva nosivosti, upotrebljivosti, krutosti i smanjuje se preostali upotrebni vek sve do granice ugroženosti sigurnosti nosećeg sistema.

Mostovi su najosetljiviji objekti u analizi oštećenja, jer su direktno izloženi dejstvima sredine i saobraćajnim dejstvima. Odluka o revitalizaciji mosta se donosi na osnovu procene stanja mosta i na osnovu zahteva koji se odnose na promenu kapaciteta saobraćaja i funkcije objekta. Oštećenja kod mostova mogu da imaju negativne posledice po životnu sredinu zbog prevelike buke i vibracija usled saobraćaja, usled udara i kočenja vozila, zbog povećane zagađenosti vazduha zbog izduvnih gasova usled zastoja u

saobraćaju, zbog raspršivanja saobraćajnog otpada izazvan otpadanjem delova vozila, guma, prevoznog tereta, i slično.

Propadanje (deterioracija) materijala elemenata objekta tokom vremena, kao kontinualni nepovrati vremenski proces gubljenja ranijih svojstava materijala, ima najveći značaj za sigurnost i funkcionalnost objekta. U posmatranom trenutku na vremenskoj skali upotrebnog vremena, propadanje konstrukcije se može definisati opšta deterioracija kao integrisani sistem svih oštećenja. Matematički model kojim se opisuje stanje objekta u eksploataciji je, kao proces propadanja objekta, definisan je stalnom opadajućom funkcijom vremena od početka korišćenja objekta, kad konstrukcija ima punu nosivost do kraja upotrebnog veka kad konstrukcija ima najmanju i nedovoljnu nosivost. Tokom vremena opadaju karakteristike materijala, pa samim tim opada i stepen nosivosti i upotrebljivosti, sve u zavisnosti od trajnosti materijala. Stanje objekta tokom upotrebe se pogoršava usled udruženih faktora starenja materijala i mehanizama poremećaja.

Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ (eng. *Resistance Degradation Function*) je vremenski zavisna vrednost koja nastaje kao posledica deterioracije i može se modelirati na osnovu početne (inventarske) vrednosti nosivosti neoštećene konstrukcije R_0 i funkcije (preostale) nosivosti $g(t)$ (eng. *Residual Resistance Function*) [151]. Svakoј funkciji degradacije nosivosti konstrukcije odgovara *specifičan* model degradacionog mehanizma konstrukcije, na osnovu izraza:

$$R(t) = R_0 \cdot g(t) \quad (4.186)$$

Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije je stalno opadajuća funkcija koja u trenutku $t=0$ ima svoju početnu i najveću vrednost R_0 gde je $R(0)=R_0$, a na kraju upotrebnog veka u vremenu $t=T$, ima svoju krajnju i najmanju vrednost $R_0 g(T)$. Tokom upotrebnog veka funkcija ima vrednost u intervalu:

$$R_0 \cdot g(T) \leq R_0 \cdot g(t) \leq R_0 \quad (4.187)$$

Funkcija preostale nosivosti konstrukcije bazirana je na određivanju parametara na osnovu podataka o brzini procesa propadanja i na vremenu trajanja konstrukcije

$$g(t) = 1 - E(X(t)) \quad (4.188)$$

Stopa oštećenja konstrukcije $E(X(t))$ je vremenski process, koji se definiše na osnovu praćenja procesa degradacije materijala usled različitih dejstava. Na bazi stohastičkog modela primenom modela slučajne stope oštećenja, gde je vreme slučajna promenljiva, merenjem parova vrednosti modela oštećenja konstrukcije $X(t)$ i funkcije vremena $f(t)$, matematičkom aproksimacijom se određuje funkcija vremena a samim tim se dobija koeficijent stope oštećenja $A_k = X(t)/f(t)$. Najčešće primenjavani aproksimacija je metod najmanjih kvadrata ili eksponencijalnom funkcijom. Stopa oštećenja konstrukcije se najčešće izražava eksponencijalnom funkcijom, i koristi se u istraživanjima u ovom radu u obliku:

$$E(X(t)) = A_k t^a \quad (4.189)$$

gde je:

- $X(t)$ - model oštećenja
- A_k - koeficijent stope oštećenja usled k -tog dejstva ($k=1,2,3..$)
- t - tekuće vreme od trenutka $t>0$

- *a*-eksponent zavistan od tempa procesa oštećenja

Vrednost A_k se odeđuje na osnovu kvantitativno izražene veličine oštećenja konstrukcije usled k -tog dejstva tokom vremena i relevantan je podatak za određivanje upotrebnog veka konstrukcije. U zavisnosti od uslova izloženosti konstrukcije dejstvu sredine i od vrste dejstava [152], na osnovu izraza (4.189) i (4.190), mogu se formirati različiti modeli degradacionih mehanizama, odnosno različite funkcije preostale nosivosti.

Funkcije preostale nosivosti $g(t)$ usled permanentne korozije je proces gde se smatra da stepen smanjenja nosivosti konstrukcije opada proporcionalno vremenu upotrebe, za vrednosti $k=1$, $a=1$, iznosi :

$$g(t) = 1 - a_1 \cdot t \quad (4.190)$$

gde je a_1 - koeficijent stope oštećenja permanentnog procesa degradacije

Funkcije preostale nosivosti usled difuzionog dejstva, gde je stepen degradacije nosivosti konstrukcije ubrzani proces propadanja izazvan hemijskim agresivnim dejstvima, za vrednosti $k=2$, $a=0,5$ iznosi:

$$g(t) = 1 - a_2 \cdot \sqrt{t} \quad (4.191)$$

gde je a_2 - koeficijent stope oštećenja ubranog -difuznog procesa degradacije.

Funkcije preostale nosivosti usled difuznog dejstva, gde stepen degradacije nosivosti konstrukcije predstavlja usporeni proces propadanja, za vrednosti $k=3$ i $a=2$ iznosi :

$$g(t) = 1 - a_3 \cdot t^2 \quad (4.192)$$

gde je a_3 - koeficijent stope oštećenja usled sulfatnog dejstva.

Na osnovu funkcije modela mehanizma oštećenja [153] izazvana saobraćajem može se definisati funkcija preostale nosivosti konstrukcije preko parametara k_1 i k_2 :

$$g(t) = 1 - k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2 \quad (4.193)$$

gde su: k_1 i k_2 - slučajne promenljive, kojim se opisuje stepen oštećenja konstrukcije

Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije s obzirom na promenu nosivosti tokom vremenamože se predstaviti krivom četvrtog reda:

$$R(t) = R_0 - a_m \cdot t^4 \quad (4.194)$$

gde je a_m – koeficijent stope oštećenja konstrukcije

Funkcija smanjenja odnosno degradacije nosivosti mostovske konstrukcije predstavljena je eksponencijalnom funkcijom [154]:

$$R(t) = R_0 (0,98 - g(t)) \quad (4.195)$$

pričemu je funkcija preostale nosivosti:

$$g(t) = a_1 a_2 (0,01 e^{0,04t} + 0,001t) \quad (4.196)$$

gde su a_1 i a_2 konstante.

Praćenjem stanja konstrukcija i prikupljanjem podataka se mogu odrediti parametri preostale nosivosti konstrukcije u određenim vremenskim intervalima. Na osnovu formirane baze merenih podataka o stanju konstrukcije u vremenskim intervalima, može se numerički odrediti deterministička ili probabilistička regresiona kriva linija na bazi stohastičkih prenosnih matrica za određivanje preostale nosivosti konstrukcije.

Funkcija modela degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ prema izrazu (4.187) u trenutku $t=0$ jednaka je početnoj (inventarskoj) vrednosti nosivosti konstrukcije bez oštećenja $R(t)=R(0)=R_0$. Na osnovu izraza (4.187) i (4.169) uzimajući u obzir izraz (4.190) sledi:

$$R(t) = R_0 g(t) = R_0 (1 - A_k t^a) \quad (4.197)$$

pri čemu je $g(t)$ funkcija vremena predstavljena izrazom:

$$g(t) = 1 - A_k t^a = 1 - (F_k / T^a) t^a \quad (4.197a)$$

koeficijent A_k je vrednost koja se dobija iz uslova da degradacija konstrukcije dostigne kritičnu vrednost F_k usled koje konstrukcija više ne ispunjava zahteve u pogledu nosivosti. A_k se dobija iz odnosa kritičnog oštećenja F_k i upotrebnog veka T , pri čemu je $A_k = F_k / T^a = \text{const.}$ Vrednosti F_k i A_k na osnovu izraza (4.190) i (4.197) određuju vrednost donje granice funkcije preostale nosivosti

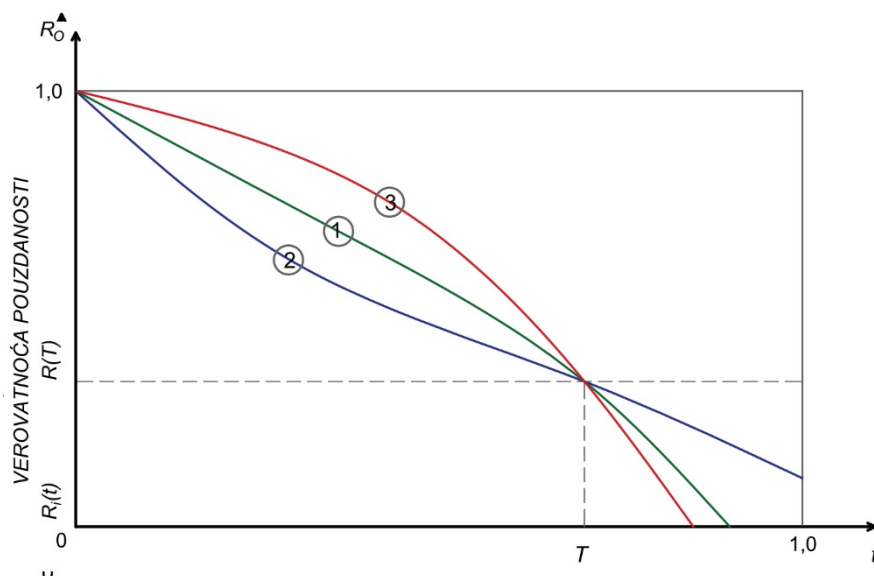
$$g(T) = 1 - F_k = \text{const.} \quad (4.197b)$$

odakle sledi da je:

$$g(T) + F_k = 1 \quad (4.197c)$$

Na osnovu izraza (4.197) i (4.197b) sledi da je donja granica nosivosti konstrukcije:

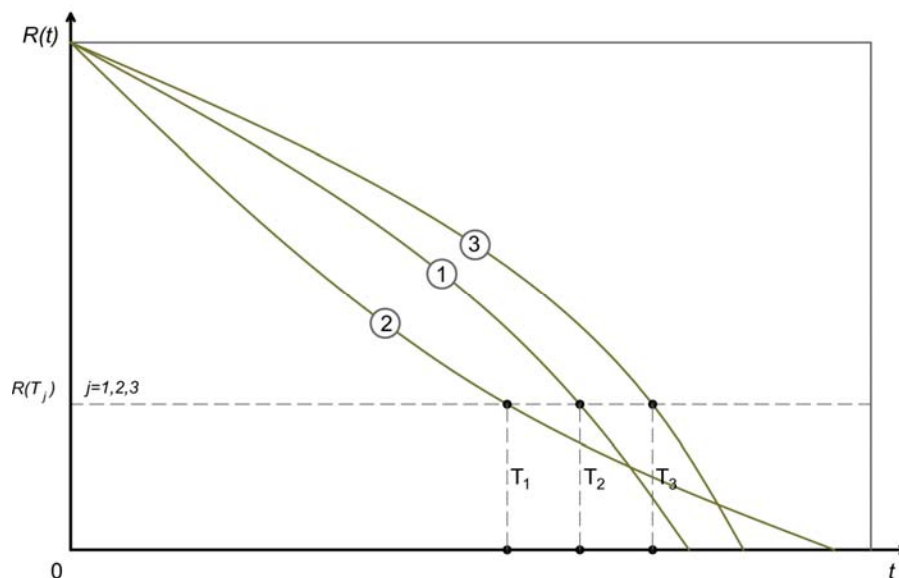
$$R(T) = R_0 (1 - F_k) = \text{const.} \quad (4.197d)$$



Slika 4.38 Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ tokom istog upotrebnog veka

Krive degradacije nosivosti $R(t)$ tokom upotrebnog veka predstavljene na slici 4.38 su date za različite mehanizme oštećenja i različite stope oštećenja konstrukcije. Dat je primer sa tri krive degradacija nosivosti konstrukcije za isti upotrebnog vek za sva tri modela oštećenja konstrukcije. Donjoj granici degradacije nosivosti $R(T)$ odgovara upotrebnog vek T , odnosno projektovani vek $T = T_{\text{projektovano}}$ konstrukcije.

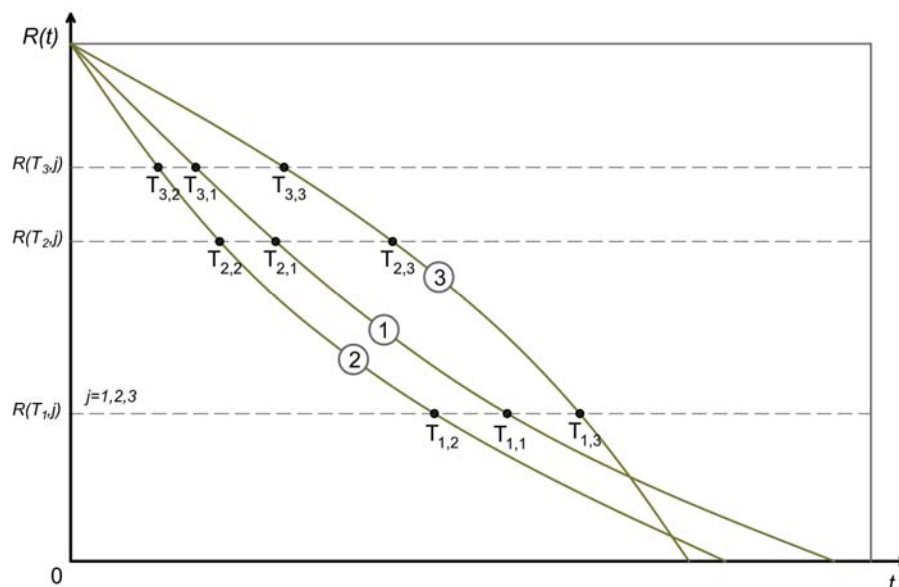
Projektovanje konstrukcija, izbor materijala i sistema, može biti i prema upotrebnom veku, kao unapred poznate vrednosti koje je određena tehničkom regulativom za određenu vrstu objekta. Za konstrukcije od istog materijala izložene različitim dejstvima sredine, usled različite degradacija u istom vremenskom intervalu, nosivosti konstrukcije se može predstaviti različitim krivama. Posmatrani broj modela oštećenja je "j".



Slika 4.39 Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ tokom različitog upotrebnog veka

Na slici 4.39 je predstavljen primer sa tri krive degradacija nosivosti konstrukcije sa oznakama $j=1,2,3$, za različiti upotrebnog veka za sva tri modela oštećenja konstrukcije. Donjoj granici degradacije nosivosti $R(T)=const$.

Predstavljene su različite krive degradacije za različiti upotrebnog veka u zavisnosti od modela oštećenja konstrukcije. Pretpostavlja se da su svi modeli ($j=1,2,3$) od istih materijala i da imaju istu početnu nosivost R_0 i istu donju granicu degradacije nosivosti konstrukcije $R(T_j)$. Svakom modelu oštećenja odgovara posebna kriva nosivosti konstrukcije $R(t)$. U zavisnosti od modela oštećenja i od vrste dejstava, za vrednosti $R(T)=R(T_j)=const$ dobijaju se različite vrednosti za upotrebnog veka T_1, T_2, T_3 .



Slika 4.40 Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ sa različitim vrednostima donje granice preostale nosivosti, tokom različitog upotrebnog veka

Vrednosti donje granice degradacije nosivosti konstrukcije može, osim zahteva nosivosti, da bude određena drugim zahtevima. Ako se postave tri zahteva $R(T_{1,j})$, prema zahtevu nosivosti, $R(T_{2,j})$ prema zahtevu funkcionalnosti i $R(T_{3,j})$, prema zahtevu ekonomičnosti, onda svakoj krivoj odgovaraju po tri različite vrednosti upotrebnog veka T_{11}, T_{12}, T_{13} , zatim

T_{21}, T_{22}, T_{23} , i T_{31}, T_{32}, T_{33} (slika 4.40). Analizom tri međusobno nezavisnih zahteva dolazi se do optimizacije rešenja i odluke o određivanju konačnog upotrebnog veka.

Za tri postavljena zahteva, na osnovu tri funkcije nosivosti, minimizacijom se određuje upotrebnii vek. Svaka kriva kao rešenje ima tri vrednosti za upotrebnii vek, tako da najmanja vrednost od tri vrednosti predstavlja konačnu vrednost upotrebnog veka. Na slici 4.40 su označene najmanje vrednosti od tri vrednosti, za upotrebnii vek i to: prema zahtevu nosivosti, najmanja vrednost za upotrebnii vek je $min1=T_{13}$, prema funkcionalnosti najmanja vrednost za upotrebnii vek je $min2=T_{22}$ i prema ekonomičnosti najmanja vrednost za upotrebnii vek $min3=T_{31}$. Upotrebnii vek konstrukcije se određuje na osnovu najmanje vrednosti prema nosivosti od ukupno tri vrednosti za svako i postavljen zahtev i to su $min3=T_{31}$, $min2=T_{22}$ i $min3=T_{13}$.

U praksi svaki most ima svoju nosivost, svoje okruženje, dejstva i svoj stepen deterioracije tokom vremena što znači da svaki most ima svoju krivu $R(t)$. Ponekad se te krive drastično razlikuju tako da je vrlo teško generalizovati problem. Ako bi raspolagali bazom podataka o sličnim mostovima, građeni na istom putnom pravcu, istog sistema i u istom okruženju sa sličnim upotrebnim vekom, onda bi se raspoloživi podaci o stanju objekta u određenom vremenu mogli upotrebiti kao osrednjene vrednosti za generisanje standardne krive stanja objekta.

Ocena stanja konstrukcije može biti za celu konstrukciju ili za svaki noseći element posebno. Kod mostova se obično ocenjuje rejting za ceo most, ili posebno za superstrukturu, posebno za substrukturu a posebno za stubove i temelje. Standardizovana kriva nosivosti usled deterioracije za određeni tip konstrukcije moguće je odrediti metodama matematičke aproksimacije na bazi parova podataka vreme-stanje.

Baza probablističkih podataka o stanju mostova tokom vremena omogućuje praćenje stanja mostova kao i prognozu budućeg stanja primenom stohastičkih metoda. Na osnovu probablističkih metoda prognoze, praćenjem stanja nosivosti i upotrebljivosti, moguće je odrediti stanje objekta u nekom trenutku u budućnosti ili odrediti upotrebnii vek, odnosno preostali upotrebnii vek objekta. Na vremenskoj skali pored oštećenja mostova važna je i baza podataka o troškovima održavanja i troškovima popravke oštećenja. Preveliki troškovi održavanja i troškovi popravki mogu da budu odlučujući faktor za smanjenje upotrebnog veka mosta iz ekonomskih razloga, bez obzira na stanje nosivosti i upotrebljivosti. Ponekad i smanjenje funkcije i izgled mosta zbog oštećenja ili novonastalih zahteva, takođe može biti kriterijum za ocenu upotrebnog veka mosta.

Matematički modeli deterioracije mogu biti deterministički i probablistički i vezani su za referentni vremenski period. Regresioni modeli su osnova za ocenjivanje i prognozu stanja objekta uz ispunjenosti pretpostavki za korišćenje određenog modela.

Osnovne Industrijske klase IFC (eng. *Industry Foundation Classes*) omogućuju kontrolu stanja objekta na bazi prikupljanja i razmene podataka o stanju objekta [155].

Naš standard SRPS EN ISO 16739:2017 [156] utvrđuje konceptualnu šemu podataka i format za razmenu podataka informacionog modela građevinskog objekta BIM (eng. *Building Information Modeling*). Konceptualna šema je definisana programskim jezikom za modeliranje podataka *EXPRESS*. IFC je računarska baza podataka o

elementima objekta sa relevantnim karakteristikama, na osnovu koje se modelira konstrukcija objekta ili proces građenja objekta (kontrola i upravljanje). Koristi se za identifikaciju podataka kontrole ispitivanja mosta nakon izvođenja i omogućuje identifikaciju i praćenje oštećenja konstrukciju tokom vremena eksploatacije.

Praćenjem stanja konstrukcije u određenim vremenskim intervalima tokom eksploatacije i prikupljanjem podataka dobijaju se ocene stanja koje se mogu koristiti za formiranje modela deterioracije čime se omogućuje predviđanje budućeg stanja konstrukcije.

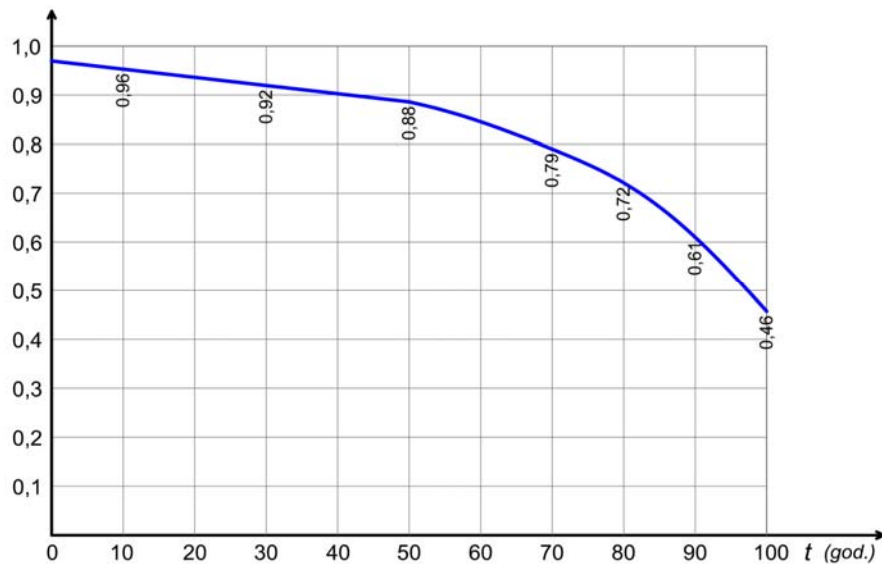
U okviru baze podataka o mostovima u Srbiji [15], Institut za puteve je sistemom kvaliteta JUS ISO 9001 predložio jednačinu promene nosivosti mostova $N_{u,i}$ tokom vremena t :

$$N_{u,i} = (0,98 - a_1 \cdot a_2 (0,01 \cdot e^{0,04 \cdot t} + 0,001 \cdot t)) N_{u,0} \quad (4.198)$$

gde je:

- $N_{u,0}$ - početna nosivost mosta, od sistema nosača
- a_1 i a_2 - konstante

Za gredne AB nosače $a_1=0,8$, $a_2=1,0$ i upotrebnii vek mosta od 100 godina, na slici 4.44 data je kriva promene nosivosti mosta tokom vremena.



Slika 4.44 Kriva promene nosivosti mosta tokom vremena

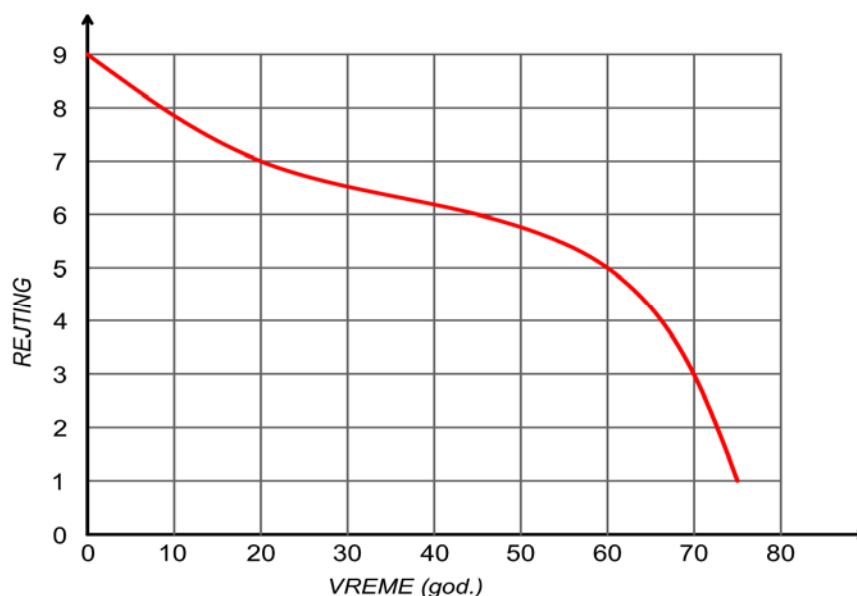
U pregledu nacionalne baze podataka NBI (eng. *National Bridge Inventory*). u Americi, objavljeno je da se na osnovu prosečnih vrednosti ocena stanja AB mostova na autoputevima se može modelirati polinomom trećeg stepena [157], tako da je rejting stanja $C(t)$, kao funkcija vremena t , u opštem obliku:

$$C(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 \quad (4.199)$$

Na osnovu baze podataka prosečnih vrednosti ocena stanja:

$$C(t) = 8.662 - 0.146t + 0.003t^2 - 3.09E-5t^3 \quad (4.200)$$

Za svaki most posebno je potrebno odrediti krivu trećeg reda sa drugačijim koeficijentima α_i koji se dobija ju na osnovu periodičnih ocena stanja.



Slika 4.45 Vrednosti ocena rejtinga stanja

Na slici 4.45 je predstavljena kriva rejtinga stanja mosta u funkciji vremena. Prema AASHTO rejting stanja se definiše ocenama N,0,1,2,3,4,5,6,7, 8 i 9 (tabela 4.29) [148], a evaluacija stanja mostova se vrši na osnovu pregleda mostova prema standardu NBIS (eng. *National Bridge Inspection Standard*). U praksi se često navedene ocene od: Code 0 do Code 9, ukupno 10 ocena, mogu grupisati u manji broj oceana stanja u zavisnosti od potreba istraživanja, tako da umesto skale od 0 do 9 koriste se skale sa manjim brojem ocena koje grupišu više stanja u jedno stanja (tabela 4.31).

Tabela 4.31 Grupisane ocene stanja konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata AASHTO

Florida Department of Transportation (FDOT) [149]:

ODLIČNO (Excellent)	DOBRO (Good)	PRIKLADNO (Fair)	LOŠE (Poor)
9,8	7,6	5	4,3,2,1

Federal Highway Administration (FHWA):

DOBRO (Good)	PRIKLADNO (Fair)	LOŠE (Poor)
9,8,7	6,5	4,3,2,1

Standard AASHTO Manual for Bridge Element Inspection (AMBEI) 2013 [158]:

1. DOBRO (Good)	2. PRIKLADNO (Fair)	3. LOŠE (Poor)	4. TEŠKO (Severe)

New York State Department of Transportation (NYDOT) [159]:

DOBRO (Good)	PRIKLADNO (Fair)	LOŠE (Poor)	TEŠKO (Severe)	NEPOZNATO (Unknown)
CS1	CS2	CS3	CS4	CS5*

*Stanje CS5 je ocena nepristupačnih elemenata konstrukcije.p

Nezavisno od AASHTO u dokumentu CDOT (eng. *Colorado Department of Transportation*) [160] oštećenja se izražavaju kvantitativno u zavisnosti od procenta oštećenja konstrukcija (Tabela 4.32), gde se pojavljuje skala rejtinga ploče sa procentima

površine oštećene ploče svrstani u 5 stanja od 1 do 5, stim što stanje 1 predstavlja armirano-betonsku konstrukciju sa najmanjim oštećenjem od 0%, a stanje 5 konstrukciju sa oštećenjem više od >25%.

Tabela 4.32 Colorado Department of Transportation CDOT [160]

Stanje objekta	Procenat oštećenja AB ploče
1	0%
2	< 2%
3	< 10%
4	> 10% <25%
5	>25%

U Kanadi dokaz sigurnosti konstrukcija tokom vremena je baziran na probabilističkom konceptu sigurnosti odnosno na vremenski zavisnom indeksu pouzdanost konstrukcija i sadržan je u standardu OHBDC [161] za evaluaciju postojećih mostova i za proračun konstrukcija. U smernicama MTQ (eng. *Ministry Of Transportation Quebec*) [162] dat je rejting stanja materijala u konstrukcijama (eng. *Material condition Ratings*) sa skalom ocene stanja materijala konstrukcije od 1 do 6. Oštećenja grednih nosača i ploča su izražena u procentima za glavne i za sekundarne noseće elemente konstrukcija i predstavljaju procentualno oštećenje poprečnog preseka ili dužine greda, ili oštećenje površine ploče (tabela 4.33).

Tabela 4.33 Procentualno oštećenje poprečnog preseka grede, površine ploče ili dužine nosača.

OCENA	STANJE KONSTRUKCIJE	GLAVNI ELEMENTI	SEKUNDARNI ELEMENTI
6	Kao novo (<i>Like New</i>)	0-1%	0-2%
5	Dobro stanje (<i>Good Condition</i>)	1-5%	2-10%
4	Prikladno (<i>Fair Condition</i>)	5-10%	10-12%
3	Loše (<i>Poor Condition</i>)	10-15%	20-30%
2	Urgentno stanje (<i>Urgent Condition</i>)	15-20%	30-40%
1	Kritično stanje (<i>Critical Condition</i>)	>20%	>40%

Prema preporukama švajcarskih normi SIA162/5-1997 [163] evaluacija stanja objekta se definiše preko Klasa stanja (nem. *Zustandsklasse*) sa ukupno 5 ocena. U normi SIA 269/2:2011 [135] dat je opis stepena korozije konstrukcije sa 5 stepena, 0,1,2,3 i 4, pri čemu stepen 0 označava najmanju koroziju. Dat je opis i oštećenja od korozije betona usled karbonizacije i usled hlorida i opis korozije čeličnih kablova za prednaprezanje.

Kod klasa stanja prema istaživanjima Martiju²⁶ [163] za potrebe normi SIA, osim opisa stanja objekta kao: dobro, prihvatljivo neispravno, loše i alarmantno, u tabeli 4.34 je dat i procenat oštećenja objekta, debljina prsline i oštećenje preseka. Smatra se da objekat

²⁶ Peter Marti, prof. dr ing. dipl. EPF, Zurich, predsednik komisije SIA-162

tokom svog upotrebnog veka ne bi trebalo da ima oštećenja veća od 50%. Ako dođe do tog stanja onda je potrebno napraviti analize o isplativosti održavanja ili obnove objekta.

Tabela 4.34 Klase stanja prema SIA-162/5

KLASE STANJA	OPIS	ZAHVAĆENA POVRŠINA	DEBLJINA PRSLINE	OŠTEĆENJE PRESEKA	MERE POPRAVKE
1 dobro	<i>Nema nedostataka</i>	0%	< 0,2mm	0%	<i>nema</i>
2 prihvatljivo	<i>Mali nedostaci i oštećenja</i>	0-10%	< 0,4mm	0%	<i>može ali ne mora</i>
3 neispravno	<i>Značajni nedostaci i oštećenja</i>	20-30%	> 0,4mm	< 5%	<i>potrebne</i>
4 loše	<i>Veliki nedostaci i oštećenja</i>	50%	>0,5mm	< 10%	<i>Hitne popravke</i>
5 alarmantno	<i>Jaka oštećenja i razaranja</i>	Veće od 50%	>0,5mm u zoni gl.arm.	> 10% kod gl. elemenata	<i>Sigurnosne mere</i>

Klase stanja mogu biti:

Klasa 1. Objekat je u veoma dobrom stanju bez ograničenja

Klasa 2. Objekat ima male nedostatke, mogu se zahtevati popravke, koje se mogu, ali ne moraju otkloniti u redovnom periodu održavanja

Klasa 3. Objekat ima grublje nedostatke, zahtevaju se popravke u slobodnom izboru vremena u redovnom periodu održavanja.

Klasa 4. Objekat ima grublje nedostatke strukture, zahtevaju se hitne popravke i pojačanja

Klasa 5. Objekat ima krupne nedostatke strukture, zahtevaju se sigurnosne hitne popravke

U Nemačkoj postoji veliki broj istraživanja vezanih za problem održavanje objekata i tehničkog upotrebnog veka objekta, koji se oslanjaju na osnovne standarde: DIN 31051: 2012-09 [164] koji sadrži mere procene stvarnog stanja tehničkih sredstava sistema i standard DIN EN 13306:2018-02 [165] koji utvrđuje opšte termine i definicije za tehničke, administrativne i menadžerske oblasti održavanja. Na osnovu ovih standarda razvijen je metod za ocenu stanja održavanja i revitalizacije objekata. Prema ovim standardima održavanje podrazumeva popravku trenutnog stanja, preventivno i prediktivno održavanje u cilju produženja preostalog upotrebnog veka objekta i smanjenja troškova održavanja. Metod se bazira na inovativnoj strategiji rizika održavanja objekata RBM (eng. *Risk Based Maintenance*) kao i na pouzdanosti održavanja objekata RCM (nem. *Reliability Centered Maintenance*).

Kod ocene stanja mostova se koriste nemačke norme DIN 1076 [16] i smernice za održavanje inženjerskih objekata RI-EBW-PRÜF [166]. Pored ocene stanja konstrukcija zbud detaljnijeg sagledavanja stepena oštećenja u normama DIN 1076 data je kvantitativna ocena oštećenja nosećih elemenata konstrukcija. Prema saopštenju "Merkblatt Bauwerksinspektion" BAW [167] kvalitativno su izražene ukupno 5 ocene oštećenja nosećih elemenata konstrukcija i odgovarajuća sigurnost konstrukcije data je

od ocene 0 - gde nema oštećenja, ocene 1,2 i 3 sa oštećenjima, do ocene 4 sa najvećim oštećenjima. Opisi oštećenja su dati za odgovarajuću sigurnost konstrukcija, odgovarajuću sigurnost saobraćaja i odgovarajuću trajnosti (tabela 4.35).

Tabela 4.35 Stanja objekata prema nemačkim uputstvima RI-EBW-PRÜF

OCENA STANJA	OPIS stanja
1-1.4	VEOMA DOBRO STANJE OBJEKTA <i>Objekat je siguran, bezbedan za saobraćaj i trajan. Redovno se održava.</i>
1.5-1.9	DOBRO STANJE OBJEKTA <i>Objekat je siguran, bezbedan za saobraćaj, ali je trajanost malo ugrožena na duži rok. Redovno se održava.</i>
2.0-2.4	ZADOVOLJAVAJUĆE STANJE OBJKTA <i>Objekat je siguran, bezbedan za saobraćaj. trajnost objekta može biti malo ugrožena na duži rok. Oštećenje ili posledica oštećenja dugoročno može imati posledice na postojanost i /ili sigurnost u saobraćaju ili povećano habanje. Redovno se održava. Potrebne su srednjeročne popravke. Mere za uklanjanje oštećenja ili upozorenja za održanje sigurnosti u saobraćaju se mogu zahtevati u kratkom roku.</i>
2.5-2.9	DOVOLJNO STANJE OBJEKTA <i>Objekat je siguran, bezbednost u saobraćaju može biti pogoršana; trajnost objekta može biti znatno pogoršana. Oštećenje ili posledica oštećenja srednjeročno može imati posledice na sigurnost i /ili bezbednost u saobraćaju i povećano habanje. Redovno se održava. Potrebne su kratkoročne popravke.</i>
3.0-3.4	KRITIČNO STANJE OBJEKTA <i>Sigurnost objekta i/ili bezbednost saobraćaja je pogoršana. Objekat je dotrajavao. Obim štete i posledice štete može dovesti kratkoročno do ugrožavanja sigurnosti objekta i/ili bezbednosti saobraćaja. Redovno se održava. Odmah je potrebno izvršiti popravke. Mere za uklanjanje oštećenja ili upozorenja za održanje sigurnosti u saobraćaju se mogu neposredno (odmah) primeniti.</i>
3.5-4	NEZADOVOLJAVAJUĆE STANJE OBJEKTA <i>Sigurnost objekta i bezbednost u saobraćaju su značano smanjeni ili više ne postoje. Objekat je dotrajavao. Širenje oštećenja kao i njegove posledice mogu kratkoročno dovesti da sigurnosti objekta i/ili bezbednost u saobraćaju više ne postoje i može dovesti do pada objekta. Redovno se održava. Potrebna je hitna popravka. Mere za uklanjanje oštećenja ili upozorenja za održanje sigurnosti u saobraćaju se mogu odmah primeniti.</i>

Procedurom detekcije i procene oštećenja [168], procenom stanja postojeće konstrukcije u zavisnosti od veličine tih oštećenja konstrukcije date su preporuke za proračunske vrednosti nosivosti i dimenzija konstrukcije, Preko bazisnih varijabli veličina oštećenja izražena je kao geometrijski podatak kao što je gubljenje visine i površine poprečnog preseka usled propadanja materijala i gubljenje čvrstoće betona i armature usled korozije. Ovaj model sadrži statističke parametre bazisnih varijabli kao što su vrste stohastičke

raspodele, srednje vrednosti, karakteristične vrednosti, standardne devijacije i koeficijente varijacije. U tabeli 4.36 su date ocene stanja konstrukcija u eksploataciji, opis kategorije njihovih oštećenja, definicije osnovnih promenljivih i elementi stohastičkog model.

Tabela 4.36 Stohastički modeli oštećenja [169]

ŠEMA PROCENE:			STOHAISTIČKI MODEL		
Oceana oštećenja konstrukcije: $i=0,1,2,3,4$	Kategorija oštećenja	Bazisna varijabla Visina d_i	Statistička raspodela	COV-koeficijent varijacije	Standardna devijacija (mm)
LJUSKANJE BETONA U PRITINUTOJ ZONI					
0	NEMA	$d_0 = d - h_0 = d$	normalna	-	5,0
1	NEZNATNA	$d_1 = d - h_1$	normalna	-	10,0
2	SLABA	$d_2 = d - h_2$	normalna	-	10,0
3	IZRAŽENA	$d_3 = d - h_3$	normalna	-	15,0
4	JAKA	$d_4 = d - h_4$	normalna	-	20,0
KOROZIJA BETONA					
0	NEMA	$A_{s,0} = 1,0 = A_s$	const.	-	-
1	NEZNATNA	$A_{s,1} = (0,95 - 1,0) A_s$	const.	-	-
2	SLABA	$A_{s,2} = (0,9 - 0,95) A_s$	normalna	2%	-
3	IZRAŽENA	$A_{s,3} = (0,8 - 0,9) A_s$	normalna	2%	-
4	JAKA	$A_{s,4} = (0,5 - 0,8) A_s$	normalna	2%	-
KOROZIJA BETONA					
0	NEMA	$f_{c,0} = f_c$	lognormalna	15%	-
1	NEZNATNA	$f_{c,1} = f_c$	lognormalna	15%	-
2	SLABA	$f_{c,2} = f_c$	lognormalna	15%	-
3	IZRAŽENA	$f_{c,3} = 0,96 f_c - 9 MN/m^2$	lognormalna	20%	-
4	JAKA	$f_{c,4} = 0,96 f_c - 9 MN/m^2$	lognormalna	20%	-
KOROZIJA ARMATURE					
0	NEMA	$f_{y,0} = f_y$	lognormalna	6%	-
1	NEZNATNA	$f_{y,1} = f_y$	lognormalna	6%	-
2	SLABA	$f_{y,2} = 0,97 f_y$	lognormalna	6%	-
3	IZRAŽENA	$f_{y,3} = 0,95 f_y$	lognormalna	6%	-
4	JAKA	$f_{y,4} = 0,93 f_y$	lognormalna	6%	-

U tabeli 4.36 dati su stohastički modeli oštećenja za:

- Ljuskanje betona u pritinitoj zoni, gde je za stanje i nosača, bazisna varijabla visina AB nosača, d_i , gde se oštećenje nosača ogleda kroz promenu visine $d_i = d - h_i$, (d je početna visina nosača, i je stanje nosača $i=0,1,2,3,4$). Vrednosti visine nosača d_i su: $d_0 = d - h_0 = d$, $d_1 = d - h_1$, $d_2 = d - h_2$, $d_3 = d - h_3$ i $d_4 = d - h_4$
- Koroziju betona, gde je bazisna varijabla površina preseka $A_{s,i}$ AB elementa. Za stanje nosača $i=0,1,2,3,4$, date su vrednosti $A_{s,i}$: $A_{s,0} = (1,0) A_s$, $A_{s,1} = (0,95 - 1,0) A_s$, $A_{s,2} = (0,9 - 0,95) A_s$, $A_{s,3} = (0,8 - 0,9) A_s$ i $A_{s,4} = (0,5 - 0,8) A_s$

- Koroziju betona gde je bazisna varijabla srednja vrednost čvrstoće betona na pritisak za stanje $i=0,1,2,3,4$, date su vrednosti $f_{c,i}$: $f_{c,0}=f_c$, $f_{c,1}=f_c$, $f_{c,2}=f_c$, $f_{c,3}=0,96f_c-9MN/m^2$, $f_{c,4}=0,96f_c-9MN/m^2$
- Koroziju armature gde je bazisna varijabla srednja vrednost čvrstoća armature na granici razvlačenja za stanje $i=0,1,2,3,4$, date su vrednosti $f_{y,i}$: $f_{y,0}=f_y$, $f_{y,1}=f_y$, $f_{y,2}=0,97f_y$, $f_{y,3}=0,95f_y$, $f_{y,4}=0,93f_y$.

Elementi modela su veoma pogodni za praktičnu upotrebu procene stanja konstrukcija jer je za svako oštećenje određena ocena oštećenja i definisana je veličina oštećenja poprečnih preseka betona, čvrstoće betona i čvrstoća armature, i time su određeni potrebni podaci za proračunsku proveru sigurnosti konstrukcije.

Kod procene stanja konstrukcija koriste se razni alati i metode zasnovane na veštačkoj inteligenciji, gde se na osnovu velikog broja podataka rešenih problema koristi za različite inženjerske potrebe naročito god donošenja zaključaka i odluka. Jedna od takvih metoda je metod veštačke neuronske mreže ANN (eng. *Artificial Neural Network*) [170]. Formiranje podataka vrši se umrežavanjem preko neurona. Mreža može da se koristi za evaluaciju i prognozu stanja konstrukcija. Skala ulaznih vrednosti za ANN je data u tabeli 4.37, za vrednosti 0,1 do 0,9 koja su u vezi sa odgovarajućom skalom stanjima konstrukcije SC1 do SC5. Vrednosti u tabeli označavaju stanja objekta gde je sa 1 označen objekat bez oštećenja, a ostale vrednosti stanja objekta sa oštećenjima.

Tabela 4.37 Veštačke neuronske mreže (eng. *Artificial Neural Network ANN*)

Stanje objekta	Skala	Ulazne vrednosti
SC 1	1,0 - 0,8	0,9
SC 2	0,8 - 0,6	0,7
SC 3	0,6 - 0,4	0,5
SC 4	0,4 - 0,2	0,3
SC 5	0,2 - 0,0	0,1

Kvalitativne metode se oslanjaju na vizuelne preglede i na kataloškom opisu oštećenja na osnovu kojih se izvode procene stanja konstrukcije, na osnovu kojih se donose subjektivni zaključci i donose odluke o intervenciji. Metode koje u sebi, osim opisa, sadrže i kvantitativne podatke koji se mogu potvrditi merenjima i ispitivanjima imaju prednosti u ocenjivanju stanja konstrukcija.

Istraživanja u Americi [171] kvantifikuju određena stanja konstrukcija kod AB mostova koja su izražena preko klasifikacije AASHTO u zavisnosti od procenta oštećenosti konstrukcije. Oštećenja su izražena procentualno kao "gubitak" poprečnog preseka usled različitih dejstava, a mogu se odrediti na osnovu ocene stanja konstrukcije ili nosećih elemenata superstrukture i substrukture (tabela 4.38). U datom istraživanju se konstatuje da su prsline usled savijanja i smicanja česta pojava u betonskim konstrukcijama kojima se uvek ne pridaje veliki značaj, ali koje mogu ukazati na promenu stanja konstrukcije. Zbog poteškoća u merenju, prsline se samo kvalitativno identifikuju, i stanje betonske konstrukcije-superstrukture pri identifikaciji prsline usled savijanja ili smicanja se ocenjuje

ocenom 5 (Priladno). Prsline sa osipanjem i flekama usled korozije se ocenjuju ocenom 4 (Loše). Postojanje prsline daje informaciju o stanju konstrukcije i ukazuje na potrebu da je potrebno dodatno istraživanje. Kod ocene stanja konstrukcije 6 do 9 nema prsline u ovom stanju.

Tabela 4.38 Gubitak poprečnog preseka elemenata

code	STANJE	GUBITAK POREČNOG PRESEKA ELEMENATA		
		superstruktura	Prednapregnuti elementi	substruktura
N	NIJE PRIMENLJIVO	-	-	-
9	ODLIČNO	ne	ne	ne
8	VRLO DOBRO	ne	ne	ne
7	DOBRO	ne	ne	ne
6	DOVOLJNO	ne	Manje 2%	Pojava fleka od korozije armature
5	PRIKLADNO	Do 10%	2% - 10%	Oštećenja do prvog sloja armature
4	LOŠE	10-20%	10-20%	do 25% oštećenja
3	OZBILJNO	20-30%	20-30%	25% do 50% oštećenja
2	KRITIČNO	30% i više	30% i više	Više od 50% oštećenja
1	BLISKO RUŠENJU	-	-	ne
0	STANJE LOMA	-	-	ne

U Japanu se procena stanja određuje na nivou celog mosta na osnovu vizuelnog pregleda svih nosećih elemenata mosta [172], [173]. Nivo deterioracije se određuje skalom od I do V, gde je V najbolje stanje, a I najgore stanje mosta. Za svaki nivo oštećenja je određen stepen oštećenja (0-1) sa opisom stanja (tabela 4.39).

Tabela 4.39 JAPAN : Model stanja oštećene AB konstrukcije

NIVO DETERIORACIJE	STEPEN DETERIORACIJE	OPIS STANJA AB KONSTRUKCIJE
I	0,8 - 1,0	Potencijalna opasnost
II	0,6 - 0,8	Očigledno pogoršanje - potrebno je ispitivanje
III	0,4 - 0,6	Teška oštećenja - zahteva se dodatni pregled
IV	0,2 - 0,4	Malo pogoršanje stanja
V	0,0 - 0,2	Kao novo

Dalja istraživanja pokazuju da je stepen deterioracije definisan gustinom prsline (tabela 4.40) kao odnos dužine prsline po m² AB konstrukcije (površine ploče) [174].

Tabela 4.40 Japan: Nivo oštećenja AB ploča

NIVO OŠTEĆENJA	STEPEN OŠTEĆENJA $D_c=C_d/10$	GUSTINA PRSLINE C_d (m/m ²)	VRSTA POPRAVKE
I	0,0 - 0,3	0-3	Nema popravke
II	0,3 – 0,6	3-6	Moguće popravke
III	0,6 – 0,8	6- 8	Popravka ili poboljšanje
IV	0,8 – 0,9	8 - 9	Popravka ili poboljšanje, zamena
V	0,9-	9-	Ozbiljna popravka ili zamena

Istraživanja koja su rađena u okviru Moskovskog sistema upravljanja mostovima kategorizuju stanje mostova u 5 klasifikacija (tabela 4.41). Stanje 1 je dobro stanje konstrukcije, a stanje 3 neprihvatljivo stanje konstrukcije. Svako stanje je određeno na osnovu procentualnog gubitka nosivosti konstrukcije za vrednosti od 0-100%). Svaka ocena stanja sadrži opis popravke konstrukcije. Sistem podržava računarski paket MOST kojim se izračunava stepen oštećenja konstrukcije, predviđanje budućeg stanja konstrukcije i proračun i optimizacije troškova izgradnje, popravke i održavanja.

Tabela 4.41 Moskva sistema upravljanja mostovima:Klasifikacija stanja mostova [175]

STANJE	PROCENA STANJA	GUBITAK NOSIVOSTI	TIP POPRAVKE
1	dobro	<20 %	Redovno održavanje
1,5	nije sasvim dobro	20-40 %	Preventivno održavanje
2	loše	40-60 %	Lokalne popravke
2,5	veoma loše	60-80 %	Generalna popravka
3	neprihvatljivo	80-100 %	Zamena ili restauracija

Istraživanja u Velikoj Britaniji određuju stepen oštećenja u odnosu na procenat oštećenje površine ili dužine konstrukcijskog elementa [176]. Oštećenja su data skalom sa 5 ocenama od A - najmanja oštećenja, do E - najveća oštećenja (tabela 4.42).

Tabela 4.42 Velika Britanija BCI (Bridge condition Index)

STEPEN OŠTEĆENJA	ZAHVAĆENA POVRŠINA	OPIS OŠTEĆENJA MOSTOVA
A	0 %	nema značajnih oštećenja
B	<5 %	laka oštećenja
C	5-10 %	srednja oštećenja
D	20-50 %	velika oštećenja
E	>50 %	znatna veća oštećenja

Održanje koeficijenta pouzdanosti za granično stanje upotrebljivosti GSU je moguće ili sprečavanjem korozije ili dodavanjem armature. Za granično stanje nosivosti GSN je potrebno definisati kritični gubitak poprečnih preseka šipki prouzrokovanih korozijom koja dovodi do oštećenja konstrukcije. Upotrební vek konstrukcije zavisi od procesa korozije armature, odnosno od veličine vremenskih perioda njene inicijacije i propagacije. U zavisnosti od procenta gubitka poprečnog preseka armature definisane su tri klase robusnosti ROS3, ROS2 i ROS1, prema kojima se može odrediti različiti načini otkaza konstrukcije, odnosno odrediti upotrební vek konstrukcije (*tabela 4.45*) [11].

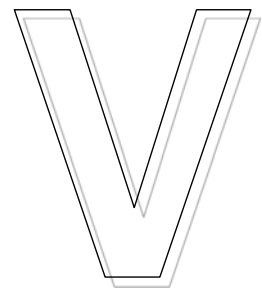
Tabela 4.43 Gubitak poprečnog preseka armature prema klasama robusnosti

KLASE ROBUSNOSTI	KARAKTERISTIKE	GUBITAK POPREČNOG PRESEKA ΔA_s
ROS 3	<i>Armatura pri savijanju van zone sidrenja i preklopa</i>	25%
ROS 2	<i>Armatura pri smicanju u zoni sidrenja sa utegnutom poprečnom armaturom</i>	15%
ROS1	<i>Armatura pri smicanju u zoni sidrenja bez utezanja sa poprečnom armaturom</i>	5%

Klase robusnosti prema vrednostima za oštećenja u vidu gubitka preseka armature ΔA_s se koriste za kontrolu graničnog stanja depasivizacije armature usled karbonizacije ili penetracije hlorida i drugih agresivnih materija.

*„Ako činjenice ne odgovaraju
teoriji, promenite činjenice“*

Albert Einstein



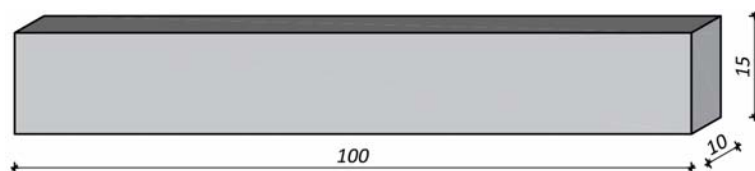
POGLAVLJE

V. TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA: DETEKCIJA OŠTEĆENJA I EVALUACIJA STANJA BETONSKE GREDICE

5.1 IZBOR MODELA I PRIMENJENE METODE ISTRAŽIVANJA

Za potvrdu teorijskih pretpostavki i utvrđivanje realnog stanja oštećenih betonskih elemenata tokom vremena neophodno je sprovođenje eksperimentalnog istraživanja. Eksperimentalnim putem moguće je simulirati određene pojave, izvršiti promenu parametara i ponavljanja celokupnog postupka onoliko broj puta koliko je to potrebno za dobijanje reprezentativnih rezultata. Eksperiment nam daje mogućnost primene različitih konvencionalnih standardizovanih i nekonvencionalnih metoda.

U skladu sa predmetom i ciljevima istraživanja formirani su laboratorijski i numerički modeli za određivanje realnih karakteristika betona i simuliranje propagacije oštećenja radi procene stanja betona. Za dobijanje relevantnih podataka za poređenje neophodno je da oba modela imaju međusobno usaglašenu geometriju i iste početne karakteristike materijala. Geometrija modela je određena na osnovu gabarita raspoložive merne opreme i optimizovanaza sprovođenje ispitivanja u laboratorijskim uslovima. Usvojeni su modeli od betona prizmatičnog oblika pravougaonog poprečnog preseka dimenzija 10x15 cm i dužine 100 cm (*slika 5.1*)

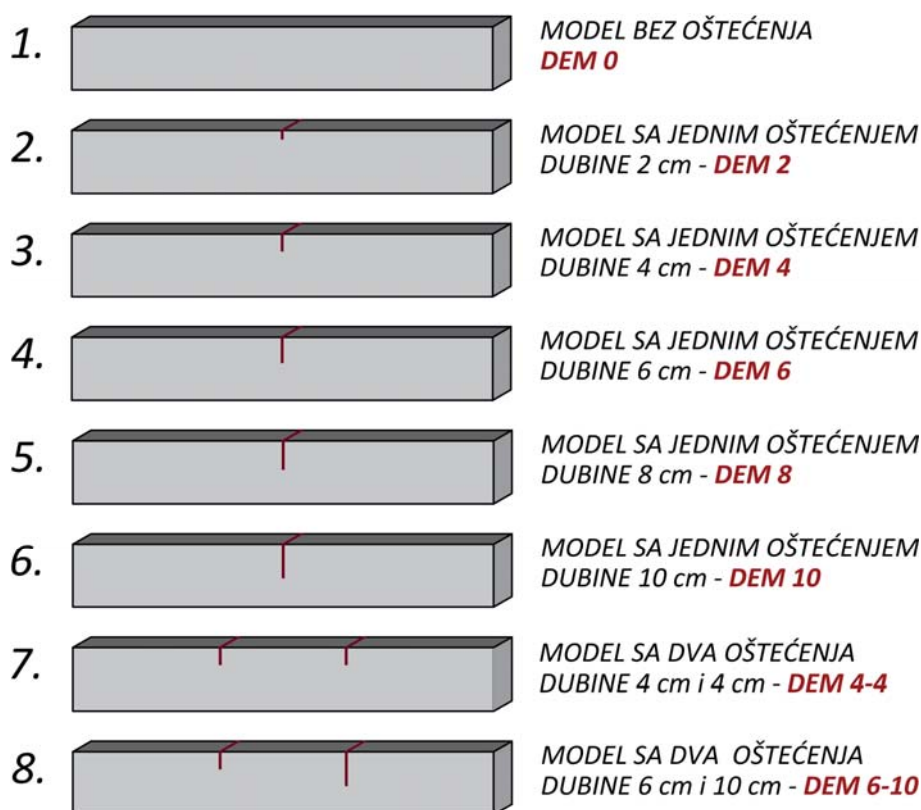


Slika 5.1 Izgled usvojenog prizmatičnog modela

Deterioracija betona je vremenski zavistan proces tokom koga oštećenja rastu od početka eksploatacije odnosno perioda kad nema oštećenja, preko pojave prslina, njihove propagacije do kritičnih vrednosti odnosno sve do kraja životnog ciklusa nosača. U skladu sa navedenim, za potrebe istraživanja formirani su modeli sa simuliranim različitim stepenima oštećenja koja odgovaraju razvoju realnih oštećenja tokom vremena.

Formiran je model bez oštećenja koji predstavlja početno stanje eksploatacije, zatim modeli sa jednim simuliranim oštećenjem na sredini raspona gredice sa različitim dubinama od 2, 4, 6, 8 i 10 cm u vidu zareza koji obuhvata celu širinu gredice. Formirana su i dva modela sa po dva oštećenja koji su pozicionirani u trećinama raspona: jedan model sa iste dubine od 4 cm i 4 cm i jedan model sa oštećenjima različitih dubina od 6 cm i 10 cm (*slika 5.2*). Simulirana oštećenja se prostiru po celoj širini elementa sa naznačenim dubinama. Najveće simulirano pojedinačno oštećenje je dubine 10 cm koje zahvata 2/3 (66,67%) visine modela odnosno površine poprečnog preseka modela.

Usled različitosti pristupa nakon formiranja modela dalji tok istraživanja se paralelno odvijao na laboratorijskim i na numeričkim modelima.



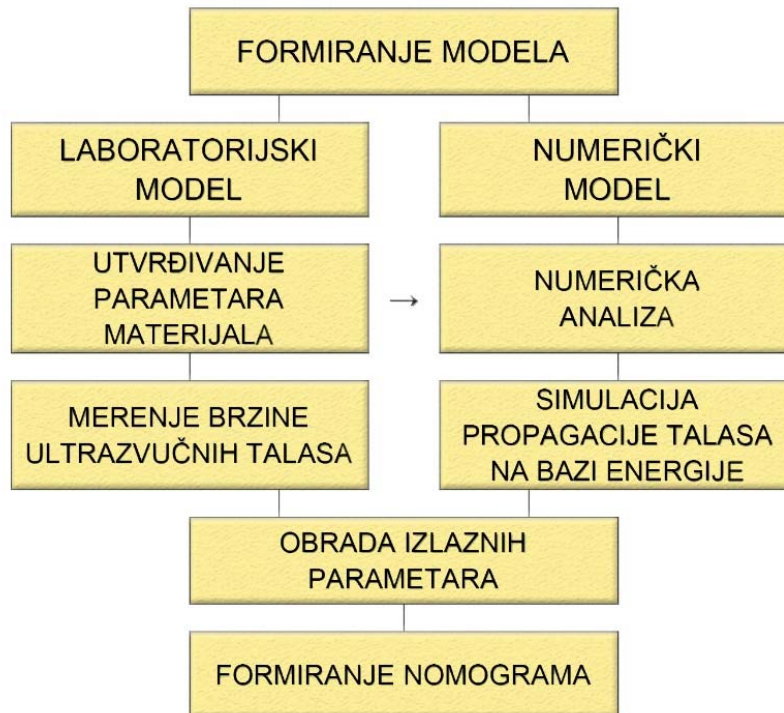
Slika 5.2 Usvojeni modeli sa različitim stepenom oštećenja

Laboratorijska ispitivanja obuvataju dve vrste merenja – merenja sa ciljem utvrđivanja karakteristika očvrstlog betona i merenja sa ciljem detekcije oštećenja na laboratorijskim modelima. Laboratorijski modeli su izrađeni u više serija, gde su za svaku od serija uzimana probna tela za utvrđivanje karakteristika očvrstlog betona, a dobijeni podaci korišćeni su kao ulazni parametri za numeričko modeliranje. Na prizmatičnim betonskim gredicama sa različitim stepenom oštećenja primenom ultrazvuka izvršena je detekcija oštećenja sa ciljem utvrđivanja ponašanja elementa u zavisnosti od stepena oštećenja. Na određenom broju gredica bez oštećenja sprovedena su merenja ultrazvukom tokom izlaganja gredica silama savijanja postepenim povećanjem inteziteta sile od nule, do pojave i propagacije prslina sve do loma elemenata. Tokom laboratorijskih ispitivanja korišćene su standardizovane metode ispitivanja. Detaljni opis formiranja laboratorijskog modela, utvrđivanja obima ispitivanja i postupka ispitivanja data su u poglavlju 5.4.

Za formiranje numeričkih modela primenjena je metoda konačnih elemenata (MKE) kao najpogodnija metoda za sprovođenje složenih numeričkih problema teorije konstrukcija. Na osnovu poznate geometrije modela, parametara materijala, položaja i veličine oštećenja, primenom MKE metode moguće je izvršiti neophodne simulacije propagacije ultrazvučnih talasa i na osnovu dobijenih podataka odrediti indeks oštećenja i utvrditi dalju propagaciju oštećenja odnosno buduće ponašanje elementa. Za formiranje modela i simulacije korišćen je softverski paket ABAQUS/Explicit koji u sebi ima veliku paletu materijala kao i „*open source code*“ koji daje mogućnost za slobodno modeliranje materijala. Softver poseduje i veliku paletu modela fizičkog ponašanja materijala kao i mogućnost modeliranja različitih vrsta simulacija.

Propagacija talasa simulirana je na bazi protoka energije talasa čija je promena praćena u određenim tačkama elementa. Promenom dinamičkog modula elastičnosti betona

dobijene su varijacije parametara prilikom promene stepena oštećenja. Na osnovu dobijenih izlaznih parametara formiran je originalni nomogram za određivanje procenta oštećenja i ocene stanja betonskih elemenata. Opis formiranja numeričkih modela i sprovedenih simulacija na modelima prikazan je u poglavlju 5.2. Tok eksperimentalnog i numeričkog istraživanja šematski je prikazan na slici 5.3.



Slika 5.3 Šematski prikaz toka eksperimentalnog istraživanja

5.1.1 FAKTORI OŠTEĆENJA I FAKTORI STANJA

Ako je posmatrana površina poprečnog preseka elementa A , oštećenje betonskog elementa se posmatra kao gubitak poprečnog preseka ΔA , a preostali deo preseka $A - \Delta A$ predstavlja kapacitet preostale površine poprečnog preseka betonskog elementa. *Procenat oštećenja* (PO) se može dobiti iz odnosa površine oštećenog preseka ΔA i prvobitne površine poprečnog preseka A , iz izraza:

$$PO = (\Delta A/A) \cdot 100 \quad (5.1)$$

ili se izraziti u bezdimenzionalnom obliku kao *faktor oštećenja* (FO):

$$FO = \Delta A/A \quad (5.2)$$

Procenat preostale površine preseka betonskog elementa (PP) dobija se iz izraza:

$$PP = (A - \Delta A)/A \cdot 100 = (1 - \Delta A/A) \cdot 100 \quad (5.3)$$

Faktor stanja (FS) je bezdimenzionalna vrednost preostale površine preseka:

$$FS = (A - \Delta A)/A = 1 - \Delta A/A \quad (5.4)$$

Iz izraza (5.1) i (5.2) => $FS = 1 - FO$ (5.5)

Kod elementa pravougaonog preseka dimenzija $b \times h$ sa pretpostavkom da je oštećenje u vidu zarezata jednakopodeljeno po širini preseka b , oštećenje se može posmatrati kao gubitak visine poprečnog preseka Δh (tabela 5.1).

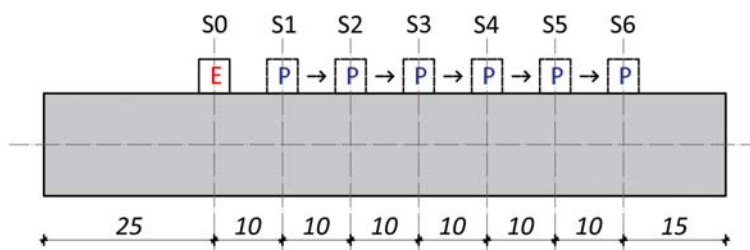
Tabela 5.1 Gubitak poprečnog preseka usled oštećenja

<i>PO</i>	<i>PP</i>	<i>FO</i>	<i>FS</i>
$(\Delta A/A) \cdot 100$	$(1-\Delta A/A) \cdot 100$	$\Delta A/A$	$1 - \Delta A/A$
$(\Delta h/h) \cdot 100$	$(1-\Delta h/h) \cdot 100$	$\Delta h/h$	$1 - \Delta h/h$

5.1.2 TEORIJSKA RAZMARANJA PROPAGACIJE TALASA I ODREĐIVANJE INDEKSA STANJA

Metoda detekcije oštećenja primenom propagacije talasa i na bazi indeksa oštećenja poznata je tek poslednjih 10 godina [177]. Indeks oštećenja se određuje na osnovu izlaznih signala koji se mogu dobiti numeričkim simulacijama ili laboratorijskim merenjem, a metoda se zasniva na pretpostavci postojanja dva stanja konstrukcije - *neoštećene* i *oštećene* konstrukcije. Analizom izlaznih signala može se odrediti energija izlaznog talasa a samim tim i stanje elementa. Tokom propagacije talasa model bez oštećenja ima veću energiju od modela sa oštećenjem, jer oštećenje sprečava slobodnu propagaciju talasa. Nailaskom na oštećenje dolazi do promene energije izlaznih talasa a time i do skretanja talasa sa prvobirnog pravca prostiranja i do pojave difrakcije, odnosno formiranja novih pravaca prostiranja talasa. Dolazi do pojave razlike u energiji izlaznih talasa što ukazuje na postojanje dva stanja modela na osnovu kog se detektuju oštećenja. Razlikom energije izlaznih talasa merenih za početno i posmatrano stanje, detektuje se razlika u oštećenjima odnosno propagacija oštećenja.

Za određivanje promene indeksa oštećenja, odnosno promene indeksa stanja elementa u zavisnosti od veličine oštećenja odnosno promene dinamičkog modula elastičnosti i poasonovog koeficijenta korišćene su numeričke simulacije primenom softverskog paketa ABAQUS/Explicit na bazi eksplicitne metode konačnih elemenata. Modeliranje prostiranja talasa je izvršeno sa pretpostavkom da je betonska greda izotropna, homogena i elastična sredina. Pobuda elementa je urađena putem *aktuatora*²⁷, a prijem signala preko *senzora* postavljenih na mernim mestima (*slika 5.4*).



Slika 5.4 Položaj aktuatora i senzora na elementu

Aktuator je modeliran korišćenjem graničnih uslova pomeranja na površini kontakta aktuatora i modela. Funkcija pobude upravno na dodirnu površinu aktuatora i betona definisana je za vreme $t=3.5 \cdot 10^{-5}$ s sa centralnom frekvencom od 100 kHz. Na ovaj način urađena je pobuda Rejljevih talasa (eng. *Rayleigh wave*) po površini betonske grede, kao i prostiranje longitudinalnih i transverzalnih prostornih talasa unutar elementa. Rasprostiranje talasa se kreće u sva tri pravca uz dominantno prostiranje po dužini grede.

²⁷ Aktuator (eng. *Actuator*, lat. *Actuare*) – Izvršiti, ostvariti

Ukupni talas dobija se superponiranjem pojedinačnih komponenti talasa, a praćenjem promene energije ukupnog talasa izlaznog signala može se odrediti nastanak oštećenja. Primenjena mreža konačnih elemenata sadrži 16 konačnih elemenata po jednoj talasnoj dužini, što omogućava dosta dobro tretiranje izlaznih signala. Ukupno trajanje simulacije je $2.0 \cdot 10^{-3}$ s, dok je stabilni vremenski korak usvojen $1.0 \cdot 10^{-7}$ s. Analizom dekompozicije signala (eng. *Wavelet Decomposition Analysis*)²⁸ kod linijskih betonskih elemenata svaki izlazni signal senzora se može rastaviti na 2^n signala. „Wavelet“ dekompozicijom se svaki signal rastavlja na dva signala (detalj i aproksimacija). Izlazni signal se može dekomponovati n puta u 2^n signal setova u obliku [178]:

$$Y_j = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_{2^n}), \quad (5.6)$$

pri čemu se svaki signal može predstaviti na sledeći način:

$$Y_j = (y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,p}, \dots, y_{j,m}) \quad (5.7)$$

gde je:

- m - broj merenih podataka vremenskog signala $m=2^n$
- $j=1,2,3,\dots,2^n$ – broj dekomponovanih signala
- n - nivo dekompozicije signala, gde uzima jednu od vrednosti $n=1,2,3,\dots$

Ukupna energija izlaznih dekomponovanih signala $E_{i,j}$ se dobija kao zbir kvadrata amplitude izlaznih signala iz izraza:

$$E_{i,j} = y_{j,1}^2 + y_{j,2}^2 + \dots + y_{j,p}^2 + \dots + y_{j,m}^2 \quad (5.8)$$

gde je:

- i - vremenski indeks sa vrednostima $i=1,2,3,4,\dots$
- $j=1,2,\dots,m=1,2,\dots, 2^n$ - frekvencijski opseg
- p - tekući broj merenih podataka vremenskog signala ($p=1,2,\dots,m$)

Za svaki od uzorka vektor energije se dobija preko energije dekompozicije svih signala:

- za neoštećeni uzorak („nulto čitanje“)

$$E_{0,j} = (E_{0,1}, E_{0,2}, \dots, E_{0,j}, \dots, E_{0,2^n}) \quad (5.9)$$

- za oštećeni uzorak (čitanje koje odgovara vremenu t)

$$E_{t,j} = (E_{t,1}, E_{t,2}, \dots, E_{t,j}, \dots, E_{t,2^n}) \quad (5.10)$$

Za potrebe analize detekcije oštećenja linijskih elemenata, definisan je indeks oštećenja IO_E preko ukupne energije izlaznih signala kao koren srednje kvadratnih odstupanja (eng. *root-mean-square deviation damage index*) [179]:

$$IO_E = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (E_{t,j} - E_{0,j})^2}{\sum_{j=1}^m (E_{0,j})^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{2^n} (E_{t,j} - E_{0,j})^2}{\sum_{j=1}^{2^n} (E_{0,j})^2}} \quad (5.11)$$

Indeks stanja IS_E je sračunat iz izraza:

$$IS_E = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (E_{t,j} - E_{0,j})^2}{\sum_{j=1}^m (E_{0,j})^2}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{2^n} (E_{t,j} - E_{0,j})^2}{\sum_{j=1}^{2^n} (E_{0,j})^2}} \quad (5.12)$$

²⁸ Primenjeni model je baziran na sistemskim istraživanjima mehanike adaptivnih sistema „Arbeitsgruppe Mechanik adaptiver Systeme“ Institut für Computational Engineering, Ruhr-Universität Bochum

5.1.3 PRIMENA METODE ULTRAZVUKA

Tokom laboratorijskih ispitivanja za određivanje promene indeksa oštećenja, odnosno promene indeksa stanja elementa u zavisnosti od veličine oštećenja, odabrana je metoda ultrazvuka. Ova metoda se veoma efikasno koristi za određivanje homogenosti strukture betona, detektovanje i lokalizovanje defekta i oštećenja, određivanje debljine betonskih elemenata ili pozicioniranje armature. Metoda spada u grupu akustičkih metoda i zasnovana je na utvrđivanju svojstva materijala na osnovu kretanja ultrazvučnih talasa.



Slika 5.5 Intervali infrazvuka, zvuka i ultrazvuka

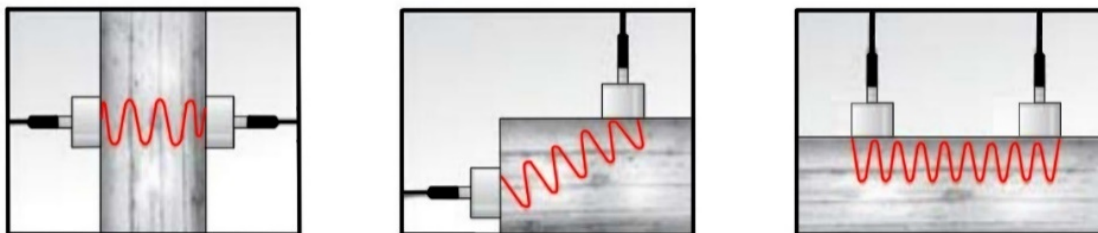
Ultrazvučni talasi nastaju generisanjem spoljnog izvora energije u unutrašnju mehaniku energiju koja se kroz materijal prenosi u vidu sitnih vibracija odnosno mehaničkih talasa. Na slici 5.5 je prikazano područje zvuka i opseg koji obuhvata ultrazvuk. Ultrazvuk obuhvata frekvencije od 20 kHz do 10 GHz koja je iznad čujnog praga ljudskog uva. Ultrazvučni talasi su po prirodi harmonijski talasi koji se mogu distributovati kao longitudinalni (*L-talasi*), transferzalni (*T-talasi*) ili površinski talasi. Talasi se kroz materijal prenose ujednačeno do promene akustične impendace pri čemu dolazi do njihovog reflektovanja o granična područja koja su u dodiru sa vazduhom tj. na mestima spoljnih površina, šupljina i pukotina. Stepem refleksije uglavnom zavisi od fizičkog stanja materijala na prelazu, a manje od osobina samog materijala.

Primenom metode ultrazvuka tokom ispitivanja materijala mere se dve osnovne veličine: vreme prostiranja talasa i amplitude talasa. Merenjem vremena prolaska talasa na zadatom rastojanju dobija se brzina talasa. Pri kontaktu sa graničnim područjem dolazi do smanjenja rastojanja, samim tim i smanjenja vremena prolaska i promene brzine talasa. Promenom amplitude talasa koja zavisi od stepena pobude, gustine materijala i vremena prolaska može se odrediti položaj i veličina prekida ili meriti prigušenje materijala. Na osnovu direktno očitanih brzina kretanja talasa može se uspostaviti kriterijum za određivanje kvaliteta betona. Sa podacima brzine kretanja talasa i gustine betona korišćenjem faktora korekcije računskim putem se indirektno može odrediti čvrstoća na pritisak, dinamički modul elastičnosti i Poasonov koeficijent.

Kod homogenih materijala visina emitovanog zvuka je ujednačena, a brzina talasa je jednostavna funkcija modula elastičnosti (E), Poasonovog koeficijenta (ν) i gustine (ρ) materijala. Zbog izrazite nehomogenosti betona ova veza nije toliko jednostavna i konzistentna. Kontinuitet posmatranog elementa se posmatra na osnovu rasipanja izmerenih brzina, odnosno razlike u količinama emitovanih i primljenih zvučnih talasa.

Postoje različite tehnike ultrazvučnog ispitivanja betona [56]. Najčešće se koristi aparatura sa sondama koje u sebi sadrže piezo materijale u vidu kvarcnih kristala. Kao piezo materijali koriste se i piezoelektrična keramika ili piezoelektrični polimeri (kombinacija keramike i polimera). Aparatura se sastoji od dve sonde- za emitovanje i prijem zvučnih talasa i uređaja za očitavanje brzine kretanja talasa. Pobudom izazvanom električnim impulsima visokog napona kod piezokristala dolazi do stvaranja zvučnih

talasa usled suprotnog *piezoelektričnog efekta* – pri čemu se usled skupljanja i širenja piezo materijala električna energija generiše u mehaničku učestalost od 500-1000 MHz i rasprostire kroz ispitivani element. Električni napon može biti u vidu veoma kratkog vremenskog signala (eng. *tone burst hanning windowed signal*), ili kontinuiran kroz vreme (eng. *sweep sine signal*). Prodorom ultrazvučnih talasa u materijal usled akustične impenanse dolazi do refleksije talasa od prelazne površine. Deo reflektovane energije se vraća nazad do sonde i usled direktnog piezoelektričnog efekta transformiše talase u električni napon i daju izlazne signale u vidu brzine kretanja talasa, dok se deo talasa rasipa. Sonde poseduju svojstva prijema i davanja signala što daje mogućnost očitavanja signala u bilo kom smeru.



Slika 5.6 Propagacija talasa ultrazvuka

Na slici 5.6 prikazan je način propagacije i očitavanje ultrazvučnih talasa u zavisnosti od položaja sonde. Ukoliko su sonde postavljene u položaju jedna naspram druge onda je merenje direktno, ukoliko se nalaze pod uglom merenje je polu direktno dok ako se sonde nalaze sa iste strane elementa merenje je indirektno. Mogućnost indirektnog merenja odnosno merenja sa iste strane elementa predstavlja posebnu pogodnost primene metode ultrazvuka. Izvor emitovanja zvuka je fiksiran u jednoj tački, dok se prijemna sonda pomera duž prave linije u jednakim intervalima i ujednačenim razmacima. U cilju veće preciznosti, merenja se vrše sa korakom pomeranja sonde od 10-20 cm. Merenjem duž nekoliko paralelnih linija, formira se cela mreža linija (eng. *“data grid”*), koja daje mapu (šemu) unutrašnjosti konstrukcije na posmatranom delu [56].

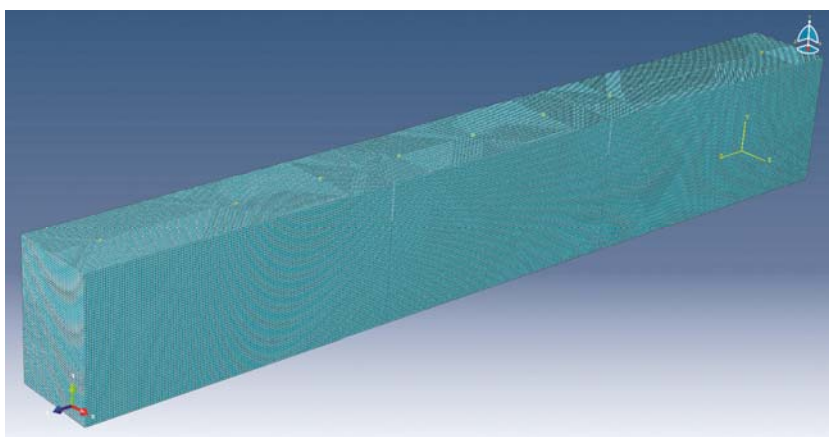
Kako bi se izbegao šum i lažni eho koji se javlja usled velike razlike u akustičnoj impedansi vazduha i krutih tela, sonde moraju da dobro prijanjaju na površinu ispitivanog uzorka. Za ispunjavanje međuprostora između sonde i kontaktne površine betona koriste se različita kontaktna sredstva najčešće na uljanoj bazi.

Ultrazvučna ispitivanja karakteriše izuzetna osetljivost i preciznost. Većina ultrazvučnih uređaja radi u frekventnom opsegu od 0,1 do 25 MHz, dok se za potrebe ispitivanja betona uglavnom se koriste kratke talasne dužine frekvence do 6 MHz. Vreme prostiranja talasa se meri automatski sa visokom tačnošću. Ultrazvukom se precizno mogu detektovati predmeti debljine 0.5 – 300 mm ili otkriti sitne pukotine duge 0.4mm i široke 0.001mm; oštećenja se mogu detektovati do dubine od 2 m od površine. Usled prisutnih varijacija u pogledu gustine i modula elastičnosti betona usled čega je potrebno razmatrati udeo pojedinačnih komponenata u ukupnom volumenu [57].

U cilju provere i korigovanja dobijenih podataka, merenja ultrazvukom se često vrše u kombinaciji sa *sklerometrom* [180].

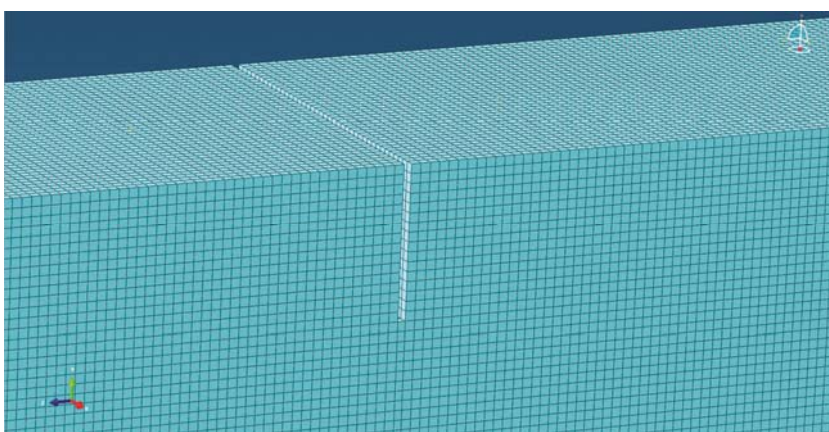
5.2 NUMERIČKI MODEL

Numerički modeli su formirani korišćenjem eksplicite metode konačnih elemenata (EMKE) kao 3D modeli primenom softverskog paketa ABAQUS/Explicit. Usvojena veličina konačnog elementa je 2,0 mm. Materijalni model je usvojen kao linearno elastični materijal sa *Rejljevim* prigušenjem, kako bi se kompenzovala mikrostruktura betona. Kreirana je eksplicitna dinamička simulacija sa linearnim i kvadratnim prostornim viskoznim parametrima u vremenskoj dužini trajanja simulacije 2.0×10^{-3} (s). Stabilni vremenski korak primenjen u numeričkim modelima je manji od kritičnog vremenskog koraka za sve analizirane modele. Modeliranjem u softverskom paketu ABAQUS/Explicit formirana je mreža konačnih elemenata korišćenjem strukturne kontrolne mreže (eng. *structured mesh control*).



Slika 5.7. Mrežni numerički model

Na slici 5.7 prikazan je omreženi 3D model betonske grede bez oštećenja. Modeliranje oštećenja odnosno zareza u modelu je izvedeno primenom *extrude* opcije u geometrijskom oblikovanju modela (slika 5.8).



Slika 5.8 Modeliranje pukotine u omreženom numeričkom modelu

Parametaraska studija propagacije talasa sporvedena je na modelima usvojenih dimenzija 100cm x 15cm x 10 cm za sledeće slučajeve:

- **model bez oštećenja** – osnovni i referentni model; dinamički modul elastičnosti $E=40 \text{ GPa}$ i poasonov koeficijent betona $\nu=0,10$ – ukupno 1 model
- **modeli sa jednim oštećenjem** u vidu vertikalnog zareza u ravni poprečnog preseka čija dubina varira u zavisnosti od modela od 2cm do 10 cm sa korakom

2 cm; dinamički modul elastičnosti $E=40\text{GPa}$ i poasonov koeficijent betona $\nu=0,10$ - ukupno 5 modela.

- **modeli sa dva oštećenja** u vidu verikalnih zareza u ravni poprečnog preseka jednake dubine 4 cm i 4 cm i različite dubine 6 cm i 10 cm; dinamički modul elastičnosti $E=40\text{GPa}$ i poasonov koeficijent betona $\nu=0,10$ - ukupno 2 modela
- **modeli sa različitim dinamičkim modulima elastičnosti** $E_1=48\text{GPa}$, $E_2=44\text{GPa}$, $E_0=40\text{GPa}$, $E_3=36\text{GPa}$ i $E_4=32\text{GPa}$ - ukupno 5 modela sa jednim oštećenjem od 4 cm
- **modeli sa različitim poasonovim koeficijentom** $\nu_0=0,10$, $\nu_1=0,15$ i $\nu_2=0,20$ - ukupno 3 modela sa jednim oštećenjem od 4 cm

Geometrijski parametri modela sa različitim stepenom oštećenja prikazani su u tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Geometrijski parametri oštećenih elemenata

DUBINA OŠTEĆENJA Δh [cm]	PREOSTALA VISINA ELEMENTA h [cm]	PO $(\Delta A/A) \cdot 100$ [%]	PP $(A-\Delta A)/A/100$ [%]	FO $\Delta A/A$	FS $(A-\Delta A)/A$
0	15	0,00	100	0,00	1
2	13	13,333	86,667	0,133	0,867
4	11	26,667	73,333	0,267	0,733
6	9	40,000	60,000	0,400	0,600
8	7	53,333	46,667	0,533	0,467
10	5	66,667	33,333	0,667	0,333

Analiza izlaznih signala se vrše na označenim mernim mestima, gde se na osnovu razlike emitovane energije i energije izlaznog signala na modelima bez oštećenja i na modelima sa oštećenjem u zavisnosti od položaja mernog mesta " S_j " i dubine oštećenja dobija indeks oštećenja. Vrednosti indeksa oštećenja se dobijaju iz izraza:

$$IO = DEM_{\Delta h}^{S_j} \quad (5.13)$$

Vrednosti indeksa oštećenja se kreću od 0 za neoštećeni nosač do 1 za potpuno oštećeni nosač. Indeks preostalog preseka nosača naziva se *Indeks stanja (IS)* koji se izražava:

$$IS = 1 - DEM_{\Delta h}^{S_j} \quad (5.14)$$

gde je:

- DEM - oznaka za indeks oštećenja
- S_j - broj mernog mesta senzora ($j=0,1,2,3,4,5,6$)
- Δh - dubina oštećenja (tabela 5.3)

Kod modela sa jednim oštećenjem dubina oštećenja je označena sa $\Delta h=A$, dok kod modela sa dva oštećenja je označena sa $\Delta h=A,B$. Indeks stanja se dobija iz izraza :

$$IS = 1 - DEM_{A,B}^{S_j} \quad (5.15)$$

gde je:

- A – indeks koji označava dubinu prvog oštećenja u cm od aktuatora prema sensorima
- B - indeks koji označava dubinu drugog oštećenja u cm

Stepen oštećenja i broj modela sa odgovarajućim oštećenjem prikazan je u tabeli 5.4.

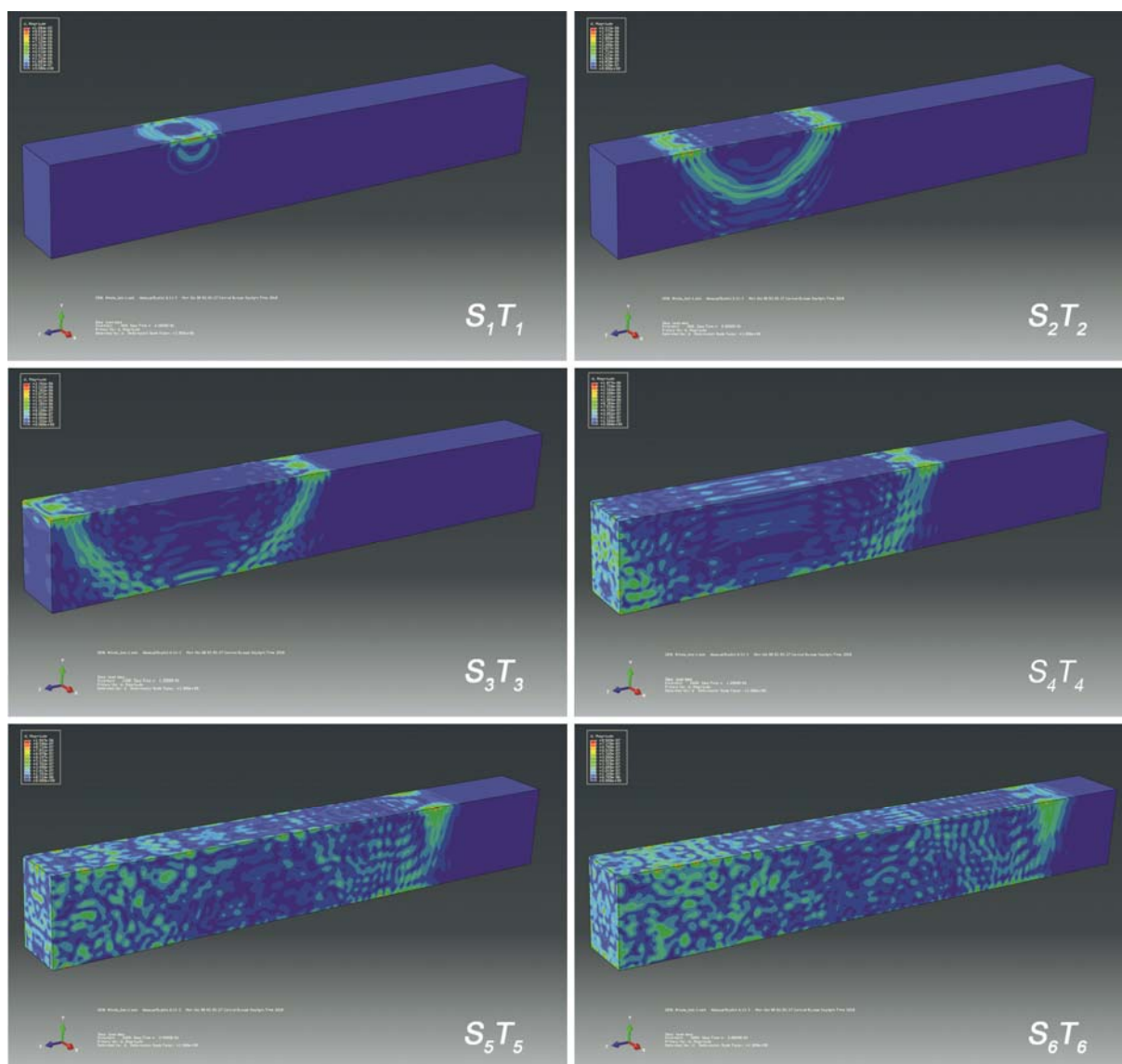
Tabela 5.3 Dubine oštećenja Δh za vrednosti A i B

OPIS OŠTEĆENJA	BROJ MODELA	DUBINA OŠTEĆENJA
BEZ OŠTEĆENJA	1	$\Delta h = 0$
JEDNO OŠTEĆENJE	5	$\Delta h = A (2-4-6-8-10)$
DVA OŠTEĆENJA	2	$\Delta h = A, B (4,4 -6, 10)$

Uticao položaja i orijentacije pukotina utiče na promenu indeksa oštećenja sa tek nekoliko procentata, na osnovu čega se zaključuje da indeks oštećenja u najvećoj meri zavisi od dubine oštećenja [178].

5.2.1 MODELI SA RAZLIČITIM STEPENIMA OŠTEĆENJA

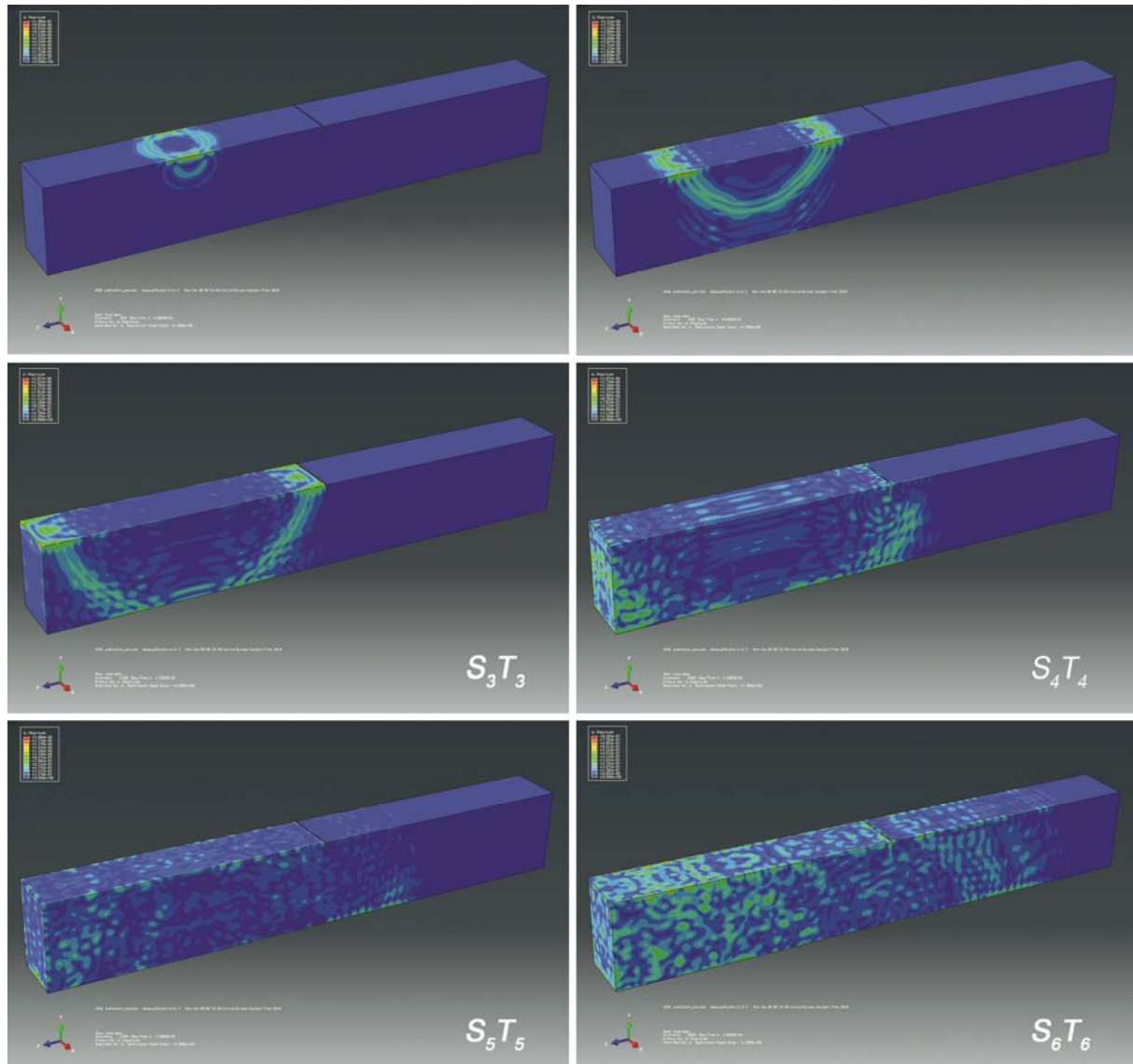
Na numeričkim modelima usvojen je položaj mernih mesta - *aktuatora* za pobudu talasa i *senzora* za prijem signala (*slika 5.4*). Aktuator i senzori su pozicionirani sa gornje strane elementa. Aktuator se nalazi na tzv. „nultom“ mernom mestu sa oznakom S_0 i njegov položaj se ne menja, dok merna mesta na kojima se nalaze senzori imaju oznake S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 i S_6 i postavljena su na međusobnom rastojanju 10 cm.



Slika 5.9 Propagacija talasa na modelu bez oštećenja

Na slici 5.9 prikazana je propagacija talasa za sve položaje senzora S_1 - S_6 u različitim vremenskim intervalima T_1 - T_6 kod modela bez oštećenja. Kod modela bez oštećenja talasi se kreću slobodno u sva tri pravca uz dominantno prostiranje po dužini grede i odbijaju se samo od ivice elementa.

Kod modela sa jednim oštećenjem aktuator i senzori S_1 i S_2 se nalaze ispred oštećenja dok su senzori S_3 , S_4 , S_5 i S_6 su postavljeni iza oštećenja, a oštećenje se nalazi između senzora S_2 i S_3 na jednakom razmaku od 5 cm. Propagacija talasa se odvija na taj način što se jedan deo talasa odbija od oštećenja i vraća nazad smanjujući brzinu kretanja talasa odnosno smanjujući energiju izlaznog signala, dok drugi deo talasa prolazi pored oštećenja i nastavlja da se slobodno kreće do senzora.



Slika 5.10 Propagacija talasa na modelu sa jednim oštećenjem u sredini $\Delta h=2$ cm

Na slici 5.10 prikazana je propagacija talasa za sve položaje senzora u različitim vremenskim intervalima za model sa jednim oštećenjem u sredini dubine $\Delta h=2$ cm. Za ostale numeričke modele sa jednim oštećenjem propagacija talasa data je u prilogima:

- model sa jednim oštećenjem dubine $\Delta h=4$ cm prikazan je u *prilogu 1*
- model sa jednim oštećenjem dubine $\Delta h=6$ cm prikazan je u *prilogu 2*

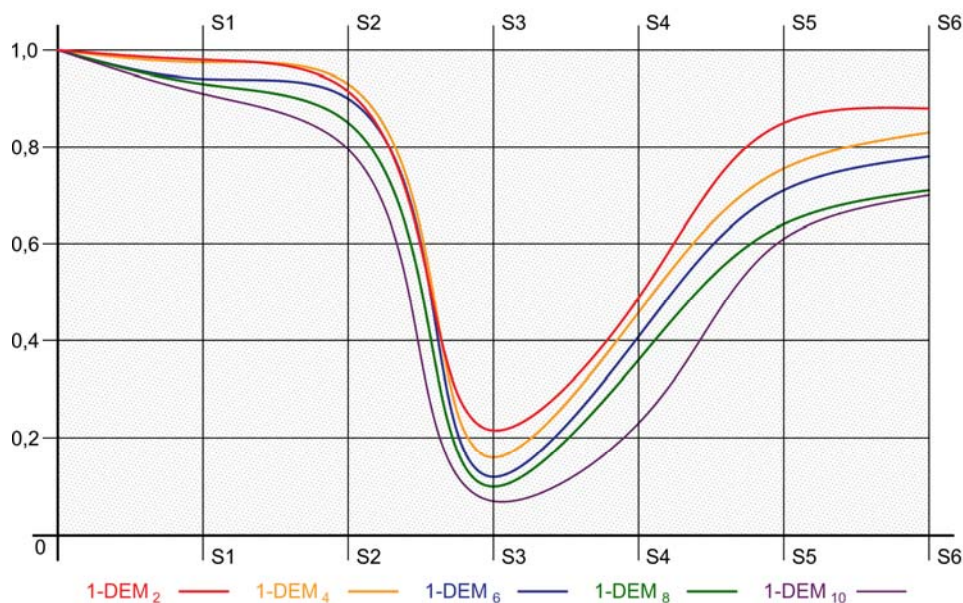
- model sa jednim oštećenjem dubine $\Delta h=8$ cm prikazan je u *prilogu 3*
- model sa jednim oštećenjem dubine $\Delta h=10$ cm prikazan je u *prilogu 4*

Na osnovu razlike energije izlaznog signala modela bez oštećenja i modela sa jednim poznatim oštećenjem, na određenom mernom mestu sračunat je indeks oštećenja $DEM_{\Delta h}^{S_j}$ odnosno indeks stanja $1-DEM_{\Delta h}^{S_j}$ (tabela 5.4).

Tabela 5.4 Indeksi stanja na modelima sa jednim oštećenjem

ABAQUS $1-DEM_{\Delta h}^{S_j}$	INDEKS STANJA $1-DEM_{i,A}^{S_j}$					
	$1-DEM_{i,A}^{S_1}$	$1-DEM_{i,A}^{S_2}$	$1-DEM_{i,A}^{S_3}$	$1-DEM_{i,A}^{S_4}$	$1-DEM_{i,A}^{S_5}$	$1-DEM_{i,A}^{S_6}$
$1-DEM_2^{S_j}$	0,9803	0,9153	0,2187	0,4794	0,8486	0,8818
$1-DEM_4^{S_j}$	0,9765	0,9292	0,1601	0,4567	0,7556	0,8342
$1-DEM_6^{S_j}$	0,9393	0,9007	0,1285	0,4076	0,7139	0,7854
$1-DEM_8^{S_j}$	0,9296	0,8538	0,1003	0,3630	0,6380	0,7174
$1-DEM_{10}^{S_j}$	0,9094	0,7970	0,0690	0,2382	0,6179	0,6998

Zavisnost dobijenih vrednosti indeksa stanja od položaja senzora za sve modele sa jednim oštećenjem prikazana je dijagramom na slici 5.11.

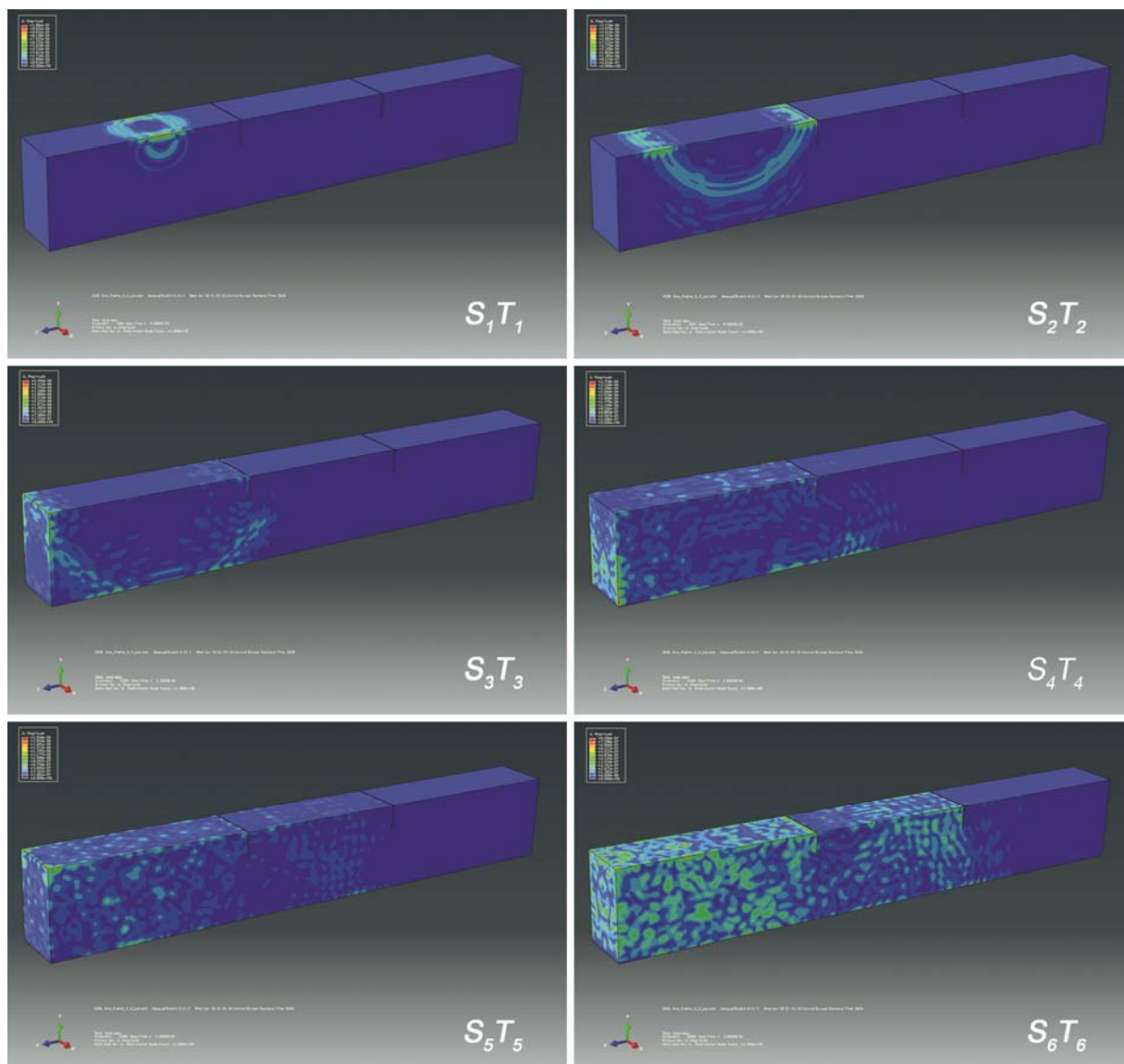


Slika 5.11 Dijagram zavisnosti vrednosti indeksa stanja od položaja senzora za modele sa jednim oštećenjem

Na osnovu dobijenih vrednosti indeksa stanja na dijagramu se vidi da je u zoni senzora S_1 vrednost bliska jedinici, sa blagim padom vrednosti u zoni senzora S_2 . U zoni oštećenja između senzora S_2 i S_3 nastaje nagli pad vrednosti indeksa stanja što ukazuje na dektovanje oštećenja. Nakon oštećenja prolaskom talasa kroz oblast "geometrijske senke", nastaje naglo povećanje indeksa stanja preko senzora S_4 sve do senzora S_5 kad nastaje "smirivanje" tih vrednosti. U daljem toku istraživanja za vremensko praćenje propagacije oštećenja uzeti su numerički podaci dobijeni na lokaciji senzora S_5 .

Kod modela sa dva oštećenja, oštećenja su pozicionirana između senzora S_1 i S_2 i senzora S_4 i S_5 na jednakom među razmaku od 5 cm. Propagacijom talasa jedan deo

talasa se odbija od prvog oštećenja i vraća nazad, drugi deo talasa se kreće ka drugom oštećenju i vraća nazad, a treći deo talasa nastavlja da se slobodno kreće smanjujući energiju izlaznog signala.



Slika 5.12 Propagacija talasa na modelu sa dva oštećenja $\Delta h=4-4$ cm

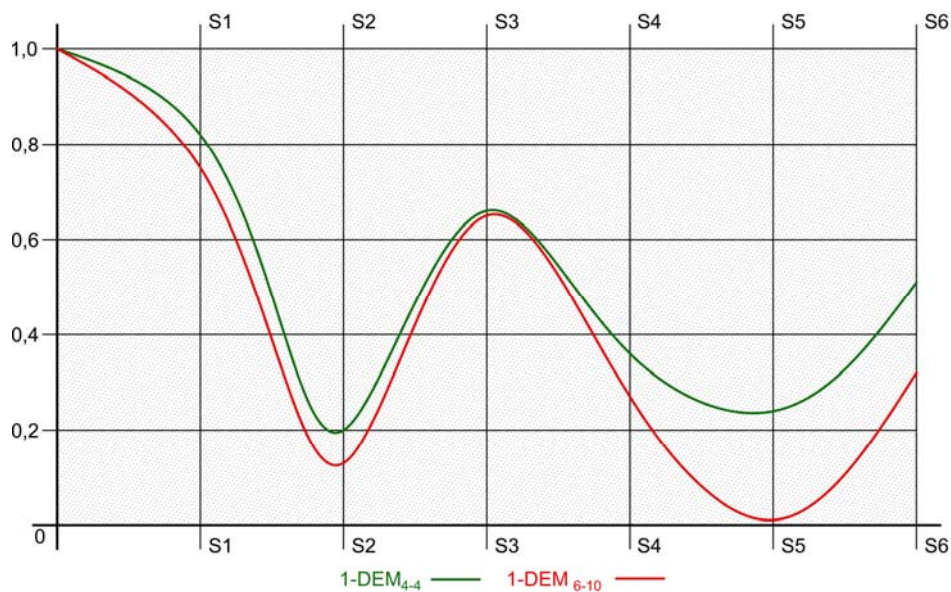
Na slici 5.12 prikazana je propagacija talasa za sve položaje senzora u različitim vremenskim intervalima za numerički model sa dva oštećenja $\Delta h=4-4$ cm. Propagacija talasa za numerički model sa dva oštećenja $\Delta h=6-10$ cm, prikazana je u prilogu 5.

Na osnovu razlike energije izlaznog signala modela sa dva oštećenje na osnovu razlike energije izlaznog signala prikazane su vrednosti indeksa stanja $1-DEM_{A,B}^{S_j}$ (tabela 5.6).

Tabela 5.5 Indeksi stanja na modelima sa dva oštećenja

ABAQUS $1-DEM_{\Delta h}^{S_j}$	INDEKS STANJA $1-DEM_{i,A,B}^{S_j}$					
	$1-DEM_{i,A,B}^{S_1}$	$1-DEM_{i,A,B}^{S_2}$	$1-DEM_{i,A,B}^{S_3}$	$1-DEM_{i,A,B}^{S_4}$	$1-DEM_{i,A,B}^{S_5}$	$1-DEM_{i,A,B}^{S_6}$
$1-DEM_{4,4}^{S_j}$	0.8198	0,1989	0.6587	0.3624	0.2395	0,5121
$1-DEM_{6,10}^{S_j}$	0.7452	0.1320	0.6507	0.2658	0.0505	0,3292

Zavisnost dobijenih vrednosti indeksa stanja od položaja senzora za sve modele sa dva oštećenja prikazana je dijagramom na slici 5.13.



Slika 5.13 Dijagram zavisnosti vrednosti indeksa stanja i položaja senzora za dva modela sa dva različita oštećenja 4-4 cm i 6-10cm

Na osnovu dijagrama uočava se isti trend krivih linija na osnovu čega se može odrediti zona jednog i drugog oštećenja. Vrednosti indeksa stanja između senzora S_1 i S_2 naglo padaju, a zatim rastu do senzora S_3 . U zoni drugog oštećenja između senzora S_4 i S_5 vrednost indeks stanja pada do senzora S_5 , a onda počinje da raste prema senzoru S_6 . Zona pada vrednosti indeksa stanja ukazuje postojanje (detekciju) oštećenja, a zona rasta pokazuje zonu bez oštećenja.

U *prilogu 6* prikazani su izlazni signali senzora S_5 za neoštećeni i oštećeni model.

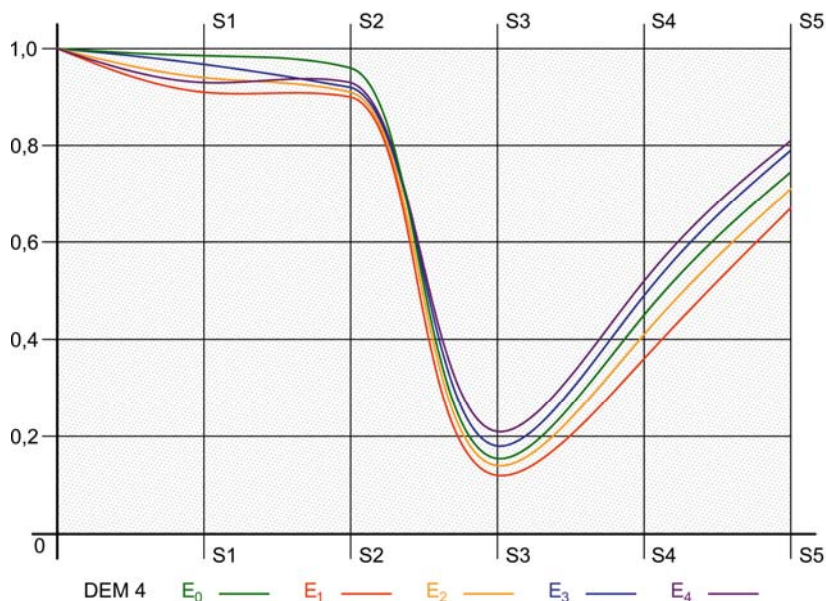
5.2.2 MODELI SA RAZLIČITIM DINAMIČKIM MODULIMA ELASTIČNOSTI

Parametarskom studijom obuhvaćen je uticaj promene dinamičkog modula elastičnosti E_d na modelima sa jednim oštećenjem u sredini od 4 cm. Za osnovnu vrednost dinamičkog modula elastičnosti tj. „*nulto čitanje*“ uzeta je vrednost $E_d=40$ GPa, a razmatrani su sledeći slučajevi promene parametara: povećane vrednosti E_d za 10% gde je $E_d=44$ GPa i povećane za 20%, gde je $E_d=48$ GPa, smanjene vrednosti E_d za 10% gde je $E_d=36$ GPa i smanjene za 20%, gde je $E_d=32$ GPa, na osnovu kojih su određeni indaksi stanja prikazani u tabeli 5.6.

Tabela 5.6 Indaksi stanja na modelima sa različitim dinamičkim modulima elastičnosti

ABAQUS $1-DEM_{\Delta h}^{S_j}-E_n$ $n=0,1,2,3,4$	INDEKS STANJA $1-DEM_{i,A}^{S_j}$				
	$1-DEM_{i,A}^{S_1}$	$1-DEM_{i,A}^{S_2}$	$1-DEM_{i,A}^{S_3}$	$1-DEM_{i,A}^{S_4}$	$1-DEM_{i,A}^{S_5}$
$1-DEM_4^{S_j}-E_1$	0,9383	0,9120	0,1409	0,4158	0,7141
$1-DEM_4^{S_j}-E_2$	0,9160	0,9057	0,1245	0,3677	0,6753
$1-DEM_4^{S_j}-E_0$	0,9765	0,9292	0,1601	0,4567	0,7556
$1-DEM_4^{S_j}-E_3$	0,9758	0,9189	0,1826	0,4896	0,7914
$1-DEM_4^{S_j}-E_4$	0,9280	0,9321	0,2079	0,5229	0,8127

Zavisnost dobijenih vrednosti indeksa stanja i položaja senzora za pet modela sa jednim oštećenjem i različitim vrednostima dinamičkog modula elastičnosti prikazana je dijagramom na slici 5.14.



Slika 5.14 Dijagram zavisnosti vrednosti indeksa stanja i položaja senzora za pet modela sa jednim oštećenjem 4cm i različitim vrednostima dinamičkog modula elastičnosti

Familije krivih linija za sva pet modela ima sličnu formu. Geometrijsko oštećenje od 4 cm ima znatno veći uticaj na vrednost indeksa stanja od promene dinamičkog modula elastičnosti za $\pm 20\%$. Učešće promena modula elastičnosti za 20% odražava se na promenu indeksa stanja izazvanog oštećenjem sa najviše 7,55%.

5.2.3 MODELI SA RAZLIČITIM POASONOVIM KOEFICIJENTIMA

Parametarskom studijom obuhvaćen je uticaj promenljivosti poasonovog koeficijenta koji je analiziran na modelima sa jednim oštećenjem u sredini od 4 cm. Numerički model sadrži 5 mernih mesta - senzora koji su raspoređeni na međusonom razmaku od 10 cm (slika 5.4). Razmatrani su modeli sa različitim poasonovim koeficijentima čije su vrednosti $\nu=10$, $\nu=15$ i $\nu=20$ na osnovu kojih su određeni indeksi stanja (tabela 5.7). Na osnovu prikazanih vrednosti uočavaju se minorna odstupanja za položaj senzora S_5 , pa se smatra da se uticaj poasonovog koeficijenta, u ovoj parametarskoj studiji, može zanemariti.

Tabela 5.7 Indeksi stanja na modelima sa različitim poasonovim koeficijentima

ABAQUS,En $1 - DEM_{\Delta h}^{S_j} - P_n$ $n=0,1,2$	INDEKS STANJA $1 - DEM_{i,A}^{S_j}$				
	$1 - DEM_{i,A}^{S_1}$	$1 - DEM_{i,A}^{S_2}$	$1 - DEM_{i,A}^{S_3}$	$1 - DEM_{i,A}^{S_4}$	$1 - DEM_{i,A}^{S_5}$
$1 - DEM_4^{S_j} - P_1$	0,9855	0,9569	0,1576	0,4533	0,7463
$1 - DEM_4^{S_j} - P_0$	0,9765	0,9292	0,1601	0,4567	0,7556
$1 - DEM_4^{S_j} - P_2$	0,9046	0,9346	0,1547	0,4498	0,7407

5.2.4 VREMENSKI ZAVISNI FAKTORI OŠTEĆENJA I FAKTORI STANJA

Prirodno je da se oštećenja pojavljuju i povećavaju tokom vremena i da svojom veličinom mogu da, u određenom trenutku, ugroze sigurnost i funkcionalnost konstrukcije. Promena oštećenja može se izraziti preko gubitka visine $\Delta h(t)$ ili površine $\Delta A(t)$ poprečnog preseka kao promenljive zavisne od vremena u vidu faktora oštećenja preseka:

$$FO(t) = \frac{\Delta h(t)}{h} = \frac{\Delta A(t)}{A} \quad (5.16)$$

Faktor stanja betonskog elementa u opštem slučaju može se predstaviti matematičkim regresionim modelom kao vremenski zavisna veličina na osnovu sledećeg izraza:

$$FS(t) = 1 - FO(t) = 1 - \frac{\Delta h(t)}{h} = 1 - \frac{\Delta A(t)}{A} \quad (5.17)$$

gde je t tekuće vreme upotrebe objekta.

Faktor oštećenja je stalno rastuća, a faktor stanja je stalno opadajuća funkcija vremena za sve vrednosti vremena koje važe do kraja upotrebnog veka T , pri čemu je $0 \leq t \leq T$. Vrednost oštećenja raste tokom vremena sve do dostizanja kritične vrednosti oštećenja Δh_{kr} pri kojoj se dovodi u pitanje nosivost i funkcionalnost konstrukcije, a vremenski period pri kome je nastalo kritično oštećenje je upotrebnii vek konstrukcije.

Ako je vreme $t=t_{kr}$ pri kome nastaje kritično oštećenje Δh_{kr} , onda je $t_{kr}=T=const$. Oštećenja $\Delta h(t)$ i $\Delta A(t)$ se mogu predstaviti kao stepene funkcije vremena (poglavljje IV):

$$\Delta h(t) = \Delta h_{kr} \left(\frac{1}{T} \right)^a \cdot t^a \quad (5.18)$$

$$\text{odnosno} \quad \Delta A(t) = \Delta A_{kr} \left(\frac{1}{T} \right)^a \cdot t^a \quad (5.18a)$$

gde su:

- Δh_{kr} - kritično oštećenje kao gubitak visine poprečnog preseka
- ΔA_{kr} - kritično oštećenje kao gubitak površine poprečnog preseka
- a - eksponent koji zavisi od brzine promene oštećenja tokom vremena:
 - $a=1$ označava proces proporcionalnosti oštećenja i vremena tokom upotrebe elementa i predstavlja referentnu vrednost u ovom istraživanju.
 - $a < 1$ pokazuje brže procese oštećenja, a za vrednost eksponenta
 - $a > 1$ pokazuje sporije procese oštećenja.
- $\frac{\Delta h(t)}{t^a} = \Delta h_{kr} \left(\frac{1}{T} \right)^a = const$
- $\frac{\Delta A(t)}{t^a} = \Delta A_{kr} \left(\frac{1}{T} \right)^a = const$

Funkcija faktora stanja $FS(t)$ može se tretirati kao funkcija preostale nosivosti $g(t)$ konstrukcije definisane izrazom (4.188) i (4.197a). Na osnovu izraza (5.16) i (5.18) funkcija faktora stanja se može predstaviti preko kritičnog oštećenja Δh_{kr} eksponencijalnom funkcijom vremena t i za $T=const$.

$$FS(t) = 1 - FO(t) = 1 - \frac{\Delta h(t)}{h} = 1 - \frac{\Delta h_{kr}}{h} \left(\frac{1}{T}\right)^a \cdot t^a = 1 - \frac{\Delta A_{kr}}{A} \left(\frac{1}{T}\right)^a \cdot t^a \quad (5.19)$$

pri čemu je faktor kritičnog oštećenja $FO_{kr} = \frac{\Delta h_{kr}}{h} = \frac{\Delta A_{kr}}{A} = const$.

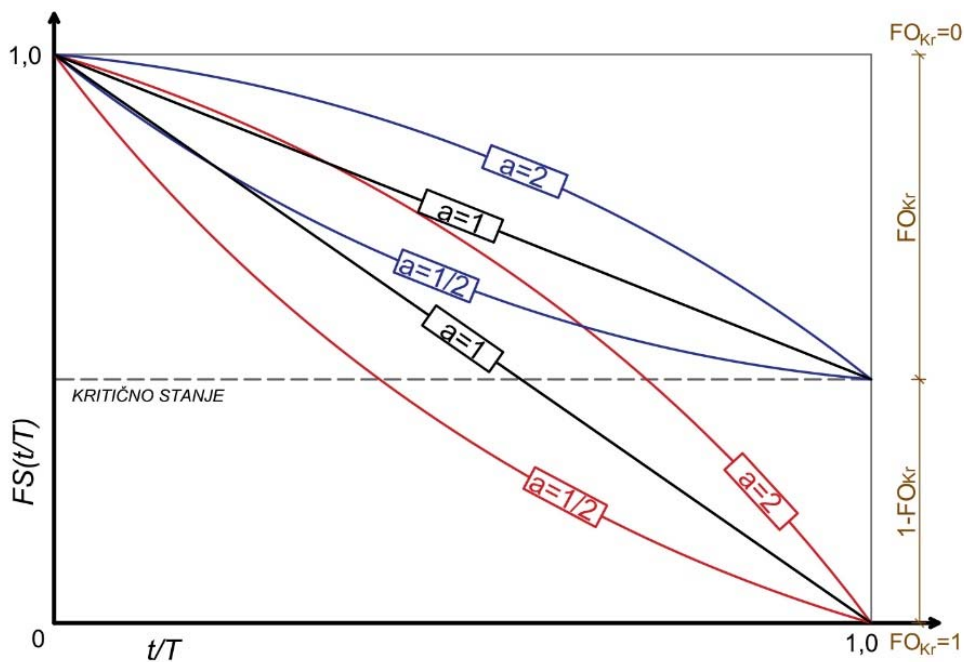
Ako se umesto vremena t u godinama problem posmatra preko faktora vremena t/T kao bezdimenzionalne promenljive veličine na vremenskoj skali od nule do jedinice, onda je funkcija faktora stanja :

$$FS(t/T) = 1 - FO(t/T) = 1 - \frac{\Delta h(t)}{h} = 1 - \frac{\Delta h_{kr}}{h} \left(\frac{t}{T}\right)^a = 1 - \frac{\Delta A_{kr}}{A} \left(\frac{t}{T}\right)^a \quad (5.20)$$

Funkcija stanja $FS(t/T)$ ima svojstva da, za vreme početka upotrebe objekta, pri stanju neoštećenosti, u vremenu $t=0, (t/T=0)$, ima najvišu vrednost $FS(t/T)=1$. Pri stanju neoštećenosti ili nultom stanju, procenat oštećenja preseka je 0, a preostali procenat je 100% i predstavlja najbolje moguće stanje konstrukcije. Tokom vremena t vrednost funkcije $FS(t/T)$ opada, sve do vremena $t=T, (T/T=1)$, na kraju upotrebnoeg veka gde funkcija ima najmanju vrednost $FS(T/T)$, odnosno element ima najviši stepen oštećenja.

$$FS(1) = 1 - \frac{\Delta h_{kr}}{h} = 1 - \frac{\Delta A_{kr}}{A} = 1 - FO_{kr} \quad (5.21)$$

Vrednost faktora oštećenja ima vrednost $0 \leq FO(t/T) \leq 1$. Za vrednost $FO(0)=0$ sledi da je $FS(0)=1$, znači da nema oštećenja, a za vrednost $FO(1)=1$, u vremenu $t=T$ sledi da je $FS(T/T)=1-FO=0$ znači da je došlo do totalnog oštećenja.



Slika 5.15 Funkcija stanja elementa $FS(t)$

Na slici 5.15 predstavljene su dve grupe krivih za vrednosti t/T u intervalu od 0 do 1. Na kraju upotrebnoeg veka za $t=T$ tri krive prve grupe imaju za vrednost $FO_{kr}=1$ i $FS(t/T)=0$. To znači da je dostignuto vreme $t=T_{TOT}$ totalnog oštećenja odnosno raspadanja betonskog elementa. Vreme T_{TOT} teorijski može da teži beskonačnosti. Ovo vreme ima samo teorijski značaj jer se u realnosti pri mnogo manjem vremenu $t=T$ dostiže faktor kritičnog oštećenja $FO_{kr} < 1$. Preostale tri krive druge grupe imaju za vrednost $FO_{kr} < 1$,

funkciju $1 > FS(t/T) > 0$ i ovim krivama se određuje kritično oštećenje preseka. Ako je vrednost $FO_{kr}=0$ onda je funkcija stanja $FS(t/T)=1$, znači da je stanje konstrukcije nepromenjeno tokom upotrebnog veka.

Funkcija oštećenja konstrukcije tokom upotrebe objekta sa eksponentom $a=1$ za različite vrednosti odnosa t/T u intervalu od 0 do 1 data je u tabeli 5.8.

Tabela 5.8 Vrednosti funkcije stanja $FS(t/T)$ za različite vrednosti t/T

t/T	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$FS(t/T)$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

Proporcionalno povećanje oštećenje u vidu gubitka visine poprečnog preseka betonskog elementa $\Delta h(t)$ tokom vremena, može se izraziti preko faktora oštećenja u obliku izraza

$$FO = FO(t/T_{TOT}) = \frac{\Delta h(t)}{h} = \frac{\Delta h_{kr}}{h} \left(\frac{t}{T_{TOT}} \right)^1 \quad (5.22)$$

Vrednost faktora oštećenja u trenutku $t=0$ je $FO(0)=0$, a u trenutku $t=T_{TOT}$ je $FO(t/T_{TOT})=1$, što znači da je $FO_{kr}=1$, odakle se dobija da je :

$$FO(t/T_{TOT}) = t/T_{TOT} \quad (5.23)$$

Proporcionalno smanjenje preostale površine poprečnog preseka betonskih elemenata tokom vremena može se izraziti preko faktora oštećenja:

$$FS(t/T_{TOT}) = 1 - \frac{t}{T} = 1 - FO(t/T_{TOT}) \quad (5.24)$$

Promena oštećenja tokom vremena se može predstaviti probabilističkim metodama (poglavlje 4.6). Polazi se od tvrdjenja da posmatrani betonski element na početku eksploatacije u vremenu $t=0$ nema oštećenja, odnosno da je element 100% neoštećen, a njegova verovatnoća pouzdanosti $P=1$. Potpuno oštećenje elementa nastaje u beskrajno dugom vremenu $t \rightarrow +\infty$ sa verovatnoćom pouzdanosti $P \rightarrow 0$.

Za skup vremenskih podataka - slučajne promenljive $T(0, +\infty)$ u realnom vremenu $t > 0$, vremenski zavisna funkcija pouzdanosti se može definisati eksponencijalnom ili vejbulovom funkcijom (eng. *Weibull function*) [181], gde je $R(t)=1$ za $t=0$ i $R(t)=0$ za $t \rightarrow +\infty$.

Verovatnoća pouzdanosti $P_r=R(t)$ se može predstaviti vejbulovom funkcijom:

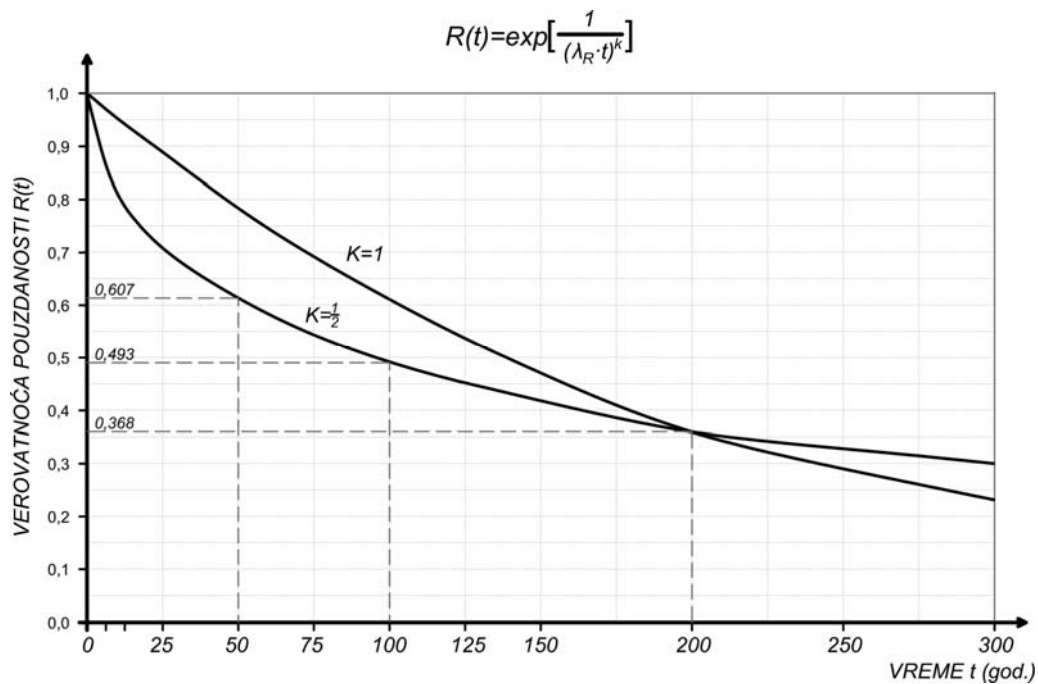
$$P_r = R(t) = \exp(-(\lambda_r t)^k) = e^{-(\lambda_r t)^k} \quad (5.25)$$

gde je:

- λ_r - faktor (1/god) u odnosu na posmatrani broj godina
- k - faktor oblika krive zavistan od brzine degradacije.

Za posmatranu degradaciju betonskog elementa u toku vremena $T_{TOT}=200$ godina faktor iznosi $\lambda_r = 1/200$ (1/god).

U zavisnosti od stanja betonskog elementa vejbulovom funkcijom se može odrediti kritično oštećenje elementa, a time i preostala nosivost i upotrebnii vek. Eksponenti k funkcije zavise od parametara kvaliteta materijala, dejstava sredine i kvaliteta izvođenja.



Slika 5.16 Vejbulova kriva verovatnoće

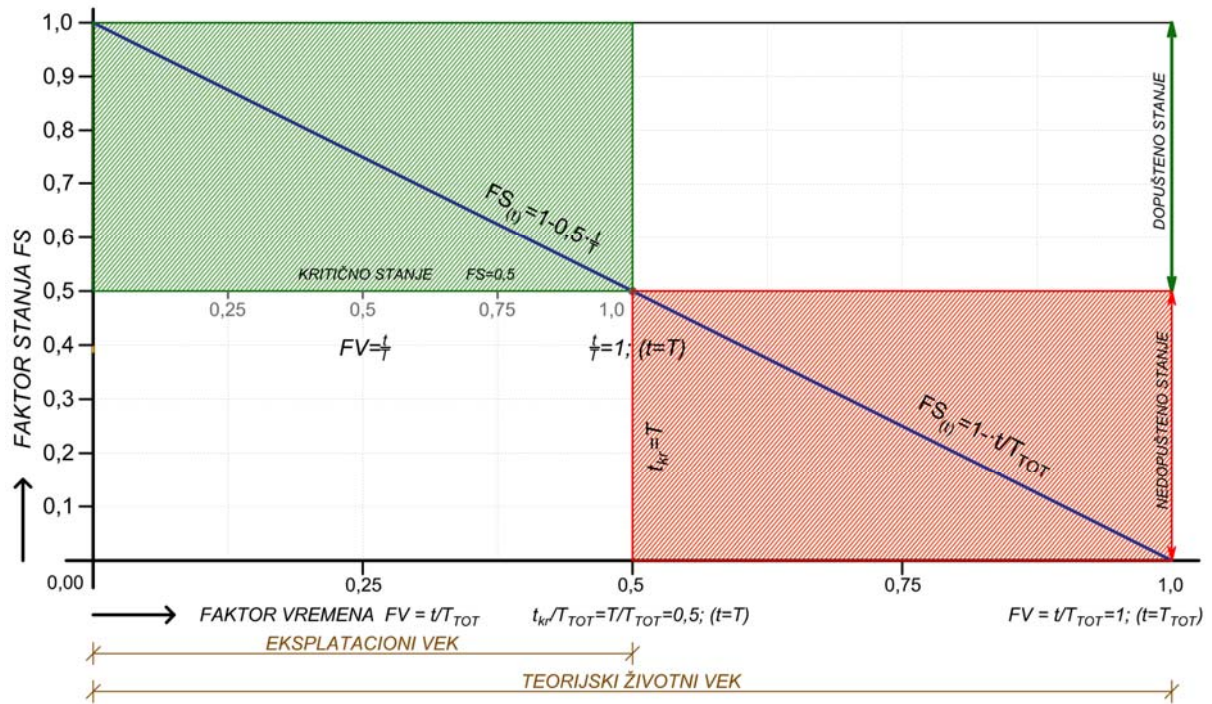
Na slici 5.16 prikazane su krive $K=1/2$ za brži proces degradacije i $k=1$ za sporiji proces degradacije, gde veća vrednost eksponenta k označava sporiji proces degradacije. Vrednosti funkcije pouzdanosti za vreme od $t=50$ godina i $T=100$ god, $t/T=0,5$, prema vejbulovoj krivi verovatnoće iznosi $R(t)=R(50)=0,607$, a funkcija otkaza $F(t)=1-R(t)=1-0,607=0,393$. Za dalja istraživanja usvojena je kriva sa eksponentom $k=1/2$ i faktorom $\lambda_r=1/200$, za koje je verovatnoća pouzdanosti $R(t)=0,493\approx 0,5$ za $t=100$ godina.

Kritično oštećenje, odnosno kritično stanje betonskog elementa, definiše se na osnovu graničnih vrednosti oštećenja, čijim se prekoračenjem sistem smatra ugroženim. Na osnovu verovatnoće pouzdanosti iz izraza (5.24) $R(t)=0,493\approx 0,5$ može se usvojiti da je faktor kritičnog stanja elementa $FS_{kr}=0,5$ kome odgovara faktor kritičnog vremena $t_{kr}=T=0,5T_{TOT}$.

Da bi konstrukcija odgovorila svojoj nameni potrebno je odrediti granične vrednosti oštećenja kao propisane vrednosti oštećenja, izražene preko dubine oštećenja ili preko faktora oštećenja. U ovom istraživanju je definisana vrednost faktora kritičnog stanja FS_{kr} , u zavisnosti od dubine kritičnog oštećenja Δh_{kr} ili odnosa $\Delta h_{kr}/h$, gde je h visina nosača. Vrednost kritičnog oštećenja $\Delta h_{kr}=h/2$ odnosno faktor kritičnog oštećenja je $\Delta h_{kr}/h=1/2$.

Izbor skale faktora vremena prema upotrebnom veku konstrukcije na osnovu određene vrednosti kritičnog oštećenja izvršen je prema proporcionalnoj zavisnosti faktora stanja i faktora vremena $FV=t/T_{TOT}$ (slika 5.17). Vrednosti faktora stanja su u granicama 1 za neoštećenu konstrukciju i 0 za potpuno oštećeni u konstrukciju.

Skala se definiše za upotrebni vek kome odgovara kritično vreme t_{kr} pri kome nastaje kritično oštećenje nosača ΔA_{kr} . Kritične vrednosti faktora stanja betonskog elementa odgovara kritično vreme $t_{kr}=T$ pri kome dolazi do kraja upotrebnoeg veka konstrukcije. Ako je $2t_{kr}=T_{TOT}$ i sledi da je $T/T_{TOT}=0,5$ na osnovu čega sledi da je vrednost $FS_{kr}=0,5$, za kritično oštećenje $\Delta h_{kr}=h/2$. Vrednosti faktora oštećenja FO i faktora stanja FS su linearno promenljive u zavisnosti od faktora vremena.



Slika 5.17 Kritično vreme i kritični faktor stanja

Faktor stanja elementa u funkciji vremena kod proporcionalnog odnosa oštećenja ivremena, se dobija na osnovu izraza (5.21) za ekponent $a=1$ u zavisnosti od vrednosti

$FO_{kr} = \frac{\Delta h_{kr}}{h}$ iz izraza:

$$FS(t/T) = 1 - FO(t/T) = 1 - FO_{kr} \left(\frac{t}{T} \right) = 1 - \frac{\Delta h_{kr}}{h} \left(\frac{t}{T} \right) \quad (5.27)$$

U daljim istraživanjima oštećenja se koristi koordinatni sistem FS i t/T . Kritično vreme nastaje u trenutku $t=t_{kr}=T$, pri čemu je $t_{kr}/T=1$. Kritičnom vremenu t_{kr} , odgovaraju kritične vrednosti faktora oštećenja FO_{kr} i kritične vrednosti faktora stanja FS_k . Gornja granica faktora stanja je 1, za $t/T=0$, a donja granica je $FS_{kr}=0,5$ za $t/T=t_{kr}/T$.

5.2.5. EVALUACIJA I TRANZICIJA STANJA

Za evaluaciju stanja nosača u ovom istraživanju je izabrana skala celobrojnih ocena $k=0, 1, 2, 3, 4$ i 5 kao konačan skup od šest elemenata koji se određuje na osnovu veličine oštećenja poprečnog preseka. Ocene stanja rastu srazmerno propagaciji oštećenja. Najbolje stanje nosača nosi ocenu 0 i označava stanje novog nosača bez oštećenja. Najgore stanje nosača nosi ocenu 5 i označava stanje sa kritičnim oštećenjima odnosno stanja kada upotreba konstrukcije nije moguća (tabela 5.9)

Tabela 5.9 Predlog evaluacije i vremena tranzicije stanja oštećenog AB nosača.

k EVALUACIJA STANJA	TS TRANZICIJA STANJA	VT TRANZICIONO VREME	OPIS OŠTEĆENJA	PO PROCENAT OŠTEĆENJA	PP PREOSTALI PRESEK u %
0		t_{00}	Bez oštećenja	0%	100%
	01 ($>0, <1$)	$t_{11}-t_{00}=t_{01}$	Tranziciona oštećenja 0-1	0 – 2%	98-100%
1		t_{11}	Mala oštećenja	2%	98%
	12 ($>1, <2$)	$t_{22}-t_{11}=t_{12}$	Tranziciona oštećenja 1-2	2 – 10%	90-98%
2		t_{22}	Značajna oštećenja	10%	90%
	23 ($>2, <3$)	$t_{33}-t_{22}=t_{23}$	Tranziciona oštećenja 2-3	10– 20%	80-90%
3		t_{33}	Velika oštećenja	20%	80%
	34 ($>3, <4$)	$t_{44}-t_{33}=t_{34}$	Tranziciona oštećenja 3-4	20– 30%	70-80%
4		t_{44}	Veoma velika oštećenja	30%	70%
	45 ($>4, <5$)	$t_{55}-t_{44}=t_{45}$	Tranziciona oštećenja 4-5	30–50%	30–50%
5		t_{55}	Kritična oštećenja	50% (0,50)	50% (0,50)

Predloženi postupak evaluacije stanja oštećenog armirano-betonskog elementa baziran je na zavisnosti podataka preostale površine preseka nosača nakon oštećenja tokom vremena. Kod trenutnih oštećenja ocena stanja se vrši nakon prestanka incidentnog dejstva. Ocena stanja nosača se može odrediti vizuelnim putem na osnovu periodičnih pregleda i merenja vidljivih oštećenja. Kod oštećenja koja se nalaze sakrivena unutar nosača ili se nalaze na nepristupačnim mestima može da se koristi ultrazvučna detekcija oštećenja. Pored evaluacije stanja u tabeli su prikazana tranziciona stanja *TS*- kao skup svih stanja između dve susedne ocene, označava prelaz od nižeg stanja sa ocenom "*k*" do višeg stanja sa ocenom "*k+1*". Tranzicija stanja *TS* definiše stanja nosača u određenim granicama oštećenja koje su određene evaluacijom stanja i izražava se vrednostima:

- *TS* = 01 označava prelaz od stanja > 0 do stanja < 1 ,
- *TS* = 12 označava prelaz od stanja > 1 do stanja < 2 ,
- *TS* = 23 označava prelaz od stanja > 2 do stanja < 3 ,
- *TS* = 34 označava prelaz od stanja > 3 do stanja < 4 ,
- *TS* = 45 označava prelaz od stanja > 4 do stanja < 5 .

Predloženi postupak ne daje ocenu stanja cele konstrukcije već definiše tranziciono stanje nosača ili stanja lokalizovanog dela nosača u zoni detektovanog oštećenja. Propagacija oštećenja nosača usled deterioracije, odnosno gubitka poprečnog preseka

nosača tokom vremena t uslovljava promenu evaluacije i tranzicije stanja nosača, a faktor oštećenja FO i faktor stanja FS postaju funkcije vremena $FO(t)$ i $FS(t)$. Ako se tekuće vreme pri kome se dostiže određena evaluacija stanja nosača označi kao $t_{k,k}$ gde je $k=0,1,2,3,4,5$, za početno vreme deterioracije nosača bez oštećenja se uzima za evaluacija satnja "0", u trenutku $t_{00}=0$, gde je vremenski zavistan faktor oštećenja $FO(t)=FO(0)=0$, odgovarajući procenat oštećenja $PO(0)=0\%$, i odgovarajući faktor $FS(t)=FS(0)=1$. Vreme na kraju životnog ciklusa je T izraženo u godinama i može da označava kraj upotrebnog veka odnosno propisano kritično vreme deterioracije nosača kad nastaju nedopustiva oštećenja. Ocene stanja su određene prema procentu oštećenja, na bazi gradacija oštećenja iz poglavlja 4.8 - tabele 4.38, s'tim što postoji razlika u vrednosti kritičnog oštećenja čija je vrednost od 50% dobijena ovim istraživanjem

Tranziciono vreme $t_{k,k+1}$, kao interval trajanja pethodne "k" do naredne "k+1" evaluacije stanja i dobija se kao razlika vremena $t_{k,k}$ i $t_{k+1, k+1}$ odnosno:

$$t_{k,k+1} = t_{k+1, k+1} - t_{k,k} \quad (5.28)$$

Tranziciono vreme označava vreme prelaza iz niže u višu ocenu usled pogoršanja stanja:

- Nosač bez oštećenja (ocena 0), oštećenje 0% tzv „*nulto stanje*“
- Tranzicija stanja 01 (ocena 1) je stanje nosača sa oštećenjima 0-2% poprečnog preseka (*mala oštećenja*), a odgovorajuće tranziciono vreme t_{01} je vremenski interval između vremena koje odgovara stanju 0- t_{00} i stanju 1- t_{11} , odnosno:

$$t_{01} = t_{11} - t_{00} \quad (5.29)$$

- Tranzicija stanja 12 (ocena 2) je stanje nosača sa 2-10% oštećenja poprečnog preseka (*značajna oštećenja*), a odgovorajuće tranziciono vreme t_{12} je vremenski interval između vremena koje odgovara stanju 1- t_{11} i stanju 2- t_{22} , odnosno:

$$t_{12} = t_{22} - t_{11} \quad (5.30)$$

- Tranzicija stanja 23 (ocena 3) je stanje nosača sa 10-20% oštećenja poprečnog preseka (*velika oštećenja*), a odgovorajuće tranziciono vremena t_{23} je vremenski interval između vremena koje odgovara stanju 2- t_{22} i stanju 3- t_{33} , odnosno:

$$t_{23} = t_{33} - t_{22} \quad (5.31)$$

- Tranzicija stanja 34 (ocena 4) je stanje nosača sa 20-30% oštećenja poprečnog preseka (*veoma velika oštećenja*), a odgovorajuće tranziciono vremena t_{34} je vremenski interval između vremena koje odgovara stanju 3- t_{33} i stanju 4- t_{44} , odnosno:

$$t_{34} = t_{44} - t_{33} \quad (5.32)$$

- Tranzicija stanja 45 (ocena 5) je stanje nosača sa 30-50% oštećenja poprečnog preseka (*kritična oštećenja*), a odgovorajuće tranziciono vremena t_{45} je vremenski interval između vremena koje odgovaraju stanju 4- t_{44} i stanju 5- t_{55} , odnosno :

$$t_{45} = t_{55} - t_{44} \quad (5.33)$$

Vreme t_{55} je kritično vreme pri kome je $t_{55}=T$, što znači da je to vreme označava kraj životnog ciklusa nosača. Zbir svih vremena tranzicije je :

$$t_{01} + t_{12} + t_{23} + t_{34} + t_{45} = T \quad (5.34)$$

Tabela 5.10 Predlog evaluacije i faktora tranzicionog stanja oštećenog AB nosača.

ES EVALUACIJA STANJA	TS TRANZICIJA STANJA	FTV FAKTOR TRANZICIJE VREMNA	OPIS OŠTEĆENJA	FO FAKTOR OŠTEĆENJA	FS FAKTOR STANJA
0		t_{00}/T	Bez oštećenja	0	1
	01 (>0,<1)	$t_{11}/T-t_{00}/T=t_{01}/T$	Tranziciona oštećenja 01	0,0 – 0,02	0,98-1,0
1		t_{11}/T	Mala oštećenja	0,02	0,98
	12 (>1,<2)	$t_{22}/T-t_{11}/T=t_{12}/T$	Tranziciona oštećenja 12	0,02 -0,10	0,90 - 0,98
2		t_{22}/T	Značajna oštećenja	0,10	0,90
	23 (>2,<3)	$t_{33}/T-t_{22}/T=t_{23}/T$	Tranziciona oštećenja 23	0,10 – 0,20	0,80 -0,9
3		t_{33}/T	Velika oštećenja	0,20	0,80
	34 (>3,<4)	$t_{44}/T-t_{33}/T=t_{34}/T$	Tranziciona oštećenja 34	0,20 – 0,30	0,70 - 0,80
4		t_{44}/T	Veoma velika oštećenja	0,30	0,70
	45 (>4,<5)	$t_{55}/T-t_{44}/T=t_{45}/T$	Tranziciona oštećenja 45	0,30 - 0,50	0,50 - 0,70
5		t_{55}/T	Kritična oštećenja	0,50	0,50

Tranzicijono vreme t_{kk} , je prikazano u tabeli 5.10 preko faktora vremena $FV=t_{kk}/T$ gde je t_{kk} tranzicijono vreme predstavljeno u odnosu na T kao bezdimenzionalne veličine. Vremenski interval $t_{k,k+1}$ prikazano je kao faktor tranzicije vremena $FTV= t_{k,k+1}/T$. Preostali upotrebni vek se može odrediti na osnovu faktora preostalog vremena iz izraza $FPV=1-FV$. Tekuće vreme t (god) teče od nule do vremena T , a odgovarajući faktor vremena deterioracije t/T teče od 0 do 1. Takođe je gubitak preseka nosača predstavljen u vidu faktora oštećenja i faktora preostalog preseka kao bezdimenzionalne veličine od 0 do 1. Na osnovu analize oštećenja u modelima deterioracije u ovom istraživanju je usvojeno da kritična oštećenja nastaju kod gubitka preseka od 50% (slika 5.17).

Referentna linija faktora oštećenja $FO(t/T)$ je generisana kao vremenski zavisna veličina i direktno je direktno proporcionalna faktoru vremena t/T prema izrazu:

$$FO(t/T)=0,50 \cdot t/T \quad (5.35)$$

Procenat preostale površina poprečnog preseka, na kraju živonog ciklusa nosača za $t=T$ takođe će biti 50%, sa odgovarajućim faktorom $FS(1)=0,5$ (tabela 5.11) koji se može dobiti iz linearne funkcije vremena:

$$FS(t/T)=1-0,50 \cdot t/T \quad (5.36)$$

Grafik funkcije direkne proporcionalnosti u koordinatnom sistemu $FS, t/T$, dat je na slici 5.19. Faktor vremena deterioracije je u intervalu od $t/T=0$ do $t/T=1$. Faktor tranzicionog vremena FTV je interval koje se dobija kao razlika faktora vremena dva uzastopna stanja izražena bezdimenzionalnim brojevima od 0 do 1.

5.2.6 VREMENSKI ZAVISNI INDEKSI OŠTEĆENJA I INDEKSI STANJA

Vrednosti indeks oštećenja IO i indeksa stanja IS u tabeli 5.11 su dobijeni na osnovu numeričkog modela razlike energije izlaznih signala za oštećeni i neoštećeni nosač za određeni položaj senzora i određeno oštećenje prema podacima iz tabele 5.4.

Tabela 5.11 Predlog vrednosti indeksa stanja IS

ES EVALUACIJA STANJA	TS TRANZICIONA STANJA	FTV FAKTOR TRANZICIONOG VREMENA	FO FAKTOR OŠTEĆENJA	FS FAKTOR PREOSTALOG PRESEKA	IO INDEKS OŠTEĆENJA	IS INDEKS STANJA
0		0,00	0	1	0	1
	01 (>0,<1)	0,04	0,0 – 0,02	0,98-1,0	0,0 – 0,019	0,981-1,0
1		0,04	0,02	0,98	0,019	0,986
	12 (>1,<2)	0,16	0,02 -0,10	0,9-0,98	0,019-0,124	0,929-0,986
2		0,20	0,10	0,90	0,124	0,929
	23 (>2,<3)	0,20	0,1 – 0,20	0,8-0,9	0,124–0,219	0,859-0,929
3		0,40	0,20	0,80	0,219	0,859
	34 (>3,<4)	0,20	0,2 – 0,30	0,7-0,8	0,219–0,270	0,788-0,859
4		0,60	0,30	0,70	0,270	0,717
	45 (>4,<5)	0,40	0,3 -0,50	0,3 -0,50	0,270-0,353	0,647 -0,717
5		1,00	0,50	0,50	0,353	0,647

5.2.7 GENERISANJE NOMOGRAMA EVALUACIJE STANJA I VREMENSKI ZAVISNIH PROMENLJIVIH

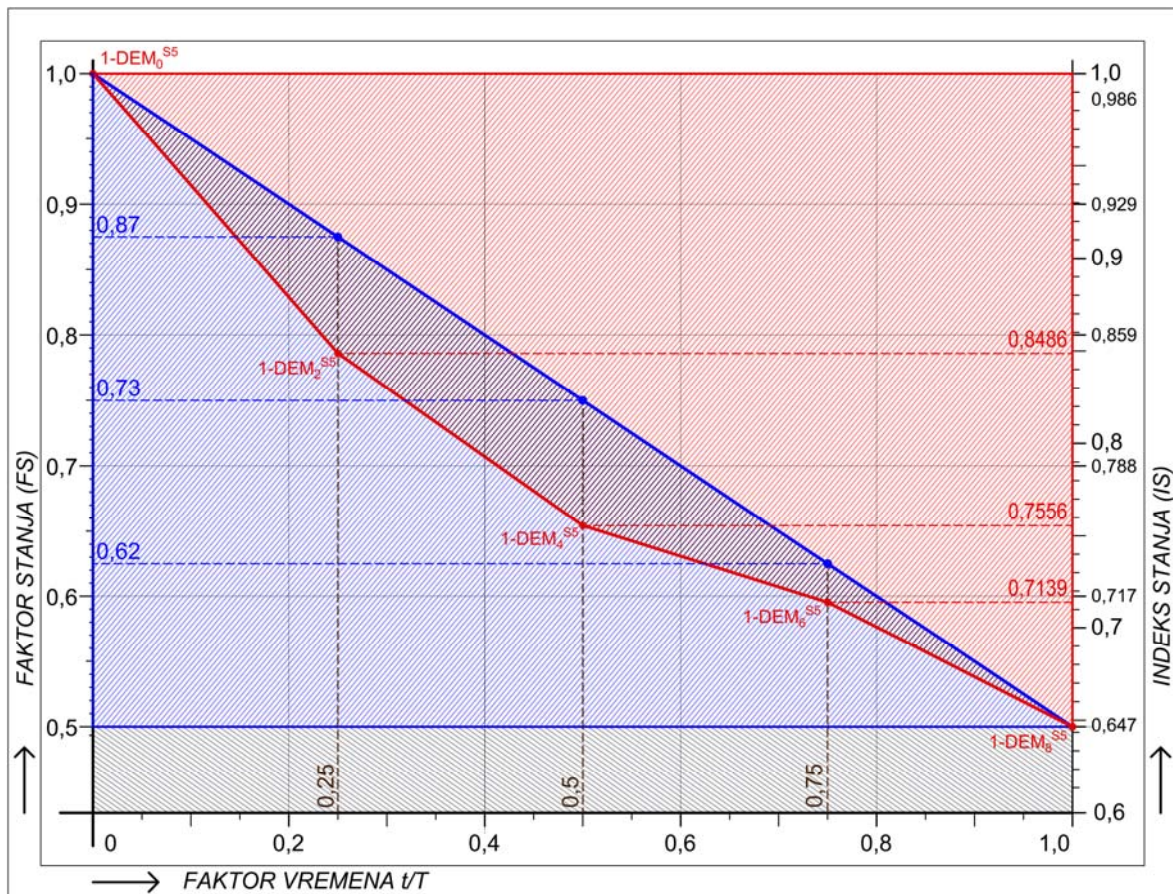
Analizom propagacije talasa dobijeni su indeksi stanja IS se može predstaviti za svaki položaj senzora i svaku veličinu oštećenja na vremenskoj osi deterioracije. Ako svakom indeksu oštećenja IO , za to oštećenje, u vremenskom trenutku odgovara faktor oštećenja FO , njihova zavisnost se može grafički predstaviti na osi faktora vremena deterioracije.

Modeliranjem propagacije ultrazvučnih talasa kroz betonsku gredicu dolazi se do indeksa oštećenja odnosno do indeksa preostalog poprečnog preseka grede. Ako dubina prsline u nosaču kao vremenski zavisno oštećenje nosača $\Delta h(t)$, kod modela deterioracije, raste proporcionalno vremenu, onda je to *proporcionalni proces deterioracije*, gde svakom vremenskom trenutku t odgovara proporcionalna dubina oštećenje $\Delta h(t)$.

Indeks oštećenja $IO = DEM^{S_j \Delta h}$ se dobija na osnovu razlike energije izlaznog ultrazvučnog signala u zavisnosti od položaja mernog mesta senzora S_j i vremenski zavisne veličine dubine oštećenja $\Delta h(t)$. Teorijski indeksa oštećenja imaju vrednosti od 0 za neoštećenu gredicu za $\Delta h(t) = \Delta h(0)$ do vrednosti 1 za potpuno oštećenu gredicu. Indeks stanja betonskog elementa IS se dobija iz izraza (5.14).

Vrednost indeksa IS iznosi 1 za neoštećeni nosač, a za oštećeni nosač je manji od 1. Na različitim dubinama oštećenja $\Delta h(t)$ sračunati su indeksi oštećenja IO i indeksi stanja IS metodom MKE korišćenjem programa ABAQUS/Explicit (tabela 5.4). Povećanje

oštećenja u toku vremena se posmatra kao proporcionalni proces deterioracije, koji podrazumeva direktnu proporcionalnost oštećenja i vremena pri čemu kritično oštećenje matematički predstavlja koeficijent proporcionalnosti.

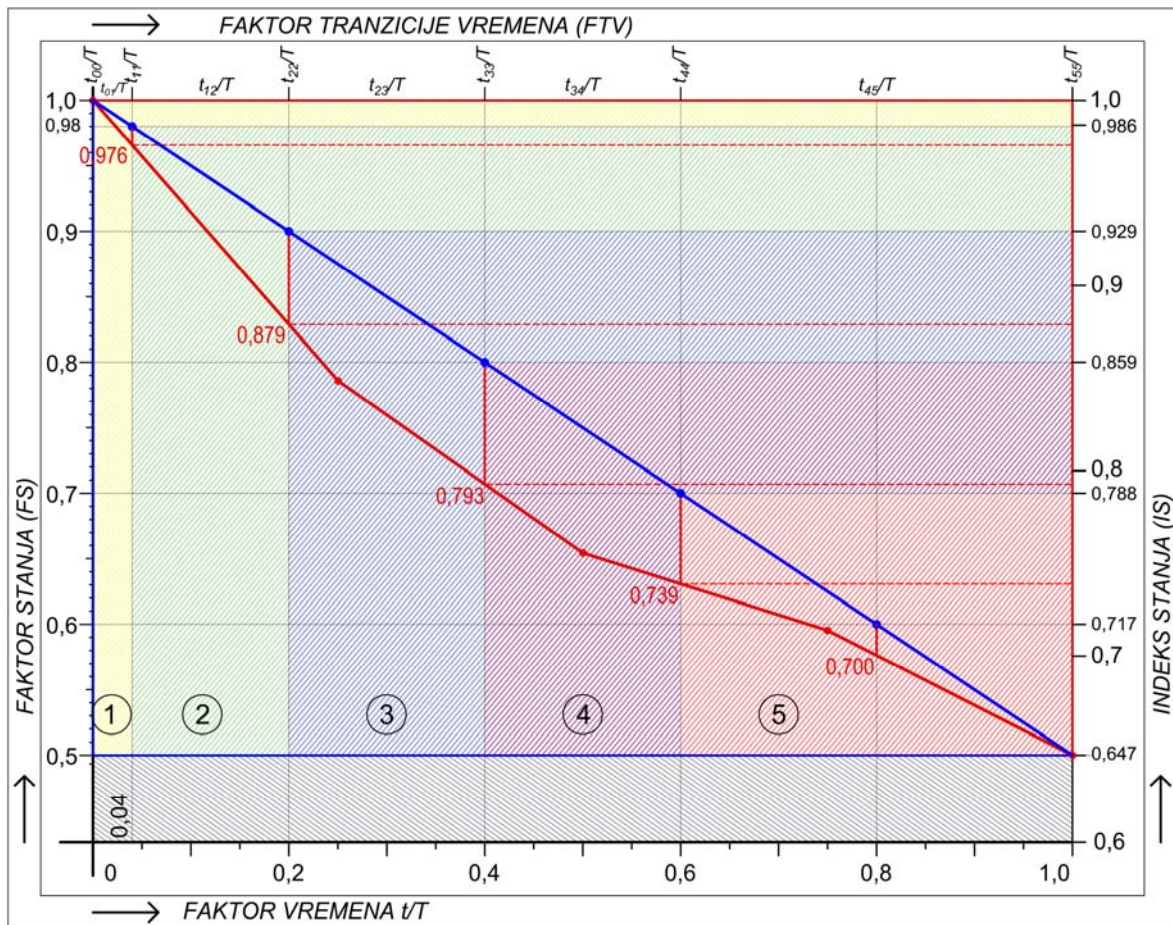


Slika 5.18 Generisanje nomograma stanja i referentnih vremenski zavisnih promenljivih

Na slici 5.18 grafički su predstavljene vrednosti IS , u zavisnosti od faktora vremena t/T , za različite vrednosti oštećenja i za položaj senzora S_5 . Tekuće vreme t je predstavljeno preko faktora vremena deterioracije t/T od vrednosti 0, za $t=0$ do vrednosti 1, za $t=T$. Na osnovu interakcija faktora $FS(t/T)$ i indeksa $IS(t/T)$ kao jednovremeno zavisne veličine od faktora vremena t/T , generisan je nomogram referentnih vremenski zavisnih stanja. Za model bez oštećenja u koordinatnom početku nomograma $t/T=0$ su definisane dve veličine, faktor stanja $FS(0)=1$ i indeks stanja $IS(0)=1$. Za model sa jednim oštećenjem dubine $h/2$, na kraju nomograma definisane su veličine faktora stanja $FS(1)=0,5$ i odgovarajući indeks stanja $IS(1)\approx 0,6469$. Vrednosti $FS(1)$ i $IS(1)$ kao međusobno zavisne veličine su grafički predstavljene na istoj dužini i nanete u određenoj razmeri srazmerno njihovim vrednostima. Plava linija u nomogramu predstavlja faktor zavisnosti preostale površine preseka (faktora stanja FS) i faktora vremena deterioracije t/T , po zakonu prave linije. Crvena linija predstavlja zavisnost indeksa preostale površine preseka (indeksa stanja IS) i faktora vremena t/T . Promena oštećenja je linearna sa promenom vremena (izraz 5.27), a samim tim je i faktor stanja proporcionalan faktoru vremena. U nomogramu referentnih vremenski zavisnih stanja su date numeričke vrednosti indeksa IS dobijenog na modelima sa oštećenjima za različite vrednosti $\Delta h=0,2,4,6,8$ i 10 cm za položaj senzora S_5 , koje odgovaraju faktorima FS i FV prema (tabela 5.4). Svakoј vrednosti oštećenja odgovara faktor stanja (izraz 5.27), a svakom faktoru stanja odgovaraju jednoznačno vrednosti indeksa stanja i faktora vremena (slika 5.18).

5.2.8 REFERENTNI NOMOGRAM EVALUACIJE STANJA I VREMENSKI PROPORCIONALNO ZAVISNIH PROMENLJIVIH

Referentni nomogram proporcionalnih oštećenja u modelima deterioracije tokom vremena je predstavljen na slici 5.19 sa označenim skalama vrednosti indeksa stanja IS , faktora stanja FS i faktora vremena FV . Na osnovu tabela 5.10, 5.11 i slike 5.18, određene su ocene stanja na osnovu vrednosti faktora stanja i tranzicionih vremena, pri čemu je indeks stanja u korelaciji sa faktorom stanja. Svakoј vrednosti faktora stanja odgovara vrednost indeksa stanja i vrednost faktora vremena. Sve tri veličine su međusobno zavisne i mogu se odrediti na osnovu referentnog nomograma (slika 5.16).



Slika 5.19 Nomogram referentnih vremenski zavisnih stanja

Ocene stanja na nomogramu su polja ograničena faktorima stanja za poznate vrednosti oštećenja iskazane u tabeli 5.12. Vrednosti indeksa stanja takođe određuju granice ocena stanja. Na osnovu prave linije $FS(t/T)$, određene vrednosti FS određuje se korespondentni faktor vremena FV , za odgovarajuću ocenu, tako da se za ocenu 0 dobija faktor stanja $FS=1$, a faktor vremena je $t/T=0$, znači da je $FS(0)=1,0$. Na dalje važi :

- za ocenu 1 i $FS=0,98 \rightarrow t/T=0,04$ odnosno $FS(0,04)=0,98$;
- za ocenu 2 i $FS=0,9 \rightarrow t/T=0,2$ odnosno $FS(0,2)=0,9$;
- za ocenu 3 i $FS=0,8 \rightarrow t/T=0,4$ odnosno $FS(0,4)=0,8$;
- za ocenu 4 i $FS=0,7 \rightarrow t/T=0,6$ odnosno $FS(0,6)=0,7$;
- za ocenu 5 i $FS=0,5 \rightarrow t/T=1,0$ odnosno $FS(1,0)=0,5$.

5.2.9 NOMOGRAM EVALUACIJE STANJA I VREMENSKI NELINEARNO ZAVISNIH PROMENLJIVIH

5.2.9.1 NOMOGRAM SPORIJE PROPAGACIJE DETERIORACIJE

Kod usporene propagacije oštećenja tokom vremena se može primeniti nelinearna zavisnost faktora preostale površine preseka i faktora vremena u vidu kvadratne funkcije (slika 5.20) iz izraza (5.19) i (5.21) sledi da je:

$$FS(t/T) = 1 - 0,50(t/T)^2 \quad (5.38)$$

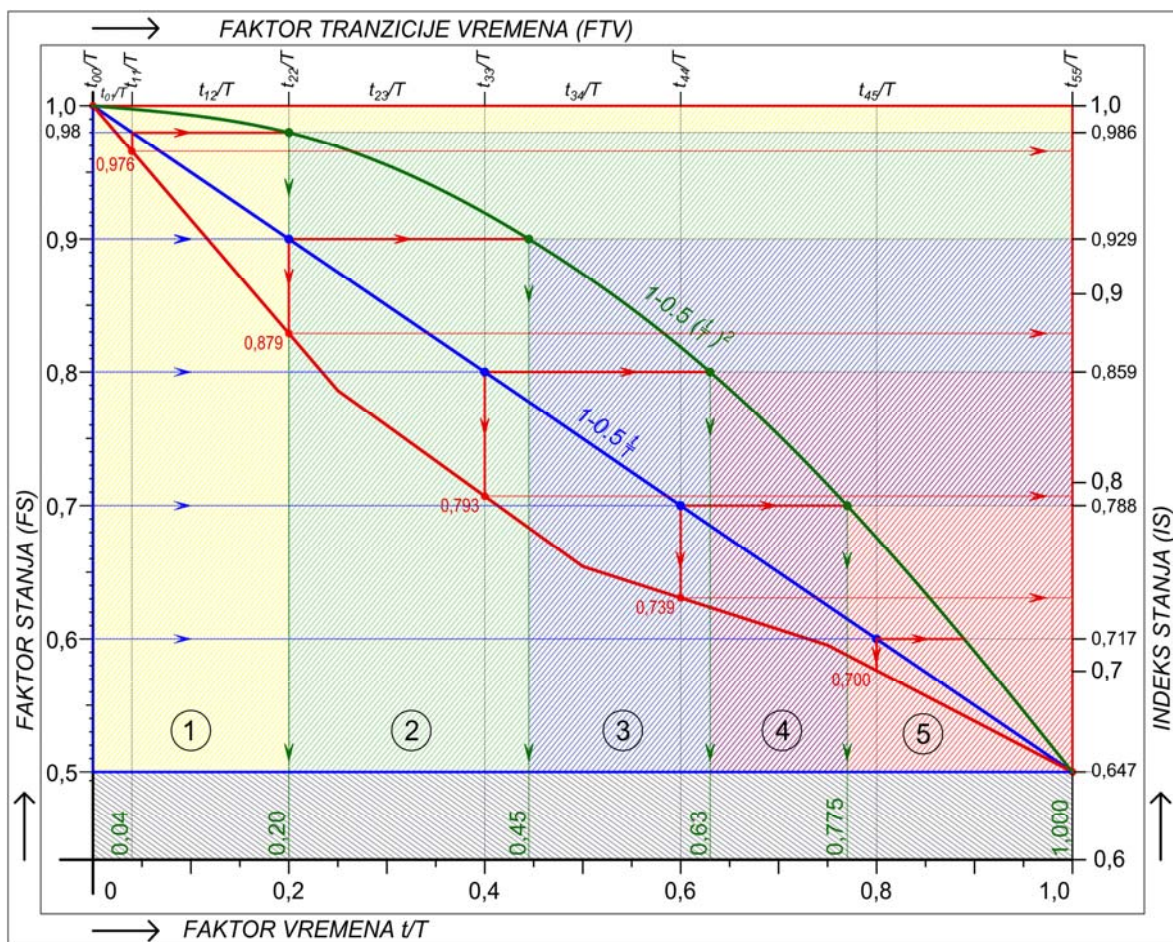
Pri istom faktoru vremena t/T dobijaju se manja vrednost faktora FS za referentnim vremenski zavisnim proporcionalnim oštećenja u odnosu na faktor FS uporenog procesa:

Na primer ako se posmatra ocena stanja 2, faktor vremena je $t/T = 0,2$, faktor stanja je kod proporcionalnog procesa $FS(0,2) = 0,9$ (plava linija). Kod usporenog procesa (zelena linija) presek linije za ocenu 2 i krive linije $FS(t/T) = 1 - 0,50(t/T)^2$ određuje tačku na osnovu koje se po vertikali određuje faktor vremena deterioracije $t/T = 0,447$, a $FS(0,447) = 0,9$. Faktor preostalog vremena je :

$$FPV = 1 - 0,447 = 0,553.$$

Za eksploatacioni vek konstrukcije od 50 godina, preostalo vreme eksploatacije je:

$$PVE = 50 \times 0,533 = 27,65 \text{ godina}$$



Slika 5.20 Nomogram stanja usporenog procesa deterioracije

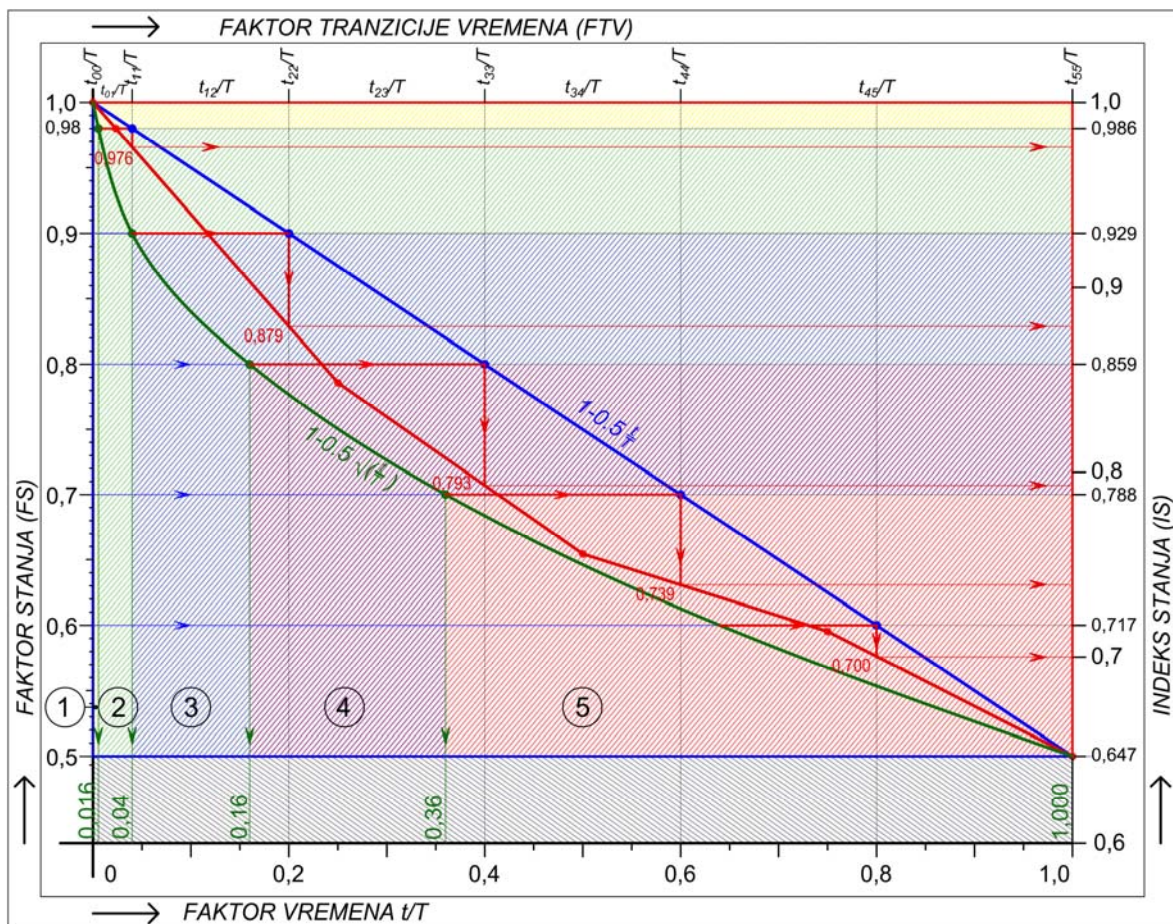
Istom faktoru stanja i odgovarajućem indeksu stanja pri linearnoj i nelinearnoj zavisnosti sa vremenom odgovaraju različiti faktori vremena, dok pri istom faktoru vremena odgovaraju različite vrednosti faktora stanja i indeksa stanja.

5.2.9.2 NOMOGRAM BRŽE PROPAGACIJE DETERIORACIJE

Kod ubrzanog procesa deterioracije se može primeniti nelinearna zavisnost faktora stanja i faktora vremena iz izraza :

$$FS(t/T)=1-0,50(t/T)^{0,5} \quad (5.39)$$

koja je predstavljena krivom linijom ubrzanog procesa deterioracije na slici 5.21. Pri istom faktoru vremena t/T dobijaju se veća vrednost faktora FS za referentna vremenski zavisna proporcionalna oštećenja u odnosu na faktor FS ubrzanog procesa.



Slika 5.21 Nomogram ubrzanog procesa deterioracije

Na primer za $t/T=0,4$ dobija se kod proporcionalnog procesa $FS(0,4)=0,8$, a kod ubrzanog procesa za $t/T=0,4$, $FS(0,4)=0,684$, znači da pri istom faktoru vremena t/T faktor stanja ubrzanog procesa ima manju vrednost. Pri istoj oceni stanja, odnosno pri istom faktoru FS dobija se veća vrednost faktora FV za proporcionalni proces u odnosu na FV usporenog procesa. Za ocenu stanja 2, kod proporcionalnog procesa, faktor vremena je $t/T=0,2$, faktor $FS(0,2)=0,9$.

Za istu ocenu stanja kod ubrzanog procesa faktor vremena je $t/T=0,04$, $FS(0,04)=0,9$. Za ocenu 3 je dato da je $FS=0,8$ i očitana vrednost indeksa stanja je $IS=0,876$. Presek linije za ocenu stanja 3 i krive linije $FS=1-0,50(t/T)^{0,5}$ određuje tačku na osnovu koje se po vertikali određuje faktor vremena deterioracije t/T (za ocenu 3 je $FS=0,9$ i očitana vrednost

$t/T=0,16$). Drugim rečima pri istom oštećenju i istoj vrednosti $FS=0,9$ potrebno je za proporcionalnu deterioraciju faktor vremena od $0,2 t/T$ a za ubranu deterioraciju faktor vremena od $t/T=0,16$. Faktor preostalog vremena je:

$$FPV = 1 - 0,16 = 0,84.$$

Za eksploatacioni vek konstrukcije od 50 godina, preostalo vreme eksploatacije (PVE) je

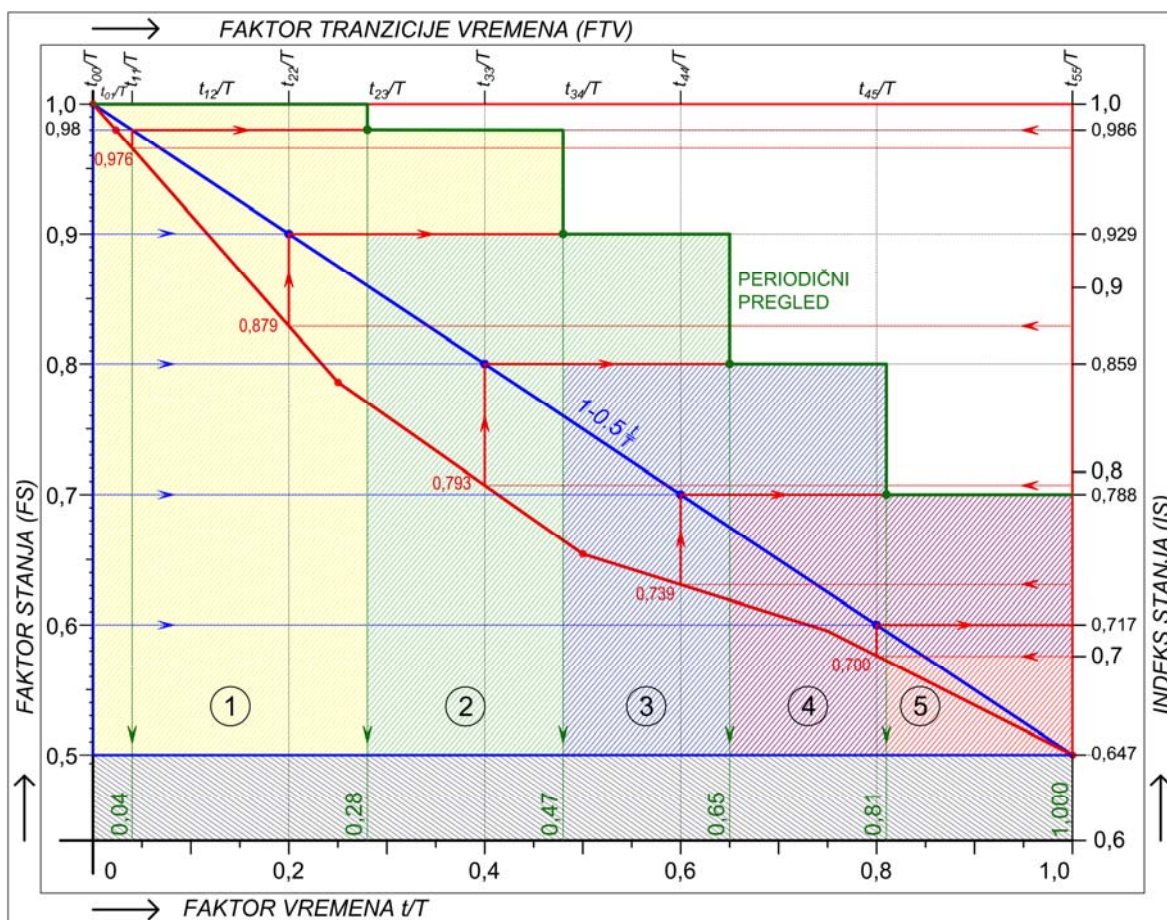
$$PVE = 50 \times 0,84 = 42 \text{ godine}$$

5.2.10 NOMOGRAM EVALUACIJE STANJA I SLUČAJNIH VREMENSKI ZAVISNIH PROMENLJIVIH

5.2.10.1 NOMOGRAM STANJA PREMA BAZAMA PODATAKA VIZUELNE EVALUACIJE STANJA

Tokom vremena usled nepovratnih procesa starenja nastaju oštećenja konstrukcija i dolazi do prelaza stanja iz niže u višu ocenu stanja. Podaci o stanju nosača se dobijaju vizuelnim pregledom na osnovu ocena stanja ili merenjem oštećenja u jednakim vremenskim intervalima, najčešće kod mostova od 1-5 godine.

Svi mereni podaci oštećenja tokom vremena su slučajni ili stohastički podaci, pa se u zavisnosti od matematičkog modela mogu koristiti za evaluaciju, predviđanje budućeg stanja i određivanje preostalog upotrebnog veka nosača.



Slika 5.22 Nomogram stanja prema bazama podataka vizuelne evaluacije stanja

Vreme tranzicije stanja označava broj merenja u jednakim vremenskim intervalima sve do dostizanja vremena više evaluacije stanja. Svako stanje k nosača se prati kroz vremenski period sa n_k merenja oštećenja na osnovu kojih se određuju faktori tranzicije vremena FTV . Prelazi u više stanje označeni su stepenastom linijom na slici 5.22.

Na osnovu vremenskog perioda između dva pregleda t_p za određeni upotrebnii vek konstrukcije T može se sračunati faktor vremena između dva pregleda FV_p , pri čemu je $FV_p = t_p/T$ a broj pregleda za upotrebnii vek biće $n_k = T/t_p$

Na primer za eksploatacioni vek konstrukcije od 50 godina, za period pregleda od 3 godine, faktor vremena biće $FV = 3/50 = 0,06$, a broj pregleda biće $50/3 = 16,67$ odnosno 16 merenja i 17. merenje je na kraju eksploatacionog veka.

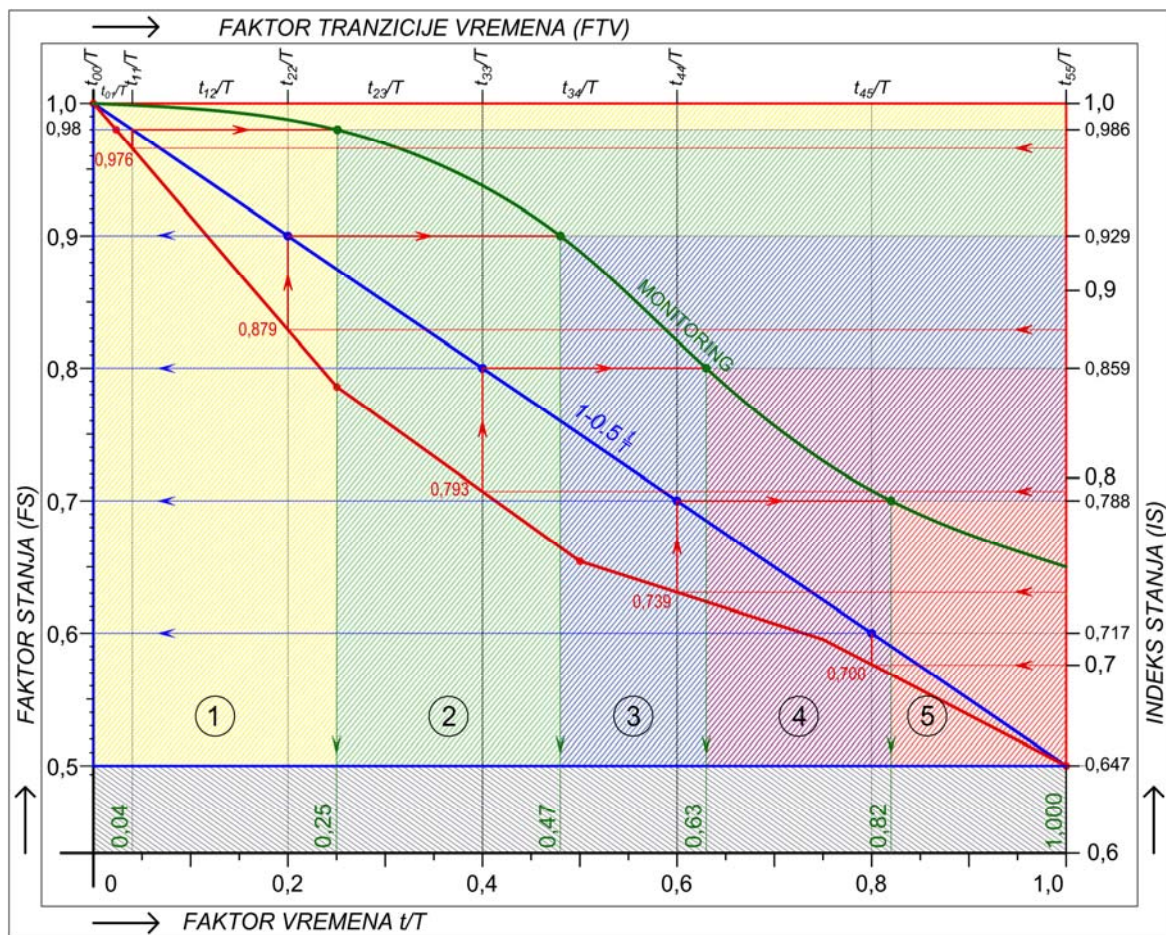
- ocena stanja $k=1$ konstrukcije bila je prvih 15 godina što odgovara $FV = 5 \times 0,06 = 0,3$ sa $n_k = 5$ pregleda, $t_{01}/T = 0,3$ i $t_{11}/T = 0,3$
- ocena stanja $k=2$ konstrukcije bila je sledećih 12 godina što odgovara $FV = 4 \times 0,06 = 0,24$ sa $n_k = 4$ pregleda, $t_{12}/T = 0,24$ i $t_{22}/T = 0,3 + 0,24 = 0,54$
- ocena stanja $k=3$ konstrukcije bila je sledećih 9 godina što odgovara $FV = 3 \times 0,06 = 0,18$ sa $n_k = 3$ pregleda $t_{23}/T = 0,18$ i $t_{33}/T = 0,54 + 0,18 = 0,72$
- ocena stanja $k=4$ konstrukcije bila je sledećih 6 godina što odgovara $FV = 2 \times 0,06 = 0,12$ sa $n_k = 2$ pregleda $t_{34}/T = 0,12$ i $t_{44}/T = 0,72 + 0,12 = 0,84$
- ocena stanja $k=5$ konstrukcije bila je sledećih 8 godina što odgovara $FV = 2,7 \times 0,06 = 0,16$ sa $n_k = 2,7$ pregleda $t_{45}/T = 0,16$ i $t_{55}/T = 0,84 + 0,16 = 1,0$
(ocena stanja 5 konstrukcije bila je sledećih 6 godina što odgovara $FV = 2 \times 0,06 = 0,12$ sa $n_k = 2$ pregleda $t_{34}/T = 0,12$ i $t_{44}/T = 0,84 + 0,12 = 0,96$ i plus 2 godine, što odgovara $FV = (2/3) \times 0,06 = 0,04$ sa 1 pregledom koji je obavljen nakon dve godine u trenutku kada se navršava eksploatacioni vek od 50 godina. $t_{34}/T = 0,04$ i $t_{44}/T = 0,96 + 0,04 = 1,00$).

Pri istoj oceni stanja, odnosno pri istom faktoru FS dobija se ili manja ili veća vrednost faktora FS u zavisnosti od podataka merenja, u odnosu na referentna vremenska proporcionalna oštećenja. Na primeru prikazanom na slici 5.18 je dato za ocenu 2 da je $FS = 0,9$, $t/T = 0,2$ i očitana vrednost $IS(0,2) = 0,879$.

5.2.10.2 NOMOGRAM STANJA PREMA BAZAMA PODATAKA MONITORINGA

Monitoring pruža mogućnost neprekidnog praćenja stanja. U zavisnosti od načina njegovog sprovođenja može omogućiti digitalizacija i potpuna kontrola stanja objekta [178].

Putem monitoringa se dobija kontinualna linije stanja tokom vremena. Funkcija faktora stanja je neprekidna funkcija $FS = FS(t/T)$. U preseku graničnih vrednosti ocena stanja na skali faktora stanja i krive linije FS dobijaju se odgovarajući faktori tranzicije vremena FTV . Diskretizacijom krive linije faktora stanja dolazi se do podataka faktora tranzicije vremena FTV i granica ocena stanja nosača (slika 5.23).



Slika 5.23 Nomogram stanja kontinualnog procesa deterioracije na bazi monitoringa

Na osnovu baze diskretnih podataka merenja u jednakim vremenskim intervalima može da se verovatnoća prelaza iz jednog u drugo rezidualno stanje, predstavi probabilističkom tranzicionom matricom PTM opšteg oblika:

$$PTM = [a_{ij}]_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{12} & a_{12} & a_{13} & \cdot & a_{1i} & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdot & a_{2i} & \cdot & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdot & a_{3i} & \cdot & a_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \cdot & a_{ii} & \cdot & a_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdot & a_{ni} & \cdot & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (5.40)$$

Proces istraživanja je sukcesivan od stanja do stanja sa rastućim ili konstantnim oštećenjima tokom vremena, odnosno sa stalnim gubitkom površine preseka i posmatra se kao verovatnoća prelaza sistema iz nižeg stanja $i=k$ u naredno isto ili više stanje $j=k+1$, na osnovu čega se tranziciona marica može uprostiti (*Markovljev deterioracioni proces*) [182]. Ako sistem zadržava isto stanje ili jednoznačno prelazi u drugo stanje, kao nepovratni proces starenja, ova matrica dobija sledeći oblik :

$$PTM = [a_{i,j}]_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{kk} & a_{k(k+1)} & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (5.41)$$

Za potrebe istraživanja iz nomograma proporcionalnih (*slika 5.19*) oštećenja uzeto je tranziciono vreme, koje definiše granice ocene stanja, u intervalima $t_{01}/T=0,04$, $t_{12}/T=0,20$, $t_{23}/T=0,40$, $t_{34}/T=0,60$ i $t_{45}/T=1,0$ za oštećenja preseka koja su proporcionalna vremenu dati pravom linijom od faktora vremena 0 do 1. Ako se usvoji da je broj podataka za ocenu k :

$$n_k = t_{k-1k}/T/0,02 = 50t_{k-1k}/T \quad (5.42)$$

Gde su članovi matrice a_{ij} sračunati u zavisnosti od broja i učestanosti podataka za svaku ocenu stanja:

$$a_{kk} = \frac{n_k - 1}{n_k} \quad (5.43)$$

$$a_{k(k+1)} = 1 - \frac{n_k - 1}{n_k} \quad (5.44)$$

To znači da je:

- za stanje $k=1$, faktor tranzicionog vremena je $t_{0,1}/T=0,04$, pa je broj merenja (podataka) za ocenu stanja $n_1=50t_{k-1k}/T=50 \times 0,04=2$.
- za stanje $k=2$, faktor tranzicionog vremena je $t_{0,1}/T=0,2-0,04=0,19$ pa je broj merenja (podataka) za ocenu stanja $n_2=50 \times 0,16=8$
- za stanje $k=3$, faktor tranzicionog vremena je $t_{0,1}/T=0,4-0,2=0,2$, pa je broj merenja (podataka) za ocenu stanja $n_3=50 \times 0,20=10$
- za stanje $k=4$, faktor tranzicionog vremena je $t_{0,1}/T=0,6-0,4=0,2$, pa je broj merenja (podataka) za ocenu stanja $n_4=50 \times 0,20=10$
- za stanje $k=5$, faktor tranzicionog vremena je $t_{0,1}/T=1,0-0,6=0,4$, pa je broj merenja (podataka) za ocenu stanja $n_5=50 \times 0,40=20$

Na osnovu navedenih podataka može se generisati probablistička tranziciona matrica PTM, koja je veoma pogodna za praćenje stanja u diskretnim vremenskim intervalima. Za pet ocena stanja i sa ukupnim brojem podataka $n_k=50$, početna standardizovana probablistička tranziciona matrica PTM imaće sledeći oblik:

$$PTM = [a_{ij}]_{5 \times 5} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,50 & 0,50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,86 & 0,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,90 & 0,10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,95 & 0,05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.45)$$

Matrica PTM je veoma primenljiva u numeričkim metodama za evaluaciju i prognozu stanja konstrukcija. Ukoliko se računa sa većim ukupnim brojem merenih podataka od 50 merenim u manjim vremenskim intervalima, onda brojne vrednosti date u matrici (5.45) nisu primenljive i moraju se sračunati iz izraza (5.41).

5.3 PROVERA SIGURNOSTI POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA PREMA EVROKODOVIMA NA BAZI OCENE STANJA

Laboratorijskim i teorijskim istraživanjima u ovom poglavlju određena je zavisnost promene oštećenja na bazi gubitka poprečnog preseka betonskog elementa i indeksa stanja koji je određen na osnovu razlika brzina ultrazvučnih talasa ili razlika energija izlaznih signala. Na osnovu poznate veličine indeksa stanja mogu se odrediti veličine oštećenja i ocene stanja (*tabela 5.11*). Generisanjem nomograma proporcionalnih oštećenja (*slika 5.19*) u modelima deterioracije tokom vremena omogućeno je određivanje veličine oštećenja i ocene stanja betonskih elemenata u zavisnosti od indeksa stanja.

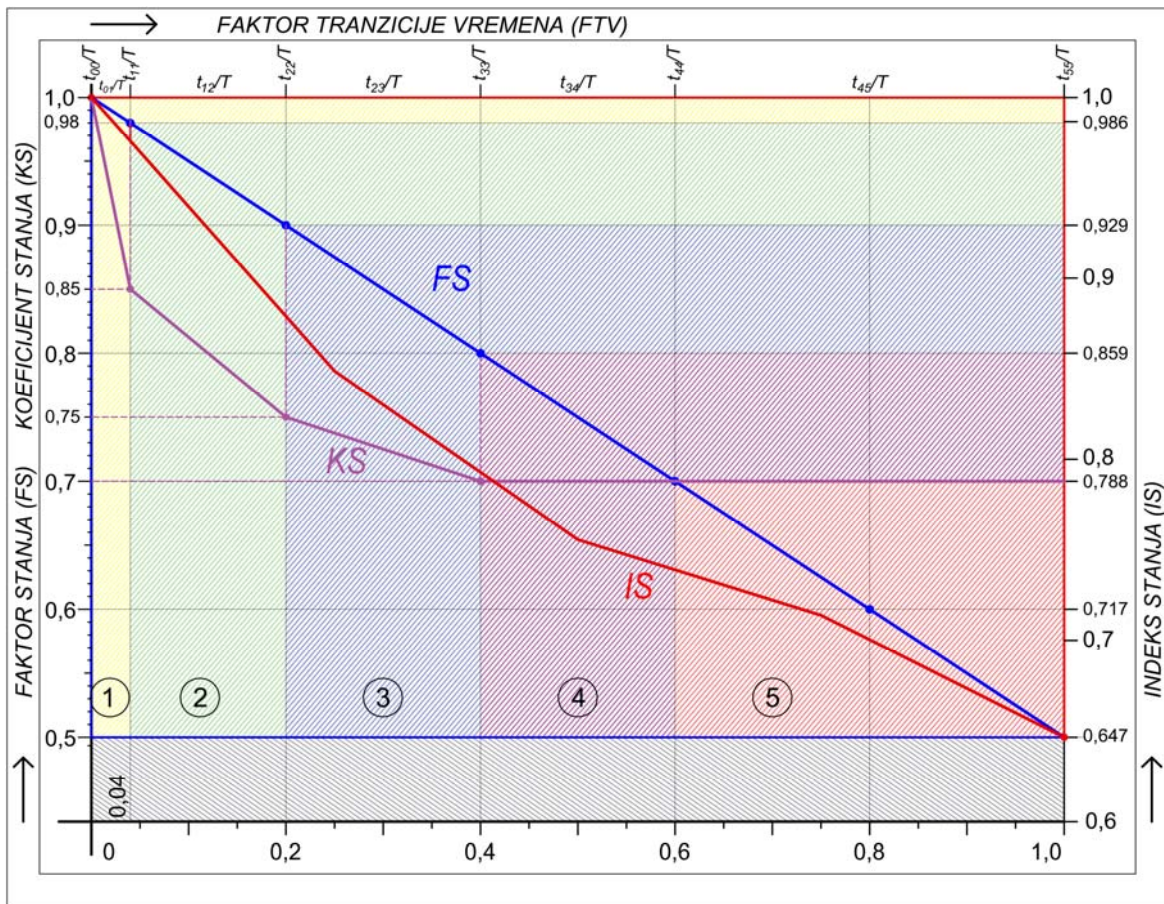
Korelacija između ocene stanja i modela nosivosti konstrukcija prema standardu AASHTO- LRFR, 2003, i rezultata istraživanja [183] data je izrazom (4.186). Koeficijent stanja konstrukcije Φ_c je dat u tabeli 4.29 u poglavlju 4. Vrednosti za Φ_c su date na bazi američkih ocena stanja 0-9-N i opisa stanja konstrukcije. Iz tabele 4.38 - *Gubitak poprečnog preseka elemenata superstrukture mostova nastalog usled preopterećenja, mraza i korozije* i tabele 4.39 - *Stanja predhodno napregnute betonske konstrukcije usled oštećenja-gubitka poprečnog preseka*, mogu se odrediti koeficijenti stanja konstrukcije Φ_c na osnovu veličine oštećenja u procentima.

Na osnovu vrednosti koeficijenta stanja konstrukcije Φ_c preuzetih iz tabele 4.29 američkih standarda AASHTO LRFR u ovom radu su određene vrednosti koeficijenta stanja $KS \leq 1$ za šest ocena stanja u zavisnosti od veličine oštećenja. Za ocenu stanja 0 vrednost $KS=1$. Vrednosti KS su date tabeli 5.12 u zavisnosti od veličine odnosno faktora oštećenja i ostalih faktora datih u tabeli.

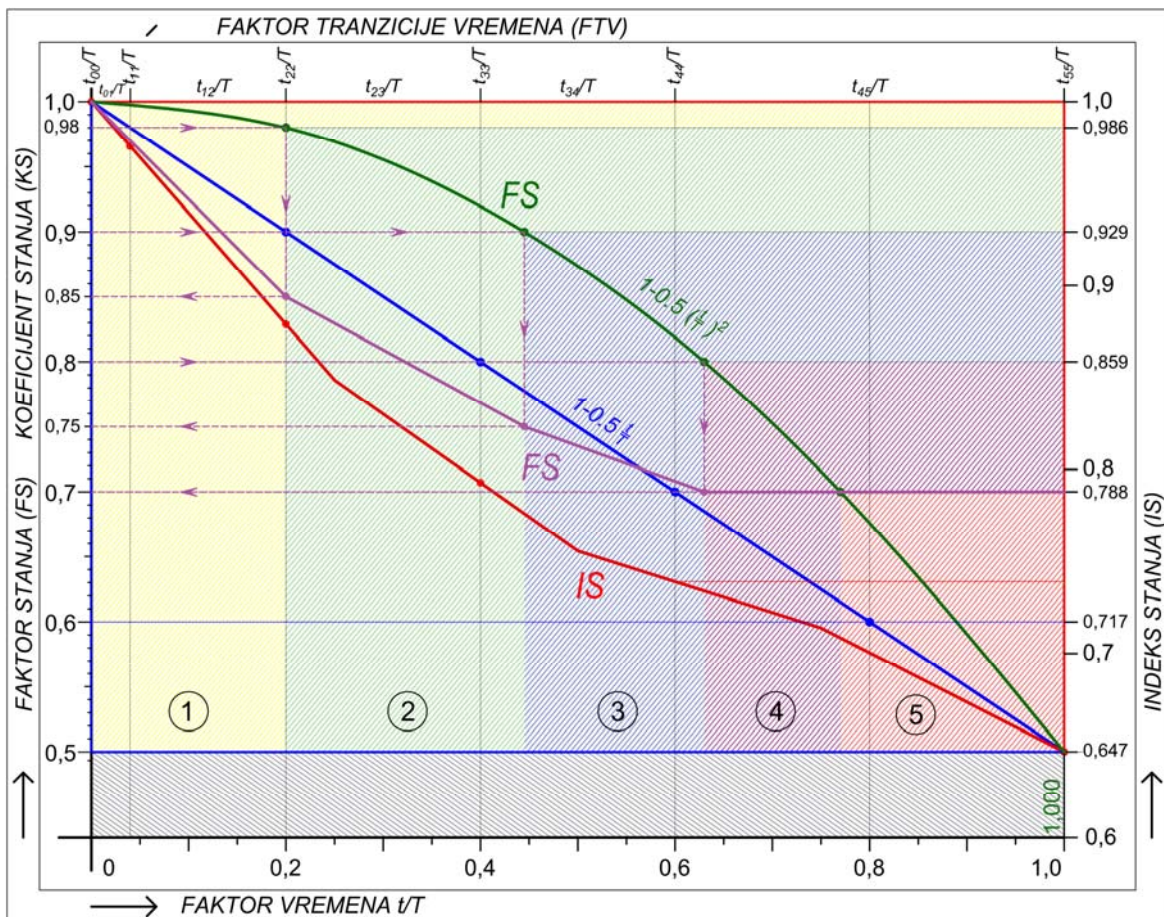
Tabela 5.12 Predlog –vrednosti koeficijenta stanja KS

ES EVALUACIJA STANJA	TS TRANZICIJONA STANJA	FTV FAKTOR TRANZICIJONO VREMENA	FO FAKTOR OŠTEĆENJA	FS FAKTOR STANJA	IO INDEKS OŠTEĆENJA	IS INDEKS STANJA	KS KOEFIČIJENT STANJA
0		t_{00}/T	0	1	0	1	1,00
	01	$t_{11}/T-t_{00}/T=t_{01}/T$	0,0 – 0,02	0,98-1,0	0,0 – 0,019	0,981-1,0	0,85-1,0
1		t_{11}/T	0,02	0,98	0,019	0,981	0,85
	12	$t_{22}/T-t_{11}/T=t_{12}/T$	0,02 -0,10	0,9-0,98	0,019-0,124	0,876-0,981	0,75-0,85
2		t_{22}/T	0,10	0,90	0,124	0,876	0,75
	23	$t_{33}/T-t_{22}/T=t_{23}/T$	0,1 – 0,20	0,8-0,9	0,124–0,219	0,781-0,876	0,70-0,75
3		t_{33}/T	0,20	0,80	0,219	0,792	0,70
	34	$t_{44}/T-t_{33}/T=t_{34}/T$	0,2 – 0,30	0,7-0,8	0,219–0,270	0,730-0,781	0,70
4		t_{44}/T	0,30	0,70	0,270	0,738	0,70
	45	$t_{55}/T-t_{44}/T=t_{45}/T$	0,3 -0,50	0,3 -0,50	0,270-0,353	0,647 -0,730	0,70
5		t_{55}/T	0,50	0,50	0,353	0,647	0,70

Formiranjem vrednosti koeficijenta stanja KS se zaključuje da se nosivost konstrukcije može smanjiti za najviše 30% pri oceni stanja 3 i većoj od 3.



Slika 5.24 Nomogram proporcionalnih oštećenja sa koeficijentima stanja KS



Slika 5.25 Nomogram usporenog procesa deterioracije sa koeficijenom stanja KS.

Na dijagramu na slici 5.24 su prikazane vrednosti koeficijenta stanja K_S na nomogramu proporcionalnih oštećenja. Uvođenjem koeficijenta K_S je omogućeno da se na bazi očitane razlike brzina ultrazvučnih talasa ili razlika energije izlaznih signala, procedurom određivanja oštećenja i ocene stanja, može odrediti nosivost postojeće konstrukcije primenom koncepta graničnog stanja nosivosti prema evrokodu. Ovakva procedura za sada nije sadržana u evrokodovima ali je moguća, pa se može sugerisati njeno uvođenje kroz promenu nacionalnih aneksa ili pravilnika.

Problem procene stanja postojećih konstrukcija nije rešen u evrokodovima. Za proveru stanja postojećih konstrukcija prikupljanjem i formiranjem podataka o stanju konstrukcija tokom vremena može se primeniti koncept proračuna prema evrokodu za novoprojektovane konstrukcije. Inspekcijskim pregledom i merenjem razlika brzina ultrazvuka, nulog i aktuelnog čitanja, mogu se odrediti podaci o oštećenju i odrediti ocena stanja. Prva provera nosivosti se sprovodi preko koeficijenta stanja, čija je vrednost iz tabele 5.12 ($0,7 \leq K_S \leq 1$), na osnovu koje se proverava da li nosivost postojeće konstrukcije zadovoljava zahteve evrokodova. Kod većih oštećenja, kada postoje značajna prekoračenja nosivosti, potrebno je detaljno ispitivanje materijala i detaljna analiza dejstava na konstrukciju. Kod manjih oštećenja potrebno je sračunati nosivost oštećene konstrukcije na bazi merenih veličina i uticaja od stalnih dejstava, i za preostali kapacitet nosivosti sračunati uticaje promenljivih odnosno pokretnih dejstava. Upoređenjem sračunatih potrebnih opterećenja i projektovanih opterećenja može se zaključiti u kakvom je stanju konstrukcije. Ukoliko konstrukcija ne zadovoljava ni ovaj zahtev onda je preostaje provera iskorišćenja zaliha nosivosti konstrukcije.

U istraživanjima procene stanja postojećih konstrukcija kod kojih je tokom vremena došlo do promena svojstava materijala ili do oštećenja, potrebno je proveriti opravdanost ranije usvojenih projektnih modela nesigurnosti, kao i vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti za dejstva i za svojstva materijala. Kod već usvojenih modela nesigurnosti izvođenja ili projektovanja, kod postojećih konstrukcija moguće je korigovati te modele i proveriti vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti za dejstva i za svojstva materijala.

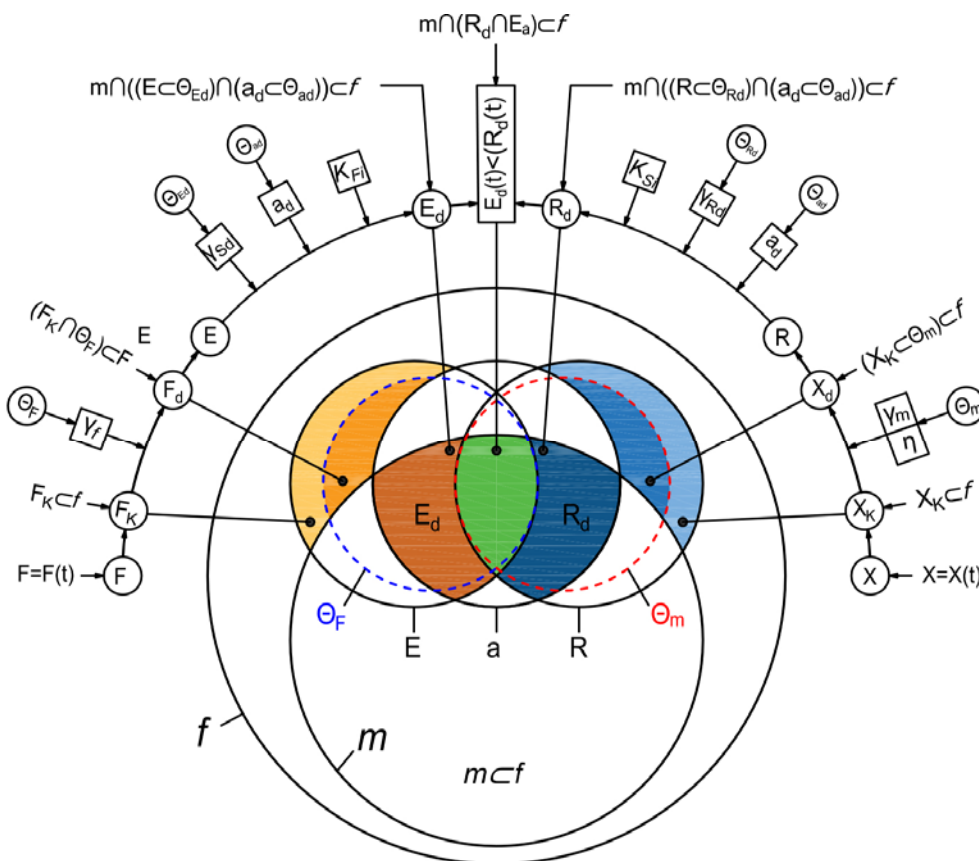
Primenom naprednih probabilističkih metoda istraživanja na bazi stohastičkih modela, moguće je izvršiti kalibraciju parcijalnih koeficijenata sigurnosti na bazi podataka praćenja stanja i time redukovati njihove početne vrednosti. Ukoliko su sve rezerve nosivosti iscrpljene, a zahtev nosivosti nije ispunjen, onda se određuje mara ograničenja nosivosti konstrukcije za prijem promenljivih ili pokretnih dejstava, kao što je slučaj kod mostova gde su česta ograničenja osovinskog opterećenja teških vozila. Alternativa ovom rešenju, tamo gde je to moguće, je prenamena objekta i u vezi sa tim promena klasama posledica i klasa pouzdanosti u zavisnosti od vrednosti koeficijenta za dejstva K_H . Tamo gde su iscrpljene navedene mogućnosti, pristupa se merama pojačanja konstrukcije.

U praksi se pokazalo da, pojačanjem postojećih konstrukcija primenom zahteva evrokodaova koji važi samo za novoprojektovane konstrukcije, se dobijaju veoma skupa i neisplativa rešenja. Napredne metode na bazi podataka o stanju konstrukcija omogućuju primenu realnih vrednosti faktora sigurnosti i za dejstva i za nosivost a time i ublažavanje zahtevanih vrednosti prema evrokodu. Ovo potvrđuje i postojanje velikog broja mostova koji uprkos svom dobrom stanju godinama odgovaraju svojoj nameni, a proračunom pokazuju da ne zadovoljavaju zahteve evrokodova.

Praćenje stanja i formiranje baze podataka je zasnovano na redovnim pregledima stanja objekta [17]. U zavisnosti od zahteva redovni pregledi mogu biti osnovni, glavni i monitoring. Vizuelni pregledi se koriste kod osnovnih pregleda. Kod glavnih pregleda, osim vizuelnih pregleda, koriste se merenja i ispitivanja materijala, geometrije i dejstava. Savremeni način praćenja stanja je monitoring koji podrazumeva praćenje stanja konstrukcije putem ugrađenih senzora u konstrukciju na osnovu čega je moguće elektronsko neprekidno praćenje ponašanja konstrukcije tokom eksploatacije.

Istraživanja detekcije oštećenja, koja su sprovedena u ovom radu, na bazi propagacije mehaničkih talasa uspešno se mogu primeniti za monitoring. Senzori za detekciju oštećenja se ugrađuju konstrukciju u fazi izvođenja radova i povezani su sa uređajima za emitovanje i analizu izlaznih signala. Na početku merenja se očitava nulti podataka vremena i svaka promena očitnog vremena u toku eksploatacije objekta ukazuje na pojavu oštećenja ili neku promenu u materijalu. Najpreciznije i najpouzdanije su metode zasnovane na promeni energije izlaznih talasa čiji su modeli prikazani u ovom radu. Ove metode su još uvek u razvoju i za sada nisu našle široku primenu u praksi.

Na osnovu prikupljenih podataka o stanju materijala, geometrije i dejstava može se proveriti sigurnost konstrukcije prema evrokodovima. Baza podataka se formira na bazi glavnog pregleda ili putem monitoringa i sadrži korekciju modela nesigurnosti na bazi utvrđivanja da li je došlo do nesigurnosti koje su predviđene u ranim fazama projektovanja i izvođenja. Na osnovu prikupljenih podataka formiraju se skupovi slučajnih promenljivih za dejstva, svojstva materijala, geometrije i nepouzdanost modela. Svi ovi skupovi su neodvojivi deo mehaničkog i fizičkog modela konstrukcije. Mehanički model obuhvata noseći sistem konstrukcije, geometrijske podatke dejstva i svojstva materijala.



Slika 5.26 Domen nosivosti slučajnih promenljivih E, R, a, m, θ_m

Na slici 5.26 dat je šematski prikaz domena nosivosti slučajnih promenljivih za dejstva $E(t)$ i nosivost konstrukcije $R(t)$ u semi-probabilističkom konceptu sigurnosti konstrukcija prema evrokodu. Na slici 5.26 primenjene su sledeće oznake i simboli:

f	- oznaka za fizički model
m	- oznaka za mehanički model
$F=F(t)$	- dejstvo, gde dejstvo u funkciji vremena t , može biti $F(t)=G(t)$ - stalno, $F(t)=Q(t)$ - promenljivo ili $F(t)=A(t)$ - incidentno
F_k	- karakteristične vrednosti dejstva Prema EN1990, deo 6.3. reprezentativna vrednost je $F_{rep} = F_k$ za $\psi=1$
γ_f	- parcijalni koeficijent sigurnosti za dejstvo, vrednost na bazi nesigurnosti modela za dejstva θ_F .
F_d	- proračunska vrednost dejstva
E	- uticaj od dejstva
E_d	- proračunska vrednost uticaja od dejstva
a_d	- proračunska vrednost geometrijskih podataka
θ_F	- faktor proračunskog modela za dejstva
θ_{Sd}	- faktor proračunskog modela za uticaj od dejstva
θ_{ad}	- faktor proračunskih modela geometrijskih podataka
θ_m	- faktor proračunskog modela za svojstva materijala
θ_{Rd}	- faktor proračunskog modela za nosivost konstrukcije
γ_f	- parcijalni koeficijent sigurnosti za dejstva
γ_{Sd}	- parcijalni koeficijent sigurnosti za uticaje od dejstava
γ_F	- parcijalni koeficijent sigurnosti uticaja od dejstava
$X=X(t)$	- svojstvo materijala u funkciji vremena t
X_k	- karakteristična vrednost svojstva materijala
X_d	- proračunska vrednost svojstva materijala
R	- nosivost konstrukcije
R_d	- proračunska nosivost konstrukcije
γ_m	- parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala
γ_{Rd}, γ_M	- parcijalni koeficijent sigurnosti za nosivost konstrukcije
η	- srednja vrednost koeficijenta konverzije
K_{Fi}	- koeficijent za dejstva prema klasama pouzdanosti ($i=1,2,3$) Prema EC 0, deo B3.3, vrednosti su za $RC1=0,9$; $RC2=1,0$; $RC3=1,1$ koeficijenti za dejstva prema klasama pouzdanosti K_{Fi} , prema EC 0, deo B3.3, dati su vrednosti :
	$K_{F1} = 0,9$ za RC1
	$K_{F2} = 1,0$ za RC2
	$K_{F3} = 1,1$ za RC3
KS_j	-koeficijenti stanja konstrukcije $0,7 \leq KS \leq 1$ ($j=0,1,2,3,4,5$) ²⁹

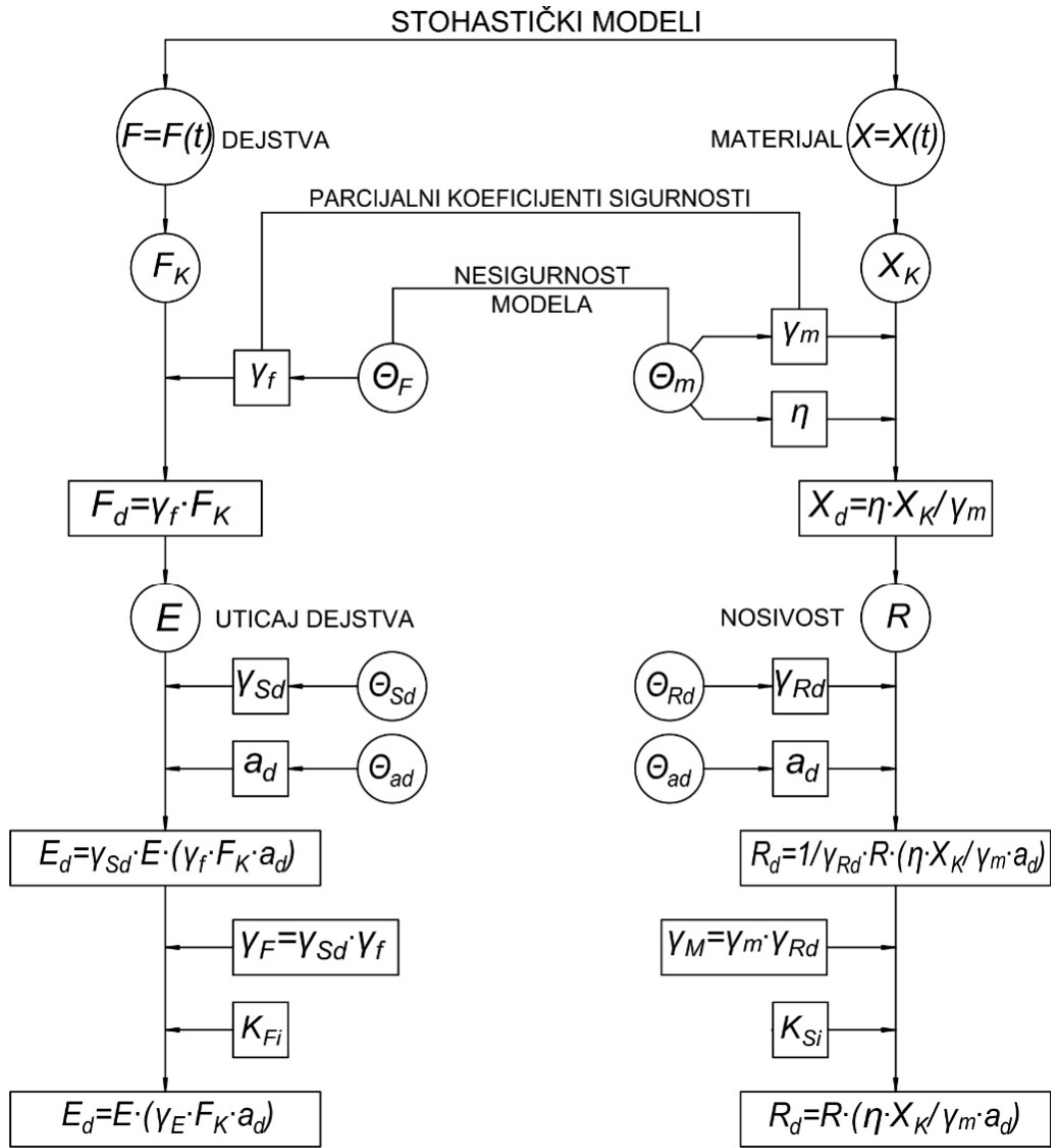
²⁹ Upotreba koeficijenta stanja konstrukcije je predlog autora i nije sadržan u evrokodu

Baze podataka se formiraju kao podskupovi slučajnih promenljivih za dejstva $F=F(t)$, za materijale $X=X(t)$ i za modele nesigurnosti, na osnovu prikupljenih podataka vremenskog praćenja stanja konstrukcije. Proračunske vrednosti uticaja od dejstava i nosivosti su definisane presekom skupova osnovnih slučajnih promenljivih $F(t)$, $R(t)$, $a(t)$, θ i m . Presek skupova čini domen nosivosti slučajnih promenljivih. Podaci o svojstvu materijala sadrže podatke o detektovanom oštećenju i/ili promeni svojstva materijala.

Prema evrokodu na osnovu stohastičkog modela proračunavaju se odgovarajuće karakteristične vrednosti $F_k(t)$ i $X_k(t)$. Na bazi prikupljenih podataka procenjuju se modeli nesigurnosti na bazi stohastičkih modela, i osnovanost veličine njihovih parcijalnih koeficijenata sigurnosti za postojeće objekte. Često se uzimaju vrednosti parcijalnih koeficijenata γ_f i γ_m na bazi utvrđivanja činjeničnog stanja, umesto njihovih nominalnih vrednosti iz faze projektovanja. Kod graničnog stanja nosivosti određuju se podskupovi proračunskih vrednosti za dejstva $F_d(t)$ i svojstva materijala $X_d(t)$ kao presek tih podskupova sa odgovarajućim podacima modela nesigurnosti. Na osnovu proračunskih vrednosti dejstava i svojstva materijala na mehaničkom modelu utvrđuje se nesigurnost modela nosećih sistema i nesigurnost modela geometrijskih podataka, a zatim se određuju uticaji od dejstava $E(t)$ i nosivost konstrukcije $R(t)$. Proračunske vrednosti za uticaje od dejstva $E_d(t)$ i za nosivost $R_d(t)$ se dobijaju na osnovu odgovarajućih modela nesigurnosti i sračunatih parcijalnih koeficijenata sigurnosti kao presek podskupova $E_d(t)$ i $R_d(t)$, sa odgovarajućim podskupovima koji čine podaci mehaničkog modela, geometrije i njihovi modeli nesigurnosti. Poznavanjem ocene stanja i oštećenja konstrukcije proračunske vrednosti nosivosti $R_d(t)$ se mogu redukovati koeficijentom stanja KS . Poređenjem proračunskih vrednosti $E_d(t)$ i $R_d(t)$ donosi se zaključak o sigurnosti postojeće konstrukcije. U slučaju promene namene objekta proračunske vrednosti za uticaje od dejstva $E_d(t)$ se mogu redukovati koeficijenti za dejstva prema klasama pouzdanosti K_{F_i} .

Za određivanje karakterističnih dejstava, svojstva materijala, parametara geometrijskih podataka i modela nesigurnosti koriste se stohastički modeli. Kalibracija parcijalnih koeficijenata sigurnosti se vrši na osnovu naprednih probalističkih metoda pouzdanosti konstrukcija. Stohastički model sadrži dve grane podataka i to za dejstva i materijale. Unutar grana predstavljeni su koeficijenti sigurnosti i faktori modela nesigurnosti.

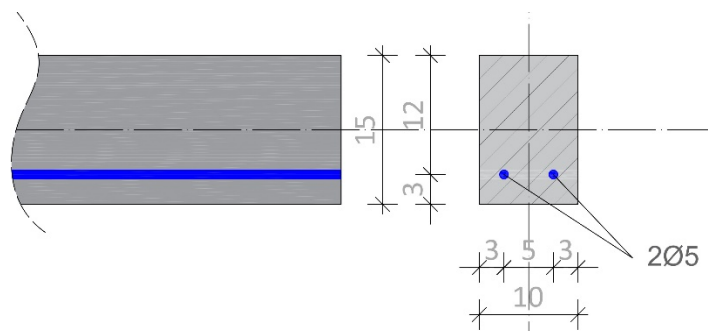
Na slici 5.27 dat je šematski prikaz semi-probalističkog koncepta proračuna prema standard SRPS EN1990 za potrebe provere sigurnosti postojećih konstrukcije. Šema pokazuje paralelnost prikupljanja podataka za dejstva i svojstva materijala i njihovih karakterističnih i proračunskih vrednosti. Radi uprošćenog prikaza koncepta proračuna, šema je predstavljena za jednu vrstu dejstava umesto kombinacije dejstava.



Slika 5.27 Semi-probabilistički koncept proračuna za postojeće konstrukcije prema evrokodovima

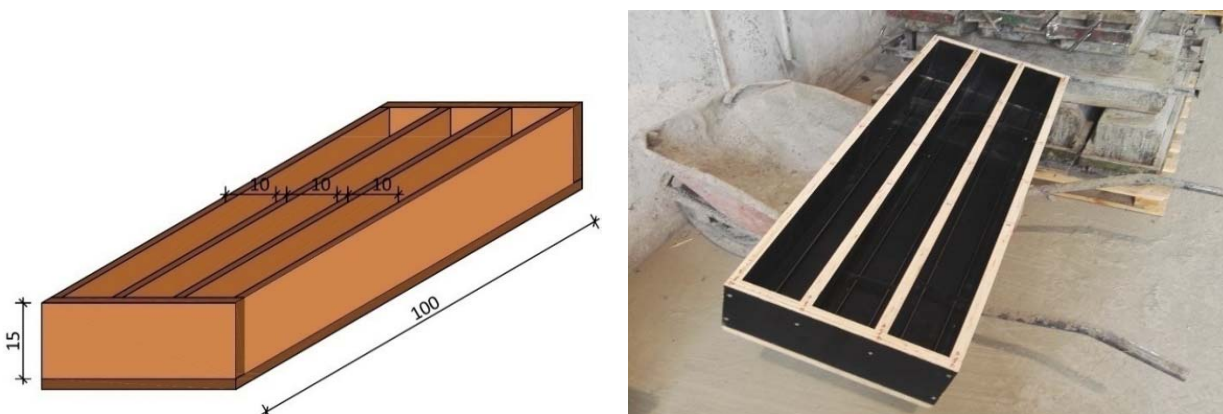
5.4 LABORATORIJSKI MODEL

Formiranje laboratorijskih modela prema usvojenim dimenzijama (*slika 5.2*) zahtevalo je detaljnu pripremu u cilju sprečavanja eventualnosti koje bi mogle uticati nepovoljno na sam tok ispitivanja a samim tim i na dobijene rezultate. Obzirom da se poprečni presek modela se oslabljuje zarezom kojim se simulira oštećenje, zbog mogućnosti pojave krtoq loma tokom transporta i manipulacije modeli su ojačani armaturom. Zbog ravnomernijeg rasprostiranja talasa kroz element presek nije klasično armiran, već je samo ojačan u donjoj zoni podužnim šipkama od glatke armature 2Ø5 bez poprečne armature i uzengija. Položaj armature je određen statičkom visinom elementa, a šipke su pričvršćene improvizovanim distancerima (*slika 5.28*).



Slika 5.28 Položaj armature u elementu

U skladu raspoloživim tehničkim kapacitetima, jednovremena izrada svih elemenata definisanih predmetom ispitivanja nije bila moguća. Optimizacijom se došlo do rešenja jednovremene izrade tri modela, a da se neophodan broj potrebnih modela izradi u više serija. Za izradu jedne serije napravljen je kalup od vodonepropusne šper ploče dimenzija datih na slici 5.29.



Slika 5.29. Izgled i dimenzije kalupa za izradu betonskih gredica

Dimenzije i izgled kalupa su usklađeni sa opremom koja se koristila za ugradnju betona (vibro stolom) i optimalnom težinom jedne serije uzoraka zbog lakše manipulacije. Armatura je postavljena na dnu kalupa što predstavljala donju zonu elementa, a otvorena strana kalupa predstavlja gornju zonu elementa odnosno zonu na kojoj se simuliraju oštećenja. Kalup je osmišljen kao montažno-demontažni jer je za izradu svih serija uzoraka predviđeno korišćenje istog kalupa. Posle izrade svake od serija kalup je kompletno rastavljan, čišćen i ponovo sastavljan uz obaveznu proveru geometrije kalupa.

Kao posledica deformacije kalupa na gotovim gredicama su zabeležena minimalna odstupanja u geometriji od 0,1%, koja nisu uticala na merene rezultate.

Simulacija oštećenja je osmišljena tako da se modelima ne naruše spoljne dimenzije. Oštećenja su simulirana u vidu zareza u elementu koji je izveden utiskivanjem pločica upravno na element u svežem betonu na unapred obeleženim mestima.



Slika 5.30 Pločice od pleksiglasa korišćene za simulaciju oštećenja

Pločice su od pleksiglasa debljine 3 mm i široke 10 cm kako bi zahvatile celu slobodnu širinu kalupa odnosno celu širinu elementa. Sa gornje strane pločica su napravljeni graničnici kako bi pločice zauzele predviđeni položaji kako ih beton ne bi istisnuo. Graničnici su osmišljeni kao montažno demontažni kako bi se omogućilo lakše uklanjanje pločica po očvršćavanju betona. Napravljeno je više različitih pločica visine od 2 do 10 cm prema zadatim parametrima oštećenja. Pločice su postavljene sa slobodne strane kalupa tj. gornja zona elementa. Obzirom da svež beton poprima oblik oplata formirani oblik predstavlja zarez odnosno prekid u elementu koji se može posmatrati kao oštećenje.

5.4.1 PROGRAM ISPITIVANJA

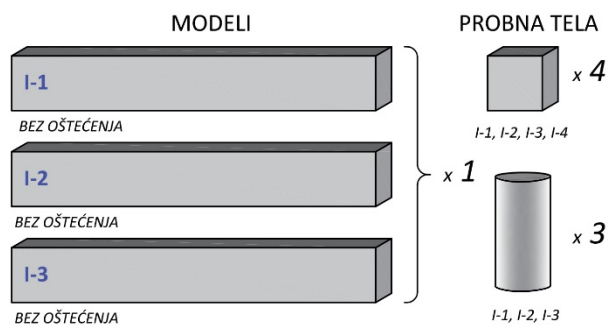
U skladu sa predmetom i ciljevima istraživanja laboratorijska ispitivanja obuhvataju ispitivanja ponašanja modela – betonskim gredicama dimenzija 100x150x1000 mm sa različitim stepenima oštećenja. U skladu sa navedenim napravljeni su modeli:

- modeli bez oštećenja, izvedeni monolitno bez prekida – ukupno 6 modela
- modeli sa jednim simuliranim oštećenjem u vidu zareza; napravljeno je više modela sa različitim stepenima oštećenja dubine: 2, 4, 6 i 10 cm – ukupno 4 modela
- modeli sa dva simulirana oštećenja u vidu zareza; napravljeno je dva elementa sa dva oštećenja: element sa oštećenjem dubine 4 i 4 cm i dubina element sa oštećenjem dubine 6 i 10 cm

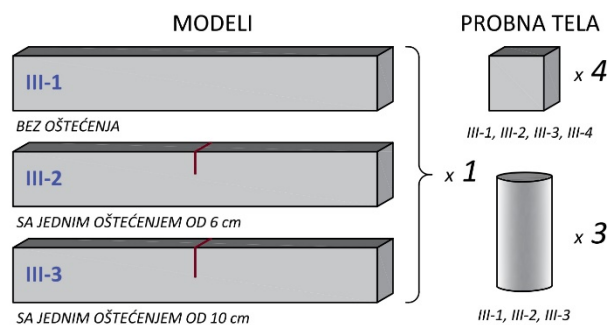
Oštećenja na elementima su simulirana upravno na element prema datom opisu. Kod elemenata sa jednim simuliranim oštećenjem, oštećenje je pozicionirano u polovini raspona grede. Kod elemenata sa dva simulirana oštećenja, oštećenja su pozicionirana u trećini raspona na 35 cm od kraja elementa na međusobnom rastojanju od 30 cm. Usled varijacija koje se javljaju u strukturi betona pored modela sa različitim stepenom oštećenja potrebno je bilo napraviti odgovarajući broj probnih tela za utvrđivanje karakteristika očvrstlog betona.

Za potrebe istraživanja napravljeno je ukupno četiri serije elemenata (*slika 5.24*).

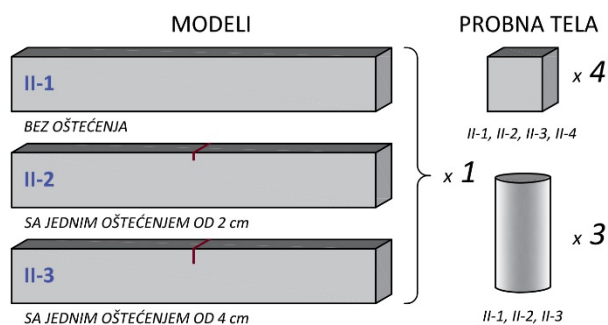
SERIJA I



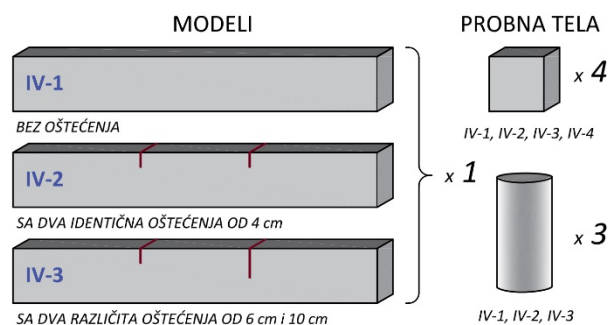
SERIJA III



SERIJA II



SERIJA IV



Slika 5.31 Modeli i probna tela izrađeni po serijama betoniranja

Svaka od serija sastoji se od tri betonske gredice sa različitim stepenom oštećenja :

- Serija I se sastoji od tri uzorka bez oštećenja,
- Serija II se sastoji od jednog uzorka bez oštećenja, jednog uzorka sa jednim oštećenjem od 2 cm i jednog uzorka sa oštećenjem od 4 cm u polovini raspona
- Serija III se sastoji od jednog uzorka bez oštećenja, jednog uzorka sa jednim oštećenjem od 6 cm i jednog uzorka sa oštećenjem od 8 cm u polovini raspona
- Serija IV se sastoji od jednog uzorka bez oštećenja, jednog uzorka sa dva identična oštećenja od 4 cm i jednog uzorka sa dva različita oštećenja od 6 cm i 10 cm u trećini raspona

U svakoj od serija izrađen je po jedan uzorak bez oštećenja koji predstavlja etalon. Za ispitivanje karakteristika očvrstlog betona uz savku od serija su uzimana probna tela:

- tri probna tela oblika kocke dimenzija 150/150/150 mm za ispitivanje čvrstoće na pritisak i određivanje zapreminske mase betona [184],
- jedno probno telo oblika kocke dimenzija 150/150/150 mm za utvrđivanje sadržaja vlage [12]
- tri probna tela oblika cilindra dimenzija Ø150/300 mm za ispitivanje statičkog modula elastičnosti [185].

Ispitivanja na laboratorijskim elementima obuhvataju sledeće faze:

- izrada i nega uzoraka
- utvrđivanje karakteristika očvrstlog betona - određivanje zapreminske mase, vlažnosti, čvrstoće na pritisak i modula elastičnosti
- ultrazvučna merenja na betonskim gredicama:
 - merenja na modelima bez oštećenja tokom izazivanja oštećenja delovanjem spoljne sile sve do loma elemenata
 - merenja na modelima sa poznatim stepenom oštećenja.

5.4.2 IZRADA UZORAKA

Prema utvrđenom programu i obimu ispitivanja u unapred pripremljenim kalupima izrađeno je četiri serije modela i probnih tela. Betoniranje je sprovedeno u skladu sa važećim domaćim standardima u periodu 14.05.-17.05.2018 godine u zatvorenoj hali u okviru betonske baze firme „ARHIBET“ iz Niša.

Za izradu uzoraka je korišćen mašinski spravljen beton MB50 V6 M150 M+S 0 prema recepturi koja se koristi za izradu elemenata betonske galanterije koji se koriste na infrastrukturnim projektima. Receptura betona korišćena za izradu serija uzoraka prikazana je u tabeli 5.13. Učešće komponenti je dato za 1m³ betona.

Tabela 5.13 Receptura betona korišćena za izradu uzoraka

Beton MB50 V6 M150 M+S 0			Σ	
1.	AGREGAT:	Rečni separisani „CD HIS“ Niš		
		frakcija	učešće	
		0/4	38 %	654,0 kg
		4/8	24 %	412,0 kg
		8/16	38 %	654,0 kg
		16/31,5	/	/
	Σ:	100%	1720 kg	
2.	CEMENT:	Holcim, CEM II/A-L 42,5 R		
3.	V/C :	Vodocementni faktor (bez aditiva)		
4.	VODA:	Iz gradskog vodovoda		
5.	ADITIV:	MC Bauhemie POWERFLOW 3200		
6.	Predviđena zapreminska masa svežeg betona		≈ 2365 kg/m ³	
7.	Klasa sleganja- S2 plastična konzistencija, uvučeni vazduh 4,5%			

Beton se mašinski spravlja u mešalici koja ima kapacitet od 0,3 m³. Za izradu jedne serije uzoraka prema dimenzijama kalupa potrebno je 0,15 m³ betona. Od mešalice do mesta ugradnje beton se prenosi putem prenosne korpe tzv. „kible“ ispod koje se nalazi vibro sto na kome se postavljaju kalupi i ugrađuje beton (slika 5.32).



Slika 5.32 Izrada laboratorijskih modela u betonskom pogonu

Na slici 5.32 levo prikazan je izgled fabrike betona i aparatura korišćena tokom izrade serija uzoraka. Na slici 5.32 desno prikazana je ugradnja betona na vibro stolu tokom izrade gredica. Izrada probnih tela vršena ručno u standardnim čeličnim kalupima [186].

Nakon 24h po betoniranju, probni uzorci su vađeni iz kalupa, stavljeni u bazen sa vodom i tokom perioda od 28 dana negovani u okviru fabrike betona [187]. Betonske gredice su po vađenju iz kalupa bile odložene na paletama i negovane su zajedno sa ostalim betonskim elementima u pogonu tokom perioda od 28 dana.



Slika 5.33 Nege uzoraka u pogonu betonske baze.

Na slici 5.33 levo prikazan je bazen za negovanje uzoraka koji se nalazi u okviru betonske baze firme „ARHIBET“ iz Niša. Na slici 5.33 desno prikazano je odlaganje betonskih gredica po vađenju iz kalupa. Po dostizanju pune čvrstoće posle 28 dana od izrade poslednje serije, svi napravljeni elementi preneti su u laboratoriju za građevinske materijale na Građevinsko arhitektonskom fakultetu u Nišu u kome su vršena sva laboratorijska ispitivanja.

5.4.3 ODREĐIVANJE VLAŽNOSTI

Saglasno programu ispitivanja nakon perioda nege i dopremanja uzoraka u laboratoriju po jedan uzorak oblika kocke dimenzija 150x150x150 mm iz svake serije betoniranja uzet je za ispitivanje sadržaja vlage u betonu. Postupak merenja se sastoji od merenja težine uzoraka u zasićenom stanju nakon čega su uzorci stavljeni u komoru za sušenje do konstantne mase.



Slika 5.34 Aparatura za merenje: elektronska vaga (levo), komora za sušenje (desno)

Na slici 5.34 levo prikazana je elektronska vaga KERN model GAB 12k0,1N sa klasom tačnosti od 0,1 g i mernim opsegom do 12000 g. Na slici 5.34 desno prikazana je ELEKTRON model S250 u kojoj se uzorci suše na 250°C.

Nakon sušenja ponovo je vršeno merenje težine i na taj način je utvrđen sadržaj vlage. Rezultati merenja prikazani su u tabeli 5.14.

Tabela 5.14 Sadržaj vlage u ispitivanim uzorcima

OZNAKA UZORKA	TEŽINA		ZADRŽANA VLAGA
	ZASIĆEN UZORAK	SUV UZORAK	
I-4	8.103,7 g	7.852,1 g	3,1 %
II-4	7.996,3 g	7.726,6 g	3,4 %
III-4	8.265,7 g	8.026,3 g	2,9 %
IV-4	8.162,9 g	7.190,2 g	11,9 %

Na osnovu utvrđenog sadržaja vlage određen je sadržaj pora i homogenost strukture očvrstlog betona, koji je kao podatak važan za formiranje numeričkog modela.

5.4.4 ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE NA PRITISAK I ZAPREMINSKE MASE

Na uzorcima oblika kocke dimenzija 150x150x150 mm sprovedeno je merenje čvrstoće na pritisak saglasno standardu SRPS EN 12390-3:2010 [188]. Za svaku seriju betoniranja za potrebe ovog ispitivanja napravljena su po tri uzorka.

Pre ispitivanja čvrstoće izmerena je težina svakog uzorka i određena zapreminska masa saglasno standardu SRPS EN 12390-7:2010 [184].



Slika 5.35 Presa za ispitivanje čvrstoće na pritisak

Na slici 5.35 prikazana je presa UTEST model UTC 5740 koja je korišćena za merenje čvrstoće na pritisak. Tokom merenja sila na presi je nanošena uz kontrolisani priraštaj napona od 0,6 MPa/s.

Na slici 5.36 prikazana su probna tela serije I nakon ispitivanja čvrstoće na pritisak, a dobijeni rezultati merenja prikazani su u tabeli 5.15.



Slika 5.36 Probna tela serije I

Tabela 5.15 Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije I

OZNAKA	STAROST (dana)	TEŽINA (g)	ZAP.MASA (kg/m ³)	SILA (kN)	ČVRSTOĆA (N/mm ²)
I-1	32	8.173,4	2.421,75	1.425,40	63,35
I-2	32	8.154,5	2.416,15	1.499,46	66,64
I-3	32	8.206,3	2.431,50	1.436,72	63,05

Na slici 5.37 prikazana su probna tela serije II nakon ispitivanja čvrstoće na pritisak, a dobijeni rezultati merenja prikazani su u tabeli 5.16.



Slika 5.37 Probna tela serije II

Tabela 5.16 Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije II

OZNAKA	STAROST (dana)	TEŽINA (g)	ZAP.MASA (kg/m ³)	SILA (kN)	ČVRSTOĆA (N/mm ²)
II-1	31	8.200,9	2.429,90	1.497,82	66,57
II-2	31	8.116,8	2.404,98	1.432,25	63,66
II-3	31	8.014,9	2.374,79	1.392,07	61,87

Na slici 5.38 prikazana su probna tela serije III nakon ispitivanja čvrstoće na pritisak, a dobijeni rezultati merenja prikazani su u tabeli 5.17.



Slika 5.38 Probna tela serije III

Tabela 5.17 Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije III

OZNAKA	STAROST (dana)	TEŽINA (g)	ZAP.MASA (kg/m ³)	SILA (kN)	ČVRSTOĆA (N/mm ²)
III-1	30	8.266,0	2.449,19	1.740,14	77,34
III-2	30	8.354,2	2.475,32	1.646,77	73,19
III-3	30	8.149,0	2.414,52	1.622,49	72,11

Na slici 5.38 prikazana su probna tela serije IV nakon ispitivanja čvroće na pritisak, a dobijeni rezultati merenja prikazani su u tabeli 5.18.



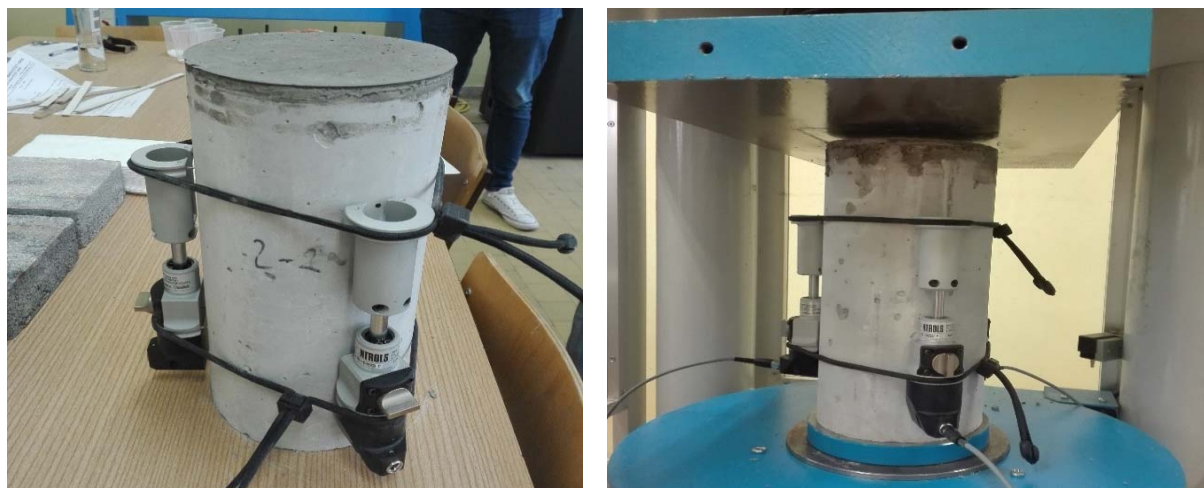
Slika 5.39 Probna tela serije IV

Tabela 5.18 Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije IV

OZNAKA	STAROST (dana)	TEŽINA (g)	ZAP.MASA (kg/m ³)	SILA (kN)	ČVRSTOĆA (N/mm ²)
IV-1	29	8.223,2	2.436,50	1.471,42	65,40
IV-2	29	8.240,9	2.441,75	1.444,43	64,20
IV-3	29	8.288,0	2.455,70	1.513,64	67,22

5.4.5 MERENJE MODULA ELASTIČNOSTI

Na cilindričnim uzorcima dimenzija Ø150x300mm sprovedeno je određivanje sekantnog modula elastičnosti očvrslog betona saglasno standardu SRPS EN 12390-13:2015 [185]. Za merenje je korišćena presa UTEST model UTC5740.



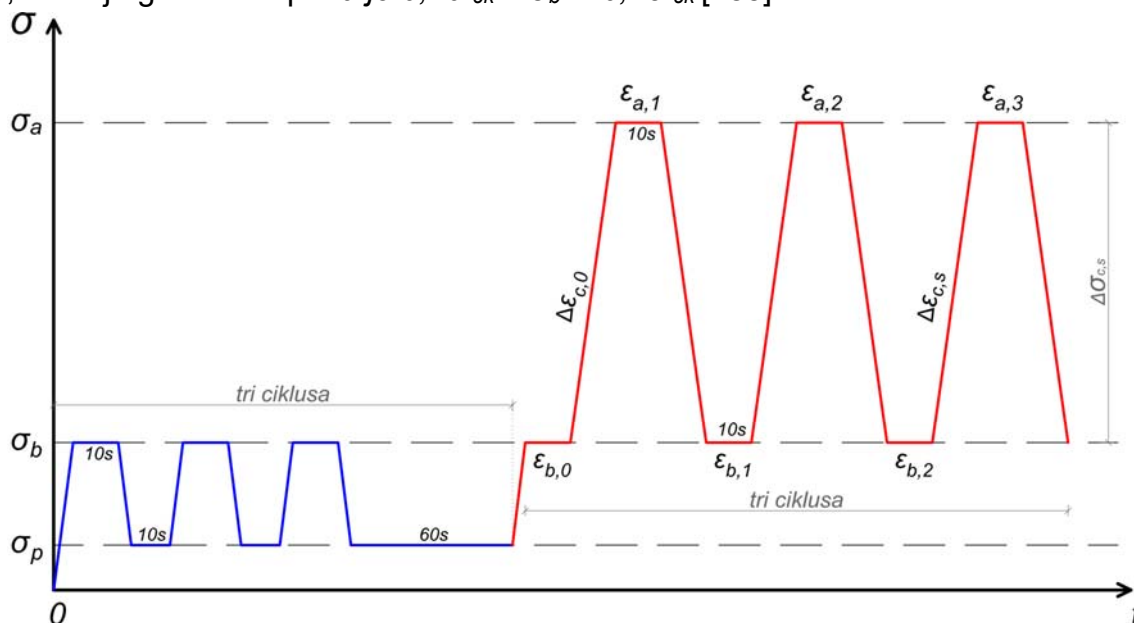
Slika 5.40 Postavljeni ekstezometri na cilindričnom uzorku tokom merenja

Pre početka merenja uzorci su držani duže od 24h van vode. Zbog boljeg prijanjanja na ploče prese, na uzorcima su obrađene ravne površine sa gornje i donje strane. Vertikalno sa strane su postavljeni ekstenzometri u mernim linijama u osnovi pod uglom od 120° za merenje dilatacije pod aksijalnim pritiskom (*slika 5.40 levo*). Baza merenja ekstenzometra je $L=150\text{ mm}$. Na ovaj način pripremljeni uzorci su postavljeni na presu na kojoj su vršena merenja (*slika 5.40 desno*).

Postupak merenja na presi se sastoji od izlaganja cilindričnih uzoraka pritiskajućoj sili predopterećenja i opterećenja.

Predopterećenjem inteziteta od σ_p do σ_b ($0,5\text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$) uzorak se tretira u tri ciklusa sa rasterećenjem radi stabilizacije uzorka. Prema tehničkim karakteristikama prese, vrednost predopterećenja je $\sigma_p = 3,95\text{ Mpa}$.

Uzorak se tretira za tri ciklusa opterećenja i rasterećenja inteziteta od σ_b do σ_a . Vreme održavanja konstantnog napona do $\pm 5\%$ je 10 sekunde. Gornja granica napona je $\sigma_a = f_{ck}/3$, a donja granica napona je $0,10f_{ck} \leq \sigma_b \leq 0,15f_{ck}$ [185].



Slika 5.41 Određivanje sekantnog modula elastičnosti

U prvom ciklusu pri naponu σ_b se meri dilatacija $\varepsilon_{b,0}$ a pri naponu σ_a se meri dilatacija $\varepsilon_{a,1}$. U trećem ciklusu pri naponu σ_b se meri dilatacija $\varepsilon_{b,2}$ a pri naponu σ_a se meri dilatacija $\varepsilon_{a,3}$.

Početni sekantni modul elastičnosti se dobija iz odnosa razlike napona $\Delta\sigma_{c,0}$ i dilatacija $\Delta\varepsilon_{c,0}$ iz izraza:

$$E_{c,0} = \Delta\sigma_{c,0} / \Delta\varepsilon_{c,0} = (\sigma_a - \sigma_b) / (\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0})$$

Stabilizovani sekantni modul elastičnosti se dobija iz odnosa razlike napona $\Delta\sigma_{c,s}$ i dilatacija $\Delta\varepsilon_{c,s}$:

$$E_{c,s} = \Delta\sigma_{c,s} / \Delta\varepsilon_{c,s} = (\sigma_a - \sigma_b) / (\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2})$$

Merenje sekantnog modula elastičnosti sprovedeno je na ukupno četiri uzoraka odnosno na po jednom uzorku iz svake serije. Dobijeni rezultati merenja prikazani su u tabeli 5.19.

Tabela 5.19 Rezultati merenja modula elastičnosti

OPIS	SERIJA I	SERIJA II	SERIJA III	SERIJA VI
Čvrstoća betona na pritisak f_{ck} (MPa)	64,35	64,03	74,21	65,61
Gornja granica napona $\sigma_a = f_{ck}/3$ (MPa)	21,45	21,34	27,74	2187
Donja granica napona $\sigma_b = 0,15f_{ck}$ (MPa)	9,65	9,60	11,13	9,84
Predopterećenje σ_p (MPa)	3,95	3,95	3,95	3,95
Razlika napona $\Delta\sigma_c = \sigma_a - \sigma_b$ (MPa)	11,8	11,76	16,61	12,03
Razlika izduženja baze merenja ΔL (mm)	0,0444	0,0448	0,0594	0,0451
Razlika dilatacija $\Delta\varepsilon_c = \varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}$	$2,972 \times 10^{-4}$	$2,987 \times 10^{-4}$	$3,959 \times 10^{-4}$	$3,005 \times 10^{-4}$
Sekantni modul elastičnosti $E_{c,s} = \Delta\sigma_c / \Delta\varepsilon_c$ (GPa)	39,71	39,37	41,95	40,03

Nakon svakog merenja dobijeni rezultati su računski proveravani putem obrasca [189]:

$$E = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

čime su potvrđene dobijene merene vrednosti.

5.4.6 ODREĐIVANJE DINAMIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI

Dinamički modul elastičnosti betona se može odrediti na dva načina - merenjem rezonantne frekvencije longitudinalnih oscilovanja ultrazvuka ili merenjem vremena, odnosno brzine prolaska ultrazvuka kroz beton.

Dinamički modul elastičnosti betona se određuje ispitivanjima definisanih standardima EN 14146-04 [190], EN 843-2-06 [191], ASTM C215-14 [192] i ASTM E1876-15. [193], ASTM C1259-15 [194] i ISO 12680-05 [195]. Prema EN14146 dinamički modul elastičnosti betona se računa uz pretpostavku da je poasonov koeficijent 0,3 iz izraza :

$$E_d = 15,136 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot f^2 \cdot \rho \cdot C [MPa] \quad (5.28)$$

gde je :

- E_d - dinamički modul elastičnosti betona [MPa]
- $C=1,45$ - koeficijent za prizmatične uzorke.
- f – osnovna sopstvena frekvencija uzorka [1/s] odnosno [Hz]
- L - dužina [m]
- ρ - gustina [kg/m³]

Prema standardima ASTM C1259-15, ASTM E1876-15, ASTM C215-14, ISO 12680, EN843-2 za prizmatično telo od betona dimenzija $b \times h \times L$ dinamički modul elastičnosti je dat prema izrazu:

$$E_d = 0,9464 \left(m \cdot f^2 / b \right) \left(T \cdot L^3 / h^3 \right) [Pa] \quad (5.29)$$

gde je:

- E_d - dinamički modul elastičnosti betona [Pa]
- m - masa uzorka [kg]
- b - širina uzorka [m]
- l - dužina uzorka [m]
- h - visina uzorka [m]
- f – osnovna sopstvena frekvencija uzorka [1/s] odnosno [Hz]
- T - korekcionni faktor zavisi od odnosa dimenzija prizmi : $T=1+6,858(h/L)^2$

Korekcionni faktor T zavisi od geometrije odnosno odnosa poluprečnika inercije r i dužine uzorka L i poasonovog koeficijenta [192]. Za pravougule preseke iznosi $r=h/(2\sqrt{3})$, $r/L=h/(2\sqrt{3}L)$. Za linijske nosače čiji je odnos $L/h > 7,0$ uticaj poasonovog koeficijenta na veličinu korekcionnog faktora T je sasvim zanemarljiv, pa se mogu uzeti samo uticaj geometrijskih podataka r/L . Za odnos $L/h > 28$ korekcionni faktor T teži jedinici pa se može zaključiti da je uticaj geometrijskih podataka r/L sasvim mali (tabela 5.20).

Tabela 5.20 Vrednosti korekcionnog faktora T za $L/h > 7,0$

R.br.	r/L	h/L	L/h	T ($\mu=0,17$)	T ($\mu=0,20$)	T ($\mu=0,26$)
1	0	0	0	1,00	1,00	1,00
2	0,01	0,0346	28,87	1,01	1,01	1,01
3	0,02	0,0693	14,43	1,03	1,03	1,03
4	0,03	0,1039	9,62	1,07	1,07	1,07
5	0,04	0,1386	7,22	1,13	1,13	1,14

Za kratke nosače čiji je odnos $L/h < 7,0$ usled promene geometrijskih podataka r/L dolazi do naglog porasta faktora T (tabela 5.21). Na porast faktora T neznan uticaj ima i promena poasonovog koeficijenta.

Tabela 5.21 Vrednosti korekcionnog faktora T za $L/h < 7,0$

R.br.	r/L	h/L	L/h	T ($\mu=0,17$)	T ($\mu=0,20$)	T ($\mu=0,26$)
1	0,05	0,1732	5,77	1,20	1,20	1,21
2	0,08	0,2771	3,61	1,48	1,49	1,50
3	0,10	0,3464	2,88	1,73	1,74	1,76
4	0,20	0,6928	1,44	3,58	3,61	3,69
5	0,30	0,1039	0,96	6,07	6,15	6,34

Propagacija brzine ultrazvučnih talasa kroz betonski element u podužnom pravcu naziva se pulsna ultrazvučna brzina V_L [km/s], na osnovu standarda EN 12504-4:2004 [196] kao i SRPS EN 12504-4, se može predstaviti izrazom:

$$V_L [km/s] = \frac{L [mm]}{T [\mu s]} \quad (5.30)$$

gde je:

- L - dužina prostiranja ultrazvučnih talasa [mm]
- T - vreme prostiranja ultrazvučnih talasa [μs] - mikrosekunda [$10^{-6}s$]

Standardima EN 12504-4 i SRPS EN 12504-4 [196] utvrđena je metoda za određivanje brzine propagacije impulsa ultrazvučnih talasa u očvrslom betonu. Standardima je utvrđeno da se brzina ultrazvučnog impulsa može koristiti za određivanje uniformnosti betona, čvrstoće, prisustva prslina i šupljina, kao i za određivanje promene mehaničkih svojstava betona tokom vremena.

Propagacija brzine ultrazvučnih talasa kroz betonski element se takođe može odrediti test metodom (eng. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*) datom u standardu ASTM C597-09 [197]. Dinamički modul elastičnosti betona na bazi frekvencija longitudinalnih oscilacija prizmatičnih i cilindričnih uzoraka se može odrediti iz izraza:

$$\begin{aligned} E_d &= 4 \rho \cdot f^2 \cdot L^2 [Pa] \\ E_d &= 4 \cdot 10^{-6} \rho \cdot f^2 \cdot L^2 [MPa] \\ E_d &= 4 \cdot 10^{-9} \rho \cdot f^2 \cdot L^2 [GPa] \end{aligned} \quad (5.31)$$

gde je:

- f – osnovna sopstvena frekvencija uzorka [1/s] odnosno [Hz]
- L - dužina [m]
- ρ - gustina [kg/m^3]

Na osnovu brzine prolaza ultrazvuka kroz beton dinamički modul elastičnosti dobija se iz izraza [198]:

$$E_d = V^2 \cdot \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (5.32)$$

gde je:

- $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ zapreminska masa (akustička gustina betona)
- $\gamma \left[\frac{N}{m^3} \right]$ zapreminska težina

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \left[\frac{N}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{s^2}{m} \right] = \frac{\gamma}{g} \left[\frac{N \cdot s^2}{m^4} \right] \quad (5.33)$$

- ν - dinamički poasonov koeficijent (eng. *dynamic Poisson's ratio*)

Na osnovu istraživanja [199] i [200] određene su vrednosti dinamičkog poasonovog koeficijenta u zavisnosti od starosti betona (*tabela 5.22*).

Tabela 5.22 vrednosti dinamičkog poasonovog koeficijenta

STAROST BETONA	POASONOV KOEFIKIJENT
2 - 14 dana	$\nu = 0,3$
28 dana	$\nu = 0,2$
> 90 dana.	$\nu = 0,15$

Alternativni način određivanja dinamičkog poasonovog koeficijenta je na osnovu izraza:

$$\left(\frac{V}{2 \cdot f \cdot L} \right)^2 = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (5.34)$$

za dinamički modul elastičnosti na osnovu osnovne sopstvene frekvencije longitudinalnog oscilovanja prizmatičnog uzorka i na osnovu brzine prolaza ultrazvuka kroz beton. Statički modul elastičnosti se određuje na osnovu merenja dilatacija na cilindričnim uzorcima i predstavlja *sekantni modul elastičnosti*.

Zavisnost statičkog i dinamičkog modula elastičnosti betona definisana su izrazima od strane različitih istraživača. Prema istraživanjima *Lydon – Balendran* [201] statički modul elastičnosti se može predstaviti u funkciji dinamičkog modula elastičnosti, prema izrazu:

$$E = 0.83 E_d \quad (5.35)$$

Prema standardu BS 8110 [141] statički modul elastičnosti E [GPa] se dobija iz izraza:

$$E = 1.25 E_d - 19 \text{ [GPa]} \quad (5.36)$$

Prema standardu ASTM C469 [202] statički modul elastičnosti E [GPa] se dobija iz izraza:

$$E = E_d - 5864 \text{ [MPa]} \quad (5.37)$$

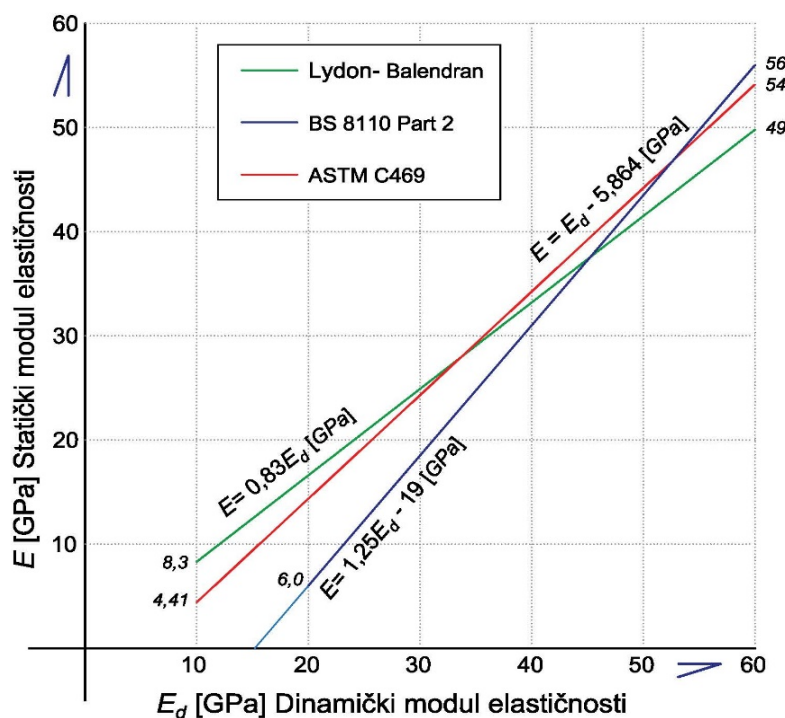
Dinamički modul smicanja se dobija na osnovu transversalne rezonantne frekvencije f_{\perp} [1/s] iz sledećeg izraza:

$$G_d = 4 \cdot 10^{-9} \rho \cdot f_{\perp}^2 \cdot L^2 \text{ [GPa]} \quad (5.38)$$

gde je:

- f – osnovna sopstvena frekvencija uzorka [1/s] odnosno [Hz]
- L - dužina [m]
- ρ - gustina [kg/m^3]

Zavisnost statičkih i dinamičkih modula elastičnosti betona, prema različitim autorima, prikazana je na slici 5.42 [203].



Slika 5.42 Zavisnost statičkih i dinamičkih modula elastičnosti betona

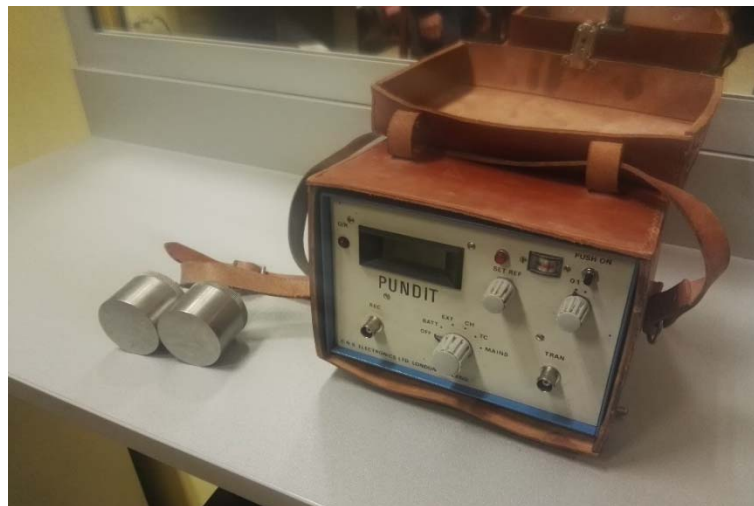
U ovom istraživanju za izradu numeričkih modela usvojen je dimački modul elastičnosti $E_d=45$ GPa prema podacima datim u prilogu 7.

5.4.7 MERENJA ULTRAZVUKOM

Za ispitivanje ponašanja betonskih elemenata sa različitim stepenom oštećenja odabrana je metoda ultrazvuka koja se kod betonskih konstrukcija veoma efikasno koristi za određivanje homogenosti strukture, detektovanje i lokalizovanje defekta i oštećenja. Ultrazvučni talasi se kroz materijal prenose ujednačeno sve do kontakta o granična područja odnosno prekid u elementu pri čemu dolazi do njihove refleksije čime se detektuju oštećenja.

Ultrazvučna merenja su sprovedena na usvojenim betonskim gredicama dimenzija 100/150/1000 mm (*slika 5.31*) prema standardizovanom postupku [189]. Na modelima sa poznatim stepenom oštećenja ultrazvučnom metodom mereno je vreme prostiranja talasa i računata brzina prostiranja talasa. Na osnovu dobijenih podataka izvršena je detekcija oštećenja na elementima izloženim na savijanje do loma [204]. Dobijeni podaci su korišćeni i za korekciju parametra numeričkog modela.

Za detekciju oštećenja korišćen je ultrazvučni aparat PUNDIT (eng. *Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester*) proizvođača C.N.S. ELECTRONICS LTD sa dve merne sonde (*slika 5.43*).



Slika 5.43 Ultrazvučni aparat za merenje

Pre početka merenja uređaj je kalibrisan na modelu sličnih dimenzija, na osnovu čega je ustanovljena je radna frekvencija od 54 kHz. Merenja na elementima su vršena sa korakom pomeranja sonde od 10 cm. Probnim merenjem je ustanovljeno veliko rasipanje rezultata prilikom povećanja rastojana sonde, usled čega je usvojeno maksimalno rastojanje sonde tokom ispitivanja od 50 cm.

Prema položaju oštećenja na modelima određeno je da se merenja vrše indirektno (*slika 5.6*), odnosno samo sa strane elementa na kome se nalazi oštećenje. Kod elemenata bez oštećenja merenja su vršena sa strane nasuprot postavljenoj armaturi.

Prijanjanje sonde za betonsku površinu je osigurano pomoću posebno izrađenih metalnih elemenata za fiksiranje (*slika 5.44*). Pričvrtni elementi se sastoje od dve pravougaone podloške koje se postavljaju iznad i ispod ispitivanog elementa i dva navoja pomoću kojih se šteluje rastojanje između podloški i kompezuju sitne imperfekcije na betonskoj površini.



Slika 5.44 Stativ za pričvršćavanje sondi za element tokom merenja

Kontakt između sondi i betonske površine ostvaren je pomoću tovatne masti na bazi kalcijumovog sapuna i mineralnog ulja.

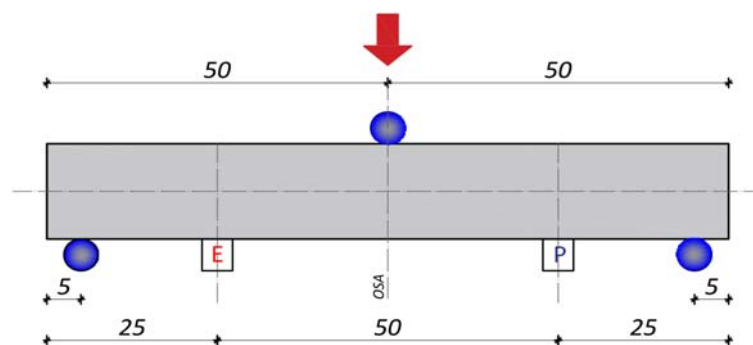
5.4.7.1 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE I

Serijska I se sastoji od tri elementa bez oštećenja (slika 5.45). Na elementima su merena vremena prolaska ultrazvučnih talasa tokom izazivanja oštećenja delovanjem spoljne sile sve do loma elemenata [204].



Slika 5.45 Betonski modeli serije I

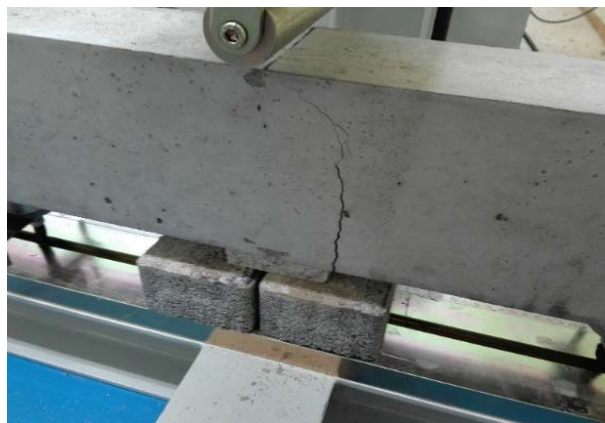
Za nanošenje sile iskorišćena je presa UTEST model UTC 5600 koja se koristi za standardna ispitivanja određivanja čvrstoće pri savijanju. Presa ima dva fiksna oslonca sa donje strane i jedan pokretni oslonac koji se nalazi sa gornje strane. Da bi se dobio željeni efekat – lom grede po sredini, gredica je postavljena tako da se armirana zona nalazila sa gornje strane elementa odakle je nanošena sila, a sonde su na elementu betonskom pričvršćene nasuprot armaturi (slika 5.46)



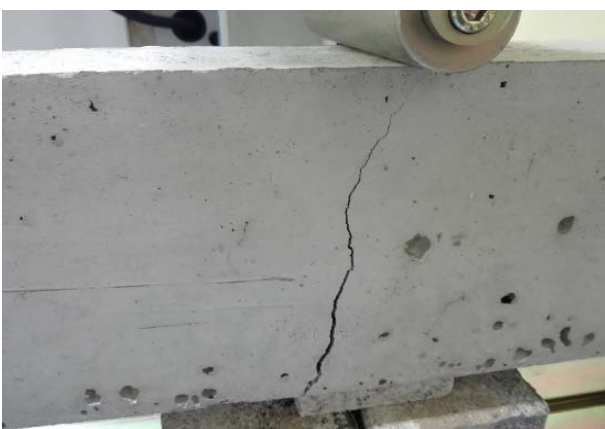
Slika 5.46 Šema ispitivanja elemenata serije I

Na šematskom prikazu na slici 5.46 plavom bojom su označeni oslonci prese dok je crvenom strelicom označen pravac nanošenja sile na element koji se ispituje. Betonski element su izloženi dejstvu sile u vertikalnoj osi u polovini raspona nasuprot sondama sa strane elementa na kojoj se nalazi armatura. Sonde (E) i (P) su postavljene na jednakom rastojanju od vertikalne ose nosača na međusobnom rastojanju od 50 cm.

Merenje vremena prostiranja ultrazvučnih talasa je na elementima prvo mereno bez opterećenja, a tek potom postavljeno na presu. Prema opisanom postupku merena su vremena prolaska ultrazvučnih talasa za različite stepene opterećenja koja su povećavana sve do dostizanja sile loma. Po lomu elemenata vršeno je još jedno merenje sa dodavanjem sile u cilju provere da li je lom nastao u potpunosti



Merenje na elementu I-1



Merenje na elementu I-2



Merenje na elementu I-3

Slika 5.47 Merenja vremena na elementima izloženim savijanju

Na slici 5.47 prikazane su karakteristične faze tokom merenja na elementima serije I. Rezultati očitanih vremena prostiranja ultrazvučnih talasa i sračunate brzine kretanja prikazane su u tabeli 5.23.

Tabela 5.23 Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije I

RB.	ELEMENT I-1			ELEMENT I-2			ELEMENT I-3		
	SILA [kN]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	SILA [kN]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	SILA [kN]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]
1.	0	104	4808	0	103	4854	0	102	4902
2.	8	106	4717	8	104	4808	8	102	4902
3.	9	106	4717	8.5	105	4762	9	103	4854
4.	9.25	106	4717	9	105	4762	9,25	103	4854
5.	9.5	107	4673	9.5	106	4717	9.39	120	4167
6.	10	108	4630	10	124	4032	6.3	139	3597
7.	10.25	133	3759	7.5	130	3846	0	156	3205
8.	0	134	3731	0	155	3226	/	/	/

Vrednosti obeležene crvenom bojom predstavljaju vrednosti pri kojima je nastao lom.

5.4.7.2 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE II

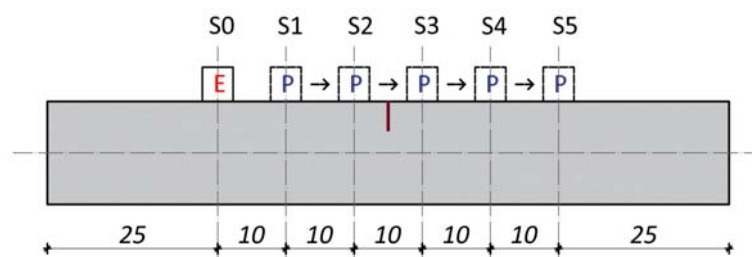
Serijs II se sastoji od jednog neoštećenog elementa, jednog elementa sa jednim oštećenjem u sredini od 2 cm i jednog elementa sa jednim oštećenjem u sredini od 4 cm.



Slika 5.48 Betonski modeli serije II

Na slici 5.48 prikazani su modeli serije II nakon izrade u betonskom pogonu (levo) i neposredno pre ispitivanja u laboratoriji (desno).

Ispitivanje na modelima serije II se sastoji od merenja vremena rasprostiranja ultrazvučnih talasa kod elemenata sa poznatim stepenima oštećenja. Merenja su vršena tako što je piezoelektrična sonda koja emituje signal (E) fiksno postavljena u početnoj poziciji na 25 cm od ivice nosača, dok se sonda koja predstavlja prijemnik (P) linijski pomera sa korakom od 10 cm na mernim mestima označenim brojevima od 1 do 5 i očitavaju vremena prolaska talasa (slika 5.49)



Slika 5.49 Šema ispitivanja elementa sa jednim oštećenjem

Maksimalno rastojnje sonde je određeno na 50 cm, dok je položaj sonde (E) i sonde (P) na poslednjem mernom mestu postavljen na istom osnom rastojanju od oštećenja. Isti položaj mernih mesta je korišćen pri merenjima ne elementu bez oštećenja.



Merenje na elementu II-1



Merenje na elementu II-2



Merenje na elementu II-3

Slika 5.50 Postupak merenja ultrazvukom na elementima serije II

Na slici 5.50 prikazane su karakteristične faze tokom merenja na elementima serije II. Rezultati očitanih vremena prostriranja ultrazvučnih talasa i sračunate brzine kretanja prikazane su u tabeli 5.24.

Tabela 5.24 Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije II

MERNA MESTA	ELEMENT II-1 BEZ OŠTEĆENJA		ELEMENT II-2 SA OŠTEĆENJEM 20 mm		ELEMENT II-3 SA OŠTEĆENJEM 40 mm	
	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]
S1	23,6	4237	21,8	4587	23,4	4274
S2	47,5	4211	44,5	4494	45,8	4367
S3	69,4	4323	93,3	3215	98,4	3049
S4	88,4	4525	111,5	3587	128,0	3125
S5	111,4	4488	143,4	3472	146,3	3418

5.4.7.3 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE III

Serijsa III se sastoji od jednog neoštećenog elementa, jednog elementa sa jednim oštećenjem u sredini od 6 cm i jednog elementa sa jednim oštećenjem od 10 cm.



Slika 5.51 Betonski modeli serije III

Na slici 5.51 prikazani su elementi serije III nakon izrade u betonskom pogonu. Obeležavanja mernih mesta kao i sam tok merenja na elementima serije III sprovedena na identičan način kao kod serije II prema datoj šemi na slici 5.49.



Merenje na elementu III-1



Merenje na elementu III-2



Merenje na elementu III-3

Slika 5.52 Postupak merenja ultrazvukom na elementima serije III

Na slici 5.52 prikazane su karakteristične faze tokom merenja ultrazvukom na elementima serije III. Rezultati očitanih vremena prostriranja ultrazvučnih talasa i sračunate brzine kretanja prikazane su u tabeli 5.25.

Tabela 5.25 Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije III

MERNA MESTA	ELEMENT III-1 BEZ OŠTEĆENJA		ELEMENT III-2 SA OŠTEĆENJEM 20 mm		ELEMENT III-3 SA OŠTEĆENJEM 40 mm	
	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]
S1	22,9	4367	30,1	4425	30.6	4451
S2	44,6	4484	69,4	4599	73.2	4644
S3	88,8	4511	224,0	2892	96.4	2713
S4	111,6	4503	270,0	2683	196.4	2846
S5	134,6	4501	278,7	3390	212.8	3213

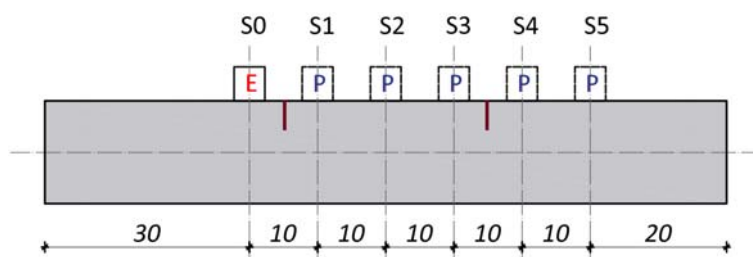
5.4.7.4 ISPITIVANJA NA ELEMENTIMA SERIJE IV

Serijska IV se sastoji od jednog elementa bez oštećenja, jednog elementa sa dva identična simulirana oštećenja po 4 cm i jednog elementa sa dva različita oštećenja od 6 i 10 cm



Slika 5.53 Betonske gredice - modeli serije IV

Na slici 5.53 prikazani su elementi serije IV nakon izrade u betonskom pogonu (*slika levo*) i po dopremanju u laboratoriju (*slika desno*). Obzirom na stepen simuliranih oštećenja na elementima, u cilju osiguranja modela od pojave dodatnih oštećenja, betonski elementi su transportovani do laboratorije u oplati. Kod modela sa dva oštećenja položaj simuliranih oštećenja se poklapa sa prethodno određenim položajem mernih mesta, što je zahtevalo malu korekciju položaja mernih mesta (*slika 5.54*).



Slika 5.54 Šema ispitivanja elemenata sa dva oštećenja

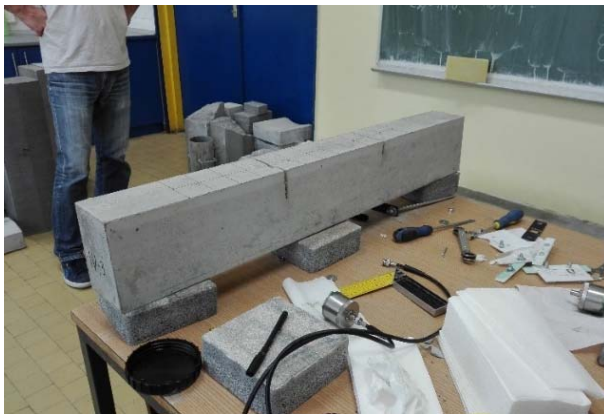
Korigovanjem položaja mernih mesta, položaj sonde (E) je određen neposredno ispred prvog oštećenja na udaljenosti od ivice nosača od 30 cm od kraja elementa, a sonda (P) zauzima označene položaje mernih mesta od 1 do 5 koja se nalaze na međusobnom rastojanju od 10 cm.



Merenje na elementu IV-1



Merenje na elementu IV-2



Merenje na elementu IV-3

Slika 5.55 Postupak merenja ultrazvukom na elementima serije IV

Na slici 5.55 prikazane su karakteristične faze tokom merenja ultrazvukom na elementima serije IV. Rezultati očitanih vremena prostriranja ultrazvučnih talasa i sračunate brzine talasa prikazane su u tabeli 5.26.

Tabela 5.26 Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije IV

MERNAMESTA	ELEMENT IV-1 BEZ OŠTEĆENJA		ELEMENT IV-2 SA OŠTEĆENJEM 20 mm		ELEMENT IV-3 SA OŠTEĆENJEM 40 mm	
	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]	VREME [μ s]	BRZINA [m/s]
RB.						
S1	54,0	4132	67,7	1852	23,4	1477
S2	89,2	2967	88,4	2242	45,8	2362
S3	93,4	3027	116,4	3212	98,4	2577
S4	145,6	3244	175,7	2747	128,0	2277
S5	166,2	3444	198,6	3008	146,3	2518

U cilju kontrole merenih podataka kod elemenata IV-3 sprovedena su dodatna merenja. Kontrolnim merenjima obuhvaćene su zone elementa koje zahvataju po jedno od oštećenja kako bi se dobijeni rezultati mogli uporediti sa rezultatima dobijenim merenjima na modelima istog stepena oštećenja.

Za ova merenja označena su dodatna merna mesta (slika 5.56). U prvom merenju sonda (E_1) je postavljena na mernom mestu 1, dok sonda (P) zauzima položaje na mernim mestima 2 do 6; u drugom merenju sonde (E_2) je postavljena je postavljena na mernom mestu -2, a sonda (P) zauzima položaje na mernim mestima -1 do 3.



Slika 5.56 Šema ispitivanja elementa sa dva oštećenja

Na slici 5.57 prikazane su dodatna merenja ultrazvukom sprovedena elementima IV.



Slika 5.57 Dodatna merenja ultrazvukom na elementima serije IV

Dobijeni rezultati merenja vremena su upoređeni sa merenjima vremena kod elementa sa jednim oštećenjem istog stepena oštećenja (elementi serije III), na osnovu čega je zaključeno da su dobijene vrednosti međusobno približne. Rezultati ovih merenja su informativnog karaktera i nisu dalje razmatrani.

5.5 EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKO ISTRAŽIVANJE DETEKCIJE OŠTEĆENJA BETONSKE GREDICE

5.5.1 NUMERIČKA SIMULACIJA PROPAGACIJE TALASA I MERENJE VREMENA ULTAZVUČNIH TALASA

Poređenjem rezultata Laboratorijskim ispitivnjima na gredicama sa različitim stepenom oštećenja su utvrđene mehaničke karakteristike materijala - čvrstoća na pritisak [188] i statički modul elastičnosti [185] koje su proverene metodom ultrazvuka [189]. Dokazano je da postoji dobro slaganje rezultata kod metoda ispitivanja sa razaranjem i metoda bez razaranja (ultrazvuk).

Kod numeričkog modela uzete su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti dobijene proračunom brzina prolaza talasa. Korišćene su dve različite vrednosti:

- modul od $E_d=45 \text{ GPa}$ koji je dobijen merenjima brzine prolaza talasa tokom eksperimenta
- modul od $E_d=40 \text{ GPa}$ uzet kao kontrolna parametarska vrednost za poređenje rezultata, odnosno procene uticaja promene vrednosti dinamičkog modula elastičnosti.

Analizom numeričkih rezultata i rezultata dobijenih merenjem vremena prostiranja UZ talasa na uzorcima od betona sa i bez oštećenja u označenim mestima S1, S2, S3, S4 i S5, sračunate su odgovarajuće brzine i odgovarajući indeksi stanja $IS_{(v)}$, odnosno indeksi oštećenja $IO_{(v)}$. Na osnovu sračunatih brzina UZ talasa može se oformiti vektor brzine za svaki uzorak:

- za neoštećeni uzorak (nulta brzina neoštećenih uzoraka $v_0 = (v_{0,1}, v_{0,2}, \dots, v_{0,m})$)
- za oštećeni uzorak (brzina oštećenih uzoraka nakon vremena t) $v_t = (v_{t,1}, v_{t,2}, \dots, v_{t,m})$

Indeks stanja IS_v preko brzine UZ talasa se računa iz izraza:

$$IS_v = 1 - \sqrt{\frac{(v_t - v_0)^2}{v_0^2}} = 1 - DEM \quad (5.39)$$

DEM je indeks oštećenja sračunat numerički ili merenjem vremena prolaza ultrazvučnih talasa. Indeks oštećenja preko brzine UZ talasa se računa kao koren količnika kvadratnih odstupanja i kvadrata nulte brzine:

$$DEM = \sqrt{\frac{(v_t - v_0)^2}{v_0^2}} = IO_v \quad (5.40)$$

Na osnovu rezultata dobijenih merenjem vremena prolaska talasa na uzorcima od betona serije SII i serije SIII i računanjem vremena MKE metodom na numeričkom modelu sračunate su brzine UZ talasa koje su prikazane u tabeli 5.27.

Tabela 5.27 Brzine sračunate na mernim mestima na elementima serije SII i serije SIII

OZNAKA MODELA	v-Brzine (m/s)				
	S1	S2	S3	S4	S5
II-1	4237	4211	4324	4525	4488
II-2	4587	4494	3215	3587	3471
II-3	4274	4367	2555	3125	3418
III-1	4367	4484	4511	4503	4501
III-2	4425	4599	2892	2983	3399
III-3	4451	4644	2713	2846	3237

U tabeli su prikazane brzine kod modela bez oštećenja (II-1 i III-1) za dinamički modul elastičnosti $E_d = 45 \text{ GPa}$. Na osnovu podataka o brzinama su sračunati indeksi stanja $IS_{(v)}$ prikazani u tabeli 5.28. Indeksi stanja su sračunati prema izrazu (2) u označenim tačkama S1, S2, S3, S4 i S5 na uzorcima serije SII i serije SIII.

Tabela 5.28 Indeksi stanja u označenim tačkama na elementima serije SII i serije SIII

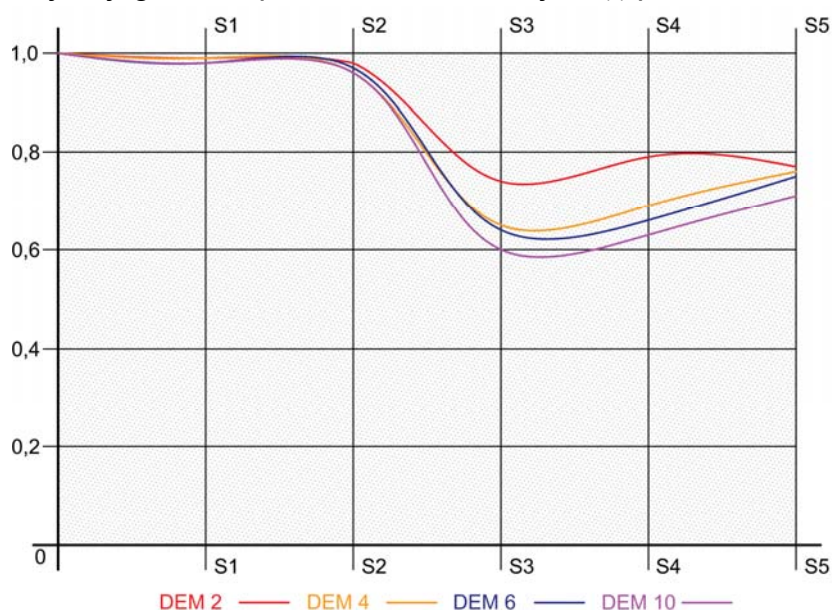
OZNAKA MODELA	INDEKS STANJA (IS_v)				
	S1	S2	S3	S4	S5
II-2 (1-DEM2)	0,9917	0,9803	0,7435	0,7927	0,7734
II-3 (1-DEM4)	0,9913	0,9629	0,6500	0,6906	0,7616
III-2 (1-DEM6)	0,9866	0,9743	0,6412	0,6625	0,7552
III-3 (1-DEM10)	0,9806	0,9643	0,6015	0,6321	0,7192

U tabeli 5.29 su prikazani indeksi oštećenja $IO_{(v)}$ za oštećene uzorke dobijeni na osnovu merenih vrednosti. Indeks oštećenja za neoštećeni uzorak je jednak 0, a indeks stanja je jednak 1.

Tabela 5.29 Indeksi oštećenja u označenim tačkama na elementima serije SII i serije SIII

UZORAK	INDEKS OŠTEĆENJA ($IO_{(v)}$)				
	S1	S2	S3	S4	S5
DEM2	0,0083	0,0200	0,2565	0,2073	0,2266
DEM4	0,0087	0,0370	0,3500	0,3094	0,2384
DEM6	0,0134	0,0257	0,3588	0,3375	0,2448
DEM10	0,0194	0,0357	0,3985	0,3679	0,2861

Na osnovu podataka iz tabele 5.28 i 5.29 sa vrednostima u mernim mestima nosača od S1 do S5 izrađen je dijagram raspodela indeksa stanja $IS_{(v)}$ po dužini nosača (slika 5.58).



Slika 5.58 Dijagram raspodela indeksa stanja $IS_{(v)}$ na osnovu merenja brzine ultrazvučnih talasa u tačkama S1-S5

Nagla promena i pad vrednosti u polju između mernih mesta S2 i S3 do dostizanja minimalne vrednosti $IS_{(v)}$ ukazuje na mesto gde postojanji oštećene, a na osnovu vrednosti $IS_{(v)}$ na mernim mestima S3, S4 i S5 može se detektovati oštećenje.

Tabela 5.30 Sračunate brzine V u modelima za $E_d=45$ GPa (ABAQUS)

MODEL BRZINA	SRAČUNATE BRZINE MODEL - ABAQUS				
	S1	S2	S3	S4	S5
V0	4412.5	4403.3	4408.6	4401.2	4397.3
V2	4414.2	4403.5	4128.4	4087.2	4097.7
V4	4401.0	4420.4	4040.1	4037.8	4086.5
V6	4406.6	4403.2	3985.1	4000.2	3994.4
V8	4415.2	4405.5	3948.0	3937.3	3945.2
V10	4410.3	4412.9	3789.6	3845.9	3798.3

U tabeli 5.30 za numeričke modele prikazane su sračunate su brzine ultra zvučnih talasa za oštećene i neoštećene gredice za dinamički modul elastičnosti $E_d=45$ Gpa.

Na osnovu prikazanih brzina sračunate su vrednosti indeksa stanja IS_v (tabela 5.31) i indeksi oštećenja IO_v (tabela 5.32)

Tabela 5.31 Indeksi stanja IS_v modela za $E_d=45$ GPa (ABAQUS)

MODEL OŠTEĆENJE	INDEKS STANJA (1-DEM)				
	S1	S2	S3	S4	S5
1-DEM2	0,9996	0,9999	0,9364	0,9287	0,9319
1-DEM4	0,9974	0,9961	0,9164	0,9174	0,9293
1-DEM6	0,9987	0,9999	0,9039	0,9089	0,9084
1-DEM8	0,9994	0,9995	0,8955	0,8946	0,8972
1-DEM10	0,9995	0,9978	0,8596	0,8620	0,8638

Tabela 5.32 Indeksi oštećenja IO_v modela za $E_d=45$ GPa (ABAQUS)

MODEL OŠTEĆENJE	INDEKS OŠTEĆENJA (DEM)				
	S1	S2	S3	S4	S5
DEM2	0,0004	0,0001	0,0636	0,0713	0,0681
DEM4	0,0026	0,0039	0,0836	0,0826	0,0707
DEM6	0,0013	0,0001	0,0961	0,0911	0,0916
DEM8	0,0006	0,0005	0,1045	0,1054	0,1028
DEM10	0,0005	0,0022	0,1404	0,1380	0,1362

Na istim numeričkim modelima za $IS=1-IO$ u ABAQUS-u su sračunate vrednosti brzine ultrazvučnih talasa prikazane u tabeli 5.33, indeksi oštećenja IO_v prikazani u tabeli 5.34 i indeksa stanja IS_v za dinamički modul elastičnosti $E_d=40$ Gpa prikazani u tabeli 5.35.

Tabela 5.33 Sračunate brzine modela za $E_d=40$ GPa (ABAQUS)

MODEL	BRZINE MODEL - ABAQUS				
	S1	S2	S3	S4	S5
V0	3846.5	3875.4	3868.5	3852.8	3848.3
V2	3854.5	3824.5	3529.4	3432.2	3403.7
V4	3813.2	3805.4	3326.1	3307.8	3281.5
V6	3805.6	3795.8	3290.6	3205.2	3193.4
V8	3783.2	3803.5	2803.7	2785.4	2760.5
V10	3804.3	3792.5	2772.6	2745.8	2728.3

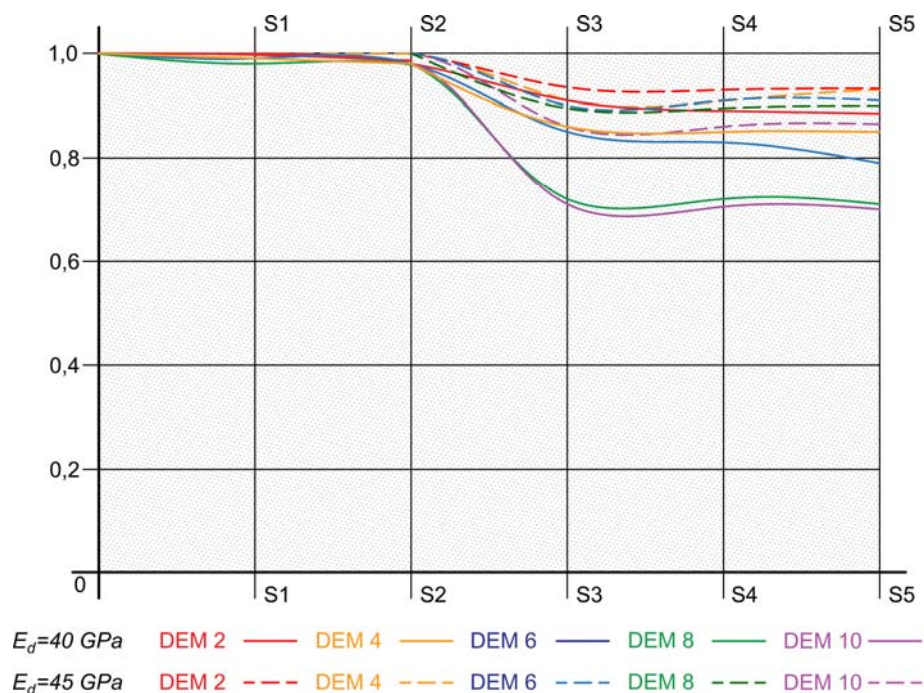
Tabela 5.34 Indeksi oštećenja modela za $E_d = 40 \text{ GPa}$ (ABAQUS)

MODEL	INDEKS OŠTEĆENJA (DEM)				
	S1	S2	S3	S4	S5
DEM2	0,0021	0,0131	0,0878	0,1091	0,1155
DEM4	0,0087	0,0184	0,1402	0,1492	0,1473
DEM6	0,0106	0,0205	0,1494	0,1681	0,2051
DEM8	0,0165	0,0189	0,2752	0,2770	0,2827
DEM10	0,0110	0,0214	0,2833	0,2873	0,2910

Tabela 5.35 Indeksi stanja modela za $E_d = 40 \text{ GPa}$ (ABAQUS)

MODEL BRZINA ABAQUS	INDEKS STANJA (1-DEM)				
	S1	S2	S3	S4	S5
1-DEM2	0,9979	0,9869	0,9122	0,8909	0,8845
1-DEM4	0,9913	0,9816	0,8598	0,8508	0,8527
1-DEM6	0,9894	0,9795	0,8506	0,8319	0,7949
1-DEM8	0,9835	0,9811	0,7248	0,7230	0,7173
1-DEM10	0,9890	0,9786	0,7167	0,7127	0,7090

Rezultati proračuna indeksa stanja $IS_{(v)}$ po dužini modela za dinamičke module $E_d = 45 \text{ GPa}$ i $E_d = 40 \text{ GPa}$ predstavljeni su na slici 5.59.

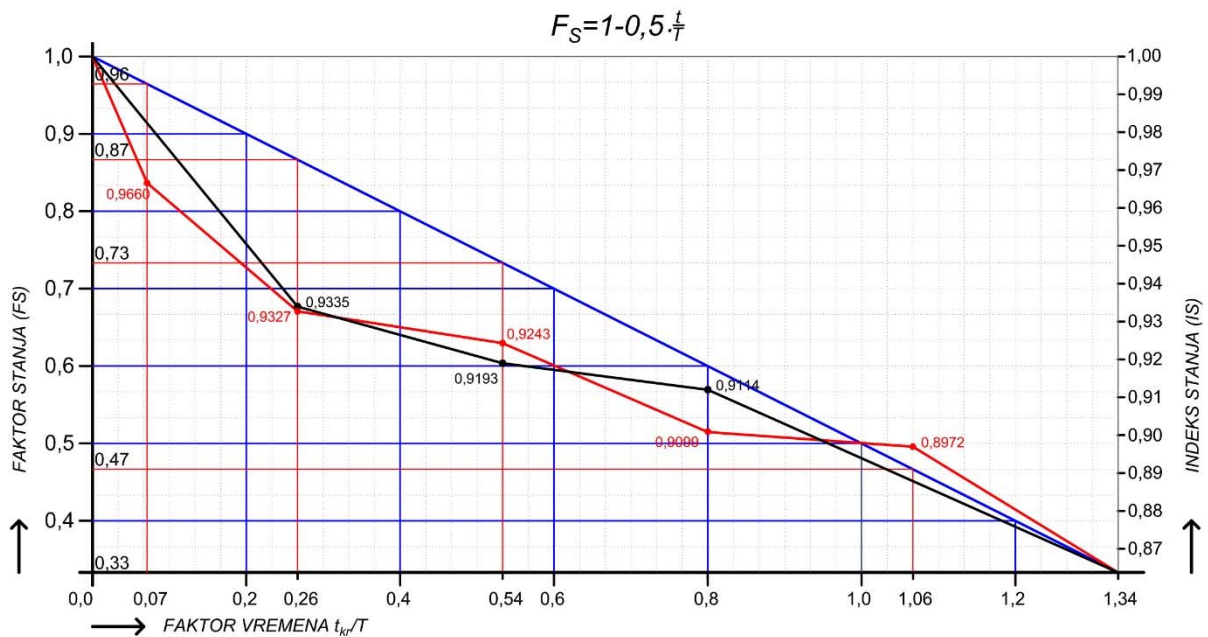


Slika 5.59 Dijagram raspodele indeksa stanja $IS_{(v)}$ na osnovu numeričkog modeliranja i proračuna brzine UZ talasa, u tačkama S1 do S5 po dužini uzoraka

5.5.2. NOMOGRAM STANJA NA BAZI PROMENE BRZINE PROSTIRANJA IMPULSA ULTRAZVUČNIH TALASA

5.5.2.1 DETEKTOVANJE OŠTEĆENJA PRI KRTOM LOMU GREDICA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE KONCENTRISANOM SILOM

Korišćenjem podataka eksperimentalnih merenja (*tabele 5.27, 5.28 i 5.29*) i numeričkih proračuna propagacije UZ talasa (*tabele 5.30, 5.31 i 5.32*), oformljen je nomogram prikazan na slici 5.60.



Slika 5.60 Nomogram za $FS_{kr}=0,5$ dobijenog na osnovu brzina ultrazvučnih talasa

Na nomogramu su nanete vrenosti indeksa stanja dobijenih eksperimentom, pa se može formirati srednja linija indeksa stanja dobijenih numerički i eksperimentom, kao konačna kriva nomograma.

Upoređivanjem podataka na odabranom mernom mestu S5, utvrđeno je odstupanje rezultata u granicama do 20% (*tabela 5.36*)

Tabela 5.36 Uporedne vrednosti eksperimentalnih merenja i numeričkih proračuna

UPOREDNE VREDNOSTI	INDEKS STANJA 1-DEM			
	S5 _{num}	S5 _{exp}	γ _{num/exp}	S5 _{num} × srγ _{exp/num}
1-DEM2	0,9319	0,7734	1,205	0,9335
1-DEM4	0,9293	0,7616	1,220	0,9193
1-DEM6	0,9084	0,7552	1,203	0,9114
1-DEM10	0,8638	0,7192	1,201	0,8680

Nesavršenost numeričkog modela po kome je urađen numerički model sa idealno elastičnim homogenim kontinuumom i nesavršenost rasporeda komponenti u betonskoj masi očvrsllog betona daju faktor modela γ .

Za usvojeni odnos indeksa stanja dobijenih iz numeričkog modela i indeksa stanja iz eksperimenta dobijaju se indeksi u tabeli 5.36, iz obrasca:

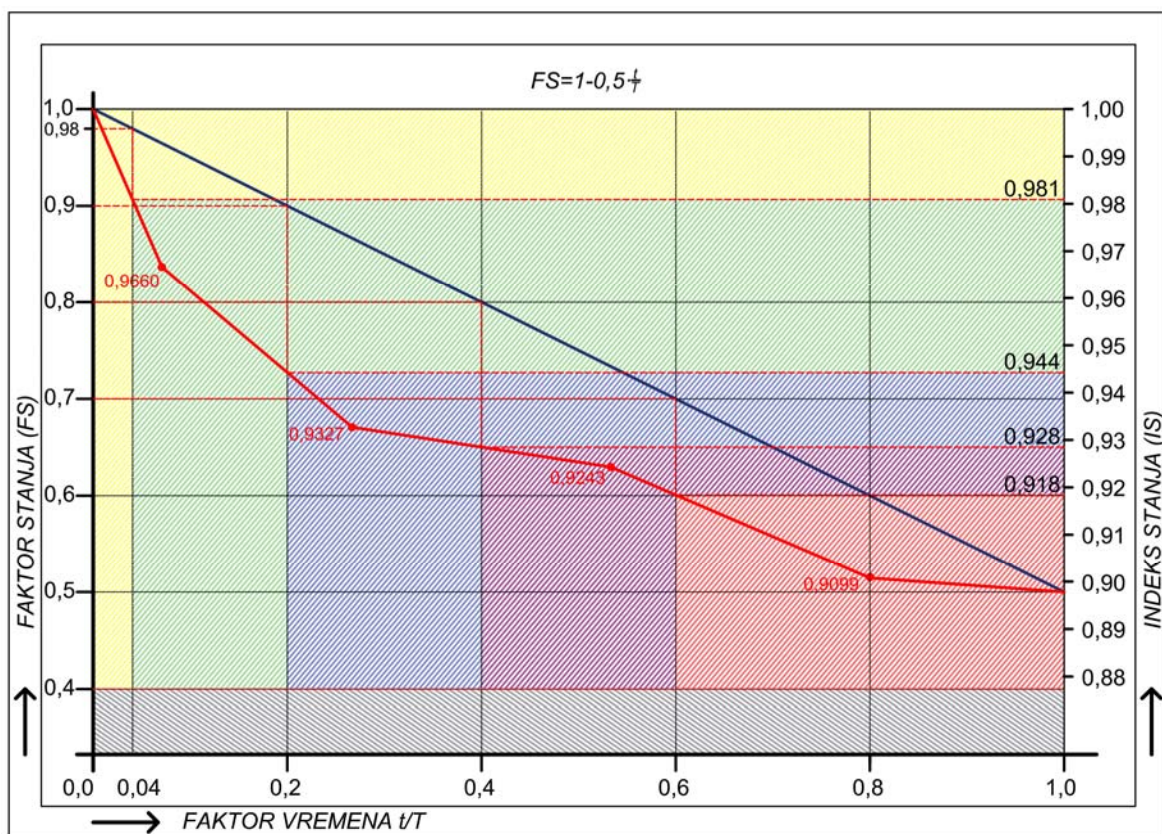
$$\gamma_{exp/num} = S5_{exp} / S5_{num} \quad (5.41)$$

Faktor modela je srednja vrednost podataka:

$$\gamma =_{sr} \gamma_{exp/num} = 1,207 \quad (5.42)$$

Množenjem faktora modela γ sa indeksima stanja dobijenih na numeričkom modelu dobijaju se podaci za krivu nomograma (slika 5.60) Nomogramom je moguće odrediti oštećenje nosača na osnovu poznatog indeksa oštećenja ili indeksa stanja. Na osnovu merenih brzina mogu se sračunati indeksi stanja nosača i korišćenjem nomograma, mogu se očitati faktori oštećenja, kao i dubine oštećenja nosača.

Određivanje dubine oštećenja korišćenjem sandardizovanog nomograma dato je na primeru ispitivanja AB gredice serije I – gređica bez oštećenja i bez opterećenja. Oštećenja na betonskim elementima su izazvana naprezanjem na savijanje usled nanošenja koncentrisane sile u sredini raspona prema postupku opisanom u poglavlju 5.4.7.1. Naprezanje ne elementu je promenljivog inteziteta od vednosti 0 do sile loma. Prilikom povećanja inteziteta sile, merene su vremena ultrazvučnih talasa u zoni očekivaih prslina na mernom mestu S5.



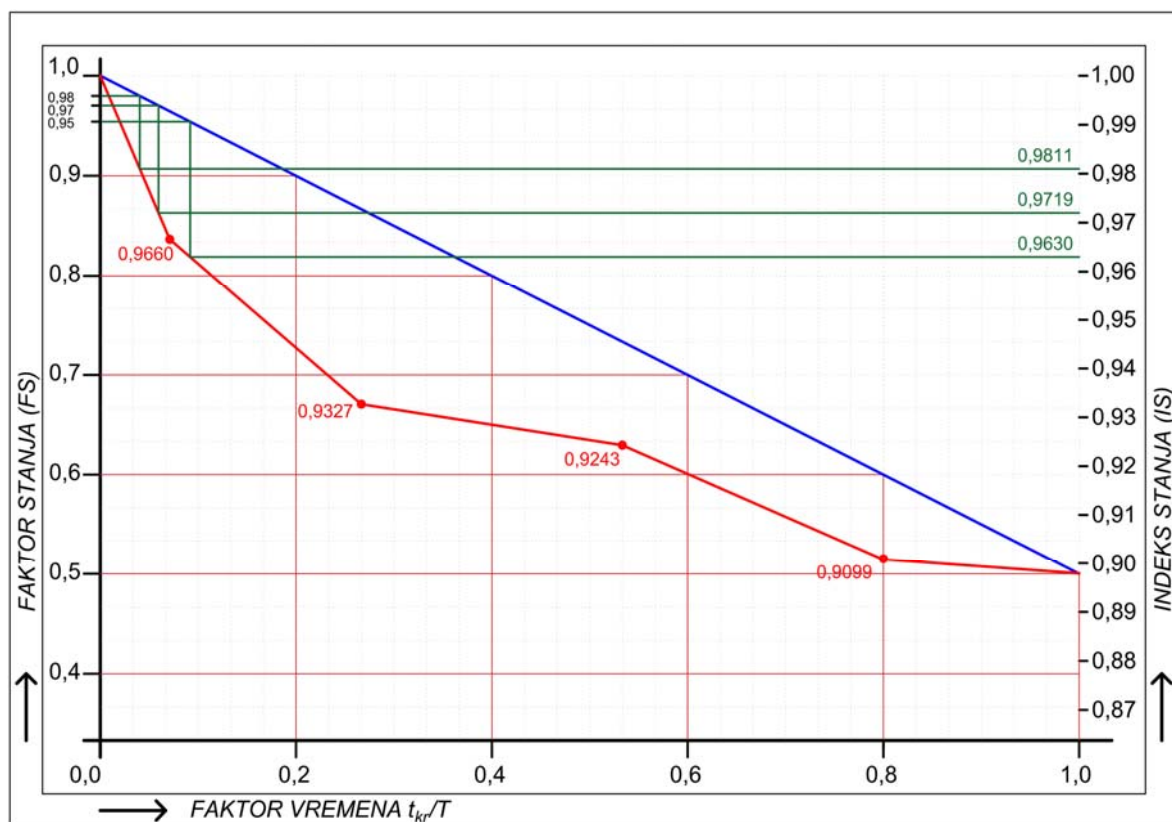
Slika 5.61 Nomogram sa indeksim stanja prema brzini

Na osnovu merenih vremena ultrazvučnih talasa i pređenog puta od 50 cm za svaku betonsku gređicu serije I su sračunati indeksi stanja koji su prikazani u tabeli 5.37 Prikazane vrednosti u tabeli nadovezuju na merene vrednosti prikazane u tabeli 5.23.

Tabela 5.37 Brzina ultra zvuka i indeksa stanja pri savijanju AB gredica serije I

OZNAKA MODELA	INDEKSA STANJA IS(v)							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
I-1	1,0000	0,9811	0,9811	0,9811	0,9719	0,9630	0,7818	0,7760
I-2	1,0000	0,9905	0,9810	0,9718	0,9718	0,9307	0,7923	0,6644
I-2	1,0000	1,0000	0,9902	0,9902	0,8501	0,7338	0,6538	/

Promena brzine UZ talasa usled povećanja opterećenja ukazuje na pojavu prslina usled savijanja. Vrednosti dubine oštećenja i faktora stanja se dobijaju na osnovu podataka indeksa stanja za uzorke serije I-1, preko nomograma na slici 5.62. Na osnovu podataka iz tabele 5.36 brzina UV talasa neoštećenog uzorka je 4880 m/s, sa postepenim povećanjem opterećenja prva promena brzine nastaje pri sili od 8.0 kN gde je brzina UZ talasa 4717 m/s. Sledeća promena brzine je pri vrednosti sile od 9.5 kN, gde je brzina 4673 m/s. Pri sili od 10 kN brzina UV talasa iznosi 4630 m/s, a već pri sili 10.25 kN nastaje veliko smanjenje brzine od 3759 m/s nakon čega nastaje lom. Kako kritičnom oštećenju poprečnog preseka nosača od 50% odgovara indeks stanja od $IS=0,8638$, to se za dalju analizu uzimaju vrednosti iz tabele 5.36. Za $IS \geq 0,8638$ odgovaraju vrednosti 1.000, 0.9811, 0.9719 i 0.9630. Za navedene vrednosti IS veće od 0,8638 pomoću sandardizovanog nomograma se mogu odrediti vrednosti detektovanih oštećenja kao što je prikazano na slici 5.62.

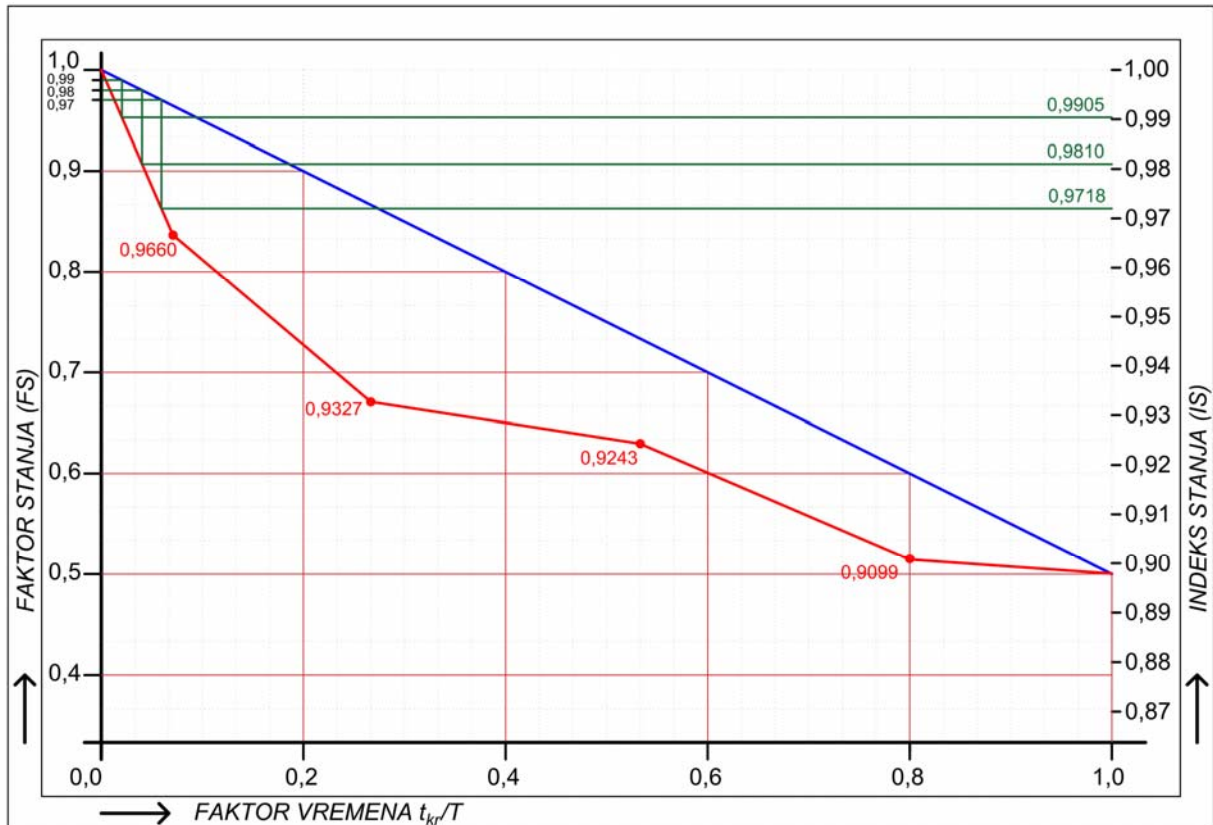


Slika 5.62 Određivanje vrednosti detektovanih oštećenja pomoću nomograma na uzorku I-1

Na osnovu podataka iz tabele 5.23, za uzorke serije I-2, kod neoštećenog uzorka (bez opterećenja) brzina UV talasa je 4854 m/s, sa postepenim povećanjem opterećenja prva promena brzine nastaje pri sili od 8,0 kN gde je brzina UZ talasa iznosi 4808 m/s. Sledeća

promena brzine je pri vrednosti sile od 8,5 kN gde je brzina 4762 m/s. Pri sili od 9,25 kN brzina UV talasa iznosi 4717, pri sili od 10 kN je brzina 4032, nakon koje nastaje lom i brzina naglo opada.

Vrednosti indeksa oštećenja za $IS \geq 0,8638$, su vrednosti 1,000, 0,9905, 0,9810, 0,9718 i 0,9307. Za navedene vrednosti IS pomoću sandardizovanog nomograma se mogu odrediti vrednosti detektovanih oštećenja za seriju uzoraka I-2 (slika 5.63).

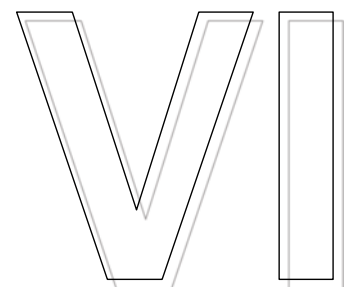


Slika 5.63 Određivanje vrednosti detektovanih oštećenja pomoću nomograma na uzorku I-2

Na uzorku serije I-3, na osnovu podataka iz tabele 5.23 u neopterećenom stanju i neoštećen izmerena je brzina od 4902 m/s. Pri sili od 9 kN brzina opada do vrednosti 4854 m/s i pri vrednosti sile od 9,39 kN brzina opada do 4167 kN nakon čega nastaje lom i pad sile i brzine. Podaci ukazuju na pojavu krtog loma gde se nakon detektovanog prvog oštećenja pri sili 9,0 kN odmah nastaje lom pri sili od 9,25 kN.

*„Nakon što se popne na jedno
brdo, čovek otkrije da postoji još
mnogo brda na koja se treba
popeti“*

Nelson Mandela



POGLAVLJE

VI ZAKLJUČAK

Deterioracija betona predstavlja složen proces fizičko-hemijskog propadanja tokom vremena koja se javlja kao rezultat smanjene ili nedovoljne otpornosti betona na agresivne uslove sredine u kojoj se nalazi. Nedovoljna trajnost betona direktno utiče na sigurnost i pouzdanost konstrukcija zbog čega je u ovom istraživanju posebna pažnja posvećena postojanosti materijala u agresivnom okruženju.

Poznavanje uslova agresivne sredine i klasifikacija dejstva od velikog su značaja kako za nove tako i za postojeće konstrukcije. Kod novih konstrukcija imaju veliki značaj pri određivanju mehaničkih karakteristika - kvaliteta materijala na osnovu očekivanih dejstva i obezbeđenja optimalne trajnosti konstrukcija. Kod postojećih konstrukcija imaju veliki značaj prilikom identifikacije i ocene stepena oštećenja, kao i utvrđivanja brzine propagacije oštećenja na osnovu nastalih promena u svojstvima materijala tokom vremena koja imaju direktan uticaj na sigurnost konstrukcije. Podaci o uslovima eksploatacije, dejstvima sredine, i stanju materijala postojećih objekata su osnova za određivanje domena i margine sigurnosti, kao i za procenu budućeg stanja konstrukcija sa aspekta smanjenja nosivosti, funkcionalnosti, upotrebljivosti i stabilnosti konstrukcija.

Procenom stanja konstrukcija van domena sigurnosti, otkazom konstrukcije i nastankom mogućih posledica ugroženosti imovine i ljudi kao i relativnim troškovima intervencija, bavi se teorija rizika konstrukcija. Procena stanja postojećih konstrukcija na bazi podataka o stanju materijala, može se posmatrati kao kvantitativni pokazatelj procene rizika ili pouzdanosti konstrukcije. Iako su ova dva pristupa sasvim suprotna u osnovi se najčešće koriste iste baze podataka i iste probablističke metode, ali sa različitim zahtevima. U ovim istraživanju procena stanja nosivosti konstrukcija u osnovi bazira na konceptu sigurnosti i pouzdanosti konstrukcija, ali je takođe data i mogućnost primene koncepta procene rizika.

Pouzdanost je definisana na osnovu stohastičkih modela analizom dve osnovne slučajne promenljive za materijale i za dejstva. Na osnovu indeksa pouzdanosti se određuje verovatnoća sigurnosti ili verovatnoća loma konstrukcije. Sintezom su utvrđena tri glavna proračunska koncepta proračuna konstrukcija: *deterministički*, *semi-probablistički* i *probabilistički* koncept.

Prema evrokodu definisane su tri klase posledica i tri klase pouzdanosti, gde se posledice kvantifikuju indeksima pouzdanosti ili verovatnoćom otkaza. Definisane dejstava i mehaničke otpornosti materijala konstrukcije, odnosno njihovi odgovarajući parcijalni koeficijenti sigurnosti su dati u zavisnosti od indeksa pouzdanosti, odnosno od klasa pouzdanosti i klasa posledica. Na osnovu ciljnog indeksa pouzdanosti se određuje odgovarajuća verovatnoća loma i proračunski vek konstrukcije. Modeliranje slučajnih promenljivih, kao što su karakteristike materijala, geometrijske karakteristike, dejstva i nesigurnost modela, i njihova međusobna korelacija prema semi-probablističkom konceptu evrokodova, istražene su u ovom radu i prikazane su na originalan način. Slučajne promenljive su definisane sa različitim statističkim krivama raspodele i vrednostima koeficijenta varijacije i vrednostima fraktila i izvedene su funkcije graničnih stanja nosivosti i upotrebljivosti konstrukcija. Analiza funkcije pouzdanosti, funkcije

raspodele otkaza, funkcije hazarda, funkcije gustine otkaza i kumulativne funkcije hazarda, kao i njihovih međusobnih korelacija, data je u zavisnosti od vremena kao slučajne promenljive. Korišćenjem tih vremenski zavisnih funkcija u radu su određena kritična oštećenja, kao i referentni vek trajanja konstrukcija. Verovatnoća pouzdanosti opada tokom vremena eksploatacije, uz istovremeni porast verovatnoće otkaza konstrukcije. Sa porastom indeksa pouzdanosti verovatnoća sigurnosti konstrukcije raste, a verovatnoća otkaza opada.

Na bazi promene indeksa pouzdanosti tokom vremena ili promene verovatnoće otkaza tokom vremena, u ovom radu je dat predlog praćenja stanja konstrukcija sa apdejtovanjem modela za materijale i dejstva tokom vremena. Apdejtovanje modela sadrži izbor dejstava i nosivosti tokom upotrebnog veka, u zavisnosti od klasa posledica, što omogućuje da kod konstrukcija sa oštećenjem koja više ne odgovaraju svojoj nameni promenom namene odnosno promenom klase posledica, može se produžiti upotrebnog veka konstrukcije sa nižim nivoom nosivosti, odnosno upotrebljivosti. Alternativa ovoj tvrdnji je popravka, pojačanje i dovođenje konstrukcije u prvobitno stanje, ali ne retko alternativa može biti i rušenje konstrukcije.

Proračunske vrednosti za dejstva i materijale se po pravilu razlikuju od odgovarajućih realnih vrednosti konstrukcija u eksploataciji. Često su ove vrednosti u projektovanju precenjene, tako da se apdejtovanjem modela mogu utvrditi realne vrednosti dejstava, svojstava materijala i geometrije, čime se dolazi do dragocenih podataka za procenu stanja konstrukcije. Proračunski modeli novoprojektovane konstrukcije sadrže i faktore sigurnosti usled grešaka koje su bile moguće u prošlosti u fazi projektovanja i izvođenja radova, koje se u apdejtovanom modelu mogu isključiti.

Parcijalni koeficijenti sigurnosti za materijale su takođe zavisne veličine od indeksa pouzdanosti, odnosno od klasa posledica. Promena namene i ograničenje nosivosti je način da se izbegnu skupe sanacije objekata a da objekat služi svojoj novoj nameni. Dokaz sigurnosti se ostvaruje ili izborom manjih koeficijenata sigurnosti ili manjih indeksa pouzdanosti za odgovarajuću klasu posledica.

Važno je zaključiti da postoji razlika između sigurnosti jednog konstrukcijskog elementa i sigurnosti konstrukcije kao sistema. Moguće je da u zavisnosti od robusnosti konstrukcije lom jednog elementa ne dovodi u pitanje sigurnost konstrukcije kao celine. Paralelnost sistema i alternative u prenošenju sila je takođe važan faktor sigurnosti konstrukcije, kome bi trebalo da se u projektovanju konstrukcijama posveti veća pažnja.

U ovom radu su istraženi i drugi modaliteti procena stanja konstrukcija osim što je to dato u metodama proračuna konstrukcija. Osim proračuna sigurnosti konstrukcija razmatrane su mogućnosti procene rizika sa aspekta neželjenih pojava i neželjenih posledica, koje nepovoljno utiču na stanje konstrukcija. Rizikom je obuhvaćen široki domen uzroka i posledica štetnih ishoda. Uzroci nastajanja štete su mogući usled promena stanja materijala i konstrukcija nastala u nepredviđenim proračunskim situacijama, prekoračenjem granice računске sigurnosti najčešće usled dejstva hazarda, ljudskih grešaka ili usled namera. Posledice štetnih ishoda mogu biti: smanjenje nosivosti, upotrebljivost i funkcionalnost konstrukcije, pogoršanje ekoloških, socioloških, estetskih i ekonomskih parametara pri eksploataciji objekata kao i učešće ljudskih grešaka u planiranju, projektovanju, izvođenju i upotrebi objekata. Ljudske greške kao iznenadni i

nepredvidivi uzroci, sa često nesagledivim posledicama štetnih ishoda, nisu po svom obimu i sadržini obuhvaćeni koeficijenima sigurnosti u proračunima po evrokodu. Rizik je verovatnoća pojave sa negativnim posledicama u zavisnosti od prirodnog hazarda i ranjivosti konstrukcije koja može da nastane kao posledica izloženosti sistema opasnim događajima određenog tipa i veličine. Ponašanje konstrukcija za vreme i posle kratkotrajnih dejstava velikih inteziteta se opisuje preko funkcije oporavka sistema, na osnovu koje se ocenjuje sposobnost i stanje sistema.

Utvrđivanjem podataka stanja postojećih konstrukcija tokom inspekcija i nadgledanja, tokom vremena se mogu primeniti smanjeni ciljni indeksi pouzdanosti, što je i sadržano u standardima nekih zemalja.

Prema evrokodovima su ciljne vrednosti indeksa pouzdanosti, nepromenljive nezavisno od vremena trajanja konstrukcija i određene su u zavisnosti od klasa pouzdanosti i klasa posledica koje važe i za novoprojektovane i za postojeće konstrukcije. Na osnovu praćenja stanja postojeće konstrukcije u proračunima sigurnosti je moguće iskoristiti postojeće rezerve u materijalu, određivanjem realnih dejstava i faktora nesigurnosti, odnosno smanjenjem parcijalnih koeficijenata sigurnosti. Prikupljanjem podataka merenja i ispitivanja na objektu i primenom naprednih naučnih metoda, moguća je korekcija proračunskog modela prema evrokodu u cilju dobijanja realnih parametara sigurnosti.

Skup podataka preostale nosivosti konstrukcije, u ovom istraživanju, je dobijen formiranjem domena podataka u preseku podskupova podataka slučajnih promenljivih kao što su: svojstva materijala, dejstava, geometrije, podataka mehaničkog modela i modela nesigurnosti. Sve slučajne veličine kao vremenski zavisne veličine su nosioci ulaznih i ciljnih informacija proračunskih stohastičkih modela u semi-probabilističkom konceptu sigurnosti konstrukcija i kao podskupovi tih podataka su sadržane u fizičkom modelu. Domen slučajnih promenljivih veličina se formira na osnovu baze podataka koje se dobija merenjem i prikupljanjem podataka na objektu u vremenskim intervalima, tako da je i njihov presek skupova promenljiv tokom vremena. Podaci o svojstvima materijala i dejstava u istraživačkom stohastičkom modelu su prikazani na osnovu parametara verovatnoće. Parcijalni koeficijenti sigurnosti i karakteristične vrednosti za materijale i dejstva su definisani na osnovu modela nesigurnosti. Uticaji od dejstava i nosivost konstrukcije su formirani na osnovu mehaničkog i matematičkog modela konstrukcije, korišćenjem geometrijskih podataka. Proračunske vrednosti dejstava i nosivosti konstrukcije su dobijene na osnovu proračunskih vrednosti geometrijskih podataka i faktora proračunskog modela za uticaje od dejstava i nosivosti konstrukcije. Zahtev sigurnosti je da proračunske vrednosti nosivosti konstrukcije za sve kombinacije opterećenja konstrukcije moraju biti veće od proračunskih vrednosti uticaja od dejstava.

U okviru studije slučaja teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima na betonskim gredicama razmatrane su promene svojstva materijala u zavisnosti od stepena oštećenja. Modeliranjem gredica sa i bez oštećenja, sa različitim elastomehaničkim karakteristikama, određena su stanja gredica u zavisnosti od vrste i veličine oštećenja. Za seriju modela sa poznatim oštećenjima datim u vidu zareza različite dubine, numerički i eksperimentalno su određeni indeksi stanja u funkciji vremena trajanja objekta. Određivanjem korelacije indeksa stanja kao merene ili numeričke vrednosti, ocene stanja

i vremena omogućuje obrnuto, da se kod nepoznate veličine oštećenja odredi indeks stanja merenjem ili proračunski, na osnovu koga se određuje ocena stanja i dubina oštećenja.

Na bazi numeričkog i laboratorijskog istraživanja na modelima sa oštećenjima u vidu geometrijskog prekida elementa - zarez različitih dubina od 0 pa do $2/3$ visine betonske gredice, definisani su gubici poprečnog preseka gredice, kao procenat oštećenja i faktor oštećenja, a za preostali poprečni presek kao faktor stanja gredice. Prema istraživanjima u ovom radu "*kritična oštećenja*" predstavljaju oštećenje od $1/2$, a "*velika oštećenja*" predstavljaju oštećenje od $1/5$ visine gredice. U ovom istraživanju je propagacija oštećenja betonske gredice tokom vremena (koje odgovara vremenu upotrebe objekta), predstavljena različitim dubinama zarez, koja se tokom vremena proporcionalno povećavaju. Pretpostavka je da u vremenskom trenutku nula nema oštećenja, a da tokom vremena u nepovratnom procesu, oštećenja neprekidno rastu sve do dostizanja kritičnog oštećenja. Proporcionalni odnos oštećenja, kao gubitka materijala poprečnog preseka betonske gredice i vremena, određen je referentnom pravom linijom preko faktora oštećenja i faktora vremena na vremenskoj skali od 0 do 1.

Vrednosti faktora oštećenja i faktora stanja su u granicama od 0 do 1, a kao komplementne veličine njihov zbir je uvek 1. Ove vrednosti kao vremenski zavisne veličine imaju sledeće vrednosti i to za faktor vremena 0, faktor oštećenja je 0 i faktora stanja 1, a za faktor vremena 1, faktor oštećenja je 0,5 i faktor stanja je 0,5. Promena oštećenja tokom vremena može biti nelinearna u zavisnosti od brzine procesa deterioracije i može se predstaviti preko stepene funkcije vremena i kritičnog oštećenja.

Numeričkim metodama i eksperimentalnim merenjima su određeni indeksi stanja oštećenog betonskog elementa i izrađeni su nomogrami za detekciju i veličinu oštećenja. Elementi nomograma su dobijeni na osnovu poznatog kritičnog oštećenja i vremenski zavisne funkcije oštećenja. Ocena stanja je određena na osnovu veličine oštećenja, tako da svaka ocena stanja ima svoj faktor stanja i indeks stanja. U zoni oštećenja (zarez) na elementu podaci čitanja sa senzora S2 i S3 pokazuju nagli skok vrednosti, dok čitanja na sensorima senzora S4 i S5 pokazuju smirivanje tih vrednosti. Za svako čitanje senzora moguće je izraditi nomogram stanja, ali je u ovom istraživanju uzeto čitanje sa senzora S5 kao relevantno za izradu nomograma.

Referentni nomogram evaluacije stanja je izrađen za proporcionalnu promenu oštećenja tokom vremena na bazi referentnih podataka. Svaka vrednost oštećenja u određenom vremenskom trenutku ima korespondentnu vrednost indeksa stanja. Referentni nomogram evaluacije stanja se koristi kao osnova u kojoj se unose nelinearne promene oštećenja tokom vremena na bazi podataka merenja i vrednosti indeksa stanja. Nelinearni faktor stanja u procesu tokom vremena je predstavljen krivom linijom. Kriva linija iznad referente linije ukazuje na sporije procese deterioracije, a kriva linija ispod referente linije ukazuje na brže procese deterioracije. Nomogrami stanja mogu da imaju praktičnu primenu kod detekcije i identifikacije oštećenja objekata na terenu, kod određivanja dubine oštećenja i brzine procesa deterioracije. Primena nomograma se zasniva na razlici vremenskih čitanja (energije ili brzine) kao izlaznih podataka i proračunskih podataka indeksa stanja, za određivanje faktora i ocene stanja. Kriva linija faktora stanja se formira na osnovu

parova vrednosti, merenih faktora vremena za svaku odgovarajuću vrednost faktora stanja.

Na osnovu promene energije izlaznih signala, numeričkom simulacijom je određen indeks oštećenja i indeks stanja oštećenih betonskih gredica, na osnovu čega je konstruisan nomogram evaluacije stanja. Na osnovu indeksa stanja, dobijenog na osnovu merenja brzine ultrazvučnih talasa i numeričkim metodom na gredicama sa oštećenjima, za linearnu zavisnost faktora stanja i vremena konstruisan je referentni nomogram evaluacije stanja na bazi brzina. Nomogrami na bazi brzina su izrađeni fitovanjem krive na osnovu podataka srednjih vrednosti ultrazvučnih merenja i numeričkih vrednosti. Na osnovu dijagrama zavisnosti vrednosti indeksa stanja i položaja senzora zaključuje se da indeks stanja zavisi, za određeno oštećenje, od položaja senzora. Uticaj položaja senzora, pri vremenskoj promeni indeksa stanja, praktično se može eliminisati korišćenjem istih položaja senzora na istim mernim mestima elementa. Time se nakon određenog vremenskog intervala dobija razlika u čitanjima sa istog mesta, na osnovu koje se računa indeks oštećenja. Za izlazno čitanje vremena prolaska ultrazvučnih talasa između dva senzora, na osnovu razmaka senzora određuje se odgovarajuća brzina, a na osnovu razlika brzina početnog čitanja i čitanja nakon oštećenja, u odgovarajućem vremenskom intervalu, proračunom se određuje indeks stanja. Ovaj metod je veoma pogodan za terensku upotrebu primenom mobilnog ultrazvučnog aparata. Kod detekcije oštećenja na bazi razlike energije izlaznih signal dolazi se do indeksa oštećenja. Ovaj metod je zahtevniji u pogledu opreme i zahteva ugrađivanja senzora u samu konstrukciju, ali omogućuje lakše praćenje stanja i monitornog konstrukcije tokom eksploatacije i lakšu obradu dobijenih podataka.

Ove metode se mogu koristiti i za utvrđivanje karakteristika betona. Na osnovu podataka o brzini kretanja talasa i gustine betona korišćenjem faktora korekcije računskim putem se indirektno može odrediti čvrstoća na pritisak, dinamički modul elastičnosti i poasonov koeficijent. Sprovedenim laboratorijskim ispitivanja u okviru ovog istraživanja direktnim utvrđivanjem čvrstoće na pritisak i modula elastičnosti na probnim telima dobijeni su rezultati koji pokazuju dobro slaganje sa vrednostima dobijenim merenjem ultrazvučnom metodom merenja. Podaci o karakteristikama betona korišćeni su za uzajamnu proveru laboratorijskih merenja kao i za korekciju parametra numeričkog modela.

Na osnovu dobijenih podataka putem numeričkih simulacija i sprovedenih laboratorijskih merenja se zaključuje da indeks stanja, kod oštećenja u vidu zareza, zavisi od dubine, položaja i orijentacije oštećenja, broja oštećenja (zareza), veličine dinamičkog modula elastičnosti i poasonovog koeficijenta betona. Položaji i orijentacije pukotina, kao i promena dinamičkog modula elastičnosti betona utiče na promenu indeksa oštećenja tek sa nekoliko procenata, na osnovu čega se zaključuje da dominantan uticaj na indeks oštećenja ima dubina oštećenja. Promena poasonovog koeficijenta betona ima najmanji uticaj na indeks oštećenja.

Glavni doprinos u ovoj doktorskoj disertaciji je unapređenje metoda ocene stanja oštećenih betonskih elemenata konstrukcije razvojem dva različita modela na bazi propagacije mehaničkih talasa primenom numeričkih i eksperimentalnih metoda. Oba modela kao rezultat daju različite vrednosti indeksa oštećenja na osnovu propagacije talasa kroz betonski element na osnovu promene energije izlaznih signala ili promene

brzine ultrazvučnih talasa. Primena ovih metoda zavisi od raspoložive merne opreme i softvera. Promena brzine ili energije izlaznih talasa merene nakon određenog vremena ukazuje na postojanje oštećenja odnosno promene u materijalu. Takođe vrednosti indeksa stanja ukazuju na to da li se u posmatranom vremenskom periodu radi o bržem ili sporijem obliku degradacije. Korelacijom indeksa stanja i faktora vremena, referentnim nomogramom evaluacije stanja se određuju faktori stanja konstrukcije, odnosno veličine oštećenja, ocena stanja i koeficijent stanja betonskog elementa. Preostala nosivost oštećenog betonskog elementa se određuje na osnovu uvedenog koeficijenta stanja u korelaciji sa veličinom oštećenja i ocenom stanja. Preostala nosivost, kao preliminarni podatak, je prvi indikator upozorenja o stanju konstrukcije i upućuje na proveru drugih zahteva u pogledu funkcionalnosti ili stabilnosti, na osnovu čega se odlučuje o tome da li konstrukcija i dalje odgovara svojoj nameni ili se nalaže detaljno laboratorijsko ispitivanje i izrada projekta sanacije.

U ostale doprinose istraživanja spada:

- definisanje kritičnog oštećenja i evaluacija stanja betonskog elementa, korišćenjem vremenskih podataka, na osnovu kojih se na nomogramu može odrediti upotrební vek konstrukcije,
- određivanje korelacije koeficijenta stanja i ocene stanja, veličine oštećenja i njena primena u kontroli sigurnosti prema evrokodovima.
- razvoj originalnih stohastikih modela za formiranje baza podataka slučajnih promenljivih za dejstva, materijale, modela nesigurnosti, mehaničkog modela i modela geometrijskih podataka u semi-probabilističkom konceptu sigurnosti konstrukcija prema evrokodovima.

Sprovedena istraživanja prikazana u ovom radu su ograničena na oštećenja na betonskim elementima poznatih dimenzija ne uzimajući u obzir ponašanja konstrukcije kao sistema. U tom smislu pravci daljih istraživanja se mogu kretati ka unapređenju istraživanja u oblasti odgovora i sposobnost i konstrukcijskih sistema da se prekoračenjem graničnih stanja odupru iznenadnim dejstvima i da nakon toga zadrže potrebna svojstva nakon oporavka. Dalje unapređenje istraživanja u pogledu ponašanja konstrukcijskog sistema je sa aspekta redundantnosti, odnosno sposobnosti sistema da otkazom jednog ili grupe elemenata ne dovede do rušenja cele konstrukcije. U vezi sa tim treba napomenuti i aspekt duktilnosti konstrukcije i pojave otkaza konstrukcije sa i bez upozorenja pri dejstvu zemljotresa i eksplozija. Neki od daljih pravaca istraživanja su:

- istraživanje uticaja oblika poprečnog preseka i armiranja nosača na propagaciju talasa i vrednosti indeksa stanja,
- unapređenje istraživanja kritične stope oštećenja sa aspekta nosivosti, upotrebljivosti-funkcionalnosti i ekonomičnosti i optimizacije rešenja u cilju donošenja odluke o određivanju upotrebnog veka konstrukcije na osnovu višekriterijumskih matematičkih modela,
- digitalizacija procesa detekcije oštećenja od prikupljanja podataka o stanju konstrukcije, izrade programa za očitavanje i automatsku obradu podataka, razvoj modela oštećenja do konačnog određivanja ocene stanja i upotrebnog veka konstrukcije.

Praktična primena rezultata istraživanja za detekciju oštećenja i određivanje ocene stanja konstrukcijskih elemenata mostova je prilikom glavnih pregleda konstrukcija. Primena modela istraživanja na realnoj konstrukciji zahteva poznavanje karakteristika materijala za stanje neoštećenosti ili nultog stanja čiji je indeks stanja $IS=1$. U zavisnosti od programa ispitivanja stanja, prema utvrđenom rasporedu mernih mesta, prati se promena energije izlaznih signala ili promena brzine ultra zvuka. Na osnovu tih promena koje ukazuju na pojavu oštećenja (prslina) ili promenu karakteristika materijala (modula elastičnosti) može se odrediti in situ vrednost IS . Na osnovu podataka merenja, primenom referentnog nomograma evaluacije stanja, može se odrediti ocena i faktor stanja, a samim tim i veličina oštećenja. Ukoliko se u polju između dva senzora S_0 i S_5 nalazi jedno oštećenje- prslina, nomogram pokazuje ispravnu vrednost IS , dok kod pojave više prslina (vidljivih i nevidljivih), nomogram ne daje ispravnu vrednost za IS , ali ukazuje na pogoršanje stanja konstrukcije. Kod složenih oštećenja elemenata sa prisustvom prslina i sa promenom karakteristika materijala, osim merenja je neophodna i vizuelna procena.

Obzirom da za mostove postoje već formirane baze podataka i višegodišnje sistemsko praćenje, implementacija ovakvih istraživanja sa podacima iz baze podataka o mostovima bi se mogla definisati kao konačni cilj istraživanja. Ovakav poduhvat zahteva adaptaciju i unapređenje sistema klasifikacije i kvantifikacije oštećenja kao i pronalaženje modela za primenu postojećih prikupljenih podataka. Najveća prepreka tome je što su postojeći podaci i ocene stanja bazirani na vizuelnim pregledima i to što ne postoje merenja. Osavremenjavanjem metoda monitoringa i sistema obrade podataka lakše i pouzdanije bi se određivao rejting stanja konstrukcija i određivali prioriteti sanacija i popravki i preciznije određivali ukupni troškovi održavanja, što bi u krajnjoj liniji uticalo i na promenu dosadašnje strategije održavanja. Prednosti bi se ogledale i u tome što bi se prikupljanjem i obradom podataka mogla utvrditi ciljana vrijednost indeksa pouzdanosti na mrežnom nivou (na nekom putu) ciljem ostvarenja podjednakog nivoa pouzdanosti za sve mostove na istom putu.

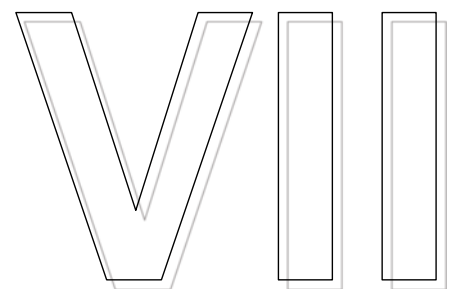
Ovo istraživanje je podstakunto dugogodišnjim radom autora pregledima, praćenju i oceni stanja mostova, davanju predloga mera sanacije i sanacijama mostova. Inverznim kretanjem od posledice ka uzroku, proučavanjem brojnih studija, ekspertiza i naučnih istraživanja, i ličnim izazovima u rešavanju praktičnih problema oštećenja betona, trasiran je originalan put ka identifikaciji i rešavanju ovog značajnog tehničkog problema.

Model ocene stanja proizašao iz numeričkih i laboratorijskih istraživanja pruža mogućnost detekcije i vremensku verifikaciju oštećenja, brzinu procesa degradacije, ocenu stanja i procenu nosivosti betonskih elemenata, a namenjen je za potrebe primene u praksi. Kompilacijom i sistematizacijom su grupisani i sintetizovani rezultati, po prioritetima, iz različitih oblasti istraživanja odabirom metoda i postupaka koji su od značaja za oblast stanja mostova. Predloženim modelom za prikupljanje i obradu podataka o oštećenjima betona i njihovo procesuiranje do naprednih matematičkih modela za proračun konstrukcija, se zatvara krug *oštećenje-sigurnost-intervencija*.

Prikazana istraživanja u ovom radu prvenstveno su vezana za oštećenja materijala i probleme trajnosti. Obzirom na složenost problema pojave oštećenja i propadanja betona kod konstrukcija u eksploataciji, posmatran problem je neodvojiv od sigurnosti konstrukcija, a dobijeni rezultati ovih istraživanja mogu koristiti i u jednoj i u drugoj svrsi.

*„Nije učen onaj ko čita knjige, već
onaj ko zna šta čita“*

Rumunska narodna poslovice



POGLAVLJE

VII LITERATURA

- [1] Gojković M.: *Stari kameni mostovi*, Naučna knjiga, Beograd 1989.
- [2] King H.R.: *Aristotle without Prima Materia*, Journal of the History of Ideas. Vol. 17, No. 3 (Jun., 1956), pp. 370-389, The University of Pennsylvania Press, Philadelphia 1956.
- [3] Gromicko N., Shepard K.: *The History Of Concrete*, InterNACHI 2013.
- [4] Pržulj M.: *Mostovi*, udruženje Izgradnja, Beograd 2014.
- [5] Polion M.V.: *Deset knjiga o arhitekturi*, Građevinska knjiga, Beograd 2014.
- [6] Neville A. M.: *Properties of Concrete*, 5th edition University of California 1995.
- [7] Grdić Z.: *Tehnologija betona*, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, Niš 2011.
- [8] Marinković S., Ignjatović I.: *Savremeni koncept obezbeđivanja trajnosti betonskih konstrukcija - projektovanje prema upotrebnoj veku*, Inženjerska komora Srbije, Beograd 2008.
- [9] Mladenović S., Pavlović M., Stanojević D.: *Korozija i zaštita betona i armiranog betona*, SISZAM Beograd 2008.
- [10] SRPS EN 1990:2012: *Evrokod — Osnove projektovanja konstrukcija*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2012.
- [11] fib Task Group 5.6: *Model Code for Service Life Design* International Federation for Structural Concrete fib, Lausanne, Switzerland, 2006
- [12] SRPS EN 206:2017: *Beton – Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2017.
- [13] Bjegović D., Rosković R, Đurković M.: *Uloga cementne industrije u održivom razvoju graditeljstva*, HSGI Sabor Hrvatskih graditelja 2008, Cavtat 2008
- [14] Ivanov D., Nikolovski T.: *Stari mostovi na putevima u Makedoniji - stanje, potreba i metode za njihovo ojačanje*, stručni časopis Materijali i konstrukcije br.46, br. 1-2, Beograd 2003.
- [15] Bebić D.: *Sistem upravljanja mostovima i pitanja održavanja, seminar* Srbijaputa, Beograd 1989.
- [16] DIN 1076:1999-11: *Ingenieurbawerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 1999.
- [17] Chen W.F., Duan L.: *International bridge engineering*, Taylor & Francis Group, LLC, CRC Press. 2014.
- [18] *Pravilnik za građevinske konstrukcije*, Službeni glasnik RS, 89/2019.
- [19] Srejović, D.: *Lepenski vir: Nova praistorijska kultura u Podunavlju*, Srpska književna zadruga, Beograd 1969.
- [20] Davidovits D.: *La nouvelle histoire des Pyramides*, Jean-Cyrille Godefroy, Paris, France 2004

- [21] Marusin Ş.L.: *Acient Concrete Structures*, Concrete international 56-58, American concrete institute ACI Michigan, USA January 1996
- [22] Garašanin M. and Vasić M.: *Trajanov Most - Kastel Pontes*, Đerdapske sveske I. Arheološki institut SANU, Beograd 1980.
- [23] Powter A.: *History, Deterioration, and Repair of Cement and Concrete in Nineteenth Century Fortifications Constructed by the Royal Engineers*, Bulletin of the Association for Preservation Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 59-77, Department of Indian and Northern Affairs, Canada 1978.
- [24] Muravljov M.: *Građevinski materijali*, Građevinska Knjiga, Beograd 2007.
- [25] Ivkovic M., Radojčić T.: *Reologija i opšta teorija loma betona*, Naučna Knjiga, Beograd 1987.
- [26] Živković S., Jevtić D., Radonjanin V.: *Istraživanje na području materijala i njihove primene*, časopis Materijali i konstrukcije vol. 48, br.4, str. 9-24, Beograd 2005.
- [27] Malešev M., Radonjanin V., Muravljov M.: *Analiza zavisnosti između čvrstoće betona pri pritisku i vodocementnog faktora*, časopis Materijali i konstrukcije br.47, vol. 47, br. 1-2, str. 63-74, Beograd 2004.
- [28] Narayan S. R.: *Durability design a holistic philosophy for sustainable construction a new concrete code for the 21st century*, ACC - African Concrete Code Symposium - Tripoli, Libya 2005
- [29] *fib bulletin 3: Structural Concrete*, Volume 3, International Federation for Structural Concrete fib Lausanne, Switzerland 1999.
- [30] Ignjatović I., Marinković S.: *Projektovanje betonskih konstrukcija prema upotrebnoj dobi – deo 1 – osnovni pojmovi trajnosti i pouzdanosti*, stručni časopis Materijali i konstrukcije br.50, Beograd 2007.
- [31] *Agenda 21*, United Nations Conference on Environment & Development (UNCED), Rio de Janeiro, Brazil 1992.
- [32] ISO 14040:1998: *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 1998.
- [33] SRPS EN 15643-1:2010: *Održivost građevinskih objekata — Ocenjivanje održivosti zgrada — Deo 1: Opšti okvir*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS), Beograd, Srbija 2010.
- [34] ISO 2394:2015: *General principles on reliability for structures*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 2015.
- [35] ISO 13822:2001: *Bases for design of structures - Assessment of existing structures*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 2001.
- [36] *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 7th Edition*, American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Washington DC 2014
- [37] *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Superstructures*, Reference Manual, Federal Highway Administration (FHWA), National Highway Institute (NHI), document FHWA-NHI-15-047:2015, U.S. Department Of Transportation 2015.

- [38] DIN 15643:2016: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Leitfaden Nachhaltiges Bauen Zukunftsfähiges Planen*, Bauen und Betreiben von Gebäuden, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin 2016.
- [39] Hegner H. D.: *Nachhaltiges Bauen in Deutschland – Bewertungssystem des Bundes für Büro- und Verwaltungsbauten, Stahlbau*, Band 79, WILEY-VCH Verlag 2010.
- [40] *fib bulletin 17: Management, maintenance and strenghtening of concrete structures*, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland 2002.
- [41] Nowak A.S. & Carr R.I.: *Classification of human errors*, Structural Safety Studies. Proceedings of the Symposium held in conjunction with the 1985 ASCE Convention, Denver, USA1985
- [42] Fröderberg M.: *The human factor in structural engineering*, Lund University, Faculty of Engineering, Division of Structural Engineering, Sweden 2014.
- [43] Taleb N.N.: *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable Fragility*, Random House Publishing Group LLC. New York, USA 2010.
- [44] Petroski H.: *Success through failure: The paradox of design*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, US 2006.
- [45] Ristić N.: *Hidro-abrazivna otpornost betona*, doktorska disertacija, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš 2015.
- [46] CEB Task Group 20: *Durable Concrete Structures*, Thomas Telford Services Ltd London, Lausanne, Switzerland 1997
- [47] Dyer T.: *Concrete durability* - CRC Press, New York 2014.
- [48] SRPS EN 1992-1-1:2015: *Evrokod 2 — Projektovanje betonskih konstrukcija — Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2015.
- [49] SRPS EN 1992-2:2014: *Evrokod 2 — Projektovanje betonskih konstrukcija — Betonski mostovi — Pravila projektovanja i konstruisanja*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2014.
- [50] Taylor C.P.: *Curing concrete*, Taylor & Francis Group, CRC press London 2014.
- [51] ACI 365.1R-00 : *Service Life Prediction-State of the Art report*, American Concrete Institute ACI Committee 2000.
- [52] SRPS EN ISO 10523:2016: *Kvalitet vode — Određivanje pH-vrednosti*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2016.
- [53] SRPS EN ISO 9963-1:2007: *Kvalitet vode - Određivanje alkaliteta - Deo 1: Određivanje ukupnog i kompozitnog alkaliteta*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2007.

- [54] *DIN 1045-2:2014-8: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 2014.
- [55] SRPSEN 1991-1-1:2012: *Evrokod 1 — Dejstva na konstrukcije — Deo 1-1: Opšta dejstva — Zapreminske težine, sopstvena težina, korisna opterećenja za zgrade - Nacionalni prilog*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2012.
- [56] Đuranović N., Popović J.: *Aktuelne metode ispitivanja mostovskih konstrukcija – dio 1*, stručni časopis Izgradnja br. 1/2, Beograd 2009.
- [57] Muravljev M., Živković S., Zakić D.: *Savremene metode i tehnike ispitivanja betona i betonskih konstrukcija*, stručni časopis Materijali i konstrukcije, vol.43, br. 1-2, Beograd 2000. str. 5-11
- [58] BS 7543:2015: *Guide to durability of buildings and building elements, products and components*, British Standard Institution 2015.
- [59] SRPS EN 1504-9:2010: *Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Definicije, zahtevi, kontrola kvaliteta i vrednovanje usaglašenosti - Deo 9: Opšti principi za upotrebu proizvoda i sistema*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2010.
- [60] *Priručnik za obuku osoblja na zimskom održavanju puteva*, Twiling publikacije, JP Putevi Srbije, Beograd 2008.
- [61] SRPS U.M1.016:1992: *Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 1992.
- [62] SRPS EN 12390-8:2019: *Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2019.
- [63] SRPS U.M1.055:1984: *Ispitivanje otpornosti površine betona na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 1984.
- [64] *fib bulletin 38: Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling*. State-of-art report, International Federation for Structural Concrete *fib* 2007.
- [65] SRPS EN 1991-2:2012: *Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije - Deo 2: Saobraćajno opterećenje na mostovima*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2012.
- [66] SRPS EN 1991-1-4:2012: *Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije - Deo 1-4: Opšta dejstva - Dejstva vetra*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2012.
- [67] SRPS EN 1998-1:2015: *Evrokod 8 : Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija - Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2015.
- [68] SRPS EN 1991-1-7:2012: *Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije - Deo 1-7: Opšta dejstva - Incidentna dejstva*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2012.
- [69] Hsieh C.H., SU J.L., Feng C.M.: *Disaster Risk Analysis of Highway Bridges from Vulnerability Perspective*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 2011. pp. 1-15.
- [70] Pržulj M.: *Uzroci rusenja, trajnost i obnova mostova*, stručni časopis Izgradnja br. 72, Beograd 2018.

- [71] Wang F., Kong Y., Wan M.A., Yi O., Chong K., Lee C.H., Tze E., Lim M.: *Reinforced concrete slabs subjected to close in explosion*, Defence science and technology agency Singapore, LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, Germany 2008.
- [72] Đuranović N.: *Primjena energetske metode za dimenzionisanje AB elemenata izloženih udarnom talasu eksplozije*, stručni časopis Istraživanja, br. 1/97, Građevinski fakultet u Podgorici, 1998. str. 61 - 74
- [73] Irwin P., Stoyanoff S. Xie J., Hunter M.: *Tacoma Narrows 50 years later—wind engineering investigations for parallel bridges, Assessment, Design and Construction*, Bridge Structures Journal Volume 1, Ontario, Canada 2005.
- [74] Smith J.W.: *Vibration of structures - Applications in civil engineering design*, Chapman and Hall, London 1988.
- [75] Pavic A., Reynolds P., Wright J.: *Analysis of frequency response functions measured on the Millennium Bridge*, 1st Draft, University of Sheffield, 2001.
- [76] *Economic Losses, Poverty & Disasters 1998-2017*, The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) 2018.
- [77] Varga S., Babić-Mladenović M.: *Zaštita od poplava u Srbiji – novi pristup*, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd 2007.
- [78] Vučinić M., Folić R., Ristić D.: *Savremeni pristup aseizmičkom projektovanju konstrukcija - primena bazne izolacije kod mostova*, stručni časopis Materijali i konstrukcije, vol. 49, br. 3-4, Beograd 2006. str. 21-34
- [79] F.L.Costa, A.S.Torres, R.A.Neves (2016): “*Analysis of concrete structures deteriorated by alkali-aggregate reaction: case study*”, Journal of Building Pathology and Rehabilitation vol. 1, Article number: 13
- [80] Tadić Lj., Kekanović M.: *Uticaj mikroorganizama na koroziju betona*, zbornik radova građevinskog fakulteta Univerziteta u Subotici, 2011.
- [81] Radić, J. i saradnici: *Betonske konstrukcije 4 – sanacije*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2010.
- [82] Trojanović M.: *Betonski mostovi II – opšta i specifična problematika betonskih mostova*, Zavod za izdavanje udžbenika SR Srbije, Beograd 1964.
- [83] Invernizzi S., Montagnoli F., Carpinteri A.: *Fatigue assessment of the collapsed XXth Century cable-stayed Polcevera Bridge in Genoa*, 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity, Procedia Structural Integrity, Volume 18, 2019, pp. 237-244
- [84] Pržulj M.: *Integralni mostovi*, Zbornik radova 13 Kongres JDGK, Zlatibor 2010.
- [85] Stojić N., Marković N., Grdić Z.: *Oštećenja betonkih mostova*, simpozijum PHIDAC, Građevinsko arhitektonski fakultet univerziteta u Nišu 2019.
- [86] Folić R.: *Saobraćajna opterećenja i stanje postojećih drumskih mostova*, stručni časopis Put i saobraćaj, Beograd 2009.
- [87] Stojić N.: *Oštećenja mostova usled dejstava izazvanih poplavama*, Zbornik radova Savremena građevinska praksa 2016, departman za Građevinarstvo i gideziju, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Andrevlje 2016

- [88] ISO 12491:1997: *Statistical methods for quality control of building materials and components*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 1997.
- [89] *NaBau Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 1981.
- [90] DNV-CN 30.6:1992: *Structural reliability analysis of marine structures*, Det Norske Veritas 1992.
- [91] DNV-RP-A203:2017: *Qualification Procedures for New Technology*, Det Norske Veritas 2017.
- [92] DNV OS-C101:2015: *Design of offshore steel structures, General – LRFD Method*, Det Norske Veritas 2015.
- [93] ISO 13819-1:1995: *Petroleum and natural gas industries — Offshore structures — Part 1: General requirements*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 1995.
- [94] ISO 19902:2007: *Petroleum and natural gas industries — Fixed steel offshore structures*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 2007.
- [95] Nowak A.S., and Collins K.R.: *Reliability of structures* McGraw-Hill, New York, 2000.
- [96] Hasofer A.M., Lind N.C.: *Exact and invariant second-moment code format* Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 100, Issue 1, American Society of Civil Engineers ASCE 1974. pp. 111-121
- [97] Burdekin F. M.: *General Principles of the use of safety factors in design and assessment*, Journal of Engineering Failure Analysis 2006.
- [98] Faber M.H., Köhler J., Schubert M., Sabiote E., Fermaud C., Scheiwiler A.: *Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten, Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung*, Forschungsauftrag AGB 2005/102, Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bericht Nr.618, VSS Zürich, Switzerland 2009.
- [99] Kaplan S., Garrick B.J.: *On the quantitative definition of risk*, Risk analysis International journal, Vol. 1., Issue 1. Society of Risk analysis 1981.
- [100] DIN 1055-100:2001: *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 2001.
- [101] *JCSS Probabilistic model code:Part 1: Basis of design*, Joint Committee on Structural Safety JCSS 2001.
- [102] Melchers R. E.: *Structural reliability analysis and prediction*, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Australien 1999.
- [103] Fischer L.: *Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen. Bautechnik Sonderheft*, Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2001
- [104] Spaethe G.: *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*, Zweite, neubearbeitete Auflage Springer – Verlag, Wien, New York 1992.
- [105] DIN 1045-1:2008: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 2008.

- [106] *JCSS Probabilistic model code: Part 2: Load models*, Joint Committee on Structural Safety JCSS 2001.
- [107] *JCSS Probabilistic model code: Part 3: Resistance models*, Joint Committee on Structural Safety JCSS 2002.
- [108] Kiureghian, A. D., Ditlevsen, O.: *Aleatory or epistemic? Does it matter?*, Journal Structural Safety vol. 31, 2009. pp. 105-112
- [109] BOMEL Ltd.: *Probabilistic methods: Uses and abuses in structural integrity*, Contract, Health and Safety Executive (HSE) Research Report 398/2001, 2001..
- [110] Brown C., Elms D., Melchers R.: *Assessing and achieving structural safety* Proceedings of the ICE-Structures and Buildings 161, 2008. pp. 219-230
- [111] El-Shahhat A. M., Rosowsky D.V., Chen W. F.: *Accounting for human error during design and construction*, Journal of Architectural Engineering, vol.1, 1995. pp.84-92
- [112] SRPS ISO 9001:2015: *Sistemi menadžmeta kvalitetom-Zahtevi*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2015.
- [113] Melchers R. E., Baker M. J., Moses F.: *Evaluation of experience. Proceedings - 1983: Quality Assurance within the Building Process*, International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE - Workshop Rigi, Switzerland 1983. pp.21-38
- [114] Frühwald E., Serrano E., Toratti t., Emilsson A., Thelandersson S.: *Design of safe timber structures – How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber?*, Division of Structural Engineering, Lund Institute of Technology, Report TVBK-3053 edn, Lund, Sweden. 2007.
- [115] Heumann G.: *Zuverlässigkeitsorientierte Bewertung bestehender Bauwerke aus Stahlbeton und Spannbeton*, PhD Thesis, Technische Universität Braunschweig 2014
- [116] *Basis of Design of Structures. Proposal for Modification of Partial Safety Factors in Eurocodes*, SAKO investigation, Joint Committee of NKB and INSTA-B 1999..
- [117] *Partial factors of safety in geotechnical engineering*. Danish Geotechnical Institute, Report No. 1, 1993.
- [118] Foschi R.O., Folz B.R., Yao F.Z.: *Reliability-based design of wood structures*, Structural Research Series, Report no. 34, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1989.
- [119] Honfi D., Mårtensson A.: *Reliability of steel flexural members according to EC in serviceability limit state*, Journal Engineering Structures 35, Division of Structural Engineering, Lund University, Lund, Sweden 2012. pp.48–54
- [120] Hansen M.: *Zur Auswirkung von Überwachungsmaßnahmen auf die Zuverlässigkeit von Betonbauteilen*, PhD thesis, Universität Hannover, 2003. Fraunhofer-IRB-Verl., Berichte des Instituts für Massivbau 2, Stuttgart 2004.
- [121] Rackwitz, R., Fiessler, B.: *Structural reliability under combined random load sequences*, Institut für Massivbau, Composite Structure journal, Technical University of Munich 1978. pp 484-494

- [122] Vogel T.V., Zwicky D., Joray D., Diggelmann M., Hoj N.: *Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten - Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten*, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich 2009
- [123] Kröger W, Zio E.: *Vulnerable Systems*, Springer, London 2011.
- [124] Maneski T., Sedmak A.: *Analiza stanja, dijagnostika ponašanja, procena preostale čvrstoće i radnog veka, revitalizacija – integritet konstrukcije*, stručni časopis Integritet i vek konstrukcija Vol. 2, 2001. pp. 107-110.
- [125] Bruneau M., Chang S., Eguchi R., Lee G., O'Rourke T., Reinhorn A., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W., von Winterfelt D.: *A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities*, EERI Spectra Journal, Vol.19, No.4, 2003. pp.733- 752
- [126] ГОСТ Р 51901.14-2005: *Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности*, Национальный стандарт Российской Федерации 2005.
- [127] *Toshiba Memory Corporation Reliability Handbook*, Toshiba Corporation 2018.
- [128] *Numerical Techniques for Safety and Serviceability Assessment*, COST 345-WG 4/5, Procedures required for the Assessment of Highway Bridges, CORDIS, 2004.
- [129] O'Connor A.N., Modarres M., Mosleh A.: *Probability Distributions Used in Reliability Engineering*, The Center for Risk and Reliability University of Maryland 2016.
- [130] F. Akgül: *Lifetime System Reliability Prediction for Multiple Structure Types in a Bridge Network*, PhD thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder, Colorado, 2002.
- [131] Markova J., Jung K.: *Reliability assessment of quick closing valves in hydroelectric power plant*, Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava Civil Engineering Series, Vol. 16, No. 2, paper 22, 2016
- [132] DIN EN 1990:2010-12: *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 2010.
- [133] Kunz C.: *Wasserbauwerke aus Beton nach europäischen Normen*. In: *Betonbauteile nach Eurocode 2*. Hrsg.: Holschemacher, K., HTWK Leipzig, Beuth Verlag, Berlin 2013. pp.127-146
- [134] *Recommendations for Loading and Safety Regulations for Structural Design*, NKB report 36, Nordic Committee on Building, 1978
- [135] SIA 269 : *Existing structures - basis for examination and interventions*, Security Industry Association (SIA) Standards Committee 2011
- [136] *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)*, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Deutschland 2011.
- [137] Mark P., Neugebauer P.: *Erhalt unserer Bausubstanz*, BetonKalender 2015.
- [138] NEN 8700:2011: *Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren - Grondslagen (Assessment of existing structures in case of reconstruction and disapproval - Basic Rules)*, The Royal Netherlands Standardization Institute (NEN) 2011.

- [139] Marková J.: *Reliability elements in the assessment of existing bridges*, Proceedings of the 3rd international conference: Reliability, safety and diagnostics of transport structures and means 2008, University of Pardubice, Czech Republic 2008.
- [140] *Appraisal of Existing Structures - 3rd edition*, The Institution of Structural Engineers IStructE, London, 2010
- [141] BS 8110-1:1997: *Structural use of concrete. Code of practice for design and construction*, British Standards Institution 1997.
- [142] ACI 318-14: *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute (ACI) Committee 318, 2014.
- [143] Bergmeister, K., Santa, U.: *Brückeninspektion und –überwachung*, Betonkalender 2004, Teil 1, pp. 407-481. Hrsg. K. Bergmeister, J. D. Wörner. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2004.
- [144] CAN/CSA-S6-88: *The Canadian standard for highway bridges*, Canadian Standards Association CSA, Toronto 1988, revidovan CSA 1990
- [145] CAN/CSA-S6-00: *Canadian Highway Bridge Design Code, Section 14: Evaluation*, Canadian Standards Association CSA, Toronto 2000.
- [146] CAN/CSA-S6-06: *Canadian Highway Bridge Design Code*, Canadian Standards Association CSA, Toronto 2012.
- [147] *Guide manual for condition evaluation and load and resistance factor rating (LRFR) of highway bridges*, AASHTO LRFR 1st Edition, Washington, 2003
- [148] *AASHTO Manual for Bridge Evaluation, 2nd edn (MBE)*, American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Washington DC 2011.
- [149] *Bridge Management System Coding Guide*, Florida Department Of Transportation (FDOT), Office of Maintenance 2019.
- [150] Naiyu Wang,: *Reliability-based Condition Assessment of Existing Highway Bridges*, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2010
- [151] Norris W.E., Graves H. L., Naus D.J., Oland C.B., Ellingwood B.R.: *Aging management of containment structures in nuclear power plants*, Technical Report, Journal Nuclear Engineering and Design, Vol. 166, Issue 3, 1996, pp. 367-379
- [152] Noortwijk Van J.M.: *A survey of the application of gamma processes in maintenance*, Journal Reliability Engineering & System Safety Volume 94, Issue 1, January 2009, pp. 2-21
- [153] Enright M.P., Frangopol D.M.: *Reliability-based condition assessment of deteriorating concrete bridges considering load redistribution*, Structural Safety journal, Vol.21, Issue 2, 1999, pp. 159-195
- [154] *Tehničko rešenje baze podataka o mostovima-knjiga 3*, Institut za puteve Beograd 1998.
- [155] ISO 10303-28:2007: *Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange, Part 28: Implementation methods: XML representations of EXPRESS schemas and data, using XML schemas*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 2007.

- [156] SRPS EN ISO 16739:2017: *Osnovne industrijske klase (IFC) za razmenu podataka u građevinskoj industriji i delatnostima menadžmenta održavanjem objekata i opreme*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2017.
- [157] Bolukbasi M., Mohammadi J. Arditi D.: *Estimating the Future Condition of Highway Bridge Components Using National Bridge Inventory Data.* Practical Periodical on Structural Design and Construction, American Society of Civil Engineers ASCE, Vol. 9, No. 1, 2004. pp.16-24
- [158] *AASHTO Manual for Bridge Element Inspection (MBEI)*, 1st edition American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Washington DC 2015.
- [159] *Bridge inspection manual*. New York State Department of Transportation (NYSDOT), 2017
- [160] Nickless K., Atadero R.: *Investigation of Mechanistic Deterioration Modeling for Bridge Design and Management*, Colorado Department of Transportation (CDOT), Report No.CDOT-2017-05, Colorado 2017.
- [161] *Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC)*, Ontario Ministry of Transportation, Quality and Standards Division, 1991.
- [162] *Manuel d'Inspection des Structures: Evaluation des Dommages*, Ministère des Transports du Québec (MTQ), Canada 1995.
- [163] SIA Norm -162 1989/1993: *Betonbuten*, Swiss Society of Engineers and Architects – SIA 1993
- [164] DIN 31051 2012-09: *Grundlagen der Instandhaltung*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 2012.
- [165] DIN EN 13306:2018-02: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung Dreisprachige Fassung EN 13306:2017*, Deutsches Institut für Normung (DIN) 2018.
- [166] RI-EBW-PRÜF, *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076*, 2013.
- [167] Merkblatt Bauwerksinspektion : *Schiffsschleusenanlagen - Massivbau*, und *Schiffsschleusenanlagen - Stahlwasserbau*, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, August 1998 Merkblatt Bauwerksinspektion „Wehranlagen“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, August 1998
- [168] Braml Th., Keuser M., Mangerig I.: *Use of monitoring data for a probabilistic analysis of structures*, IABSE 34th Symposium Venedig 2010, Venedig, Italia 2010.
- [169] Braml T.: *Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk*, PhD Thesis, Universität der Bundeswehr München 2010.
- [170] Lee J.: *A methodology for Developing Bridge Condition Rating Models Based on Limited Inspection Records*, PhD Thesis, Griffith University 2007.
- [171] Knight M. L.: *Quantitative framework for planning highway bridge inspection and assessment*, PhD Thesis, Vanderbilt University Nashville, Tennessee 2007.
- [172] Liu C., Hammad A., Itoh Y.: *Multi-Objective Optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using Genetic Algorithm*, Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol.12(6) 1997 pp.431-443

- [173] Yokoyama K., Sato H., Ogihara K., Toriumi R.: *Development of A Bridge Management System in Japan*, Proceeding of the 3rd International Conference on Bridge Management, Guildford, Surrey, UK 1996 pp 580-586
- [174] Dogaki M., Furuta H., Tsukiyama I., Fraqngpool D.: *Optimal Maintenance Planning of Reinforced Concrete Decks on Highway Network*, Conference Proceedings, US-Japan Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, American Society of Civil Engineers ASCE, Hawaii 2000.
- [175] Brodsky G., Muzykin R., Brodskaja E., Ponomarev Y., Yenyutin Y., and Vlasova M.: *Analysis of Parameters of Structure Deterioration Models within the Moscow Bridge Management System*, Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis, 2006. pp. 13-21
- [176] Atkins O.: *Bridge Condition Indicators, Volume 3: Evaluation of Condition Indicators*, County Surveyors' Society (CSS), Lincoln, UK 2002.
- [177] Moslehy Y., Gu H., Mo Y.L.: *Multi-functional smart aggregate-based structural health monitoring of circular reinforced concrete columns subjected to seismic excitations*, Journal Smart Materials and Structures 2010.
- [178] Stojić D., Nestorović T., Marković N., Cvetković R., Stojić N.: *Detection of damage to reinforced-concrete structures using piezoelectric smart aggregates*, stručni časopis Građevinar br.68, Zagreb 5/2016, str. 371-380
- [179] Si J., Zhong D., Xiong W.: *Piezoceramic-Based Damage Monitoring of Concrete Structure for Underwater Blasting*, Journal Sensors 20(6):1672, 03/2020.
- [180] SRPS U.M1.041:1986: *Beton. Određivanje indeksa sklerometra i kalibracione krive*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 1986.
- [181] Yang S., Frangopol D.M., Neves L.C.: *Service life prediction of structural systems using lifetime functions with emphasis on bridges*, Reliability Engineering and System Safety No.86, 2004. pp.39–51
- [182] Morcoux G., Lounis Z., Mirza M. S.: *Identification of Environmental Categories for Markovian Deterioration Models of Bridge Decks*. Journal of Bridge Engineering, 8(6), 2003. pp. 353–361
- [183] Nowak, A.S.: *Calibration of LRFD Bridge Design Code*, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. 1999.
- [184] SRPS EN 12390-7:2010: *Ispitivanje očvrslag betona - Deo 7: Zapreminska masa očvrslag betona*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2010.
- [185] SRPS EN 12390-13:2015: *Ispitivanje očvrslag betona — Deo 13: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri pritisku*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2015.
- [186] SRPS EN 12390-1:2014: *Ispitivanje očvrslag betona - Deo 1: Oblik, mere i ostali zahtevi za uzorke i kalupe*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2014.
- [187] SRPS EN 12390-2:2010: *Ispitivanje očvrslag betona - Deo 2: Izrada i negovanje uzoraka za ispitivanje čvrstoće*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2010.
- [188] SRPS EN 12390-3:2010: *Ispitivanje očvrslag betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2010.

- [189] SRPS EN 12390-4:200 : *Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 4: Čvrstoća pri pritisku – Specifikacija uređaja za ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2008.
- [190] SRPS EN 14146:2007: *Metode ispitivanja prirodnog kamena - Određivanje modula elastičnosti (merenjem pomoću osnovne rezonantne frekvencije)*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2007.
- [191] SRPS EN 843-2:2010: *Savremena tehnička keramika - Mehanička svojstva monolitne keramike na sobnoj temperaturi - Deo 2: Određivanje Jungovog modula, modula smicanja i Poasonovog koeficijenta*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2010.
- [192] ASTM C215-14: *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*, ASTM International 2014.
- [193] ASTM E1876-15: *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse*, ASTM International 2015.
- [194] ASTM C1259-15: *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration*, ASTM International 2015.
- [195] ISO 12680-1:2005 : *Methods of test for refractory products - Part 1: Determination of dynamic Youngs modulus (MOE) by impulse excitation of vibration*, International Standards Organisation (ISO), Geneva, Switzerland 2005.
- [196] SRPS EN 12504-4:2008: *Ispitivanje betonskih konstrukcija - Deo 4: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2008.
- [197] ASTM C597-09: *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*, ASTM International 2009.
- [198] Krautkramer J., Krautkramer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, Germany 1990.
- [199] Bogas J. A., Gomes M.G., Gomes A.: *Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method*, Ultrasonics journal vol. 53, 2013. pp962-972
- [200] Dimov D.: *Non-destructive testing of Building Structures*, University of Architecture and Civil Engineering Sofia, Bulgaria 2011.
- [201] Lydon F.D., Balendran R.V.: *Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete*, Cement and Concrete Research Journal Vol.16, No.3, 1986.
- [202] ASTM C469/C469M-14: *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International 2014.
- [203] Lee B.J., Kee S.H., Oh T., Kim Y.Y.: *Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements*, Advances in Materials Science and Engineering 2017(5):1-13, 2017.
- [204] SRPS EN 12390-5:2010: *Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS) 2010.

POPIS SLIKA*

<i>Slika 2.1</i>	<i>Hram Pantenon u Rimu (levo); ostaci Trajanovog mosta na Dunavu (desno)</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.2</i>	<i>Prvi armirano betonski most u Srbiji (levo); Brana na Nišavi kod Sićeva (desno)</i>	<i>11</i>
<i>Slika 2.3</i>	<i>Šematski prikaz tipova strukture svežeg betona</i>	<i>13</i>
<i>Slika 2.4</i>	<i>Šematski prikaz tipova makro strukture očvrslog betona</i>	<i>14</i>
<i>Slika 2.5</i>	<i>Šematski prikaz osnovnih principa održivosti (eng. triple bottom line sustainability)</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.6</i>	<i>Lanac ljudskih grešaka</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.7</i>	<i>Segregacija betona</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2.8</i>	<i>Zarobljeni mehurići vazduha ispod oplata</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2.9</i>	<i>Prsline usled plastičnog skupljanja (levo) i plačičnog sleganja (desno)</i>	<i>20</i>
<i>Slika 2.10</i>	<i>Prsline sa donje strane kolovozne ploče mosta</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2.11</i>	<i>Oštećenja betona usled deformacije</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2.12</i>	<i>Pojednostavljena klasifikacija sredine prema SRPS EN 206</i>	<i>26</i>
<i>Slika 3.1</i>	<i>Klasifikacija dejstava</i>	<i>31</i>
<i>Slika 3.2</i>	<i>Oštećenja betona usled dejstva mraza</i>	<i>33</i>
<i>Slika 3.3</i>	<i>Oštećenja betona usled erozije betona</i>	<i>35</i>
<i>Slika 3.4</i>	<i>Oštećenja potpornih elemenata mostova usled sleganja</i>	<i>36</i>
<i>Slika 3.5</i>	<i>Oštećenja nastala udarom vozila</i>	<i>37</i>
<i>Slika 3.6</i>	<i>Oštećenja armirano betonskih mostova usled eksplozija</i>	<i>38</i>
<i>Slika 3.7</i>	<i>Oštećenja mostova usled preopterećenja</i>	<i>38</i>
<i>Slika 3.8</i>	<i>Prirodni hazardi u periodu 1998-2017</i>	<i>40</i>
<i>Slika 3.9</i>	<i>Oštećenja mostova usled poplava</i>	<i>41</i>
<i>Slika 3.10</i>	<i>Karbonatizacija na betonskim elementima mosta</i>	<i>43</i>
<i>Slika 3.11</i>	<i>Oštećenje betona usled dejstva sulfata</i>	<i>44</i>
<i>Slika 3.12</i>	<i>Oštećenja betona izazvana hloridima</i>	<i>45</i>
<i>Slika 3.13</i>	<i>Oštećenja usled korozije armature</i>	<i>46</i>
<i>Slika 3.14</i>	<i>Oštećenja betona usled alkalno-agregatne reakcije</i>	<i>47</i>
<i>Slika 3.15</i>	<i>Oštećenje betona usled dejstva vegetacije</i>	<i>48</i>
<i>Slika 3.16</i>	<i>Mahovina na betonskim elementima mosta</i>	<i>49</i>
<i>Slika 3.17</i>	<i>Organska jedinjenja životinjskog porekla na betonskim elementima mosta</i>	<i>50</i>
<i>Slika 3.18</i>	<i>Oštećenja betona u zoni ispod dilatacija</i>	<i>53</i>
<i>Slika 3.19</i>	<i>Oštećenje beton kolovozne ploče ispod hidroizolacije</i>	<i>53</i>
<i>Slika 3.20</i>	<i>Oštećenja mostova usled slivanja vode</i>	<i>54</i>
<i>Slika 3.21</i>	<i>Greške u izvođenju</i>	<i>54</i>

* Sve slike, crteži i grafički prikazi koji su preuzeti su jasno naznačeni u tekstu. Ukoliko u tekstu nije drugačije naglašeno, sve fotografije priložene u doktoratu su originalne i predstavljaju deo lične baze podataka autora prikupljane tokom godina na poslovima na kojima je bio angažovan; sve grafike i crteži su originalni i predstavljaju autorovu interpretaciju prezentovanih podataka

Slika 3.22	Oštećenja mostova usled hazardnog dejstva poplava	55
Slika 3.23	Životni krug mostova	56
Slika 4.1	Verovatnoća otkaza i margina sigurnosti preko funkcija PDF –za vrednosti g, r, e	62
Slika 4.2	Margina sigurnosti	63
Slika 4.3	Formiranje modela i materijalizacija konstrukcije	65
Slika 4.4	Koncepti proračuna konstrukcija	66
Slika 4.5	Model pouzdanosti	67
Slika 4.6	Zavisnost verovatnoće otkaza konstrukcije i indeksa pouzdanosti (levo); Zavisnost verovatnoće sigurnosti i indeksa pouzdanosti konstrukcije (desno)	68
Slika 4.7	Algoritam iterativne procedure proračuna rizika prema ISO 2394	70
Slika 4.8	Globalni koeficijent sigurnosti u konceptu dopuštenih napona	71
Slika 4.9	Globalni koeficijent sigurnosti u konceptu graničnog stanja	72
Slika 4.10	Nominalne vrednosti za dejstva i materijale	72
Slika 4.11	Parcijalni koeficijenti sigurnosti za $E_d=R_d$	75
Slika 4.12	Normalna raspodela	79
Slika 4.13	Standardna, Lognormalna i Gumbelova raspodela funkcije	80
Slika 4.14	Oblast sigurnosti i oblast nesigurnosti konstrukcije	82
Slika 4.15	Platonov model znanja	83
Slika 4.16	Kategorije modela nesigurnosti	84
Slika 4.17	Funkcija oporavka sistema $\varphi(t)$	92
Slika 4.18	Funkcija oporavka sistema u slučaju seizmičkog dejstva	93
Slika 4.19	Ireverzibilno granično stanje	93
Slika 4.20	Reverzibilno granično stanje	93
Slika 4.21	Funkcija gustine otkaza	94
Slika 4.22	Funkcija pouzdanost i funkcija raspodele otkaza u funkciji vremena	95
Slika 4.23	Funkcija hazarda	96
Slika 4.24	Funkcija inteziteta otkaza	97
Slika 4.25	Promena vremenski zavisnih slučajnih promenljivih tokom vremena	98
Slika 4.26	Promena indeksa pouzdanosti tokom vremena	99
Slika 4.27	Promena verovatnoće otkaza tokom vremena	99
Slika 4.28	Apdejtovanje modela nesigurnosti	100
Slika 4.29	Apdejtovani stohastički modeli sigurnosti i dejstva $R(t)$ i $E(t)$	101
Slika 4.30	Promena dejstava i nosivosti tokom upotrebnog veka u zavisnosti od klasa posledica	102
Slika 4.31	Ciljni indeks pouzdanosti i pripadajuća verovatnoća otkaza tokom upotrebnog veka za klasu pouzdanosti RC2	104
Slika 4.32	Parcijalni koeficijenti sigurnosti za nosivost u zavisnosti od indeksa pouzdanosti	108
Slika 4.33	Parcijalni koeficijenti sigurnosti za stalna opterećenja u zavisnosti od indeksa pouzdanosti	109
Slika 4.34	Zavisnost parcijalnih koeficijenata sigurnosti za pokretno i stalno opterećenje i indeksa pouzdanosti	114

Slika 4.35	Domen podataka nosivosti osnovnih slučajnih promenljivih $X(t)$, $F(t)$ i $a(t)$	117
Slika 4.36	Domen podataka nosivosti konstrukcije osnovnih slučajnih promenljivih $R(t)$, $a(t)$ i m	118
Slika 4.37	Domen podataka sigurnosti konstrukcije osnovnih slučajnih promenljivih $F(t)$, $R(t)$, $a(t)$ i m	120
Slika 4.38	Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ tokom istog upotrebnog veka	127
Slika 4.39	Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ tokom različitog upotrebnog veka	128
Slika 4.40	Funkcija degradacije nosivosti konstrukcije $R(t)$ sa različitim vrednostima donje granice preostale nosivosti, tokom različitog upotrebnog veka	128
Slika 4.44	Kriva promene nosivosti mosta tokom vremena	130
Slika 4.45	Vrednosti ocena rejtinga stanja	131
Slika 5.1	Izgled usvojenog prizmatičnog modela	140
Slika 5.2	Usvojeni modeli sa različitim stepenom oštećenja	141
Slika 5.3	Šematski prikaz toka eksperimentalnog istraživanja	142
Slika 5.4	Položaj aktuatora i senzora na elementu	143
Slika 5.5	Intervali infrazvuka, zvuka i ultrazvuka	145
Slika 5.6	Propagacija talasa ultrazvuka	146
Slika 5.7	Mrežni numerički model	147
Slika 5.8	Modeliranje pukotine u omreženom numeričkom modelu	147
Slika 5.9	Propagacija talasa na modelu bez oštećenja	149
Slika 5.10	Propagacija talasa na modelu sa jednim oštećenjem u sredini $\Delta h=2$ cm	150
Slika 5.11	Dijagram zavisnosti vrednosti indeksa stanja od položaja senzora za modele sa jednim oštećenjem	151
Slika 5.12	Propagacija talasa na modelu sa dva oštećenja $\Delta h=4-4$ cm	152
Slika 5.13	Dijagram zavisnosti vrednosti indeksa stanja i položaja senzora za dva modela sa dva različita oštećenja 4-4 cm i 6-10cm	153
Slika 5.14	Dijagram zavisnosti vrednosti indeksa stanja i položaja senzora za pet modela sa oštećenjem 4cm i različitim vrednostima dinamičkog modula elastičnosti	154
Slika 5.15	Funkcija stanja elementa $FS(t)$	155
Slika 5.16	Vejbulovalova kriva verovatnoće	158
Slika 5.17	Kritično vreme i kritični faktor stanja	159
Slika 5.18	Generisanje nomograma stanja i referentnih vremenski zavisnih promenljivih	164
Slika 5.19	Nomogram referentnih vremenski zavisnih stanja	165
Slika 5.20	Nomogram stanja usporenog procesa deterioracije	166
Slika 5.21	Nomogram ubrzanog procesa deterioracije	167
Slika 5.22	Nomogram stanja prema bazama podataka vizuelne evaluacije stanja	168
Slika 5.23	Nomogram stanja kontinualnog procesa deterioracije na bazi monitoringa	170
Slika 5.24	Nomogram proporcionalnih oštećenja sa koeficijentima stanja KS	173
Slika 5.25	Nomogram usporenog procesa deterioracije sa koeficijenom stanja KS	173
Slika 5.26	Domen nosivosti slučajnih promenljivih E , R , a , m , θ_m	175

Slika 5.27	<i>Semi-probabilistički koncept proračuna za postojeće konstrukcije prema evrokodovima</i>	178
Slika 5.28	<i>Položaj armature u elementu</i>	179
Slika 5.29	<i>Izgled i dimenzije kalupa za izradu betonskih gredica</i>	179
Slika 5.30	<i>Pločice od pleksiglasa korišćene za simulaciju oštećenja</i>	180
Slika 5.31	<i>Modeli i probna tela izrađeni po serijama betoniranja</i>	181
Slika 5.32	<i>Izrada laboratorijskih modela u betonskom pogonu</i>	182
Slika 5.33	<i>Nega uzoraka u pogonu betonske baze</i>	183
Slika 5.34	<i>Aparatura za merenje: elektronska vaga (levo), komora za sušenje (desno)</i>	183
Slika 5.35	<i>Presna za ispitivanje čvrstoće na pritisak</i>	184
Slika 5.36	<i>Probna tela serije I</i>	185
Slika 5.37	<i>Probna tela serije II</i>	185
Slika 5.38	<i>Probna tela serije III</i>	185
Slika 5.39	<i>Probna tela serije IV</i>	186
Slika 5.40	<i>Postavljeni ekstezometri na cilindričnom uzorku tokom merenja</i>	186
Slika 5.41	<i>Određivanje sekantnog modula elastičnosti</i>	187
Slika 5.42	<i>Zavisnost statičkih i dinamičkih modula elastičnosti betona</i>	191
Slika 5.43	<i>Ultrazvučni aparat za merenje</i>	192
Slika 5.44	<i>Stativ za pričvršćavanje sonde za element tokom merenja</i>	193
Slika 5.45	<i>Betonski modeli serije I</i>	193
Slika 5.46	<i>Šema ispitivanja elemenata serije I</i>	193
Slika 5.47	<i>Merenja vremena na elementima izloženim savijanju</i>	194
Slika 5.48	<i>Betonski modeli serije II</i>	195
Slika 5.49	<i>Šema ispitivanja elemenata sa jednim oštećenjem</i>	196
Slika 5.50	<i>Postupak merenja ultrazvukom na elementima serije II</i>	196
Slika 5.51	<i>Betonski modeli serije III</i>	197
Slika 5.52	<i>Postupak merenja ultrazvukom na elementima serije III</i>	198
Slika 5.53	<i>Betonske gredice - modeli serije IV</i>	199
Slika 5.54	<i>Šema ispitivanja elemenata sa dva oštećenja</i>	199
Slika 5.55	<i>Postupak merenja ultrazvukom na elementima serije IV</i>	200
Slika 5.56	<i>Šema ispitivanja elemenata sa dva oštećenja</i>	201
Slika 5.57	<i>Dodatna merenja ultrazvukom na elementima serije IV</i>	201
Slika 5.58	<i>Dijagram raspodele indeksa stanja $IS_{(v)}$ na osnovu merenja brzine ultrazvučnih talasa u tačkama S1-S5</i>	203
Slika 5.59	<i>Dijagram raspodele indeksa stanja $IS_{(v)}$ na osnovu numeričkog modeliranja i proračuna brzine UZ talasa, u tačkama S1 do S5 po dužini uzoraka</i>	205
Slika 5.60	<i>Nomogram za $FS_{kr}=0,5$ dobijenog na osnovu brzina ultrazvučnih talasa</i>	206
Slika 5.61	<i>Nomogram sa indeksom stanja prema brzini</i>	207
Slika 5.62	<i>Određivanje vrednosti detektovanih oštećenja pomoću nomograma na uzorku I-1</i>	208
Slika 5.63	<i>Određivanje vrednosti detektovanih oštećenja pomoću nomograma na uzorku I-2</i>	209

POPIS TABELA*

Tabela 2.1	<i>Funkcionalni zahtevi trajnosti</i>	14
Tabela 2.2	<i>Procentualno učešće zahteva održivosti u ukupnom kvalitetu</i>	16
Tabela 2.3	<i>Kategorizacija objekata obzirom na upotrebni vek</i>	16
Tabela 2.4	<i>Klasifikacija fizičkih oštećenja kod svežeg betona prema CEB</i>	19
Tabela 2.5	<i>Intezitet korozije u zavisnosti od vlažnosti sredine</i>	19
Tabela 2.6	<i>pH skala</i>	24
Tabela 2.7	<i>Karbonatna tvrdoća vode</i>	25
Tabela 2.8	<i>Klase izloženosti u zavisnosti od uslova sredine prema EN 206</i>	26
Tabela 2.9	<i>Klase XM prema DIN-EN 206</i>	27
Tabela 2.10	<i>Minimalni zaštitni sloj betona preko armature prema evrokodu</i>	27
Tabela 2.11	<i>Preporučena klasa konstrukcije</i>	28
Tabela 3.1	<i>Sadržaj materija kontamiranih u vazduhu</i>	42
Tabela 3.2	<i>Kategorizacija parametara oštećenja</i>	56
Tabela 4.1	<i>Vrednosti indeksa pouzdanosti, verovatnoće sigurnosti i verovatnoće otkaza</i>	69
Tabela 4.2	<i>Definicija klase prema posledicama</i>	76
Tabela 4.3	<i>Ciljni indeksi pouzdanosti za granično stanje nosivosti</i>	76
Tabela 4.5	<i>Relevantni modeli u pouzdanosti konstrukcija</i>	83
Tabela 4.6	<i>Oznake za dejstva i parcijalne keficijente sigurnosti</i>	85
Tabela 4.7	<i>Stohastički modeli osnovnih promenljivih (F_k, X_k, θ_k)</i>	88
Tabela 4.8	<i>Stohastički modeli osnovnih promenljivih ($E, I, \theta_E, \theta_R, a_n$)</i>	89
Tabela 4.9	<i>Geometrijski podaci</i>	89
Tabela 4.10	<i>Korelacija vremenski zavisnih funkcija i pouzdanosti</i>	97
Tabela 4.11	<i>Ciljni indeksi pouzdanosti za granična stanja GSU i GSN i zamor prema Evrokodu</i>	105
Tabela 4.12	<i>Ciljni indeks pouzdanosti prema JCSS:2001</i>	105
Tabela 4.13	<i>Ciljni indeks pouzdanosti za upotrebni vek prema ISO 2394:1998</i>	105
Tabela 4.14	<i>Ciljni indeks pouzdanosti prema NKB</i>	106
Tabela 4.15	<i>Ciljni indeks pouzdanosti prema SIA-269, 2011</i>	106
Tabela 4.16	<i>Indeks pouzdanosti i verovatnoća kolapsa prema klasama posledica NEN 8700</i>	107

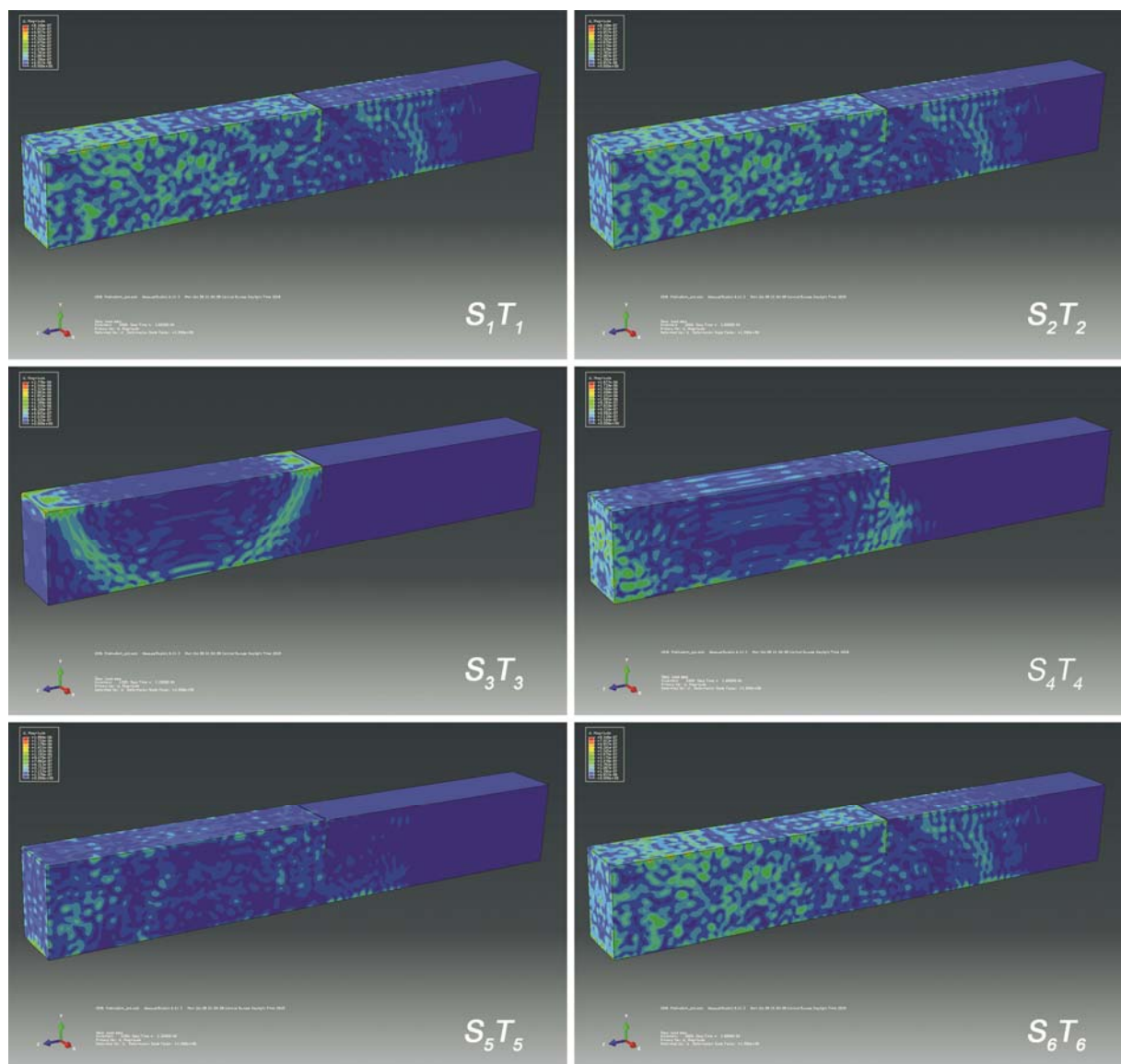
* Sve tabele koje su preuzete od drugih autora jasno su naznačene u tekstu. Ukoliko u tekstu nije drugačije naglašeno, sve tabele su originalne i predstavljaju autorovu interpretaciju prezentovanih podataka

Tabela 4.17	<i>Parcijalni koeficijenti sigurnosti za opterećenja u zavisnosti od klasa posledica</i>	108
Tabela 4.18	<i>Parcijalni koeficijenti sigurnosti prema kalsama posledica u normama NEN i EC</i>	108
Tabela 4.19	<i>Parcijalni koeficijenti sigurnosti za stalna i promenljiva opterećenja prema EC i AASHTO</i>	109
Tabela 4.20	<i>Vrednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti u zavisnosti od ciljnog indeksa pouzdanosti</i>	109
Tabela 4.21	<i>Ciljni indeksi pouzdanosti i verovatnoća loma za proračunski vek konstrukcije</i>	110
Tabela 4.22	<i>Parcijalni koeficijenti sigurnosti za opterećenja konstrukcije</i>	110
Tabela 4.23	<i>Parcijalni koeficijenti sigurnosti za materijale za nove i postojeće objekte prema BS 8110</i>	110
Tabela 4.24	<i>Parcijalni koeficijent sigurnosti za materijale postojećih AB konstrukcija</i>	111
Tabela 4.25	<i>Vrednosti-samnjenja indeksa pouzdanosti</i>	112
Tabela 4.26	<i>Indeks pouzdanosti za postojeće konstrukcije prema CSA-S6-88</i>	113
Tabela 4.27	<i>Ciljni indeks pouzdanosti β za evaluaciju postojećih mostova (za GSN za 1 god.)</i>	113
Tabela 4.29	<i>Model stanja konstrukcije (AASHTO-LRFR)</i>	123
Tabela 4.30	<i>Faktor stanja Φ_c (AASHTO-LRFR)</i>	124
Tabela 4.31	<i>Grupisane ocene stanja konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata AASHTO</i>	131
Tabela 4.32	<i>Colorado Department of Transportation CDOT</i>	132
Tabela 4.33	<i>Procentualno oštećenje poprečnog preseka grede, površine ploče ili dužine nosača.</i>	132
Tabela 4.34	<i>Klase stanja prema SIA-162/5</i>	133
Tabela 4.35	<i>Stanja objekata prema nemačkim uputstvima RI-EBW-PRÜF</i>	134
Tabela 4.36	<i>Stohastički modeli oštećenja</i>	135
Tabela 4.37	<i>Veštačke neuronske mreže (eng.Artificial Neural Network ANN)</i>	136
Tabela 4.38	<i>Gubitak poprečnog preseka elemenata</i>	137
Tabela 4.39	<i>JAPAN : Model stanja oštećene AB konstrukcije</i>	137
Tabela 4.40	<i>Japan: Nivo oštećenja AB ploča</i>	138
Tabela 4.41	<i>Moskva sistema upravljanja mostovima:Klasifikacija stanja mostova</i>	138
Tabela 4.42	<i>Velika Britanija BCI (Bridge condition Index)</i>	138
Tabela 4.43	<i>Gubitak poprečnog preseka armature prema klasama robusnosti</i>	139
Tabela 5.1	<i>Gubitak poprečnog preseka usled oštećenja</i>	143
Tabela 5.2	<i>Geometrijski parametri oštećenih elemenata</i>	148
Tabela 5.3	<i>Dubine oštećenja Δh za vrednosti A i B</i>	149

Tabela 5.4	<i>Indeksi stanja na modelima sa jednim oštećenjem</i>	151
Tabela 5.5	<i>Indeksi stanja na modelima sa dva oštećenja</i>	152
Tabela 5.6	<i>Indeksi stanja na modelima sa različitim dinamičkim modulima elastičnosti</i>	153
Tabela 5.7	<i>Indeksi stanja na modelima sa različitim poasonovim koeficijentima</i>	154
Tabela 5.8	<i>Vrednosti funkcije stanja $FS(t/T)$ za različite vrednosti t/T</i>	157
Tabela 5.9	<i>Predlog evaluacije i vremena tranzicije stanja oštećenog AB nosača</i>	160
Tabela 5.10	<i>Predlog evaluacije i faktora tranzicionog stanja oštećenog AB nosača</i>	162
Tabela 5.11	<i>Predlog vrednosti indeksa stanja IS</i>	163
Tabela 5.12	<i>Predlog –vrednosti koeficijenta stanja KS</i>	172
Tabela 5.13	<i>Receptura betona korišćena za izradu uzoraka</i>	182
Tabela 5.14	<i>Sadržaj vlage u ispitanim uzorcima</i>	184
Tabela 5.15	<i>Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije I</i>	185
Tabela 5.16	<i>Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije II</i>	185
Tabela 5.17	<i>Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije III</i>	186
Tabela 5.18	<i>Rezultati merenja zapreminske mase i čvrstoće na pritisak uzoraka serije IV</i>	186
Tabela 5.19	<i>Rezultati merenja modula elastičnosti</i>	188
Tabela 5.20	<i>Vrednosti korekcionog faktora T za $L/h > 7,0$</i>	189
Tabela 5.21	<i>Vrednosti korekcionog faktora T za $L/h < 7,0$</i>	189
Tabela 5.22	<i>Vrednosti dinamičkog poasonovog koeficijenta</i>	190
Tabela 5.23	<i>Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije I</i>	195
Tabela 5.24	<i>Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije II</i>	197
Tabela 5.25	<i>Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije III</i>	198
Tabela 5.26	<i>Merena vremena i sračunate brzine za elemente serije IV</i>	200
Tabela 5.27	<i>Brzine sračunate na mernim mestima na elementima serije SII i serije SIII</i>	202
Tabela 5.28	<i>Indeksi stanja u označenim tačkama na elementima serije SII i serije SIII</i>	202
Tabela 5.29	<i>Indeksi oštećenja u označenim tačkama na elementima serije SII i serije SIII</i>	203
Tabela 5.30	<i>Sračunate brzine V u modelima za $E_d=45$ GPa (ABAQUS)</i>	203
Tabela 5.31	<i>Indeksi stanja IS_v modela za $E_d=45$ GPa (ABAQUS)</i>	204
Tabela 5.32	<i>Indeksi oštećenja $IO_{(v)}$ modela za $E_d=45$ GPa (ABAQUS)</i>	204
Tabela 5.33	<i>Sračunate brzine modela za $E_d=40$ GPa (ABAQUS)</i>	204
Tabela 5.34	<i>Indeksi oštećenja modela za $E_d=40$ GPa (ABAQUS)</i>	205
Tabela 5.35	<i>Indeksi stanja modela za $E_d=40$ GPa (ABAQUS)</i>	205
Tabela 5.36	<i>Uporedne vrednosti eksperimentalnih merenja i numeričkih proračuna</i>	206
Tabela 5.37	<i>Brzina ultra zvuka i indeksa stanja pri savijanju AB gredica serije I</i>	208

PRILOG 2

PROPAGACIJA TALASA NA MODELU SA JEDNIM OŠTEĆENJEM U SREDINI OD $\Delta h=6$ cm U RALIČITIM VREMENSKIM INTERVALIMA

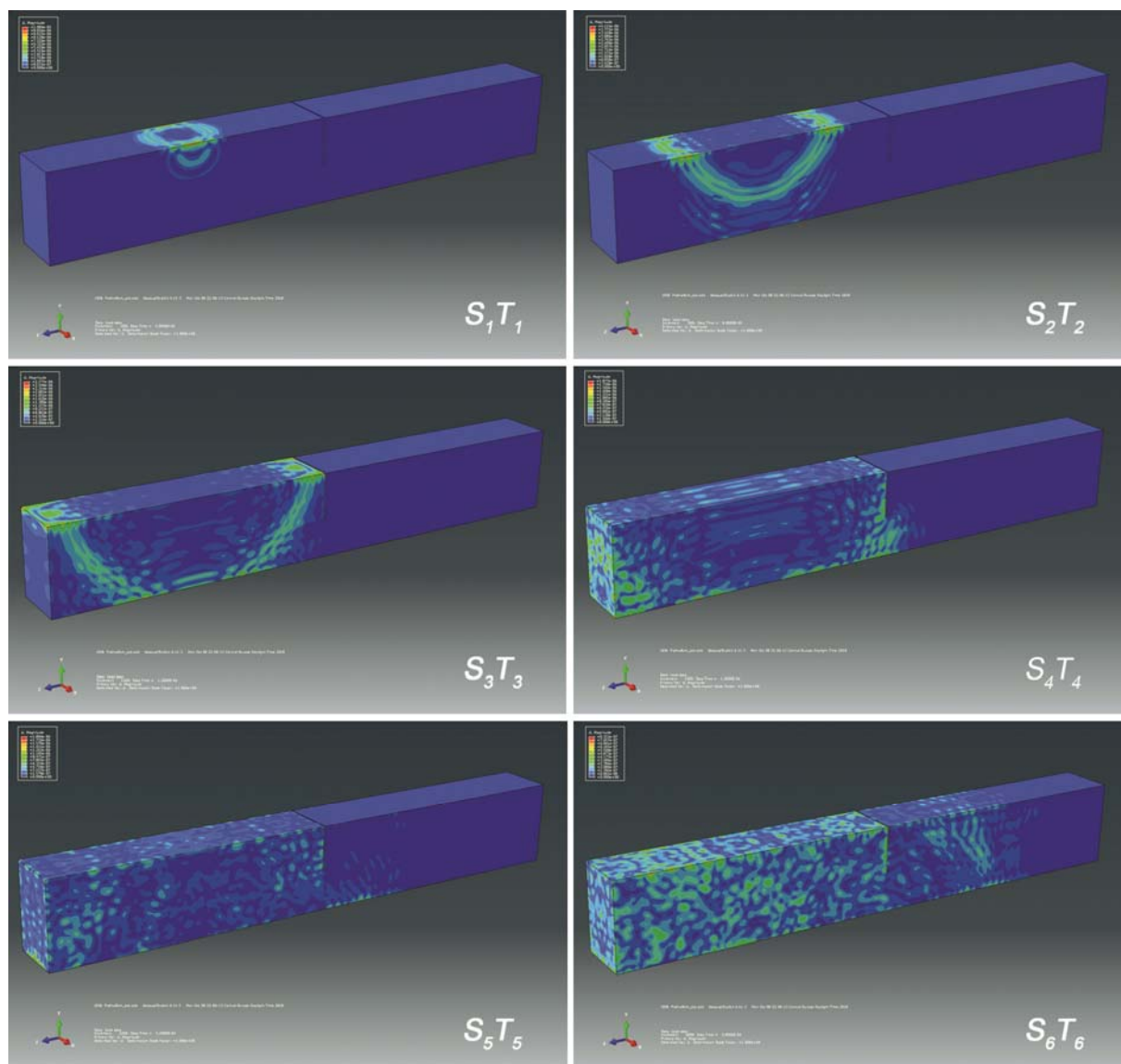


Na slici je prikazana propagacija talasa za sve položaje senzora S_1 - S_6 u različitim vremenskim intervalima T_1 - T_6 kod modela bez oštećenja za numerički model. sa jednim oštećenjem dubine $\Delta h=6$ cm.

Propagacija talasa odvija tako što se deo talasa odbija od oštećenja i vraća nazad smanjujući brzinu kretanja talasa odnosno energiju izlaznog signala, a drugi deo talasa prolazi pored oštećenja i nastavlja da se slobodno kreće do senzora.

PRILOG 3

PROPAGACIJA TALASA NA MODELU SA JEDNIM OŠTEĆENJEM U SREDINI OD $\Delta h=8$ cm U RALIČITIM VREMENSKIM INTERVALIMA

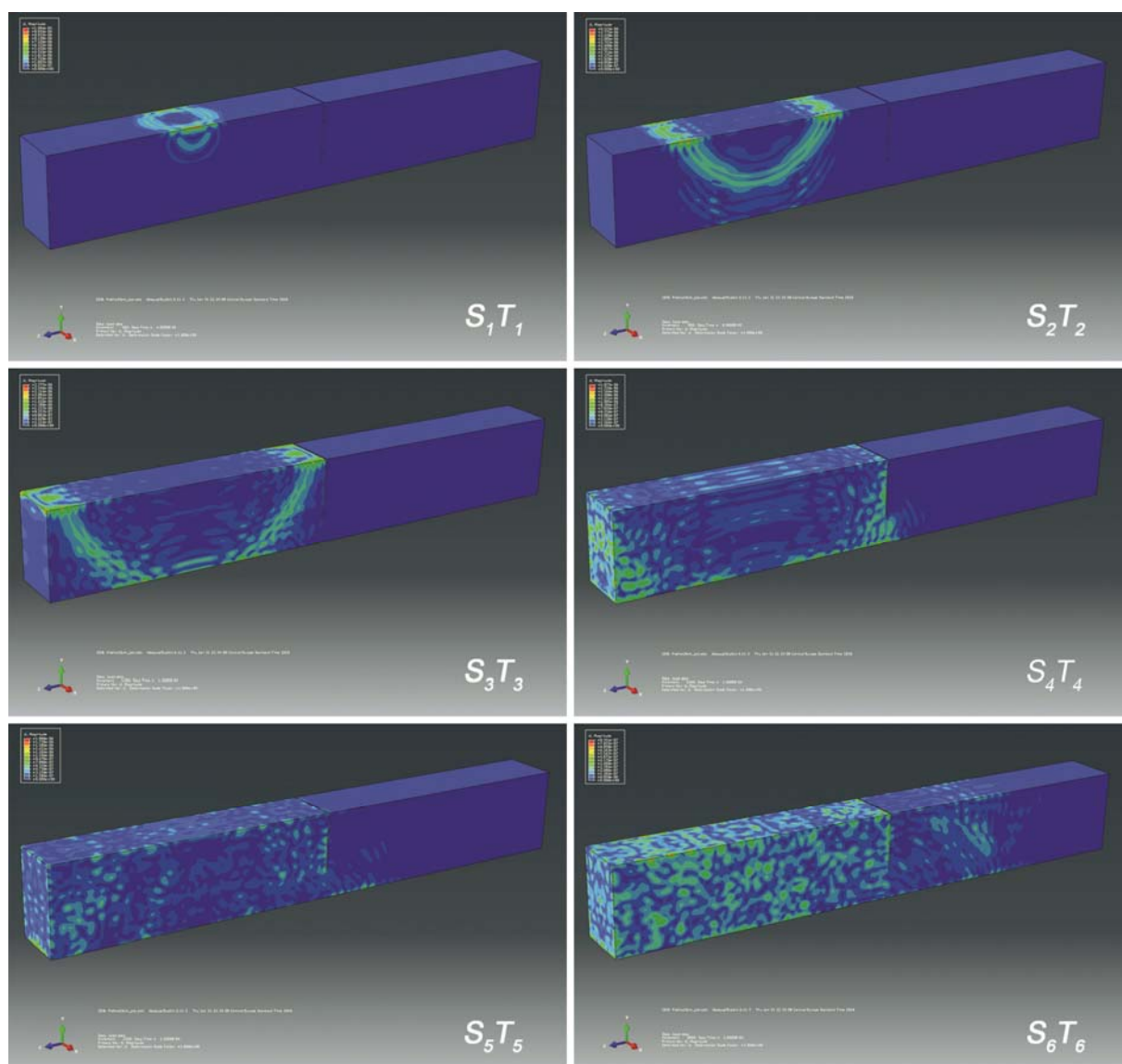


Na slici je prikazana propagacija talasa za sve položaje senzora S_1 - S_6 u različitim vremenskim intervalima T_1 - T_6 kod modela bez oštećenja za numerički model, sa jednim oštećenjem dubine $\Delta h=8$ cm.

Propagacija talasa odvija tako što se deo talasa odbija od oštećenja i vraća nazad smanjujući brzinu kretanja talasa odnosno energiju izlaznog signala, a drugi deo talasa prolazi pored oštećenja i nastavlja da se slobodno kreće do senzora.

PRILOG 4

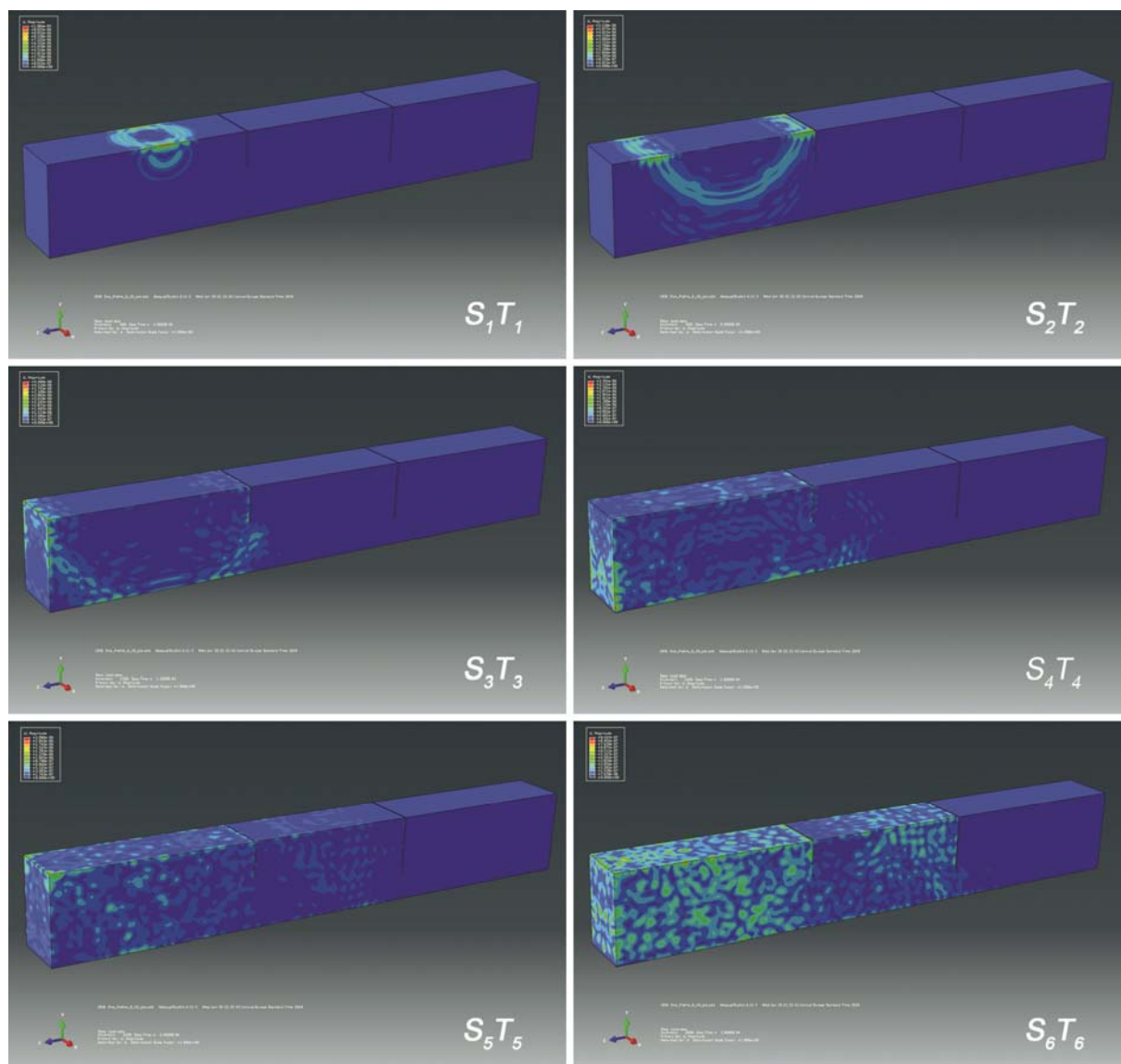
PROPAGACIJA TALASA NA MODELU SA JEDNIM OŠTEĆENJEM U SREDINI OD $\Delta h=10$ cm U RALIČITIM VREMENSKIM INTERVALIMA



Na slici je prikazana propagacija talasa za sve položaje senzora S_1 - S_6 u različitim vremenskim intervalima T_1 - T_6 kod modela bez oštećenja za numerički model, sa jednim oštećenjem dubine $\Delta h=10$ cm.

Propagacija talasa odvija tako što se deo talasa odbija od oštećenja i vraća nazad smanjujući brzinu kretanja talasa odnosno energiju izlaznog signala, a drugi deo talasa prolazi pored oštećenja i nastavlja da se slobodno kreće do senzora.

PRILOG 5

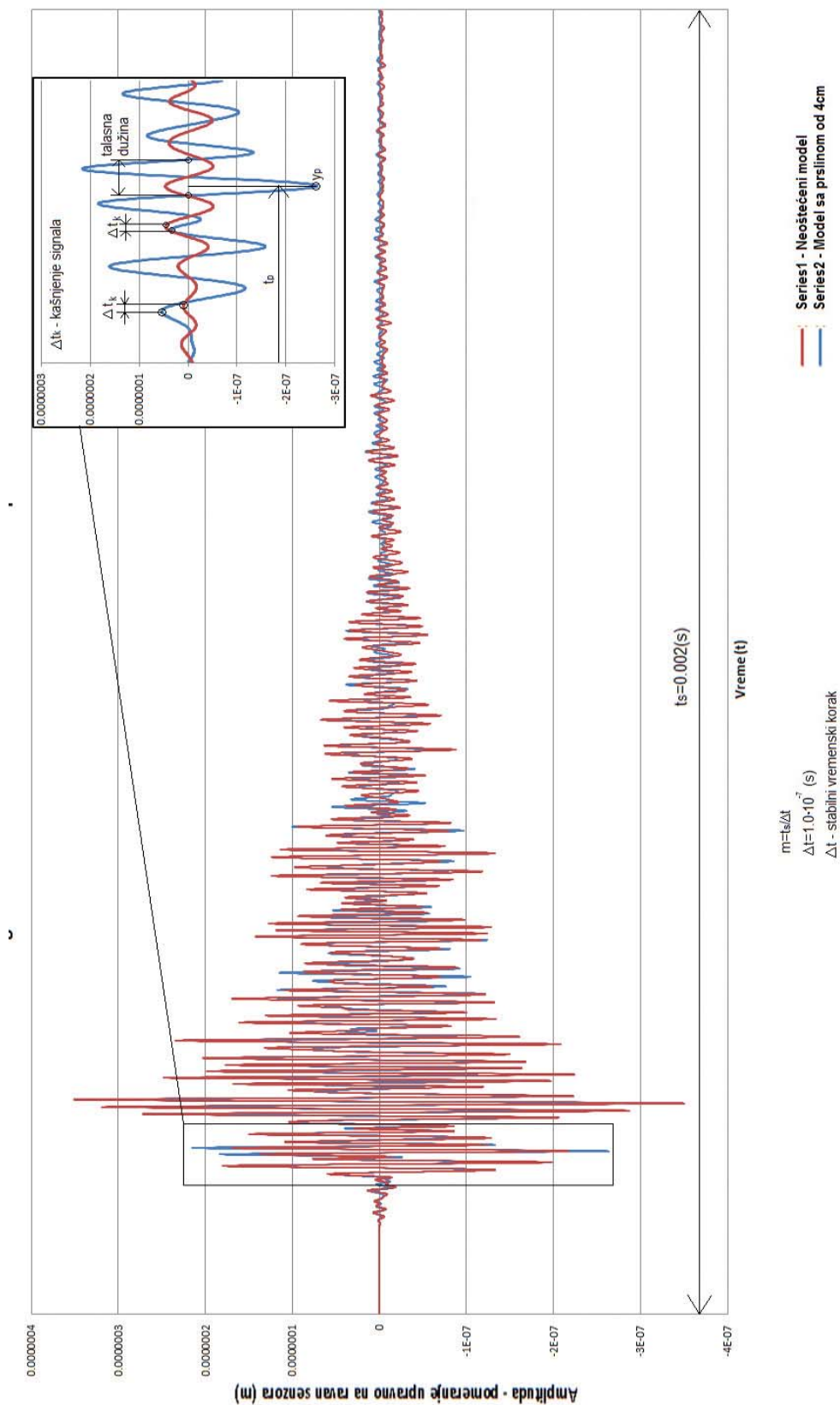
PROPAGACIJA TALASA NA MODELU SA DVA OŠTEĆENJA $\Delta h_1=6$ I $\Delta h_2=10$ cm U RALIČITIM VREMENSKIM INTERVALIMA

Na slici je prikazana propagacija talasa za sve položaje senzora S_1 - S_6 u različitim vremenskim intervalima T_1 - T_6 kod modela bez oštećenja za numerički model sa dva oštećenja dubine $\Delta h_1 = 6\text{cm}$ i $\Delta h_2 = 10\text{cm}$.

Propagacija talasa odvija tako što se deo talasa odbija od oštećenja i vraća nazad smanjujući brzinu kretanja talasa odnosno energiju izlaznog signala, a drugi deo talasa prolazi pored oštećenja i nastavlja da se slobodno kreće do senzora.

PRILOG 6

IZLAZNI SIGNALI SENZORA S5 ZA NEOŠTEĆENI MODEL I MODEL SA JEDNIM OŠTEĆENJEM $\Delta h=4$ cm



PRILOG 7

ODREĐIVANJE STATIČKOG I DINAMIČKI MODULA ELASTIČNOSTI NA OSNOVU MERENIH PODATAKA

uzorci	Zapreminska masa ¹	Čvrstoća na pritisak ¹	Statički modul elastičnosti ²	Dinamički modul elastičnosti ³	Brzina ⁴
	ρ (kg/m ³)	f_c (Mpa)	E_c (Gpa)	E_d (Gpa)	v (m/s)
I-1	2.417,60	63,35	37,82	43,68	4497
I-2	2.417,60	66,64	38,46	44,32	4530
I-3	2.417,60	63,05	37,76	43,62	4494
II-1	2394,73	66,57	38,18	44,04	4515
II-2	2394,73	63,66	37,88	43,74	4500
II-3	2394,73	61,87	37,26	43,12	4468
III-1	2447,03	77,34	40,14	46,00	4615
III-2	2447,03	73,19	39,41	45,27	4578
III-3	2447,03	72,11	39,21	45,07	4568
IV-1	2438,15	65,40	37,96	43,82	4504
IV-2	2438,15	64,20	37,73	43,59	4492
IV-3	2438,15	67,22	38,31	45,17	4573

¹merene vrednosti

$$^2 E_C = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

$$^3 E_d = E_c + 5,864$$

$$^4 v = (E_d / 2160)^{0,5}$$

SREDNJE VREDNOSTI

SERIJE UZORAKA	ρ	f_c	E_c	E_d	v
	(kg/m ³)	(N/mm ²)- MPa	(GPa)	(GPa)	(m/s)
serija I	2.417,6	64,35	38,02	43,884	4507
serija II	2394,73	64,03	37,95	43,814	4504
serija III	2394,73	74,21	39,86	45,72	4601
serija IV	2438,15	65,61	38,61	44,47	4537

Za izradu numeričkih modela je usvojen dinamički modul elastičnosti $E_d=45$ GPa

BIOGRAFIJA AUTORA

Nikola Stojić rođen je 18.09.1978. godine u Nišu. Završio je Osnovnu školu "Učitelj Tasa" u Nišu sa odličnim uspehom. Još u osnovnoj školi pokazao je veliko interesovanje za tehničke nauke. Učešćem na republičkim smotrama naučno-tehnološkog stvaralaštva mladih Srbije tokom 1992. i 1993. godine postao je nosilac prvog mesta i zlatne medalje iz oblasti energetike, za šta je na kraju osnovne škole nagrađen diplomom za izuzetan uspeh iz fizike. Nakon osnovne škole maturirao je u gimnaziji „Stevan Sremac“ u Nišu na prirodno matematičkom smeru. Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu upisao je školske 1997/98. godine kao redovni student na saobraćajno konstruktorskom smeru. Diplomirao je 2005. godine sa prosečnom ocenom tokom studija (7,58) i ocenom (10) na diplomskom radu iz predmeta Drvene konstrukcije i Betonski mostovi na temu „*Projekat pešačkog mosta od lepljeno-lameliranog drveta preko reke Nišave u Nišu*“ čime je stekao zvanje diplomiranog inženjera građevinarstva.

Još za vreme studija u periodu 2002-2005. je aktivno angažovan kao saradnik na izradi projekata visokogradnje. U periodu 2005/2006. tokom civilnog služenja vojnog roka na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu tokom dva semestra je angažovan kao demonstrator pri nastavi na predmetu Građevinski materijali. Godine 2006. se zapošljava u preduzeću „Institut za puteve“ Beograd kao nadzorni organ za mostove. Tokom najvećeg dela svoje karijere učestvovao je na poslovima pregleda mostova, identifikacije oštećenja i proceni stanja i prikupljanja podataka za bazu podataka o mostovima, izradi projektnih zadataka, kao i brojnim projektima izgradnje i sanacije mostova u sklopu državnih puteva. Kao član ekspertskeg tima učestvovao je u nezavisnoj reviziji izvedenih radova na mostovima na putevima u Makedoniji koje je finansirala Svetska banka. Učešćem u izradi brojnih projekata stekao je iskustva u više oblasti građevinarstva.

Paralelno sa profesionalnom karijerom, školske 2007/08. godine upisuje doktorske studije na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu na kojima je položio je sve ispite predviđene planom i programom na doktorskim studijama sa prosečnom ocenom 9,82 (devet/osamdesetdva). Tokom 2011. učesnik je programa tehnološkog razvoja, projekta pod nazivom „*Eksperimentalna i teorijska istraživanja linijskih i površinskih sistema sa polukrutim vezama sa aspekta teorije II reda i stabilnosti*“, projekta br. TR36016 finansiranog od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

Nikola Stojić aktivno radi u preduzeću „Institut za puteve“ Beograd na poziciji glavnog inženjera i bavi se problematikom mostova.

Član je Inženjerske komore i nosilac je relevantnih projektantskih i izvođačkih licenci iz oblasti visokogradnje, niskogradnje i hidrogradnje.

Govori, čita i piše engleski jezik.

Oženjen je i otac je dvoje dece.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

Детекција оштећења бетона на бази пропагације ултразвучних таласа за потребе оцене стања бетонских елемената мостова

која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 15.07.2020.

Потпис аутора дисертације:

Никола Д. Стојић

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов дисертације:

***Детекција оштећења бетона на бази пропагације ултразвучних таласа за
потребе оцене стања бетонских елемената мостова***

која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 15.07.2020.

Потпис аутора дисертације:

Никола Д. Стојић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

Детекција оштећења бетона на бази пропагације ултразвучних таласа за потребе оцене стања бетонских елемената мостова

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у

Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио:

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 15.07.2020.

Потпис аутора дисертације:

Никола Д. Стојић